

大深度・低空頭対応型 CSM 機の開発

株式会社間組機電部 ○嶋田尚正 梅本慶三
株式会社間組技術第1部 増田浩二

1. はじめに

現在、地中連続壁は、SMW 工法や TRD 工法など施工性及び経済性に優れた原位置攪拌ソイルセメント地中連続壁が主流となっている。今回開発された、カッターソイルミキシング (CSM) 工法は、水平多軸型地中連続壁掘削機をベースとした水平多軸回転カッター (Cutter) を用いて土 (Soil) とセメント系懸濁液を原位置で攪拌 (Mixing) し、等壁厚のソイルセメント壁体 (土留め壁・遮水壁等) を造成する工法である。その特徴として、以下のような点がある。

- ① 岩盤・硬質地盤においても、水平多軸回転カッターの性能をそのまま生かした高い掘削性能により、先行削孔等の補助工法が不要
- ② 優れた攪拌性能とカッティングジョイントによる高い遮水性
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁の造成により、芯材の間隔を密に設定できるため、高剛性の壁体を造成可能
- ④ カッター部に内蔵した傾斜計により、リアルタイムでの掘削精度確認が可能

近年、都市部における大規模地下開発など 40m 以深の大深度土留め壁築造へのニーズが高まっている。しかしながら、従来の CSM 機にて大深度施工を行う場合、カッターを支持しているケリーバーを長くする必要がある。そのため施工機械の大型化が避けがたく、掘削深度に限界 (35m 程度) があつた。そこで今回、低空頭型掘削機に、新しく開発された原位置攪拌用水平多軸回転カッターを吊り下げ方式にて装備し、大深度地下における原位置攪拌ソイルセメント地中連続壁が施工可能な掘削機を開発した。本報文では、今回開発した大深度、低空頭対応型 CSM 機の概要と、試験施工の概要を報告する。またドイツパワー社において施工された内径 8,000m

m の円形立坑構築の概要についても報告する。図-1 に、ケリーバー型と吊り下げ型 CSM 機の掘削方法の比較を示す。

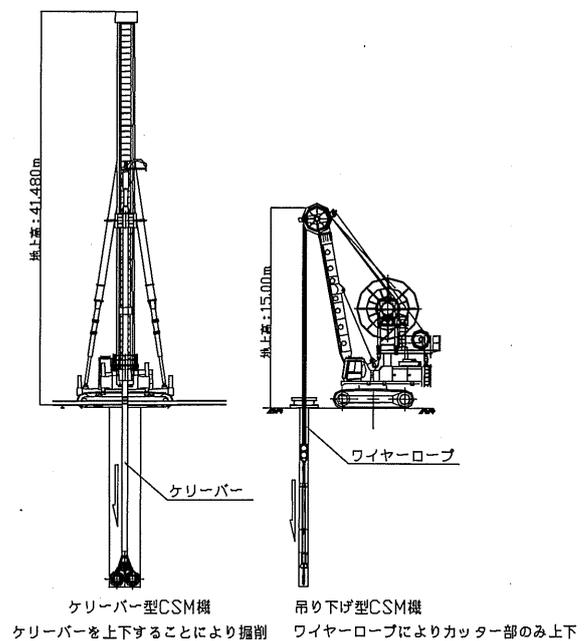


図-1：掘削方法比較

2. 吊り下げ型 CSM 機の概要

今回、開発した機械は従来のトレンチカッター、CBC25 のカッター部を BC25 から吊り下げ型 CSM カッター、BCM10 に変更することを基本としている。従来の主な CSM 工法の特徴に加えて、以下のような特色がある。

- ① 吊り下げ方式の採用により大深度対応が可能
- ② 低空頭条件下、狭いヤードでの施工が可能
- ③ ガイドフラップの稼動により方向制御、修正掘削が可能

表-1に掘削機の諸元を記す。

表-1：吊り下げ型CSM機諸元 (BCM10)

ベースマシン(BA1000)		
機械質量 (t)	110.0	
エンジン出力 kw [PS]/rpm	331 [450]/1800	(超低騒音型)
全幅 (mm)	5,446	
高さ (mm)	14,828	
吊り下げ式CSM機カッター部分(BCM10)		
重量 (t)	16.5	
全長 (mm)	9,057	
カッター直径 (mm)	1,395	
カッター部壁幅 (mm)	2,800	
カッターモータ トルク (KN・m)	100	左右独立して2台装 備し任意に駆動可 能
方向制御フラッ プ部傾斜角(°)	1.325	偏心量 107mm
回転数(rpm)	0~35	
ソイルセメント 壁造成幅(mm)	2,800	
ソイルセメント 壁造成可能厚 (m)	0.64~1.2	

2.1 ベースマシン

ベースマシンは、トレンチカッターベースマシン BA1000を利用している。BA1000は、小松製作所製バックホウPC750 (3.1³級)の改造型であり、最大吊荷重は40tである。平均接地圧は、0.026kPaである。掘削深度35m対応ケリーパー型掘削機の高さが41.48mに対し、吊り下げ型は高さ15m以下に収まっている。また造成可能深度は65mまで対応可能である。写真-1に吊り下げ型CSM機を示す。



写真-1：吊り下げ型CSM機

2.2 カッター部

CSM機のカッター部は、トレンチカッター工法で実績のある水平多軸回転式カッター方式及び同形状のビットを採用した。左右のカッターは回転数、回転方向を任意に制御可能である。ただし、トレンチカッターでは掘削時、土砂を集める必要があり、土砂を中央部から取り込む回転方向にカッターが回転するのに対し、図-3のようにCSM機では中央部よりエアとセメントミルクを吐出するため回転をトレンチカッターの場合とは逆回転させて掘削を行う。掘削後カッター部を引き上げる時は、吊荷重の低減や固化液の攪拌を目的として、掘削時とは逆回転させながら引き上げる。また、掘削土砂がエアリフト効果により攪拌されやすいよう、カッター上部が下部より幅の狭いテーパ形状となっている。そのため、掘削時、カッター上部の横ゆれが懸念されるが、上部にガイドローラをつけることによりゆれを抑えている。方向制御の方法は、トレンチカッターと同様、カッター部に傾斜計を内蔵しており、運転室のモニターにてリアルタイムでチェックできる。そのデータを見ながらカッター回転軸と平行方向(Y方向)についてはカッター側面の方向制御フラップを動かすことにより行い、カッター回転軸と垂直方向(X方向)については、左右のカッター回転数を任意に変えることにより方向制御を行う。

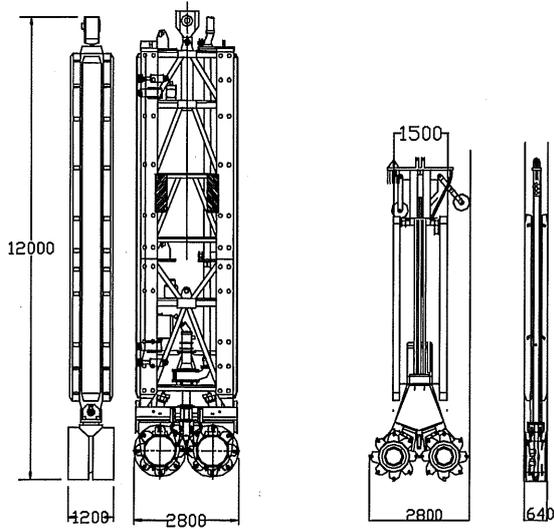


図-2：トレンチカッターとCSM機

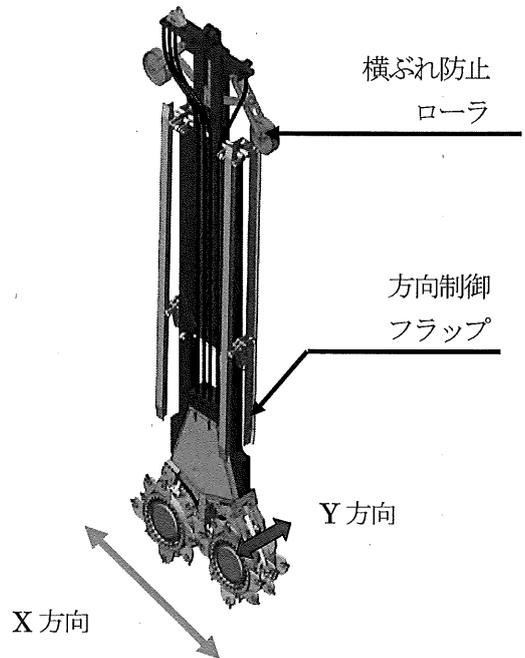


図-4：方向制御機構

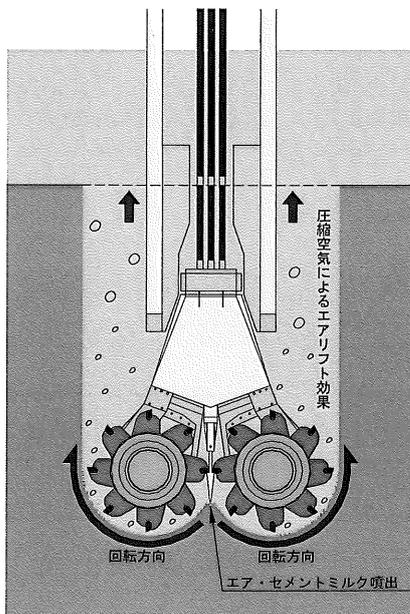


図-3：CSM機掘削モデル

3. 試験施工の概要

吊り下げ型 CSM 機の施工能力、造成されたソイルセメント壁の品質の確認等を目的として試験施工をおこなった。以下に、試験施工の概要および結果を報告する。

3.1 概要

当工事の概要を以下に示す。

施工時期：平成17年4月～平成17年6月

工事内容：掘削壁厚 640mm

掘削深度 40m

施工延長 8.0m (2.8m×2エレメント
2.4×1エレメント)

(図-5 エレメント配置図参照)

施工面積 320m²

土質条件 柱状図参照 (図-6)

要求品質：透水係数 1×10^{-6} cm/sec 以下

一軸圧縮強度 0.6N/mm² 以上

なお、試験施工は硬質地盤を含む40mの大深度施工であり、セメント主体の固化液での掘削はスラリー固化によるカッターの固着および引抜抵抗の増加が懸念されるため、掘削時にはベントナイト主体の掘削液

で掘削し、引き上げ時攪拌時には、セメント主体の固化液にて施工する2パス施工を採用した。表-2に掘削機以外の設備一覧を、表-3に注入液の配合を、写真-2に施工状況を示す。

先行 2.8	後行 2.4	先行 2.8
①	③	②
2.6	2.8	2.6
8.0		

図-5：エレメント配置図

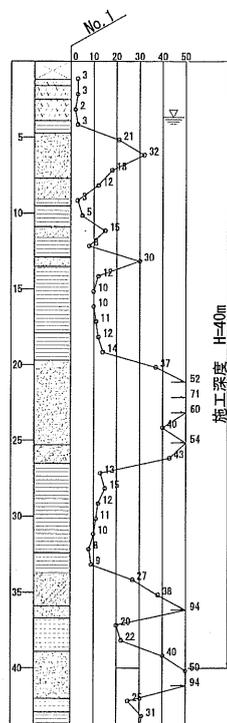


図-6：試験場所土質柱状図

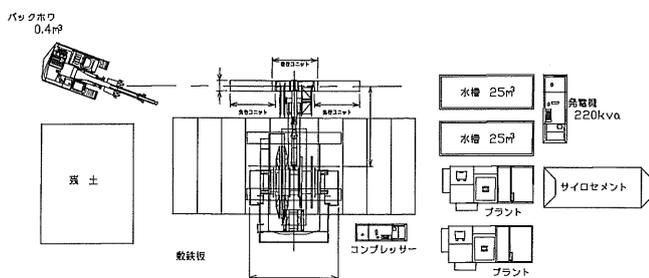


図-7：機械配置図

表-2：設備一覧

機材名	能力	備考
コンプレッサー	7.5m ³ /min	
セメントサイロ	30 t × 1	
水槽	25m ³ × 2台	
ラフタークレーン	25 t、50 t	芯材吊用
セメントミキシングプラント	2基	24m ³ /h仕様
バックホウ	0.45m ³ 級	排泥搬出用



写真-2：施工状況

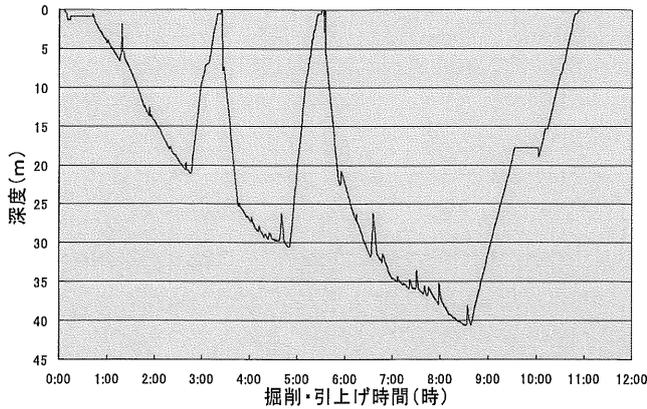
表-3：注入液の配合

配合 (掘削体積 1m ³ あたり)	セメント kg	ベントナイト kg	水 kg	備考
掘削液	5	32	530	B/W=6.0%
固化液	197	5	292.5	W/C=148%

3. 2 試験施工結果

(1) 掘削性能

掘削経過時間と到達深度の関係を図-8に示す。



図一 8 : 掘削経過時間と到達深度

掘削速度は以下のような結果となった。

- 全平均掘削速度 : 12cm/min
- 砂質土 (N値=20程度) : 19cm/min
- 砂質土 (N値=50程度) : 14cm/min
- 粘性土 (N値=10程度) : 9cm/min

1) N値による掘削速度

バウアー工法研究会発行のCSM工法標準積算資料(案)から算出したケリーバー型による掘削速度と、試験施工の掘削速度を表一4に示す。標準積算資料(案)では、掘削から引抜までを固化液のみで施工する1パス施工を想定しているの、試験施工の掘削速度を1/2した数値と比較した。

表一 4 : 掘削速度比較 (cm/min)

	N値=20	N値=50	備考
ケリーバー式	9.7	6.5	標準積算資料による
	N値増加による速度減少率		
吊り下げ式	9.5	7	2パス施工のため試験施工値の1/2とした
	N値増加による速度減少率		

吊り下げ型とケリーバー型とは掘削性能に大差がないことがわかる。またN値の増加に対する掘削速度の低下も、ケリーバー型が32%に対し、吊り下げ型は26%と

ほぼ同割合の減少になり、ケリーバー式同様吊り下げ式CSM機の高い掘削性能が実証された。

2) 大深度下における掘削

大深度下で掘削性能評価を、大深度下での掘削性能が高いTRD工法の標準積算資料 (TRD工法協会発行) を用いて以下のことを考慮し行った。

- ・TRD工法は、CSM工法とは違いカッターを横方向に移動させて掘削する方法であり掘削方法が大きく違うため、掘削速度自体の比較では問題が多い。よって今回は掘削速度ではなく掘削速度の減少率にて評価を行った。
- ・TRD工法については深度40m、壁厚640mm、エレメント幅2800mmのソイル壁を造成する際に、下記の深度で各想定地盤が存在した場合の掘削速度を算出した。

表一 5 : 掘削速度比較 (cm/min)

	N値=20 深度10m	N値=61 深度40m	備考
TRD工法	27	7	
	速度減少率		
吊り下げ式CSM機	19	7	試験施工値
	速度減少率		

このように深度、N値の増大による掘削速度減少率は、TRD工法程度に抑えられており、大深度下での高い掘削性能が証明された。

(2) 掘削精度

カッター部に内蔵された傾斜計の変位計測結果は、40m掘削においてy方向では最大69mm、x方向では、最大18mmであり、原位置攪拌ソイルセメント壁の一般的掘削精度1/150から1/200に対して、それぞれ1/580、1/2200と高い掘削精度が確認できた。また今回は傾斜計による掘削管理の妥当性自体を確認するため、長さ12mの鋼材をセメントソイル内に沈め、その変位を計測したが、XY方向とも傾斜計による掘削変位計測結果とは10mm以内の誤差 (1/2000) であり、傾斜計による

掘削管理の有効性も確認できた。

(3) 透水係数と一軸圧縮強度

No.3 エレメントにおいて、コアボーリングを行い造成されたソイルセメント壁の要求品質の確認をおこなった。透水係数については深度10mにおいて室内透水試験を実施し、 $2.41 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ の結果が得られ、要求品質である $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 以下を満足することができた。また、一軸圧縮強度についても、深度方向で多少のばらつきが見られたが、要求品質(0.6N/mm^2)を満足する結果が得られた。

4. 曲線への適用例

CSM工法の場合、曲線施工といっても、地中連続壁の場合と同様、厳密には多角形となる。なお今回紹介する工事は、吊り下げ型ではなく、ケリーバー型のCSM機により施工を行っている。

4.1 概要

施工場所：ドイツ

施工時期：平成16年12月～平成17年1月

工事内容：掘削壁厚：500mm

掘削深度：20m

施工延長：26.18m

(2.2m×14エレメント

φ8000円形立坑)

施工面積：569.8m²

土質条件：おもに細砂、N値=10～30

要求品質：一軸圧縮強度0.5N/mm²以上

(実績：0.7N/mm²)

平面図

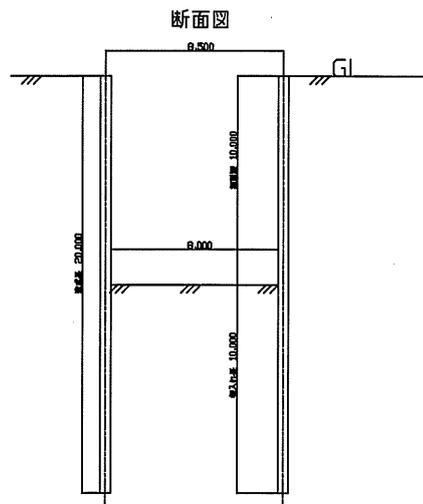
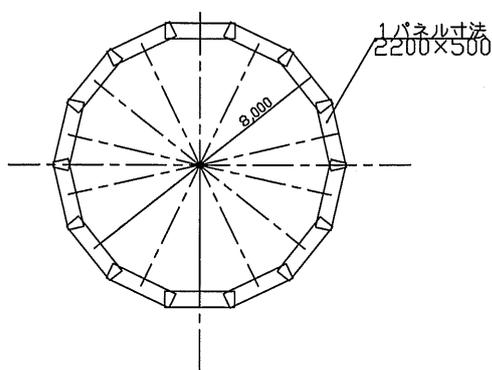


図-9：円形立坑施工図



写真-3：円形立坑施工状況

図-9に円形立坑施工図を、写真-3において施工状況を示す。

5. おわりに

今回の試験施工を通じて、吊り下げ型CSM機の大深度掘削への有効性が証明された。近年、限られた都市部空間における高度利用を促進するための大深度土留め壁や、廃棄物処理場での遮水壁など、大深度、低空頭対応の吊り下げ型CSM機が活躍する場面は年々増えていくと考えられる。しかしながらまだこの工法の施工実績は少ない。今回の報告が、本工法の普及に役立てば幸いである。

最後に、本論文の執筆にご協力いただきました関係各位に感謝申し上げます。

大深度・低空頭型CSM工法の開発と試験施工

佐久間 誠也* 梅本 慶三** バウアー工法研究会***

1. はじめに

現在、地中連続壁はSMW工法やTRD工法など、施工性や経済性に優れた原位置土攪拌混合ソイルセメント地中連続壁が主流となっている。近年、これらの工法に加えケリーバー方式のCSM機がバウアーマシーネン社（独）とソレタンシュ社（仏）によって共同開発（2003年）され、欧州における試験施工を踏まえて日本に機械とともに2004年にCSM工法が導入された（BCM5-CSM機：写真-1参照）。CSM工法とは、水平多軸型地中連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター（Cutter）を用いて土（Soil）とセメント系懸濁液を原位置で攪拌（Mixing）し、等壁厚のソイルセメント壁体（土留め壁・遮水壁等）を造成する工法である（図-1参照）。その特徴には以下のような点がある。

- ① 岩盤・硬質地盤においても、水平多軸回転カッターの性能をそのまま生かした高い掘削性能により、先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ② エアブローを併用した高速回転カッターによる攪拌のため高い攪拌性能を持つ。
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定できるため設計の自由度が高い。
- ④ 壁体がパネル状に造成されるため小さな円形立坑の施工が可能である。
- ⑤ 壁体のジョイントは止水性の高いカッティングジョイントとなる。
- ⑥ カッター部に内蔵した傾斜計により、リアルタイムでの掘削精度確認が可能である。

本稿では、これらのCSM工法の特徴を生かした大深度・低空頭型CSM機の開発および工法確立のために実施した試験施工について報告する。



写真-1 BCM5-CSM機

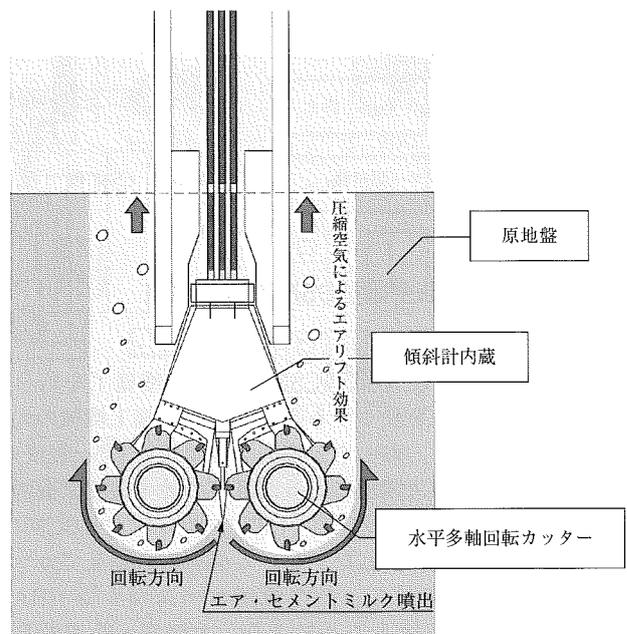


図-1 施工方法の説明

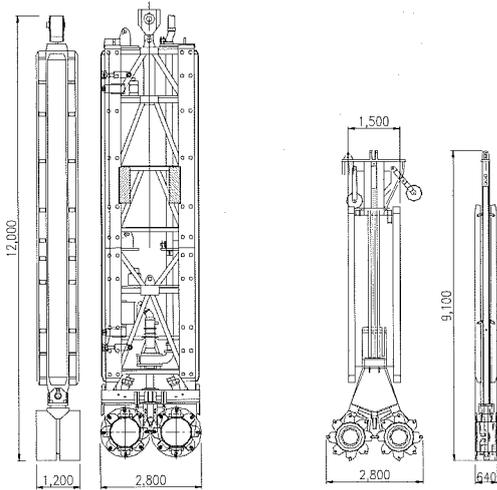
* SAKUMA Seiya ハザマ 土木事業本部 技術第一部 部長 | 東京都港区虎ノ門2-2-5

** UMEMOTO Keizō 同上 機電部 部長 | 同上

*** 事務局 東京都世田谷区経堂2-3-8 但馬屋ビル3階 TEL: 03-5426-3151 FAX: 03-5426-3152



写真-2 BCM10-CSM機



BC30 トレンチカッター掘削機

BCM10 CSM機

図-2 トレンチカッターとCSM機

2. 大深度・低空頭型CSM工法の開発

2.1 開発経緯

従来のケリーバー方式のCSM機で大深度施工を行うには、ケリーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けがたく、おのずと掘削深度に限界(35m程度)があった。そこで、国内にあった既存の地中連続壁掘削機の水平多軸回転カッター部(トレンチカッターBC30)と新たにドイツで製作したフレーム部を組合わせてカッターフレームを組立て、低空頭用ベースマシン(BA1000)から吊り下げることにより、大深度・低空頭型CSM機(BCM10-CSM機)を造り上げた(写真-2参照)。

2.2 BCM10-CSM機の概要

新開発のBCM10-CSM機は、従来のCSM機の特徴に加えて次の特徴がある。

表-1 BCM10-CSM機諸元

掘削深度(m)	~65
掘削壁厚(mm)	640~1,200
掘削幅(mm)	2,800
カッターフレーム重量(t)	16.5
カッターフレーム全長(mm)	9,057
カッタートルク(kN・m)	0~80
カッター回転数(rpm)	0~35
方向制御フラップ部傾斜角(°)	1.325
ベースマシン重量(t)	110
機械寸法(m) 高さ×幅×奥行き	14.9×5.5×9.1

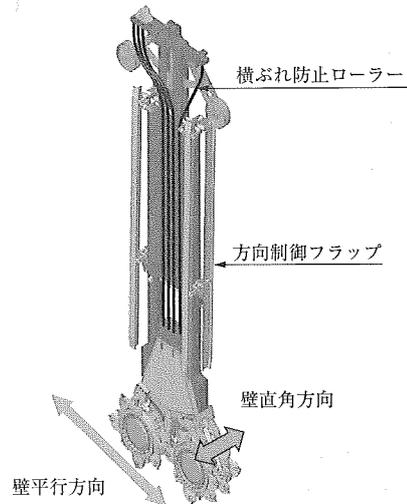


図-3 方向制御機構

- ① ホースドラムを利用した吊り下げ方式の採用により大深度施工対応が可能である。
- ② 低空頭条件下(15m以下)および三点式ベースマシンに取付けたケリーバー方式に比べ、狭いヤードでの施工が可能である。

表-1にBCM10-CSM機の諸元を記す。

2.3 カッターフレーム

CSM機のカッター部は、トレンチカッター工法で実績のある水平多軸回転式カッター方式および同形状のビットを採用した(図-2参照)。トレンチカッターでは掘削時、リバース方式で土砂を集める必要があるため、土砂を中央部へ取込む方向にカッターが回転する。

これに対し、CSM機では中央部よりエアとセメントミルクを吐出しながら原位置土砂と混合攪拌を行うため、掘削時は中央部から外側へ押し出す方向にカッターが回転し、カッター引上げ時は吊荷重の低減や固化液の攪拌を行うため、掘削時とは逆方向に回転させる。

なお、掘削した土砂がエアリフト効果により攪拌されやすいよう、カッター上部が下部より幅の狭いテーパ形状となっている。

また、掘削精度を確保するため、以下に示す機構を有している(図-3参照)。

- ① ヒンジ機構を有したガイドフラップにより、壁直角

方向の制御が可能であり、修正掘削ができる。

- ② カッター上部の横ぶれを防止するためのガイドローラおよび左右のカッター回転数、回転方向を任意に変えることにより壁平行方向の移動制御が可能である。

2.4 ベースマシン

ベースマシンBA1000は、小松製作所製バックホウPC750 (3.1m³級) の改造型であり、最大吊荷重は40tfである。地上からの高さは、施工深度35mに対応したケリーバー方式掘削機の高さが41.5mに対し、吊下げ方式は高さ15m以下に収まっている。また、ホースやケーブル類はドラムへの巻取り方式とし、深度65mまで対応可能である。

3. 試験施工の目的と概要

大深度・低空頭型CSM機の施工能力および造成された壁体の品質を確認し、新しいソイルセメント地中連続壁工法の確立を目的として試験施工を実施した。

以下に、試験施工の概要および結果を報告する。

3.1 概要

当工事の概要を以下に示す。

施工場所：埼玉県北本市青山機工株

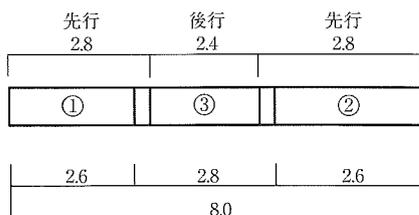


図-4 エレメント配置図

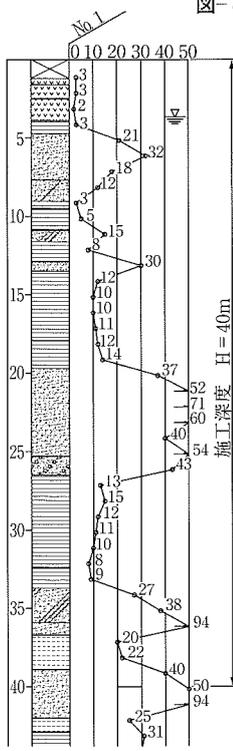


図-5 試験場所土質柱状図

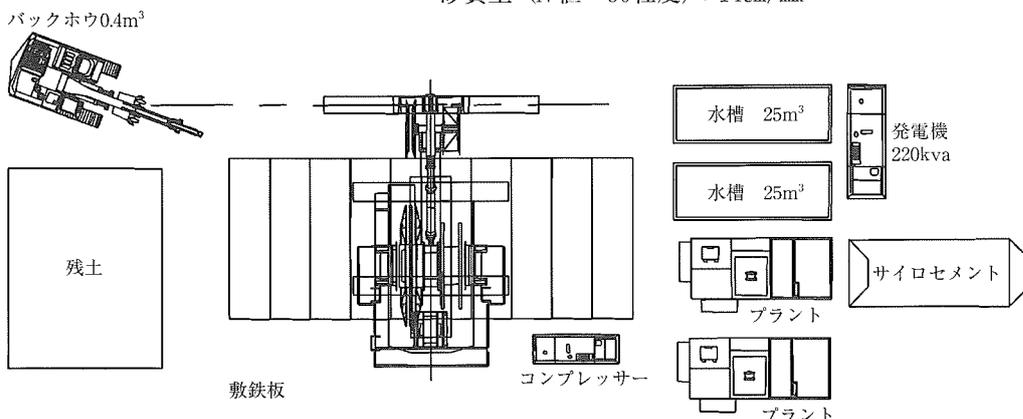


図-6 機械配置図

表-2 設備一覧

機材名	能力	備考
コンプレッサー	7.5m ³ /min	
セメントサイロ	30t×1	
水槽	25m ³ ×2台	
ラフタークレーン	25t, 50t	芯材吊り用
セメントミキシングプラント	24m ³ /h×2基	
バックホウ	0.45m ³ 級	排泥搬出用

表-3 注入液の配合

配合 (掘削体積 1m ³ 当たり)	セメント (kg)	ベントナイト (kg)	水 (kg)	備考
掘削液	5	32	530	B/W=6.0%
固化液	197	5	292.5	W/C=148%

北本機材センター敷地内
 施工時期：平成17年4月～平成17年6月
 工事内容：掘削壁厚 640mm
 掘削深度 40m
 施工延長 8.0m 2.8m×2 エレメント
 2.4m×1 エレメント
 (図-4 参照)

施工面積 320m²
 土質条件 図-5 参照
 機械配置：図-6 参照
 確認項目：掘削精度：1/250以上
 遮水壁としての要求品質
 ：透水係数 1×10^{-6} cm/s以下
 ：一軸圧縮強度 0.6N/mm²以上

なお、試験施工は硬質地盤を含む40mの大深度施工であり、セメント主体の固化液を用いた掘削はスラリー固化によるカッターの固着および引抜き抵抗の増加が懸念された。

そこで、掘削攪拌時にはベントナイト主体の掘削液で掘削攪拌し、引上げ攪拌時にセメント主体の固化液に切替えて施工する2パス施工を採用した。表-2に掘削機以外の設備一覧を、表-3に注入液の配合例を示す。また、写真-3に施工状況を示す。

3.2 試験施工結果

3.2.1 掘削速度

掘削経過時間と掘削深度の関係を図-7に示す。

掘削速度は以下のような結果となった。

- 全平均掘削速度：12cm/min
- 砂質土 (N値=20程度)：19cm/min
- 砂質土 (N値=50程度)：14cm/min



写真-3 施工状況

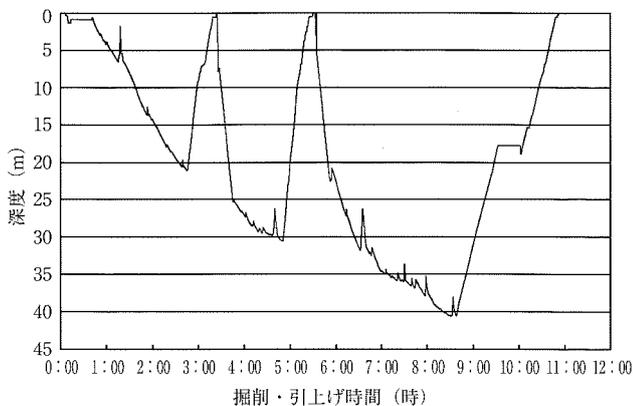


図-7 掘削経過時間と掘削深度

粘性土 (N 値 = 10程度) : 9 cm/min

ケリーバー方式と掘削速度の比較を行うため、パワー工法研究会発行のCSM工法標準積算資料からケリーバー方式の掘削速度を算出し、吊下げ方式との比較を行った(表-4参照)。標準積算資料では、掘削から引抜きまでを固化液のみで施工する1パス施工を想定しているため、吊下げ方式の掘削速度を1/2とした。

その結果、吊下げ方式とケリーバー方式とは掘削性能に大差がないことがわかる。また、 N 値の20から50への増加に対する掘削速度の低下も、ケリーバー方式が67%に対し吊下げ方式は73%となり、ケリーバー方式と遜色なく、吊下げ方式CSM機の高い掘削性能が実証された。

3.2.2 鉛直施工精度

先行エレメント②における傾斜計の変位計測結果は、40mの施工深度においてx(壁平行)方向では最大69mmであり、y(壁直角)方向では最大18mmとなった。原位置土攪拌混合ソイルセメント壁の一般的施工精度の1/150~1/200程度に対して、それぞれ1/580および1/2,200と高い施工精度が確認できた。これらの計測結果は機械の運転席に取付けられたリアルタイムモニター(写真-4参照)により、リアルタイムで把握することが可能である。

表-4 掘削速度比較 (cm/min)

	N 値 = 20程度	N 値 = 50程度	備考
ケリーバー方式	9.7	6.5	標準積算資料による
吊下げ方式	9.5	7.0	2パス施工のため試験施工値の1/2とした

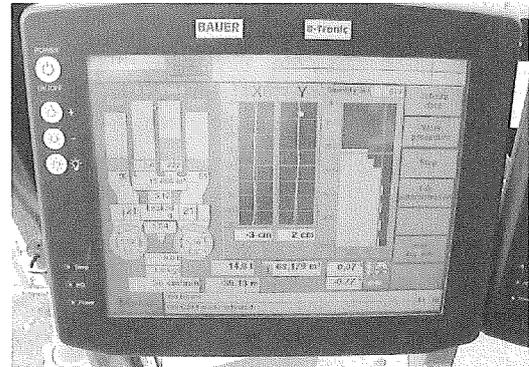


写真-4 リアルタイムモニター

3.2.3 透水係数と一軸圧縮強度

透水係数と一軸圧縮強度については、従来からあるソイルセメント壁工法と同様の配合を設定しており、ケリーバー方式の実績からも問題はないものと考えられたが、後行エレメント③において、コアボーリングを行い造成されたソイルセメント壁の要求品質の確認を行った。その結果、一軸圧縮強度については深度方向で多少のばらつきが見られたが、要求品質 (0.6N/mm^2) を満足する結果が得られた。また、透水係数については深度10mで採取した供試体において室内透水試験を実施した結果 $2.41 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ の結果が得られ、要求品質である $1.0 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ 以下を満足することを確認した。

4. おわりに

ソイルセメント壁に関する技術は、基礎工2005年5月号にも特集「ソイルセメント壁工法の最新技術と展望」として紹介されているが、その後も精度の確認方法や排泥量の削減技術などの面で新しい関連技術が開発され、日々進歩してきている。CSM工法はソイルセメント壁の造成工法の中であらゆる地盤に対してより深く経済的に等壁厚のソイルセメント壁を築造できる工法として開発されたものである。ケリーバー方式のCSM工法の実績は、公共工事も含めて増えつつあるが、BCM10-CSM機の公共工事への実績はまだ1件のみである。しかしながら、今後機械の進歩と相まって、さらにCSM工法の適用が広がっていくものと考えられる。なお、現在パワーマシーネン社(独)においては、BCM10の後継機として新しい機械の開発を進めており、近々欧州において発表される予定である。

〔参考文献〕

- 1) パワー工法研究会: CSM工法 標準積算資料, 平成17年度版。

都市狭隘部・玉石砂礫地盤におけるCSM工法の施工事例

—国道9号京都西立体千代原地区工事—

梶原 修* 瀬戸 清** 田中 啓之***

1. はじめに

国道9号は、京都市内中心部から京都府北西部へと続く道路として重要な役割を担うものであるが、近年の交通量の増大により渋滞が発生するなど、幹線道路としての機能低下が生じている。この交通渋滞の緩和と沿道環境の改善等を図るため、「9号京都西立体交差事業」が進められている(写真-1、図-1)。

本工事は立体交差事業のうち千代原口交差点を中心とした延長約490mの区間に、地下構造の道路トンネルを

構築するものである。現在、国道9号は上下各2車線の道路であるが、上下各1車線がアンダーパスとなる(図-2、図-3)。

本稿では、開削トンネル区間の上留め壁の築造において、「大深度・低空頭型CSM(カッターソイルミキシング)工法」を実際の工事へ初めて適用したので、その施工実績について報告する。

2. 工事概要

2.1 全体工事概要

工事名：9号京都西立体千代原地区工事
発注者：国土交通省近畿地方整備局
工期：平成15年3月15日～平成18年3月31日
施工者：鹿島・鴻池特定建設工事共同企業体



写真-1 完成イメージ

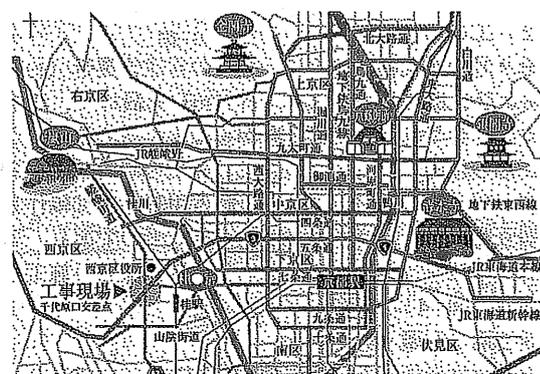


図-1 位置図

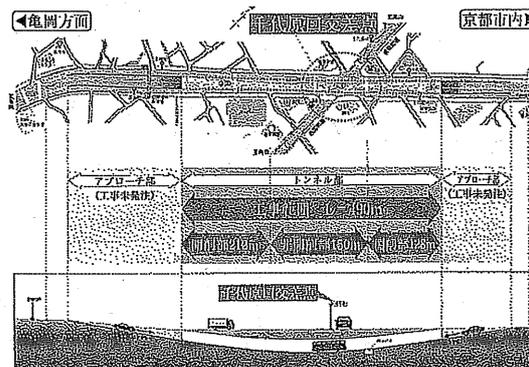


図-2 計画図

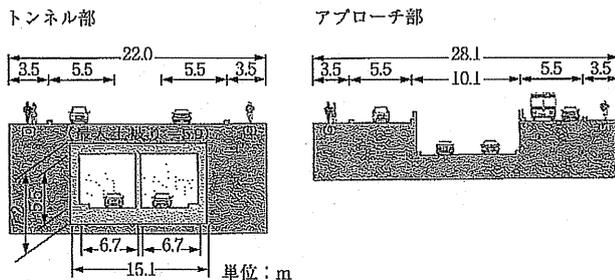


図-3 計画断面図

* KAJIWARA Osamu	国土交通省 近畿地方整備局 京都国道事務所 南丹国道出張所 所長	京都市西京区牛ヶ瀬奥ノ防町18
** SETO Kiyoshi	鹿島・鴻池特定建設工事共同企業体 (国道9号線京都西JV工事事務所) 所長	京都市西京区桂千代原町65
*** TANAKA Hiroyuki	同 上 工事課長	同 上



写真-2 昼間現場全景

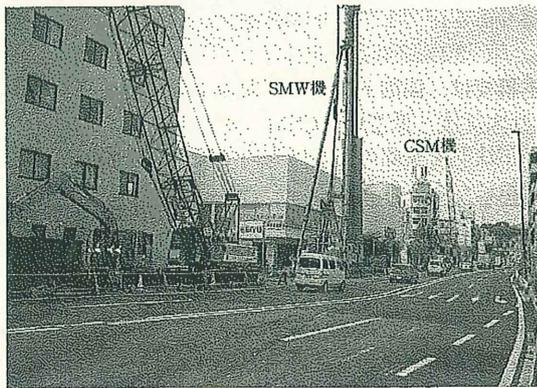


写真-3 昼間作業帯状況 (右奥：CSM機, 中央：SMW機)

工事場所：京都市西京区桂乾町～御陵溝浦町地先
 工事内容：

- 非開削トンネル (パイプルーフ工法) 延長：150m
- 開削トンネル (全面路面覆工) 延長：340m
- 地中連続壁工 (柱列式) 455平面m
 (その内CSM工法による施工は約67平面m)
- 路面覆工 約4,000m²
- 地盤改良工ほか

2.2 CSM工法

2.2.1 工法概要

CSM (カッターソイルミキシング) 工法は、水平多軸回転カッター (Cutter) を用いて土 (Soil) とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合 (Mixing) し、矩形 (等厚壁) のソイルセメント壁体 (土留め壁、遮水壁など) や、地盤改良体を造成する工法である。従来工法のオーガ攪拌方式やカッターチェーン攪拌方式と異なり、掘削と攪拌混合との機能を兼ね備えた水平多軸回転カッターによる攪拌方式の採用により、粘性土から硬質地盤・岩盤まで補助工法なしで施工可能であり、掘削効率と攪拌性能に優れた工法である。

2.2.2 工法選定理由

施工箇所ではN値50以上の密に締まった砂礫層が存在し、φ100mm以上 (推定最大径460mm) の大きな径の玉石が混入する地盤条件であることから、当初設計では単軸による先行削孔 (2孔に1カ所) を併用した柱列式地中連続壁 (SMW) 工法による土留め工の施工が計画され

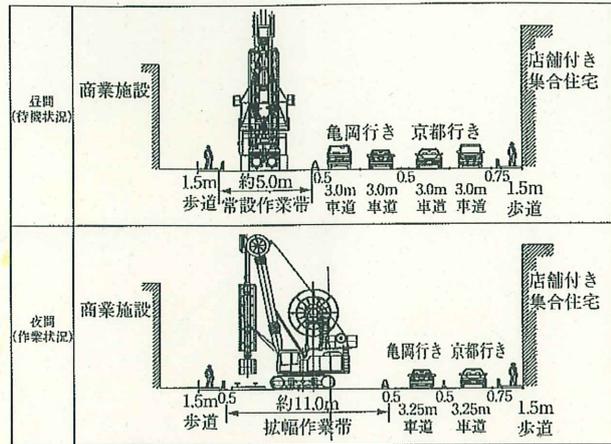


図-4 施工状況断面図

ていた。

本工事において、CSM工法の採用に至った経緯は以下のとおりである。

- ① CSM工法では先行削孔を省略することができ、工期の短縮が可能となる。
- ② CSM機 ($H \approx 14.8\text{m}$) は、SMW機 ($H \approx 32\text{m}$) に比べて空頭の低い施工機械であるため、沿道住民に対する圧迫感の緩和を図る効果が見込める。
- ③ 国道上に設けることのできる工事用作業エリアが狭いため、SMW機に比べてコンパクトなCSM機の方が施工上有利である。

3. 施工条件

3.1 土質条件

当該地区の地質は、沖積砂礫層 (Ag)・段丘粘土層 (Tc)・段丘砂礫層 (Tg) から構成される。Ag層はGL-10m前後まで分布し、径100~150mm程度の玉石を多く含み、細粒分が少なく (礫率75%)、透水性が高い ($k = 2 \times 10^{-2}\text{cm/sec}$)。また、Tg層は風化礫を混入し (礫率52~86%)、全体的にシルト混り~シルト質であるため透水性は比較的低い ($k = 2 \times 10^{-4}\text{cm/sec}$)。その両者の間にTc層が挟在する。

3.2 工事用作業帯

国道9号の現況幅員の中に、昼夜の常設作業帯 (約5m) および夜間の拡幅作業帯 (約11m) を設けて、工事のための作業エリアを確保しながら工事を進める必要がある。そのため、土留め壁の造成は夜間の時間帯である22:00~翌6:00に限定され、道路占用形態を拡幅作業帯へ切り替えした後に施工が開始できるものであり、昼間は施工機械が待機するのみという非常に厳しい施工条件である (図-4)。

3.3 周辺環境

施工場所は市街地人口集中地区 (DID地区) であり、国道9号沿いには、病院、ガソリンスタンド、銀行、飲食店、商業施設、集合住宅などが密集している。

また、平均交通量が約55,000台/日であり、慢性的な混雑状況を呈している交通状況のなか、通行車両並びに

歩行者等への安全確保が最優先となる。さらに、夜間作業時には工事による騒音・振動発生を最小限に抑えなければならない(写真-2, 写真-3)。

4. 土留め工施工計画

4.1 土留め壁

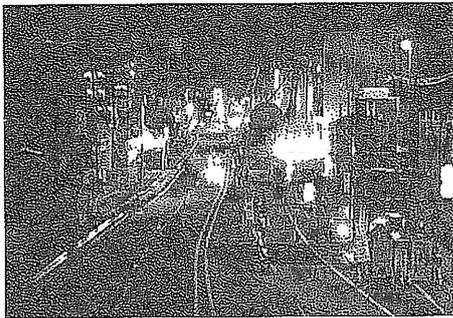


写真-4 夜間作業帯状況

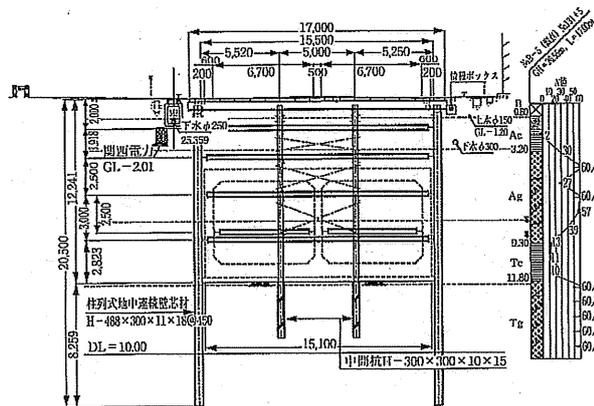


図-5 計画断面図

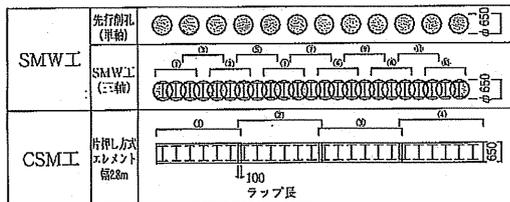


図-6 SMW工法との比較

土留め壁の仕様は以下のとおりである(図-5, 図-7)。

- ・壁 厚 650mm
- ・芯 材 H-488×300×11×18 (間隔: 450mm)
- ・壁 長 20.5m
- ・施工延長 約67平面m (25エレメント)

4.2 土留め造成方式

施工時間を考慮した場合、夜間1日当たりの施工数量は、掘削・攪拌～芯材建て込みまでの1エレメントの施工が時間的に限界となったため、片押し方式にて各エレメントをラップ連結しながら土留め壁を造成する方法を採用した(図-6)。

4.3 掘削固化液の配合

試験練り実施の結果、表-1の配合(設計基準強度0.5 N/mm²)とした。

4.4 主要機械

主要機械は表-2のとおりである(図-7)。

5. 施工実績

5.1 施工サイクル

施工は夜間の道路占用時間(22:00～翌6:00)であり、標準的な施工サイクルは表-3となった。

表-1 掘削固化液配合

現場土砂	セメント (高炉B)	ベントナイト	水	混和材	W/C
1m ³ 当たり	250kg	11.5kg	400%	1.5kg	160%

表-2 主要機械

機 械 名	規 格	数 量
CSM機 (ベースマシン)	BA1000 (クローラー式)	1台
水平多軸カッター	BCM10型 (吊り下げ方式)	1台
クローラークレーン	油圧ロープ式50t吊り	1台
バックホウ	クローラ型0.45m ³	1台
全自動モルタルポンプ	KMP-PM1800	1基
セメントサイロ	30t	1基
水 槽	20m ³	2基
発電機	100KVA	1台
空気圧縮機	5m ³ /min	1台
高圧洗浄機	30.8%/min	1台

表-3 施工サイクル

作 業 内 容	作 業 時 間
道路規制開始	22:00
拡幅作業帯設置	22:00～22:30
準備工	22:30～24:00
掘削・攪拌・引抜	24:00～3:30
芯材建て込み	3:30～5:00
後片付け	5:00～5:30
拡幅作業帯撤去	5:30～6:00
道路規制解除	6:00

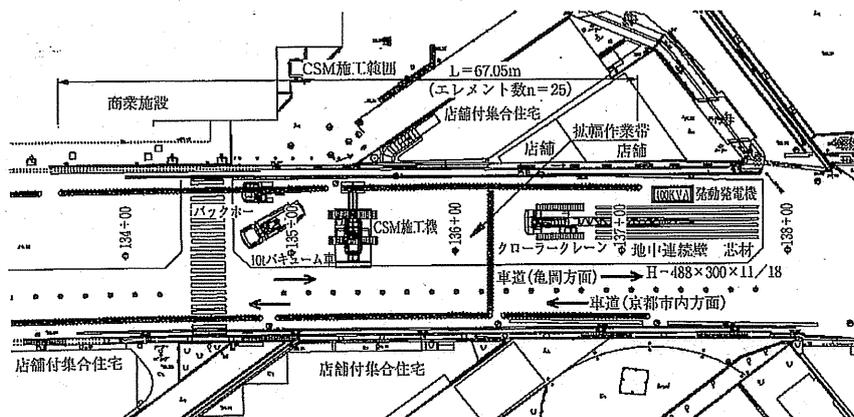


図-7 機械配置図

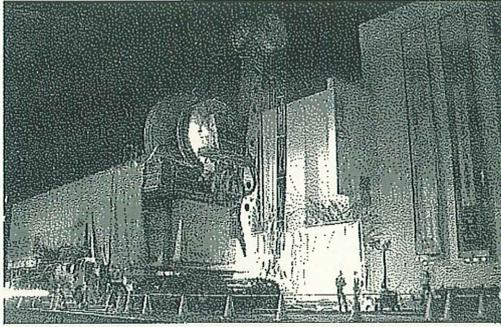


写真-5 施工状況 (全景)

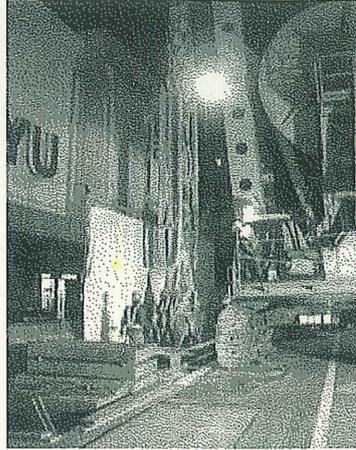


写真-6 掘削状況



写真-7 カッター部

なお、1日当たりの施工数量は1エレメント(L=2.8m)である。

5.2 施工結果

- (1) 玉石砂礫層と粘性土層とが互層となる地質条件であったが、前者の土層では玉石礫の沈降によるカッター回転および上下動に対する負荷の増加、また後者の土層では粘土塊のカッタービットへの付着による掘削効率の低下が見られた。その対策として、掘削攪拌時にカッター上下動を繰返すことによって掘削効率の改善を図った。
- (2) 透水性の高い無水地盤であったため、掘削固化液が逸水することによる影響と思われるが、攪拌されたソイルモルタルの流動性が低下する現象が見られた。カッター回転状態や地上への排泥状態を観察しながら、掘削固化液配合の微調整を行った。
- (3) カッターは玉石砂礫を含むソイルモルタル内で回転するため、カッター回転部が激しく損耗し掘削効率の低下が見られたが、カッタービットの補強と日々のメンテナンスにより対応した。
- (4) 上記に示す土質条件に起因する施工結果によっては、芯材建込み不能から再掘削を余儀なくされるエレメントも生じた。

5.3 今後の課題

今後の課題として、以下のことがあげられる。

5.3.1 掘削固化液の配合

掘削固化液の配合は掘削効率並びに芯材の建込み性に大きく影響を与えるものなので、掘削土質に適應しているかどうか検討する必要がある。特に互層となる地盤では、混和材や添加剤の効果的な使用が望ましいと思われる。

5.3.2 カッタービット

ビットが磨耗することによって掘削効率が低下するた

め、土質条件に合致したビット形状並びに配置について事前の検討が必要である。

5.3.3 ガイドフラップによる方向制御

ソイルモルタル内においてカッター部分が深度を下げることになるが、方向制御のためのガイドフラップの可動部分に、玉石や礫が干渉した場合の制御方法について検討する必要がある。

5.3.4 作業時間の制約

本工事のように作業時間が制約を受けるような施工条件の場合、CSM工法本来の最大施工量を達成できないことも想定される。そのため、特殊条件において本工法を適用するに当たっては、施工サイクルタイムに関して十分な検討が必要である。

6. むすび

本工法は、硬質地盤へ適用した場合には先行削孔などの補助工法が不要となり、大深度地下での施工能力・施工精度の確保、さらにコスト低減と工期短縮、品質向上が期待できるものである。また、都市部等での作業エリアの狭い施工条件下や沿道環境に配慮を要する場所での施工において有利な工法といえる。

本稿が、今後の類似工事の参考になれば幸いである。

〔参 考 文 献〕

- 1) NETIS新技術概要説明情報：CSM（カッターソイルミキシング）工法。
- 2) パワー工法研究会CSM分科会：CSM工法 標準積算資料(案) 2004. 5.

硬質地盤における 新しいソイルセメント地中連続壁の造成工法

New construction technique for the soil cement underground continuous wall
applicable for the hard soil condition

佐久間誠也¹・増田浩二²・宮下英子³

Seiya Sakuma and Koji Masuda and Eiko Miyashita

¹正会員 株式会社間組 土木事業本部技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門二丁目二番地五号)

E-mail:sukuma@hazama.co.jp

²正会員 株式会社間組 土木事業本部技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門二丁目二番地五号)

³非会員 株式会社間組 土木事業本部技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門二丁目二番地五号)

Newly developed cutter soil mixing method is the in-situ soil mixing technique for constructing the underground continuous wall with uniform thickness or improving the quality of the ground itself. In this method, soil and cement suspension are mixed on the site by employing the horizontal multi-axial rotational cutter modified for in-situ soil mixing. This method requires no additional assisting method even in the hard soil condition where some assisting method would be necessary in the conventional method. In this report, this newly developed cutter soil mixing method and some construction cases would be introduced and illustrated.

Key Words : CSM, soil mixing wall, equal wall thickness, The horizontal multi-axial rotational cutter, hard soil condition,

1. はじめに

現在、地中連続壁はSMW工法やTRD工法など、施工性や経済性に優れた原位置土攪拌混合ソイルセメント地中連続壁が主流となっている。しかしながら、これら従来の工法では、硬質地盤への適用に対し、先行削孔等の補助工法が必要となる場合も多く、工期、工費の増加につながる状況がみられている。

近年開発されたCSM(カッターソイルミキシング)工法は、硬質地盤においても補助工法を用いることなく、ソイルセメント地中連続壁の造成を可能にした工法である。

本稿では、これらCSM工法の概要および施工事例について報告する。

CSM工法とは、水平多軸回転カッター式の地中連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター(Cutter)を用いて土(Soil)とセメント系懸濁液を原位置で攪拌(Mixing)し、等壁厚のソイルセメント壁体(土留め壁・遮水壁等)を造成する工法である(図-1参照)。その特長には以下のような点がある。

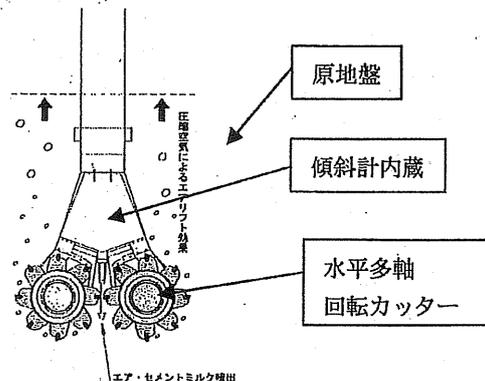


図-1 施工方法の説明(ケリーバー方式)

2. CSM工法の概要

(1) 概要

(a) 工期短縮・コスト低減

水平多軸回転カッターを用いた掘削・攪拌方式の採用により、岩盤や硬質地盤においても、先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できるため、工期短縮、コスト低減が可能である。

(b) 高い鉛直精度

カッターユニット部に傾斜計を内蔵し、運転席で掘削精度をリアルタイムで監視しながら（写真-1参照）修正掘削ができる。

(c) 優れた遮水性能

優れた攪拌性能とカッティングジョイントにより、高い遮水性を確保できる。

(d) 等厚な壁の造成

等壁厚のソイルセメント壁が造成されるため、土留め壁等で芯材の間隔を任意に設置できるので、設計の自由度が高い。

(e) 造成形状

壁体がパネル状に造成されるため小さな円形立坑の施工も可能である。

(f) 高い安定性

カッターの駆動部がケーリーバーの先端に配置されており、重心が低く転倒に対する安定性が高い。

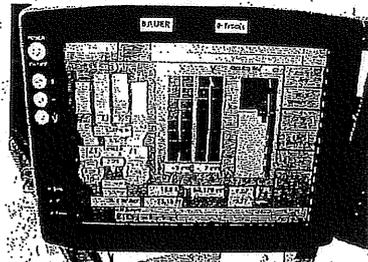
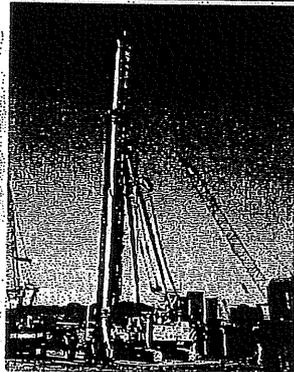
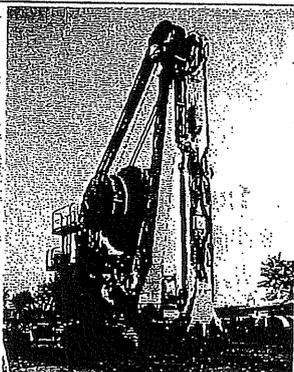


写真-1 リアルタイムモニター

(2) 施工機械

CSM工法の施工機械には、水平多軸回転カッターを支持する方式により、ケーリーバー方式と吊り下げ方式がある（表-1参照）。

表-1 施工機械の比較

項目	ケーリーバー方式		吊り下げ方式	
概要・特徴	 <p>高剛性の棒状部材（ケーリーバー）により水平多軸回転カッターを支持する。施工深度の増加に伴い、ケーリーバーも長くなるため、機械高が高くなる。</p>		 <p>低空頭ベースマシンにホースドラムを装備し、カッターユニットを吊り下げ方式とすることにより、低空頭機械（15m程度）で大深度（最大65mまで）施工を可能とした。</p>	
型式	BCM3	BCM5	BCM10	クアトロカッター（BCM5）
カッタートルク (kNm)	0~30	0~45	0~80	0~45
掘削深度 (m)	~35	~35	~65	~65
掘削壁厚 (mm)	500~700	500~900	640~1,200	500~1,200
掘削幅 (mm)	2,200	2,400	2,800	2,400
カッター重量 (t)	3.7	5.1	7.4	13.5

吊り下げ方式では、掘削精度を確保するため、壁直角方向については、ヒンジ機構を有したガイドフラップ、壁平行方向については、ガイドローラを補助的に用い、左右のカッター回転数、回転方向を任意に変えることにより、方向制御、修正掘削が可能である（図-2参照）。

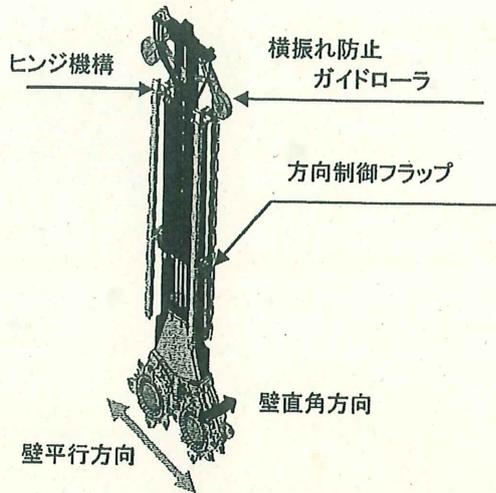


図-2 掘削制御機構 (BCM10)

また、BCM10の後継機として開発された吊り下げ方式のクアトロカッター（図-3参照）では、4個のカッターの組み合わせとフラップによって方向制御を行う。さらに、カッターユニット内部に傾斜計を内蔵していることから、リアルタイムに正確な位置を把握し、より高精度な掘削が可能となる。また、カッターが従来型の2対から4対になることから、掘削攪拌性能も向上する。

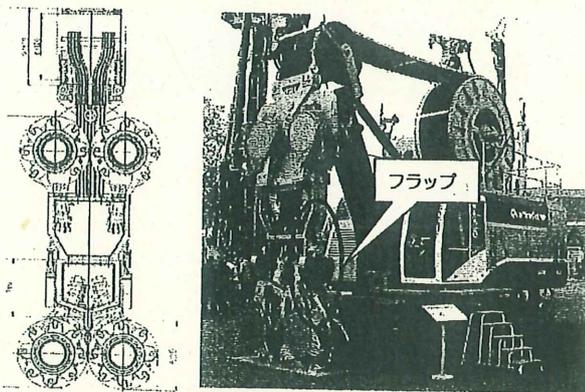


図-3 掘削制御機構 (クアトロカッター)

3. 施工事例

(1) ケリーバー方式の事例

a) 工事概要

工事名 : 豊後大野広域連合旧東部埋立処分場適正閉鎖工事

工事場所 : 大分県豊後大野市

工期 : 平成17年3月～平成18年3月

工事概要 : 鉛直遮水壁 (壁厚: 0.55m、深度 6.5～11.0m)

要求品質 : 一軸圧縮強度 0.5N/mm²以上

透水係数 1×10^{-6} cm/s 以下

本工事は、適正閉鎖処分場工事において、鉛直遮水壁を施工する工事（図-3、写真-2参照）である。当初、遮水壁を造成する対象地盤は硬質な岩盤層も存在したため、二軸同軸ロックオーガーによる先行削孔を併用した工法で計画されていた。しかし、この計画では、先行削孔に時間を要し、余裕のない工程であった。そこで、硬質地盤においても先行削孔などの補助工法が不要なCSM工法の適用について検討を行った結果、本工法が採用となった。採用にあたって行われた試験施工の結果と、本施工について以下に述べる。

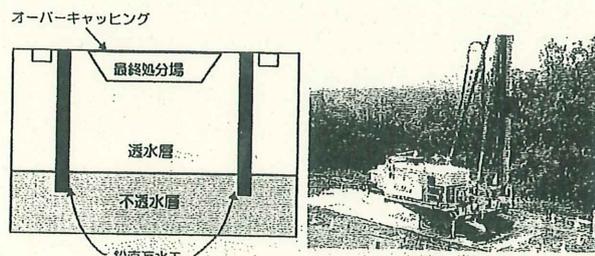


図-3 模式図

写真-2 施工状況

b) 試験施工

試験施工は、根入れ部分の不透水層となる岩盤層（砂岩頁岩互層：最大一軸圧縮強度40N/mm²程度）において、CSM機での削孔が可能か、また造成されたソイルセメント壁が要求品質を満足しているかを確認するために行った。

表-2にウェットサンプリングにより実施した一軸圧縮強度試験、室内透水試験の結果を示す。また、表-3に造成後のソイルセメント壁をボーリングして得られたコアの一軸圧縮強度と透水試験結果を示す。

表-2 ウェットサンプリング品質管理結果

施工日	材 齢	試験日 (日)	一軸圧縮強度 N/mm^2 (kN/m^2)		透水係数 (cm/s)
			測定値	平均値	
平成17年 7月 20日	7	平成17年 7月 27日	1.80 (1797)	1.94 (1940)	1.42×10^{-8}
			2.04 (2041)		
			1.98 (1981)		
	28	平成17年 8月 17日	3.57 (3572)	3.54 (3542)	
			3.54 (3540)		
			3.52 (3515)		
平成17年 9月 1日	7	平成17年 9月 8日	0.67 (670)	0.82 (822)	7.63×10^{-7}
			0.91 (905)		
			0.89 (891)		
	28	平成17年 9月 29日	1.76 (1759)	1.91 (1913)	
			2.11 (2107)		
			1.87 (1873)		
平成17年 9月 15日	7	平成17年 9月 22日	0.90 (895)	0.87 (864)	3.21×10^{-6}
			0.86 (860)		
			0.84 (837)		
	28	平成17年 10月 13日	2.03 (2029)	2.21 (2214)	
			2.29 (2289)		
			2.32 (2323)		

表-3 ボーリングコア品質管理結果

施工日	材 齢	試験日 (日)	供試体採取深度	一軸圧縮強度 N/mm^2 (kN/m^2)	透水係数 (cm/s)
平成17年 10月 19日	28	平成17年 11月 16日	1 GL-2.20~2.50m	1.03 (1030)	7.18×10^{-7}
			2 GL-3.70~4.00m	1.50 (1495)	6.51×10^{-7}
			3 GL-4.10~4.40m	1.58 (1575)	4.96×10^{-7}
平成17年 9月 16日	61	平成17年 11月 16日	1 GL-2.20~2.50m	3.49 (3486)	3.90×10^{-8}
			2 GL-3.60~3.90m	3.16 (3159)	2.11×10^{-8}
			3 GL-4.20~4.50m	3.21 (3208)	1.63×10^{-8}

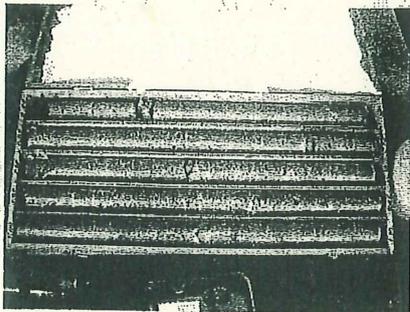


写真-3 ボーリングコア

以上の結果より、ウェットサンプリングおよびボーリングコアは一軸圧縮強度、透水係数とも要求品質を満足していることを確認した。

c) 本施工

本工事では平面的なコーナー部での施工が多く、従来の等壁厚ソイルセメント工法では段取り替えなどの手間が発生していたが、CSM工法では1エレメント2.4m(BCMS)の壁を鉛直方向に造成するため、コーナー部での施工や掘削深度の変化点においても施工ロスを生じさせずに施工することができた。

また、工事完了後のチェックボーリングによる品質試験の結果から、すべての計測点において要求品質が確保されていることを確認した。

(2) 吊り下げ方式(BCM10)の事例

a) 試験施工の目的と概要

吊り下げ方式(BCM10)のCSM工法の施工能力および造成された壁体の品質を確認し、新しいソイルセメント地中連続壁工法の確立を目的として試験施工を実施した(写真-4参照)。

施工時期:平成17年4月~平成17年6月

工事内容:壁厚0.64m 深度40m

施工延長 8.0m(図-4参照)

土質条件:砂質土 N値 20~50

粘性土 N値 10程度

主要確認項目

掘削精度:1/250以下

要求品質:一軸圧縮強度 $0.6N/mm^2$ 以上

透水係数 $1 \times 10^{-6}cm/s$ 以下

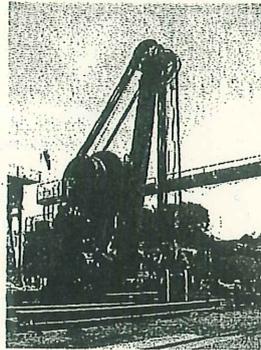


写真-4 施工状況

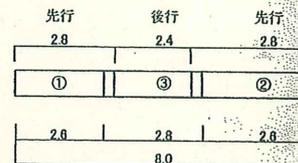


図-4 エレメント平面図

b) 試験施工結果

鉛直施工精度について

先行エレメント②におけるカッターユニットに内蔵された傾斜計の変位計測結果は、40mの施工深度においてx(壁平行)方向では最大69mm、y(壁直角)方向では最大18mmとなった。原位置土攪拌混合ソイルセメント壁の一般的施工精度の1/150~1/200程度に対して、それぞれ1/580及び1/2200と高い施工精度が確認できた。これらの計測結果は機械の運転席に取り付けられたリアルタイムモニターにより確認した。

一軸圧縮強度と透水係数について

一軸圧縮強度と透水係数については、従来からあるソイルセメント壁工法と同様の配合を設定しており、ケリーバー方式の実工事の実績からも問題はないものと考えられたが、後行エレメント③において、コアボーリングを行い、造成されたソイルセメント壁の要求品質の確認をおこなった。

その結果、一軸圧縮強度については、深度方向で多少のばらつきが見られたが、要求品質($0.6N/mm^2$)

以上)を満足する結果が得られた。また、透水係数については深度10mで採取した供試体において室内透水試験を実施した結果 $2.41 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ の結果が得られ、要求品質である $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下を満足することを確認した。

(3) 吊り下げ方式(クアトロカッター)の事例

a) 試験施工の目的と概要

吊り下げ方式のBCM10の後継機として開発されたクアトロカッターの施工能力を確認することを目的として、パワーマシーネン社(独)のアラジン工場敷地内において行われた試験施工に立会った(写真-5参照)。

施工時期:平成18年7月

工事内容:壁厚0.80m 深度60m

土質条件:埋土,砂質土,粘性土,砂礫,粘土混じり砂

試験項目:

深度60mの原位置攪拌ソイルセメント壁の掘削

- ・掘削性能の確認
- ・姿勢制御装置の機能確認

片押し施工の施工性確認

コンクリートの切削性能試験

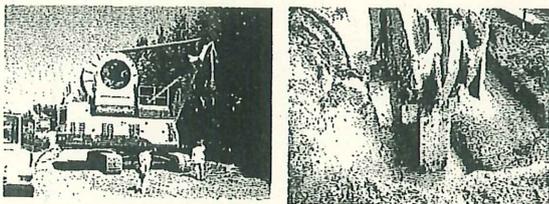


写真-5 施工状況

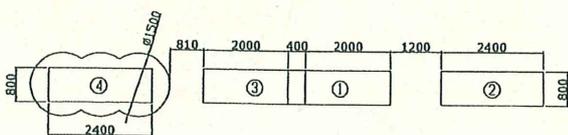


図-5 試験施工平面図

b) 深度60mの原位置攪拌ソイルセメント壁の掘削攪拌

図-5の②のソイルセメント壁について、6/30までに深度GL-23mまで原位置土攪拌を完了し、その後、姿勢制御の確認等も含め、深度GL-60mの掘削攪拌試験を完了した(写真-6参照)。

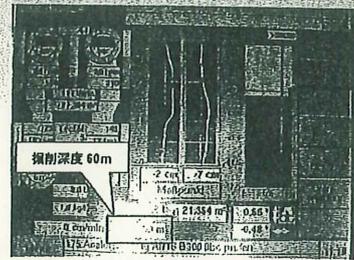


写真-6 リアルタイムモニター

c) 片押し施工の施工性確認

図-5の①のソイルセメント壁について事前に25mまで掘削攪拌しておいたものを再攪拌し、その後③のエレメントを連続して掘削攪拌を行い、片押し施工試験を行った。ラップ代は400mmとし、施工深度は下端部20mまで行った。カッターは既攪拌部に流されることなく試験を完了した(写真-7参照)。

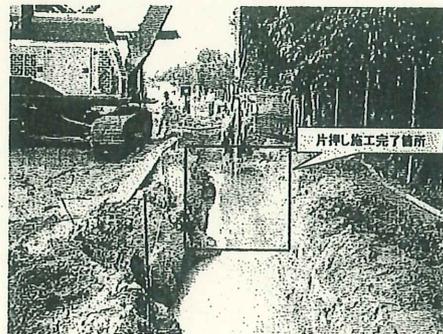


写真-7 片押し施工

d) コンクリートの切削性能試験

図-5の④のエレメントは、先行して $\phi 1,500 \text{mm}$ のコンクリート杭を3本施工し、その杭(一軸圧縮強度49MPa)をクアトロカッターにて掘削攪拌した。施工深度は7mで、その内コンクリート杭の切削は5.2mまで行った(図-6,写真-8,写真-9,写真-10参照)。

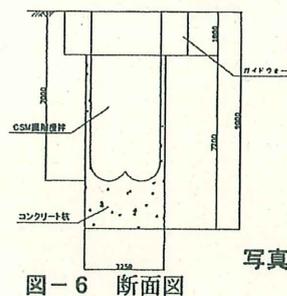


図-6 断面図

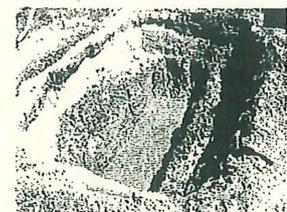


写真-8 ソイルモルタルによるガイドウォール

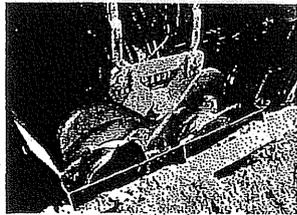


写真-9 施工状況



写真-10 掘削完了後

e) 排泥量削減システム

試験施工ではパワーマシーネン社（独）が開発した排泥量削減システムを使用した。このシステムは、掘削攪拌に使用した排泥を、振動ふるいにかけて、土砂と、ベントナイト泥水やセメントスラリーに分離し、その流体を再度、掘削攪拌に使用することにより、排泥量を削減するものである。

今回は、掘削液（ソイルセメントの造成を行わないため、セメント分は含まない）を対象として本システムを適用したが、掘削攪拌土量に対して約30%の土砂を排出し、残りの泥水は再利用された（写真-11参照）。

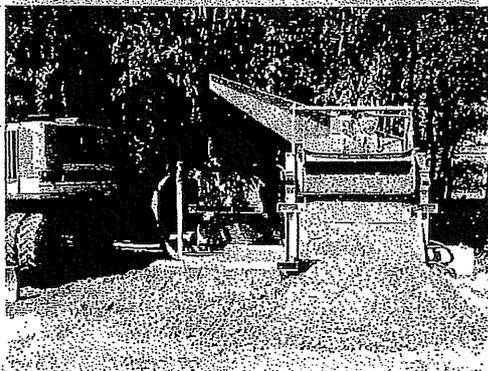


写真-11 振動ふるい

本システム（例：ベントナイト泥水）のフローを図-7に示す。

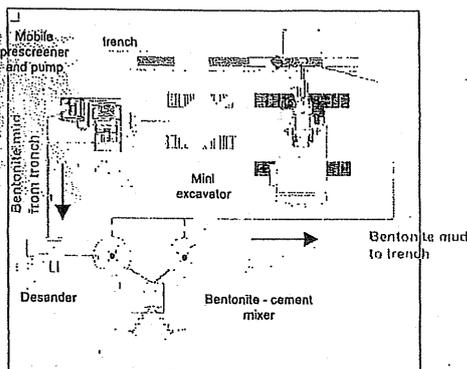


図-7 排泥量削減システム フロー図

4. おわりに

ソイルセメント壁に関する技術は、精度の確認方法や排泥量の削減技術などの面で新しい関連技術が開発され日々進歩してきている。CSM工法は、国内において平成18年9月末までに試験施工(5件)、建築土木工事の土留め壁、廃棄物処分場の遮水壁等、12件の施工実績を有している。また、本技術は新技術情報提供システム(NETIS)に登録(登録番号:KT-050014)されており、今後もソイルセメント地中連続壁の新技術として、土留め壁、遮水壁、地下ダム本体、さらには地盤改良への適用も視野に入れ、更なる普及・発展を目指している。

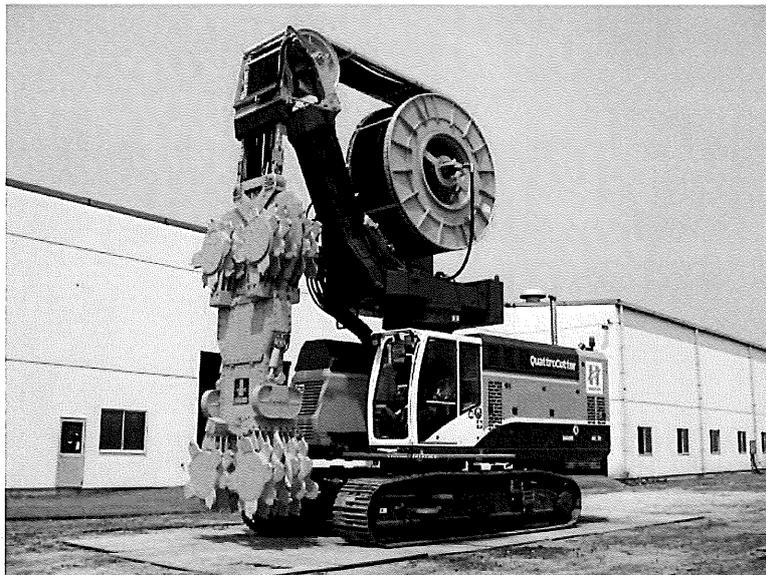
CSM工法（クワトロサイドカッター機）の開発

—作業帯占有幅6 m内での大深度ソイルセメント壁の構築—

株 間 組 舘 岡 潤 仁
榎 本 教 隆

1. はじめに

近年、環境に対する配慮として、掘削による建設発生土や産業廃棄物となる建設汚泥の排出量が少ない工法が求められている。一方で、大都市部の地下プロジェクトはより深い位置に構造物を構築する『大深度化』が進み、大深度に存在する硬い地盤の掘削対策が必要となる。また、工事場所が大都市部であるため、地上交通を阻害せず（占有作業空間の最小化）、周辺住民にも不安感や圧迫感を与えない、よりコンパクトな施工機械へのニーズが高まっている。これらの課題を解決する工法として、作業幅6 m以内で大深度ソイルセメント壁を構築できるCSM工法（クワトロサイドカッター機：写-1）を開発・導入し、「中央環状品川線大橋連結路工事（首都高速道路(株)）」において採用された。ここではCSM工法の概要、掘削機械の開発経緯、クワトロサイドカッター機の概要と実施工への展開について報告する。



写-1 クワトロサイドカッター

2. CSM工法の概要

地中連続壁は、SMW工法やTRD工法など施工性や経済性に優れた原位置土攪拌混合ソイルセメント地中連続壁が主流となっている。近年、これらの工法に加えケーリーバー方式のCSM機がバウアーマシーネン社（独）とソレタンシュ社（仏）によって共同開発（2003年）され、欧州における試験施工を踏まえて日本に導入された。（2004年）

その後4年が経過し、施工実績が増えてくると同時に新しい機械の開発・導入が進んできている。日本国内での総施工面積は2008年3月末現在で約24,000m²を越え、順調に施工実績を伸ばしている。また、岩盤や礫地盤を含む様々な条件下で施工が行われ技術的な問題点の克服や低空頭対応や狭隘地対応など機械の改良も行われている。

CSM工法とは、水平多軸型地中連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター（Cutter）を用いて土（Soil）とセメント系懸濁液を原位置で攪拌（Mixing）し、等壁厚のソイルセメント壁体（土留め壁・遮水壁等）を造成する工法である（図1参照）。その特長には以下のような点がある。

- ① 岩盤・硬質地盤においても、水平多軸回転カッターの性能をそのまま生かした高い掘削性能により、先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ② エアブローを併用した高速回転カッターによる攪拌のため高い攪拌性能を持つ。（クアトロカッターの例）
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定でき、設計の自由度が高い。
- ④ 壁体がパネル状に造成されるため円形に近い立坑の施工が可能である。
- ⑤ 壁体のジョイントは止水性の高いカッティングジョイントとなる。
- ⑥ カッター部に内蔵した傾斜計およびジャイロコンパスにより、リアルタイムでの掘削精度確認が可能である。また、カッター部に装備してある方向修正装置により修正掘削が行える。

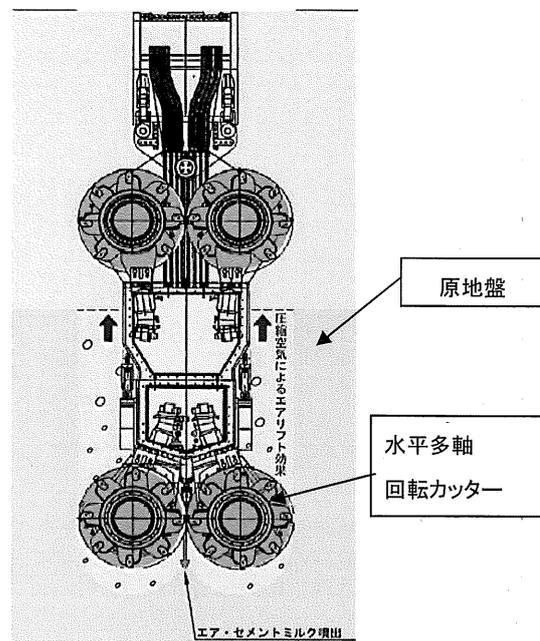


図-1 CSM工法概念図

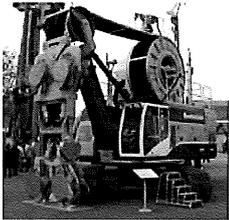
3. クワトロサイドカッター開発の経緯

クレーバー方式のCSM機（表-1参照）は、2003年にドイツ（パウアーマシーネン社）において開発され2004年にBCM3型機1台が日本に導入された。その後、続いて同じくクレーバー方式のBCM5型機が導入された。しかし、クレーバー方式で大深度施工を行うには、施工機械を大型化しクレーバーを長くする必要があるが、おのずと掘削深度に限界（35m程度）があった。そのためハザマとパウアーマシーネン社でカッター吊り下げ方式の開発を進め、2カッター方式のBCM10型が誕生し、その後継機としてクワトロフロントカッターが製作され日本に導入された。

ハザマはクワトロフロントカッター機に改良を加え、カッターをベースマシンのサイドに配置して狭隘地（作業幅6m以内）での施工が可能なサイドカッター方式のアイデアをパウアーマシーネン社に提案し、設計製作させて日本に導入した。

これら機械の概要や性能などを表-1 CSM機の種類と実績に示す。

表-1 CSM機の種類と実績

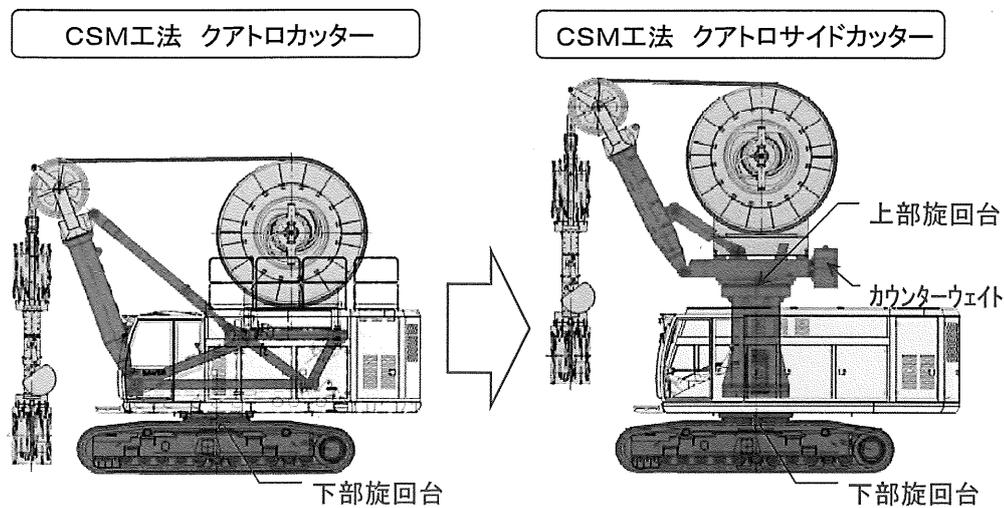
種 類	クレーバー方式		吊り下げ方式		
	2カッター		2カッター	クワトロカッター(4カッター)	
機械姿写真					
開発年:日本導入年度	2004年	2004年	2005年	2006年	
国内保有台数	1台	2台	0台(海外に2台)	2台(クワトロサイドカッター含む)	
カッター	型式	BCM3型	BCM5型	BCM10型	BCM5型
	トルク	0-30kN・m	0-45kN・m	0-80kN・m	0-45kN・m
ベースマシン	機械高	~35m程度	~35m程度	約15m(CBC25)	約6.5m(専用機)
	機械長	10m程度	10m程度	9.5m程度	8.0m程度
掘削深度(実績最大深度)	~35m(20m)	~35m(31m)	~60m(60m)	~65m(60m)	
掘削壁厚	500~700mm	500~900mm	640~1,200mm	500~1,200mm	
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,800mm	2,400mm	
施工実績(試験施工を除く)	3件(海外19件)	4件(海外33件)	1件(海外7件)	4件(海外0件)	

2008年3月末現在：パウアー工法研究会調べ（パウアーマシーネン社製機械のみ）

4. クアトロサイドカッター機の概要

クアトロサイドカッター機は、従来のケリーバー方式のCSM機の特長に加えて次の特長がある。

- ① クアトロサイドカッターは上部旋回台を旋回させる事（写-2→写-3）により、狭隘な空間（作業占有幅 6m）での施工が可能である。
- ② 低空頭条件下での施工が可能である。（クアトロカッター機：機械高さ 6.5m）
- ③ ホースドラムを利用した吊り下げ方式の採用により大深度（最大 65m）施工が可能である。
- ④ 転倒に対する安定性が高く、また周辺に対する圧迫感がない。
- ⑤ 4カッター化（写-4）により方向制御、掘削攪拌性能を向上。（下部のカッターは掘削・攪拌の機能、上部のカッターは攪拌およびカッター引上げ時の引上げ抵抗の低減機能を有する。）
- ⑥ リアルタイムモニターによる掘削精度確認に加え、カッター部に姿勢制御装置を装備し、壁直角方向およびカッター部のねじれを制御することにより掘削精度を向上。
- ⑦ パーツ交換（図-2 参照）により、クアトロサイドカッターへ容易に変更可能である。



上部旋回台を追加 ⇒ カッター単体をマシン側部に旋回可能
(青色のパーツ交換で相互にモデルチェンジ可能)
(上部旋回台)

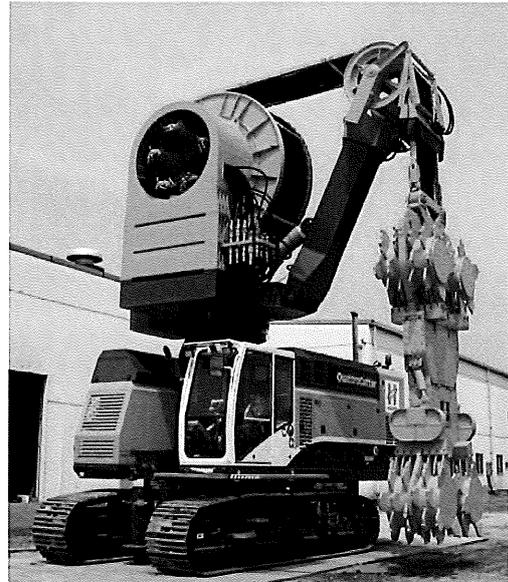
図-2 サイドカッターへの改良点

クアトロサイドカッター

機械幅	： 約 4.4m
機械高	： 約 8.6m
機械長	： 約 7.0m



(写-2 カッター フロントポジション)

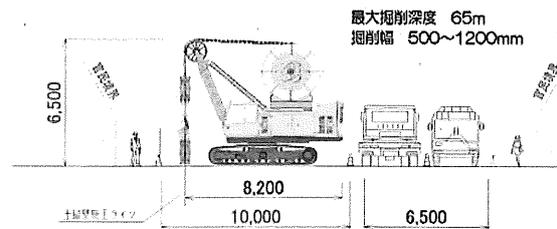


(写-3 カッター サイドポジション)



(写-4 カッター部)

フロントカッター（低空頭型）



サイドカッター（狭隘空間型）

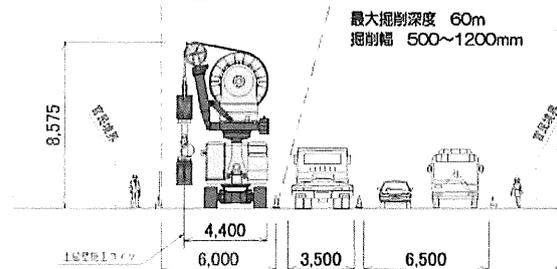
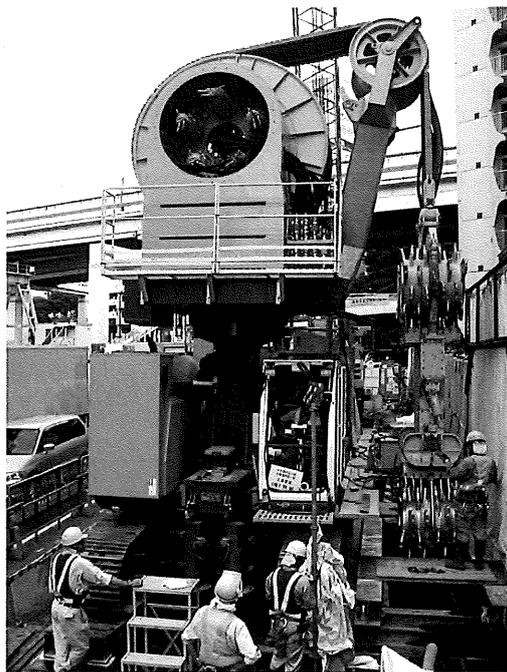


図-3 クワトロカッター使用条件別配置例

実施工へ向け、狭隘な作業帯幅 6 m 内での施工を想定し試験施工を行い、クワトロサイドカッター機の施工能力、ソイルセメント壁の品質及び施工性が良好であることを確認した。

この後、「中央環状品川線大橋連結路工事（首都高速道路(株)）」のシールド発進立坑土留壁を同実機により施工した。シールド発進土留壁は深さ 35.5m、壁圧 900mm であり、芯材 H700×300 を 600mm ピッチで建て込むものである。4 車線の山手通り支線で 1 車線分の作業帯においての施工が 2008 年 7 月に 1 期施工分を順調に終了した（写-5, 6）。



写-5 大橋連結路工事 施工状況 1



写-6 大橋連結路工事 施工状況 2

6. おわりに

今回の試験施工および「首都高速道路中央環状品川線大橋連結路工事」での実績を踏まえ、都市部における開削道路・鉄道トンネル、共同溝工事などに、クワトロサイドカッターを積極的に展開していく予定である。

報文 ケリーバーおよび吊下げ方式のCSM機と施工事例

佐久間 誠也* / パウアー工法研究会**

1. はじめに

CSM工法が2004年に日本に導入されてから4年が経過し、施工実績の増加と同時に新しいタイプの機械の開発・導入も進んできている。国内外の総施工面積は2007年3月末現在で約74,000m²となり2008年3月末においては85,000m²を越える予定である。また、岩盤や礫地盤を含むさまざまな条件下で施工実績を積み、技術的な問題点の克服や機械の改良も随時行なわれている。CSM工法については、基礎工2006年5月号の寄稿「大深度・低空頭型CSM工法の開発と試験施工」に紹介されているので、本稿においては工法の説明は割愛し、機械の紹介とケリーバーおよび吊下げ方式による施工事例についてそれぞれ数例を紹介する。

2. CSM機の開発と日本への導入

ケリーバー方式のCSM機は、2003年にドイツにおい

て開発され、2004年にCSM 3型機1台が日本に導入された。その後、続いて同じくケリーバー方式のCSM 5型機が導入され、並行して吊下げ方式のCSM10型機の開発が進められた。このCSM10型機は、国内にあった既存の地中連続壁掘削機のカッター部とドイツから日本へ搬入したフレーム部等を組立てて作られた。また吊下げ方式の機械としては、このCSM10型機の後継機としてCSM 5型機（クアトロカッター）が開発され、1台が2006年に日本に導入されている。これら機械の種類や施工実績などを表-1 CSM機の種類と実績に示す。

3. ケリーバー方式のCSM機による施工例

3.1 鉛直遮水壁工事の例①

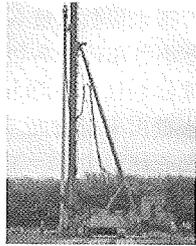
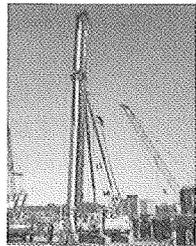
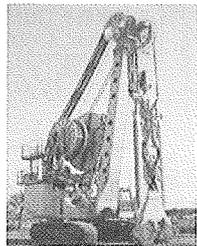
3.1.1 工事概要

発注者 大野広域連合

受注者 間・三重建設工事共同企業体

工事名 旧東部埋立処分場適正閉鎖工事

表-1 CSM機の種類と実績

種類	ケリーバー方式		吊下げ方式		
	2カッター		2カッター	クアトロカッター(4カッター)	
機械姿写真					
開発年：日本導入年度	2004年	2004年	2005年	2006年	
国内保有台数	1台	2台	0台(海外に2台)	1台	
カッター	型式	BCM 3型	BCM 5型	BCM10型	
	トルク	0-30kN・m	0-45kN・m	0-80kN・m	0-45kN・m
ベースマシン	機械高	~35m程度	~35m程度	約15m (CBC25)	約6.5m (専用機)
	機械長	10m程度	10m程度	9.5m程度	8.0m程度
掘削深度(実績最大深度)	~35m (20m)	~35m (31m)	~60m (60m)	~65m (60m)	
掘削壁厚	500~700mm	500~900mm	640~1,200mm	500~1,200mm	
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,800mm	2,400mm	
施工実績(試験施工を除く)	3件(海外16件)	4件(海外18件)	1件(海外5件)	4件(海外0件)	

2007年8月現在：パウアー工法研究会調べ（パウアーマシーネン社製機械のみ）

* SAKUMA Seiya ハザマ 土木事業本部 技術部 都市土木グループ長 | 東京都港区虎ノ門2-2-5 (パウアー工法研究会CSM委員会 委員長)

** 事務局：東京都世田谷区2-3-8 但馬屋ビル3階 TEL：03-5426-3151 FAX：03-5426-3152

工事場所 大分県豊後大野市
 施工概要 鉛直遮水壁 (壁厚0.55m, 深度6.5~11.0m)
 延長245m, 総面積2,396m²
 対象地盤 硬質岩盤
 要求品質 一軸圧縮強度 $q_u=0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
 透水係数 $k=1\times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 以下

3.1.2 試験施工

遮水壁を造成する地盤には、玉石混りの砂礫や硬質な岩盤層が含まれており、試験施工においては根入れ部分の不透水層となる岩盤層(砂岩頁岩互層:最大一軸圧縮強度40N/mm²程度)での削孔が可能か、また、造成されたソイルセメント壁が要求品質を満足しているかの確認を行なった。ソイルセメントのウェットサンプリングと造成後のボーリングにより、一軸圧縮強度、透水係数とも要求品質を満足する結果であった。

3.1.3 施工

CSM工法は工期短縮のために採用された工法であったが、試験施工によりその適用性が確認された。本工事の鉛直遮水壁は平面的にコーナー部が多く、また根入れ層の境界深さに応じて深度を変えているので、深度の高低差が大きくなっている。同じ等厚壁となるTRD工法では、平面コーナー部で一度カッターポストの抜き差しが必要である。本工事では、深度が変わると施工能率が下がってしまうが、一軸圧縮強度40N/mm²を明らかに超えると判断された岩盤の範囲では、二軸同軸オーガーに

よる先行削孔を補助工法としてTRD工法が採用された。一方、CSM工法は1エレメント当り平面長2.4mの壁を上下動だけで構築していくため、平面上のコーナー部でも機械の移動だけですむ。また深度が1エレメントごとにも変わっても、全く施工ロスは発生しない。図-1にCSM工法およびTRD工法で施工した遮水壁の施工平面図を示す。

3.2 鉛直遮水壁工事の例②

3.2.1 工事概要

発注者 (財)滋賀県環境事業公社
 受注者 大林組・鹿島建設・三東工業社・西村建設JV
 工事名 クリーンセンター滋賀 第1期施設整備工事
 工事場所 滋賀県甲賀市甲賀町神
 施工概要 鉛直遮水壁 (壁厚0.55m, 深度9.6~30.2m)
 延長107m, 総面積2,043m²

対象地盤 礫岩岩盤

要求品質 透水係数 $k=1\times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 以下

3.2.2 工法の選定

遮水壁造成工法は、アースオーガーによる岩盤先行掘削工程後、SMW工法によるソイルセメント壁造成の2工程方式で検討されていたが、調査ボーリングの結果、CL~CM級の岩盤においてCM級が卓越する部分が確認された。アースオーガーによる先行削工では鉛直精度の確保が難しく、また、透水係数を確保するために必要な岩盤の細径への破砕が困難であると判断された。そこで他工法を検討した結果、岩盤掘削に対応可能な1工程方式で確実に高品質なソイルセメント壁が造成できるCSM工法が選定された。

3.2.3 施工

掘削攪拌深度30m級の岩盤施工であったが、工期内に施工完了し、品質面でもソイルセメントのウェットサンプルとコア・サンプルの品質確認調査の結果、透水係数は最もよくない数値でも $7.18\times 10^{-7}\text{cm}/\text{s}$ と小さな値であり、すべての調査地点で要求品質が確保されていた。写真-1に施工状況、写真-2に遮水壁出来形断面、写真-3に遮水壁出来形平面をそれぞれ示す。

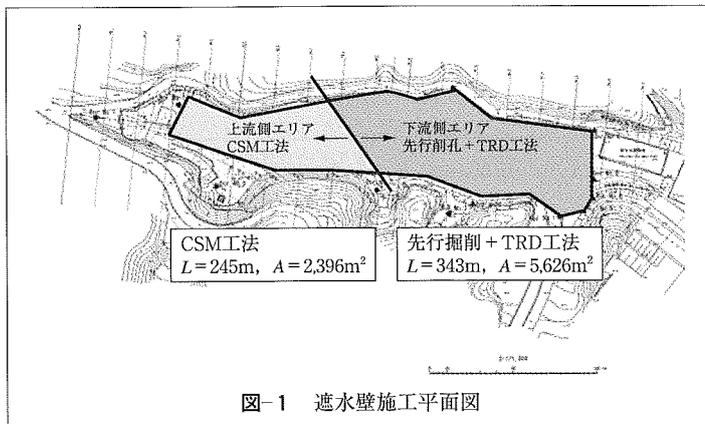


図-1 遮水壁施工平面図

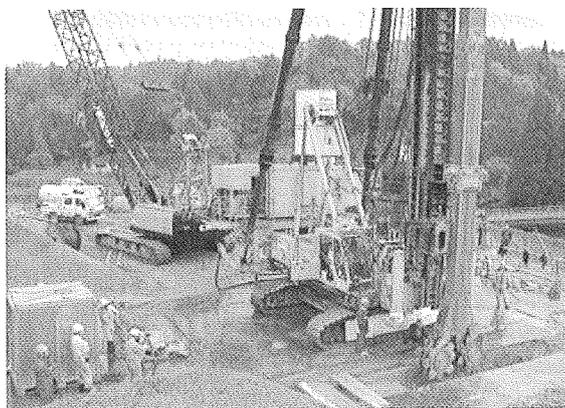


写真-1 CSM 5型施工状況



写真-2 遮水壁出来形断面

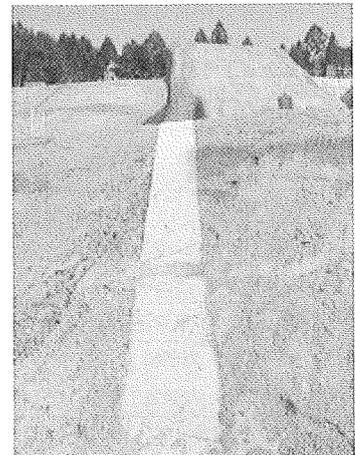


写真-3 遮水壁出来形平面



写真-4 CSM 3型施工状況

3.3 土留め壁工事の例

3.3.1 工事概要

発注者 学校法人某大学
 受注者 榎竹中工務店
 工事名 某大学校舎新築工事
 工事場所 千葉県松戸市
 施工概要 鉛直遮水壁(壁厚0.55m, 深度19.0~21.5m)
 延長114.25m, 総面積2,190m²
 対象地盤 硬質粘土, 細砂 (N値: 50以上)
 要求品質 一軸圧縮強度 $q_u = 0.5\text{N/mm}^2$ 以上
 透水係数 $k = 1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 以下

3.3.2 土質および施工条件

当該地は、松戸市内の丘陵部の斜面に位置する。土層構成は表層下部に、ローム層および粘性土層が6m程度の厚さであり、それ以深は均一な細砂層でN値30~50以上と硬く、層厚10m~15mとなっている。また、この細砂層には一部硬質粘性土が介在している。施工は、住宅地の中であるため振動や騒音などの環境に対する配慮が必要であった。

3.3.3 施工

本工事では、当初SMWで計画されていた土留め壁に対し、工期短縮および新工法であるCSM工法の施工性を評価する目的で土留め壁の一部にCSM工法を適用した。写真-4に施工状況写真を示す。

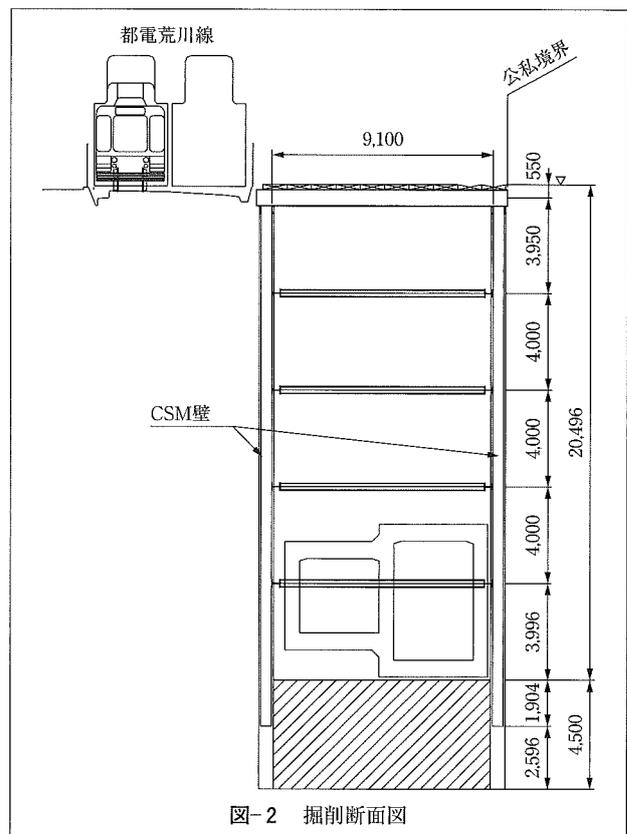


図-2 掘削断面図

4. 吊下げ方式のCSM機による施工例

4.1 土留め壁工事の例①

4.1.1 工事概要

発注者 東京地下鉄(株)
 受注者 大日本・株木建設工事共同企業体
 工事名 13号線雑司ヶ谷二工区土木工事
 工事場所 豊島区雑司が谷3丁目地先
 施工概要 延長49.244m, 壁長25.000m, 壁厚550mm
 掘削幅2.4m/エレメント
 応力材 H-440×300×11×18 L=21.5m
 84本
 対象地盤 粘性土層, 砂質土層, 礫層
 要求品質 透水係数 $k = 1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 以下

4.1.2 土質および施工条件

掘削断面図を図-2に示す。土質条件は、GL-10m程度まではロームおよび粘性土、GL-10~15mではN値40程度の礫層、GL-15~20mはN値50程度の東京砂層と東京礫層、それ以降はN値40程度の上総砂層と硬質地盤主体の土層構成となっている。また、地下水位はGL-9m程度である。施工条件は、都電荒川線が近接しており、公私境界とは離隔がほとんどない状態での施工であった。

4.1.3 施工

硬質地盤における工期短縮を目的としてCSM工法が採用された。また、周辺が住宅地であることから、吊下げ方式のクアトロカッターが選定された。写真-5に施工状況、写真-6に掘削後の壁面状況を示す。

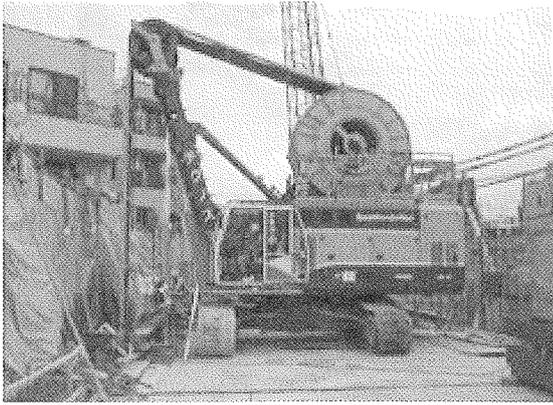


写真-5 13号線雑司ヶ谷二工区土木工事の施工状況

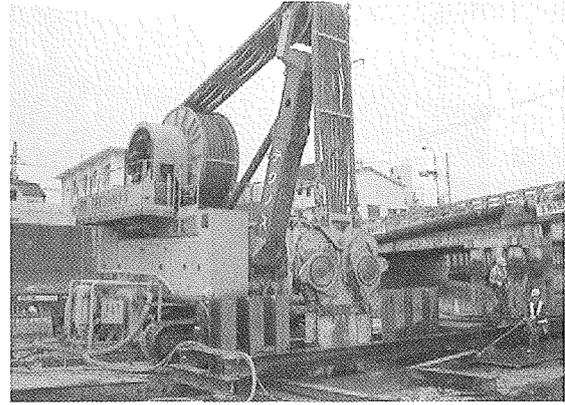


写真-7 正蓮寺東工区開削トンネル工事の施工状況



写真-6 13号線雑司ヶ谷二工区土木工事掘削後の壁面状況

4.2 土留め壁工事の例②

4.2.1 工事概要

発注者 阪神高速道路(株)

受注者 (株)間組

工事名 正蓮寺東工区開削トンネル工事

工事場所 大阪市此花区伝法1丁目

施工概要 ソイルセメント壁総延長 約400m, 壁長36~37.5m, 壁厚550mm・800mm, 掘削幅2.4m/エレメント, 応力材 H-390×300×10×16, H-700×300×13×24

対象地盤 軟弱粘性土層, 砂層, 砂礫, 硬質粘性土

要求品質 一軸圧縮強度 $q_u = 0.5\text{N/mm}^2$ 以上

透水係数 締切全体(土留め欠損部含む)

$k = 1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 以下

4.2.2 土質条件

代表的な設計断面における土質性状は、河川の埋立地であるためGL-6m程度までは改良土、GL-6m~8

mまでは沖積の緩い砂層、GL-8m~27mまでは厚い沖積の粘性土、GL-27m~29mまでは沖積の砂層、GL-29m~35mまでは礫層(N値60以上)、遮水壁の根入れは洪積の粘性土である。また、砂層・礫層の地下水が豊富であり、盤ぶくれ対策のためにソイルセメント壁の根入れを不透水層まで伸ばしている。

4.2.3 施工

河川の埋立直後の地盤における機械の安定性が十分確保できると同時に、1エレメントの施工面積が大きく35m以上のソイルセメント壁の造成が可能な吊下げ方式のCSM機(クアトロカッター)が採用された(現在施工中)。写真-7に施工状況を示す。

5. おわりに

ソイルセメント壁を造成する施工機械には多種多様なものがあり、工法名とセットであることが多い。CSM工法はこれらの中で最も新しい工法であり、機械台数は少ないものの工法の優位性より確実に施工実績を伸ばしてきている。また、欧州においても安定液掘削を伴う連続地中壁に代わり、CSM工法による原位置土攪拌混合ソイルセメント壁が河川堤防の補強や土留め壁として普及してきている。さらに、日本においてもCSM5型機(クアトロカッター)を改造したコンパクトな機械の開発・導入が進められ、近々都市土木分野の工事に適用される予定である。

■参考文献

- 1) パウアー工法研究会: CSM工法 標準積算資料, 平成19年度版.
- 2) 佐久間誠也, 梅本慶三, パウアー工法研究会: 大深度・低空頭型CSM工法の施工事例, 基礎工, Vol. 34, No.5, pp. 89~96, 2006.

ソイルセメント鋼製地中連続壁工法による自立式道路擁壁の施工

○ (株) 間組 賛助団体 佐々木 順一
 (株) 間組 正会員 佐久間 誠也
 (株) 間組 賛助団体 前田 博司
 佐清工業 (株) 澤村 祐介

1. はじめに

仙台市が整備を進めている都市計画道路北四番丁大衡線は、仙台都市圏における交通体系の骨格形成や、慢性化している交通渋滞の解消が期待される最重要路線のひとつである。当工事箇所は、掘削式の計画道路に近接して家屋が密集して立ち並んでいるため、仙台市では薄壁化・本体利用可能なソイルセメント鋼製地中連続壁を日本で初めて採用し、当企業が施工実績を修めた。

2. 工事概要

本工事はソイルセメント鋼製地中連続壁工法により自立式の道路擁壁（延長約135m、最大高さ約9m）を構築する工事である。TRD工法によりソイルセメント壁を原位置にて混合攪拌して造成し、鋼製地中連続壁用鋼材（NS-BOX）を建込み土留め壁を施工後、前面を掘削し擁壁（本体利用）とする道路改良工事である。

(1) 地質概要

工事地点はJR仙山線北山駅より東北方へ約500mの仙台市山手町地内に位置する。付近の地質は、主に新第三紀漸新世に形成された竜の口層（T）と称される岩盤層が広く分布する。岩層としては砂質凝灰岩～シルト質凝灰岩である。竜の口層の岩盤強度にはばらつきがあり、軟岩部分（D級）では一軸圧縮強度1N/mm²程度、中硬岩部（CL～CM級）では5～7N/mm²程度である。鋼製連壁による自立式の道路擁壁が成り立つのも鋼製連壁の根入れ部が軟岩であること。背面の地下水位を水抜き孔により低下させ、鋼製連壁に作用させないことによる。標準断面図を図-1に示す。

(2) 周辺環境（近接施工）

ソイルセメント鋼製地中連続壁の施工位置と民地境界との離隔は最小で17.5cm 民家壁とは1m程度しかない状況である（写真-1）。

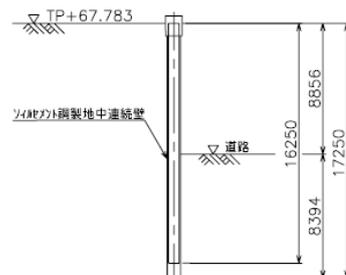


図-1 標準図



写真-1 近接施工状況

3. 施工状況

(1) 掘削精度の管理

地山掘削時、カッターポスト内部に装着した多点傾斜計からの信号をTRD施工機運転席にあるポストフォームモニター（PFM）画面に表示、1/250の管理基準値を外れた場合、赤く警告表示となり変位量が小さい内に修正掘削することで掘削精度を管理した。

(2) 芯材の建込み精度

芯材（NS-BOX）はH形鋼4辺にメス形かん合部を有するGH-Rとオス形かん合部を有するGH-Iから構成され、それぞれの部材をかん合しながら施工する必要がある。このようなかん合継手を有するので建込み精度がよく、かつ止水性が高いので地下壁の本体利用が可能となる。特に基準となる芯材の建込み精度は以降に連続する芯材の建込み精度に連鎖する。そのため、挿入式傾斜計の測定が出来るようガイドパイプを取付けて、X、Y2方向の建込み精度測定を実施した。基準芯材の建込み精度を図-3に示す。TRD工法の一般的なH形鋼建込み精度は1/250であるが、本工事の一般部のNS-BOXは面内1/250、面外1/500で非常によい精度であった。写真-2にNS-BOXの建込み終了後の天端状況を示す。

本工事では当初850mmの掘削溝に700mmのNS-BOXを建込んだが、NS-BOX先端が岩盤に引っかかる傾向があったため掘削幅を900mmに変更して掘削攪拌を行なった。ソイルセメント造成最大深さは17.5mでNS-BOX（長さL=14.25m）とH形鋼（長さL=2.0m）を事前に継いで1本として全長16.25mの部材を建込んだ。午前中にソイルセメント造成、午後にはNS-BOX建込みという作業日程を繰り返して工事を進め、平均5～6本/日のNS-BOXを建込んだ。

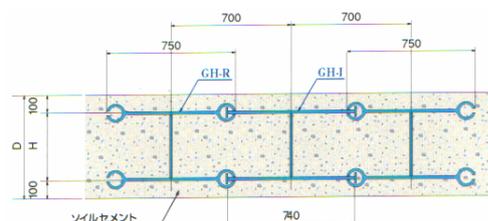


図-2 ソイルセメント鋼製連壁の標準構造

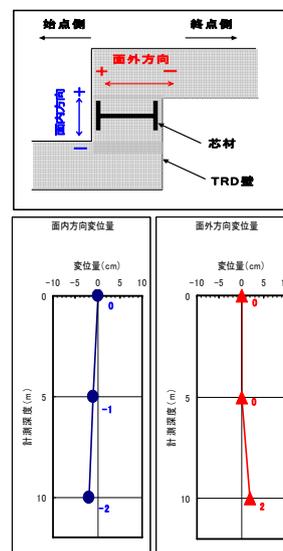


図-3 基準芯材建込み精度

(3) 擁壁部の前面掘削およびNS-BOX の変形

擁壁部の前面掘削の状況を写真-3に示す。最大擁壁高さ約9mのNS-BOX 頂部の設計変位量は29mm（許容変位量30mm）として設計された。施工途中の変位量は14mmであったが、この値が観測された時期は、降水量が多く背面水位はGL-3.5mまで上昇していた。水位は次第にGL-6mに減少し変位量も12mm程度と縮小した。NS-BOXには水抜き管を擁壁中段と下段の2段に1.4m間隔で取り付けることで背面水位を低下させ設計上水位は床付け以下としていた。なお、NS-BOXの表面はセメント成型版を取付け最終仕上げ（写真-4）を行い、その時の変位量は15mmであった。実測変位量が設計値より少ない理由として土質定数を安全側に評価した結果と考えられる。



写真-2 NS-BOX建込み後の天端状況



写真-3 鋼製連壁の前面掘削後の状況



写真-4 自立式擁壁完成状況

(4) 分散剤による発生泥土の低減

ソイルセメント壁の構築において発生する掘削泥土を低減する目的で、分散剤（レオフローA1000）を適用した。

分散剤の添加により、ソイルセメントの流動性を確保した上で水セメント比を下げ、泥土の発生量を低減するものである。基本配合および分散剤を用いた低減配合を表-1に示す。配合設計において約18%の発生泥土低減目標を設定し、必要以上に掘削液を注入しないように管理を行い18%の低減を達成した。本工事におけるTRD工法の施工サイクル図-4に示す。

表-1 配合表

	セメント	水	ペントケイ	分散剤	W/C	注入量
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	%/m ³
基本配合	275	933	30	0	339	1,034
低減配合	250	750	30	2.5	300	843
低減量	25	183	0	-2.5	-	191

*注入量低減 191 / 1034 = 0.18

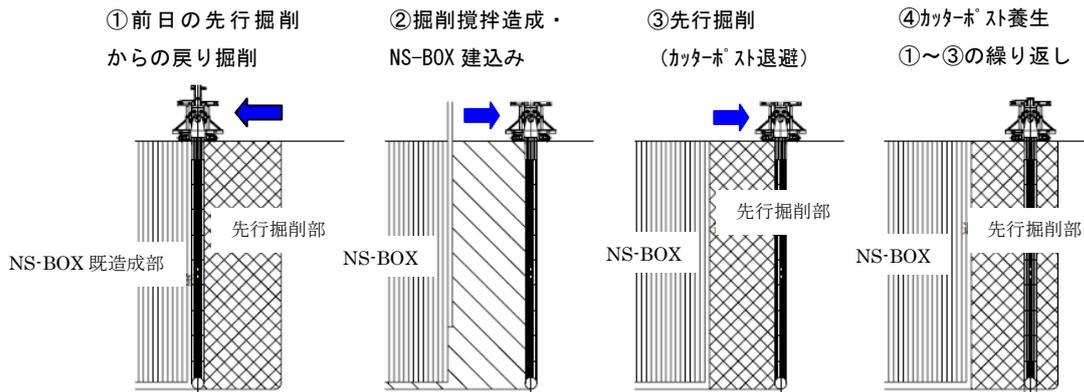


図-4 施工サイクル

4. あとがき

仙台市（当現場）のように比較的浅い部分から岩盤等の硬質な地盤が存在する地域において自立式の擁壁は有効である。自立式の擁壁には高い曲げ剛性が要求されるため、従来深礎杭と鋼製の横矢板を組み合わせた工法が多く採用されてきた。しかし今回のように擁壁背面に施工ヤードが設けられない場合、薄い壁でありながら高い剛性の壁を構築できる本工法は特に有効であり、施工面からも実証された。従来のコンクリート充填型の鋼製連壁工法と同様な床版接合法が可能であることから、今後地下駅、地下道路の壁体本体利用の構造物に採用することで、さらに利用価値を高めることが期待できる。

CSM工法「クアトロサイドカッター機」による大深度ソイルセメント壁の施工

—首都高速道路中央環状品川線大橋連結路工事—

原田 哲 伸・井 上 隆 広・今 若 弘 孝

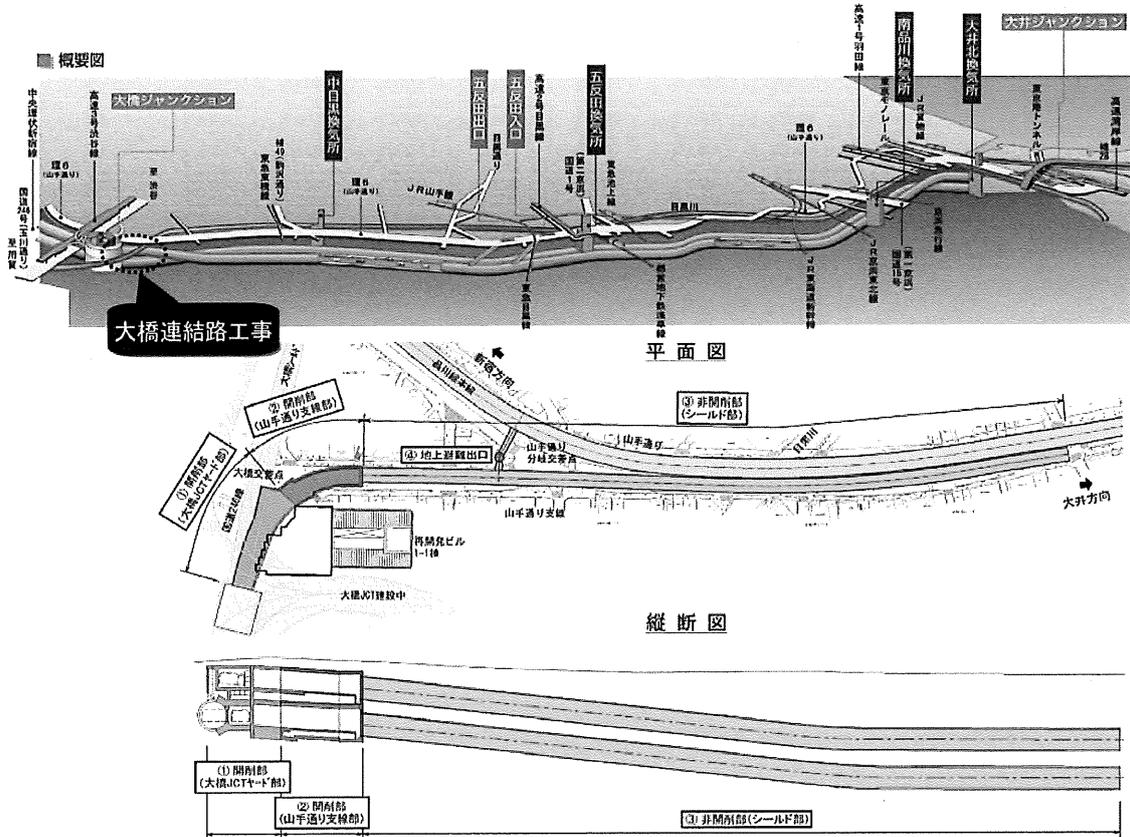
近年、大都市部における地下工事は大深度化が進み、硬い地盤への対応が必要になっている。また、施工条件として、地上交通を阻害せず（占有作業空間の最小化）、周辺住民にも不安感や圧迫感を与えない、よりコンパクトな施工機械へのニーズが高まっている。そこで、これらの課題を解決する工法として、硬質地盤への適用性が高く、作業幅6m以内で大深度ソイルセメント地下連続壁を構築できるCSM工法「クアトロサイドカッター機」を開発・導入し、首都高速道路中央環状品川線大橋連結路工事において採用した。現在、第1期の施工を完了したが、概ね想定した施工能力を発揮することができた。

キーワード：地下連続壁，ソイルセメント，等壁厚，水平多軸回転カッター，大深度，硬質地盤，低空頭，狭隘地

1. はじめに

首都高速道路中央環状品川線は、高速湾岸線から3

号渋谷線間を連絡する延長約9kmの地下トンネルであり、現在、鋭意建設が進められている。このうち、本工事は大橋ジャンクションへの連結路を開削工法お



図一 中央環状品川線・大橋連結路概要図

よび非開削工法により構築するものである(図-1)。

開削工事は、幹線道路(国246号、山手通り)を結ぶ山手通り支線に位置し、作業帯を占有して大規模な地下連続壁を構築する必要がある。しかし、道路幅員が狭いうえに、沿道には商店等が隣接しており、施工にあたっては、「1車線規制のみの狭隘な作業帯で施工が可能であること」、「周辺住民に与える圧迫感が小さいこと」、「硬質地盤でも施工が可能であること」が課題となった。そこで、これらの施工条件を満足する工法として、作業幅6m以内で大深度ソイルセメント地下連続壁を構築できるCSM工法「クアトロサイドカッター機」を開発・導入し、本工事において採用した。

本稿ではCSM工法「クアトロサイドカッター機」の概要と施工状況について報告する。

2. 工事概要

(1) 全体概要

工事名：中央環状品川線大橋連結路工事

工事場所：東京都目黒区青葉台二丁目～大橋一丁目

発注者：首都高速道路株式会社

施工者：株式会社 間組

工期：平成19年5月22日～平成25年6月30日

工事内容：大橋連結路(上層)L=550m, (下層)L=540m

- ①開削部：延長55m, 掘削幅13～20m, 掘削深度33m
- ②シールド部：延長(上層)475m, (下層)450m, シールド外径 ϕ 9.7m
- ③切開き部：延長(上層)210m, (下層)180m
- ④地上避難出口：掘削深度50m, 掘削外径 ϕ 5.1m
- ⑤その他：道路床版工, 耐火工

(2) 施工対象(土留め壁)

「クアトロサイドカッター機」は、シールド発進立坑の土留め壁の構築に適用した。当該立坑では上下2段の大断面シールドを施工するため、強度および剛性の高い土留め壁が必要であり、等壁厚ソイルセメント地下連続壁を採用した。土留め壁の諸元を以下に示す(図-2)。

- ・壁厚：900mm(等壁厚ソイルセメント地下連続壁)
- ・芯材：H700×300×13×24(間隔：600mm)
- ・壁長：35.5m
- ・施工延長：約38m(17エレメント)

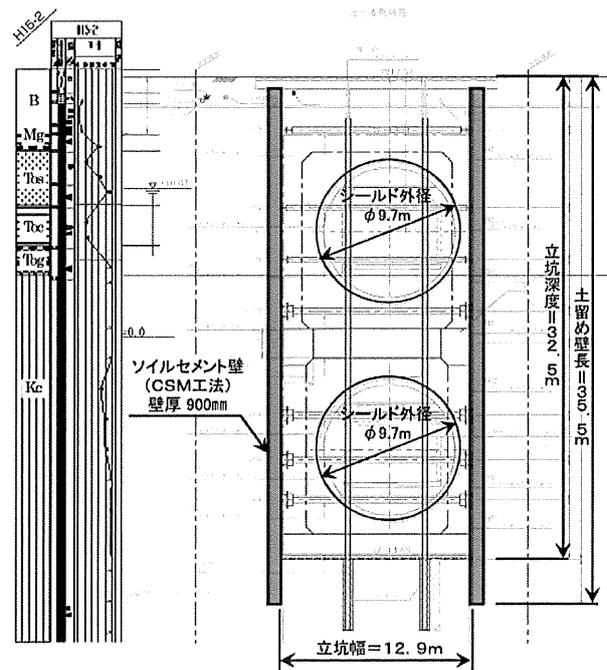


図-2 立坑概要図

(3) 土質条件

施工地点の地質は、新第三紀鮮新世～第四紀更新世の上総層群の泥岩(Kc)を基盤岩とし、その上位に第四紀更新世武蔵野礫層(Mg), 東京層砂質土(Tos), 粘性土(Toc), 東京礫層(Tog)および埋土, ローム層, 凝灰質粘性土などの地表層(B)が分布する。

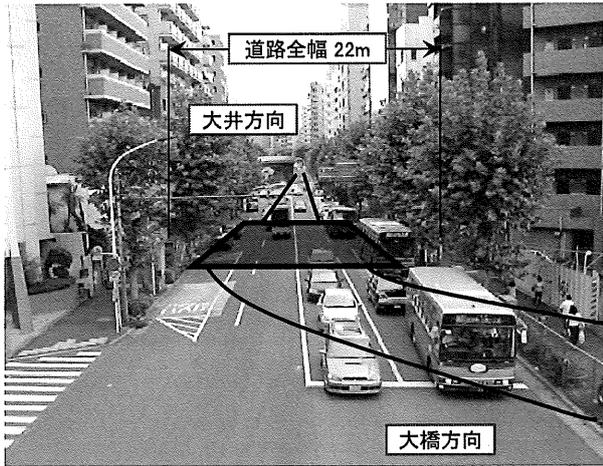
特に、泥岩($q_u = 3N/mm^2$ 程度)はGL-13m以深に厚く堆積しており、土留め壁の施工方法として硬質地盤での施工性、経済性に優れた工法を選定する必要がある。

(4) 施工環境

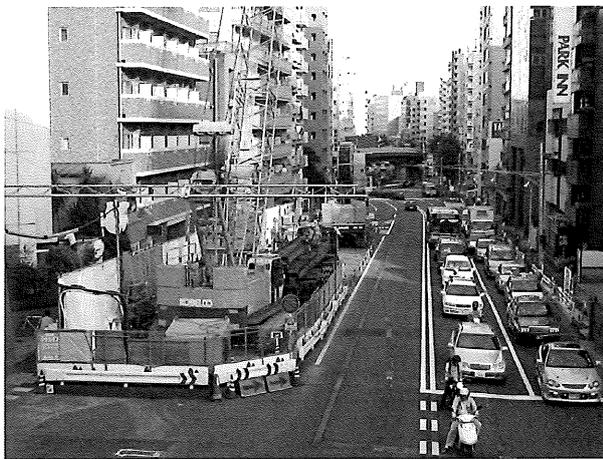
当該工事現場は、歩道を含めた道路幅員が22mと狭いうえに、沿道には飲食店や商店、集合住宅等が隣接しているため、施工に伴う交通渋滞や周辺に与える圧迫感、騒音、振動などについて慎重に配慮する必要がある。

そこで、現況4車線のうち3車線(大井方向1車線, 大橋方向2車線)を確保し、常設作業帯(幅6m×延長60m)で昼間に土留め壁の施工を行うことが条件となる(写真-1～写真-2)。

以上の施工条件を踏まえ、コンパクトな機械で、硬質地盤で大深度ソイルセメント地下連続壁を構築できる、「クアトロサイドカッター機」の開発に至った。



写真一 1 施工環境 (工事着手前)

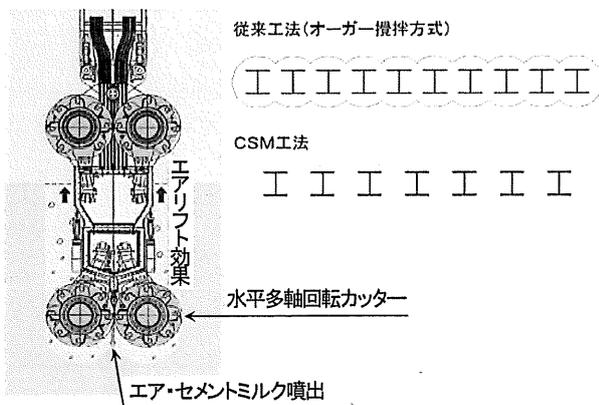


写真一 2 作業帯状況

3. CSM 工法「クアトロサイドカッター機」

(1) CSM 工法の概要

CSM 工法とは、水平多軸型地下連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター (Cutter) を用いて土 (Soil) とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合 (Mixing) し、



図一 3 CSM 工法概念図

等壁厚のソイルセメント壁体 (土留め壁・遮水壁等) を造成する工法である (図一 3)。その特長には原位置土攪拌混合法の特長に加え、以下のような点がある。

- ① 水平多軸回転カッターの高い掘削性能により、岩盤や硬質地盤においても先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ② エアブローを併用した高速回転カッターにより、高い攪拌性能を持つ。
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定でき、設計の自由度が高い。
- ④ 壁体がパネル状に造成されるため小さな円形立坑の施工が可能である。
- ⑤ 壁体の接続は止水性の高いカッティングジョイントとなる。
- ⑥ カッター部に内蔵した傾斜計により、リアルタイムでの掘削精度確認が可能である。

(2) 「クアトロサイドカッター機」の開発経緯

表一 1 に CSM 機の種類と実績を示す。

ケリーバー方式の CSM 機は 2003 年にドイツにおいて開発され、2004 年に BCM3 型が、続いて同方式の BCM5 型が日本に導入された。

しかし、ケリーバー方式の CSM 機は、大深度を施工する場合にケリーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けがたく、おのずと掘削深度に限界 (35 m 程度) があつた。そのため吊り下げ方式の開発が進められ、大深度施工が可能となる BCM10 型が、試験施工を経て日本に導入された (2005 年)。

掘削深度は従来機に比べ大幅に深くなり、機械高さ 15 m、機械長 9.5 m と小型化されたが、都市部での施工を想定した場合、さらなる小型化が望まれた。そして、コンパクト化された (機械高さ 6.5 m) クアトロカッター機 (低空頭対応型) が 2006 年に開発された。

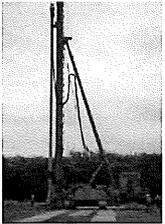
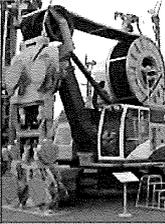
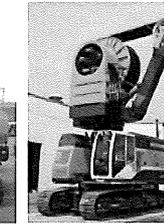
さらに今回、上部旋回台を設けて、カッターをベースマシンのサイドに配置することにより、狭隘地 (作業幅 6 m 以内) での施工が可能な「クアトロサイドカッター機」を考案、製作をバウアーマシーネン社に依頼し、本工事に導入した。

(3) 「クアトロサイドカッター機」の特長

「クアトロサイドカッター機」は、従来のケリーバー方式の特長に加えて次の特長がある。

- ① ホースドラムを利用した吊り下げ方式の採用により大深度 (最大 65 m) 施工が可能である。
- ② 転倒に対する安定性が高く、また周辺に対する圧迫感がない。

表一 CSM機の種類と実績

種類	ケリーバー方式		吊り下げ方式	
	2カッター		2カッター	クアトロカッター (4カッター)
機械姿写真				 
開発年：日本導入年度	2004年	2004年	2005年	2006年 (サイドカッター：2007年)
国内保有台数	1台	2台	0台 (海外2台)	2台 (サイドカッター：1台)
カッター	型式	BCM3型	BCM5型	BCM10型
	トルク	0-30 kN・m	0-45 kN・m	0-80 kN・m
ベース マシン	機械高	～35m程度	～35m程度	約15m (CBC25)
	機械長	10m程度	10m程度	9.5m程度
掘削深度 (実績最大深度)	～35m (20m)	～35m (31m)	～60m (60m)	～65m (60m)
掘削壁厚	500～700mm	500～900mm	640～1,200mm	500～1,200mm
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,800mm	2,400mm
施工実績 (試験施工除く)	3件 (海外19件)	4件 (海外33件)	1件 (海外7件)	11件 (海外0件)

2008年12月末現在：パワー工法研究会調べ (パワーマシーネン社製機械のみ)

- ③ 4カッター化により方向制御および掘削・攪拌性能が向上する (下部カッターは掘削・攪拌機能, 上部カッターは攪拌およびカッター引上げ時の抵抗低減機能を有する (写真-3))。
- ④ リアルタイムモニターによる掘削精度確認に加え, カッター部に姿勢制御フラップを装備しており, 壁直角方向およびねじれ方向の掘削精度が向上する (写真-4)。

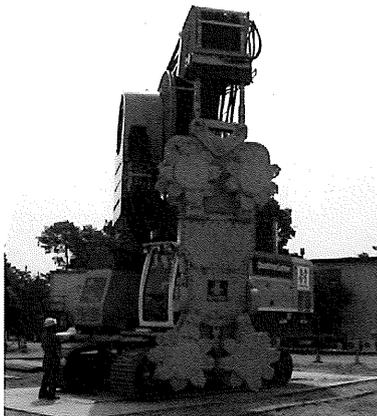


写真-3 旋回中のカッター

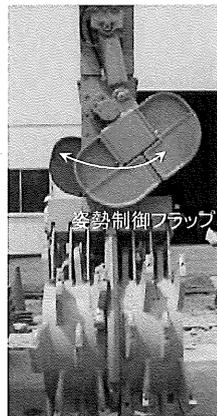


写真-4 姿勢制御装置

4. 施工状況

土留め壁の施工は, 作業帯を切替えながら3期に分割して行うが, 現在, 第1期の施工 (7エレメント) を終え, 「クアトロサイドカッター機」は概ね想定どおりの施工能力を発揮している。施工状況を写真-5に示す。

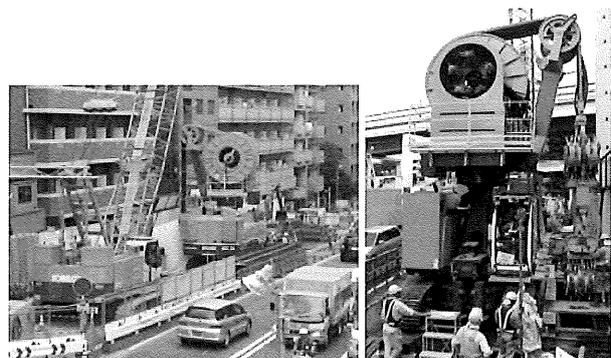


写真-5 「クアトロサイドカッター機」の稼働状況

(1) 施工サイクル

標準的な施工サイクルの実績を表-2に示す。

本工事は, 大深度, 硬質地盤での施工であるため掘削に長時間を要するうえに, 作業帯が狭小であることから芯材の継手が多く, 建込みに長時間を要する。そこで, 施工途中のセメント固化によるトラブルを避けるため, 掘削と造成を個別に行う2サイクル施工を適用した。

- ⑤ 低空頭, 狭隘地での施工が可能である (図-4)。

クアトロカッター機 : 機械高 6.5 m

クアトロサイドカッター機 : 機械幅 4.4 m + 壁厚 / 2

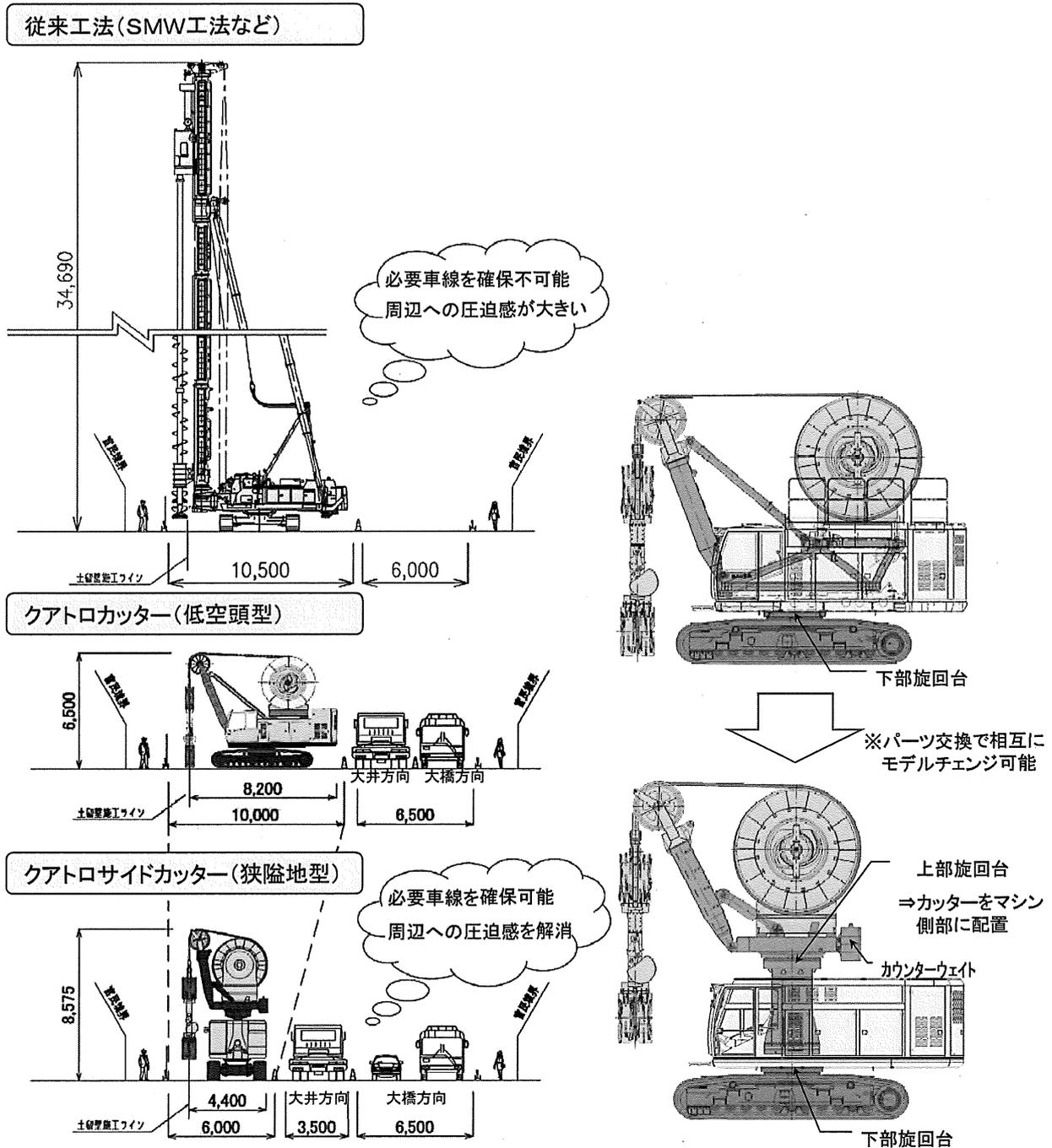


図-4 「クアトロサイドカッター機」の特長

表-2 施工サイクル実績 (2日/EL)

	作業内容	作業時間	備考
1日	点検・準備	8:15 ~ 9:00	壁厚 0.9 m, 掘削幅 2.4 m
	掘削・引上	9:00 ~ 17:00	掘削深度 38.5 m (余掘り含む)
	片付け	17:00 ~ 17:30	掘削速度 5.5 m/hr
2日	点検・準備	8:15 ~ 9:00	
	造成・引上	9:00 ~ 12:00	H-700 × 300 13 × 24@600
	段取替え	12:00 ~ 12:30	建込み 4 本
	芯材建込み	12:30 ~ 18:30	継手 3 箇所 / 本
	片付け	18:30 ~ 19:00	

2サイクル施工とは、1サイクル目にベントナイトを主体とする掘削液により地山を泥土状にほぐし、2サイクル目でセメント固化液を素早く混練して、フレッシュなソイルセメントに芯材を建込む方法である。

(2) 施工品質

壁体の掘削精度およびソイルセメントの圧縮強度は、表-3に示すとおり良好な結果が得られた。

表-3 掘削精度および圧縮強度

	管理値	実績
掘削精度	1/300	面内 1/440 ~ 2,060 面外 1/825 ~ 2,090
一軸圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)	0.50	1.12 ~ 2.56

(3) 掘削・固化液の配合

掘削・固化液の配合は、試験練りの結果を基に表-4に示す配合を標準とした（設計基準強度 0.5 N/mm²）。

表-4 掘削・固化液計画配合 (kg/対象土量 1 m³当り)

	セメント	ベントナイト	水	遅延剤	分散剤	注入率
掘削液	25	20	400	0	0	41.6%
固化液	200	5	200	8	2	27.7%

これに対して、実施工では掘削能率を優先した結果、掘削液の注入率は約 60% となり、その分、排泥量も増加した。

また、施工時期は真夏の炎天下であり、固化液混合土のテーブルフローの低下が速く、遅延剤の添加量は約 1.5 倍を要した。

5. おわりに

本工事において CSM 工法「クアトロサイドカッター機」を開発・導入し、実際に作業幅 6 m という極めて狭隘な施工条件で、硬質地盤に大深度ソイルセメン

ト地下連続壁の構築を行い、概ね良好な施工結果が得られた。

一方、掘削液や遅延剤は計画より多量に必要であった。今後、継続エレメントの施工データも含めて詳細な分析を行い、掘削・固化液の配合や注入率、遅延剤の添加量の決定手法などソフト面の合理化を図りたい。

本稿が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

JCMA

（参考文献）

- 1) 佐久間誠也：ケーリーバーおよび吊り下げ方式の CSM 機と施工事例、基礎工 (2006.3)

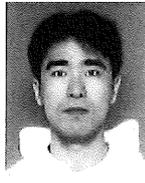
【筆者紹介】



原田 哲伸 (はらだ てつお)
首都高速道路(株)
東京建設局 大橋建設グループ



井上 隆広 (いのうえ たかひろ)
(株)間組
関東土木支店 大橋出張所



今若 弘孝 (いまわか ひろたか)
(株)間組
関東土木支店 大橋出張所

狭隘地における 大深度地下連続壁の施工

CSM 工法クアトロサイドカッタ機の開発と品川線大橋連結路工事への適用

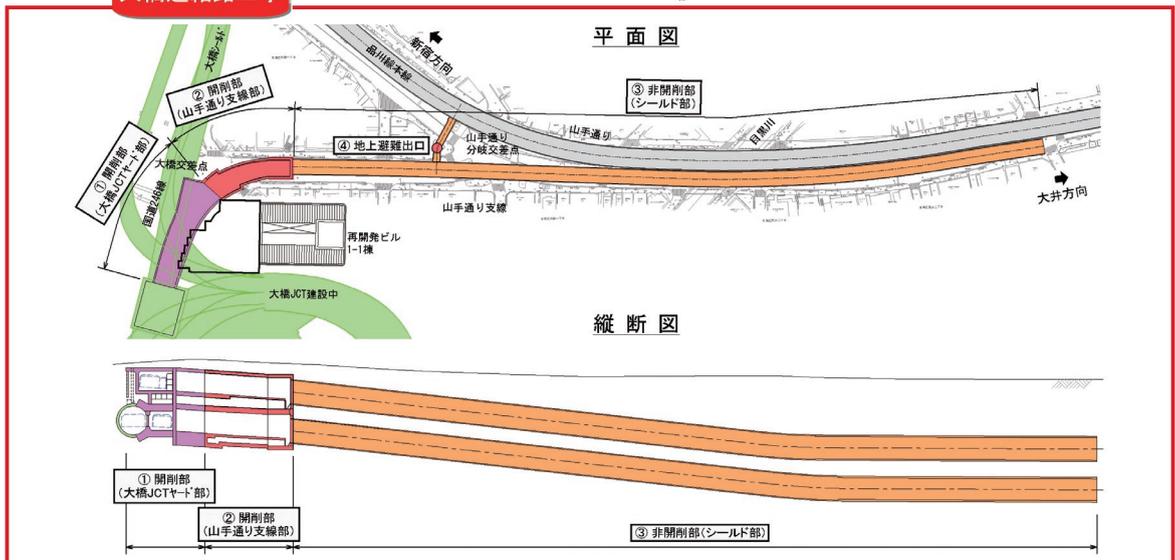
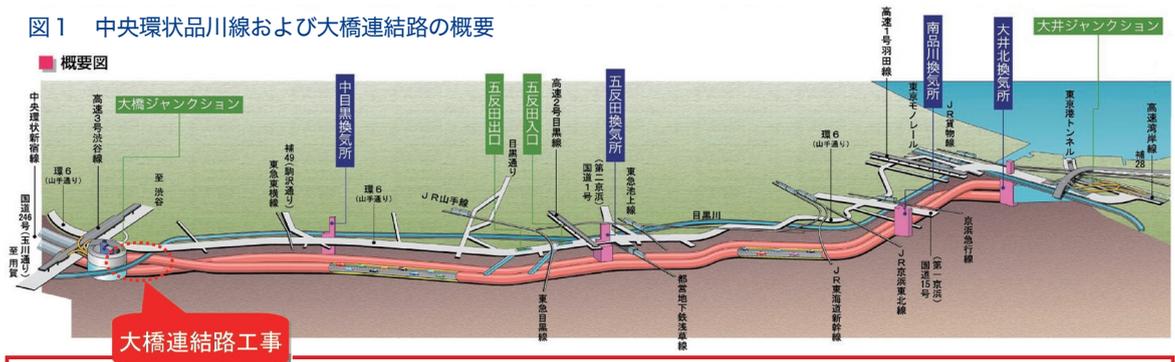
首都高速道路(株) 東京建設局 大橋建設グループ 工事長 原田哲伸
(株)間組 関東土木支店 大橋出張所 井上隆広
岩倉孝之

はじめに

現在、首都高速道路(株)では中央環状品川

線の建設を進めています。中央環状品川線は、高速湾岸線から3号渋谷線間を連携し、中央環状新宿線(山手トンネル)に接続する延長約9kmの地下トンネルであり、このうち本工事は

図1 中央環状品川線および大橋連結路の概要



大橋ジャンクションへの連結路を開削工法および非開削工法により構築するものです(図1)。

開削工事は、幹線道路(国246号、山手通り)を結束する山手通り支線に位置し、作業帯を占用して大規模な地下連続壁を構築する必要があります。しかし、道路幅員が狭い上に沿道には商店等が隣接しており、施工に当たっては「1車線規制のみの狭隘な作業帯で施工が可能であること」、「周辺住民に与える圧迫感が小さいこと」、「硬質地盤でも施工が可能であること」が課題になりました。そこで、これらの施工条件を満足する工法として施工者からの技術提案を評価し、作業幅6m以内で大深度ソイルセメント地下連続壁の構築が可能なCSM工法「クアトロサイドカッタ機」を本工事において採用しました。

本稿では「クアトロサイドカッタ機」の概要と施工状況について報告します。

工事概要

1 全体概要

- 工 事 名：中央環状品川線大橋連結路工事
工 事 場 所：東京都目黒区青葉台二丁目～大橋一丁目
発 注 者：首都高速道路(株)
施 工 者：(株)間組
工 期：平成19年5月22日～平成25年6月30日
工 事 内 容：大橋連結路
(上層)L=550m
(下層)L=540m
①開 削 部：延長55m、掘削幅13～20m、掘削深度33m
②シールド部：延長(上層)475m、(下層)450m、シールド外径φ9.7m
③切 開 き 部：延長(上層)210m、(下層)180m

- ④地上避難出口：掘削深度50m、掘削径φ5.1m
⑤そ の 他：道路床版工、耐火工

2 施工対象(土留め壁)

「クアトロサイドカッタ機」は、シールド発進立坑の土留め壁の構築に適用しました。当該立坑では上下2段の大断面シールドを施工するため、強度および剛性の高い土留め壁が必要であり、等壁厚ソイルセメント地下連続壁を採用しました。土留め壁の諸元を以下に示します(図2)。

- ・壁厚：900mm(等壁厚ソイルセメント地下連続壁)
- ・芯材：H-700×300×13×24(間隔：600mm)
- ・壁長：35.5m
- ・施工延長：約38m(17エレメント)

3 土質条件

施工地点の地質は、新第三紀鮮新世～第四紀更新世の上総層群の泥岩(Kc)を基盤岩とし、その上位に第四紀更新世武蔵野礫層(Mg)、東京層砂質土(Tos)、粘性土(Toc)、東京礫層(Tog)および埋め土、ローム層、凝灰質粘性土などの地表層(B)が分布しています。

特に、泥岩($q_u=3\text{N}/\text{mm}^2$ 程度)はGL-13m以深に厚く堆積しており、土留め壁の施工方法として硬質地盤での施工性、経済性に優れた工法を選定する必要があります。

4 施工環境

当該工事現場は、歩道を含めた道路幅員が22mと狭いうえに、沿道には飲食店や商店、集合住宅等が隣接しているため、施工に伴う交通渋滞や周辺に与える圧迫感、騒音、振動などについて慎重に配慮する必要があります。

そこで、現況4車線のうち3車線(大井方向1車線、大橋方向2車線)を確保し、常設作業帯(幅6m×延長60m)で昼間に土留め壁の施工を行うことが条件となります(写真1～写



写真2 作業帯状況

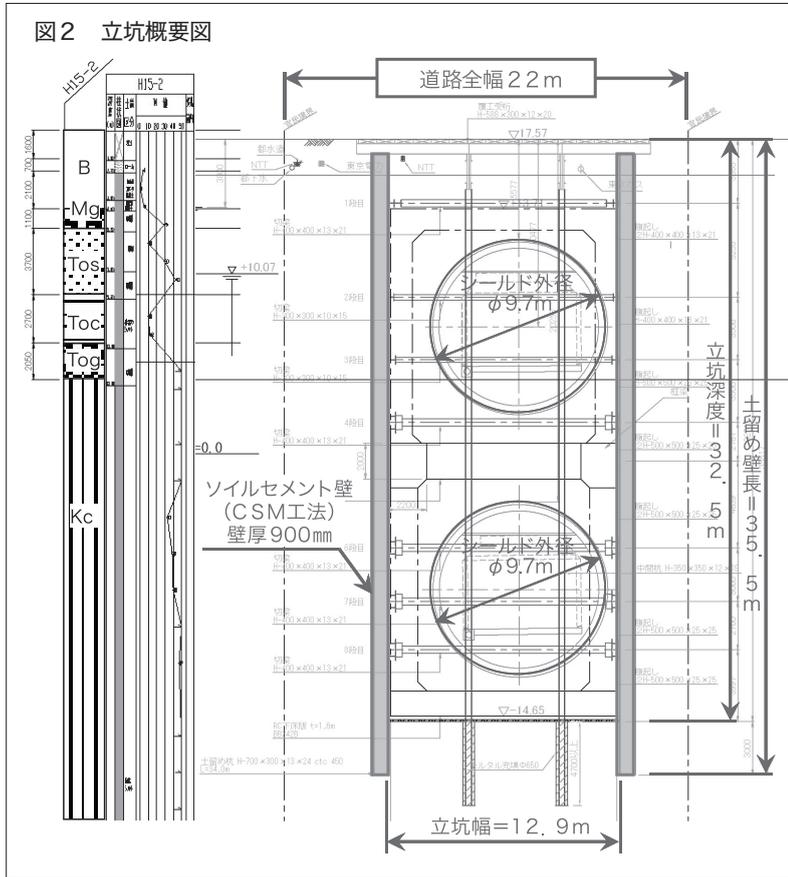


図2 立坑概要図

CSM工法「クアトロサイドカッタ機」

1 CSM工法の概要

CSM工法とは、水平多軸型地下連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッタ (Cutter) を用い、土 (Soil) とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合 (Mixing) して等壁厚のソイルセメント壁体 (土留め壁・遮水壁等) を造成する工法です (図3)。

真2)。

以上の施工条件を踏まえ、コンパクトな機械で、硬質地盤に大深度ソイルセメント地下連続壁を構築できる、「クアトロサイドカッタ機」の採用に至りました。

その特長には原位置土攪拌混合工法の特長に加え、以下のような点があります。

- ①水平多軸回転カッタの高い掘削性能により、岩盤や硬質地盤においても先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できます。

写真1 施工環境 (工事着手前)

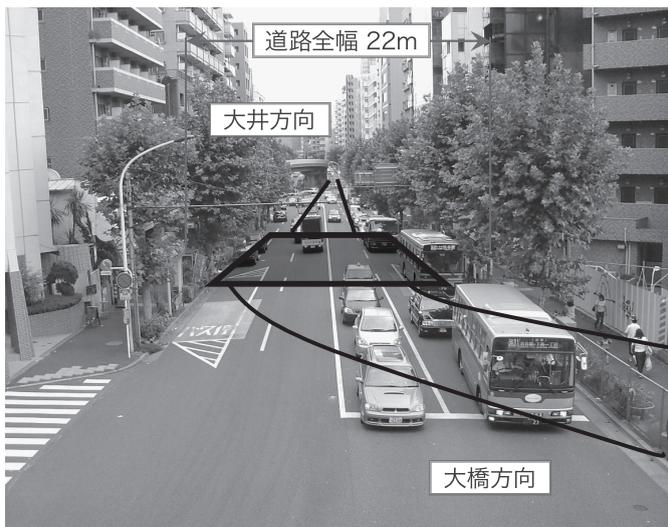
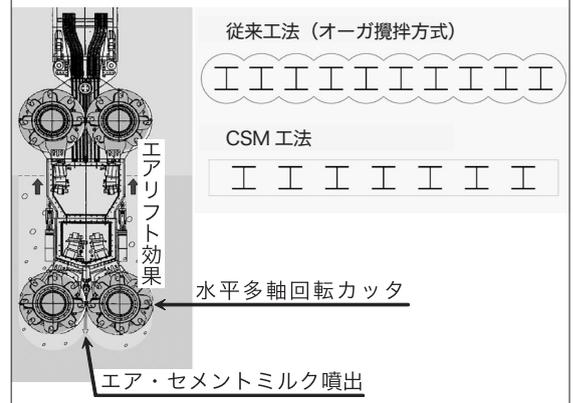


図3 CSM工法概念図



- ②エアブローを併用した高速回転カッタにより、高い攪拌性能を有しています。
- ③等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定でき、設計の自由度が高まります。
- ④壁体がパネル状に造成されるため小さな円形立坑の施工が可能です。
- ⑤壁体の接続は止水性の高いカッティングジョイントとなります。
- ⑥カッタ部に内蔵した傾斜計により、リアルタイムでの掘削精度確認が可能です。

ツにおいて開発され、2004年にBCM3型が、続いて同方式のBCM5型が日本に導入されました。

しかし、ケリーバー方式のCSM機は、大深度を施工する場合にケリーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けがたく、おのずと掘削深度に限界(35m程度)がありました。そのため吊下げ方式の開発が進められ、大深度施工が可能なBCM10型が、試験施工を経て日本に導入されました(2005年)。

掘削深度は従来機に比べ大幅に深くなり、機械高さ15m、機械長9.5mと小型化されましたが、都市部での施工を想定した場合、さらなる小型化が望まれました。そして、コンパクト化された(機械高さ6.5m)クアトロカッタ機(低

2 「クアトロサイドカッタ機」の開発経緯

表1にCSM機の種類と実績を示します。
ケリーバー方式のCSM機は2003年にドイ

表1 CSM機の種類と実績

種類	ケリーバー方式		吊り下げ方式		
	2カッタ		2カッタ	クアトロカッタ(4カッタ)	
機械姿写真					
開発年：日本導入年度	2004年	2004年	2005年	2006年(サイドカッタ：2007年)	
国内保有台数	1台	2台	0台(海外2台)	2台(サイドカッタ：1台)	
カッタ	型式	BCM3型	BCM5型	BCM10型	
	トルク	0～30kN・m	0～45kN・m	0～80kN・m	0～45kN・m
ベースマシン	機械高	～35m程度	～35m程度	約15m(CBC25)	約6.5m(サイドカッタ：約8.6m)
	機械長	10m程度	10m程度	9.5m程度	8.0m程度
掘削深度(実績最大深度)	～35m(20m)	～35m(31m)	～60m(60m)	～65m(60m)	
掘削壁厚	500～700mm	500～900mm	640～1,200mm	500～1,200mm	
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,800mm	2,400mm	
施工実績(試験施工除く)	3件(海外19件)	4件(海外33件)	1件(海外7件)	11件(海外0件)	

2008年12月末現在：パウアー工法研究会調べ(パウアーマシーネン社製機械のみ)



写真3 旋回中のカット

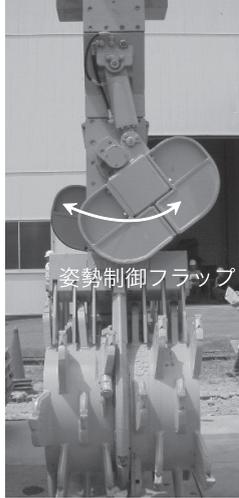


写真4 姿勢制御装置



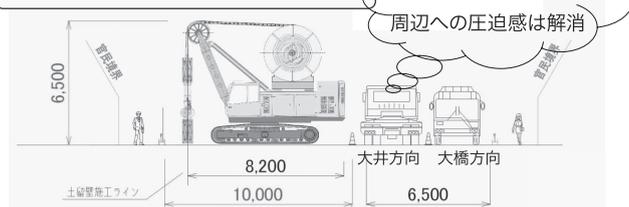
写真5 「クアトロサイドカッター機」の稼働状況

図4 「クアトロサイドカッター」の特長

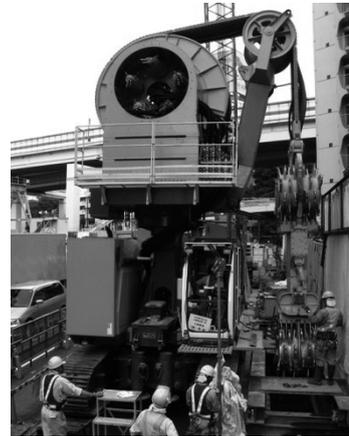
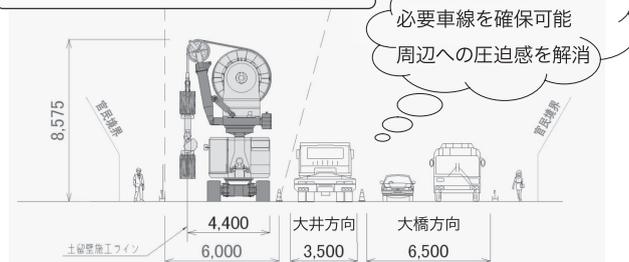
従来工法 (SMW工法など)



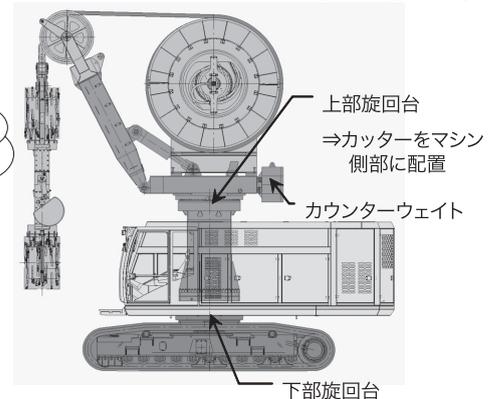
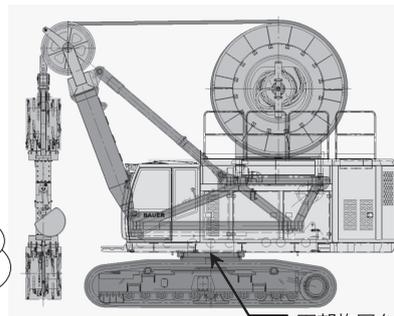
クアトロカッター (低空頭型)



クアトロサイドカッター (狭路地型)



《サイドカッターへの改良のポイント》



空頭対応型) が2006年に開発されました。

さらに今回、(株) 間組は上部旋回台を設けて、カッタをベースマシンのサイドに配置することにより、狭隘地(作業幅6m以内)での施工が可能な「クアトロサイドカッタ機」を考案、製作をバウアーマシーネン社に依頼し、本工事に導入しました。

3 「クアトロサイドカッタ機」の特長

「クアトロサイドカッタ機」は従来のケリーバー方式に加えて次の特長があります。

- ①ホースドラムを利用した吊下げ方式の採用により大深度(最大65m)施工が可能です。
- ②転倒に対する安定性が高く、また周辺環境に対して圧迫感を与えません。
- ③4カッタ化により方向制御および掘削・攪拌性能が向上します(下部カッタは掘削・攪拌機能を、上部カッタは攪拌機能およびカッタ引上げ時の抵抗低減機能を有しています(写真3))。
- ④リアルタイムモニタによる掘削精度確認に加え、カッタ部に姿勢制御フラップを装備しており、壁直角方向およびねじれ方向の掘削精度が向上します(写真4)。
- ⑤低空頭、狭隘地での施工が可能です(図4)。

クアトロカッタ機：機械高6.5m

クアトロサイドカッタ機：機械幅4.4m+ 壁厚/2

施工状況

土留め壁の施工は、作業帯を切り替えながら3期に分割して行いますが、現在、第2期までの施工(10エレメント)を終え、「クアトロサイドカッタ機」はおおむね想定通りの施工能力を発揮しています。施工状況を写真5に示します。

1 施工サイクル

標準的な施工サイクルの実績を表2に示します。

本工事は、大深度、硬質地盤での施工であるため掘削に長時間を要するうえに、作業帯が狭小であることから芯材の継手が多く、建込みに長時間を要します。そこで、施工途中のセメント固化によるトラブルを避けるため、掘削と造成を個別に行う2サイクル施工を適用しました。

2サイクル施工とは、1サイクル目にベントナイトを主体とする掘削液により地山を泥土状にほぐし、2サイクル目でセメント固化液を素早く混練して、フレッシュなソイルセメントに芯材を建て込む方法です。

2 掘削・固化液の配合

2サイクル施工における掘削・固化液の配合の考え方を図5に示します。ここで、(I)掘削液と地山が均質に混練され、排出スラリーと残留スラリーは同一配合になる、(II)固化液と残留スラリーは均質に混練され、排出ソイルセメントと残留ソイルセメントは同一配合になると考えています。

表3に実施した配合を示します(設計基準強度 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$)。計画配合に対して実施工では掘削能率を考慮し、掘削液の注入率を約1.5倍にして施工しました。また、施工時期は真夏の

表2 施工サイクル実績(2日/EL)

	作業内容	作業時間	備考
1日目	点検・準備	8:15~9:00	壁厚0.9m, 掘削幅2.4m 掘削深度38.5m(余掘り含む) 掘削速度5.5m/h
	掘削・引上げ	9:00~17:00	
	片付け	17:00~17:30	
2日目	点検・準備	8:15~9:00	H-700×30013×24@600 建込み4本 継手3箇所/本
	造成・引上げ	9:00~12:00	
	段取替え	12:00~12:30	
	芯材建込み	12:30~18:30	
	片付け	18:30~19:00	

図5 2サイクル施工における配合の考え方

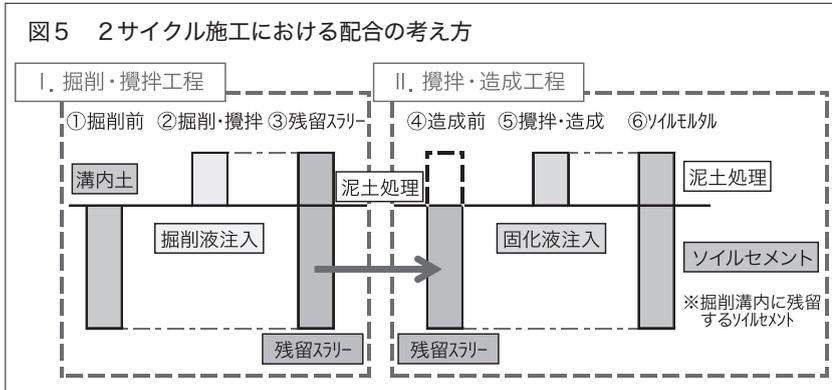


表3 掘削・固化液の配合 (kg/対象土量 1m³当たり)

	セメント	ベントナイト	水	遅延剤	分散剤	注入率
掘削液	38 (25)	30 (20)	600 (400)	0 (0)	0 (0)	62.4% (41.6%)
固化液	162 (200)	5 (5)	222 (200)	16 (8)	0 (2)	29.1% (27.6%)

注) ()は室内試験に基づく計画配合

図6 水セメント比と強度 (σ_{28}) の関係

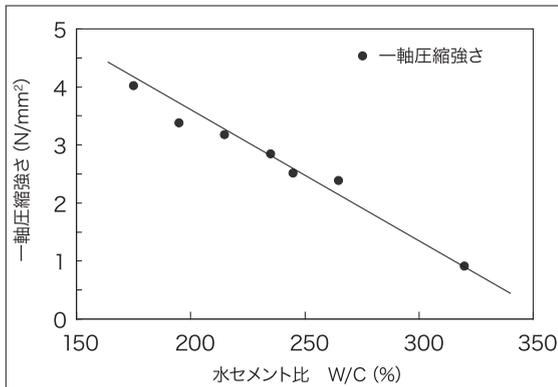


表4 掘削精度および圧縮強度

	管理値	実績
掘削精度	1/300	面内 1/440 ~ 2,060 面外 1/825 ~ 2,090
一軸圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)	0.5	1.12 ~ 2.56

炎天下であり、ソイルセメントのテーブルフローの低下が速く、遅延剤の添加量は約2倍を要しました。

なお、施工状況に応じて掘削液の配合や注入量を変更すると最終的な残留ソイルセメントの配合に影響

響するため、本工事では室内試験で把握した水セメント比と強度の関係(図6)に基づいて、目標強度を満足するように固化液の配合や注入量を管理しました($\sigma_{28} \geq 1\text{N/mm}^2 \rightarrow \text{W/C} \leq 320\%$)。

3 施工品質

壁体の掘削精度およびソイルセメントの圧縮強度は、表4に示すとおり良好な結果が得られています。

おわりに

本工事においてCSM工法「クアトロサイドカッター機」を初めて採用し、実際に作業幅6mという極めて狭隘な施工条件で、硬質地盤に大深度ソイルセメント地下連続壁の構築を行い、おおむね良好な施工結果が得られました。

一方、掘削液や遅延剤は計画より多量に必要になりました。今後、継続して施工するエレメントのデータも含めて詳細な分析を行い、掘削・固化液の配合や注入率、遅延剤の添加量の最適化などソフト面の合理化を図りたいと考えています。

本稿が今後の類似工事の参考になれば幸いです。

参考文献

- 1) 佐久間誠也：ケリーバーおよび吊り下げ方式のCSM機と施工事例、基礎工、2006年3月

低空頭・狭隘地型掘削機による大深度地下連続壁の施工

首都高速道路(株) 正会員 齊藤亮 正会員 石田高啓 潮晃司

○(株) 間組 正会員 井上隆広* 岩倉孝幸*

1. はじめに

首都高速道路中央環状品川線は、高速湾岸線から3号渋谷線間を連携する延長約9kmの地下トンネルであり、現在、鋭意建設が進められている。このうち、本工事は大橋ジャンクションへの連結路を開削工法および非開削工法により構築するものである。

開削工事は、幹線道路(国246号、山手通り)を結束する山手通り支線に位置し、作業帯を占用して大規模な地下連続壁を構築する必要がある。しかし、道路幅員が狭いうえに、沿道には商店等が隣接しており、施工にあたっては、「1車線規制のみの狭隘な作業帯で施工が可能であること」、「周辺住民に与える圧迫感が小さいこと」、「硬質地盤でも施工が可能であること」が課題となった。そこで、これらの施工条件を満足する工法として、作業幅6m以内で大深度ソイルセメント地下連続壁を構築できるCSM工法「クアトロサイドカッター機」を開発・導入し、試験施工を経て本工事に採用した。

本稿ではCSM工法「クアトロサイドカッター機」の概要と試験施工について報告する。

2. CSM工法「クアトロサイドカッター機」

CSM工法とは、水平多軸型地下連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター(Cutter)を用いて土(Soil)とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合(Mixing)し、等壁厚のソイルセメント壁体(土留め壁・遮水壁等)を造成する工法である(図-1)。その特長には従来の原位置土攪拌混合工法の特長に加え、以下のような点がある。

- ①高い掘削性能により、岩盤や硬質地盤においても先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ②エアブローを併用した高速回転カッターにより、高い攪拌性能を持つ。
- ③等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定でき、設計の自由度が高い。

- ④止水性の高いカッティングジョイントである。
- ⑤カッター内蔵傾斜計によりリアルタイムで掘削精度を確認でき、姿勢制御フラップおよび4カッター個別制御により、方向修正および掘削・攪拌性能が向上する。
- ⑥ホースドラムを利用した吊り下げ方式の採用により大深度(最大65m)施工が可能である。
- ⑦低空頭、狭隘地での施工が可能である(図-2)。また、転倒に対する安定性が高く、周辺に対する圧迫感がない。

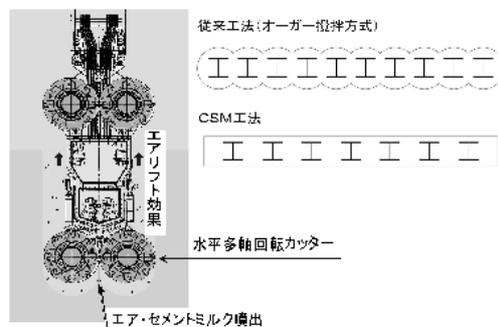


図-1 CSM工法の概要

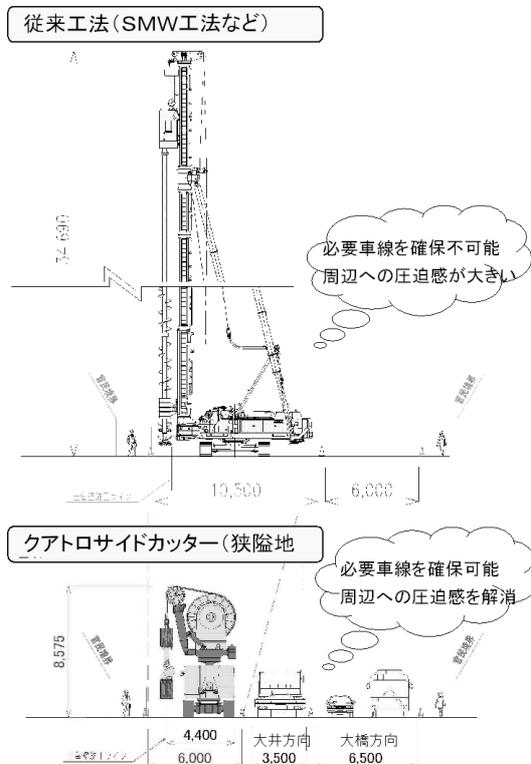


図-2 クアトロサイドカッター機の特長

キーワード: 地下連続壁, ソイルセメント, 等壁厚, 水平多軸回転カッター, 大深度, 硬質地盤, 低空頭, 狭隘地

*連絡先(東京都目黒区大橋 1-8-3・TEL03-5489-6366・FAX03-5489-6367)

3. 試験施工

本掘削機は前述した特長を有するが、新しい技術であり、大深度および硬質地盤での施工実績が少ないため、実施前に先立ち、「硬質地盤を含む砂質土および粘性土などにおいて、掘削精度と壁体品質を確認すること」を目的として試験施工を行った(2008年6月)。

図-3にエレメント割付図を、図-4に土質柱状図を示す。施工規模は深度40.0m×壁厚900mm×4ELであり、地盤はローム層、粘土層、細砂層の互層から成る。また、過去の試験施工で造成されたソイルセメント壁(2005年施工、深度40m、 $q_u=1\sim 4\text{N/mm}^2$ 程度)を利用して、実施施工の対象である硬質地盤(固結シルト、 $q_u=1\sim 3\text{N/mm}^2$ 程度)を模擬した(エレメント①)。なお、硬質地盤での長時間施工におけるリスク対策として2パス施工とし、エレメント④において片押し施工も実施した。

試験結果は表-1に示すとおり良好であり、実施施工への適用性が確認された。

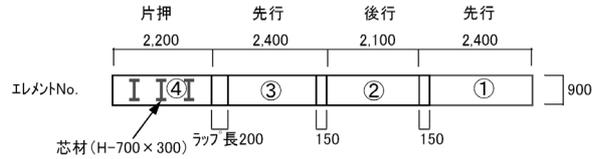


図-3 エレメント割付図

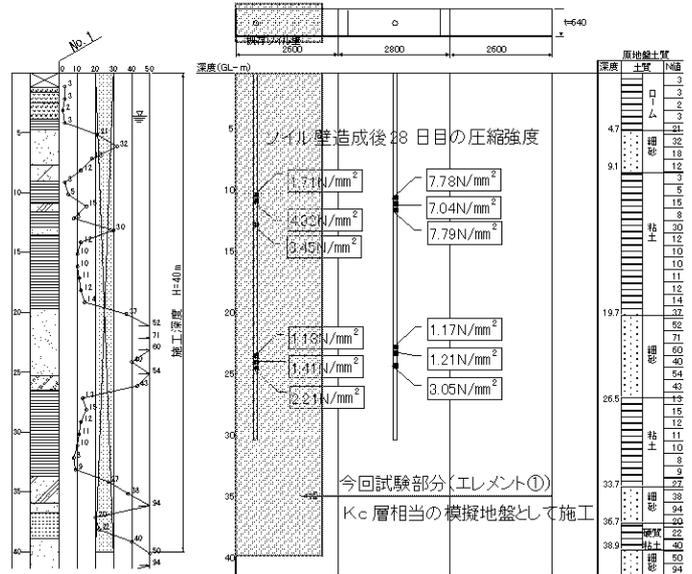


図-4 土質柱状図

4. おわりに

近年、大都市部における地下工事は大深度化が進み、硬い地盤への対応が必要になっている。また、施工条件として、地上交通を阻害せず(占有作業空間の最小化)、周辺住民にも不安感や圧迫感を与えない、よりコンパクトな施工機械へのニーズが高まっている。本掘削機はこのようなニーズに対して適用性が高く、今後の類似工事の施工計画立案に役に立つものと考えている。



写真-1 現場稼働状況

表-1 試験結果の概要

確認項目		試験結果	評価
掘進精度	鉛直精度	X(面内)方向:1/303~1/1400 Y(面外)方向:1/633~1/1214	問題なし (片押ELも遜色なし)
	掘削深度	深度40mを掘削・造成	問題なし
壁体品質	強度	GL-10m 付近: $\sigma_{28} = 3.2\text{ N/mm}^2$ GL-20m 付近: $\sigma_{28} = 5.3\text{ N/mm}^2$ GL-35m 付近: $\sigma_{28} = 4.4\text{ N/mm}^2$	管理値 $\sigma_{28} \geq 0.5\text{ N/mm}^2$ を満足
	透水性	GL-10m 付近: $k_s = 2.19 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ GL-20m 付近: $k_s = 9.51 \times 10^{-8}\text{ cm/s}$ GL-35m 付近: $k_s = 4.61 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$	管理値 $k_s \leq 1 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$ を満足
	壁面状況	継手部の連続性を確認	問題なし
掘削工	掘削速度	掘削速度: 先行 EL 平均 5.1m/hr(カッター下降) 後行 EL 平均 3.5m/hr(") 造成速度: 全体 EL 平均 18.3m/hr(")	先行 EL は概ね想定どおりで問題なし。 後行、片押 EL は先行 EL が軟らかいためカッターの姿勢制御に時間を要した。
芯材 建込み工	施工性	建込み時間 : 平均 82 分/本 継手締結時間: 平均 22 分/箇所	問題なし
その他	長時間対応	芯材を円滑に挿入、十分な遅延効果を確認	問題なし
	施工性	衝突、はみ出し等なく、幅 6m の作業帯で施工	問題なし

狭隘地における大深度地下連続壁の施工

池上 徹*1、井上 隆広*2、岩倉 孝幸*3

1. はじめに

首都高速中央環状品川線は、高速湾岸線から3号渋谷線間を連携し、中央環状新宿線（山手トンネル）に接続する延長約9kmの地下トンネルである。このうち本工事は大橋ジャンクションへの連結路を開削工法および非開削工法により構築するものである（図1.1）。

開削工事は、幹線道路（国道246号、都道山手通り）を結束する山手通り支線に位置し、作業帯を占有して大規模な地下連続壁を構築する必要がある。しかし、道路幅員が狭い上に沿道には商店等が隣接しており、施工にあたっては「1車線規制のみの狭隘な作業帯で施工が可能であること」、「周辺住民に与える圧迫感が小さいこと」、「硬質地盤でも施工が可能であること」が課題になった。そこで、これらの施工条件を満足する工法として、作業帯幅6m以内で大深度ソイルセメント地下連続壁の構築が可能なCSM工法「クアトロサイドカッター機」を本工事において採用した。

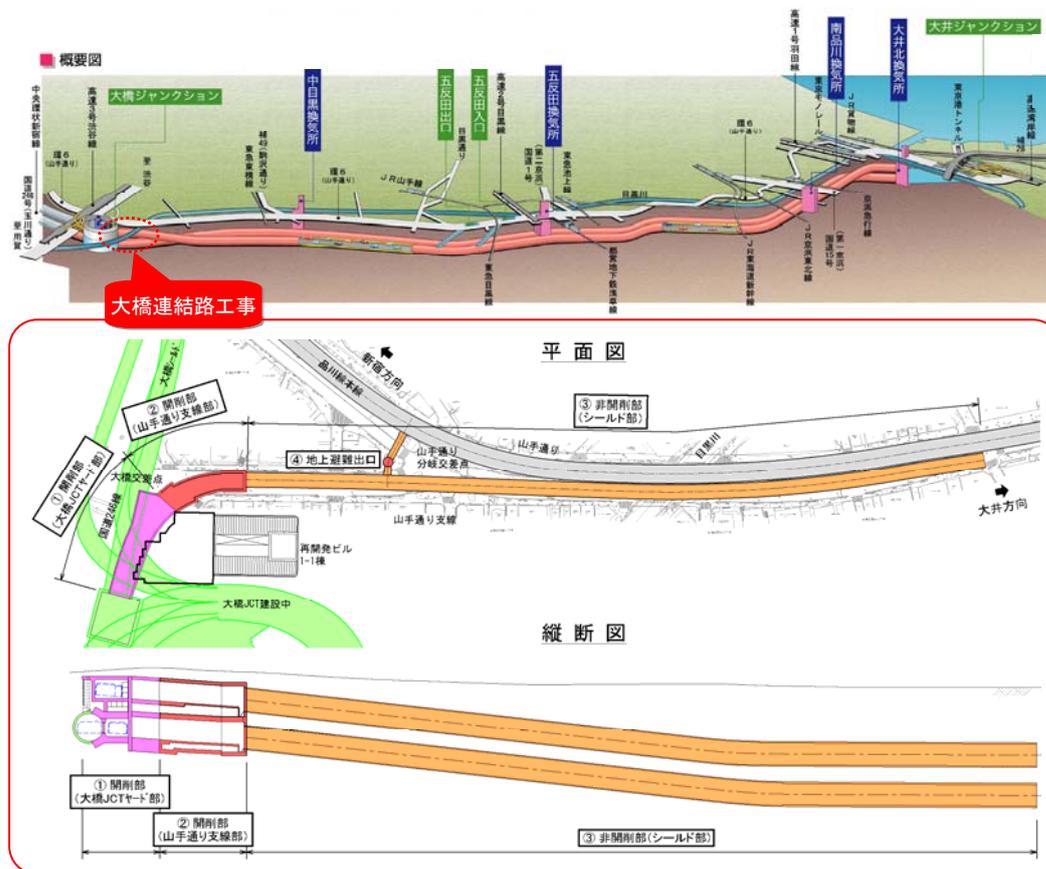


図 1.1 中央環状品川線および大橋連結路の概

*1 株式会社間組関東土木支店大橋出張所

2. 工事概要

2.1 全体概要

工事名：中央環状品川線大橋連結路工事

工事場所：東京都目黒区青葉台二丁目～大橋一丁目

発注者：首都高速道路株式会社

施工者：株式会社 間組

工期：平成19年5月22日～平成25年6月30日

工事内容：大橋連結路（上層）L=550m（下層）L=540m

①開削部：延長55m，掘削幅13～20m，掘削深度33m

②シールド部：延長（上層）475m，（下層）450m，シールド外径 ϕ 9.7m

③切開き部：延長（上層）210m，（下層）180m

④地上避難出口：掘削深度50m，掘削径 ϕ 5.1m

⑤その他：道路床版工，耐火工

2.2 土留工概要（CSM工法）

「クアトロサイドカッター機」は、シールド発進立坑の土留壁の構築に適用した。当該立坑では上下2段の大断面シールドを施工するため、強度および剛性の高い土留壁が必要であり、等壁厚ソイルセメント地下連続壁を採用した。土留壁の諸元を以下に示す（図2.2.1）。

- ・壁厚：900mm（等壁厚ソイルセメント地下連続壁）
- ・芯材：H-700x300x13x24（間隔：600mm）、シールド発進部にはNOMST材を使用
- ・壁長：35.5m
- ・施工延長：約46m（21エレメント）

2.3 土質条件

施工地点の地質は、新第三紀鮮新世～第四紀更新世の上総層群の泥岩(Kc)を基盤岩とし、その上位に第四紀更新世武蔵野礫層(Mg)、東京層砂質土(Tos)、粘性土(Toc)、東京礫層(Tog)および埋土、ローム層、凝灰質粘性土などの地表層(B)が分布している。

特に、泥岩($qu=3N/mm^2$ 程度)はGL-13m以深に厚く堆積しており、土留壁の施工方法として硬質地盤での施工性、経済性に優れた工法を選定する必要があった。

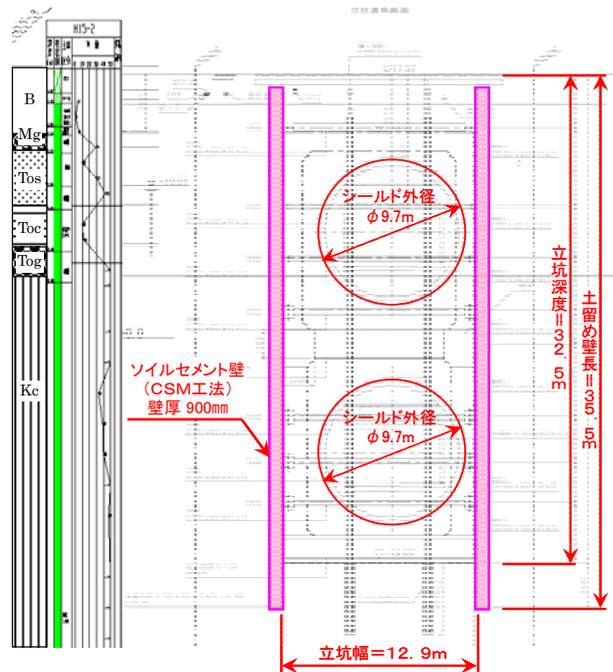


図 2.2.1 立坑概要図

2.4 施工環境

当該工事現場は、歩道を含めた道路幅員が22mと狭いうえに、沿道には飲食店や商店、集合住宅等が隣接しているため、施工に伴う交通渋滞や周辺に与える圧迫感、騒音、振動などについて慎重に配慮する必要があった。

そこで、現況4車線のうち3車線（大井方向1車線、大橋方向2車線）を確保し、常設作業帯内（幅6m）で昼間に土留壁の施工を行うことが条件となった（写真2.4.1、2.4.2）。

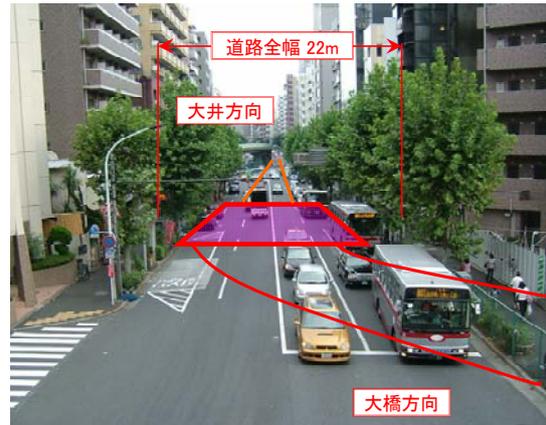


写真 2.4.1 施工環境（工事着手前）

3. CSM工法「クアトロサイドカッター機」

3.1 CSM工法の概要

CSM工法とは、水平多軸型地下連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター(Cutter)を用い、土(Soil)とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合(Mixing)して等壁厚のソイルセメント壁体(土留壁・遮水壁等)を造成する工法である。(図3.1.1)

その特長には原位置土攪拌混合工法の特長に加え、以下のような点がある。

- ① 水平多軸カッターの高い掘削性能により、岩盤や硬質地盤においても先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ② エアブローを併用した高速回転カッターにより、高い攪拌性能を有している。
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定できる。(エレメント厚 500~1200mmが可能、エレメント幅 2400mm)
- ④ 壁体の接続は止水性の高いカッティングジョイントとなる。
- ⑤ ホースドラムを利用した吊り下げ方式により大深度(最大 60m)施工が可能であり、低空頭、狭隘地での施工が可能である。(図 3.1.2)



写真 2.4.2 作業帯状況

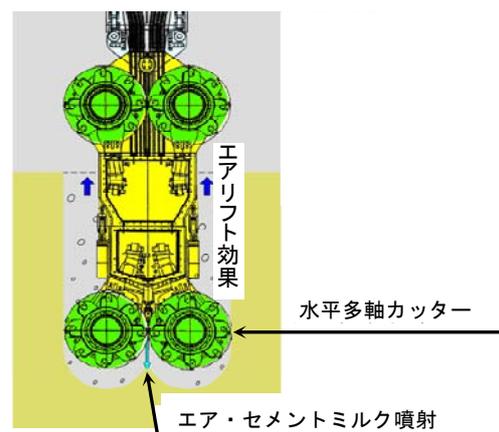


図 3.1.1 CSM工法概要図

- ⑥ 転倒に対する安定性が高く、また周辺環境に対して圧迫感を与えない。
- ⑦ 4 カッター化により方向制御および掘削・攪拌性能が向上する（下部カッターは掘削・攪拌機能を、上部カッターは攪拌機能およびカッター引上げ時の抵抗低減機能を有する）（写真 3.1.3）。
- ⑧ カッター部に内蔵した傾斜計によるリアルタイムでの掘削精度確認に加え、カッター部に姿勢制御フラップを装備しており、壁直角方向およびねじれ方向の掘削精度が向上する（写真 3.1.4）。

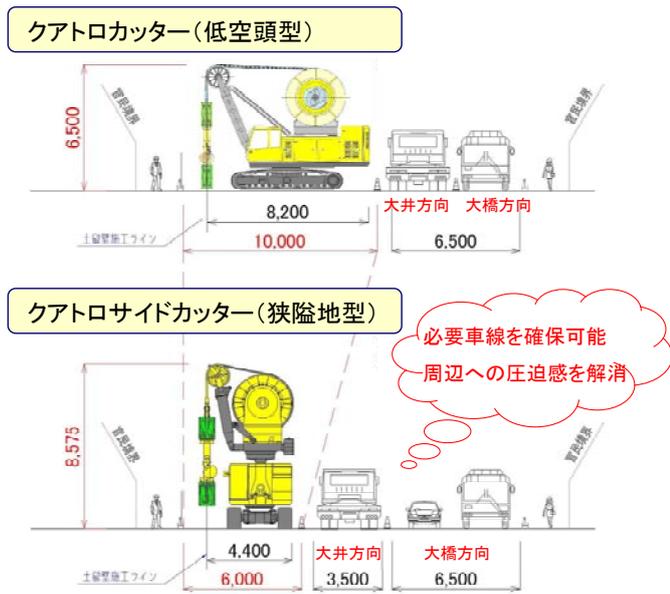


図 3.1.2



写真 3.1.3

写真 3.1.4

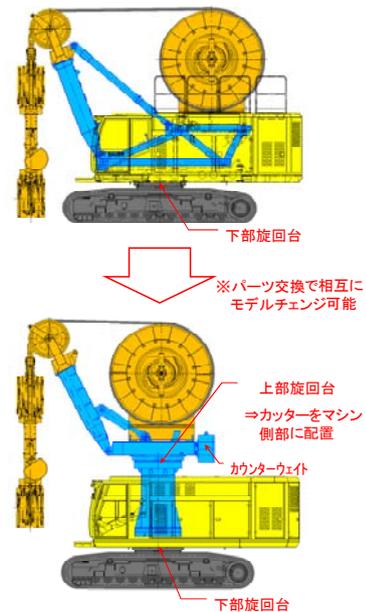


図 3.2.1

3.2 「クアトロサイドカッター機」の開発経緯

クレーパー方式のCSM機は、大深度を施工する場合にクレーパーを長くする必要があり、掘削深度に限界

(35m 程度)があったが、吊り下げ方式の開発が進められ、大深度施工が可能な BCM10 型が、小型化（機械高さ 15m）も実現して日本に導入された（2005 年）。

都市部での施工を想定した場合、さらなる小型化と攪拌性能向上が望まれ、4 カッターを装備、コンパクト化された（機械高さ 6.5m）クアトロカッター機（低空頭対応型）が 2006 年に開発された。

さらに今回は上部旋回台を設けて、カッターをベースマシンのサイドに配置することにより、狭隘地（作業幅 6m 以内）での施工が可能な「クアトロサイドカッター機」を開発、本工事に導入した（図 3.2.1）。表 3.2.1 に CSM 機の種類と実績を示す。

表3.2.1 CSM機の種類と実績

種 類	クレーン方式 2カッター		吊り下げ方式 クアトロカッター (4カッター)		
	機械姿写真				
開発年：日本導入年度	2004年	2004年	2005年	2006年 (サイドカッター：2007年)	
国内保有台数	1台	2台	0台 (海外2台)	2台 (サイドカッター：1台)	
カッター	型式	BCM3型	BCM5型	BCM10型	
	トルク	0-30kN・m	0-45kN・m	0-80kN・m	0-45kN・m
ベース マシン	機械高	~35m程度	~35m程度	約15m (CBC25)	約6.5m (サイドカッター：約8.6m)
	機械長	10m程度	10m程度	9.5m程度	8.0m程度
掘削深度 (実績最大深度)	~35m (20m)	~35m (31m)	~60m (60m)	~65m (60m)	
掘削壁厚	500~700mm	500~900mm	640~1,200mm	500~1,200mm	
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,800mm	2,400mm	
施工実績 (試験施工除く)	3件 (海外19件)	4件 (海外33件)	1件 (海外7件)	11件 (海外0件)	

2008年12月末現在パウアー工法研究会調べ

4. 施工実績

4.1 施工条件

道路上での施工であり、作業帯を移設しながら三分割の施工を行った。図-4.1.1に示すとおり、クアトロサイドカッターを配置した状態で横を人間が通り過ぎられるかどうかの作業帯幅となっている。また、内回りと外回り作業帯においては、延長についてもクアトロサイドカッター、相番70tクレーン、排泥の積込用バックホウ、排泥運搬車、排泥タンク、芯材を配置するのがやっとの状態であった。

原位置攪拌工法のプラントは安定液掘削工法に比べ省スペースではあるが、施工場所に配置することが不可能であったため、道路用地外に確保可能となった事業用地にプラントを配置し、各々の作業帯までの路下配管により注入材の圧送を行った。

作業帯の移設に伴う資機材の搬出入等を含め、21エレメントの施工に要した工程は3.5ヶ月程度となっている。

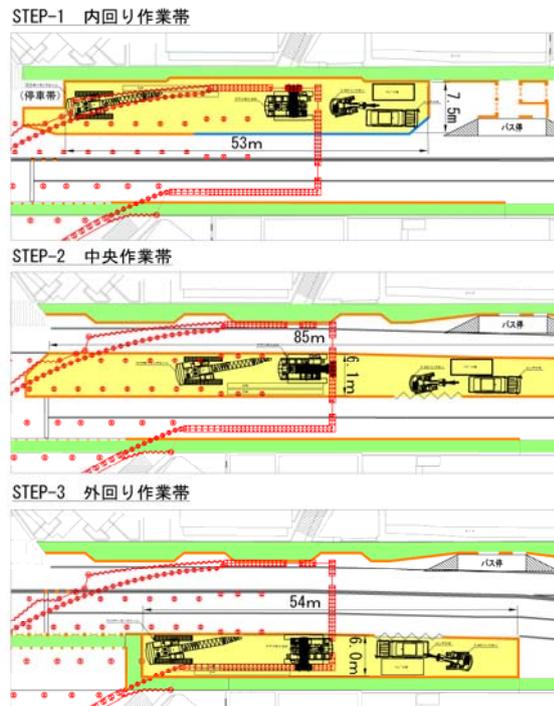


図4.1.1 作業帯毎の施工状況図



写真4.1.1 施工状況 (中央作業帯)

4.2 施工方法の検討（2サイクル施工の選定）

本工事は、大深度、硬質地盤での施工であるため掘削に長時間を要するうえに、作業帯が狭小であることから芯材の継手が多く、建込みに長時間を要す。そこで、施工途中のセメント固化によるトラブルを避けるため、掘削と造成を個別に行う2サイクル施工を適用した。

2サイクル施工とは、1サイクル目にベントナイトを主体とする掘削液により地山を泥土状にほぐし、2サイクル目でセメント固化液を素早く混練して、フレッシュなソイルセメントに芯材を建込む方法である。（図4.2.1）



図4.2.1 2サイクル施工概要図

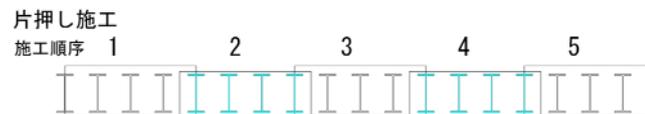
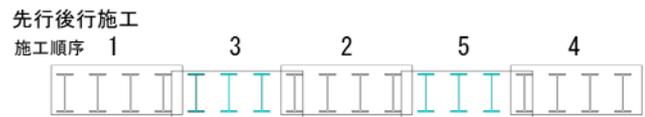


図4.3.1 施工手順概要図

4.3 掘削・造成

当初計画では、ソイルセメント硬化等による芯材挿入不能が生じた場合、建て込み完了済の芯材位置から再度掘削造成が可能となるように片押し施工を計画した。（図

4.3.1）

実施工において片押し施工では、硬化途中（地山と比較して低強度）の施工済エレメントを掘削することになり、施工済エレメント側にカッターが逃げてしまう傾向が見られ、カッター位置の制御、修正掘削に時間を要した。

そこで、1サイクル（掘削）を先行後行施工、2サイクル（造成攪拌）を片押し施工に変更し、1サイクル施工位置の両側が地山となるようにした。これにより1サイクルに要する時間が大幅に短縮されるものとなった。掘削の平均所要時間を表4.3.1に示す。

掘削精度においては、カッターに内蔵された傾斜計によるリアルタイムデータを確認し、掘削位置の修正を行い所定の掘削精度（1/300以内）を確保している。なお、土留壁面外方向の偏心はほとんど生じていない。

4.4 ソイルセメントの配合

表4.3.1 1サイクル所要時間

対象層	層厚	掘削速度	所要時間
		m/h	h
B	2.0	6.0	0.3
Tos	5.0	5.4	0.9
Toc	2.0	5.6	0.4
Tog	4.0	3.3	1.2
Kc	24.0	5.0	4.8
計	37.0	5.0	7.4

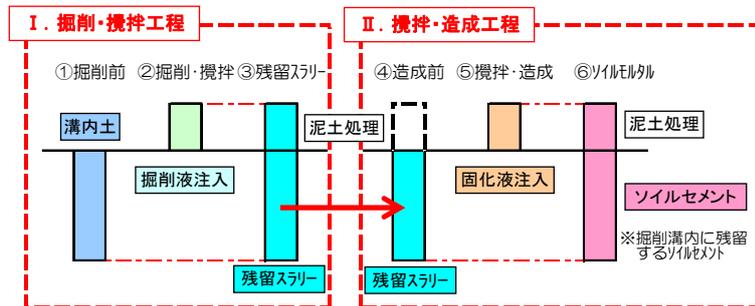
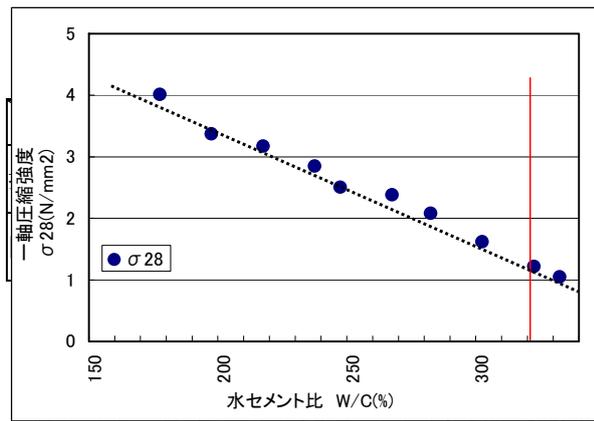
2サイクル施工における掘削・固化液の配合の考え方を図4.4.1に示す。ここで、(I)掘削液と地山が均質に混練され、排出スラリーと残留スラリーは同一配合になる、(II)固化液と残留スラリーは均質に混練され、排出ソイルセメントと残留ソイルセメントは同一配合になると考えている。表4.4.1に実施した配合を示す(設計基準強度 0.5N/mm²)。

計画配合に対して、実施工では掘削能率を優先した結果、掘削液の注入率は約1.5倍を要し、その分、排泥量も増加した。

また、狭隘な作業帯での施工において芯材建て込みに時間を要することが予想されたため、目標とするソイルセメントのテーブルフローを6時間後で150mmとしたが、高気温やカッターから発生する熱等の原因によるソイルセメントの温度上昇により、テーブルフロー低下が速く、遅延剤の添加量は約2倍を要した。

なお、施工状況に応じて掘削液の配合や注入量を変更すると最終的な残留ソイルセメントの配合に影響するため、本工事では室内試験で把握した水セメント比と強度の関係(図4.4.2)に基づいて、目標強度を満足するように固化液の配合や注入量を管理した($\sigma_{28} \geq 1\text{N/mm}^2 \rightarrow \text{W/C} \leq 320\%$)。

図4.4.1 2サイクル施工における配合の考え方



4.5 注入量、排泥量

表4.5.1に注入量と排泥量の実績を示す。当初計画では過去の実績等から1サイクルの注入量を対象土量の40%としていたが、Kc層での粘性が大きくなり掘削時間が大きくなってしまうこと、片押し施工時の掘削精度確保のため修正掘削で掘削時間が大きくなったことから、実績としては65%程度の注入を必要とした。

排泥量は、ほぼ注入量と一致している。中央作業帯での排泥率が大きいのは、芯材が全て体積の大きいNOMST材であり、建て込み時に地上へ排出されるためである。

表4.5.1 注入量と排泥量の実績

作業帯		内回り	中央	外回り	計
エレメント数		7	3	11	21
造成量	(m ³)	723	247	887	1,857
	(%)				
注入率	(%) 1サイクル	61.0	71.6	67.4	65.5
	(%) 2サイクル	26.1	28.1	27.7	27.1
	(%) 計	87.1	99.8	95.0	92.5
排泥率	(%) /造成量	84.6	113.6	92.4	92.2
	(%) /注入量	97.1	113.9	97.3	99.6

4. 6 芯材建て込み

芯材は、一般部にH-700×300 (L=32.0～35.5m、3分割)、土留め欠損部両脇にH-498×432 (L=35.5m、3分割)、シールド発進部にはNOMST材とH=700×300との組み合わせ (L=35.5m、5分割) となっており、継手ボルトはトルシアボルトを採用している。

作業帯が狭隘であることから2サイクル (造成攪拌) が完了後に、クアトロサイドカッターの退避、搬入済芯材の移動を行い、相番クレーンが建て込み位置に近づけるスペースを確保する必要があった。2サイクル完了後から芯材建て込み開始までに1時間以上を要している。

4. 7 日当たり施工量

表4.7.1に1エレメント施工におけるサイクルタイムを示す。上記のサイクルタイムに加え、狭隘な作業帯での施工に伴うクリティカルな作業 (定規移設、布掘、芯材搬入等) に要する時間を考慮すると1エレメント (約85m²) /2.5日程度 (34m²/日) の施工となった。

表4.7.1 サイクルタイム

工程	所要時間 (h)
準備工	0.8
1サイクル (掘削)	7.4
1サイクル (引上)	1.2
段取替	1.5
2サイクル (造成)	2.0
2サイクル (引上)	1.0
段取替	1.0
芯材建込	3.2
片付	1.5
計	19.6

5. おわりに

本工事においてC S M工法「クアトロサイドカッター機」を初めて採用し、実際に作業幅 6mという極めて狭隘な施工条件で、硬質地盤に大深度ソイルセメント地下連続壁の構築を行い、当該条件での適用性を確認できた。

一方、掘削液や遅延剤は計画より多量に必要になり、排泥量の低減、コストの低減が今後の課題である。現在C S M工法「クアトロサイドカッター機」により、施工実績を蓄積中であり、エレメント施工順序による施工能率向上、対象土層による最適配合等、同工法の適用性が大きく広がる可能性を感じている。

最後に発注者である首都高速道路株式会社をはじめ、本工事に対し御指導、御協力頂いた関係各位にこの紙面を借りてお礼申し上げます。また、本稿が今後の類似工事の参考になれば幸いです。

クアトロカッターによる地中連続壁の施工 CONSTRUCTION OF DIAPHRAGM WALL BY QUATTRO CUTTER

潮 晃司¹・石田 高啓²
Kouji USHIO・Takahiro ISHIDA

Recently underground construction in urban area is developed in large depth and hard ground, and the compact machine that doesn't obstruct traffic is requested. In this project the Quattro Cutter was designed to solve these problems and constructed the diaphragm wall successfully.

Key Words: Urban Expressway, Cut and Cover Tunnel, Diaphragm Wall, Soil Mixing, Little Space

1. はじめに

首都高速道路(株)では、高度な技術を要する大規模工事を対象に、民間の優れた技術を幅広く求めて設計及び施工に反映させるため、技術提案型の新たな契約方式を活用している。これは、複数社から技術提案を公募し、首都高速道路(株)で審査、評価するものであり、本稿で報告する施工方法は、「中央環状品川線大橋連結路工事」において、複数社からの技術提案の中で最も評価が高かったものについて、附带条件(試験施工による施工精度、品質、施工性等の確認)を付して採用したものである。

「中央環状品川線大橋連結路工事」は、現在建設中の中央環状品川線と3号渋谷線を接続する連結路を山手通り支線の地下に構築する工事である(図-1)。当該工事現場は、歩道を含めた道路幅員が22mと狭

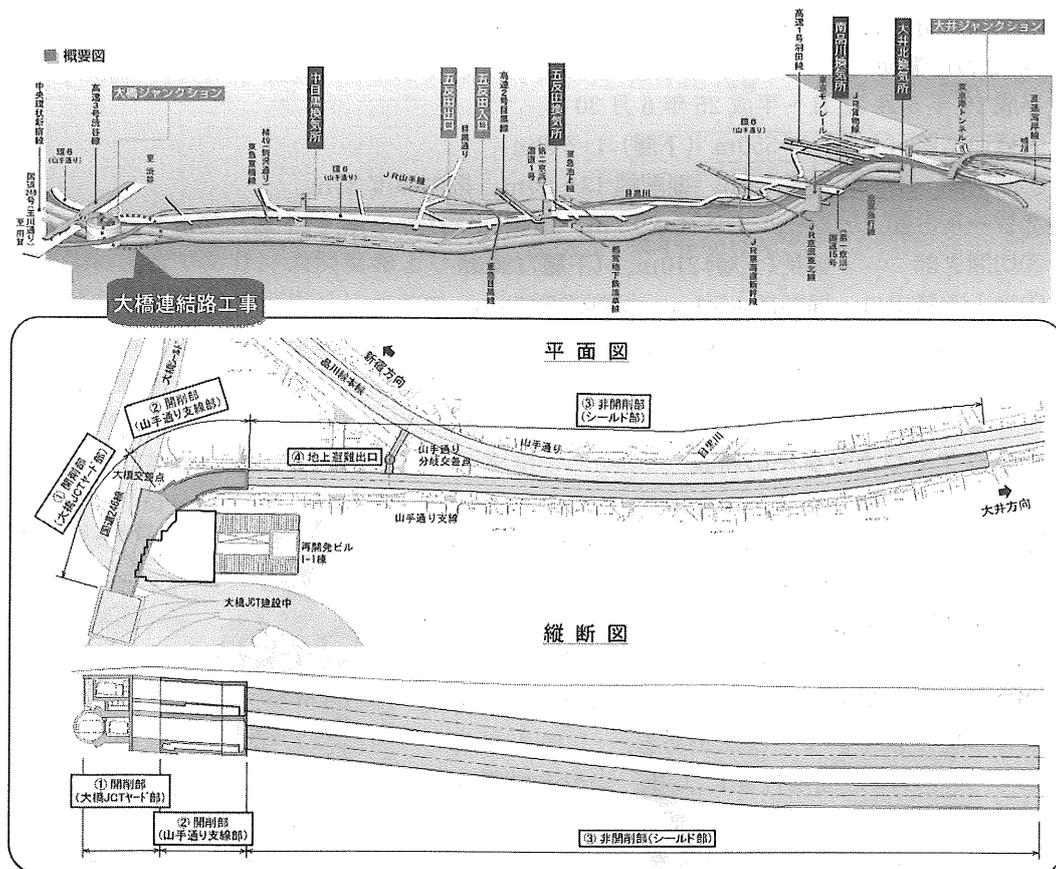


図-1 中央環状品川線および大橋連結路の概要

キーワード：都市高速道路，開削トンネル，地下連続壁，ソイルセメント，狹隘空間

¹非会員 首都高速道路株式会社 東京建設局 大橋建設グループ

²正会員 首都高速道路株式会社計画・環境部 設計調整グループ

い上に、沿道には商店等が隣接しているため、施工に伴う交通渋滞や周辺に与える圧迫感などについて慎重に配慮する必要があった(写真-1)。また、当該工事現場の地下には硬質地盤が存在するため、土留め壁等の構築にあたっては、硬質地盤でも施工可能な工法を選択する必要があった。このような現場条件から、本工事の技術提案公募の際に付した施工条件は以下のとおりである。



写真-1 大橋連絡路の現場状況 (施工前)

- ①1車線規制のみの狭隘な作業帯で施工が可能であること。
- ②周辺に与える圧迫感が小さいこと。
- ③硬質地盤でも施工が可能であること。

本工事において施工者から提案された施工法は、シールド工法とシールドトンネル非開削切開き工法により連絡路と品川線本線シールドトンネルを接続するものであり、地上作業を最小限に抑え、沿道環境や街路交通に配慮した優れたものである。唯一、地上からの作業となるシールド発進立坑の構築においても、ここに報告するCSM工法「クアトロカッター」を用いた技術提案があり、施工精度、品質、施工性等が確認できれば、上記の施工条件を満足するものと評価した。本稿では、2008年6月に行われた試験施工の結果とその後の実施工の施工実績について報告する。

2. 工事概要

工事名：中央環状品川線大橋連絡路工事

工事場所：東京都目黒区青葉台二丁目～大橋一丁目

発注者：首都高速道路株式会社

施工者：株式会社 間組

工期：平成19年5月22日～平成25年6月30日

工事内容：大橋連絡路（上層）L=550m（下層）L=540m

- ①開削部：延長55m，掘削幅13～20m，掘削深度33m
- ②シールド部：シールド外径φ9.7m，延長(上層)475m，(下層)450m
- ③切開き部：延長(上層)210m，(下層)180m
- ④地上避難出口：掘削径φ5.1m，掘削深度50m
- ⑤その他：道路床版工，耐火工 ほか

3. CSM工法クアトロカッターの特長

CSM工法クアトロカッターとは、水平多軸型地下連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター（Cutter）を用い、土（Soil）とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合（Mixing）して等壁厚のソイルセメント壁体（土留壁・遮水壁等）を造成する施工機械である(図-2)。その特長には原位置土攪拌混合工法の特長に加え、以下のような点がある。

- ①水平多軸カッターの高い掘削性能により、岩盤や硬質地盤においても先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ②エアブローを併用した高速回転カッターにより、高い攪拌性能を有している。
- ③等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定できる（エレメント厚500～1200mm，エレメント幅2400mm）。

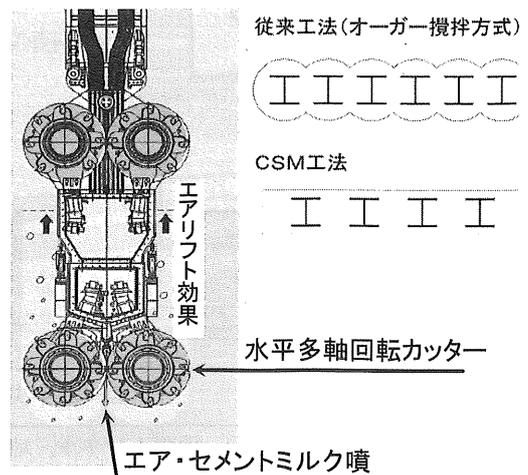


図-2 CSM工法クアトロカッター概念図

- ④壁体の接続は止水性の高いカッティングジョイントとなる。
- ⑤ホースドラムを利用した吊り下げ方式により大深度（最大65m）施工が可能であり，低空頭，狭隘地での施工が可能である（図-3）。
- ⑥転倒に対する安定性が高く，また周辺環境に対して圧迫感を与えない。
- ⑦4カッター化により方向制御，掘削・攪拌性能が向上する（下部カッターは掘削・攪拌機能を，上部カッターは攪拌機能とカッター引上げ時の抵抗低減機能を有する）（写真-2）。
- ⑧カッター内蔵の傾斜計によるリアルタイムでの掘削精度確認に加え，カッター部に姿勢制御フラップを装備しており，壁直角方向およびねじれ方向の掘削精度が向上する（写真-3）。

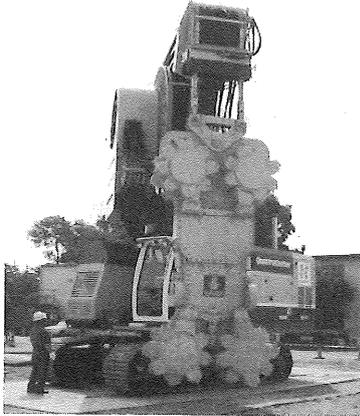


写真-2 クアトロカッター

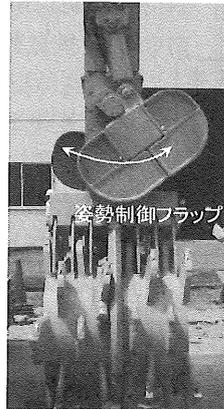


写真-3 姿勢制御装置

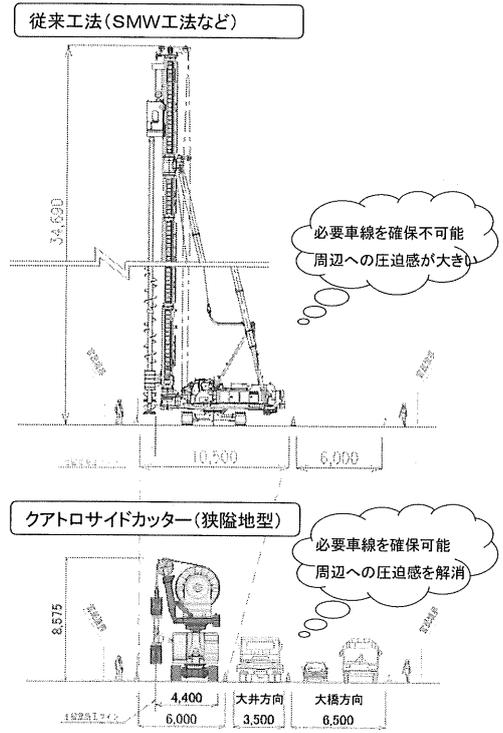


図-3 施工条件（低空頭・狭隘地）への対応

4. 試験施工

クアトロカッターは，前述したように優れた特長を有するが，新しい技術であり，大深度および硬質地盤での施工実績が少ないため，実施工に先立ち，「硬質地盤を含む砂質土および粘性土などにおいて，掘削精度と壁体品質を確認すること」を目的として試験施工を行った（2008年6月）。

図-4にエレメント割付図を，図-5に地盤条件を示す。施工規模は深度40.0m×壁厚900mm×4エレメントであり，地盤はローム層，粘土層，細砂層の互層から成る。また，過去の試験施工で造成されたソイルセメント壁（2005年施工，深度40m， $qu=1\sim4N/mm^2$ 程度）を利用して，実施工の対象である硬質地盤（固結シルト， $qu=1\sim3N/mm^2$ 程度）を模擬した（エレメント①）。

また，実施工では大深度，硬質地盤という条件に加え，作業帯が非常に狭小（作業幅6m）であり，芯材の継手が多く，建込みに長時間を要する。そこで，施工途中のセメント固化によるトラブルを避けるため2サイクル施工とし，また，仮に芯材が建込み不能になった場合でも再掘削により施工が継続できるように，エレメント④において片押し施工の試験も実施した。なお，2サイクル施工とは，1サイクル目にベントナイトを主体

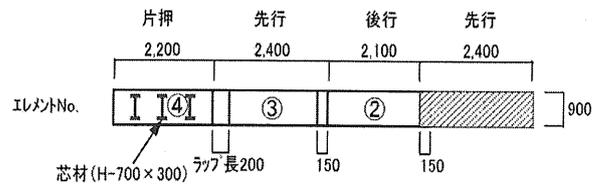


図-4 エレメント割付図

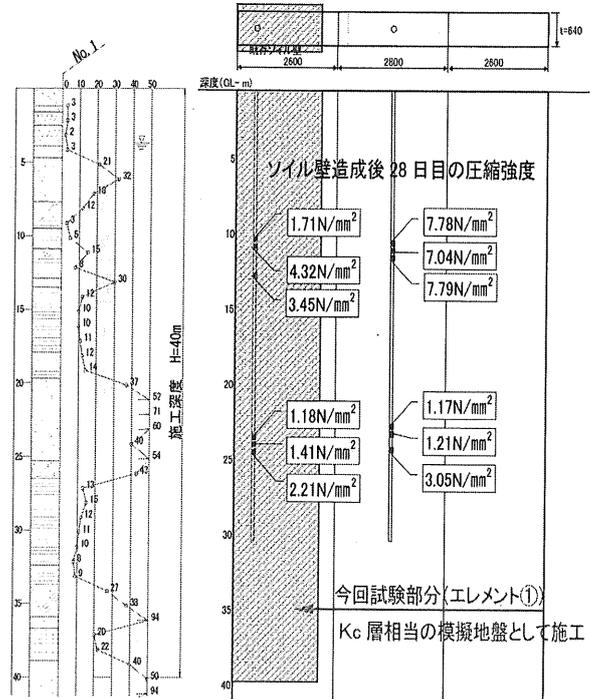


図-5 試験施工における地盤条件

とする掘削液で地山を泥土状にほぐし、2サイクル目でセメント固化液を素早く混練し、フレッシュなソイルセメントの内に芯材を建込む方法である(図-6)。使用した掘削液、固化液の配合を表-1に示す。

試験施工の結果は表-2に示すとおり良好であり、クアトロカッターの適用性が確認された。ただし、後行、片押エレメントの掘削は、既に造成された先行エレメントのソイルセメントが未だ軟らかいためカッターの姿勢制御に時間を要し、実施工における課題となった。

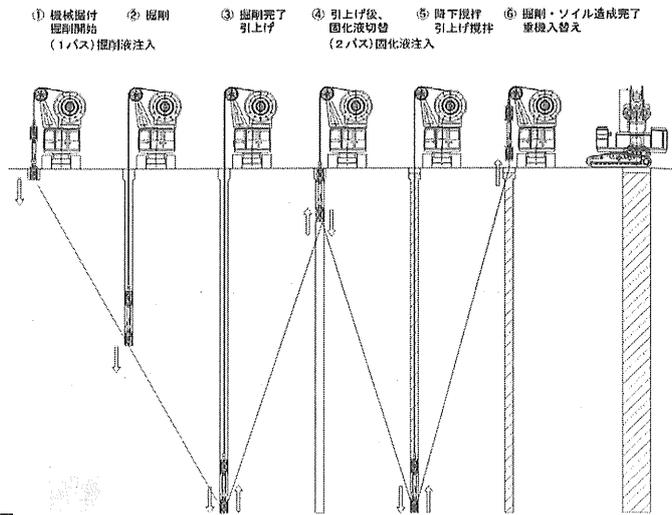


図-6 2サイクル施工概要図

表-1 掘削・固化液の配合 (kg/対象土量 1m³当り)

	セメント	ペントナイト	水	遅延剤	分散剤	注入率
掘削液	0	15	400	0	0	40.6%
固化液	200	5	200	8	1	26.9%

注) ()は試験施工時の配合

表-2 試験施工結果一覧

確認項目		試験結果	評価
掘進精度	鉛直精度	X(面内)方向:1/303~1/1400 Y(面外)方向:1/633~1/1214	管理値 1/300 以下を満足 (片押 EL も遜色なし)
	掘削深度	深度 40m を掘削・造成	問題なし
壁体品質	強度	GL-10m 付近: $\sigma_{28} = 3.2 \text{ N/mm}^2$ GL-20m 付近: $\sigma_{28} = 5.3 \text{ N/mm}^2$ GL-35m 付近: $\sigma_{28} = 4.4 \text{ N/mm}^2$	管理値 $\sigma_{28} \geq 0.5 \text{ N/mm}^2$ を満足
	透水性	GL-10m 付近: $ks = 2.19 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ GL-20m 付近: $ks = 9.51 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ GL-35m 付近: $ks = 4.61 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$	管理値 $ks \leq 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ を満足
	壁面状況	継手部の連続性を確認	問題なし
掘削工	掘削速度	掘削速度: 先行 EL 平均 5.1m/hr(カッター下降) 後行 EL 平均 3.5m/hr(") 造成速度: 全体 EL 平均 18.3m/hr(")	先行 EL は概ね想定どおりで問題なし。 後行、片押 EL は先行 EL が軟らかいためカッターの姿勢制御に時間を要した。
芯材 建込み工	施工性	建込み時間 : 平均 82 分/本 継手締結時間: 平均 22 分/箇所	問題なし
その他	長時間対応	芯材を円滑に挿入, 十分な遅延効果を確認	問題なし
	施工性	衝突, はみ出し等なく, 幅 6m の作業帯で施工	問題なし

5. 実施工の実績

(1) 施工条件

実施工において、クアトロカッターはシールド発進立坑の土留め壁の構築に適用した。図-7 に示すように、当該立坑では外径φ9.7mの大断面シールドを上下2段で施工するため大空間を要し、強度および剛性の高い土留め壁が必要であり、CSM工法による等壁厚ソイルセメント地中連続壁を採用した。土留め壁の諸元を以下に示す。

壁 厚：900 mm
 芯 材：H-700x300x13x24（間隔：600 mm）
 シールド発進部には NOMST 材を使用
 壁 長：35.5m
 施工延長：約 46m（21 エレメント）

施工地点の地質は、新第三紀鮮新世～第四紀更新世の上総層群の泥岩（Kc）を基盤岩とし、その上位に第四紀更新世武蔵野礫層（Mg）、東京層砂質土（Tos）、粘性土（Toc）、東京礫層（Tog）および埋土、ローム層、凝灰質粘性土などの地表層（B）が分布している。特に、泥岩（ $qu=3N/mm^2$ 程度）はGL-13m以深に厚く堆積しており、土留壁の施工方法として硬質地盤での施工性、経済性に優れた工法を選定する必要があった。

また、施工環境として当該工事現場は歩道を含めた道路幅員が 22 m と狭いうえに、沿道には飲食店や商店、集合住宅等が隣接しているため、施工に伴う交通渋滞や周辺に与える圧迫感、騒音、振動などについて慎重に配慮する必要があった。そこで、現況 4 車線のうち 3 車線（大井方向 1 車線、大橋方向 2 車線）を確保し、常設作業帯内（最小幅 6 m、最小延長 53 m）で昼間に土留め壁の施工を行うことが条件となり、図-8 に示すとおり作業帯を移設しながら三分割の施工を行った。このように、クアトロカッターを配置した状態で横を人間が通過できるかどうかの作業帯幅であった（写真-4、写真-5）。また、内回りと外回り作業帯においては、延長についてもクアトロカッター、相番 70 t クレーン、排泥の積込用バックホウ、排泥運搬車、排泥タンク、芯材を配置するのがやっとの状態であった。

なお、原位置攪拌工法のプラントは安定液掘削工法に比べて省スペースではあるが、作業帯内での配置が困難であったとともに、沿道への影響を軽減するため、別途、道路外に用地を確保し、各々の作業帯まで路下配管により注入材の圧送を行った。

このような施工条件の下、作業帯の移設に伴う資機材の搬出入等を含めて、21 エレメントの施工に要した工程は 3.5 ヶ月程度となっている。

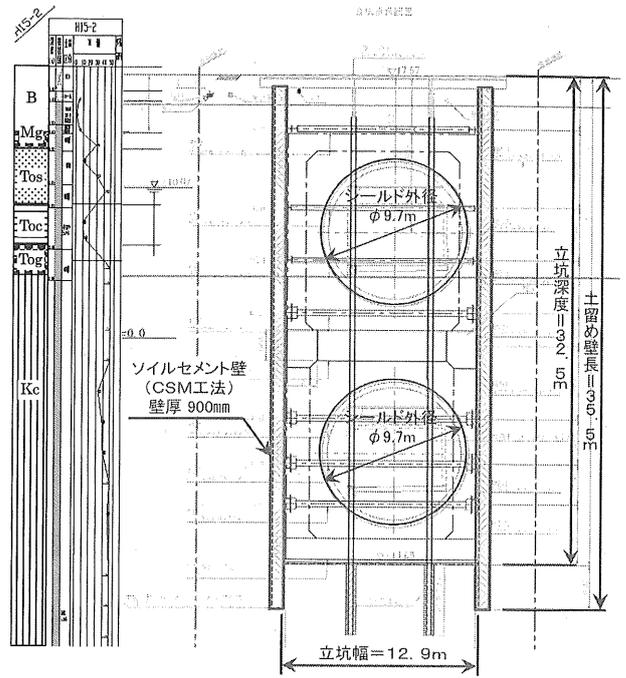


図-7 立坑概要図

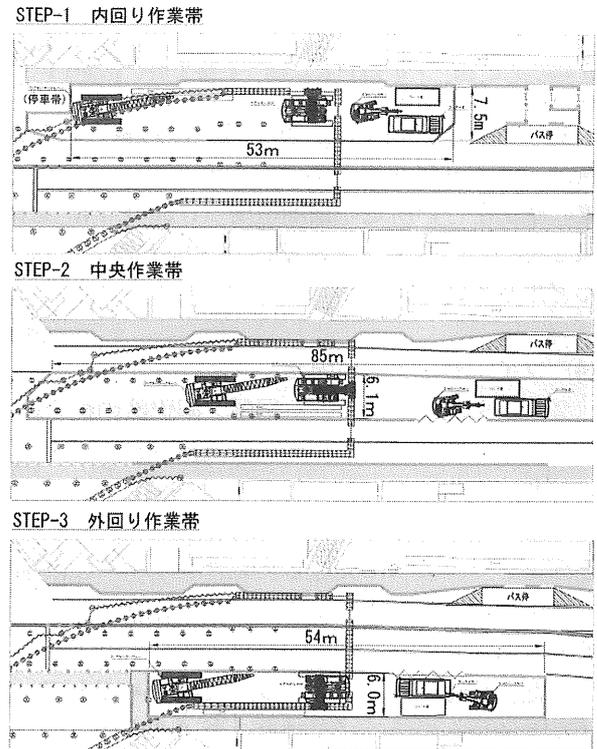


図-8 各作業帯の施工配置



写真-4 施工状況（内回り作業帯）



写真-5 施工状況（中央作業帯）

(2) 施工方法の検討 (2 サイクル施工の選定)

当該工事は大深度、硬質地盤での施工であるため掘削に長時間を要するうえに、作業帯が狭小であることから芯材の継手が多く、建込みに長時間を要する。そこで、施工途中のセメント固化によるトラブルを避けるため、掘削と造成を個別に行う2サイクル施工(図-6参照)を適用した。

(3) 掘削・造成

当初計画では、ソイルセメントの硬化等による芯材挿入不能が生じた場合、建込み完了済の芯材位置から再度掘削・造成が可能となるように片押し施工を計画した(図-9)。しかし、試験施工の結果と同様に、片押し施工では硬化途中(地山と比較して低強度)の施工済エレメントを掘削することになり、施工済エレメント側にカッターが逃げてしまう傾向が見られ、カッター位置の制御、修正掘削に時間を要した。

そこで、1サイクル目(掘削)を先行後行施工、2サイクル目(造成攪拌)を片押し施工に変更し、1サイクル目の施工位置の両側が原地山となるようにした。これにより1サイクル目に要する掘削時間が大幅に短縮されるものとなった。掘削の平均所要時間を表-3に示す。

掘削精度においては、カッターに内蔵された傾斜計によるリアルタイムデータを確認し、掘削位置の修正を行い所定の掘削精度(1/300以内)を確保している。なお、土留壁面外方向の偏心はほとんど生じていない。

(4) ソイルセメントの配合

2サイクル施工における掘削・固化液の配合の考え方を図-10に示す。ここで、当工事では、

- (I) 掘削液と地山が均質に混練され、排出スラリーと残留スラリーは同一配合になる。
- (II) 固化液と残留スラリーは均質に混練され、排出ソイルセメントと残留ソイルセメントは同一配合になる。

と仮定した。表-4に実施した配合を示す(設計基準強度0.5N/mm²)。

計画配合に対して、実施工では掘削能率を優先した結果、掘削液の注入率は約1.5倍を要し、その分、排泥量も増加した。

また、狭隘な作業帯での施工において芯材建て込みに時間を要することが予想されたため、目標とするソイルセメントのテーブルフローを6時間後で150mmとしたが、高気温やカッターから発生する熱等の原因によるソイルセメントの温度上昇により、テーブルフローの低下が速く、遅延剤の添加量は約2倍を要した。

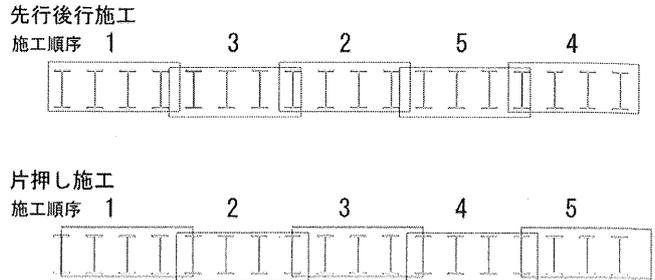


図-9 1サイクル目(掘削)の施工順序

表-3 1サイクル目(掘削)の平均所要時間

対象層	層厚	掘削速度	所要時間
		m/h	h
B	2.0	6.0	0.3
Tos	5.0	5.4	0.9
Toc	2.0	5.6	0.4
Tog	4.0	3.3	1.2
Kc	24.0	5.0	4.8
計	37.0	5.0	7.4

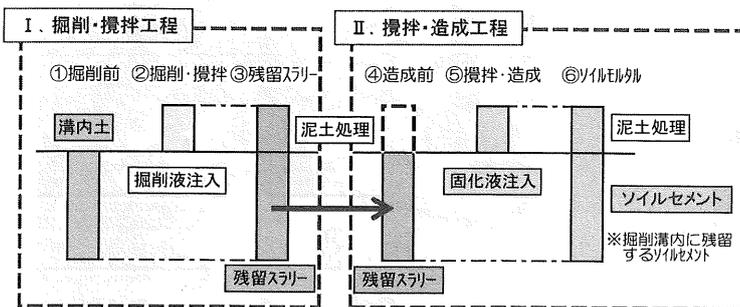


図-10 2サイクル施工における配合の考え方

表-4 掘削・固化液配合(kg/対象土量1m³当り)

	セメント	ベントナイト	水	遅延剤	分散剤	注入率
掘削液	38 (25)	30 (20)	600 (400)	0 (0)	0 (0)	62.4% (41.6%)
固化液	162 (200)	5 (5)	222 (200)	16 (8)	0 (2)	29.1% (27.6%)

注：()は室内試験に基づく計画配合

なお、施工状況に応じて掘削液の配合や注入量を変更すると最終的な残留ソイルセメントの配合に影響するため、当工事では室内試験で得られた水セメント比と一軸圧縮強度の関係（図-11）に基づいて、目標強度を満足するように固化液の配合や注入量を管理した（ $\sigma_{28} \geq 1\text{N/mm}^2 \rightarrow \text{W/C} \leq 320\%$ ）。

(5) 注入量、排泥量

表-5に注入量と排泥量の実績を示す。当初計画では過去の実績等から1サイクル目の注入量を対象土量の40%としていたが、Kc層での粘性が大きくなり掘削時間が大きくなってしまふこと、片押し施工時の掘削精度確保のため修正掘削で掘削時間が大きくなったことから、実績としては65%程度の注入を必要とした。

排泥量は、ほぼ注入量と一致している。中央作業帯での排泥率が大きいのは、芯材が全て体積の大きいNOMST材であり、建て込み時に地上へ排出されるためである。

(6) 芯材建て込み

芯材は、一般部にH-700×300（L=32.0～35.5m、3分割）、土留め欠損部両脇にH-498×432（L=35.5m、3分割）、シールド発進部にはNOMST材とH-700×300との組み合わせ（L=35.5m、5分割）となっており、継手ボルトはトルシアボルトを採用している。

作業帯が狭隘であることから、2サイクル目（造成攪拌）が完了後にクアトロサイドカッターの退避、搬入済芯材の移動を行い、相番クレーンが建て込み位置に近づけるスペースを確保する必要があった（写真-6、写真-7）。2サイクル目完了後から芯材建て込み開始までに1時間以上を要している。

(7) 日当たり施工量

表-6に1エレメント当たりの施工サイクルタイム

表-6 サイクルタイム

工程	所要時間 (h)
準備工	0.8
1サイクル (掘削)	7.4
1サイクル (引上)	1.2
段取替	1.5
2サイクル (造成)	2.0
2サイクル (引上)	1.0
段取替	1.0
芯材建込	3.2
片付	1.5
計	19.6

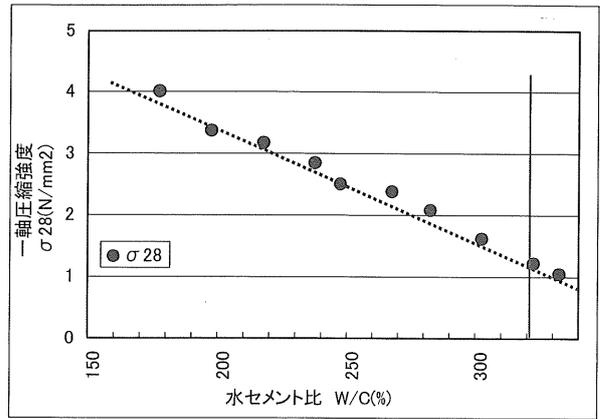


図-11 水セメント比と強度（ σ_{28} ）の関係

表-5 注入量と排泥量の実績

作業帯		内回り	中央	外回り	計
エレメント数		7	3	11	21
造成量 (m ³)		723	247	887	1,857
注入率	(%) 1サイクル	61.0	71.6	67.4	65.5
	(%) 2サイクル	26.1	28.1	27.7	27.1
	(%) 計	87.1	99.8	95.0	92.5
排泥率	(%) /造成量	84.6	113.6	92.4	92.2
	(%) /注入量	97.1	113.9	97.3	99.6



写真-6 芯材搬入状況

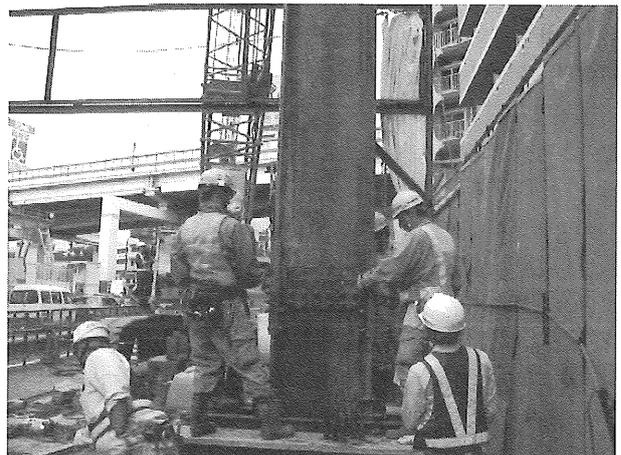


写真-7 芯材建込状況

を示す。これに加えて、狭隘な作業帯での施工に伴うクリティカルな作業（定規移設、布掘、芯材搬入等）に要する時間を考慮すると、1エレメント（約85㎡）/2.5日程度（34㎡/日）の施工となった。

6. おわりに

当工事においてCSM工法「クアトロカッター」（狭隘地型）を初めて採用し、実際に作業幅6mという極めて狭隘な施工条件で、硬質地盤に大深度ソイルセメント地中連続壁の構築を行い、当該条件での適用性を確認できた。

一方、掘削液や遅延剤は計画より多量に必要になり、排泥量の低減、コストの低減が今後の課題である。なお、CSM工法「クアトロカッター」（狭隘地型）は隣接工区においても採用して施工実績を積み重ねており、エレメント施工順序の工夫による施工能率の向上や、対象土層に応じた配合の最適化など、同工法の適用性が大きく広がる可能性を感じている。

最後に、近隣住民の方々をはじめ、当工事に対して御指導、御協力をいただいた関係各位に、この紙面を借りて深甚なる感謝の意を表する次第である。また、本稿が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 原田哲伸：狭隘地における大深度地下連続壁の施工，土木施工，平成21年4月号
- 2) バウアー工法研究会：CSM工法標準積算資料，平成20年度版

ソイルセメント鋼製地中連続壁の本体利用 およびスラブ接合部に関する実験検討

藪本 篤¹・長田 光正²・井上 隆広³

¹正会員 首都高速道路株式会社 東京建設局 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-6-2)
E-mail:a.yabumoto114@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路株式会社 技術管理室 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)

³正会員 株式会社 間組 関東土木支店 (〒153-0044 東京都目黒区大橋1-8-3)

大橋JCTのEF連結路工事は供用下のシールドトンネルを開削工法にて切開く工事であるため、供用中のシールドトンネルに影響を与えないよう計測管理を行いながら施工を行っている。また本工区では、都市内の限られた作業ヤードと複雑な条件の下、山留め壁としてソイルセメント鋼製地中連続壁工法の本体利用を採用している。さらに施工性や費用の面から、ハンチ筋を鋼製連壁に接続しないで、補強部が圧縮される側の有効高の増加による鉄筋の応力低減を期待した「アゴ付きスラブ構造」を採用し、1/2モデルの供試体を用いた正負交番載荷実験により、鋼製連壁とRCスラブ接合部の応答特性およびを把握し、アゴ付きスラブ構造でもスラブの耐力増強が可能であることを確認した。

Key Words : soil cement, NS-BOX diaphragm wall method, haunch, cyclic loading experiment

1. 工事概要

本工事は、中央環状品川線と接続する大橋JCTのEF連結路において、中央環状新宿線供用後の大橋シールドトンネルを供用下で開削工法にて切開き、合流部を構築する工事である(図-1, 図-2)。供用下での切開き工事となるため、施工時の安全を確保するため大橋シールドの計測管理を実施し、中央環状新宿線供用開始前にプロテクターを設置して、切開き工事によるセグメント切断時に生じる煙などの影響が既供用車線に生じないように配慮している。

また、大橋JCTは東京都再開発との協同事業を行っており、立体道路区域を設定しトンネル上に再開発ビルの一部が構築される予定である。平成23年3月までには、再開発ビルの工事のために東京都へ用地を返還する必要があるため、上層トンネル頂版(以下、「F頂版」という。)を先行して施工する逆巻き施工により躯体を構築する。

本工事では東京都再開発用地に隣接する山留め壁として本体利用のソイルセメント鋼製地中連続壁(以下、「鋼製連壁」という。)を採用している。さらに、鋼製連壁とRCスラブの接合構造として、ハンチを鋼製連壁に定着しないで、補強部が圧縮される側のみに期待した

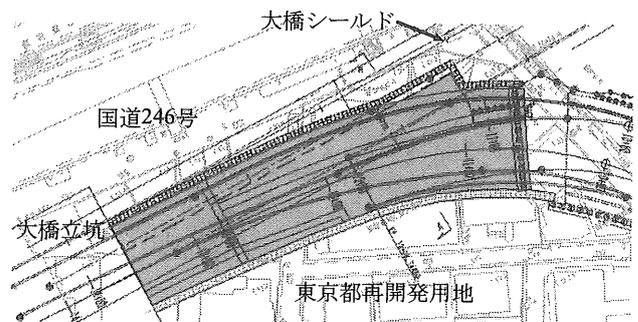


図-1 検討対象範囲(平面図)

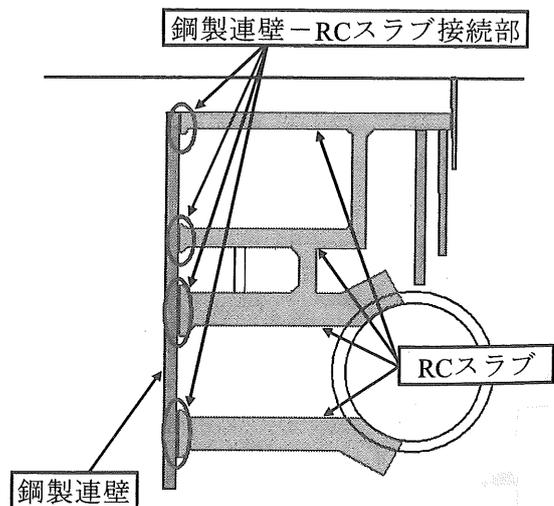


図-2 検討対象構造(断面図)

「アゴ付きスラブ構造」について、正負交番載荷実験を行って効果を確かしている。

2. 供用下でのシールドトンネルの切開き

近接する再開発ビルの掘削や逆巻き施工による躯体の構築、およびシールドトンネルの切開き施工によって、供用下の大橋シールドに影響が出ないように、大橋シールドの変形を計測管理しながら施工を行う。計測断面は、上下層ともに切開き区間2断面、非切開き区間1断面の計3断面とした。計測断面の位置は、土留めの設計断面位置や施設付属物による計測機器設置位置への制限を考慮して決定した。図-3に一例として上層トンネルの計測機器設置断面図を示す。

FEMによる逐次解析を行い、躯体構築の施工ステップを検討している。上層トンネル（B2下層）、下層トンネル（D2下層）ともに、EF連結路掘削時は上下につぶれ、EF連結路の掘削が進行するに連れて、掘削側斜め上方に引っ張られるような挙動を示す。最大変位は両トンネルともに下層トンネル頂版（以下、「E頂版」という。）下まで掘削し、E頂版施工前の状態で、隣接する再開発ビルが床付けまで掘削されたときにおいて生じている。

またFEM解析の結果を許容値として管理値を設定し、トータルステーションを用いたシールドトンネルの計測管理を行う。

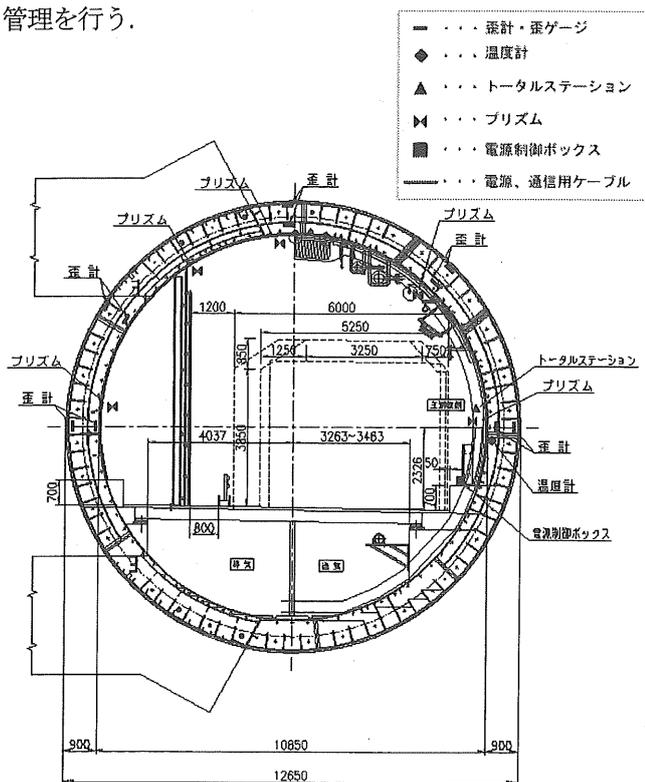


図-3 計測機器設置断面図（大橋シールド上層トンネル）

3. 再開発側山留め壁の施工方法の選定

(1) 山留め壁選定における着目点

東京都再開発事業用地に隣接する山留め壁の施工方法の選定には、以下の点を考慮する必要があった。

- ・掘削深度が深い（約30m）ため、大規模掘削に対応できること。
- ・作業用地が限定されるため施工効率が良く占有面積の小さい工法であること。
- ・地下水位が高いことから、止水性が良いこと。
- ・砂礫層ならびに土丹層を掘削するため、先行削孔等の補助工法を必要としないこと。
- ・東京都再開発事業用地を借用できる期間が限られており東京都へ用地を返還する必要があるため、工期が優先となること。

(2) 山留め壁の選定方法

以上の点を考慮し、再開発側山留め壁として鋼製地中連続壁を選定した。鋼製地中連続壁は、剛性が高いため当該工事のような掘削深度の深い施工に適しており、本体利用とすることで全体工程も有利となる。

また、鋼製地中連続壁には工法Ⅰ（コンクリート等充填鋼製地中連続壁工法）と工法Ⅱ（ソイルセメント鋼製地中連続壁工法）があり、それぞれ作業スペース、経済性、工期などの項目から適応性を評価した。

作業スペースに関して、施工は区分地上権設定範囲内での作業が前提となるため、泥水処理プラント、安定液プラント、コンクリートプラントを配置する通常の連壁施工ヤードでの施工は不可能と考えられた。しかし、工法Ⅰについてはコンクリートプラントを省略しコンクリートを打設時搬入にて対応する、工法ⅡについてはCSM等の現位置攪拌により泥土モルタルを生成してその中に芯材を建て込むことで、両案ともヤードの配置が可能となる。経済性に関しては、工法Ⅱのほうが鋼材の重量が多少CSMのほうが重くなるため芯材は高価となるが、現位置攪拌で設備が少なくコンクリートの購入の必要が無いCSMを用いた工法Ⅱが経済的

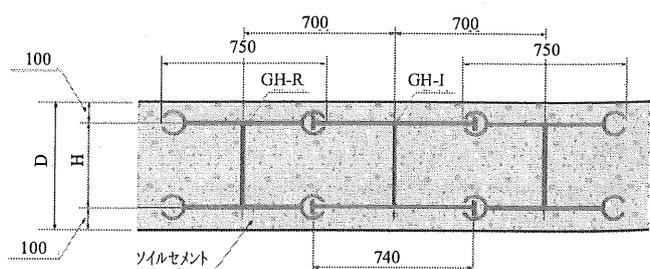


図-4 ソイルセメント鋼製地中連続壁（標準構造）

ある。また、施工のスピードは現位置攪拌となる工法Ⅱのほうが効率的となる。さらに工法Ⅱは、混合攪拌処理工法で築造されたソイルセメント壁中にNS-BOXのGH-RとGH-Iの2種類の部材を交互に連続して建込み、両フランジで嵌合できるため、継手部の止水性が高くなる(図-4)。

これらの点から総合的に勘案し、鋼製地中連続壁工法Ⅱの本体利用(単独壁)を採用した。

4. 鋼製連壁-RCスラブ接続方法の検討

(1) アゴ付スラブ構造の選定

鋼製連壁(工法Ⅱ)は、芯材の内部に強度を期待しないソイルセメントが充填された構造である。当初建築限界との関係から、鋼製連壁とRCスラブの接合構造としてRCスラブにハンチを設けない構造を考えていたが、鋼製連壁施工後に道路線形の変更によってハンチ構造の追加が可能となった。地震時の地盤変形等により鋼製連壁とRCスラブ間の曲げ変形が大きくなった場合、ハンチ構造がなければ鋼製連壁とRCスラブの接合部において損傷が生じる可能性が高く、このような損傷は補修が困難となる。よって損傷部を鋼製連壁とRCスラブの接

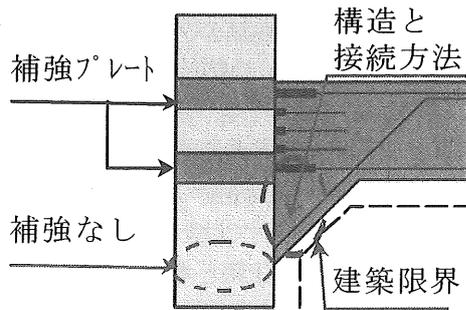


図-5 アゴ付きスラブ構造

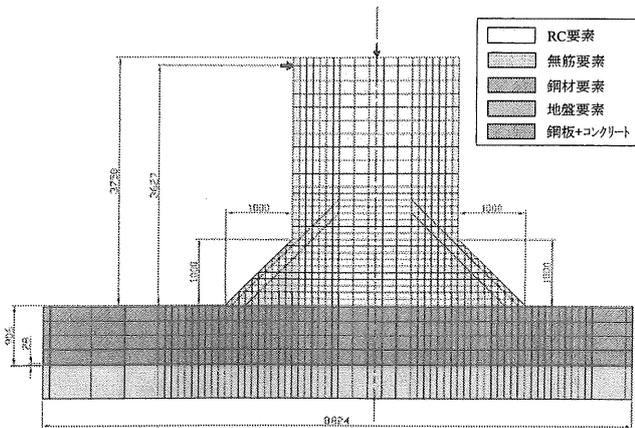


図-6 解析モデル(鋼製連壁-RCスラブ)

続部から断面変化部付近に移動させることを期待して、ハンチ構造を追加することとした。

しかし当初ハンチを設けない構造を考えていたため、施工済みの鋼製連壁にはハンチを設置する位置の鋼製連壁に荷重を伝達する補強部材が配置されておらず、通常のハンチ筋を鋼製連壁に定着したハンチ構造とすることはできなかった。そこで、施工性や費用の面から、ハンチ筋を鋼製連壁に定着せず、補強部が圧縮される側の有効高の増加による鉄筋の応力低減を期待した「アゴ付きスラブ構造」(図-5)を選定した。このような構造は引張には寄与せず、圧縮時に接合面がずれる力を伝えないため、鋼製連壁からの圧力に対してコーベルとして抵抗する必要があると考えられる。また新構造となるため効果の確認のため、応力が厳しい断面に着目し1/2モデルの供試体で正負交番載荷実験を行い、鋼製連壁-RCスラブ接続部の応答特性を把握した。

(2) 事前解析検討

実験に先立ち、まず選定した「アゴ付きスラブ構造」について事前解析を実施し、RCスラブおよび鋼製連壁の耐荷性能向上のための適切なハンチ構造の検討と補強効果を確認した。検討方法としては、二次元非線形FEM(WCOMD)を用いて、常時、地震時荷重の漸増荷重による最大荷重確認後の大変位までの予測解析により、鋼製連壁とRCスラブ接合部の破壊形態、耐力、変形性能といった応答特性を推定した(図-6)。対象部位はスラブ厚2500mmのE頂版とし、補強なし、アゴ付スラブ構造、通常ハンチ構造の3種類を比較検討した。ここで、モデル化の範囲は、地震時に曲げモーメントがゼロとなる位置までとし、アゴ付スラブ構造のアゴ部と鋼製連壁の接

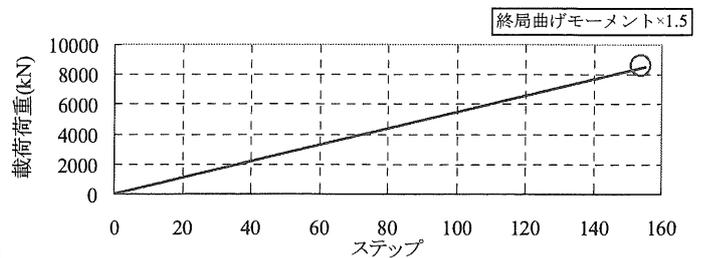


図-7 載過ステップ(単調載荷)

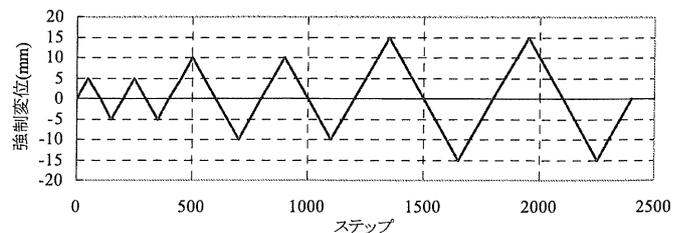


図-8 載過ステップ(正負交番載荷)

合面のせん断ずれ抵抗は安全側の仮定からゼロとし、アゴ部と鋼製連壁の接合条件としては、引張、せん断に対してはフリー、圧縮に対しては剛として解析を行った。荷重ステップは、終局曲げモーメントの1.5倍までの単調荷重（図-7）と、モデル天端に5cm、10cm、15cmを2サイクルずつ強制変位を与える正負交番荷重（図-8）の2種類を行った。

単調荷重の解析結果から、RCスラブの水平変位（RCスラブ上下端の水平変位の差分）とRCスラブ下端である鋼製連壁-RCスラブ接合部のせん断力を抽出した。図-9に鋼製連壁とRCスラブ接合部に発生するせん断力と、RCスラブの水平変位の関係を示す。図-9に示すように、せん断力のピークは、通常ハンチ構造、アゴ付スラブ構造ともに、補強なしの1.8倍程度となり、アゴ付スラブ構造でも通常ハンチ構造とほぼ同程度の耐力増加が見られることが予想された。

また図-10に正負交番荷重の解析結果から、モデル天端の水平変位と鋼製連壁-RCスラブ接合部のせん断力の関係を示す。アゴ付スラブ構造は、通常ハンチ構造に比べ最大荷重後の耐力の低下量が大きいものの、通常ハンチ構造と同等の耐力向上が見られた。

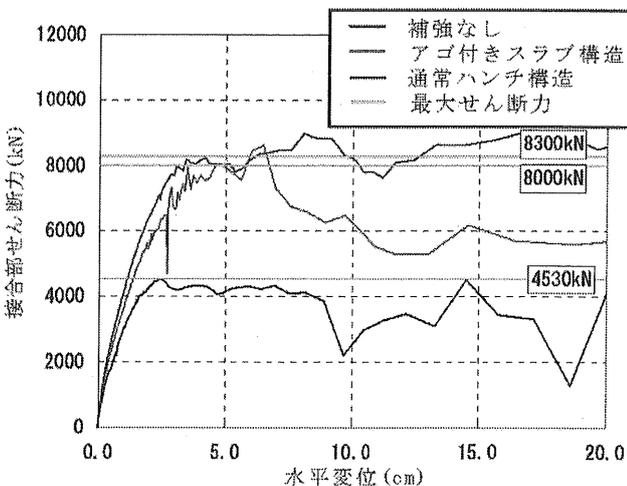


図-9 接合部せん断力-水平変位関係（単調荷重）

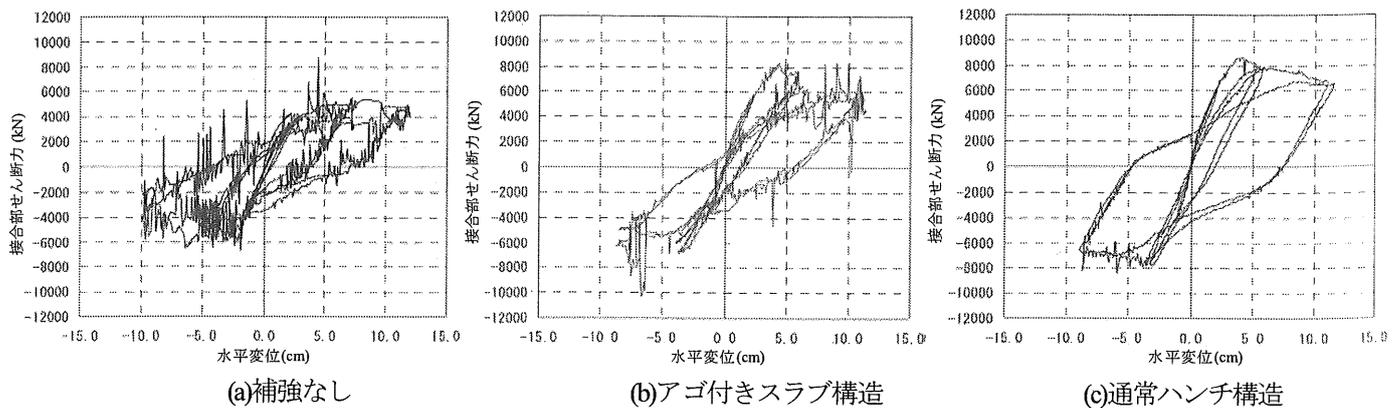


図-10 接合部せん断力-水平変位関係（正負交番荷重）

これらの結果から、アゴ付スラブ構造は通常のハンチ構造よりも若干耐力が劣るが、ほぼ同程度の補強効果が得られるものと考えられる。

(3) アゴ部構造検討

4 (2) のFEM解析結果により、補強端部の先端形状およびアゴ部の配筋細目の検討を行った。WCOMDにおける損傷の定義としては、重度な損傷として最大圧縮応力時のひずみの1.5倍（図-11に示す紫色部）、軽微な損傷として引張ひずみが0.1%（図-11に示す黄色部）と設定した。

まず補強端部の先端形状に関しては、RCスラブ終局時におけるアゴ部の圧縮側の損傷状況から、図-11に示すようにアゴ部先端から500mmの範囲に損傷が発生していないことが確認できた。これは、アゴ部の内側にひび割れが発生することで先端が機能しなくなるためであり、この先端部位は補強鉄筋を配置できなければ欠け落ちるものと考えられる。このため、同範囲から鉄筋のかぶり分の100mmを除いた範囲を削除することとし、図-12に示すような先端形状とすることにした。RCスラブ終局時の接合部のせん断力の比較により、端部形状の検討前後で耐力低下はほとんどないことを確認した。

アゴ部の補強鉄筋に関しては、施工性の観点からD32を上限と考え、D25とD32とした場合の検討を実施し、RCスラブが重度な損傷に至る際のアゴ部の補強鉄筋に発生するひずみと引張側の主筋のひずみを比較した。この結果最大ひずみは、補強鉄筋がD25の場合、主筋で5.3%程度、補強鉄筋で8.8%程度、また補強鉄筋がD32の場合、主筋で3.7%程度、補強鉄筋で4.6%程度となった。以上の検討は、アゴ部と鋼製連壁の接合面のせん断ずれ抵抗を無視した安全側の検討ではあるが、この結果によると、アゴ部の施工上より上限と考えたD32を配置しても、主筋と同等以上の大きなひずみが発生する可能性があることを示唆しており、補強鉄筋にもある程度の鉄筋径が必要となると考えられる。このため後述の実験では、

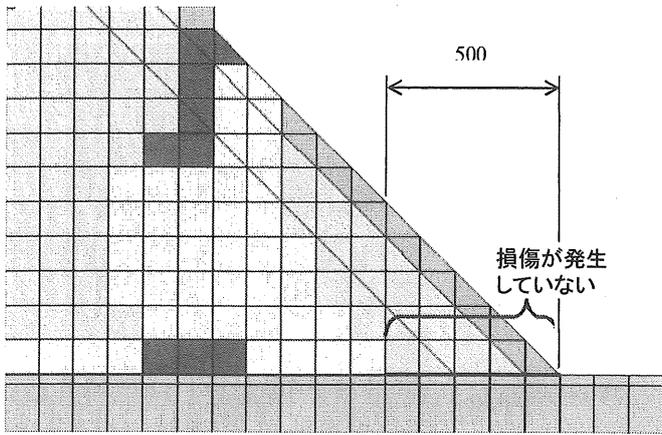


図-11 RCスラブの損傷状況

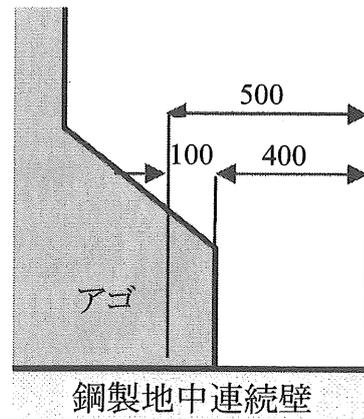


図-12 アゴ部先端形状

実構造物でD32に相当する補強鉄筋を配置し、実験結果を踏まえて設計法を検討することとした。

(4) アゴ付きスラブ構造正負交番載荷実験

a) 実験供試体の設計

ハンチ構造を採用していない過年度設計の結果から、応力度が最も厳しい条件となる設計断面及び鋼製連壁—RCスラブ接合部を抽出し、F頂版、E頂版と鋼製連壁の接合部（以下、それぞれ「A部」、「C部」という。）を着目部位とした。A部はスラブ厚が薄く補強部を片側のみに設置する箇所、C部はスラブ厚が厚く補強部を両側に設置する箇所として選定した。

実験ケースとしては、①A部の片押し繰返し載荷、②C部の正負交番載荷を行い、アゴ部の大きさの違いと、RCスラブと鋼製連壁の厚さの差による剛性比の違いを確認した。また、③C部の補強なし構造の正負交番載荷を行い、アゴ付きスラブ構造の有無による補強効果を確認した。

実験供試体の縮尺については、既往文献¹⁾³⁾でこれまで実施された同様の実物大実験に比べ、本検討対象の寸法（芯材高、床版厚）が大きいことから、本実験では1/2縮小モデルの供試体を用いて実験を行った。

実験供試体に用いた材料仕様を表-1に示す。鋼製連壁

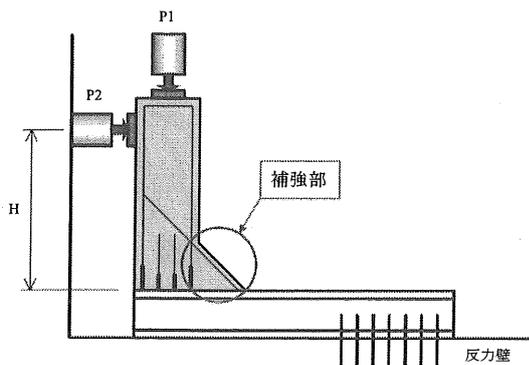
内のソイルセメントの強度は小さく剛性は考慮しないが、芯材の局部座屈防止効果を期待しているため、ソイルセメントの代替材料として、建設発生土と水および固化材を混合した強度の小さい流動化処理土を使用した。

載荷方法の概念図を図-13に示す。本実験の終局状態は、補強構造無しの場合はRCスラブ—鋼製連壁接合部、補強構造有りの場合はアゴ部のつけ根の曲げ破壊と考えられ、これらの位置が曲げ終局に達する荷重を設定した。なお水平荷重の載荷高さは、地震時の設計曲げモーメントと設計せん断力の比率により設定した。

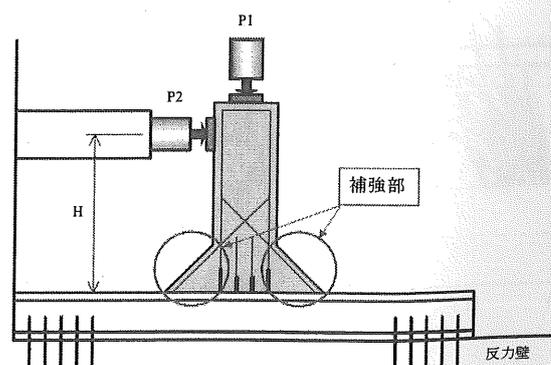
また補強構造無しの場合のRCスラブ—鋼製連壁接合部、補強構造有りの場合のアゴ部のつけ根位置が曲げ終局に達するときに、RCスラブにせん断破壊が生じないように、せん断補強筋を配置しておく。設計せん断力に対してせん断耐力照査を行い、設計せん断力が曲げ耐力以上にならないようなせん断補強筋を算定した。

表-1 材料仕様

コンクリート設計基準強度	$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$
鉄筋	SD345
鋼製地中連続壁(芯材)	A部:SS400、C部:SM490
鋼製地中連続壁(ソイルセメント)	$\sigma_{ck} = 0.5 \text{ N/mm}^2$



(a)片側補強 (A部)



(b)両側補強 (C部)

図-13 載荷方法の概念図

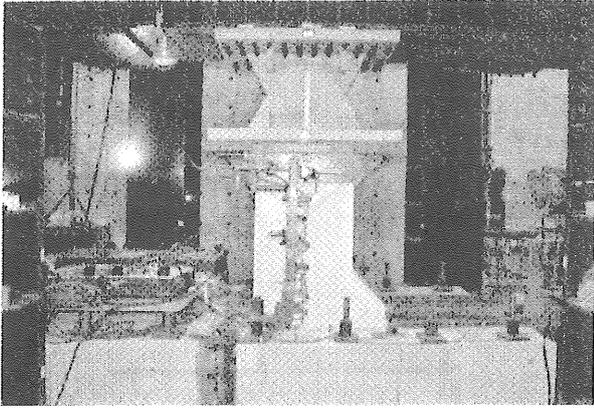


図-14 荷装置

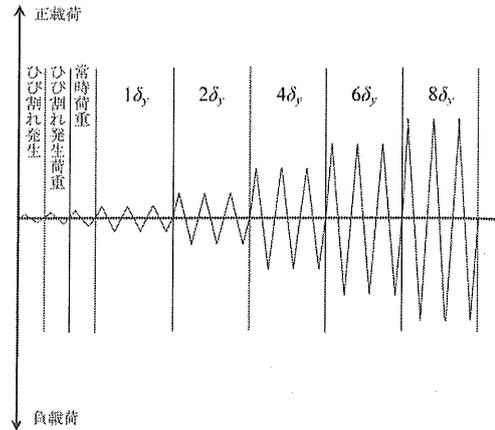


図-15 荷重ステップ

さらに本実験は、アゴ付き構造の増設によるRCスラブの補強効果の確認が主目的であるため、鋼製連壁はRCスラブの終局時より先に曲げ破壊しないようにしておく必要があり、RCスラブ終局曲げモーメント時に、鋼製連壁の降伏曲げモーメントに2割以上の余裕を持たせて鋼製連壁の断面を設定した。ただし本実験では、補強部の下面にあらかじめ補強プレートが配置されていない影響についても着目していることから、鋼製連壁の曲げ剛性を上げる際には、鋼製連壁の上フランジの厚さは固定し、ウェブおよび下フランジの厚さを増すことで対応するよう配慮した。

図-14に実験に用いた荷装置を、図-15に荷重ステップを示す。荷重は、まず鉛直ジャッキで鉛直荷重を荷重し、その後水平荷重は変位制御により正負交番荷重を行う。正負それぞれの荷重において、水平荷重-水平変位曲線の勾配変化時の変位を降伏変位 δ_y とし、以降図-15に示す δ_y ごとを目標に各3回の荷重を行った。

b) 実験結果

各供試体の繰返し荷重実験の結果から、図-16に供試体天端の水平荷重-水平変位関係を、図-17に表-2に実験値とハンチ全高を有効としたRC断面計算による設計

値との比較を示す。なおA部の実験に関しては、 $7\delta_y$ までの荷重において供試体の治具への定着が不完全であったために、一度水平荷重を除荷した後に再度定着して実験を継続している。このため、 $7\delta_y$ までの荷重結果は、実性能と異なる可能性がある。

表-2に示す結果より、C部補強ありに関して、アゴ部つけ根断面と鋼製連壁とRCスラブの接合面ではほぼ同時期に降伏に至り、接合面において終局に至っている。また降伏時、終局時のどちらにおいても、アゴ部つけ根、接合面ともに実験値は設計値以上の耐力が確認できた。A部に関しては、アゴ部つけ根断面よりも接合面が先行して降伏、終局に至るが、C部と同様に終局荷重の実験値は設計値に対して十分大きな耐力となった。また、C部補強の有無による比較により、アゴ付き構造の設置により同等の変形性能のまま耐力の増強が図れることが分かる。

さらに、図-18に示すように鋼製連壁のRCスラブが接続する上フランジの最大ひずみは、C部補強なしに比べC部補強ありでは1/2程度に減少しており、アゴ付き構造の増設による鋼製連壁の断面力低減が見られた。

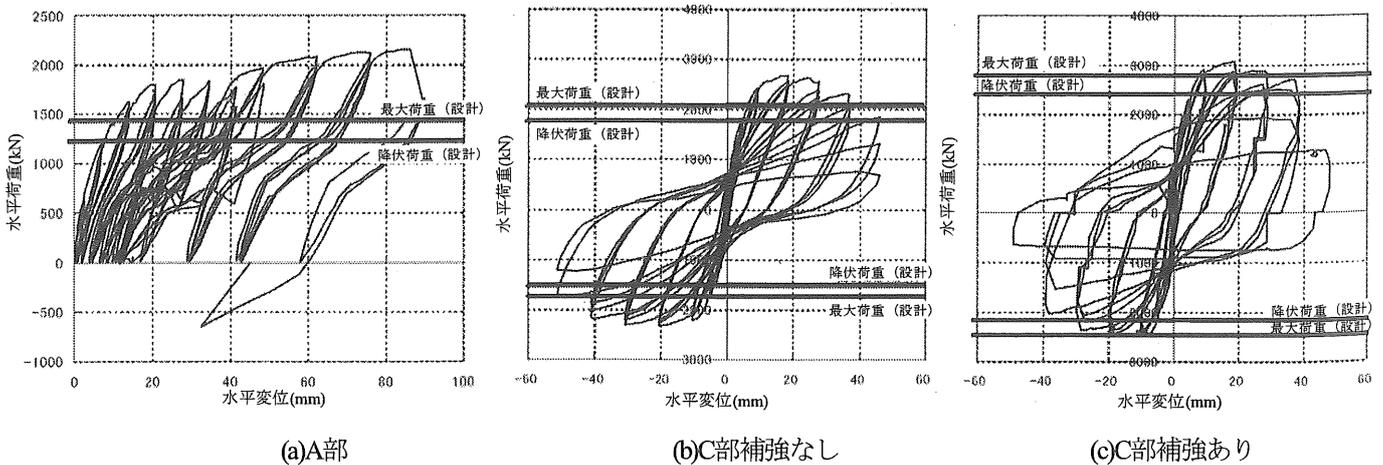


図-16 水平荷重-水平変位関係

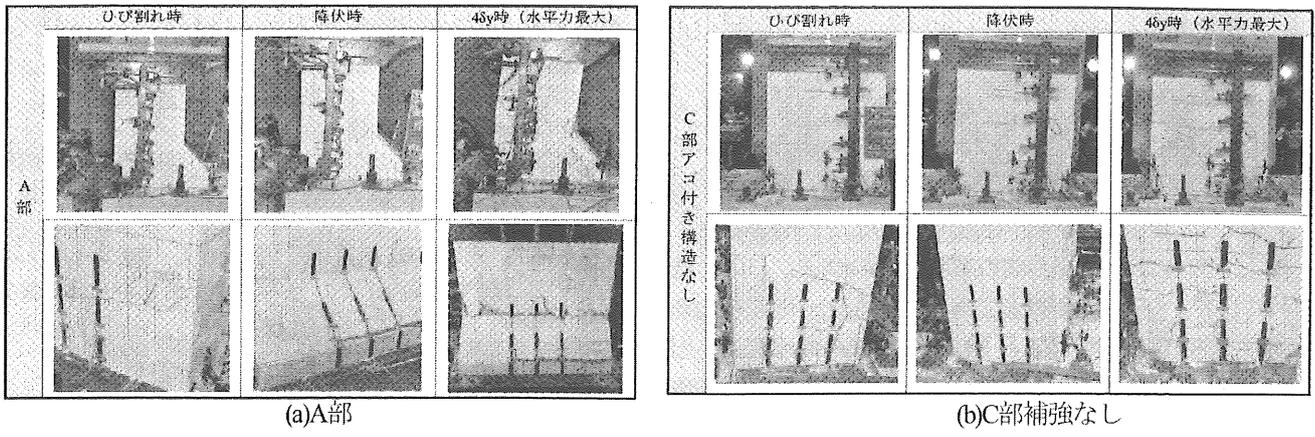
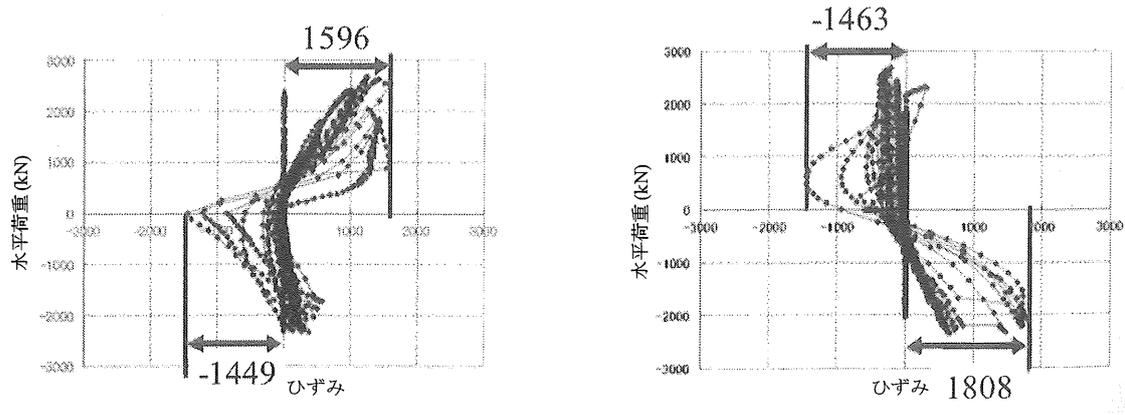


図-17 代表ステップの状況

表-2 実験結果と計測値の比較

水平荷重(kN)

		A部			C部補強なし						C部補強あり					
		正側			正側			負側			正側			負側		
		設計値	実験値	実験/設計	設計値	実験値	実験/設計	設計値	実験値	実験/設計	設計値	実験値	実験/設計	設計値	実験値	実験/設計
アゴ部 つけ根 断面	ひび割れ荷重	284	105	0.37	848	746	0.88	-834	-785	0.94	848	746	0.88	-836	-742	0.89
	常時荷重	698	未確認	未確認	1,451	未確認	未確認	-1,280	未確認	未確認	1,451	未確認	未確認	-1,280	未確認	未確認
	地震時荷重	1,067	1,397	1.31	2,186	1,925	0.88	-1,930	-1,703	0.88	2,186	1,925	0.88	-1,930	-1,902	0.99
	降伏荷重	1,215	1,520	1.25	2,408	2,119	0.88	-2,110	-1,784	0.85	2,408	2,119	0.88	-2,110	-2,008	0.95
	最大荷重	1,418	—	—	2,801	—	—	-2,425	—	—	2,801	—	—	-2,423	—	—
鋼製連壁と スラブの 接続面	ひび割れ荷重	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	常時荷重	849	未確認	未確認	1,051	未確認	未確認	-926	未確認	未確認	1,051	未確認	未確認	-1,222	未確認	未確認
	地震時荷重	1,295	1,283	0.99	1,583	1,736	1.10	-1,398	-1,585	1.13	1,583	1,736	1.10	-1,844	-1,902	1.03
	降伏荷重	1,475	1,340	0.91	1,744	1,842	1.06	-1,528	-1,784	1.17	1,744	1,842	1.06	-2,004	-2,150	1.07
	最大荷重	1,699	2,114	1.24	2,025	2,672	1.32	-1,755	-2,329	1.33	2,025	2,672	1.32	-2,518	-2,473	0.98



(a)C部補強なし (b)C部補強あり

図-18 鋼製連壁上フランジ ひずみ履歴

5. まとめ

以上の結果より、アゴ付スラブ構造であっても、ハンチ部の増設により RC スラブの耐力増強の耐力増強が可能であり、その耐力はハンチ全高を有効とした RC 断面計算により安全側の評価が可能であることが分かった。また、RC スラブと接合部の鋼製連壁のウェブの応力低下にも寄与することが確認できた。さらに、地震時の地盤変形等により鋼製連壁と RC スラブ間の曲げ変形が大きくなった場合でも、ハンチ起点部において損傷が発生するため、接合部での補修困難な損傷の発生を防ぐことができる。

参考文献

- 1) 田崎和之, 広沢規行, 石田宗弘, 今福健一郎: ソイルセメント鋼製地中連続壁その 2/床版接合部の繰り返し載荷特性, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 2001.
- 2) 田嶋仁志, 岸田政彦, 前川宏一, 大野了: 開削トンネル隅角部周辺の耐震性能に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004.
- 3) 幸左賢二, 藤井康男, 大野政雄, 鈴木直人: 開削トンネルの耐震性に関する実験的検討, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 1998.

THE NS-BOX DIAPHRAGM WALL AS MAIN WALLS AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE JOINT WITH THE SLAB

Atsushi YABUMOTO, Mitsumasa OSADA and Takahiro INOUE

In this report, we proposed the reinforced structure that doesn't fix reinforcing bar which reinforced haunch in the NS-BOX diaphragm wall like haunchs. We decide to call it "the structure with the chin". Cyclic loading experiments of the structure with the chin were conducted in order to investigate the effect of reinforced department which are established in the joint of NS-BOX diaphragm wall and slab. It is found that the increase of strength of RC slab is enables by installing the structure with the chin.

ソイルセメント壁の狭隘地・低空頭型施工機械

＝CSM工法の施工機械の開発と展開＝

ハザマ 佐久間 誠也
Seiya Sakuma

BAUER Maschinen GmbH Helmut Florian

1. はじめに

CSM (カッターソイルミキシング) 工法が2004年に初めて日本に導入されてから7年が経過し、その間に狭隘地・低空頭型の機械の開発も進められてきた。そして、新しい機械の開発と共に遮水壁や土留め壁に加え本体利用可能な鋼製地中連続壁工法-IIの施工機械としての施工実績も増えてきている。国内外の総施工面積は2011年3月末現在で約50万 m^2 となり国内だけでも7万 m^2 を越えている。また、岩盤や礫地盤を含む様々な条件下で施工実績を積み、技術的な問題点の克服や機械の改良も随時行われている。

CSM工法の概要や特長についてはバウアー工法研究会発刊のCSM工法標準積算資料に詳述されているので省略し、本稿においては主に狭隘地・低空頭型機械の開発経緯と具体的な工夫内容およびその展開について紹介する。

2. CSM機誕生の経緯

日本における、原位置土攪拌混合ソイルセメント地中連続壁の施工機械は、オーガー攪拌方式のSMW機やチェーン攪拌方式のTRD機など、工法とセットで開発された機械が主流となっている。バウアーマシーネン社(独)は、原位置土攪拌混合ソイルセメント地中連続壁の経

済性に目を付け、安定液掘削による地中連続壁の施工機械で採用されていた水平多軸回転カッターを用いた機械の開発に着手した。

その結果2003年にケリーバー方式のCSM機がバウアーマシーネン社(独)とソレタンシュ社(仏)の共同開発によって生まれた。そして欧州における試験施工を踏まえて、2004年にCSM工法の施工機械としてBCM3型およびBCM5型のCSM機が日本に導入された(写真1)。

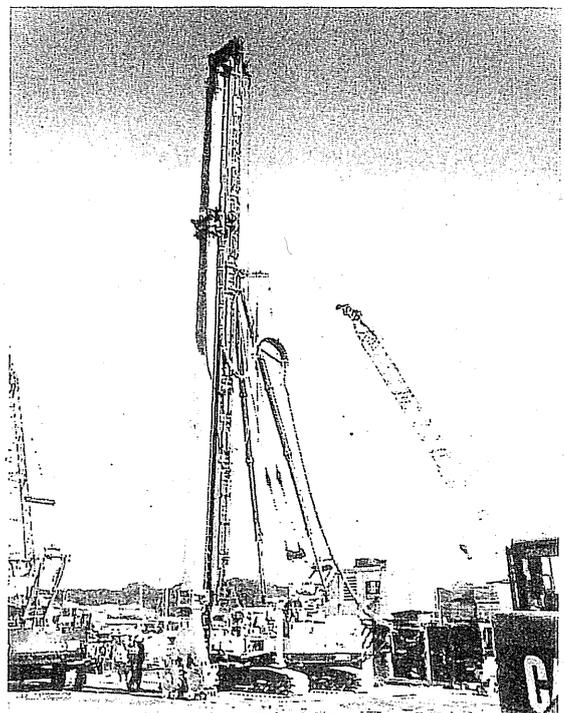


写真1 BCM5型-CSM機

3. ケリーバー方式から 吊り下げ方式への変遷

開発されたケリーバー方式の機械で大深度施工を行うには、ケリーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けがたく、おのずと掘削深度に限界(35m程度)があった。そこで、国内にあった既存の地中連続壁掘削機の水平多軸回転カッター部(トレンチカッターBC30:ハザマ提供)と新たにドイツで製作したフレー

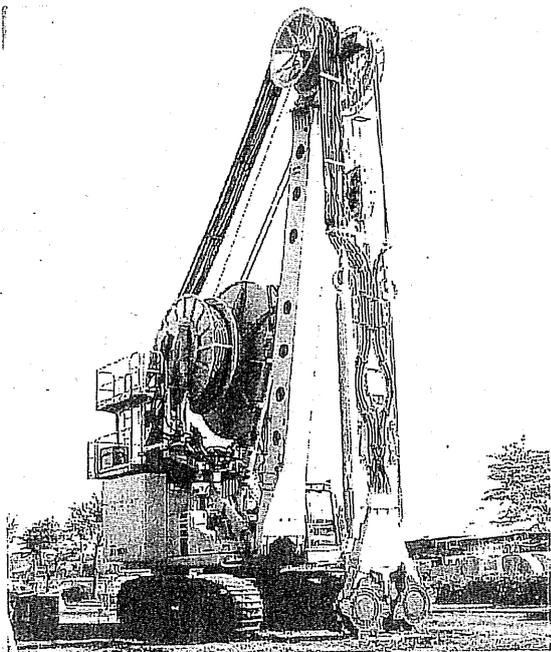


写真2 CBC25-BCM10型-CSM機

第1表 CBC25-BCM10型CSM機:諸元

掘削深度 (m)	~65
掘削壁厚(mm)	640~1,200
掘削幅(mm)	2,800
カッターフレーム重量 (t)	18
カッターフレーム全長 (mm)	9,057
カッタートルク (kN・m)	0~80
カッター回転数 (rpm)	0~35
ベースマシン全装備重量 (t)	102
機械寸法 (m) 高さ×幅×奥行き	14.9×5.5×9.1

ム部を組み合わせて、カッターフレームを組み立て、低空頭用ベースマシン(CBC25)から吊り下げることにより、大深度・低空頭型CSM機(CBC25-BCM10型-CSM機)を造り上げた(写真2)。第1表に、この機械の諸元を示す。

3-1 吊り下げ方式の低空頭化

CBC25-BCM10型は空頭高さが約15m程度であり、三点式のSMW機に比べれば半分ほどの高さであるが、高架下や電線等の下での作業には難があった。また、工事の需要がなかったため、試験施工1件、実施工1件を持って海外に流出してしまった。

その後、バウアーマシーネン社は、BCM10型機の開発により日本における吊り下げ方式のCSM機の需要を確信し、機械高さ6.5m、施工深度65m、対応壁厚0.5~1.2mの大深度・低空頭型のクアトロカッター機を開発した。クアトロカッター機は、写真のように回転カッターを4対を有しており、攪拌性能の向上やカッター引き上げ時の負荷低減を実現した(写真3)。また、ベースマシンは専用機とし低空頭仕様とした。なお、クアトロとはイタリア語で数字の4を言い、4対のカッターをイメージしている。

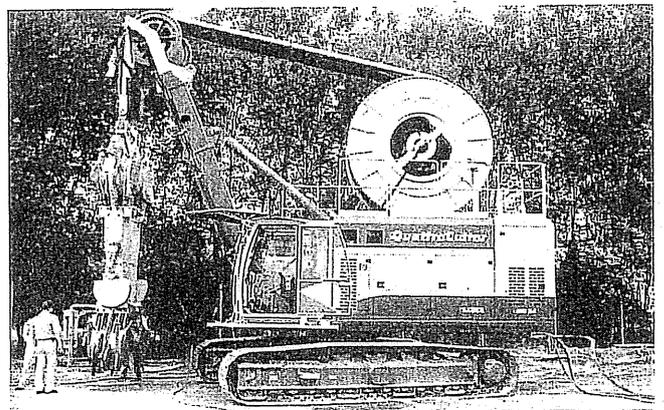


写真3 BCM5型-CSM機(クアトロカッター)

3-2 クアトロカッターの 狭隘地対応型への改造

クアトロカッターの施工性に着目したハザマは、設計施工型の技術提案工事に採用すること

を決め、施工時の通行車線数や歩道を考慮し、道路上の作業帯の幅を6mと想定した。クアトロカッターは、カッターからベースマシンの後部までおよそ8mあったため、バウアーマシーン社に狭隘地対応型への機械の改造を依頼し共同でクアトロサイドカッターを開発した。

カッターをベースマシンのサイドに吊り下げられるようにしたことによりカッター中心からキャタピラー端部までの幅を4.4mまで縮めることが可能となった(写真4)。カッターをベースマシンに対して前方のみで吊るタイプをフロントカッター、サイドでも吊れるタイプをサイドカッターと便宜上呼ぶことにした。ただし、サイドカッターは、構造上ベースマシンに対して前方にカッターを持ってこられることもできる。第2表にはクアトロカッターの諸元を示す。表中の(F)はフロントカッター、(S)はサイドカッターを示す。

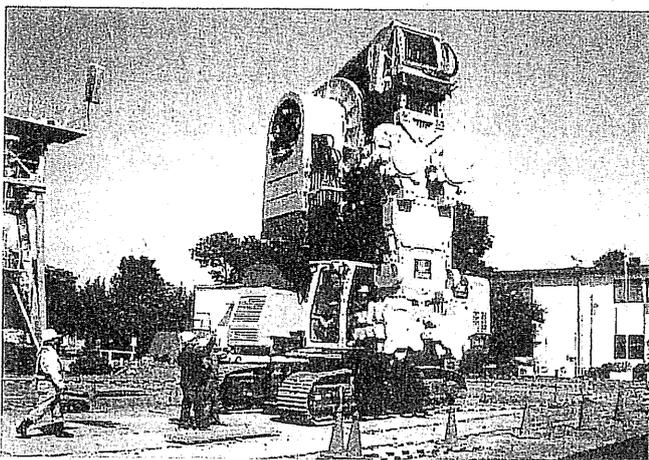


写真4 BCM5型-CSM機(クアトロサイドカッター)

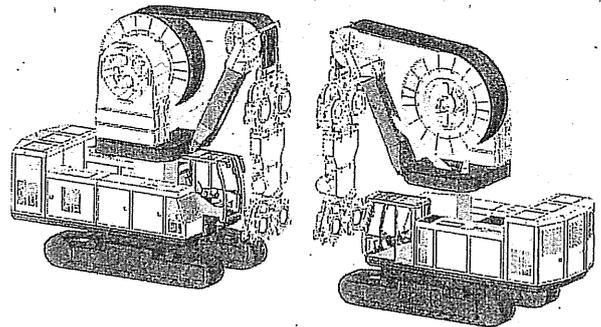
4. サイドカッターの機械構造と工夫

フロントカッターからサイドカッターへの改造は、設計に約2ヶ月半、部品調達に約2ヶ月半、そして組み立てに2ヶ月と7ヶ月を要した。構造的には、ベースマシンと一体となっていたホースドラムおよびカッター部を新しく製作した回転テーブル付きのポストの上に乗せてい

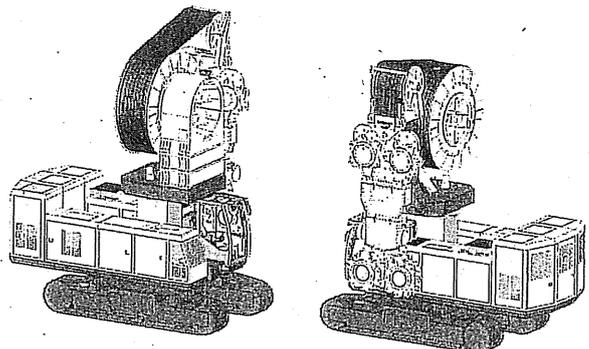
第2表 BCM5型-クアトロカッター機：諸元

掘削深度 (m)	~65 (F) ~60 (S)
掘削壁厚(mm)	500~1,200
掘削幅(mm)	2,400
カッターフレーム重量 (t)	14.5
カッターフレーム全長 (mm)	5,160
カッタートルク (kN・m)	0~45
カッター回転数 (rpm)	0~40
ベースマシン全装備重量 (t)	~84 (F) ~87 (S)
機械寸法 (m)	6.5×3.3×8.0 (F)
高さ×幅×奥行き	8.5×4.4×8.0 (S)

る。このため、高さが8.5mとフロントカッターに比べ2mほど高くなってしまったが、フロントカッターとサイドカッターはパーツの組み換えにより互換性があるので使用状況に応じて使い分けることができる。サイドカッター設計時のイメージパースを第1図、第2図に示す。

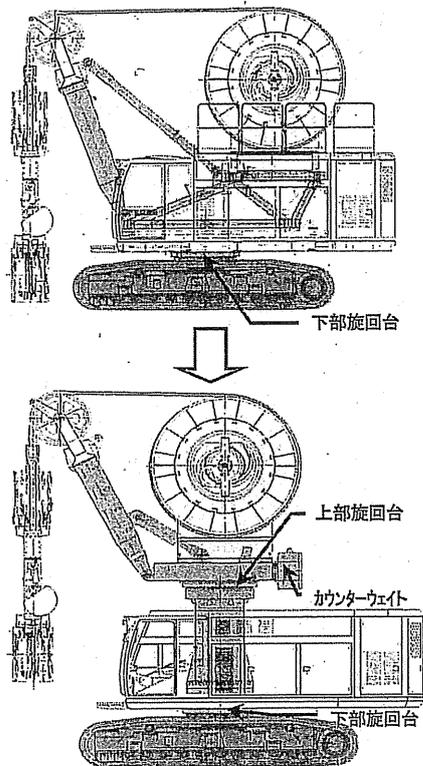


第1図 フロントにカッターがある場合

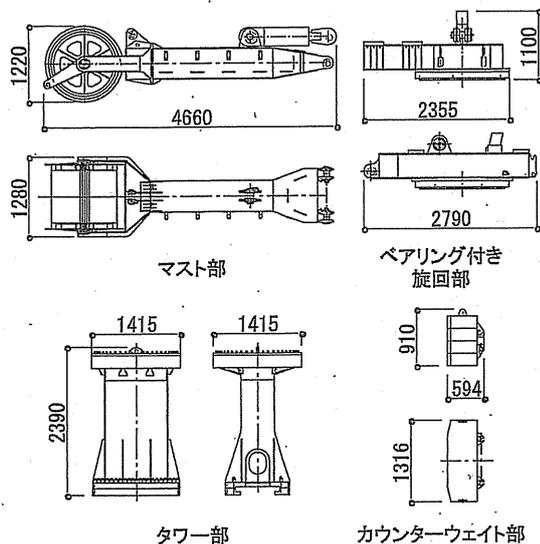


第2図 サイド(左右)にカッターがある場合

具体的な改造のポイントは、第3図に示すとおり下部旋回台に加え上部旋回台を設置することにより、キャタピラー部、ベースマシン本体、カッター部がそれぞれ自由に旋回できるようにしたことである。参考としてマスト、タワー、ベアリング付き旋回部、カウンターウエイトの改造パーツを第4図に示す。



第3図 サイドカッターへの改造のポイント



第4図 改造パーツ詳細図

5. 狭隘地・低空頭型機械としての施工への展開

CSMクアトロカッター機の施工への展開は、東京地区や大阪地区の道路、鉄道、地下通路、シールド立坑などにおける実績が増えており、設計にCSM機の使用が前提となっている工事も見受けられる。この背景には狭隘地施工や上空制限を受ける低空頭型施工と言った都市部独特の施工条件の厳しさがある。

バウアー工法研究会では、これまでにCSM機の普及を図るために工法の技術積算資料の発刊やNETIS登録、東京都の新技术登録などを行ってきた。また、鋼製地中連続壁協会からは、鋼製地中連続壁工法Ⅱにおける積算にCSM機を用いた資料が発刊されている。

以降、簡単にCSMサイドカッター機で施工された最近の施工事例を写真で紹介する。

写真5は、道路トンネル拡幅部の施工深度約50mの土留め工事であり、路上交通への影響を極力少なくするため狭隘な作業帯の中で施工された。

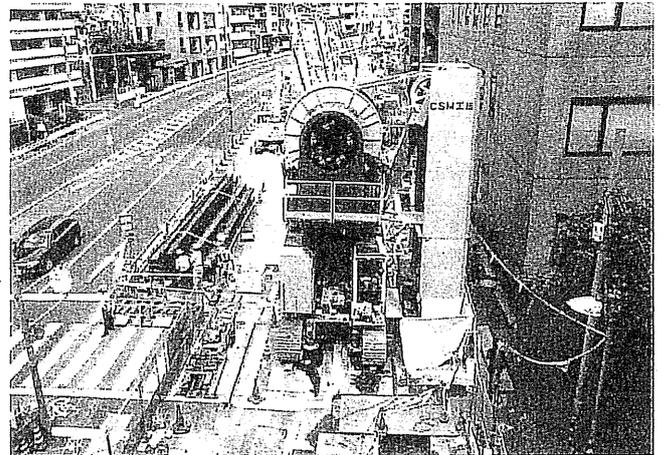


写真5 道路トンネル拡幅部工事の施工例

写真6は、地下通路の側壁を本体利用で構築する工事であり、設計からCSM工法で計画されていた既設ビルへの超近接施工である。

写真7は、道路の分岐部の施工であり、当初TRD工法で計画されていたが、施工用地が狭隘でありCSM機に変更された工事である。

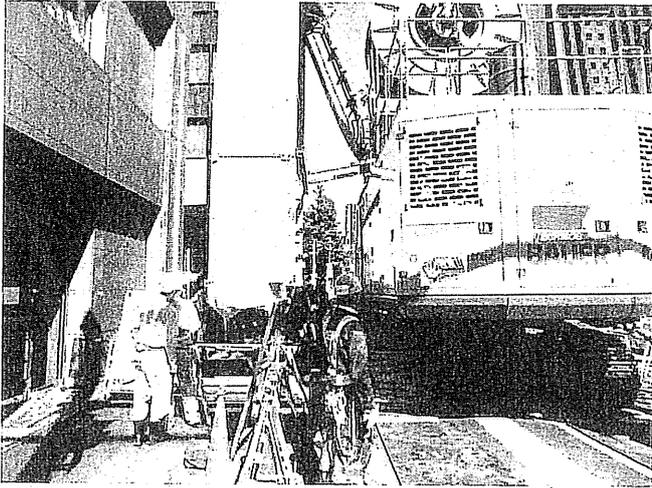


写真6 地下通路工事の施工例

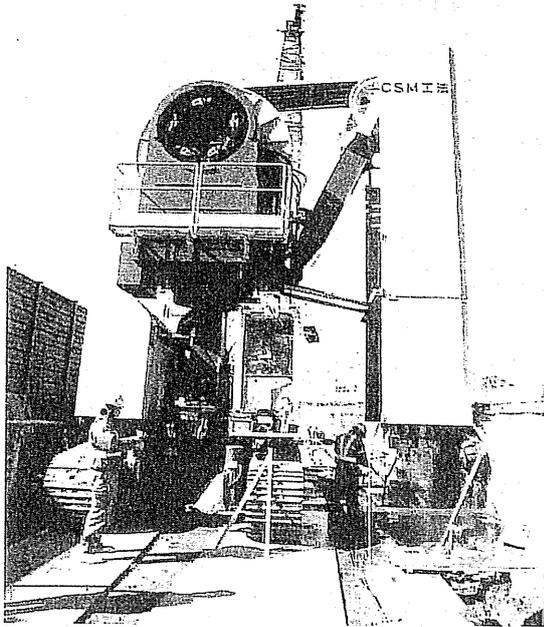


写真7 道路トンネル分岐部の施工例

6. おわりに

狭隘地・低空頭下の工事における建設機械の開発は、時間と費用が掛かるが、施工する工事が常にあるとは限らないのでなかなか採算が合わないものである。しかし、今回紹介したCSM機は、狭隘地・低空頭下の工事のみならず大深度、大壁厚のソイルセメント壁や地盤改良が施工できるため汎用性が広い機械である。

したがって、現在のところ、クアトロカッタ

ー(サイドカッター仕様への変更可)は日本に3台しかないが、CSM工法の普及と共に今後さらに機械の需要も増えていくものと考える。

<参考文献>

- (1) 佐久間誠也・梅本慶三(パワー工法研究会):“大深度・低空頭型CSM工法の開発と試験施工”, 総合土木研究所、基礎工、2006年5月号、Vol.34、No.5、pp.89-92 (2006)
- (2) 佐久間誠也(パワー工法研究会):“クレーバー及び吊り下げ方式のCSM機と施工事例”, 総合土木研究所、基礎工、2008年3月号、Vol.36、No.3、pp.53-56 (2008)
- (3) 原田哲伸・井上隆広・岩倉孝幸:“狭隘地における大深度地下連続壁の施工—CSM工法クアトロカッター機の開発と品川線大橋連結路工事への適用—”, 土木施工、平成21年4月号 (2009)

【筆者紹介】

佐久間 誠也

ハザマ 土木事業本部 技術第一部長

〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5

TEL: 03-3568-5761 FAX: 03-3588-5755

E-mail: sakuma@hazama.co.jp

パワー工法研究会 CSM委員会 委員長

〒156-0052 東京都世田谷区経堂2-3-8

但馬屋ビル3F (有)日本パワー内

TEL: 03-5426-3151 FAX: 03-5426-3152

Helmut Florian

BAUER Maschinen GmbH

Sales Director

Australia, New Zealand, Korea, Japan

TEL: +49 8252 97-1183

FAX: +49 8252 97-1135

E-mail: Helmut.Florian@bauer.de

技術資料

狭隘な作業ヤード内における土留め壁の構築

＝クアトロサイドカッター機を使用したCSM工法による施工＝

首都高速道路㈱ 田原 徹也
Tetsuya Tahara

1. はじめに

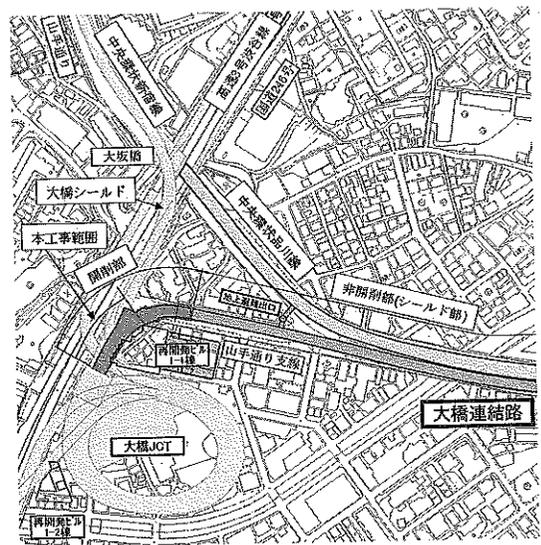
大橋ジャンクション（以下、大橋JCT）は首都高速中央環状線と首都高速3号渋谷線（以下、3号渋谷線）を接続するジャンクションであり、中央環状新宿線（大橋JCT～熊野町JCT間）の一部として、平成22年3月28日に開通した。

現在、中央環状線の南側部分を形成する中央環状品川線（大橋JCT～大井JCT間）を建設中であり、大井JCTから大橋JCTに向かってシールド工法を用いてトンネルを掘り進めている。大橋地区では中央環状品川線と大橋JCTを結ぶ連絡路を建設している。

連絡路工事はシールド部と開削部に分かれており、開削部の一部では営業中路線のシールドトンネルを切開くことにより分合流部を構築する。

SJ14工区(1)EF連絡路トンネル工事（以下、本工事）は大橋シールド（第1図参照）開削部の工事であり、営業中路線のシールドトンネルを切開く工事である。

本工事の施工の最初のステップである土留め壁の構築では、都市内の限られた作業ヤード、工程上の制約条件下での施工が求められた。本稿では、本工事における土留め壁の施工に着目し、施工にあたり採用したCSM工法の概要、選定理由及び施工機械として使用したクアトロ

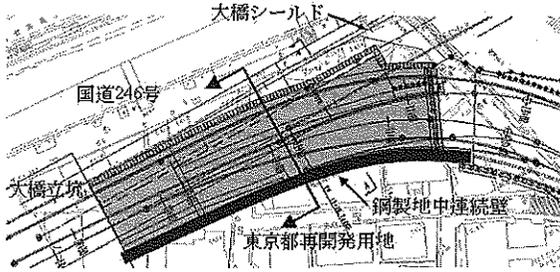


第1図 大橋連絡路（平面図）

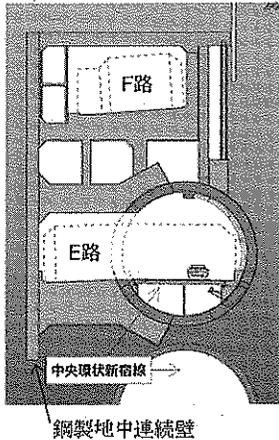
サイドカッター機について紹介する。

2. 工事の概要

本工事（SJ14工区(1)EF連絡路トンネル工事）は、中央環状品川線と大橋JCTを接続する連絡路のうち、大橋JCTループ部に近い部分に位置する上下2層の開削トンネルを構築する工事である（第2図、着色部）。上層は大橋JCTから品川線への流出、下層は品川線から大橋JCTへの流入となる（第3図参照）。上層は矩形のトンネル構造、下層は中央環状新宿線から流入する大橋シールドの上層を切開いて合流部



第2図 工事範囲図(平面図)



第3図 一般断面図

を構築するトンネル切開き構造である。切開き工法とはシールドトンネル完成後に地山を外部から掘削し、セグメントと一体化される拡幅部躯体を構築することにより道路拡幅構造とするものである。

工事の流れとしては先ず土留め壁を施工し、掘削、躯体の構築を行い、最後に切開きを行う。

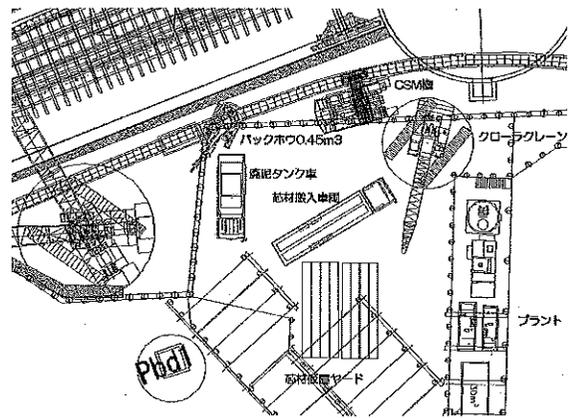
本工事で構築する土留め壁は国道246号側と東京都再開発用地側(第2図参照)があるが、本稿では第2図の太線部、第3図の左側にあたる掘削深度約30mの土留め壁(以下、再開発側土留め壁)を対象とする。再開発側土留め壁は平成20年8月から施工を開始した。

3. 土留め壁の選定

大橋JCTは、地域住民、行政(東京都、目黒区)、首都高の4者で協力し道路事業と一体

で整備する再開発事業区域内にあり、現在、東京都再開発事業用地では再開発ビルが構築されている。本工事が行われた当時は、この東京都再開発事業用地を作業ヤードとして借用し施工を行っていた。本工事には東京都再開発事業用地の借用期間である中央環状新宿線開通の平成22年3月までという工程上の制約が存在していた。

本工事以外にも中央環状新宿線の開通に向け多数の工事を並行して行う必要があった。これら他の工事としては、例えば大橋JCT高架部の桁架設や、高架部に設置されるカバー・ルーバーの施工などがあった。桁架設には桁を地組みするための地組みヤードや桁の架設ヤードが必要であり、カバー・ルーバーの施工には荷揚ヤードが必要であった。大橋JCTは国道246号と山手通り支線に隣接しており、これら他工事の作業ヤードも東京都から借用した用地から確保しなければならなかった(第4図参照)。



第4図 機械配置図

また大橋JCT高架部の桁架設により本工事には空頭制限も存在しており、低空頭の重機を用いる必要があった。

土留め壁の施工方法の種類は、現場の制約条件やその用途によって多岐にわたる。本工事における土留め壁の施工方法の選定には、以下の点を考慮する必要があった。

- ① 作業ヤードが限定されるため施工効率が良く占有面積の小さい工法であること。
- ② 掘削深度が深い(約30m)ため、大規模掘削に対応できること。
- ③ 地下水位が高いことから、止水性が良いこと。
- ④ 砂礫層ならびに土丹層を掘削するため、先行削孔等の補助工法を必要としないこと。
- ⑤ 東京都再開発事業用地を借用できる期間が限られており工程上の制約から、工期が優先となること。

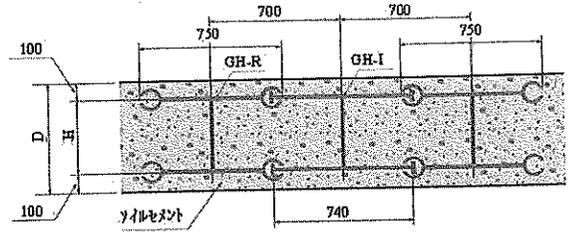
以上の点を考慮し、再開発側土留め壁として鋼製地中連続壁の本体利用(単独壁)を選定した。鋼製地中連続壁は、剛性が高いため当該工事のような掘削深度の深い施工に適している。また本体利用とすることで建設用地幅を縮小でき、全体工程も有利となる。

鋼製地中連続壁は、下記に示す形式があり、比較検討を行った。

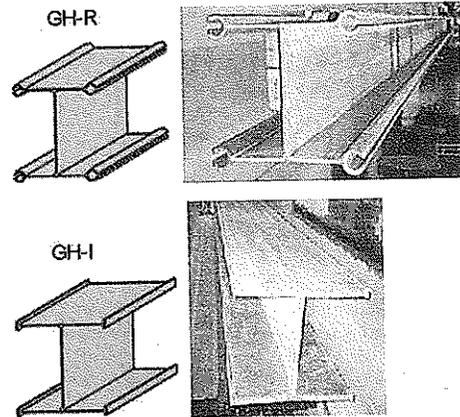
- ① コンクリート等充填鋼製地中連続壁
- ② ソイルセメント鋼製地中連続壁

作業スペースに関して、①を構築する安定液掘削工法では、安定液プラントと泥水処理プラントが必要である。それに対し②では現位置攪拌工法により原地盤とセメントミルクを地中で混練してソイルセメント壁を造成するため、安定液掘削工法に比べてプラントの占有面積を小さくすることができる。経済性に関しては、現位置攪拌で設備が少なく、コンクリートの購入の必要が無い②が経済的である。また、施工のスピードは現位置攪拌となる②のほうが早い。さらに②は、混合攪拌処理工法で築造されたソイルセメント壁中にNS-BOXのGH-RとGH-Iの2種類の部材を交互に連続して建込み、連続したフランジを嵌合させて構築するため、継手部の止水性が高くなる(第5図、第6図)。

したがって、これらの点を総合的に勘案し、②ソイルセメント鋼製地中連続壁を採用した。



第5図 ソイルセメント鋼製地中連続壁(標準構造)

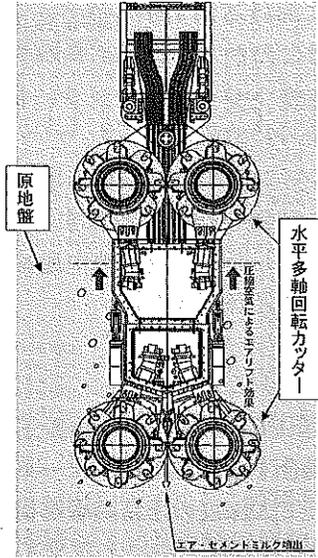


第6図 NS-BOXの構造

4. 使用した施工機械

CSM工法とは、水平多軸型地中連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター(Cutter)を用いて土(Soil)とセメント系懸濁液を原位置で攪拌(Mixing)し、等壁厚のソイルセメント壁を造成する工法である。

CSM工法における施工機械は、カッターを支持する方式により、クレーバー方式と吊り下げ方式がある。クレーバー方式のCSM機は2003年にドイツ(バウアーマシーネン社)において開発され、2004年にBCM3型1台が日本に導入され、その後、同じくクレーバー方式のBCM5型が導入された。しかし、クレーバー方式の機械で大深度施工を行うには、クレーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けられない。本工事のような狭隘なヤードや空頭制限下での作業を求められる際には不向きと考えられる(機械幅:約10.0m、機械高:約



第7図 CSM工法概念図

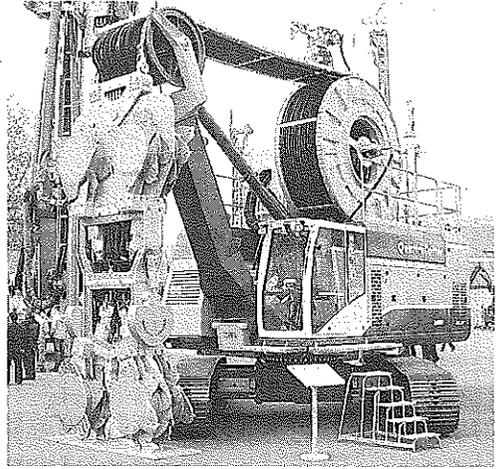


写真2 クアトロカッター機

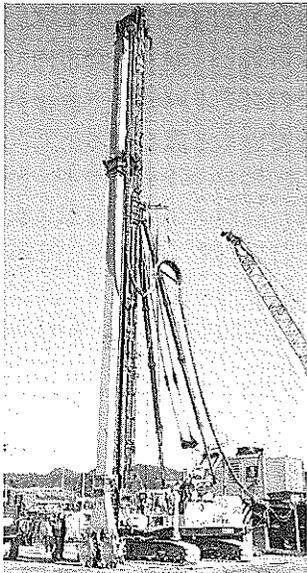


写真1 ケリーバー方式

30.0m、写真1参照)。

そのため、限られた作業ヤードや空頭制限下で大深度のソイルセメント壁を造成するため、クアトロカッター(4カッター)を吊り下げ方式とし、コンパクト化および掘削・攪拌能力の向上を目的としたクアトロカッター機が開発された(機械幅:約8.0m、機械高:約6.5m、写

真2参照)。

さらに、クアトロカッター機の必要施工スペースである約8.0mを小さくするために、クアトロカッターをベースマシンのサイドで吊り下げることにより機械幅を大幅に短縮したクアトロサイドカッター機が開発された(機械幅:約4.5m、機械高:約8.6m、写真3参照)。このクアトロサイドカッター機を使用することによりヤード幅6m以内での施工が可能となる。

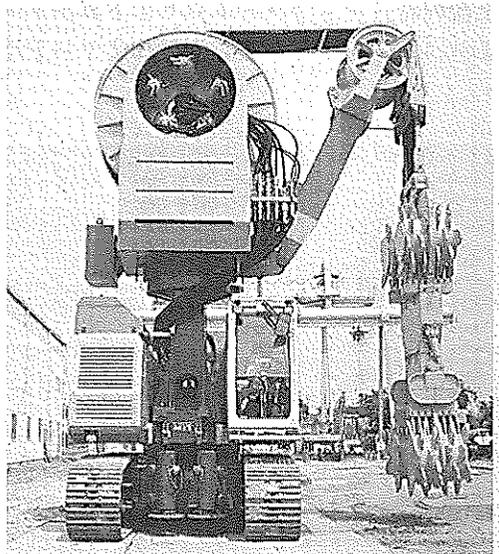


写真3 クアトロサイドカッター機(本工事で用いた掘削機)

クアトロサイドカッター機的主要な特長を以下に示す。

- ① 空頭制限下、狭隘なヤード（ヤード幅6.0m）においても大深度（～60m）のソイルセメント壁の造成が可能。
- ② 水平多軸回転カッターを用いた掘削・攪拌方式の採用により、岩盤や硬質地盤においても、先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できるため、工期短縮、コスト低減が可能。
- ③ カッターユニット内部に搭載されたジャイロコンパスにより、リアルタイムで掘削精度を確認でき、4ヶ所に配置されたカッターの回転数・回転方向とガイドフラップにより方向制御・修正掘削ができる。
- ④ 優れた攪拌性能とカッティングジョイントにより、高い遮水性を確保できる。
- ⑤ 等壁厚のソイルセメント壁が造成されるため、土留め壁等で芯材の間隔を任意に配置できる。
- ⑥ 多くの工事で採用されているSMW工法よりも高さが1/4ほどの低空頭の重機を用いるため、転倒に対する安定性が高く、また周辺に対する圧迫感がない。

上記の特長をもつクアトロサイドカッター機により、前述のような限られた作業ヤードや空

頭制限下における施工が可能であると判断し、本工事ではこのクアトロサイドカッター機を採用した。クアトロサイドカッター機は第4図、写真4のように70tクレーン、バックホウ、クローラクレーン等の機械や他工事の作業ヤードに囲まれた狭隘な空間に設置することにより、他工事と並行しながら鋼製地中連続壁を効率的に施工することができた。

5. おわりに

SJ14工区(1)EF連結路トンネル工事では、他の工事と競合する狭隘な作業ヤード、工程上の制約条件下で大深度の土留め壁を構築する必要があったが、CSM工法によるソイルセメント鋼製地中連続壁を採用し、クアトロサイドカッター機を使用することで、施工が可能となった。他工区でもクアトロサイドカッター機を用いた土留め壁を構築しており、都市内での狭隘な作業空間内でのクアトロサイドカッター機の使用は今後増えていくと思われる。

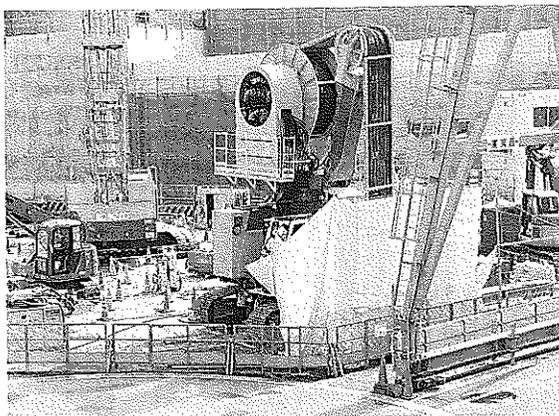


写真4 作業状況

【筆者紹介】

田原 徹也
首都高速道路㈱ 東京建設局 設計グループ
〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-3
大崎ニューシティ3号館
TEL : 03-5434-7428 FAX : 03-5434-7574
E-mail : t.tahara88@shutoko.jp

C S M工法による土留壁の構築

—正蓮寺川東工区開削トンネル工事—

阪神高速道路(株) 建設事業本部 大阪建設部 淀川左岸線建設事務所主任 片山 大介
 (株)間組 正蓮寺川東工区作業所所長 竹内 廣高
 (株)間組 正蓮寺川東工区作業所副所長 市原 栄二
 (株)間組 正蓮寺川東工区作業所工務課長 ○ 佐伯 賢一

1. まえがき

淀川左岸線は(1期)は、阪神高速道路5号湾岸線(北港ジャンクション)と阪神高速道路3号神戸線(海老江ジャンクション)とを結ぶ、延長5.7kmの自動車専用道路である。淀川左岸線(1期)と淀川左岸線(2期)を整備し、臨海部と大阪都心北部地域を連結することで、東西の交通軸を強化する。また、1号環状線の外側に位置する環状道路の一部として、大阪北部から都心部へ向かう流入交通と通過交通を分散させることで、都心部の混雑緩和を図る目的がある。

本工区を含む淀川左岸線のうち約2.5kmは、18世紀に開削された正蓮寺川(運河)であり、舟運の減少に伴い、環境の改善、新たな道路ネットワークの構築の必要性から、道路建設、河川の地下化、広域下水道の整備、公園整備などからなる正蓮寺川総合整備が推進されている。

当工事は淀川左岸線(1期)のうち約317mを開削土留トンネルボックスカルバートで建設するものである。

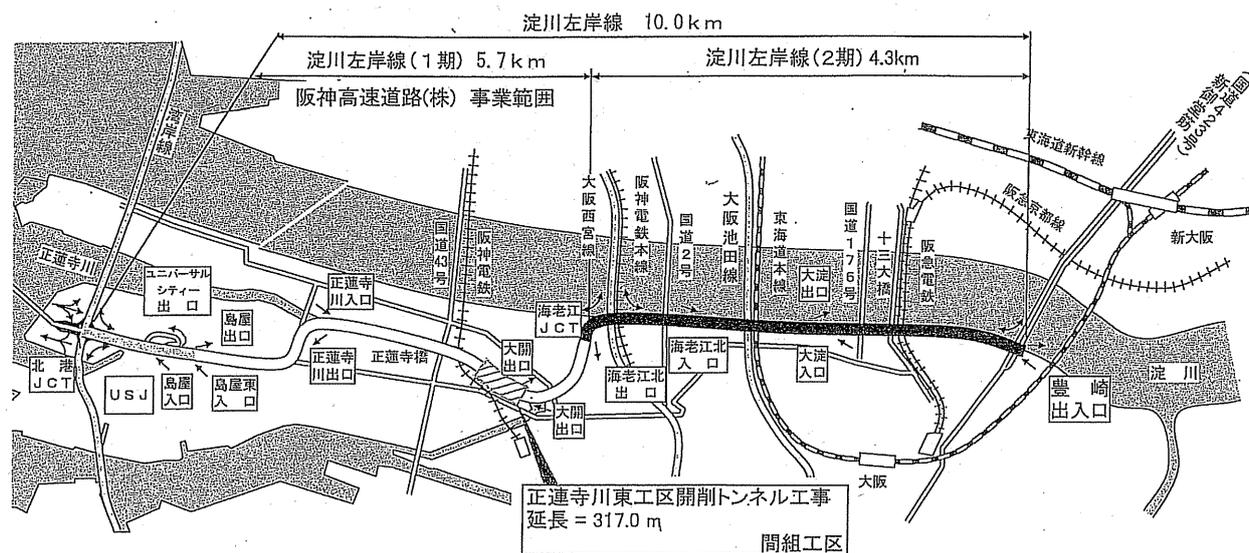


図-1 淀川左岸線(1期)概要

Daisuke KATAYAMA, Hiroataka TAKEUCHI, Eiji ICHIHARA, Kenichi SAEKI

2. CSM工法の概要と採用に至った経緯

2.1 CSM工法の概要

CSM工法とは、水平多軸型地中連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター（Cutter）を用いて土（Soil）とセメント系懸濁液を原位置で攪拌（Mixing）し、等壁厚のソイルセメント壁体（土留め壁・遮水壁等）を造成する工法である（図-3 参照）。その特長には以下のような点がある。

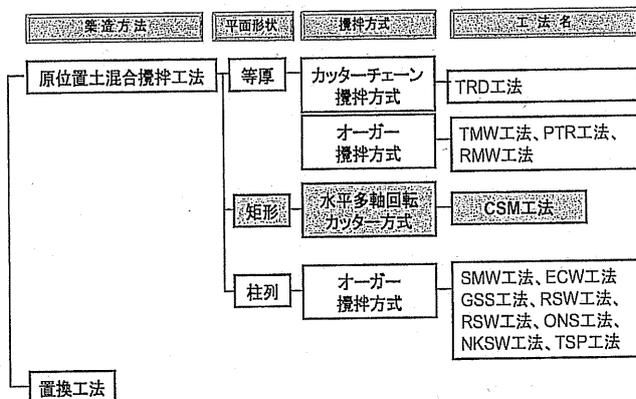


図-2 CSM工法の位置づけ

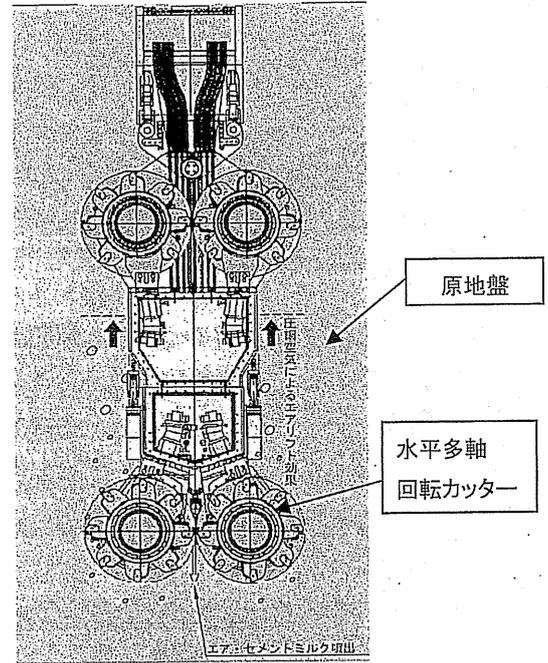


図-3 CSM工法概念図

CSM工法の特長

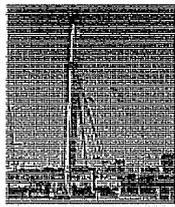
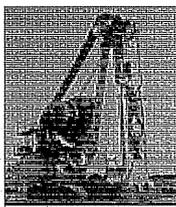
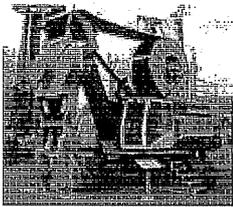
- ① 岩盤・硬質地盤においても、水平多軸回転カッターの性能をそのまま生かした高い掘削性能により、先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ② エアブローを併用した高速回転カッターによる攪拌のため高い攪拌性能を持つ。
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定でき、設計の自由度が高い。
- ④ 壁体がパネル状に造成されるため小さな円形立坑の施工が可能である。
- ⑤ 壁体のジョイントは止水性の高いカッティングジョイントとなる。
- ⑥ カッター部に内蔵した傾斜計により、リアルタイムでの掘削精度確認が可能である。

ケリーバー方式のCSM機は2003年にドイツにおいて開発され、2004年にBCM3型1台が日本に導入された。その後、続いて同じくケリーバー方式のBCM5型が導入された。しかし、ケリーバー方式のCSM機で大深度施工を行うには、ケリーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けがたく、おのずと掘削深度に限界（35m程度）があった。そのため吊り下げ方式の開発が進められ、BCM10型がパウアーマシーネン社とハザマによって誕生し、その後継機としてクアトロカッターが製作され、日本に導入された。

さらにハザマはクアトロカッター機に改良を加え、カッターをベースマシンのサイドに配置することにより狭隘地（作業幅6m以内）での施工が可能なクアトロサイドカッターの製作をパウアーマシーネン社に依頼し、日本に導入した。

これら機械の概要や性能などを表-1 CSM機の種類と実績に示す。

表-1 CSM機の種類と実績

種 類	クレーバー方式		吊り下げ方式		
	2カッター		2カッター	クアトロカッター(4カッター)	
機械姿写真					
開発年:日本導入年度	2004年	2004年	2005年	2006年	
国内保有台数	1台	2台	0台(海外に2台)	2台(クアトロサイドカッター含む)	
カッター	型式	BCM3型	BCM5型	BCM10型	
	トルク	0-30kN・m	0-45kN・m	0-80kN・m	0-45kN・m
ベース マシン	機械高	~35m程度	~35m程度	約15m(CBC25)	約6.5m(専用機)
	機械長	10m程度	10m程度	9.5m程度	8.0m程度
掘削深度(実績最大深度)	~35m(20m)	~35m(31m)	~60m(60m)	~65m(60m)	
掘削壁厚	500~700mm	500~900mm	640~1,200mm	500~1,200mm	
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,800mm	2,400mm	
施工実績(試験施工を除く)	3件(海外19件)	4件(海外33件)	1件(海外7件)	4件(海外0件)	

2008年3月末現在: パウアー工法研究会調べ(パウアーマシーネン社製機械のみ)

当工事で使用したクアトロカッター機は、従来のクレーバー方式のCSM機の特長に加えて次の特長がある。

- ① ホースドラムを利用した吊り下げ方式の採用により大深度(最大65m)施工が可能である。
- ② 転倒に対する安定性が高く、また周辺に対する圧迫感がない。
- ③ 4カッター化により方向制御、掘削攪拌性能を向上。(下部のカッターは掘削・攪拌の機能、上部のカッターは攪拌およびカッター引上げ時の引上げ抵抗の低減機能を有する。)
- ④ リアルタイムモニターによる掘削精度確認に加え、カッター部に姿勢制御フラップを装備し、壁直角方向およびカッター部のねじれを制御することにより掘削精度を向上。
- ⑤ 低空頭条件下での施工が可能である。(クアトロカッター機: 機械高さ6.5m)

写真-1、図-4が当工事で使用したクアトロサイドカッター機である。

2.2 CSM工法を当工事に採用した経緯

当工事は、入札時技術提案による総合評価落札方式の工事である。

CSM工法に関しては、品質、安全、環境の各項目について以下の提案を行い採用された。

	提案項目
品質	芯材建込精度の確保 ・ 芯材を2本以上連結して同時に建て込む ・ 電磁マグネット脱着傾斜計により芯材建込精度1/200以下を確保する
	削孔精度の確保 ・ カッターユニット内臓の傾斜計とジャイロコンパスによりリアルタイムモニターを使用し1/300以下の精度で施工する ・ 4個の回転カッターとフラップによる方向制御を行う

提案項目	
安全	地耐力不足による重機の転倒等、安定性において有利である。
環境	工区の周囲に密集する高層マンション、民家への騒音振動対策上有利である。

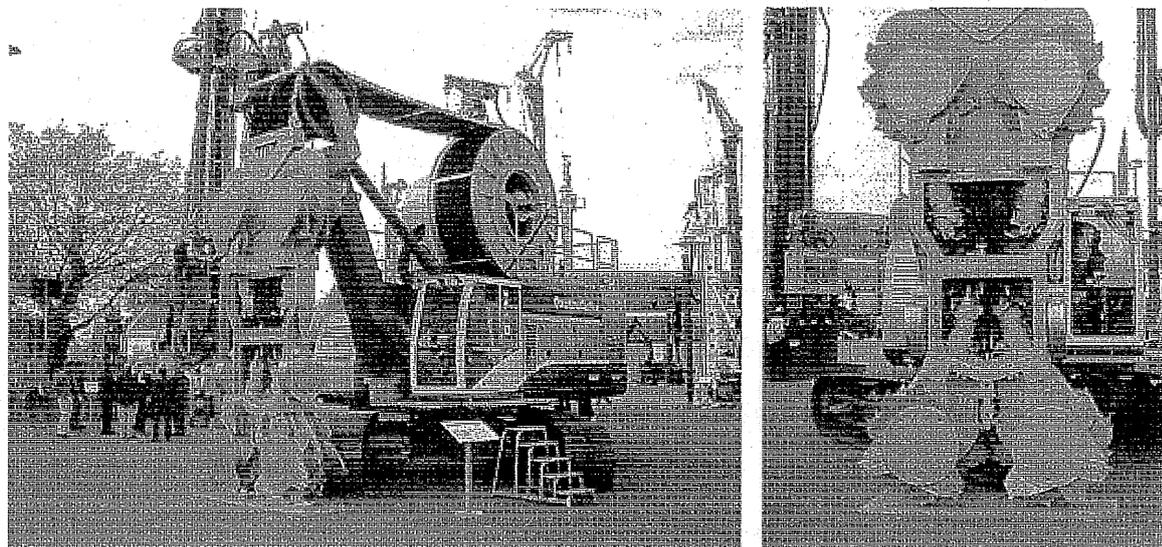


写真-1 CSM機（吊り下げ式水平多軸カッター方式）

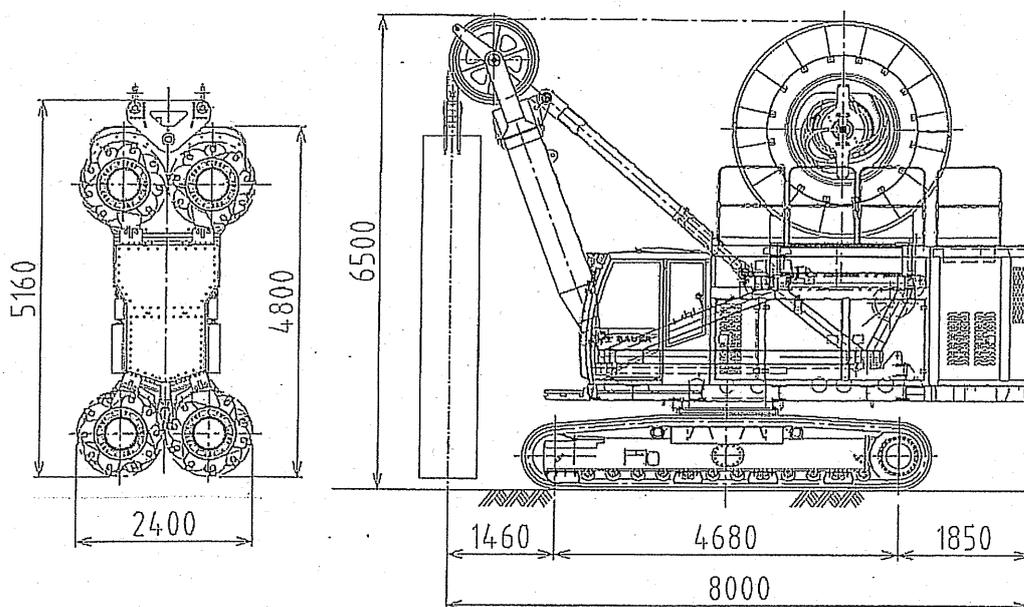


図-4 クアトロカッター（BCM5）

3. CSM工法による地中連続壁工の施工記録

3.1 工事概要

図-5 に当工区の開削工事標準断面を示す。

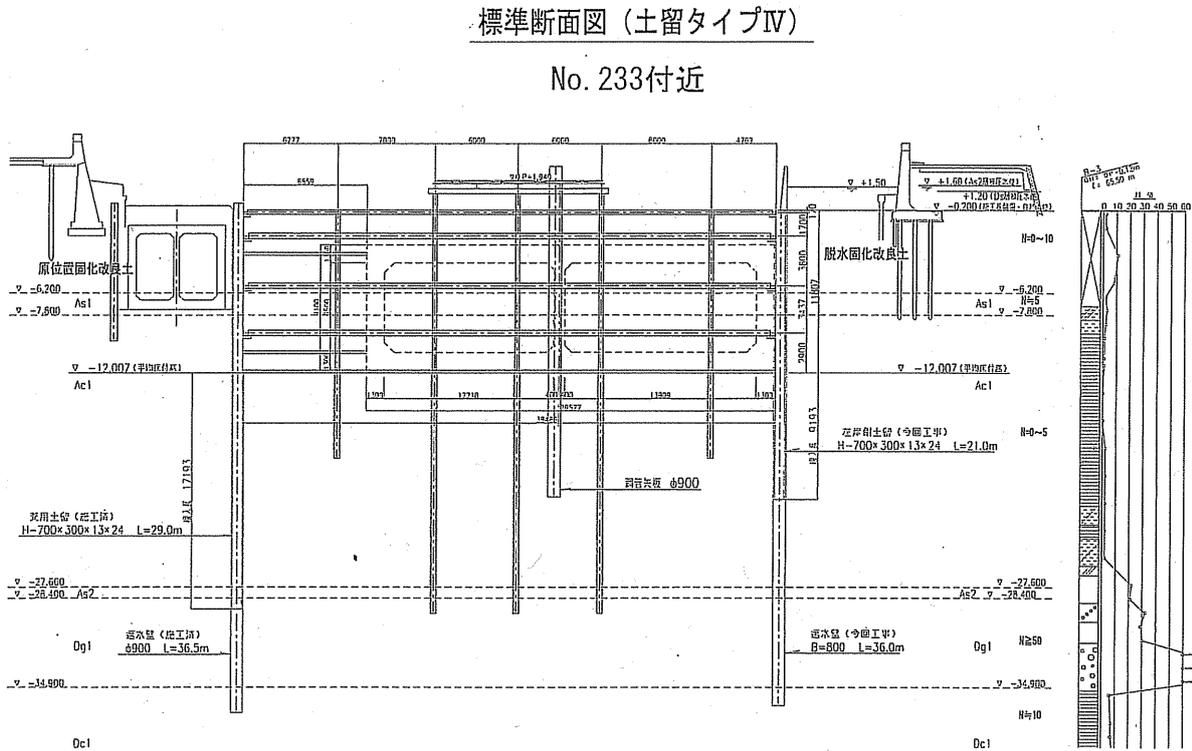


図-5 開削工事標準断面図

本工区周辺の土質は、土質調査結果によればおおよそ次のとおりである。

- 河床 (H6 頃) ~ GL-4.5m 付近 : 底泥層 (ヘドロ)
- GL-4.5m から -11.0m 付近 : 砂質シルト ~ シルト
- GL-11.0m から -21.0m 付近 : Ac1 層 (粘土, $N=0$)
- GL-21.0m から -25.0m 付近 : 砂混じりシルト
- GL-28.0m から -35.0m 付近 : Dg1 層 (砂礫, $N \geq 50$)

先行工事の正蓮寺川基盤整備工により、上部のヘドロ層については、半川締切鋼管矢板の右岸側を原位置固化改良土、左岸側を脱水固化改良土で置換している (GL-約6.0mまで)。

開削工事の土留壁工のうち右岸側土留壁については、先行工事により施工済である。当工事では、左岸側の延長327.4m、造成深度36.0m~37.5m、挿入芯材長18.0m~22.0m、造成面積11,650m²と、開削部分両端妻部の遮水壁 (起点側、終点側、無芯) の延長66.3m、造成深度36.5m~37.5m、造成面積2,370m²を構築した。

3.2 芯材建込

BCM-5使用の場合のCSM工法のエレメント形状は矩形で延長方向に2.4mである。隣接エレメントとのラップは削孔精度1/250、削孔深度37.5mでラップ可能な0.3mとした。また、応力芯材がH-700×300×13×24またはH-390×300×10×16であるため、削孔幅をそれぞれ800mm、550mmとし、芯材を挿入しない遮水壁では550mmとした。造成順序は先行・後行施工とした。芯材ピッチは、土留応力解析、土留背面構造物への近接施工影響検討結果より@600とした。エレメント割付ピッチ@2.1mと合わないため、先行エレメントで芯材3本、後行エレメントで芯材4本(図-6-②参照)を建て込むこととした。また、複数芯材を連結して建て込む方法を採用したため、先行・後行で芯材本数が異なり、また、継ぎ杭の場合、継ぎ位置の上下が1本おきとなるため、芯材組み立てのパターンが4パターンで煩雑になった。

先に述べたように、今回は土留芯材の設計検討結果により、芯材ピッチ@600での建込となったが、芯材ピッチを@700にできるような条件であれば、先行・後行とも建て込み本数を3本とすることができ、芯材の本数を低減し、CSM工法の長所が生かされたのではないかと考える。ただし、図-6-③からわかるように、カッターと芯材との余裕が少ないため、先行エレメントの3本の芯材の間隔を詰める等の工夫が必要と考える。

また、片押し施工については、芯材ピッチ@600ではラップ0.6mとなり、ロスが大きくなるという理由で今回は採用しなかった(図-6-①参照)。

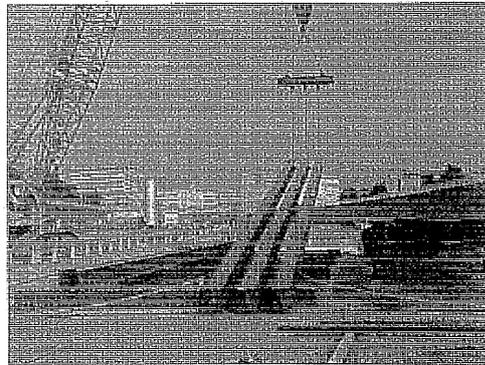
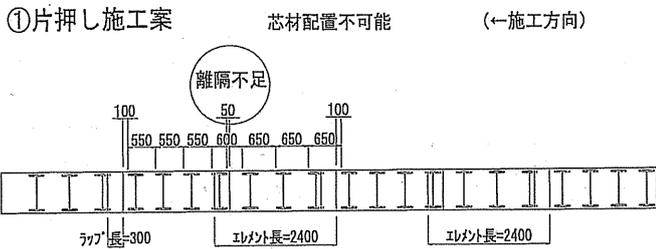


写真-2 芯材建込状況

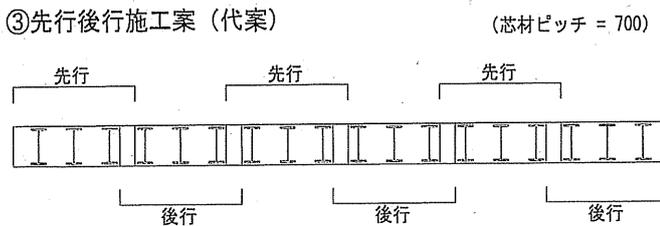
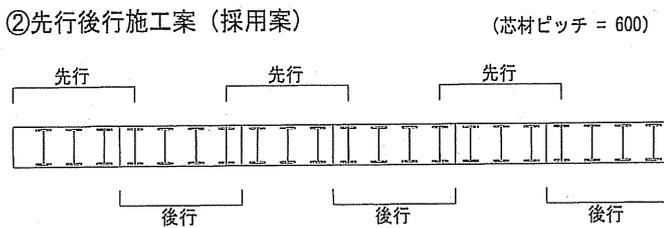


図-6 エレメント及び芯材の割付

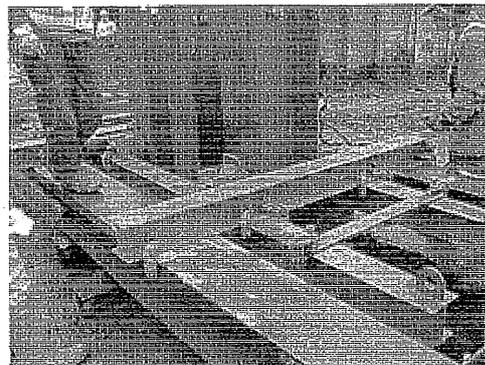


写真-3 芯材建込状況

3.3 削孔

C S M工法での削孔時間は、GL～Ac1層・As2層（GL～GL-28.0m付近）では約2時間（20～30cm/分）であったのに対し、N値50以上の硬い砂礫層（Dg1層）約7.0mを削孔するのに約2～4時間（3～6cm/分）と予想外の時間を要した。

<計画注入量>

造成体積：V = 造成長2.1m×造成厚0.8m×深度34.0m= 58.8m³

注入量：Q = 58.8 m³×約60%= 35.3 m³（1m³×36バッチ）

<必要注入時間>

必要注入時間：36.0 m³/0.180 = 200 min（約3.3時間）

<GL-30.0m以降の削孔時間と引上げ時間>

削孔時間：2.0～3.0時間（実績） 引上げ攪拌時間：0.8×30 = 24分（積算資料）合計）2.5～3.5時間

また、近隣の制約から重機を使用した作業時間が8時～18時に制約されることから、削孔終了時間が13:30を超えた時点で同日の造成を断念し、2日/BL施工に切り替えることとした。傾向としては、先行エレメントの方が削孔時間を要することが多かったため、先行エレメント+後行エレメントの2エレメントで3日と考え、下記の施工サイクルを守るように施工した。

表-2 施工サイクル表

① 後行エレメント（掘削時間が短い場合）

日	作業内容	作業時間
1日目	準備・ガイド設置	7:30～8:00
	削孔・攪拌	8:00～12:00
	造成・引上	12:00～15:00
	芯材建込	15:30～16:15
	片付	16:15～16:30

② 先行エレメント（削孔エレメント）

日	作業内容	作業時間
1日目	準備・ガイド設置	7:30～8:00
	削孔・攪拌	8:00～14:00
	引上	14:00～15:30
	片付	15:30～15:45
2日目	準備	7:45～8:00
	削孔・攪拌	8:00～10:00
	造成・引上	10:00～13:30
	芯材建込	13:30～14:15
	片付	14:15～14:30

3.4 施工精度の確保

C S M機に搭載されたリアルタイムモニターによるカッターユニットの姿勢制御を行いながら、削孔造成を行った。モニター表示で削孔精度が1/300以下になるように削孔した。施工精度はジャイロ、傾斜計の精度により管理した。複数芯材を連結して難なく建て込むことができた。

芯材建て込み精度に関しては、マグネット脱着式傾斜計による確認を行い、建て込み精度1/200以下を確認している。

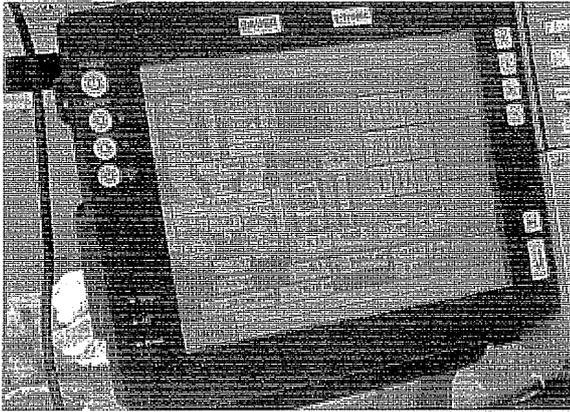


写真-4 リアルタイムモニター



写真-5 マグネット着脱式傾斜計

3.5 安全・環境について

当工区における土留工の施工基盤は旧河川を陸地化した地盤となる。河川右岸側と左岸側で陸地化の方法は異なるが、主な施工範囲となる左岸側では、旧河川のヘドロを浚渫し高圧プレスした脱水固化土を水中投入しその上に覆土を行っている。

施工基盤の造成にはセメント系改良材を用いた地盤改良を行った。地盤改良検討時に地盤内応力のFEM解析、CSM機の安定計算を行ったので、その結果を示す。なお、解析は従来工法の三点式杭打機についても実施し比較した。

表-3 安定度検討結果一覧表

使用機械	三点式杭打機	CSM クアトロ機
機械重量	約 1,200 kN	約 800kN
最大設置圧	260.8 kN/m ²	195.2 kN/m ²
地盤内発生応力 G.L-1.0m における最大値	48.9 kN/m ²	37.7 kN/m ²
機械全高	31.59m	6.5m
機械の重心高さ	約 8.3m	約 3.0m
最小安定度	6.3度	23.4度

なお、CSM機の現場搬入前に、機体パネルの内側に防音シートを貼り付け、国土交通省の試験場で騒音測定を行った結果、所定の騒音レベル以下であったため、本現場で使用したCSM機は低騒音型機械の指定を受けている。

4. おわりに

地中連続壁工施工でCSM機による造成を行った。CSM機は三点式杭打機等による標準工法に比べて機械損料が割高であるが、軽量で小型のため、狭隘な作業スペース、空頭制限のある場所、夜間施工から昼間施工への変更等、そのメリットを生かせる施工条件でその強みを発揮できると考える。今回は仮設土留壁への適用となったが、その施工精度と1エレメントの長さを生かして、複数芯材連結建て込み等による本体利用壁への適用、芯材ピッチが自由であることを生かした、応力芯材の低減などにも適用可能であると考えられる。

各論 最近の土留め・仮締切り工法の特徴と課題

佐久間 誠也*

1. はじめに

最近の土留め・仮締切り工法における新工法の開発は一時期に比べ少なくなったが、コスト縮減や工程短縮を目的とした従来工法の工夫・改良とソイルセメント系土留めの大規模化および本体利用が注目される。特に、等厚式ソイルセメント系の土留め工法では、応力材に本体利用可能な剛性の高い鋼材やプレキャストの部材を建込んだ土留めが採用されるケースが見られるようになってきた。また、仮締切りに関しては連結鋼管矢板工法に見られるように、止水性の向上や従来型の鋼管矢板と比較して鋼材の縮減と工期の短縮が期待できる工法が開発されている。現在、土留め・仮締切りに関して施工可能な

工法は非常に多くあるので、個々の工法名は割愛し、壁体材料や施工法の切口でまとめた工法分類を参考までに図-1に示す。

本稿では、これらの現状を踏まえて最近の土留め・仮締切り工法から代表的な工法を選定し、その特徴と課題について述べる。

2. 各種工法の概要

数多くある土留め・仮締切り工法の中から最近話題となっている工法を中心に、ソイルセメント系、プレキャスト系、場所打ち系、鋼材系といった切口で整理した工法の概要を表-1に示す。ソイルセメント系では、柱列式地下連続壁として代表的なSMW工法、等厚式地下連

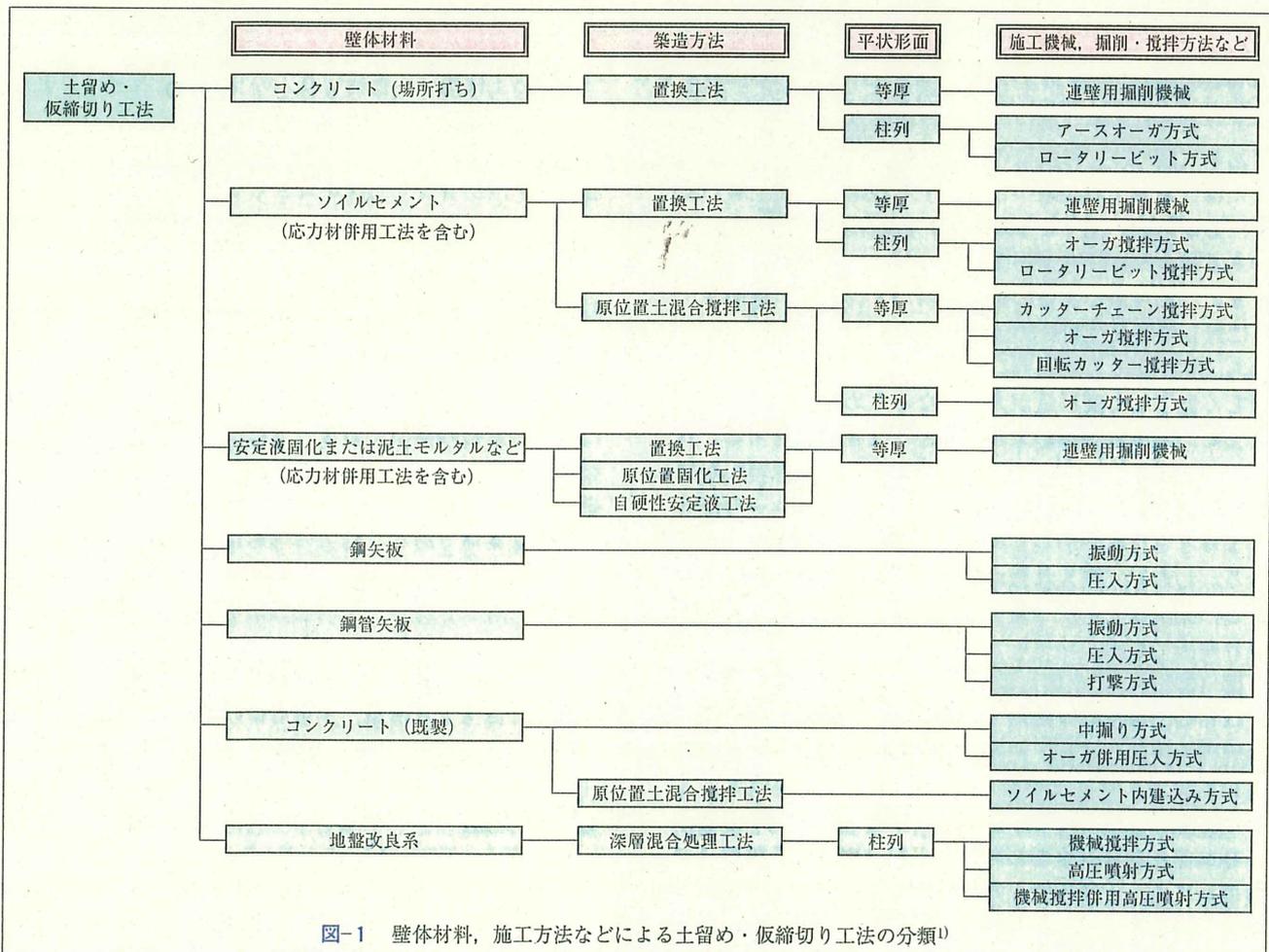


図-1 壁体材料，施工方法などによる土留め・仮締切り工法の分類¹⁾

* SAKUMA Seiya ハザマ 土木事業本部 技術第一部長 | 東京都港区虎ノ門2-2-5

表-1 土留め・仮締切り工法の概要

分類	ソイルセメント系 (原位置土混合攪拌)	プレキャスト系	場所打ち系	鋼材系
主な 施工法	SMW工法・TRD工法・CSM工法	PC-壁体工法 H型PC杭工法	鉄筋コンクリート地中連続壁工法 鋼製地中連続壁工法-I	鋼矢板工法 鋼管矢板工法
概要図 (平面形状)				
工 法 概 要	<p>【SMW工法】 多軸オーガによる掘削・攪拌機で原位置土をスラリー状のソイルセメントに改良し、応力材としてH型鋼を挿入して柱列状の土留め壁を構築する。大口径のオーガもありφ900mmまでの柱列壁に対応できる。応力材のH型鋼を利用した本体利用が可能である。</p> <p>【TRD工法】 チェーンソー形の掘削・攪拌機で原位置土をスラリー状のソイルセメントに改良し、応力材としてH型鋼を挿入し土留め壁を構築する。等厚壁なので本体利用を目的としたNS-BOXを挿入し、ソイルセメント鋼製地中連続壁を構築することもできる。</p> <p>【CSM工法】 水平多軸回転カッターによる掘削・攪拌機で原位置土をスラリー状のソイルセメントに改良し、応力材としてH型鋼を挿入し土留め壁を構築する。上記と同様にNS-BOXを挿入したソイルセメント鋼製地中連続壁を構築することもできる。</p> <p>その他、類似工法にはECWI工法、TMWI工法、PTRI工法、RMWI工法、GSSI工法、RSWI工法、UD-HOMET工法などがある。</p>	<p>【PC-壁体工法】 PC-壁体部材の中空部にオーガを挿入し、中掘り圧入工法などで連続して沈設することで壁体を構築する。製品間の隣接面には楕円形状の孔ができ、この孔にモルタルを充填して水密性を確保する。また、この孔に透水性材料を充填すれば、壁体背面の地下水を排水することもできる。プレキャスト製品なので本体利用可能であり、壁体の品質に対する信頼性は高い。径程の大きい砂礫層で中掘り圧入工法を採用する場合は検討が必要である。堅固な地層まで根入れすることにより鉛直荷重を支持することができる。</p> <p>【H型PC杭工法】 H型断面をしたプレキャスト部材にオーガを沿わせて中掘り圧入工法で連続して沈設することで壁体を構築する。杭の先端部には摩擦の影響を低減するために刃口金物を取付けてある。設計で考慮した支持力を確保する必要がある場合は、杭の先端処理方法に応じて施工する。本体利用に関しては上記と同様である。</p> <p>その他、根入れのない土留めとしては擁壁タイプのプレキャスト部材を用いた工法がある。</p>	<p>【鉄筋コンクリート地中連続壁工法】 安定液で溝壁を安定させながら、専用機械で地盤を掘削し、鉄筋籠を建込んだ後、水中でコンクリートを打込んで土留め壁を構築する。本体利用に関しては、設計によって一体壁、重ね壁、単独壁による利用が可能である。</p> <p>【鋼製地中連続壁工法-I】 上記の鉄筋籠の代わりに工場製品の特長な形状をした鋼材であるNS-BOXを建込めば鋼製連壁-Iとなる。本体利用に関しては上記と同様である。鋼製連壁-Iは、鋼材系への分類でもよいが、安定液掘削を伴いコンクリートは場所打ちとなるのでここに分類する。</p> <p>その他、安定液掘削による土留め壁の構築工法には古くから安定液固化工法がある。この工法の応力材にはH型鋼などの鋼材が用いられ、安定液の固化方法には自硬性安定液の利用、原位置固化、置換固化の3工法がある。また、掘削土をソイルセメントに利用した掘削土再利用連壁(CRM工法)などもある。さらに柱列式形状であるが、安定液掘削後、ソイルセメントに置換する方式としてリサイクルコラムやBH-W工法などがある。</p>	<p>【鋼矢板工法】 U型などの鋼矢板を継手部を噛み合わせながら連続して打設し、土留め壁や仮締切りを構築する。施工は圧入パイロ工法が主であるが、硬質地盤においてはウォータージェットやオーガ併用で施工する場合も多い。</p> <p>【鋼管矢板工法】 型鋼やパイプなどの継手を有した鋼管杭を、継手を噛み合わせながら連続して打設し土留め壁や仮締切りを構築する。施工は大型のパイロ工法や中掘り圧入方式が多い。鋼管矢板基礎の施工法においては鋼管矢板井筒を水面まで立上げ、上部の鋼管矢板を仮締切りとして利用する仮締切り兼用方式がある。また、2本の鋼管矢板をH型鋼で繋いだ連結鋼管矢板も開発されている。</p> <p>その他、ソイルセメント系工法との組み合わせ工法となるが、鋼管矢板を建て込む工法としてONS工法やNKSW工法などがある。鋼矢板や鋼管矢板は護岸などで永久構造物として本体利用されている。</p>

続壁としては応力材との組み合わせが容易なTRD工法およびCSM工法を取上げる。また、プレキャスト系では工程短縮に有利なPC-壁体工法およびH型PC杭工法を、場所打ち系では鉄筋コンクリート式地中連続壁（以下、RC連壁）と鋼製地中連続壁工法-I（以下、鋼製連壁-I）を、そして鋼材系では鋼矢板工法と鋼管矢板工法をそれぞれ紹介する。

3. 工法の特徴と課題

3.1 ソイルセメント系工法

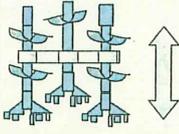
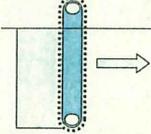
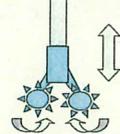
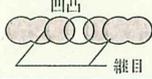
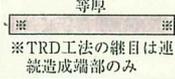
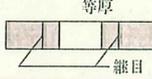
原位置土混合攪拌ソイルセメント系のSMW工法は、施工性もよく仮設土留めの代表格であり、40年以上の実績を持つ工法である。しかし、機械台数も多く過当競争の中で工事費の低下が顕著となっている。技術的には、多軸オーガ方式の掘削機構は粘性の高い粘土をうまく攪

拌混合することが難しく、粘土塊がソイルセメント壁内に残る場合がある。また、硬質地盤や玉石・砂礫層では補助工法を必要とする。本体利用に関しては、早くから応力材であるH型鋼を本体の一部として利用する技術開発が精力的にすすめられ、土木分野では日本トンネル技術協会、阪神高速道路公団（阪神高速道路株）などから本体利用に関する基準類も出されている。また建築分野においても、建設会社を中心となって複数の研究グループを立上げ共同研究開発を行ない、さまざまな工法名で本体利用に関する評定を受けている。最近では、環境問題やコストダウンに対応するため廃泥量の低減に関する技術開発が進められ、排泥を再利用する工法、分散材や気泡を用いて流動性を高めセメントスラリー量を低減した施工法などが研究され実用化に至っている。

TRD工法は開発されてすでに17年が経過し、等厚壁

や品質の優位性を前面に出し、施工量は約260万m³に達している。施工深度は開発当初の25mから現在では60mまで伸び、壁厚も条件によっては900mmまで対応可能であり、大型の開削トンネル工事への適用も多くなっている。また遮水壁や土留め壁に加え、本体利用可能な鋼製地中連続壁工法-II（以下、

表-2 原位置土混合攪拌ソイルセメント工法の特徴²⁾

項目	SMW工法	TRD工法	CSM工法
掘削機構 (イメージ)			
掘削機械の種類	多軸オーガ	カッターチェーン	水平多軸回転カッター
攪拌方向	水平	鉛直	鉛直
攪拌範囲	局所的 (上下動あり)	地表から壁底	局所的 (上下動+エアブローあり)
連続性	パネルの継合せ	連続造成	パネルの継合せ
壁の形状			

下、ソイルセメント鋼製連壁)の施工法としても採用されている。技術開発面ではSMW工法と同様に気泡を用いた施工法も実用化されているが、TRD工法協会では現在、工程短縮、廃泥量の低減を目的とした大深度ワンパス施工液の開発に取り組んでいる。

CSM工法は、TRD工法と同様に等厚のソイルセメント壁が構築できる工法であり、カッターの動きが上下方向なのでコーナー部や曲線部の施工も問題とならず、施工深度は65m、壁厚も1,200mmまで対応できる。CSM機が2004年に初めて日本に導入されてから7年が経過し、その間に狭隘地・低空型頭の機械の開発も進められてきた。そして、新しい機械の開発とともに遮水壁や土留め壁に加え、本体利用可能なソイルセメント鋼製連壁の施工機械としての施工実績も増えてきている。CSM工法の実績は、2011年3月末現在で国内外の総施工面積が約50万m²となり、国内だけでも7万m²を越えている。また、岩盤や礫地盤を含むさまざまな条件下で施工実績を積み、技術的な問題点の克服や機械の改良も随時行なわれている。技術開発面では、ソイルセメント系工法共通の課題である廃泥量の低減や機械トルクなどの性能アップが求められている。

これらの原位置土混合攪拌ソイルセメント系工法の特徴を簡単にまとめたものを表-2に示す。また、SMW工法、TRD工法、CSM工法の施工機械の1例をそれぞれ写真-1、写真-2、写真-3に示す。

3.2 プレキャスト系工法

PC-壁体工法は、断面形状が正方形で円形の中空部を有する土留め構造用プレキャストコンクリート部材を連続して圧入、中掘りおよびTRD工法などにより施工する振動・騒音が少ない工法であり、本体利用が可能である。特徴としては、本体利用により土地の有効利用ができること、工期が短いこと、施工が簡易であることなどがあげられ、都市部における擁壁築造工法として特にその能力を発揮する。壁高が9m程度まで自立可能で壁厚

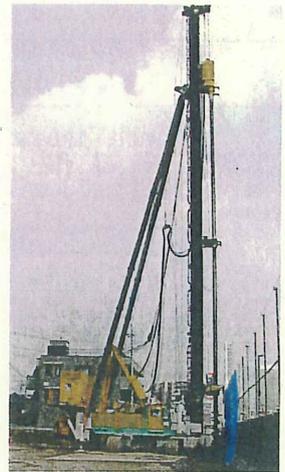


写真-1 SMW工法施工機械



写真-2 TRD工法施工機械

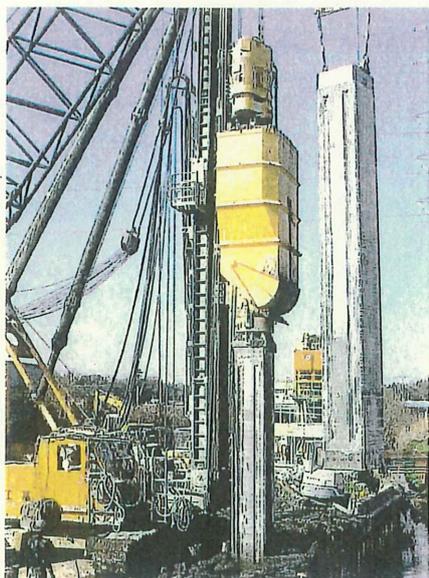


写真-3 CSM工法施工機械 (クアトロサイドカッター)

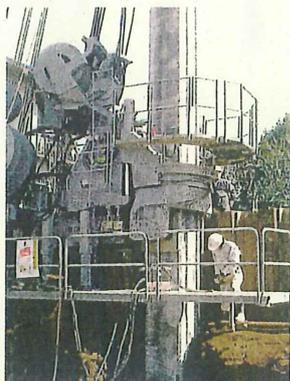
は最大900mmであり、製品は15mまで製作できる。用途は、壁体コンクリート表面に模様をつけることができるので、景観性と耐久性に優れた河川護岸壁や道路擁壁、調整池などの壁体構造物および種々の土留め構造物に適用されている。また、先端部に根固め球根を築造することで基礎杭の機能を併せ持つことができるので、護岸あるいは擁壁と橋梁基礎を兼ねることもできる。写真-4にPC-壁体の施工状況を示す。

H型PC杭工法は、H型の断面形状をしたプレテンション方式のプレストレストコンクリート部材を連続して中掘り工法で施工する工法であり、PC-壁体同様、振動・騒音が少ない本体利用が可能な工法である。壁高は8.5m程度まで自立可能で壁厚は最大740mmであり、製品は25mまで製作できる。用途はほぼPC-壁体と同様で、自立式土留め構造物のほか地下構造物の側壁に用いられている。写真-5にH型PC杭工法の施工状況を示す。

これらプレキャスト系の工法における課題は、地盤が軟らかければ圧入工法や中掘り工法が使えるが、礫や玉石などがある地盤においては施工が困難となることが多いことである。そのためPC-壁体工法では、地盤に対する工法の適用範囲を広げ、TRD工法を施工法の1つに加える技術開発を行なった。またH型PC杭工法では、硬質地盤の施工に対し硬質地盤先行掘削圧入工法の開発を数年



中掘り工法



圧入工法



TRD工法

写真-4 PC-壁体の施工状況³⁾



写真-5 H型PC杭の施工状況⁴⁾



写真-6 地中連続壁施工機械（低空頭型）

前に行なっている。この開発においては、従来使用していた三点式杭打ち機に装着して、先行掘削が行なえるオーガビットや揚土機械の開発が行なわれた。

3.3 場所打ち系工法

RC連壁は、安定液によって溝壁を保護しながら掘削

を行ない、地上で組立てた鉄筋籠を建込んだ後、トレミーによってコンクリートを打込み、地中に鉄筋コンクリートの壁体を構築する工法である。壁深度100mを越える施工実績もあり、東京湾横断道路の川崎人口島換気立坑やLNG地下タンクなど主に大型プロジェクトに採用されている。この工法の特徴は、鉛直精度が非常によく2mを超える大壁厚の施工も可能で本体利用もできるので、前述のように大型工事に適している。しかし、安定液掘削を伴うので安定液の管理、溝壁の安定確保、コンクリートの打込み管理など高度な品質管理が要求される

工法である。また、特殊な掘削機械を用いるため、その機械の性能も施工性に大きく関わってくる。

RC連壁に関する課題は、近年大型プロジェクトがほとんどなくなり、施工経験者が激減すると同時に、多くの施工機械が海外に流出してしまったことである。最近の大型工事では、東京スカイツリーの基礎や津波対策の防波堤の基礎に採用されるなどの事例があるものの、経験者を育成できるほどの工事量ではない。また、機械の整備・調達には時間を要する場合もあり、本工法の採用に当っては計画的に進める必要がある。一方、海外に目をやれば、中東、韓国、中国、台湾、シンガポールなどで地下鉄や道路トンネルほか、インフラ整備工事にRC連壁が多用されており、これからもベトナムやインドネシアにおけるプロジェクトにおいて採用される見通しである。写真-6に連壁施工機械の1例を示す。

鋼製連壁-Iは、RC連壁の鉄筋籠の代わりに剛性の高い鋼材（NS-BOX）を建込む工法で、壁厚をRC連壁の7割程度にすることができ、本体利用するが多い。安定液掘削を伴うので、品質管理面での難しさや掘削機械に対する課題はRC連壁と同様である。また、最近では、鋼製連壁-Iのコストダウンを追求し、原位置土混合攪拌ソイルセメント工法とNS-BOXの高剛性を合わせたソイルセメント鋼製連壁が開発され、道路トンネルなどに単独壁や重ね壁方式で本体利用されている。

3.4 鋼材系工法

鋼矢板工法は、小規模から中規模の土留め・仮締切りで多用されてきた工法であり、施工方法も圧入やパイロ工法など地盤条件に合わせて選定される。礫・玉石地盤などではウォータージェットを併用したり、場合によってはドーナツオーガーやCD機で掘削し地盤を置換えて施工することもある。鋼矢板部材に関する製品開発は従来のU形鋼矢板（有効幅400mm、V_L形は500mm）から広幅U形鋼矢板（有効幅600mm）、そしてハット形鋼矢板（有

効幅900mm)へと施工性と経済性を追求した開発が行なわれてきた。この工法に関する大きな課題はないが、継手の止水性能を高める研究や材料の開発は継続している。

鋼管矢板工法は中規模から大規模な土留め・仮締切りで実績の多い工法であり、施工法も圧入、中掘り、打込み、ソイルセメント中への建込みなどさまざまである。製品は工場製作であり信頼性が高くサイズも豊富なので、経済的な設計が可能である。最近では継手の遮水性を確保した漏洩防止ゴム板付鋼管矢板が開発され、海面廃棄物処分場への適用も見られる。さらに、2本の鋼管をH型鋼で連結した連結鋼管矢板工法も開発されており、今後、鋼管矢板基礎、遮水壁などへの適用で新たな用途拡大が期待されている。連結鋼管矢板工法の特徴は、施工期間の短縮、打設精度の向上、継手遮水性の向上などがあげられる。写真-7に連結鋼管矢板の施工状況を示す。

鋼管矢板に関する課題は、やはり大型プロジェクトの減少のなか、他工法との競争でさらなるコストダウンや工程短縮、そして用途の拡大が求められていることであろう。

4. 課題への展望

各工法の課題への展望は、前項の技術開発に関する状況説明の中にすでに見られるように、工事量の確保と技術開発の成果に懸かっている。共通する課題は、難しい施工条件下における品質確保、コストダウンおよび工程短縮であり、それに向けたさまざまな工夫や改良、そして新規技術の開発・導入が求められている。さらに、環境面からは施工機械や材料に関するCO₂の削減も重要な視点となっており、単に効率やコストダウンだけを見据えたものではよい課題解決にはならないので、多面的に物事を考えていく必要がある。その中で、ソイルセメント系の工法に関しては原位置土の性状や地下水の有無、大深度化、材料、施工法など品質を左右する外的要因も多く、品質面から施工面までさらなる技術開発のテーマが豊富にある。例えば、大深度施工においては、ベントナイトにカルシウムイオンが加わると、圧密圧力が大きいところのソイルスラリーは保水性を喪失し、早期に脱水して自重で圧密し硬い粘土の塊になる。そのため、流動性を回復するためにTRD工法では解泥工程を設け、CSM工法では常時エアブローをかけている。したがってTRD工法においては、この工程をなくすることができれば施工性を大幅に改善できる。その他、ソイルセメントの高強度化を目指した研究や施工機械の性能向上などが進展することによって、展望も広がっていくものと

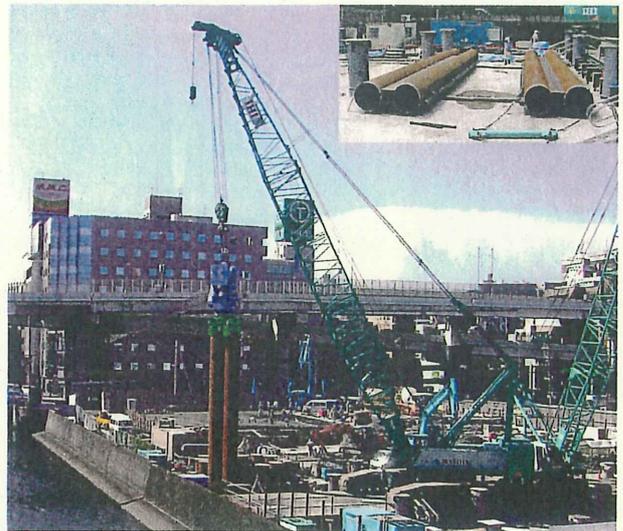


写真-7 連結鋼管矢板の施工状況⁵⁾

考える。

5. おわりに

土留め・仮締切り工法に関しては、過去に多くの工法が生み出されてきたが、国内工事量の減少のなか、技術開発を継続してきた工法が生き残ってきたように思う。また、今後の震災復興に寄与できそうな工法も多々あり、ちょっとした工夫や改良で蘇る工法もありそうなので、工事関係者の奮起を期待したい。

なお、本稿を執筆するに当たり、関係する工法の協会・研究会の皆様よりさまざまな資料をいただきました。御礼を申し上げますと同時に、紙面の都合もあり資料を生かすきれなかったことをお詫びいたします。

■参考文献

- 1) 土木学会建設技術研究委員会建設技術体系化小委員会：第9回新しい材料・工法・機械講演概要—最近の土留め工法の現状と設計・施工のポイント—, 2003. 3.14内資料より一部引用, 加筆修正。
- 2) TRD工法協会提供資料に加筆修正。
- 3) PC-壁体工法 設計施工マニュアル, パンフレット, PC-壁体工業会。
- 4) H型PC杭工法 技術資料, H型PC杭工法研究会, 平成22年10月。
- 5) 葛拓造, 平井卓, 西山嘉一: 連結鋼管矢板の開発と鋼管矢板基礎への適用事例, 土木施工, Vol. 50, No. 7, pp. 32~37, 2009。
- 6) 砂子洋一: H型PC杭の硬質地盤先行掘削圧入工法の開発, 基礎工, Vol. 36, No. 3, pp. 34~36, 2008。
- 7) 佐久間誠也, Helmut Florian: ソイルセメント壁の狭隘地・低空頭型施工機械—CSM工法の施工機械の開発と展開—, 建設機械, 562, Vol. 47, No.12, pp. 28~32, 2011。

報文 仙台北四番丁大衡線自立式道路擁壁の施工

佐久間 誠也* / 佐々木 順一** / 前田 博司***

1. はじめに

「北四番丁大衡線北山区道路擁壁工事」は仙台都市圏と宮城県北部地域を結ぶ路線にあり、その中の「北山区」は輪王寺の北に位置している道路擁壁である。この擁壁は当初、深礎杭（ $\phi 2\text{m}$ 程度）を親杭とする親杭横矢板工法で計画されていたが、民地境界までが非常に狭く、この計画では施工が困難であった。そのため擁壁の薄壁化が可能であり、さらに本体利用可能なソイルセメント鋼製地中連続壁（以下、鋼製連壁 工法-II という）へ計画が見直された。施工は、等壁厚のソイルセメント壁の構築が可能なTRD工法で行なった。

2. 工事概要

- ・工事名称：緊街第17-7号 北四番丁大衡線（北山区）道路改築工事
- ・工事場所：宮城県仙台市青葉区山手町地内
- ・工期：平成17年10月18日～18年11月30日
- ・発注者：仙台市建設局道路部北道路建設課
- ・施工者：間組・佐清工業共同企業体
- ・施工数量：【鋼製連壁 工法-II】壁延長134.549m、壁面積2,020.0 m^2 （余掘り面積は含まず）、壁深度11.64m～16.97m、壁幅850～900cm、〔芯材数量〕芯材本数192本、芯材長11.25m～16.25m（GH-R97本、長さ6.75m～13.75m、GH-I95本、長さ7.25m～14.2m）、H型鋼（根入部）192本、長さ3.5m～5.0m、【道路土工】掘削・発生土処理量15,200 m^3

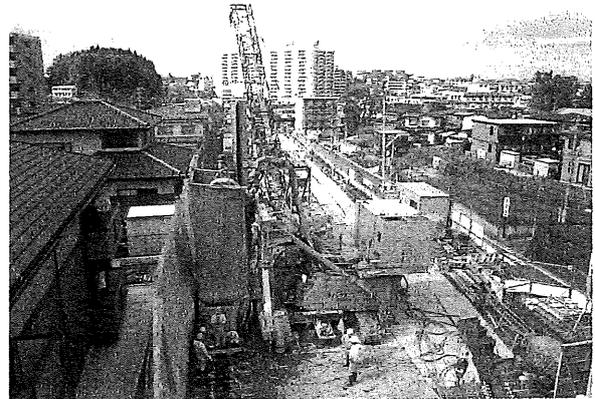


写真-1 近接施工状況

3. 地質および周辺環境

3.1 地質概要

地質は、主に新第三紀漸新世に形成された竜の口層と称される岩盤層が分布する。岩層としては砂質凝灰岩～シルト質凝灰岩である。竜の口層の岩盤強度にはばらつきがあり、軟岩部分（D級）では一軸圧縮強度1MPa程度、中硬岩部（CL～CM級）では5MPa程度であった（図-1参照）。

3.2 周辺環境

現場周辺は住宅地であり、本工法が採用された近接施工の経緯からも分かるように、鋼製連壁 工法-IIの施工位置と民地境界との離隔は非常に狭く、最小で17.5cm、民家壁との離隔は1mであった（写真-1参照）。

4. 施工概要

4.1 施工手順および施工サイクル

本工事におけるTRD工法の施工は、下記の手順による3パス施工であった。

- ①先行地山掘削により地山を掘削
- ②戻り掘削として先行地山掘削部を再度攪拌
- ③固化液を注入しながら

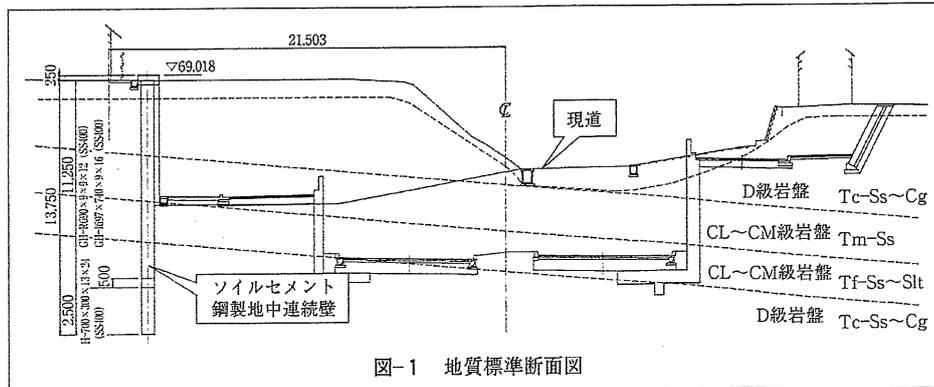


図-1 地質標準断面図

* SAKUMA Seiya 安藤ハザマ 土木事業本部 技術第一部長
 ** SASAKI Jun-ichi 同上 関東土木支店 大橋出張所 所長 東京都港区赤坂6-1-20
 *** MAEDA Hiroshi 同上 土木事業本部 土木設計部 部長

表-1 施工サイクルの1例

作業内容	数量	単位 作業時間	作業時間	A.M.					P.M.					備考			
				7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		17	18	19
朝礼			20分														近深掘削養生シート掛け
準備			45分														
起動・稼働			5分														
戻り掘削	8.9m	5分/m	45分														セメントミルク注入攪拌
壁造成	5.9m	8分/m	47分														
通過	3.0m	10分/m	30分														
先行地山掘削	5.6m	25分/m	140分														高床トラレーザ、litonトラック
芯材搬入荷下	1台	30分/台	30分														
芯材おか組立	8本	15分/本	120分														
建込定規設置	2回	20分/回	40分														
芯材建込	8本	35分/本	280分														
ポスト養生			15分														
養生シート移動			60分														
片付け			30分														
1日作業時間			7.3時間														

※作業時間：8:00~17:00 (トラブル時は18:00程度)
 ※1日最大造成量：85m²/日、芯材8set



表-2 品質管理表

管理項目		標準値	チェックの方法		異常時の処理
管理項目	点検項目		時期	方法	
カッターポスト自立建込掘削	壁厚	850mm以上	検査時	スケール	ビットプレート交換
	掘削深度	設計値以上	自力建込時	残尺・スケール	修正
	鉛直精度	1/250以下	自力建込時	多段式傾斜モニター	修正
掘削造成	壁芯位置	±25mm	掘削時	トランシット, レーザトランシット, 光波測距儀, スケール	修正
	混合スラリーのブリーディング	3%未満	掘削時	JSCE-F522-1994	配合調整
	混合スラリーの流動性	150mm ≤ TF ≤ 230mm	掘削時	JIS R 5201	配合調整
	固化材量	設計値以上	混合攪拌時	プラント計量器	調整
	固化液混合スラリーのブリーディング	3%未満	造成時	JSCE-F522-1994	配合調整
	固化液混合スラリーの流動性	150mm ≤ TF ≤ 280mm	造成時	JIS R 5201	配合調整
TRD壁の品質	一軸圧縮強さ	0.5N/mm ² 以上	造成時	ウェットサンプリング 1,000 m ² に1回 (3供試体採取)	協議
	芯材建込	芯材建込定規位置	±25mm	定規設置時	トランシット, スケール
芯材頭部位置		±50mm	芯材建込時	トランシット, スケール	修正
芯材建込鉛直精度		1/250以下	芯材建込時	トランシット, 水準器	修正
芯材天端		±50mm	芯材建込時	レベル	修正

攪拌, ソイルセメント壁を造成

施工が順調に進んだときの施工サイクルを表-1に示す。平均的な日造成量は約60m²/日程度であり, 芯材建込は6本/日程度であった。

4.2 品質管理

当工区におけるTRD工法による鋼製連壁 工法-IIの品質管理表を表-2に示す。

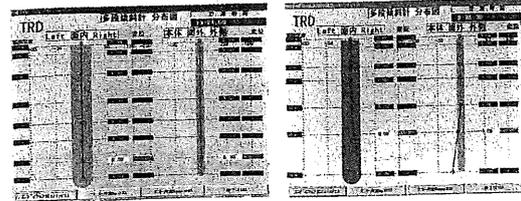


写真-2 PFMの表示例

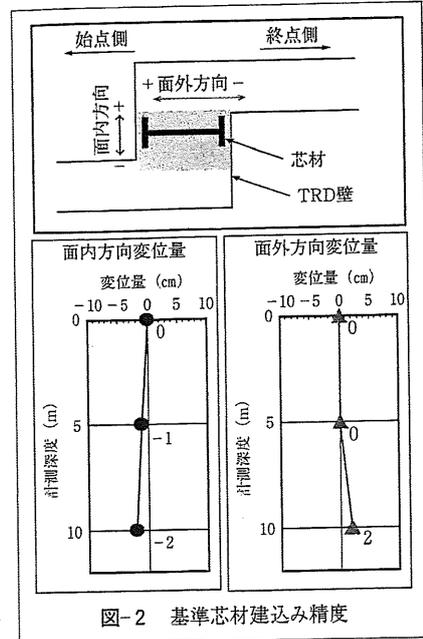


図-2 基準芯材建込み精度

4.3 掘削精度

掘削精度は, TRD機による掘削時にカッターポスト内部に装着した多点傾斜計からの信号をTRD施工機運転席にあるポストフォルムモニター (PFM) 画面に表示し管理した。1/250の管理基準値を外れた場合は赤く警告表示となるので (写真-2右), それをもとに変位量が小さいうちに修正掘削を行なった。

4.4 芯材の建込み精度

基準となる芯材の建込み精度は, 以降に連続する芯材の建込み精度に連鎖する。そのため, 挿入式傾斜計の測定ができるようにガイドパイプを取付けてX, Y 2方向の建込み精度測定を実施した。具体的には, 壁延長35mに1ヵ所の割合とし, 全6ヵ所で挿入式傾斜計による建込み精度確認を実施した (図-2参照)。

4.5 分散剤による発生泥土の低減

ソイルセメント壁の構築において発生する掘削泥土を低減する目的で, 分散剤 (レオフロー-A1000) を適用した。分散剤の添加により, ソイルセメントの流動性を確保したうえで水セメント比を下げ, 汚泥の発生量を低減するものである。配合設計において約18%の発生泥土低減目

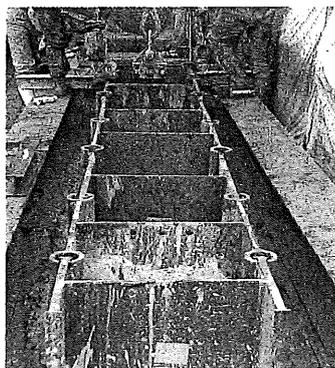


写真-3 芯材建込み状況

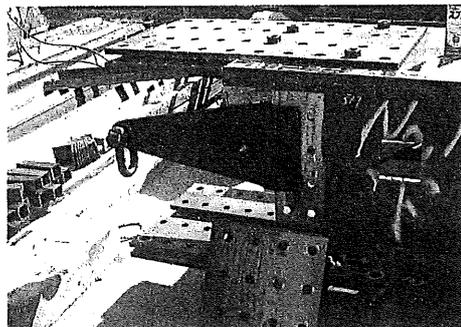


写真-5 改造前の吊上げ金物

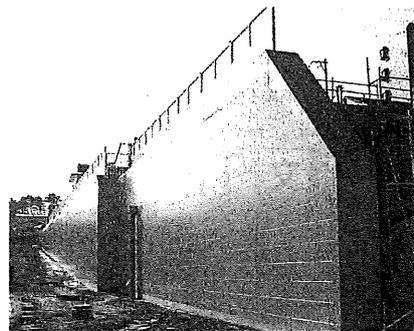


写真-7 自立式擁壁完成状況

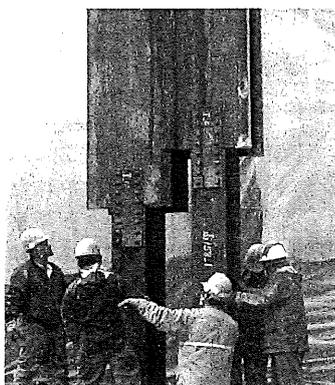


写真-4 芯材継手部の段差

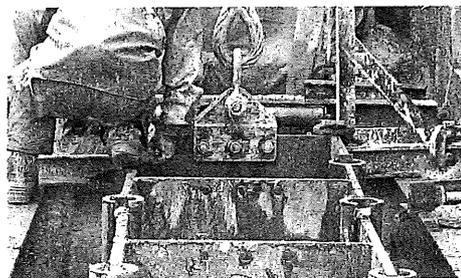


写真-6 改良後の吊上げ金物

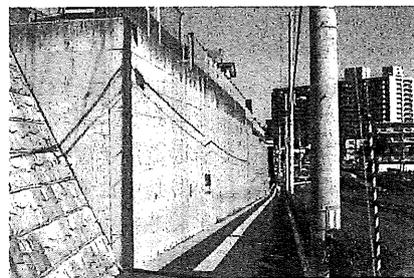


写真-8 震災後の状況

標を設定し実現した。
また、発生泥土の処理として仙台市よりオ
デッサシステムの適用

を指示され実施した。このシステムは、現場に移動式のプラントを設置し、現場内にて発生泥土に高分子ポリマと固化剤を混合した粉体を添加し(泥土重量の5%添加)改質した改良土として搬出するものである。

5. 設計および施工上の留意点

国内最初のTRD工法による鋼製連壁 工法-IIの施工であったため、施工を実施して初めて気づいた事項が多々あった。主な項目を以下に示す。

5.1 GH-700シリーズ芯材に対する掘削壁厚

芯材高さ700mmのGH-R嵌合部位置における最大高さは約800mmあり、掘削壁厚850mmの場合被り(掘削面との離隔)は25mmずつとなる。25mm程度の離隔で建込みを問題なく実施するためには、1/500程度の掘削精度が必要と考えられた(本工事では掘削精度1/250で管理)。対策として、一部掘削壁厚を900mmにして施工した(ただし、砂礫層では対応不可)。写真-3に芯材建込み状況を示す。

5.2 芯材配列

下杭が通常のH-700×300鋼材とNS-BOXを現場継手しているために、継手位置を交互にずらす設計であり、オス継手を有するGH-Iの鋼材長さが常に50cm長い配列となっていた(写真-4参照)。したがって、前日に最終建込みしているメス継手下端よりも最初に建込みするGH-Iの鋼材オス継手下端が50cmほど、前日造成したソイルセメントを削り込まなければならない。

現場での対策は防護パイプ先端がメス継手下端より50cm以上となるように挿入したが、今後このような配列の

場合はGH-Rメス継手の長さを長く設計すべきである。

5.3 芯材頭部吊上げ金物取付け穴

NS-BOXは、ウェブがフランジに較べて極端に薄く、施工開始当初は引きこし時にウェブの変形が見られた。そのため吊上げ金物をガス切断により短く加工し対応した(写真-5、写真-6参照)。

5.4 押出し成形セメント板(アスロック)の使用

鋼製連壁 工法-IIの前面は、当初残存型枠によりコンクリートを現場打ちして仕上げるものである。しかし、連壁面と残存型枠の隙間は20cmしかなく、施工が困難であった。そのため押出し成形セメント板を化粧版として取り付けることを提案し採用された。押出し成形セメント板(アスロック)設置・塗装後の連壁全景を写真-7に示す。

6. あとがき

本工事は、日本で初めてTRD工法によるソイルセメント壁にNS-BOXを建込む工事であったため、経験者はいなかったが、工事を進める中で様々な課題を解決しながら完工することができた。また、完成後の3.11の震災の影響も皆無であった(写真-8参照)。本工法は都市部での施工などにおいて用地の問題などの制約条件に対して有効な工法であり、本工法が適用される機会が今後増えると思われる。本工事を進めるにあたって、ご指導・ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

■参考文献

- 1) 熊谷, 塚田, 佐々木, 田崎: ソイルセメント鋼製地中連続壁による自立式道路擁壁の施工, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007年9月.
- 2) 佐久間: 最近の土留め・仮締切り工法の特徴と課題, 基礎工, Vol. 40, No. 3, pp. 6~10, 2012.

報文

壁厚1.7m鋼製地中連続壁を 本体利用した施工事例

玉田 康一* / 岩住 知一** / 生川 寛之*** / 犬島 正資****

1. はじめに

本工事は、トンネルの換気口、電力・通信・防災用水などを供給・送配水する設備を備えた中間立坑を構築するものである。本中間立坑は、工期短縮を目的に立坑を構築しながら大断面のシールド（外径φ12.47m）を通過させる工法を採用し、直接切削が可能な土留め壁芯材（以降、SZパイルと称す）や鋼製地中連続壁（Ns-Box）を採用するなど、設計および施工順序の工夫を行なっている。ここでは、用地境界との離隔が非常に狭く、さらにシールド通過後に立坑躯体を構築するという特殊条件のもと、国内最大規模（壁厚1.7m）の鋼製地中連続壁（Ns-Box）を本体利用した施工事例について紹介する。

2. 工事概要

本中間立坑は、大阪府南部を流れる大和川沿線の浅香山浄水場跡地内に位置している。図-1に構造概要を示す。鋼製地中連続壁は、用地境界に隣接するシールド進行方向に平行な壁面に適用した。壁厚1.7m、掘削深度48.7m、壁延長37.6mである。芯材はフランジ両端部に嵌合継手を持つ「Ns-Box」であり、先行・後行それぞれ4つずつの8エレメントにて分割施工した。なお、直角方向の壁面は仮設のSMW壁とその内側に本設のRC躯体を構築する。

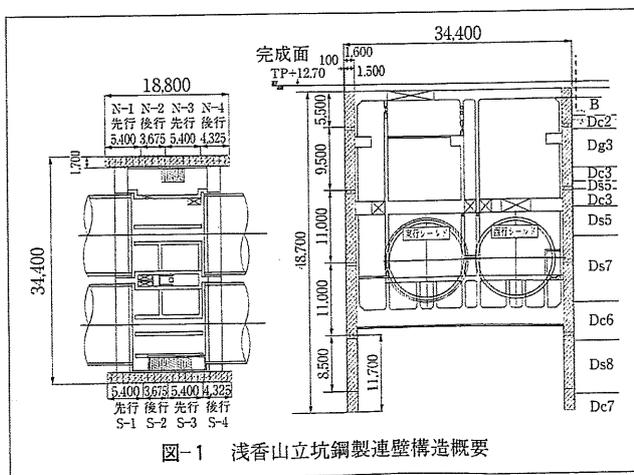


図-1 浅香山立坑鋼製連壁構造概要

地質は、洪積層を主体とするよく締った砂質土および礫質土（ $N \approx 50$ ）と比較的硬い粘性土（ $N > 10$ ）の互層状の地盤である。設計地下水位はTP+6.77m（GL-5.93m：完成面から）である。

3. 鋼製地中連続壁採用の経緯

本工事では、シールドを通過させた後、セグメントを撤去しながら掘削を行なうため、セグメントを部分的に撤去することでセグメントの変形が生じ、シールド位置の土留め壁の受働抵抗が小さくなり、土留め壁が大きく変形することが懸念された。シールドトンネルが大断面であることから、土留め壁の広範囲にわたり受働抵抗が低下してしまうため、土留め壁の剛性を大幅に増加させる必要がある。一方、用地制約から土留め壁の剛性確保のために部材厚を大きくすることができない。以上を勘案し、土留め壁として高い剛性を有する、仮設壁・鋼製連壁・RC連壁単独壁などの中から、コスト削減・リスク軽減を鑑み、本体利用を考慮した鋼製地中連続壁を採用した。これにより、深い位置での切梁本数を軽減し、経済性・施工性に優れた構造に配慮することができた。

ここで、図-2に立坑構築の概略施工ステップを示す。

- ① 土留め壁構築後、掘削・切梁支保工を4次施工まで完了した後、2段かまち梁から上部の本設躯体を構築する。
- ② 立坑内を一部流動化処理土で埋戻し、現状の地下水位（GL-5.3m）まで注水して、先行シールドの通過を待つ。
- ③ 先行シールド通過後、セグメントを撤去しながら、5次～8次掘削（最終床付け約35m）を行なう。
- ④ 底版構築後、後行シールド通過のため、流動化処理土で埋戻しながら、先行側の内部構築を行ない、後行シールドが通過する。
- ⑤ 後行シールド通過後、後行側のセグメントを撤去し、残りの内部構築、中床版・頂版を構築して完成となる。

4. 鋼製地中連続壁の施工実績

本体利用する地中連続壁施工にとって特に留意すべき事項として、①芯材の精度確保、②止水性確保が挙げら

*TAMADA Kōichi 鹿島・飛鳥建設工事共同体 大和川シールド工事事務所 工務課長
 **IWAZUMI Tomokazu 同 上 副所長
 ***IKUKAWA Hiroyuki 同 上
 ****ŌSHIMA Masashi 阪神高速道路㈱ 大和川線建設事務所 建設事業本部 堺建設部 主任

堺市堺区遠里小野町4-5-3

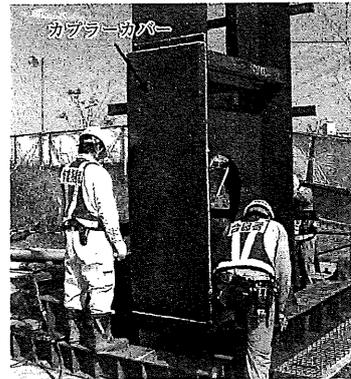
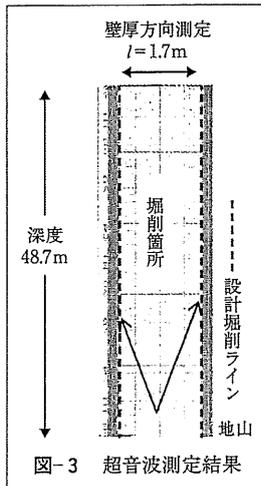
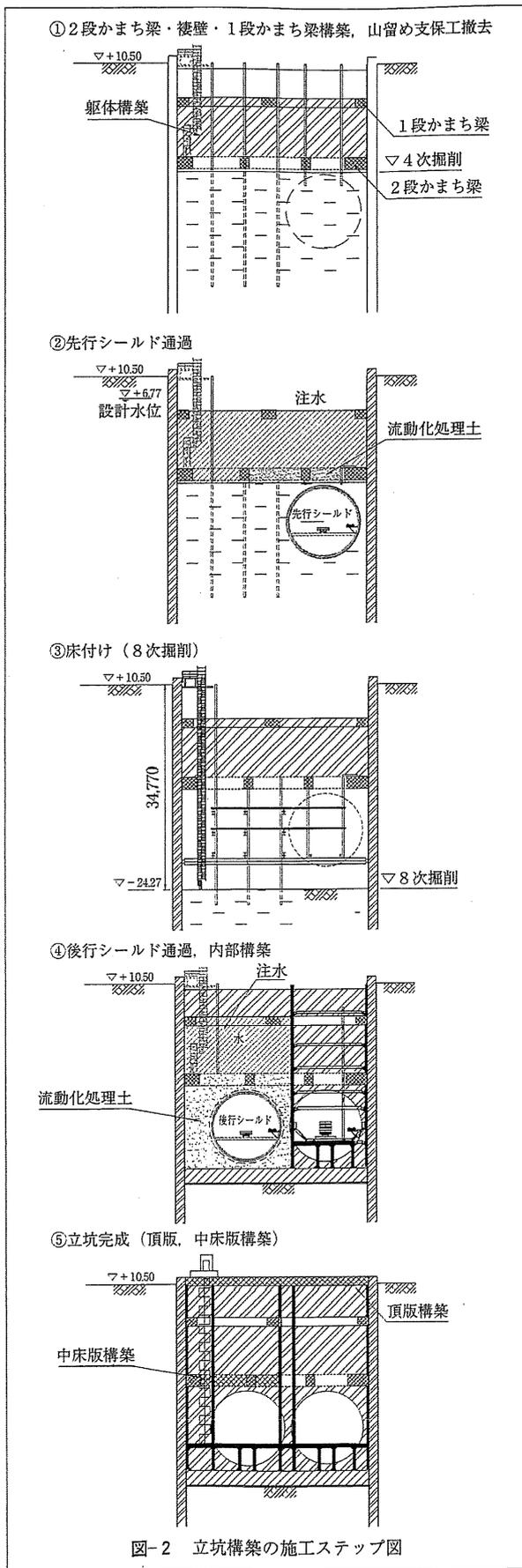


写真-1 カプラーカバー

れる。以下に，上記を踏まえた施工実績について示す。

4.1 掘削工

掘削機は，水平多軸回転掘削機EMX-240を採用した。ガット幅（掘削幅）は2.4m，各エレメントは2～3ガットで掘削した。先行エレメントでは3ガット目の幅が600mmと狭く，2ガット目掘削中に土砂の崩落を防ぐため，2，3両ガットをそれぞれ掘削深度の半分まで掘削するサイクルを2回繰り返した（ベンチカット）。

各エレメントにて，掘削深度の中間地点と床付時の2回の超音波測定を行ない掘削精度確保に努めた。また，溝壁安定とコンクリートの置換性を考慮し，ポリマー系の安定液（比重1.08～1.15）を使用した。図-3に超音波測定の結果を示す。掘削精度の管理基準値1/1,000（最大変位量48.7mm）に対し1/1,500～1/5,000と非常に高い精度で施工することができた。

4.2 芯材建込み

芯材には立坑スラブの鉄筋ジョイントのカプラーが溶接されているため，立坑の出来形確保のために正確な位置と深度が要求される。品質管理項目として，①建込み位置：±20mm以内，②建込み精度：1/1,000，芯材天端高：±5mmを設定した。この精度を確保するため，①ガイドウォールの墨出し位置に定規架台を設置，②トランシットで視準し芯材を建て込み，その後超音波測定を実施，③添接板接合時のドリフトピン使用などの対応をとることで，管理値内の精度を確保することができた。

また，鉄筋ジョイントのカプラーは，コンクリートの回り込みとコンクリートはつり時の損傷防止のため，写真-1に示すカプラーカバーにて保護し，その周囲に止水コーキングを施した。掘削時にカバーを撤去したが，コンクリートで目詰まりしたカプラーはなく，その効果を確認することができた。

4.3 根固め

先行エレメントでは，建て込んだ芯材の移動防止を目的に根固めコンクリートとして本体と同仕様の高流動コンクリートを打設した。また，根固めコンクリート打設時の芯材移動抑制のため芯材下端に写真-2に示すアンクルスタッドを設置し支持地盤に貫入した。

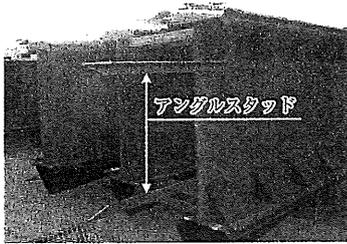


写真-2 アングルスタッド

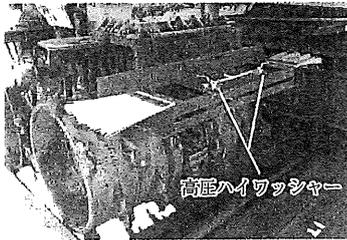


写真-3 継手清掃機

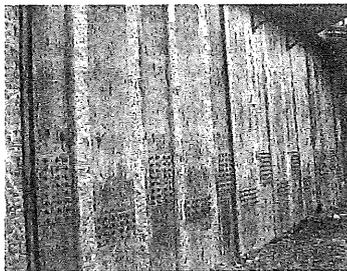


写真-4 掘削後の鋼製連壁状況

表-1 コンクリート仕様

配合条件				
コンクリートの種類	水セメント比	スランプフロー (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	セメントの種類
普通	W/C48%	60	20	BB

配合表 (kg/m ³)					
セメント	混和材	水	細骨材	粗骨材	混和剤
344	156	165	822	786	6.00

※混和材：石灰石微粉末

表-2 コンクリート打設実績表

施工順序	エレメント No	打設時間	打設面積	コンクリート設計深度	打設速度	打設量
		hr	m ²	m	m/hr	m ³
1	N-3	10:24	6.46	47.7	4.59	324.0
	(N-3根固)		9.18	1.0		13.0
2	S-3	8:41	6.46	47.7	5.49	329.0
	(S-3根固)		9.18	1.0		13.0
3	N-1	8:00	7.10	47.7	5.96	345.8
	(N-1根固)		9.18	1.0		13.5
4	S-1	7:52	7.10	47.7	6.06	340.0
	(S-1根固)		9.18	1.0		13.5
5	N-4	9:07	8.71	47.7	5.23	431.5
6	S-4	7:30	8.71	47.7	6.36	419.5
7	N-2	7:39	9.69	47.7	6.24	464.5
8	S-2	7:39	9.69	47.7	6.24	461.0

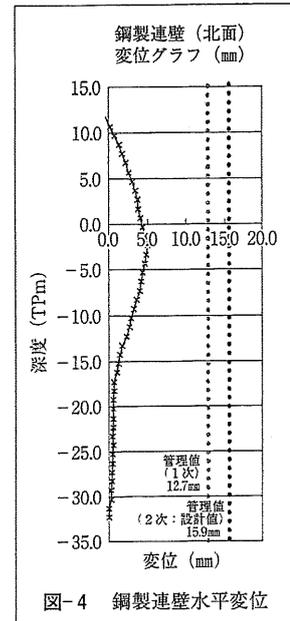


図-4 鋼製連壁水平変位

計を用いて自動計測 (2回/day) を行なった。4次掘削完了後 (GL-18.5m) の鋼製地中連続壁の変位は図-4に示すとおり、管理値 (2次:設計値) に比べ1/3程度であり、安全な施工状況であった。

4.4 継手清掃 (スライム除去)

先行と後行エレメントの継手部からの漏水を防ぐため、後行エレメント掘削完了後に既設の先行エレメントとの継手部のスライム除去・清掃を入念に行なった。写真-3に継手清掃機を示す。継手部の清掃はブラシにて、先行エレメント芯材ウェブ部の清掃は今回新たに2カ所に設置した高圧ハイワッシャーにて行なった。写真-4に掘削後の施工状況を示す。継手からの漏水は見られず、清掃の効果を確認することができた。

4.5 コンクリート

鋼製地中連続壁の壁厚は1.7mと、従来の鋼製連壁の実績の中でも最大規模の壁厚である。コンクリートボリュームは、1エレメント当たり約400m³、最大約465m³である。1日で1エレメントを打設する計画であり、鋼製地中連続壁は芯材が勘合すると隔壁状の構造となるため、コンクリートは自己充填性・自己流動性・材料分離抵抗性のある高流動コンクリート (粉体系;石灰石微粉末) を使用した。表-1にコンクリート仕様、表-2にコンクリート打設実績表を示す。

コンクリートの打設平均速度は、先行エレメントで5.5m/hr、後行エレメントで6.0m/hrであった。

5. 計測管理

立坑掘削中の施工管理を目的に、鋼製地中連壁の変位と切梁軸力を測定した。土留め壁の変形は、挿入式傾斜

6. おわりに

今回の施工を終えて、鋼製連続地中壁に関する課題・懸案事項を列挙したい。

- ① 許容範囲内の芯材のわずかな傾きやカプラーの取付き向きの影響により、躯体構築時の鉄筋接続 (ネジ式)、鉄筋かぶり・鉄筋ピッチなどの確保に苦勞する。Ns-Boxの建込み精度・掘削精度をさらに向上させる必要がある。
- ② 施工ヤードが浄水場跡地であったため、予め地中埋設物の撤去を行なってはいたものの、エレメント掘削時に取りきることができなかったと思われる鉄筋棒と粘土塊が、芯材の継手鋼材部に引っかかる事象が見られた。

平成25年3月には、シールドが浅香山中間立坑を通過し、その後、立坑掘削を再開して床付け (GL-35m) まで施工する。引続き十分な施工管理を行ないながら安全に努めていく所存である。

今後の同種工事の一助となれば幸いである。

■参考文献

- 1) 藤原勝也, 志村敦, 岩住知一:大断面シールドの通過を想定した中間立坑設計, 土木学会第66回年次学術講演会 (平成23年度), VI-096, pp.191~192.

報文

都市部における CSM工法による鋼製連壁の施工

村田 隆志*

1. はじめに

新宿歩行者専用道第2号線（タイムズ・アベニュー）は、東京都庁第一本庁舎から新宿区道、青梅街道を経て小田急ハルク前付近へ至る約1kmの地下歩道であり、東京都庁第一本庁舎から新宿警察署付近までは平成23年5月に供用を開始している（図-1）。今回工事では新宿警察署前交差点から小田急ハルクへ向かう約30m区間が対象であり、本体構造を兼ねる鋼製連壁（芯材：NS-BOX）をCSM（Cutter Soil Mixing）工法により施工した。

施工場所である青梅街道は片側2車線、歩道を含め上下線合わせて幅員約30mの主要幹線道路であり、所轄警察との協議により片側2車線の交通を確保したうえでの

施工が条件であった。

本稿では、都市部狭隘場所での鋼製連壁工の施工について報告する。

2. 工事概要

施工延長：L=30m（図-2，図-3）

全体工期：平成23年2月6日～平成24年2月22日（鋼製連壁施工日数：1.5ヵ月）

実施工事工程表を表-1，鋼製連壁工諸元を表-2に示す。

3. 施工環境

3.1 土質条件

施工場所は、地表面より関東ローム層が約5.5mの深さまで堆積しており、地下歩道の下端部に当たるGL-10m付近より砂質土層が出てくる。連壁下端は砂質土層の下の粘性土層に達するように設計されている。

3.2 交通条件

施工場所（青梅街道）は、上下線合わせ1日に40,000台を超える交通量があり、通勤時間帯（8時台，17時台）には歩行者が1時間

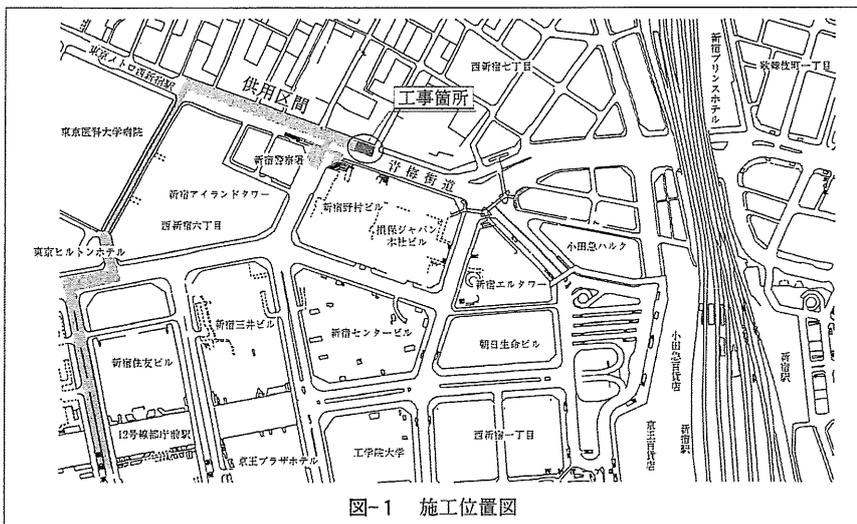


図-1 施工位置図

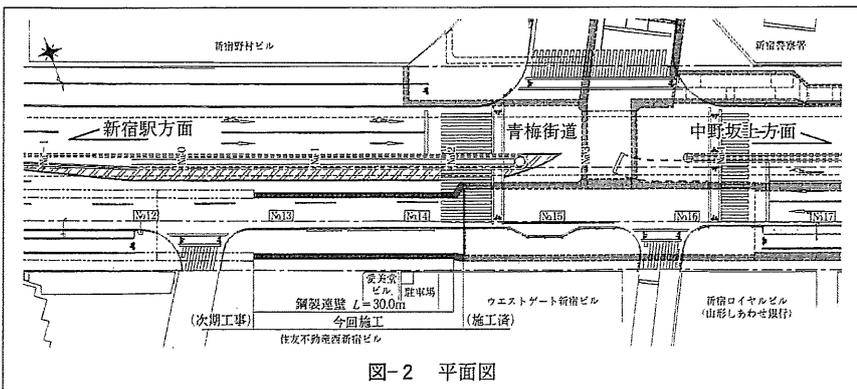


図-2 平面図

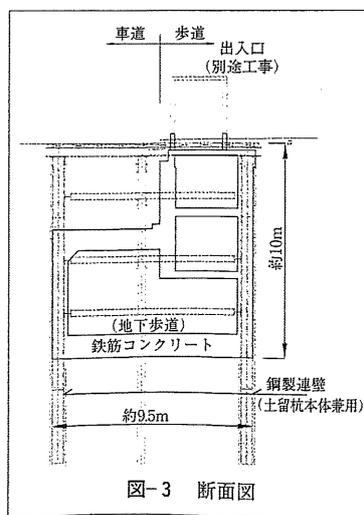


図-3 断面図

*MURATA Takashi 清水建設(株) 土木東京支店 工事長 | 福島県双葉郡広野町大字下北迫前川原21-3

表-1 実施工程

工種・種別	H23												H24	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
準備工・片付 (各種協議)														
鋼製連壁工														
支障物撤去														
仮設工														
掘削工 土留め支保工														
躯体構築工														
道路本復旧														

表-2 鋼製連壁工諸元

工 法	CSM工法
施工面積	996m ²
掘削深さ	16.8m
掘削幅	0.75m
芯 材	GH-R (550×750×9×10) L=11.0m 42本
	GH-I (552×740×9×12) L=11.0m 42本
※芯材はNSBOX (L=11.0m) とH-550×200 (L=3.5m) をボルト接合	

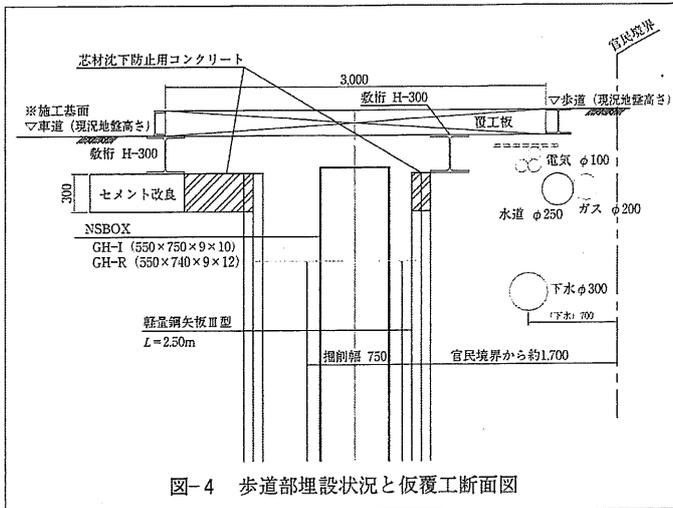


図-4 歩道部埋設状況と仮覆工断面図

2,000人に達する。

3.3 歩道部埋設状況と仮覆工

鋼製連壁端部と用地境界までは約1.7m。その間に電気・ガス・水道・下水が既に同一断面図の上下に切り回された状況であり、歩車道の段差などを考慮し、図-4に示すように歩車道にあえて段差を付けた。

今回は、土留め壁本体利用するため、芯材であるNS-BOXには下床版や上床版と接続するためのカプラーが溶接されており、建込み時の鉛直精度が躯体の精度や品質に大きく影響することから、芯材を仮受けする箇所は沈下防止対策としてコンクリートを打設した(図-4参照)。

4. 施 工

4.1 プラント配置と作業スペース

写真-1、写真-2は歩道側の施工状況である。まず、プラントを施工箇所と反対側の下り線側歩道に4.5m×30mのスペースを確保して設置し、横断配管にて施工場所とつないだ。車道4車線(片側2車線)を確保すると、鋼製連壁施工エリアとして使用可能なスペースは9.5m×30mであった。

4.2 サイクルタイム

今回の作業スペースは、写真-1でもわかるように作業スペースとしては非常に狭く、掘削機を配置すると掘削完了までは掘削機とクレーンの入替えが不可能なだけでなく、芯材運搬のトレーラーを入れるスペースも確保できない状況であった。芯材の荷おろし、前日施工箇所の確認や防護板の撤去などを含め、同時にできる作業がないため、各種作業を順番にこなしていく必要があった。作業時間帯は、近隣の要望、歩行者のピーク時などを考慮し、所轄警察との協議の結果、10:00~24:00とした。日々の標準サイクルを表-3に示す。作業順序をひとつ間違えると、その日の予定時刻の24:00をまわってしまう可能性があるため、エレメントごとの機械配置とタイムスケジュールを作成し管理した。

4.3 GH-I部材の防護

鋼製連壁施工は、他の工程と比較して大々的に幹線道路を切り回す必要があるため、1日でも鋼製連壁工の日程を短縮することが警察の要望であった。

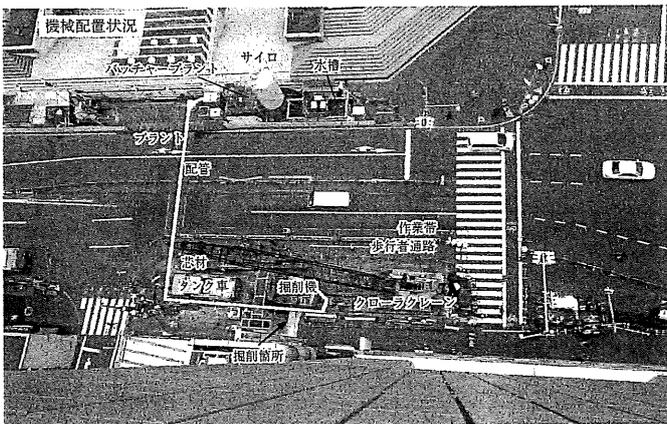


写真-1 鋼製連壁施工状況①



写真-2 鋼製連壁施工状況②

表-3 施工サイクル

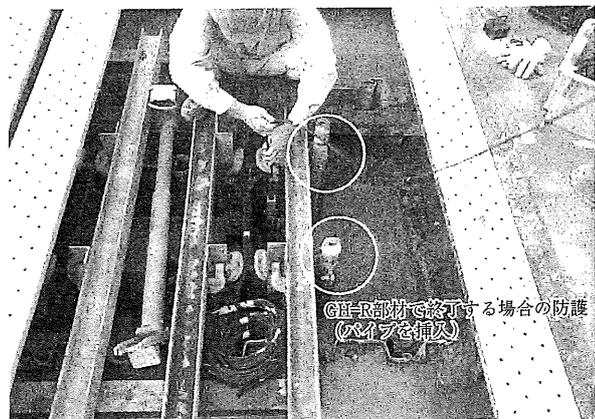
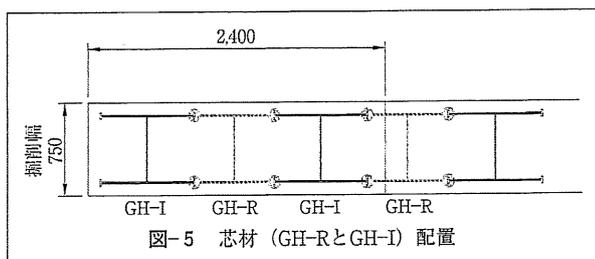
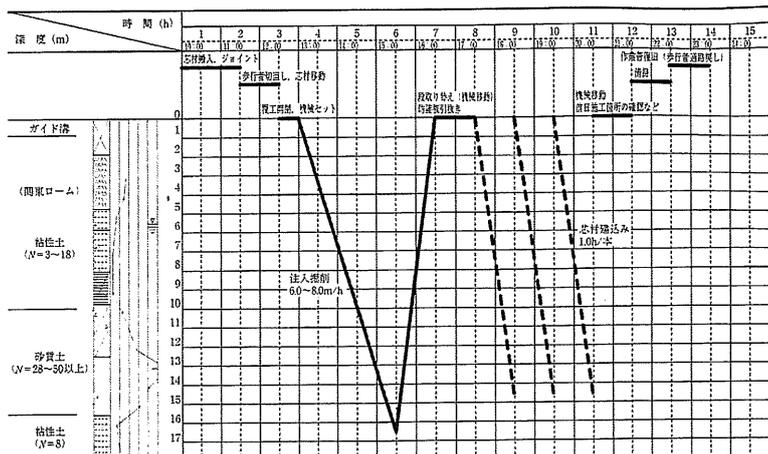


写真-3 建込み固定完了 (通常のGH-R材の防護)

今回の芯材であるNS-BOXは、図-5に示すとおりGH-R部材とGH-I部材の2種類を交互に建て込む構造であり、継手(嵌合継手)部の防護の関係から1セット当たり芯材を偶数本建て込むサイクル(常にGH-R部材で1セット終了)で作業計画を立てることが一般的である。写真-3は芯材建込み・固定およびGH-R部材で終了する場合の防護を完了した状況である。今回のCSM工法では掘削寸法は750mm×2,400mmであり、4本の建込みは不可能なため、当初は1セット当たり2本の建込みによる作業計画を立てていたが、芯材GH-Iの防護を工夫することにより3本の建込みを可能にした。結果として、大きな規制を伴う鋼製連壁工の作業日数を約2週間短縮した。GH-I部材の防護については、今回比較的浅い深度であるため部材重量も抑えることができ、引抜き時の摩擦も問題はなかったが、今後はあらゆる条件下での実証が必

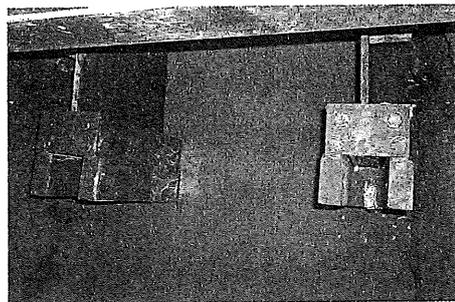


写真-4 GH-I防護状況

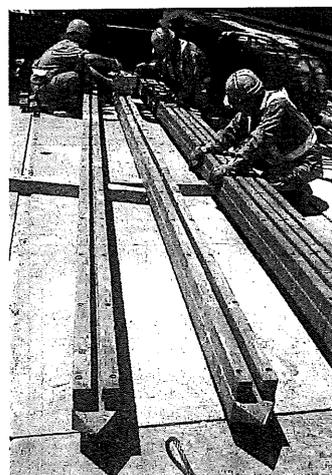


写真-5 GH-I防護板

要と思われる(GH-I部材の防護治具:写真-4,写真-5)。

4.4 施工精度

掘削深度および掘削精度は、操作室のモニターにより管理した。芯材の建込みについては、2方向からトランシットによる鉛直性の管理とあわせ、傾斜計

(芯材10本に1ヵ所)を併用し精度を向上させた。また、本体構造物を兼ねるため、躯体構築時の鉄筋かぶりを考慮して建込み時は±10mmで自主管理を行った。仮覆工の項でも述べたが、仮受けする箇所はコンクリートを打設したこともあり、躯体構築の際の鉄筋かぶりには影響はなかった。

4.5 環境対策、近隣への配慮

大型重機による施工のため、キャピラの下にはゴムマット(t=20mm)を敷き、移動時の振動・騒音の低減を図るとともに、粉塵防止として防塵フードと地面の間もシートで養生し飛散防止対策を図った。

また、沿道店舗前の施工については、土日・祝日を中心に工程調整を図った。

5. おわりに

今回は、非常に限られたスペースで鋼製連壁工の施工を行った。施工数量も少なく、また深度も比較的浅かったことに加え地山状態もよく、ガイドウォール背面の崩壊などのトラブルもなく施工終了した。しかし、今回以上に狭いスペースでの施工は、鋼製連壁の品質の確保や作業員・第三者の安全の確保といった面でも物理的に困難であると思われる。

本報告が今後の都市部狭隘箇所における鋼製連壁施工の参考になれば幸いである。

最後に、ご指導・ご支援いただいた関係者の皆様に感謝申し上げます。

報文

谷津船橋IC OFFランプにおける鋼製連壁の施工

—東関東自動車道谷津船橋インターチェンジ工事—

友廣 裕亮* / 久保寺 家光** / 宮元 克洋***

1. はじめに

谷津船橋インターチェンジ工事は、図-1、2に示すように慢性的な交通渋滞が著しい船橋・習志野市域の一般国道357号および飽和状態にある京葉道路などの交通を東関東自動車道（以下、東関東道）に誘導することにより、渋滞の緩和を図ることを目的として、地域活性化インターチェンジの制度を活用した新たなインターチェンジを構築するものである。東関東道下り（千葉方面）からのOFFランプ（出口）と、東関東道上り（東京方

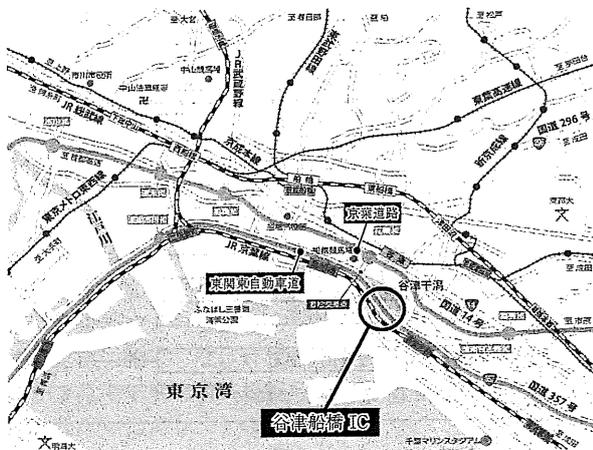


図-1 工事位置図

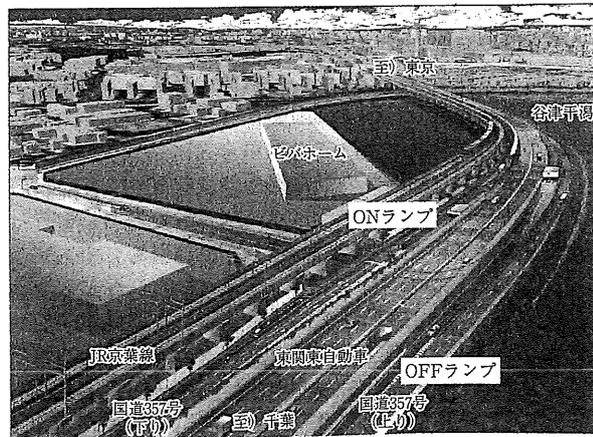


図-2 完成予想図

面行）に接続するONランプ（入口）により構成される。全体工事概要を表-1に示す。

東関東道のOFFランプは既設橋梁を拡幅し、開削工法による掘削道路を経て既設国道に合流する。この開削部の土留め方式に鋼矢板および鋼製連壁が採用された。

ここで、OFFランプの掘削ラインと並行する国道357号（千葉方面）路下には共同溝が設置されており、掘削位置と近接していた。そこで、掘削深度が深く土水圧の大きい場所については、鋼製連壁を本体利用して施工クリアランスを確保する設計であった。

本稿では、谷津船橋インターチェンジにおける鋼製連壁施工について紹介する。

2. 鋼製連壁施工概要

2.1 施工概要

OFFランプは東関東道と国道357号に挟まれた狭隘な施工ヤードで施工する必要があり、その幅は最大約9mである。また、国道357号の直下には共同溝もある（図-3参照）。この区間のU型擁壁部およびBOX部（F+STA.0+90.4～F+STA2+25.5）において鋼製連壁を

表-1 全体工事概要

工事名称	東関東自動車道谷津船橋インターチェンジ工事
発注者	東日本高速道路(株)関東支社千葉工事事務所
工期	平成21年6月19日～平成25年5月17日
工事場所	自：千葉県習志野市谷津4丁目 至：千葉県習志野市秋津5丁目
主要数量	<p>[延長] 延長770m</p> <p>[幅員] ランプ部 7.0m×1</p> <p>[土工量] 約56,000m³</p> <p>[橋梁等] 上部工 谷津高架橋(拡幅)</p> <p>下り線 PC3径間連続2主版桁 約250m²</p> <p>上下線 RC4径間連続2～3主桁 約860m²</p> <p>下部工 橋台1基, 橋脚11基</p> <p>基礎工 場所打ち杭(φ1.2m) 約1,200m</p> <p>[開削溝渠工] L型擁壁, 掘削道路(U型擁壁)他 約425m</p> <p>鋼矢板Ⅲ～V L型 約20,600m</p> <p>ソイルセメント鋼製地中連続壁(壁厚60～90cm)約2,500m² (NS-BOX 約470t)</p> <p>[非開削函渠工] URUP工法(東関東直下) L=約70m(曲線半径R=50m)</p> <p>[開削函渠工] L=約16m(国道357号線直下)</p>

*TOMOHIRO Yūsuke (株)大林組 URUP湾岸船橋工事事務所 工事長
 **KUBODERA Iemitsu 同 上 工事長
 ***MIYAMOTO Katsuhiko 同 上 所長
 千葉県船橋市高瀬町62-2

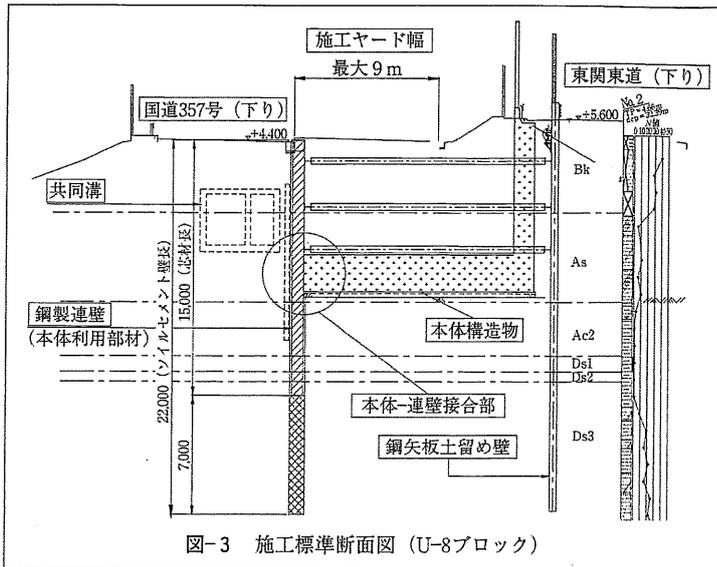


図-3 施工標準断面図 (U-8ブロック)

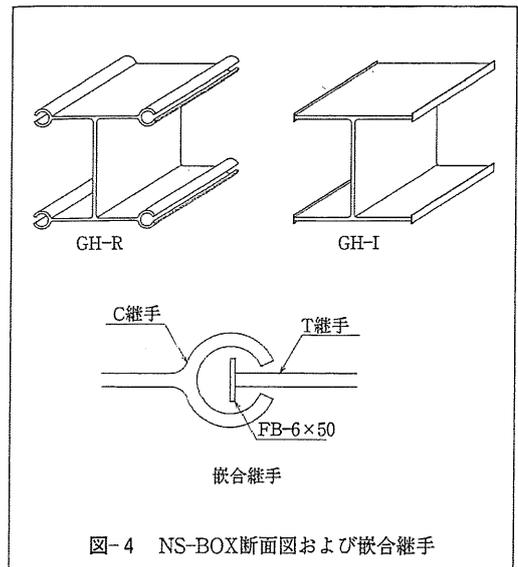


図-4 NS-BOX断面図および嵌合継手

延長約135m施工し、壁体を本体利用する。当現場では鋼製地中連続壁工法-II（以下、工法-II）が採用された。工法-IIとは、混合攪拌処理工法で構築されたソイルセメント中にNS-BOXを連続して建て込んで築造する地中連続壁である。NS-BOXとは図-4に示すような並行フランジ型の土留め壁材料で、フランジの両端に嵌合継手を有する構造部材である。NS-BOXではGH-RおよびGH-Iの2種類を標準部材としている。

当現場においては、この鋼製連壁をCSM（カッターソイルミキシング）工法にて施工を行った。CSM工法とは、水平多軸回転カッター式掘削機（Cutter）を用いて土（Soil）とセメント系混濁液を原位置で攪拌混合（Mixing）して、等厚のソイルセメント壁体（土留め壁・遮水壁など）や地盤改良体を造成する工法であり、連続した矩形のソイルセメント壁体を造成する工法である。

従来の施工方法であるオーガー攪拌工法やカッターチェーン攪拌工法と異なり、掘削と高性能な攪拌混合機能を有した水平多軸回転カッターによる攪拌方式であり、掘削精度の確保が可能で修正機能を有しているため、高精度・高品質のソイルセメント地中連続壁の施工が可能である。さらにCSM工法は、粘性土から硬質地盤まで補助工法なしで施工でき、出来型が等厚のため応力材のピッチを任意に決定できる効率的な土留め工法である。

当現場におけるソイルセメント壁厚は600mmおよび900mm、壁長は最深部で21.5mである。使用したNS-BOXは合計198条である。

2.2 施工手順

図-5に標準的な施工フローを示す。

2.2.1 ガイドウォール工

施工に先立ち鋼製連壁の施工精度を確保するために、定規となるガイドウォールの施工を行う。

2.2.2 掘削・攪拌

ガイドウォール上のマーキングに合わせて定規材（H-300）を設置し、掘削機の位置、NS-BOXの建込み位置の墨出しを行う。次にガイドウォールのマーキングに合

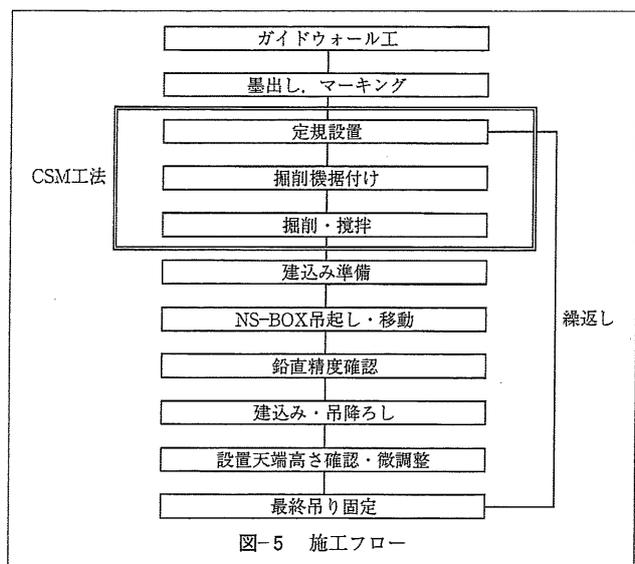


図-5 施工フロー

わせて掘削機を据え付け、位置および通りの確認を行う。掘削機の中央先端部よりセメント系懸濁液とエアを吐出し、カッターを回転させて掘削・攪拌・混練を繰り返す。掘削深度の確認および精度は、掘削機のモニターを用いてリアルタイムに確認しながら修正掘削を行う。

2.2.3 NS-BOX建込み

前日建込みした端部の嵌合継手部に挿入されている防護パイプを縁切りして引き抜く。定規材の墨出しを行った位置に建込み治具定規を設置し固定する。NS-BOXの建込みはトランシットで2方向から監視しながら行う。また、事前に取り付けておいた角パイプの中に傾斜計を挿入して傾斜測定を行う。天端高さをレベルで確認し、ガイド定規上で吊り金具を使用して固定する。

2.3 施工に当たっての課題と解決策

2.3.1 国道直近作業および国道直下の共同溝

鋼製連壁を精度よく施工するには、掘削箇所を両側にガイドウォールを施工するのが通常の方法であるが、国

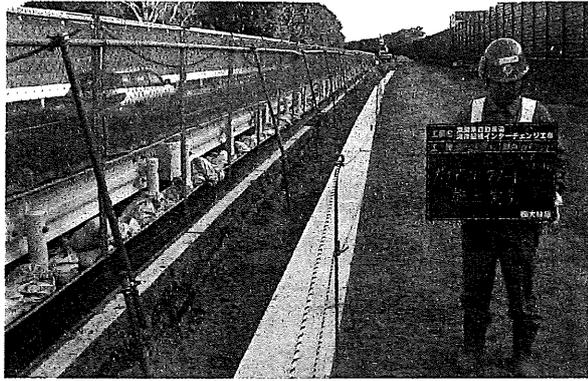


写真-1 As舗装で代用したガイドウォール



写真-2 CSM工法施工状況

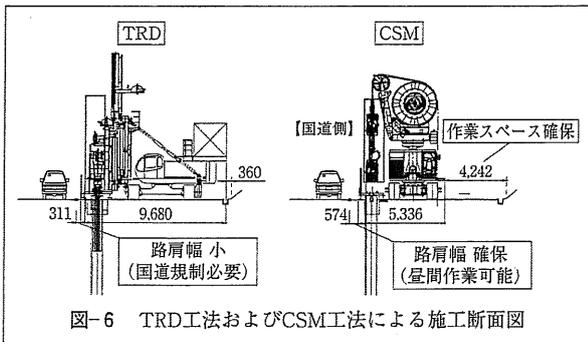


図-6 TRD工法およびCSM工法による施工断面図

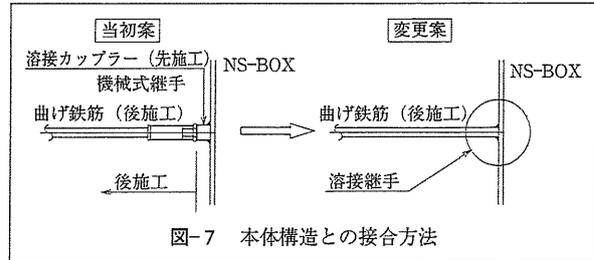


図-7 本体構造との接合方法

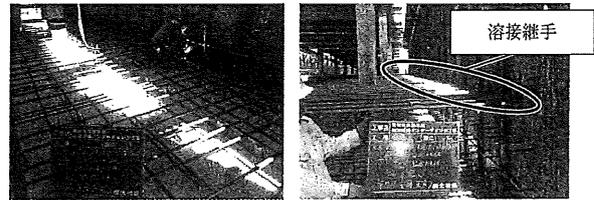


写真-3 床版部の接合方法

道と近接しているために国道側にガイドウォールを施工するスペースがなかった。これに対して、写真-1に示すように国道側のガイドウォールを国道のAs舗装($t=350\text{mm}$)で代用することにした。また共同溝の位置を事前に試掘して埋設物損傷事故の防止を図った。

2.3.2 狭隘な施工スペースおよび施工時期

前述したように国道357号および東関東道に挟まれた狭隘な敷地内での作業であること、土留め壁は国道との境界位置に施工しなければならないこと、および施工時期が3月で年度末道路規制抑制期間に当たることがあげられた。

当初採用を検討したTRD工法の場合、図-6のように施工時に500mm以上の路肩幅を確保できないことから、夜間に国道を規制しての作業になる。さらに、夜間の国道規制作業時間内にカッターポストを引き抜くことができないため、昼夜間国道を規制する必要が生じる。しかしながら、施工時期が3月で年度末道路規制抑制期間に当たることから国道を規制しての作業ができないため、TRD工法の採用を見送った。

一方、CSM工法に関しては、クワトロカッターをベースマシンの横に吊り下げられるパワーマシーネン社製のクワトロサイドカッターを使用することにより、カッター中心からキャタビラー端部までの幅を4.4mまで縮めることが可能となり、狭隘な施工箇所においても背面部に約4m作業スペースを確保できた。また、カッター前面の張出しも少なく路肩幅を確保できるので、施工時に国道の規制を必要としない。よって年度末道路規制抑制期間に関係なく施工が進めることが可能となるため、CSM工法を採用することとなった。写真-2にクワ

トロサイドカッターでの施工状況を示す。

2.3.3 本体構造との接合方法

NS-BOXと本体構造物の床版との接合部には通常事前におじ継手のカップラーを溶接しておき、掘削後の床版施工時にねじ切り鉄筋を接合する方法がとられる。この方法ではNS-BOXの建込み精度が直接床版の鉄筋の施工精度に影響するために、当現場では掘削後にNS-BOXに直接鉄筋を溶接する方式(図-7、写真-3参照)をとった。これにより床版接合部の鉄筋も要求精度を確保することができた。

3. おわりに

本稿において、狭隘な施工場所、国道に対しての超近接施工、3月という施工時期を条件に持った現場として、鋼製連壁を本体利用した事例について記した。

今後、さらに厳しく特殊な条件の現場が増えると考えられるので、本稿が工法選定の参考になれば幸いである。

最後に、工事の実施に伴い、終始暖かくご指導下さった東日本高速道路(株)関東支社千葉工事事務所および関係者の皆様に紙面をかりて謝意を表します。

■参考文献

- 1) 鋼製地中連続壁協会：鋼製地中連続壁工法-II(ソイルセメント鋼製地中連続壁工法)設計施工指針(案)，pp.1~5(参17,18)，平成24年4月。

各論

地中連続壁を本体として 用いる場合の施工上の留意点

葛 拓造*

1. はじめに

我が国における主要な土留め壁形式の実績としては、比較的浅い15m以浅の深度では鋼矢板・プレキャストコンクリート矢板などが、50m以浅ではSMW工法やTRD工法のソイルセメント連続壁工法や鋼管矢板工法などが、50m以深では鉄筋コンクリート製地中連続壁工法（以下、RC連壁）に代表される安定液掘削工法による地中連続壁が多い。

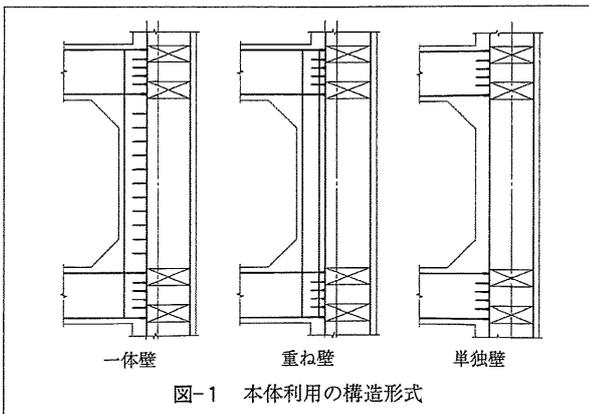
本稿では、本体利用としての実績の多いRC連壁、鋼製地中連続壁工法-I（以下、工法-I）および新しく開発されたソイルセメント鋼製地中連続壁工法（以下、工法-II）、そのうち、工法-I、工法-IIについての本体利用時の施工上の留意点を中心に紹介する。

2. 地中連続壁工法の本体利用の形式

地中連続壁を本体利用する場合、地中連続壁は本体構造物の一部となるため、設計段階から施工にかけての十分な検討や配慮が必要である。

本体利用する場合の地中連続壁の形式は、施工条件・荷重条件・重要度を考慮して、下記の3つの構造形式から選定される（図-1参照）。

- ① 単独壁形式：土留め壁内部に増打ち壁（以下、内壁）を設けずに地中連続壁のみで荷重に抵抗する構造で、そのまま本体構造として利用する形式である。地中連続壁と床版などとの接合が必要なため、高い施工精度が要求され、特に止水には配慮する必要がある。工



法-Iの単独壁形式では、美観・耐久性および止水性を考慮して、一般的に内壁と異なり非構造壁である化粧壁を設ける。

- ② 重ね壁形式：地中連続壁と内壁の間で面内せん断力の伝達をしない構造で、完成後の壁の強度は地中連続壁と内壁の累加強度とする形式である。
- ③ 一体壁形式：地中連続壁と内壁の接合面に目荒したジベルを取り付けるなどして、完全に1枚の壁として作用荷重に抵抗する形式である。

いずれの形式を選択した場合でも、設計で決められた本体構造（壁+頂版、床版、底版）としての形状・寸法・位置を確保するため、高い施工精度が要求される。また、本体構造であるため耐久性、長期的な止水性、耐震性が求められる。

3. 安定液掘削工法での施工上の留意点

3.1 概要

ここでは、本体利用の実績の多い安定液掘削工法として、RC連壁と工法-Iを取り上げる。

RC連壁は、安定液を用いて掘削面の崩壊を抑えながら地盤を壁状に掘削し（溝壁）、この溝壁内に鉄筋籠を挿入してコンクリートを打設して、地盤内に連続したRC壁を構築する工法で、その強度・剛性が高いことから大深度・大壁厚への適用が可能であるなどの特徴を有する。

工法-Iは、RC連壁の鉄筋籠の代わりに、工場製作された嵌合継手を有する鋼製連壁部材（以下、NS-BOX）を用いて地中連続壁を構築する工法で、プレキャスト部材であるNS-BOXを用いるため、現場の省スペース化が図れ、高耐力の部材を用いることからRC連壁に比べて薄壁化が可能であるなどの特徴を有する。

以下に、RC連壁および工法-Iを本体利用する場合に求められる施工精度と止水性の確保に必要な施工上の留意点を示す。

3.2 施工精度の確保

3.2.1 掘削

連続壁を所定の精度で構築するためには、掘削により解放された地盤内の応力を確実に制御して溝壁の安定を保つ必要があり、必要に応じて補助工法を選択する必要がある。補助工法としては、ウェルポイントやディーブ

* KUZU Takuzō 鋼製地中連続壁協会 事務局 | 東京都千代田区丸の内2-6-1 新日鐵住金内

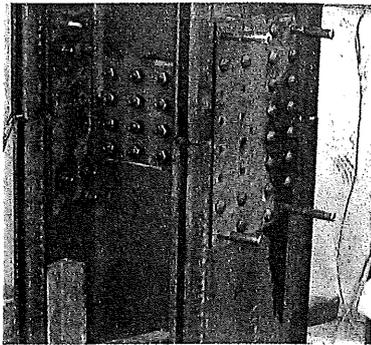


写真-1 ドリフトピン打込み

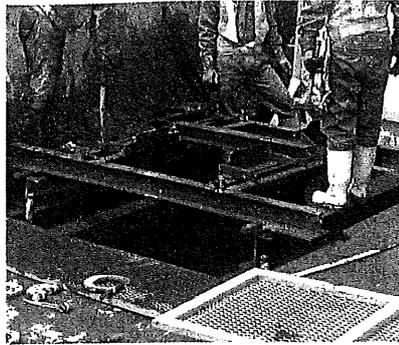


写真-2 定規設置状況

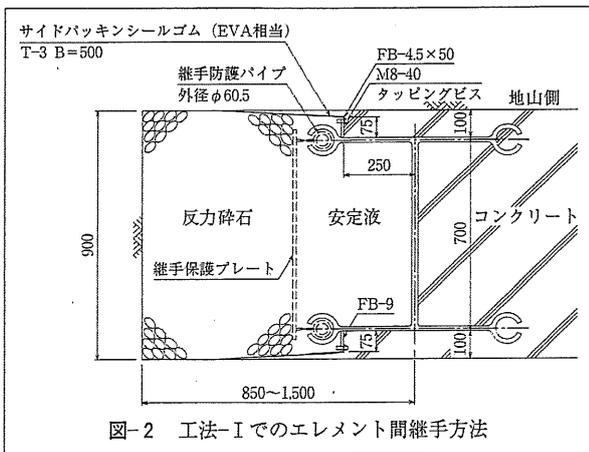


図-2 工法-Iでのエレメント間継手方法

ウェルによる地下水位低下工法，地盤改良により溝壁の周辺地盤の強度や止水性を向上させるなどの方法がある。

ガイドウォールは，掘削機械の据付けおよび掘削位置を決める定規となるため，鉄筋コンクリート造などの堅固な構造とし，地盤の状況や上載荷重などを考慮して形状・寸法などを決定し，所定の位置に精度よく築造する。

掘削時の溝壁の施工精度は壁体の品質に大きく影響するため，掘削壁面の鉛直性・平面性などに注意を要する。一般に施工の掘削誤差は50mm以下，鉛直精度は通常1/500以下が要求される。掘削中の精度管理は，掘削機に取り付けられた傾斜計による掘削状況の確認や，精度調整装置による掘削機の姿勢制御で行なう。さらに，掘削後には超音波測定機により溝壁面を把握し，必要に応じて修正掘削を行なう。

3.2.2 鉄筋籠およびNS-BOXの製作・建込み

鉄筋籠やNS-BOXの製作精度・建込み精度は，そのまま壁体の精度となるため非常に重要である。

鉄筋籠の場合は，1エレメント分を製作できる籠製作架台の準備は不可欠である。一方，NS-BOXの場合は，加工工場での条組検査によって確保された鉛直精度を現場で再現するために，現場での部材接合時に現場継手の添接板の四隅にドリフトピンを打ち込み，NS-BOX全長の鉛直精度を確保する（写真-1参照）。

建込み時には，ガイドウォール上に，敷桁および定規を設置し，精度確保を図る（写真-2参照）。建込み精度管理は，クレーンで吊り下げた状態でトランシットによ

り測定し，掘削溝内に仮受けした際にレベルにより測定することで行なう。

3.2.3 コンクリート打設

RC連壁では水中コンクリートを，鋼製連壁工法-Iでは高流動コンクリートを打設する。工法-Iでは，NS-BOXの形状が隔壁構造に近いので，また，かぶり部・継手部を含め充填性を確保するため，スランプフロー値が500mm以上の高流動コンクリートとしている。なお，一般部のコンクリートの打込み圧力によりNS-BOXが移動しないように，建込み直

後に根固めコンクリートを打設する。

また，所要の品質の壁体が構築できるように，トレミー管の配置・挿入深さ・打設速度を決定する。

3.3 止水性の確保

エレメント間相互の継手は，要求性能から剛結継手・ヒンジ継手・フリー継手の3種類から選択する。仮設構造のRC連壁ではフリー継手のコンクリートカッティング方式の採用が多いようである。

RC連壁，工法-Iの漏水は，多くの場合エレメント間の継手部で発生する。継手面にスライムなどの付着物がないように，スライム処理や後行エレメントの建込み前にブラシなどで継手面の清掃を行なう。

工法-Iのエレメント間継手では，NS-BOXを連結されるため，「ゴムシート+継手防護プレート方式」（図-2）が一般的に用いられており，継手清掃機などにより洗浄し，溝壁掘削時の抵抗用に配置した反力砕石を確実に除去してからコンクリートを打設する。

4 原位置土攪拌工法の施工上の留意点

4.1 概要

原位置土混合攪拌工法で本体利用する工法として，ソイルセメント柱列壁工法でH形鋼を本体の一部として使用する工法や比較的新しく開発された工法-IIがある。

工法-IIは，TRD工法やCSM工法といった原位置土攪拌工法で等厚のソイルセメント壁を造成後，ほぐして攪拌した地盤内にNS-BOXを建て込んで地中連続壁を構築する工法である。原位置土攪拌工法を用いることにより，安定液掘削工法に比べて作泥などのためのプラントヤードが不要となり，大幅な省スペース化，掘削残土の縮減が可能である。その結果，建設費の低減が図れるという特徴を有する。

NS-BOXは嵌合継手を用いて建込みを行なうため，工法-IIにおいても高い精度の確保が可能であり，さらにフランジ間・継手部内にソイルセメントが充填されて止水性が向上するため，より信頼性のある連続壁体を構築できる。

工法-IIと鉄筋コンクリート製の頂版・底版などとの接合は，NS-BOXのフランジに工場にてねじ継手（溶接カプラー）をあらかじめ溶接しておき，床版との接合時に後施工カプラー付き鉄筋，またはねじ切り鉄筋と接合

するための機械式継手が設置されている。このため、設計どおりの位置で床版鉄筋と、接続するためには、溝壁の掘削精度、NS-BOXの建込み精度の確保が重要となる。

以下に、工法-IIで本体利用する場合に求められる施工上の留意点を示す(図-3参照)。

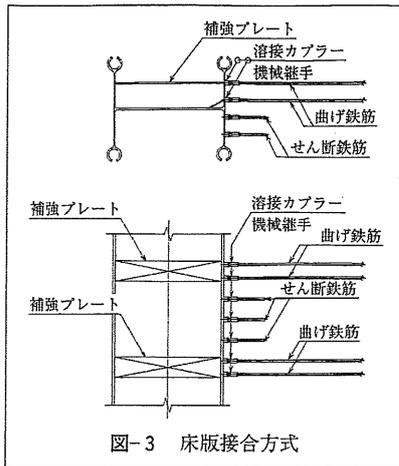


図-3 床版接合方式

4.2 ソイルセメント壁の造成およびNS-BOXの建込み精度確保

工法-IIのソイルセメント壁の造成は、TRD工法(掘削精度1/250以下)、CSM工法(掘削精度1/300以下)で行なわれる(写真-3参照)。

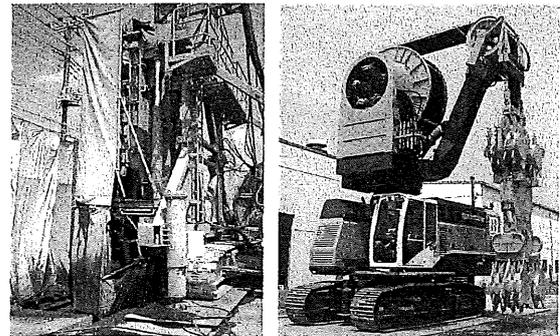
TRD工法は、チェーンソー型のカッターポストをベースマシンと接続し、所定の深度まで地中にカッターポストを挿入した後、横方向に移動させてソイルセメント壁の掘削と固化液の注入、原位置土との混合・攪拌を行ない、地中に等厚の連続したソイルセメント壁を造成する工法である。

TRD工法では、掘削深さが浅い場合、施工長が短い場合以外は3パス施工を標準造成サイクルとしている。3パス施工とは、先行掘削/戻り掘削/固化液注入の3つのパスによりソイルセメント壁を造成することである。

CSM(カッターソイルミキシング)工法は、水平多軸回転カッターを用いて土とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合し、平面的に矩形のソイルセメント壁体を造成する工法である。近年、狭隘部の施工に対応可能な掘削機が開発され、省スペース施工に適した工法-IIとの組み合わせで多数の建設工事に貢献されてきた。

CSM工法の標準的な施工では、掘削・攪拌・造成を1回の上げ下げ(1サイクル)で行なう。しかしながら、硬質地盤などで掘削に長時間を要するような場合、あるいは各種制約によりNS-BOXの継手・建込み作業に長時間を要するような場合は、掘削液による掘削・攪拌工程と、固化液による攪拌・造成工程を分けて行なう2サイクルでの施工も可能である(図-4参照)。

施工中の代表的なトラブルとしては、ソイルセメントの硬化によりNS-BOXの建込み精度の確保が困難になったり、建込みが不能となったりすることがあげられる。これらの対策としては、造成深さ・NS-BOXの継手箇所数や現場作業性などを考慮して、造成・建込みを1日の作業可能時間内で確実に完了させることである。このため、事前に試験練りを行なってソイルセメントの配合を適切に設定する、輸送上分割されたNS-BOXを建込み前に現場で事前に連結して建込み時のボルト接合作業の時間を省略するなどの計画を立てておく必要がある。



TRD工法
最大施工深度：60m
最大壁厚：900mm

CSM工法
最大施工深度：65m
最大壁厚：1,200mm

写真-3 TRD工法およびCSM工法

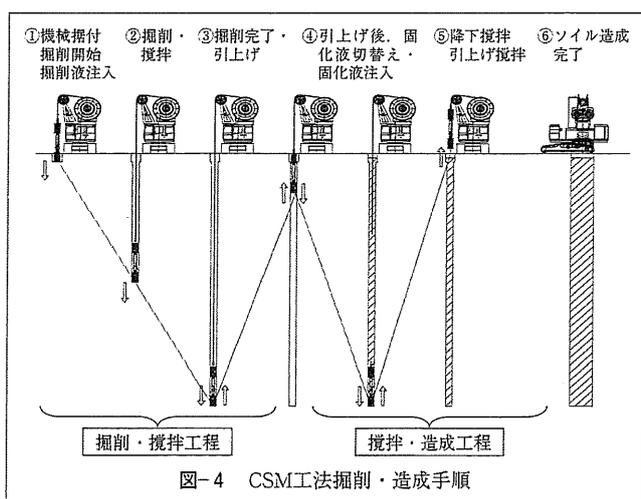


図-4 CSM工法掘削・造成手順

ソイルセメント掘削壁厚は、NS-BOXの寸法およびNS-BOXの建込み精度実績の1/300以下を満足するように設定する。掘削幅、部材の高さ、嵌合継手の形状、掘削精度を考慮して、設計位置を確保できるように施工を行なう場合の必要掘削幅の検討例を図-5に示す。例えば、 $h=700$ のNS-BOXを $L_h=30m$ 建て込む場合、必要な壁厚(W)は900mmとなる。

各辺長の基準となるNS-BOXの鉛直精度は、その直後に建て込む鋼材の鉛直精度に大きく影響する。NS-BOXの建込み中は、トランシットで2方向から建込み精度を確認し、曲りを検知した場合は引き抜いて再建込みを行なうなど、変位量の小さいうちに確実に修正することが肝要である。

建込み後のNS-BOXの設置精度は、超音波では測定できないため、NS-BOX自体に測定用パイプをあらかじめ取り付けておき、建て込み後、挿入式傾斜計にて面内・面外の鉛直性を確認する。施工を行なった4工事での建込み精度を表-1に示す。建込み精度は、面外方向は非常に高く、面内(法線方向)でも1/500程度である。

4.3 底版・頂版の防水工

止水性能の要求に応じて、工法-IIおよびコンクリート床版などの防水を行なう必要がある。防水工は主に

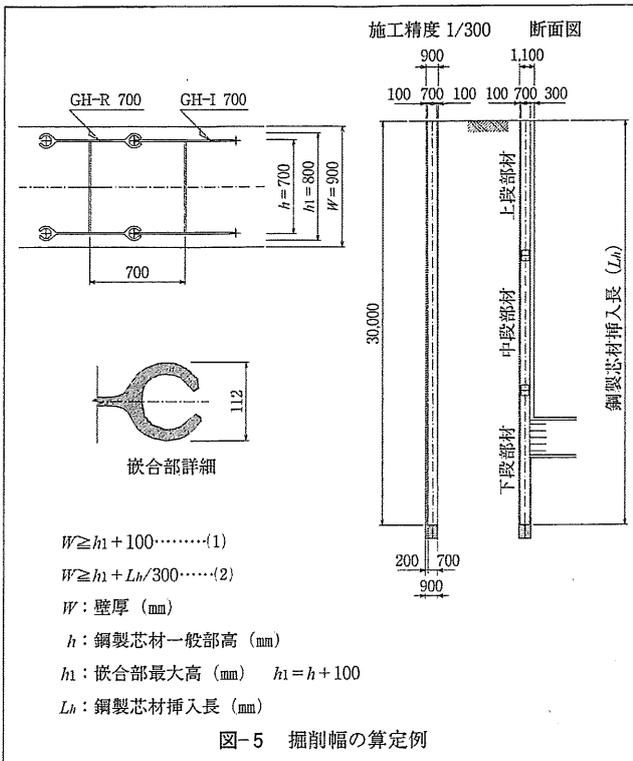


表-1 工法-IIの建込み精度実績

物件	面外	面内	施工機
R試験工事	1/913	1/1,000	TRD
K工事	1/1,000	1/250	TRD
T工事	1/870	1/750	CSM
S工事	1/2,600	1/600	CSM
Ave.	1/1,300	1/500	CSM

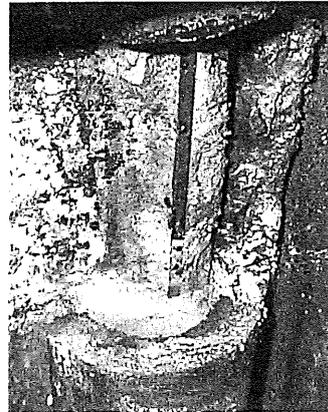


写真-4 嵌合継手内

きる。処理方法として、嵌合継手部に①内壁とNS-BOXの間に水膨潤性止水材を塗布する、②弾性目地材を塗布する(写真-5参照)、③鉄板を溶接するなどの方法がある。①および②の方法を用いた嵌合継手部の止水試験では、0.5Mpaの水圧時でも漏水がないことを確認された。また、②弾性目地材とNS-BOXの付着性能は、ワイヤブラシにより表面錆を除去しプライマーを塗布することで、錆がない場合の付着強度の約8割の強度を有することを付着試験により確認した。写真-6に現場適用された②の事例を示す。

5. おわりに

地中連続壁工法が我が国に導入されてから50年が経過した。鋼製連壁工法のうち、工法-Iは開発後20年が経ち、工法-IIは現在8工事に適用されてきた。これまでの実績、

特に本体構造物への適用を通じて技術確立が図られてきた。今後も改良・改善を進め、狭隘な都市部で地下空間の高度利用化、インフラのリニューアルニーズに資する技術として、さらなる発展が期待できると思われる。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 開削工法・同解説，2006年。
- 2) 鋼製連壁協会：鋼製地中連続壁工法-I，工法-II設計施工指針，平成24年4月。
- 3) 地中連続基礎協会：地中連続壁基礎工法ハンドブック 設計編・施工編，平成3年。
- 4) 地中連続基礎協会：地中連続壁基礎工法施工指針(案)，平成22年7月。
- 5) 地中連続壁基礎協会：土木構造物本体として用いる場合の諸問題と対策，pp.22~27，昭和63年2月。
- 6) 佐久間誠也：最近の土留め・仮締切り工法の特徴と課題，基礎工，Vol.40，No.3，p.6~p.10，2012。
- 7) 渋沢重彦，田中卓也，田崎和之，石田宗弘：ソイルセメント鋼製地中連続壁その1/施工性確認実験，土木学会第56回年次学術講演会，pp.618~619，2001.10。

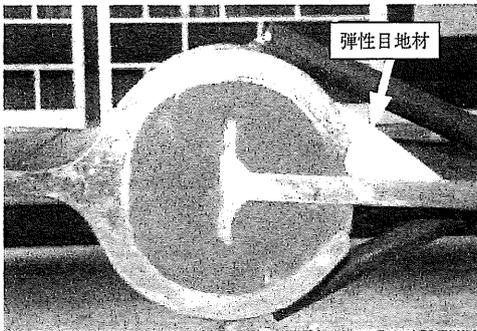


写真-5 弾性目地材継手試験体

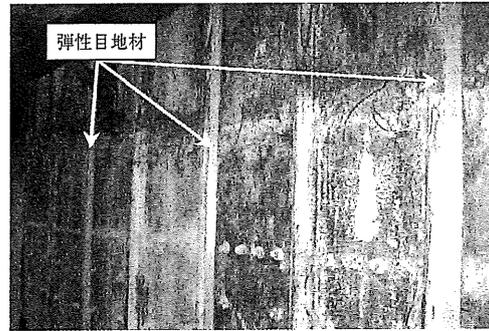


写真-6 嵌合継手内

NS-BOXの防水工，本体コンクリート構造物の底版・頂版の防水工に分けられる。

コンクリート構造物である底版・頂版は一般のコンクリート構造物での防水方法と同じであるが，NS-BOXとコンクリートの異種材料間の接合部には入念な防水処理が必要である。

4.4 工法-IIの止水性

上述したように，工法-IIではNS-BOX間および継手間にソイルセメントが充填されているため，高い止水性能を有する。試験施工での打設後の嵌合継手部の継手鋼材を撤去した状態を写真-4に示す。

ソイルセメントを充填させた嵌合継手の止水性を確認するため実施した止水試験では，約0.3Mpaの水圧下で $5.9 \sim 6.1 \times 10^{-7}$ の透水係数(500mm換算)を確認した。

工法-IIの壁面はほぼ鋼材で覆われているが，継手間からの浸入水を許さない，さらに高い止水性が要求される場合，嵌合継手部の隙間部に防水処理を施すことがで

供用下の道路シールドトンネルを切り開いて 合流部を構築

—首都高速大橋JCT SJ14工区(1)EF連結路トンネル工事—

首都高速道路(株)
東京建設局
安井 雅士



首都高速道路(株)
東京建設局
遠藤 啓一郎



(株)安藤・間
関東土木支店
住野 英明



(株)安藤・間
関東土木支店
半田 陽介



はじめに

現在、首都高速道路(株)では中央環状線の早期完成に向けて鋭意施工を進めている。このうち、トンネル構造の中央環状線と高架構造の高速3号渋谷線を接続する大橋ジャンクションでは、平成22年3月に開通した山手トンネルの連結路を供用しながら切り開き、中央環状品川線の連結路トンネルとの分合流部を構築している。本稿では、その施工方法及び実施状況について報告する。

工事概要

SJ14工区(1)EF連結路トンネル工事(以下、本工事と称す)では、中央環状品川線大橋連結路の下層トンネル(E連結路)において、大橋ジャンクションのループ部に接続する山手トンネルの連結路(以下、大橋シールドと称す)の上層を開削工法により掘削して露出し、新設するRC躯体と接合した後に、大橋シールドのセグメントの一部を撤去して合流部を構築する(図-1、2)。なお、この一連の作業を「切り開き」と呼んでいる。

大橋シールド上層とE連結路を走行する車両は、この合流部を通過して大橋ジャンクションのループ部に入り、ループを2周して高速3号渋谷線の上り方向と下り方向に分岐する。一方、本工事の上層トンネル(F連結路)を走行する車両は、ループ部から流出して大井方向に向かい、品川線本線トンネルと合流する。

開削工法によりシールドトンネルを切り開く構造や施工方法については、山手トンネルの建設で培ったノウハウを有するものの、供用下のシールドトンネルを切り開くのは初めてである。したがって、セグメントの変形や切断時の漏煙など、車両走行空間に対して慎重な管理が求められた。

また、大橋ジャンクションの建設では、関係権利者などが引き続き事業エリアに住み続けられるよう、東京都による再開発事業と協働して、地域のまちづくりと一体的に整備する事業手法が採られている¹⁾²⁾。そこで、立体道路制度を活用した重複利用区域が設定され、本工区の地上は全て再開発事業用地となっている。このため、工事用資機材の搬入出経路が著しく制限され、対策として供用中の高速道路を利用したことも本工事の特徴である。

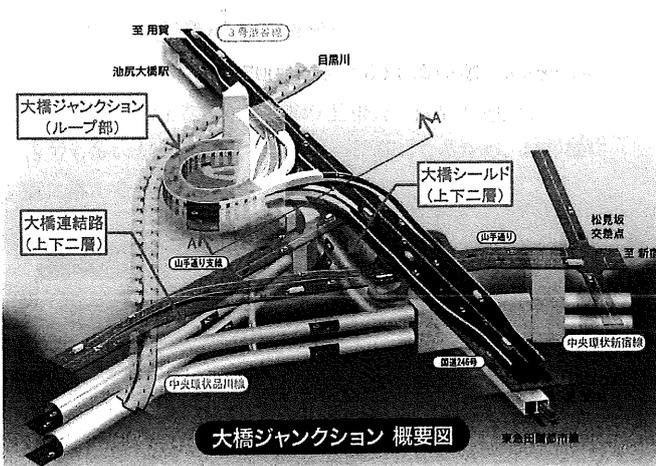


図-1 大橋ジャンクション概要図

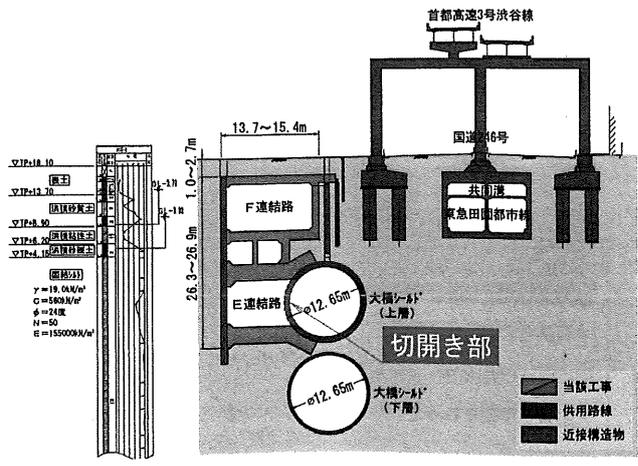


図-2 EF連結路トンネル概要図(A-A断面)

施工方法

(1) 施工順序

本工事の施工順序を図-3に示す。

まず、借地した地上ヤードから土留め壁や中間杭などを施工した後、早期に地上ヤードを再開発事業者へ返還する必要があるため、F連結路上床版を逆巻き工法により先行して

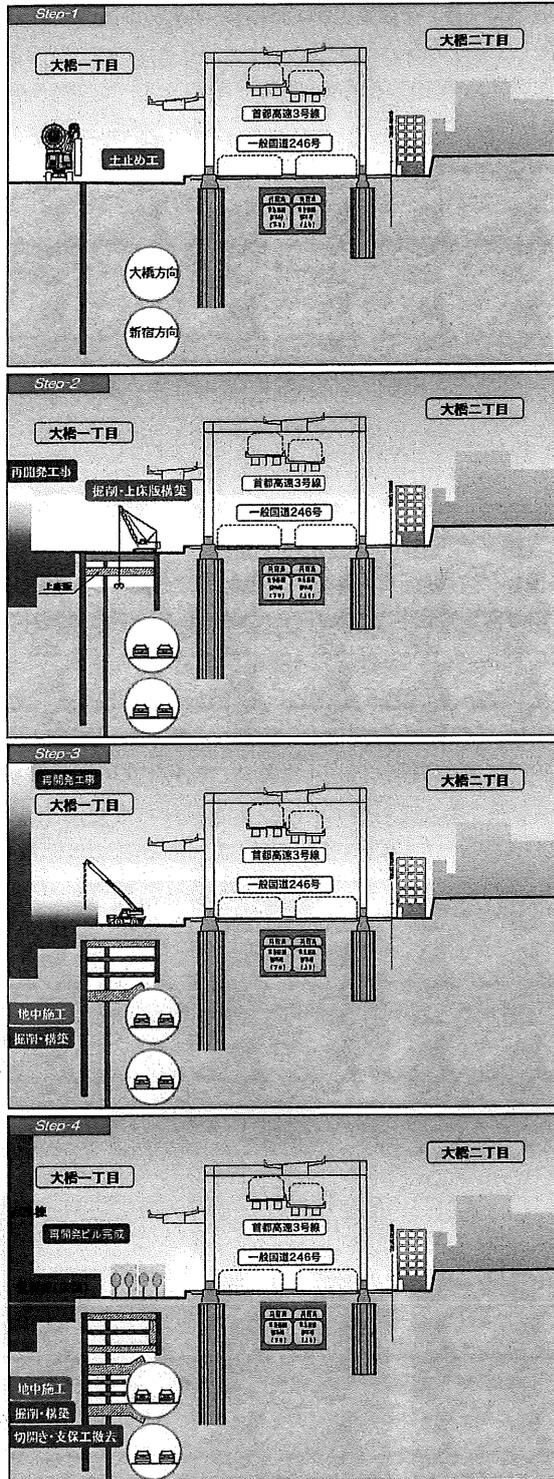


図-3 施工ステップ

構築し、埋戻しを行う。なお、実施工は2か所に残した施工開口(3m×5m)からE連結路上床版まで掘削し、開口部を閉塞および埋戻してヤードを返還した。

次に、切開きを行う大橋シールドの安定と土留め壁の変位抑制を図るため、E連結路上床版を逆巻き工法で先行構築する。その後は、上層(ダクト階、F連結路)の構築と下層(E連結路)の掘削、構築を並行して行い、全体工程の短縮を図っている。

最終的に躯体構築が全て完了した後に、大橋シールドの鋼殻セグメントを切断、撤去して切開きを行う。

(2) 切開き構造

大橋シールドは山手トンネルの一部としてすでに供用中であり、あらかじめ供用下での切開き工事を考慮して、内外面にスキムプレート(鋼殻)を有する特殊な鋼殻セグメントで構築している(図-4)³⁾。この鋼殻セグメントは、外面スキムプレートを撤去すればコンクリート躯体の鉄筋を直接接続できるように、あらかじめ主桁に鉄筋接続用の部材が内蔵されている(写真-1)。また、内面スキムプレートが内型枠となるため、供用トンネルの内側から作業することなく、RC躯体の接合を完了することができる。

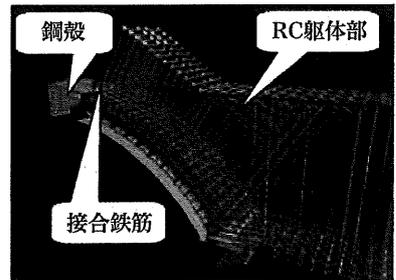


図-4 特殊鋼殻セグメント接合部

なお、鋼殻セグメント切断、撤去区間となる供用路線内には、あらかじめ仮設プロテクターを設置し、高速道路利用者の走行性、安全性の確保に対処している(図-5)。



写真-1 特殊鋼殻セグメントに内蔵された鉄筋接続部材



図-5 プロテクター

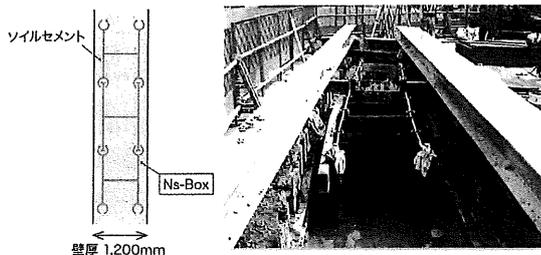


図-6 ソイルセメント鋼製地中連続壁

(3)土留めおよび躯体構造

大橋シールドに相対する側壁は、隣接する再開発事業用地との離隔に余裕がないため、地下連続壁を本体に利用している。連壁の施工時期は大橋ジャンクションの連結路橋梁工事と競合し、狭隘かつ空頭制限下であったことから、泥水処理プラントや鉄筋ヤードといった大規模な設備が不要となるソイルセメント鋼製地中連続壁工法(以下、鋼製連壁と称す)を採用し⁴⁾、掘削機にコンパクトなCSM工法クアトロサイドカッターを使用した(図-6、写真-2)。なお、本工事はソイルセメント鋼製連壁をトンネル構造物として初めて本格的に採用した事例である。

また、鋼製連壁とRC躯体との接合部には、鉄筋接続用の機械継手(溶接カブラ)を連壁部材の製作工場にてあらかじめ設置している。

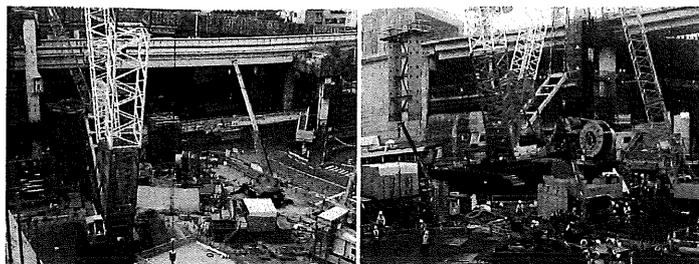


写真-2(2点) 連結路橋梁工事競合下の連壁施工に止水コーキングを施している(写真-4)。

(2)RC躯体の接合

E連結路の上下床版は、鋼製連壁側とシールド鋼殻側の両サイドにおいて鉄筋の接続位置が制約される。そのため、両者の施工誤差によっては配筋困難なことが懸念されたが、実際には相対誤差は鉛直約30mm、水平約100mmであり、現場での緩やかな曲げ加工により対応可能であった。

また、床版の厚さは2.5mと大きく、接合部では多数の鉄筋が重なり高密度になるため、低熱セメントによる高流動コンクリートを使用した。なお、万が一にも打ち込んだコンクリートが供用中の車両走行空間に漏出しないよう、事前にセグメントの継手および内側スキムプレートと主桁、継手板の接合部の全てをコーキングし、手厚い安全対策を行った(写真-5)。

(3)シールド切開き

大橋シールド側部の掘削は、鋼殻セグメント主桁背面に溶接した治具(写真-6)を介して支保工を架設し、供用トンネルの安定を図りながら行った。また、下床版の鋼殻接合部の掘削については、トンネル下端まで大きく解放することになるため、安全性を重視して、掘削から躯体構築までを延長10~15m程度のブロックに分けて施工した(写真-7)。

全ての躯体構築が完了した後に、スキムプレート、縦リブおよび継手板、主桁の順に鋼殻セグメントを切断、撤去して切開きを行った(写真-8)。主桁は、弧長約6.6mを3分割

施工状況

(1)鋼製連壁

写真-3に鋼製連壁の仕上がり状況を示す。一部の嵌合継手に滲みが認められるが、全体として漏水はほとんどなく、止水性は良好である。なお、鉛直継手部には連壁建込み時

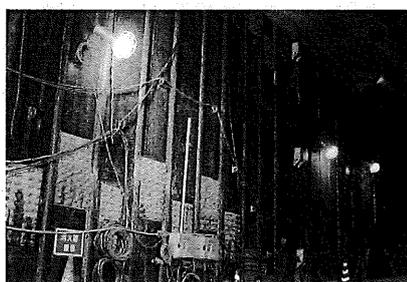


写真-3 鋼製連壁の仕上がり



写真-4 鋼製連壁の継手コーキング



写真-5 鋼殻内コーキング



写真-6 鋼殻腹起こし治具



写真-7 下床版のブロック施工



写真-8 鋼殻縦リブの切断

して上部より切断し、供用路線側に荷が振れないように細心の注意を払って撤去した(写真-9)。また、下部コンクリート充填部はワイヤーソーにて切断した。

なお、供用中の車両走行空間を防護するプロテクターは、トンネル火災時の排煙滞留空間を確保するために、上部は常時開放しておく必要があった。そこで、鋼殻切断中の施工ブロックのみポリエステル製のエアーマットと防災性シートでプロテクターの上部を閉塞した(写真-10)。これにより、供用路線の交通規制を伴うことなく作業帯内でプロテクター上部を開閉可能とした。

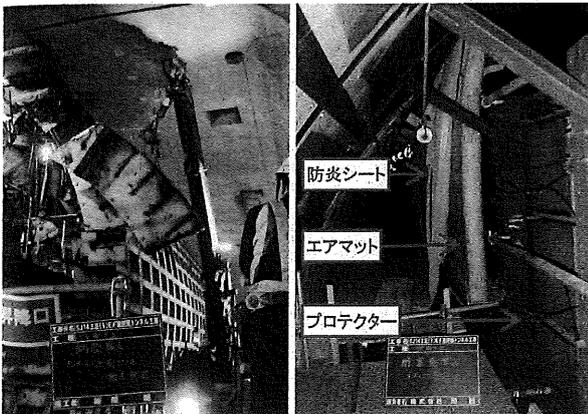


写真-9 鋼殻主桁の撤去 写真-10 プロテクター閉塞

(4) 供用トンネルの工事利用

F連結路上床版構築後は再開発事業に用地を引渡すため、地上からの資機材の搬入出ができないうえ、隣接工事との競合などもあり、工事動線は非効率なものとなった。そこで、E連結路下床版を構築した後は、供用中の山手トンネルからのアクセスを利用して工程促進を図った。

工事車両の搬入出は、規制車を使用して搬入出車両の後尾規制(低速走行)を行い、十分な車間距離を確保して、その間に工事車両を入退場させた(写真-11)。



写真-11 規制車による入場

(5) 近接構造物の影響管理

土留め壁背後に東急田園都市線、共同溝、高速3号渋谷線などの重要構造物が近接しており(前掲図-2)、掘削に伴う変状を抑制するため、切梁に設計軸力の100%のプレロードを導入した。その結果、土留め壁の変位量は許容値5.1mmに対して最大3.1mmに抑えることができた。

また、大橋シールドについては、供用開始前に坑内に設置したトータルステーションにより自動計測を行い、施工ステップを詳細に反映したFEM逐次解析より得られた予測値と比較して計測管理を行った。図-7に変形量が最大となるE連結路上床版掘削完了時の計測結果を示す。掘削による土荷重の除荷に伴い、セグメント変形が斜め上方に生じる結果となっている。セグメント変形モードは、全施工過程を通しておおむねFEMによる予測解析結果と合致し、変形量は解析値の最大60%程度であった。

なお、鋼殻セグメント主桁の応力解放を伴う切断作業は、計測データを逐次フィードバックしながら施工管理できるよう、切開き延長43.5mを6ブロック(10リング@0.75m)に分割して施工を行った。

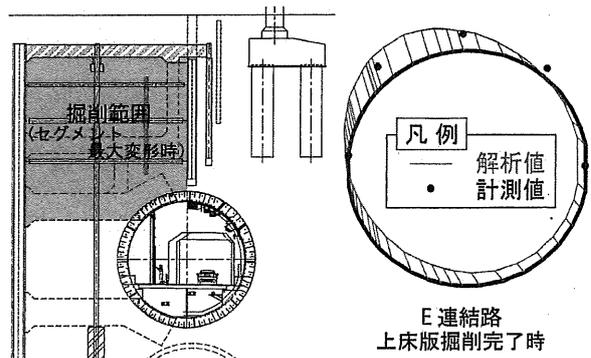


図-7 大橋シールド(上層)の変形挙動

あとがき

本工事においては、平成25年3月に切開きを無事完了し、路面工やダクト仕切り壁などの内部構築の段階に移っている。平成26年度内の中央環状品川線の供用に向けて、更なる工事進捗を図る決意である。

都市部の地下工事において、近接施工は常に重要な課題である。本工事においても多数の近接構造物があり、各管理者の方々にご指導、ご協力をいただきながら施工することができた。この場をお借りして厚く御礼申し上げたい。

《参考文献》

- 1) 佐伯・黒川:再開発と一体化した道路事業の概要、基礎工、第38巻第3号、pp10-12、2010.3
- 2) 小川:ジャンクションとまちづくりの取組み、土木施工、第52巻第12号、pp69-72、2011.11
- 3) 前川・遠藤ほか:大橋ジャンクションの構造と施工、土木施工、第52巻第12号、pp73-81、2011.11
- 4) 藪本・長田ほか:ソイルセメント鋼製地中連続壁の本体利用およびスラブ接合部に関する実験検討、トンネル工学報告集、第20巻、pp359-366、2010.11

首都高速道路における供用部シールド鋼殻切り開き工

首都高速道路株式会社 正会員 ○安井 雅士
 首都高速道路株式会社 染谷 厚徳
 株式会社 安藤・間 半田 陽介

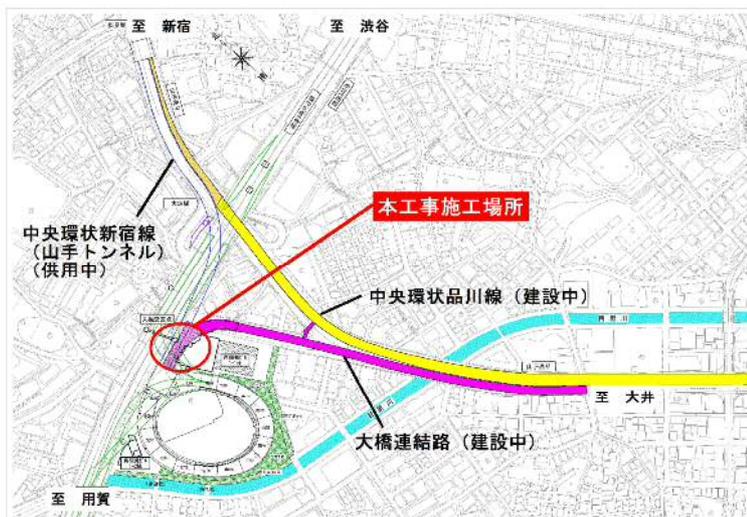
1. 目的

首都高速道路中央環状品川線建設にあたり、シールド工法で建設された供用中の中央環状新宿線（山手トンネル）と建設中の大橋連結路とを接続する分合流部工事を実施する。合流幅員を確保するためにシールド鋼殻を部分的に撤去する工事を「切り開き工」と呼んでおり、実施にあたっては、供用部通行車両の安全確保が優先事項のひとつとなる。

2. 現場状況

建設する連結路（E路：中央環状品川線北行⇒3号渋谷線， F路：3号渋谷線⇒中央環状品川線南行）躯体は、地上から開削による逆巻き工法で構築した。構築後、地上部は東京都再開発工事に着手し、ヤード北側は、地表に国道246号、上空に首都高速3号渋谷線、地中に東急田園都市線、共同溝がある。逆巻きによる躯体構築、切り開き工に至るまでの各ステップにおける地盤変位をFEM解析で算出したうえで、関係機関の協力を仰ぎながら、山手トンネルをはじめとする各近接構造物の計測管理を継続的に実施した。

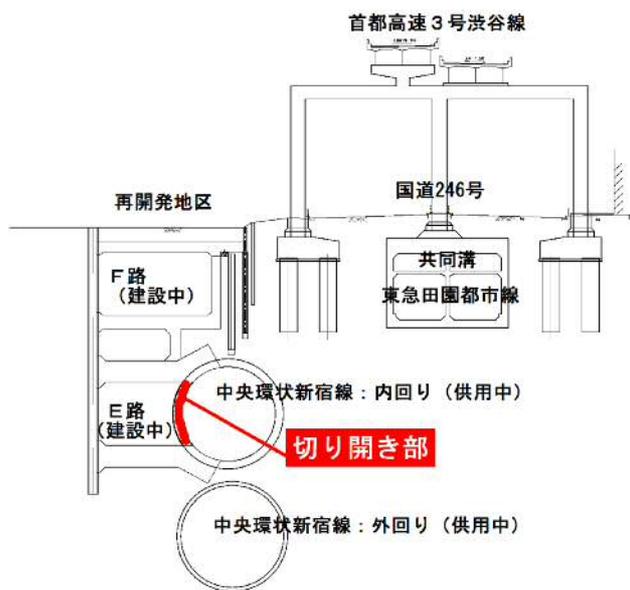
切り開き工は、E路と中央環状新宿線内回り（供用中）を接続するため、延長43.5mにわたって実施した。



位置図



平面図



断面図

キーワード 供用部，シールド，切り開き，安全対策

連絡先 〒153-0042 東京都目黒区青葉台3-6-16 HF 青葉台ビル4F

首都高速道路株式会社 東京建設局 大橋建設事務所 TEL 03-3462-6297

3. 切り開き工手順

山手トンネルの切り開き範囲は鋼製セグメントで構築されている。切り開き工は、躯体構築完了を経て、鋼殻スキンプレーートを撤去した後に鋼殻の縦リブ、主桁の順にガス切断を実施。主な撤去部材となる主桁は、上段、中段、下段の3分割とし、作業帯側にクレーンを設置して吊り出し、搬出をした。なお、下段ピースのみ、防護コンクリートを巻き込んでいるため、ワイヤーソーによる切断とした。

4. 供用部対策

切り開き工を実施する際の、供用部に対する悪影響要因は、資機材転倒、ガス切断時の火花、煙、ワイヤーソー切断水等が挙げられる。いずれも運転者に不安感を与えないため、少量の流出も許されずに完全遮断することが重要となる。

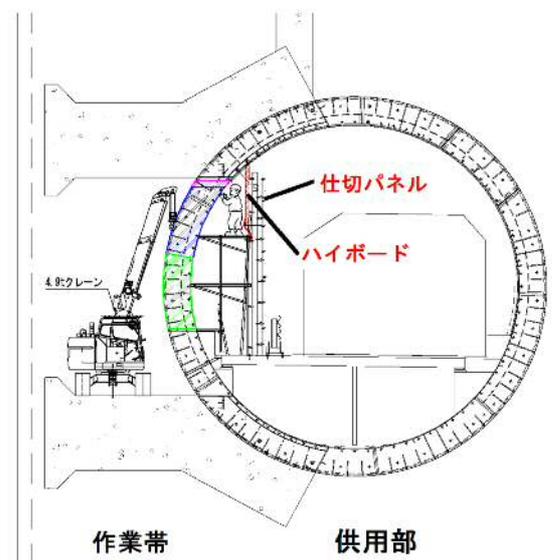
まず、供用部からの視覚的な遮断と資機材転倒防止を兼ねて仕切パネルを設置。仕切パネルは中央環状新宿線供用前に左側路肩に高さ約5mで事前設置を図っている。本工事では更に、上部に隙間からのガス切断時の煙を遮断するため、ハイボードと呼ぶポリエステル製のエアマットを防災のスパッタシートと併用で設置した。設置時は、作業帯内側からの空気注入を行うことで遮断を行うことが可能となり、供用部の交通規制を実施しなかった。

鋼殻切断時には、作業員の他に仕切パネル内側に監視員を配置したほか、弊社管理局の交通管理部門、保全部門と連携を図り、供用部パトロール時に作業内容を留意することにより、万が一供用部に異変が発生した場合、早期対応ができるように努めた。

撤去部材搬出の動線は、供用中の中央環状新宿線を利用し、搬出時は標識規制車を背後に配置して、通行車両に対しての安全を十分に確保した。

5. 今後について

本箇所での切り開き工は、開始から約2か月で終了した。供用部シールド鋼殻切り開き工は、本連結路の他、中央環状品川線本線部においても予定している。引き続き安全第一ですすめていきたい。



作業時断面図



切り開き前 (スキンプレーート撤去後)



切り開き後

クアトロサイドカッター機(CSM工法)

首都高速道路(株)では、高度な技術を要する大規模工事を対象に、民間の優れた技術を幅広く求めて設計及び施工に反映させるため、技術提案型の新たな契約方式を活用しています。これは、複数社からの技術提案を公募し、首都高速道路(株)で審査、評価するもので、中央環状線では、「中央環状品川線シールドトンネル(北行き)工事」、「中央環状品川線大橋連結路工事」【図-1】および「中央環状新宿線大橋地区本線接続工事」の3工事で採用しています。

今回の施工方法(クアトロサイドカッター機(CSM工法)による地中連続壁工事)【図-2】は、「中央環状品川線大橋連結路工事」において、複数社からの提案の中で最も評価が高かった株式会社間組からの技術提案について、付帯条件(試験施工による施工精度、品質、施工性等の確認)を付して採用したものです。



図-1 中央環状品川線大橋連結路工事箇所



図-2 クアトロサイドカッター機による地中連続壁施工状況

「中央環状品川線大橋連結路工事」は、現在建設中の中央環状品川線と3号渋谷線を接続する連結路を山手通り支線の地下に構築する工事です。【図-3~4】当該工事現場は、歩道を含めた道路幅員が22mと狭い上に、沿道には商店等が隣接しているため、【図-5】施工に伴う交通渋滞や周辺に与える圧迫感などについて慎重に配慮する必要があります。また、当該工事現場の地下には硬質地盤が存在するため、土留め壁等の構築にあたっては、硬い地盤でも施工可能な工法を選択する必要があります。

このような現場条件から、本工事の技術提案公募の際に付した施工条件は以下のとおりです。

- ① 1車線規制のみの狭隘な作業帯で施工が可能であること
- ② 周辺に与える圧迫感が小さいこと
- ③ 硬質地盤でも施工が可能であること



図-3 中央環状品川線 概要図



図-4 中央環状品川線大橋連絡路 概要図

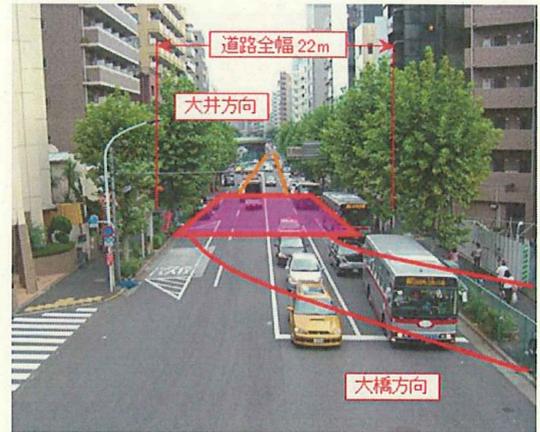


図-5 現場状況
(工事着手前の山手通り支線)

本工事において間組から提案された施工方法は、シールド工法とシールドトンネル非開削切開き工法により連絡路と品川線本線シールドトンネルを接続するものであり、地上作業を最小限に抑え沿道環境や街路交通に配慮した優れたものです。【図-6~7】唯一、地上からの作業となるシールド発進立坑の構築においても、「クアトロサイドカッター機(CSM工法)」を用いた技術提案があり、施工精度、品質、施工性等が確認できれば、上記の施工条件を満足するものと評価いたしました。【図-8】2008年6月に行われた試験施工では、施工精度、品質(山留め壁の強度、遮水性)、狭隘な作業スペースでの施工性等について確認が出来たため、本工法を採用し、今回工事に着手いたしました。なお、隣接する工事においても「クアトロサイドカッター機(CSM工法)」を採用し2008年8月末より施工を行っております。

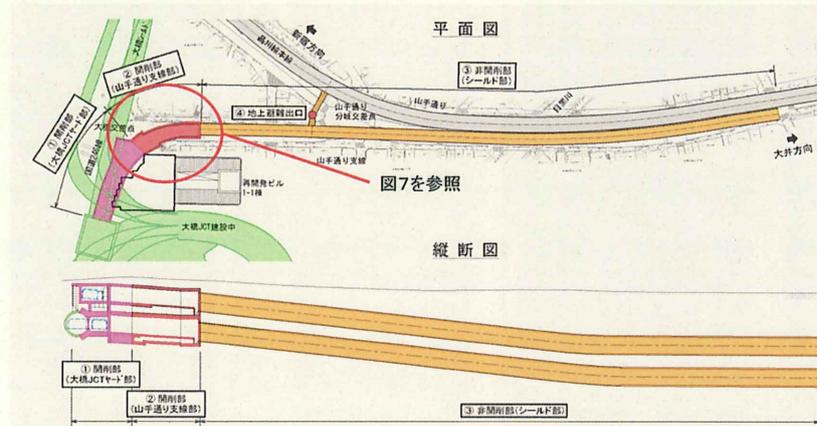


図-6 中央環状品川線大橋連絡路工事(株間組提案) 概要図

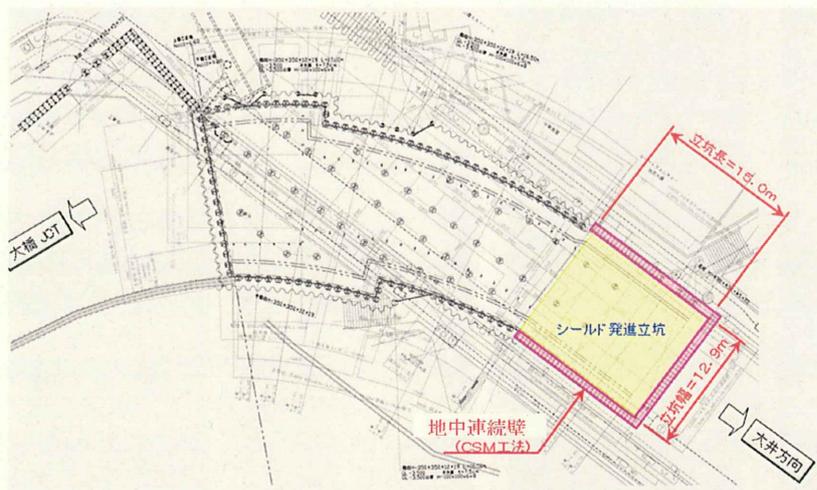


図-7 立坑概要図(株間組提案)

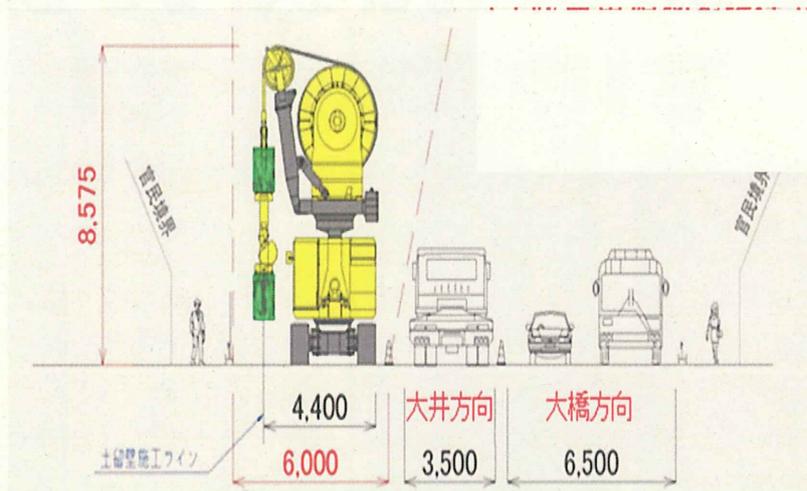


図-8 施工状況断面図(柵間組提案)

首都高速道路㈱は、本工法のような民間の優れた技術提案を公募、評価、試験施工等による確認を経て採用していくことは、都市土木の技術発展に大きく寄与できるものと考えます。今後も民間の優れた技術提案を積極的に評価し、採用していく予定です。

基礎工事に用多目的施工機

1. はじめに

ドイツ バウアー社製の BG 機は、日本では、主に障害物撤去工事に使用されている。本機には、多目的な基礎工事（壁、杭、障害撤去）用に様々なアタッチメントが用意されており、海外の工事事例等も含め、各用途と新技術について、述べる。

2. ケリーバー工法

2.1 ケリーバーによる掘削

ケリーバー（回転力を掘削ツールに伝達し、多段に延長できるので所定の掘削深度が確保できる）とドレッタラー（ケーシングをジョイントし、ケーシング掘削）を用い、順次作業が可能である。

2.2 揺動機とケリーバーによる掘削

揺動機は、ケーシングを用いた掘削深度が深い場合、その径が大きい場合で、ケーシングの引抜き力増強のために装備できる。写真 1 は、揺動機の搭載を示す。

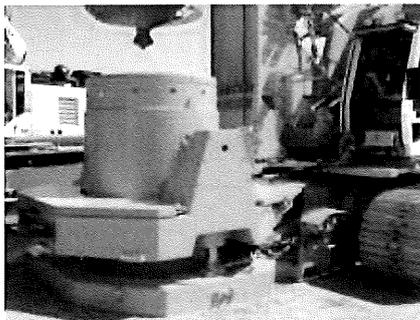
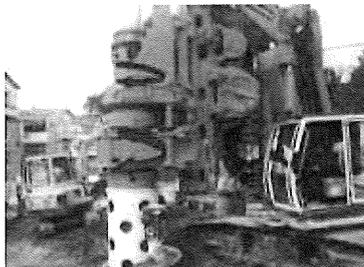


写真 1

2.3 トルクコンバーターとケリーバーによる掘削

標準以上の回転トルクが欲しい場合やダブルオーガー的に内側・外側に回転させたい場合、トルクコンバーターを装備できる。ケリーバーやケーシング、オーガー等での掘削に利用できる。写真 2 は、上下の回転は同方向の場合を示す。



3. エコサイトパイル®工法

3.1 スタンダードタイプ

安定液を全く使用せず、特殊ツールで掘削、貫入、引き上げ（コンクリート打設）、鉄筋かご挿入の手順で施工する場所打ち杭工法である。従来の場所打ち杭の 1.5～2 倍の支持力が、確認されている。本工法は、日本建築センターの基礎評定を、掘削径 620mm、最大深度 28m で取得しており、場所打ち杭として設計が出来る。写真 3-1 は、日本での BG28 を使用した施工状況を示し、写真 3-1-1 は、ロッド先端の特殊ツールである。

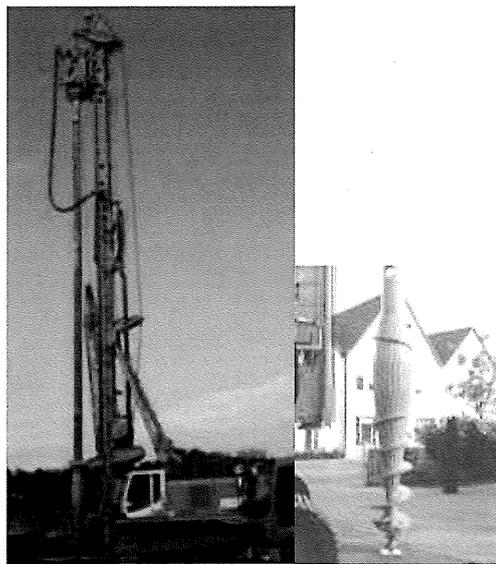


写真 3-1

写真 3-1-1

3.2 ロストビットタイプ

特殊ツール先端にロストビット（杭先端に残すビット）を付けた状態で、掘削、貫入、鉄筋かご挿入、引き上げ（コンクリート打設）の手順で施工する、場所打ち杭工法である。杭としての審査は日本ではされていないが、海外では施工実績がある。

写真 3-2 はイタリアにおいて BG28 を使用して施工された、掘削径 620mm、深度 21m の場所打ち杭の施工状況である。



写真 3-2

4. CFA 工法

連続フライトオーガーを使用し、掘削、引き上げ（コンクリート打設）、鉄筋かご挿入の手順で、場所打ち杭を施工する。土質条件に応じ、ケーシングを併用する。この際、トルクコンバーターを使用すれば、ダブルロータリー（回転方向が正逆）の同時作業が可能となる。

写真 4 は、上下で反対方向に回転させ、ケーシングとオーガーに使用する場合である。

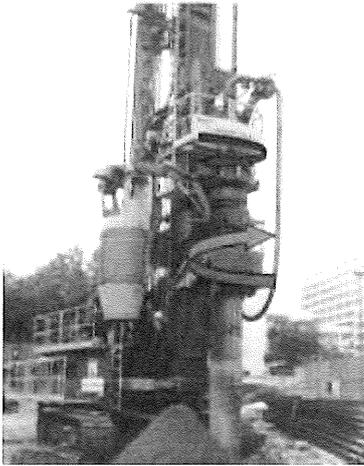


写真 4

5. BC 工法(トレンチカッター工法)

トレンチカッター（水平多軸回転カッター）を装備して、安定液を用いた地中連続壁施工を行う。ホース同調システムを採用し、掘削深度は、約 40 m となっている。BG28 以上の機械で可能である。クローラクレーンに搭載するより、コンパクトである。写真 5 は、トレンチカッターBC32 を搭載している。

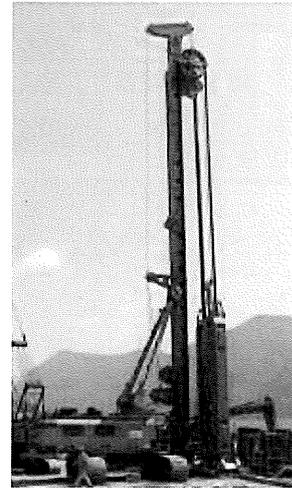


写真 5

6. CSM®工法（カッターソイルミキシング®工法）

水平多軸回転カッターを用いて土とセメント系懸濁液を原位置で攪拌混合し、矩形のソイルセメント壁や地盤改良体を造成する工法である。

モノクレーの先端にカッターが装備され、BG28 の場合、約 35m の掘削深度となっている。この工法は、既に国内外で 50 万 m² 以上の実績を上げている。カッティングとミキシングのカッター部は、2 種類（BCM5, BCM10）を有している。

写真 6-1 は、BCM5 搭載したもので、写真 6-2 はカッター部の掘削液・固化液の噴出状況である。

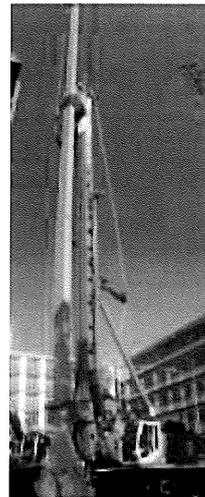


写真 6-1

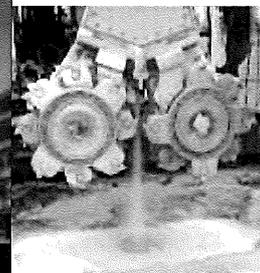


写真 6-2

7. SMW 工法

日本の SMW 工法と同様であるが、ベースマシンが BG 機になり、写真 7 のように、3 軸のロータリヘッドを装備している。

8. SCM 工法（シングルコラム混合法）

SMW 工法の単軸に回転数を増速するために、トルクコンバーターBTM を装備し、攪拌効率の向

上の図り、写真 8 のように改良体を造成する。

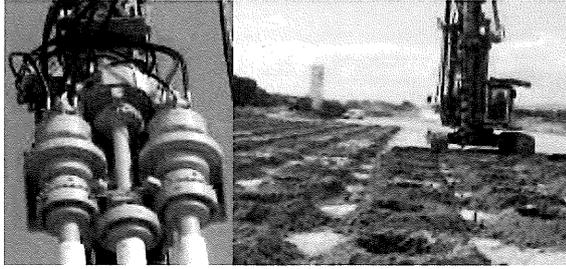


写真 7

写真 8

9. 油圧ハンマーによる打撃工法

パワーグループの FAMBO 製油圧ハンマーを装備し、鋼管、シートパイル、コンクリート杭等の打設ができる。BG28 では、最大ピストン重量 10 t (HR10000 写真 9) まで搭載することができる。

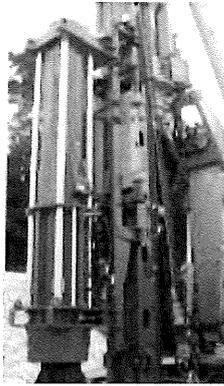


写真 9

10. ジェットグラウチング工法

一般的には、小型のボーリング機を用いて、行われるが、BG の場合は、延長ロッドのジョイントを行わず、所定ロッドを保有し、BG28 では、深度 40m まで施工可能である。

写真は、油圧式ロータリヘッドを搭載した状況である。

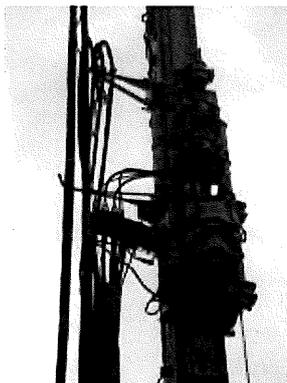


写真 10

11. ディープバイブロ工法

ロッド先端に装備した水平振動するバイブロフロット(油圧モーターと回転体)の振動エネルギーで、地盤の間隙を減少させ密度の増大を図り、地盤改良に使用される。補給材(砂、碎石等)は、地面または地中から投入される。液状化対策に効果がある。写真 11-1 は、全景を示し、写真 11-2 は、バイブロ先端部を示す。

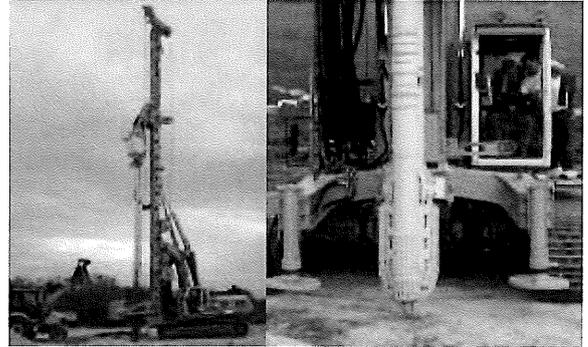


写真 11-1

写真 11-2

12. 羽付鋼管杭工法

ヨーロッパでは、あまり例をみないが、日本では多くの工法があり、これらの工法にも適したトルクを有し、さらに斜杭にも適応できる。現在の実績の鋼管径は、400mm、杭長約 38m である。試験では、鋼管径 600mm、杭長 18m を施工している。斜杭は、傾斜 15° まで施工可能である。写真 12 は、BG12H でのテスト状況である。



写真 12

13. 斜杭(場所打ち杭)

施工例では、BG28 により、最大傾斜 16° 掘削深さ 40m、掘削径 800mm、ケーシング併用の掘削である。港湾の架台上からの施工(写真 13)や川の

両岸での施工等がある。橋脚基礎でも斜杭が施工されている。

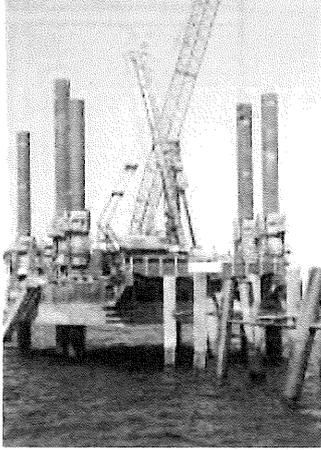


写真 13

14. 新技術

14.1 GPS ポジショニングシステム (位置管理装置)

GPS を利用し、設定された位置 (杭芯) まで画面に従ってオペレータの操作を誘導する装置で、写真 14-1 は、運転席の画面例である。

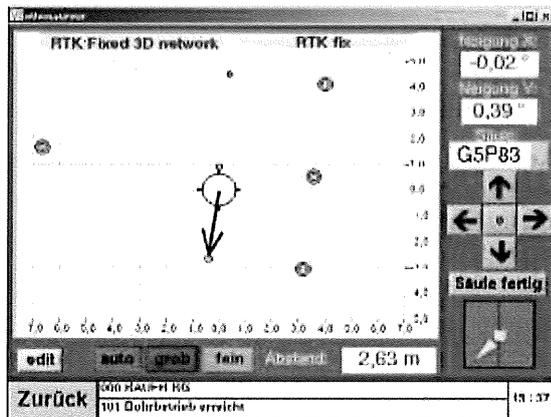


写真 14-1

14.2 リモートコントロールシステム

本体機の運転席から離れた地点でも、運転操作を可能にした有線によるシステムである。災害現場など人の近づけない所での施工に効果的である。カメラ、マイクロフォンからの情報も取り入れ臨場感がある。写真 14-2 は、遠隔操作室の例である。

14.3 データ通信システム

バウアーの B トロニックシステムは、各種データの蓄積、出力、故障診断等の機能を有しているが、インターネット通信を利用して、運転席と同じ掘削状況、故障診断等の情報を離れた場所でも、確

認できる。これらにより、修理時間の短縮にも繋がる。写真 14-3 は、遠隔地 (模擬) パソコン画面と運転席画面を示す。

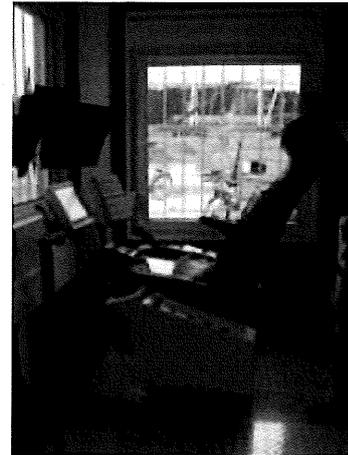


写真 14-2

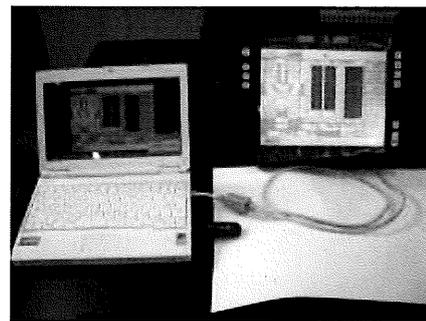


写真 14-3

15. 終わりに

BG 機の多様な利用法は、様々なニーズにより展開されて来た。今後もさらに進化し、環境にやさしい機械として排気ガス対策、騒音対策、振動対策を施しつつ、厳しい施工条件下の日本を始め、全世界で活躍する基礎施工機を望むものである。

<参考文献>

- (1) バウアー社プレゼンテーション資料
- (2) エコサイトパイル®工法 (パンフレット)
- (3) CSM 工法 (パンフレット) バウアー工法研究会
- (4) ディープバイプロ工法 (パンフレット) バウアー工法研究会
- (5) BG 工法 (パンフレット) バウアー工法研究会
- (6) トレンチカッター (パンフレット) バウアー工法研究会

ソイルセメント壁および深層地盤改良の汎用施工機械 CSM工法の施工機械の開発・展開・改良

佐久間 誠 也

CSM (カッターソイルミキシング) 工法 (以下「本工法」という) の施工機械について、誕生の経緯、ケリーバー方式から吊り下げ方式への変遷、狭隘地・低空頭型機械の開発、高トルク型機械への改良などについて概要を述べる。また、CSMクアトロカッター機 (以下「本施工機」という) の機械構造と具体的な工夫内容を説明すると共に現場施工への展開や最新の改良機械を紹介する。

キーワード：CSM工法、ソイルセメント壁、水平多軸回転カッター、等壁厚、大深度、低空頭、狭隘地

1. はじめに

パワー工法研究会は、B社 (独) の基礎工事技術の普及とその技術の日本化を目指す研究会であり次の4つの工法の委員会を立ち上げている。工法名は、B社 (独) の機械名などから、等壁厚のソイルセメント壁や地盤改良が施工できる本工法、杭打ちや障害物の撤去などの施工ができるBG (ボアーゲレーテ) 工法、大深度・大壁厚の地中連続壁が施工できるBC (パウアーカッター) 工法、地震時の液状化対策などに有効な地盤の締め固めができるDV (ディーブパイプロ) 工法がある。本稿においては、これらの中から近年普及が進んできている本工法について、誕生の経緯、ケリーバー方式から吊り下げ方式への変遷、狭隘地・低空頭型機械の開発、高トルク型機械への改良などについて概要を述べる。

本工法は、施工機械が2004年に初めて日本に導入されてから9年が経過し、その間に狭隘地・低空頭型の機械の開発も実施工案件に対応しながら進められてきた。そして、新しい機械の開発と共に遮水壁や土留め壁に加え地盤改良の実績もできた。また、本体利用可能な鋼製地中連続壁工法-IIの施工機械としての施工実績も増えつつある。

2. 本工法の概要

本工法とは、水平多軸型地中連続壁掘削機と同様の水平多軸回転カッター (Cutter) を用いて土 (Soil) とセメント系懸濁液を原位置で攪拌 (Mixing) し、等壁厚のソイルセメント壁体 (土留め壁・遮水壁等)

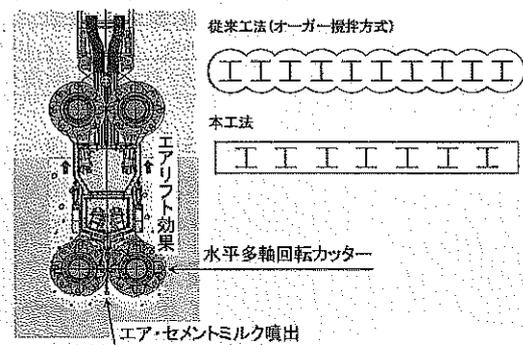


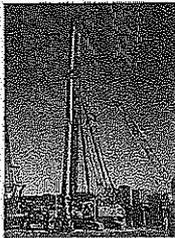
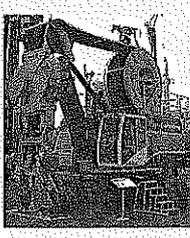
図-1 本施工機概念図

や地盤改良体を造成する工法である (図-1)。その特長には、以下の様な点がある。

- ①硬質地盤においても、水平多軸回転カッターの性能をそのまま生かした高い掘削性能により、先行削孔等の補助工法が不要もしくは軽減できる。
- ②エアブローを併用した高速回転カッターによる攪拌のため高い攪拌性能を持つ。
- ③等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定できるため、設計の自由度が高い。
- ④壁体がパネル状に造成されるため、小さな円形立坑の施工が可能である。
- ⑤壁体のジョイントは、止水性の高いカッティングジョイントである。
- ⑥カッター部に内蔵した傾斜計やジャイロコンパスにより、リアルタイムでの掘削精度確認が可能である。
- ⑦大壁厚・大深度にも対応できるため、地盤改良機械としての汎用性がある。
- ⑧ NETIS 登録技術である (登録番号 KT-050014-A)。

現在、日本にはケリーバー方式と吊り下げ方式の本施工機が合計7台ある。日本にある本施工機の一覧表

表-1 CSM 機一覧表

種類	ケリーバー方式		吊り下げ方式	
	2カッター		クアトロカッター (4カッター)	タンデムカッター (2カッター)
機械姿写真				
開発年:日本導入年度	2004年	2004年	2006年(サイドカッター:2007年)	2013年
国内保有台数	1台	2台	3台(サイドカッター仕様:3台)	1台
カッター	型式	BCM3型	BCM5型	BCM5型
	トルク	0-30kN・m	0-45kN・m	0-45kN・m
ベース マシン	機械高	~35m程度	~35m程度	約6.5m(サイドカッター:約8.6m)
	機械長	10m程度	10m程度	8.0m程度
掘削深度(実績最大深度)	~35m(20m)	~35m(31m)	~65m(60m)	~65m(60m)
掘削壁厚	500~700mm	500~900mm	500~1,200mm	640~1200mm
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,400mm	2,800mm
施工実績(試験施工含む)	5件(海外22件)	9件(海外88件)	31件(海外1件)	1件(海外7件)

2012年3月現在 パワー工法研究会 CSM 委員会調べ

を表-1に示す。

3. 本施工機開発の経緯と変遷

日本における、原位置土攪拌混合ソイルセメント地中連続壁（以下、ソイルセメント壁）の施工機械は、オーガー攪拌方式のSMW機やチェーン攪拌方式のTRD機など、工法とセットで開発された機械が主流となっている（表-2）。B社（独）は、ソイルセメント壁の経済性に目を付け、安定液掘削による地中連続壁の施工機械で採用されていた水平多軸回転カッターを用いたソイルセメント壁の施工機械の開発に約10年前に着手した。

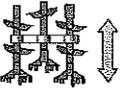
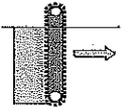
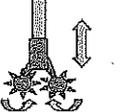
その結果2003年にケリーバー方式の本施工機が海

外においてB社（独）とS社（仏）の共同開発によって生まれた。そして、欧州における試験施工を踏まえて2004年に本工法の施工機械としてBCM3型がD社およびBCM5型がM社によって日本に導入された。なお、BCM3型とBCM5型の違いはカッタートルクの違いであるが、近年は5型が主流になっている。

(1) ケリーバー方式から吊り下げ方式への変遷

ケリーバー方式の機械で大深度施工を行うには、ケリーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けがたく、おのずと掘削深度に限界（35m程度）があった。そこで、B社（独）と日本のH社は、従来安定液掘削の範疇であった50mを超える大深度においても経済性・施工性・品質を満足するイルセメント壁が吊り下げ方式で、対応できないかを模索していた。最終的には試作機を作った方が早いという結論に到り、共同で従来の吊り下げ方式による地中連続壁の機械を参考に、国内にあった既存の地中連続壁掘削機の水平多軸回転カッター部（トレンチカッターBC30：H社所有）とB社（独）が新たにドイツで製作したフレーム部を組み合わせることでカッターフレームを組み立て、地中連続壁の低空頭用ベースマシン（CBC25）から吊り下げることにより、大深度・低空頭型本施工機（CBC25-BCM10型-本施工機）を造り上げた（写真-1）。表-3に、この機械の諸元を示す。

表-2 ソイルセメント壁造成工法の比較

工法 項目	SMW工法	TRD工法	本工法
掘削機 (イメージ)			
掘削機械の種類	多軸オーガ	カッターチェーン	水平多軸回転カッター
攪拌方向	水平	鉛直	鉛直
攪拌範囲	局所的 (上下動あり)	地表から壁底	局所的 (上下動+エアブローあり)
連続性	パネルの継ぎ合せ	連続造成	パネルの継ぎ合せ
壁の形状			

※TRD工法の掘削は連続造成増設のみ



写真-1 CBC25-BCM10型 CSM機

表-3 CBC25-BCM10型 CSM機 諸元

掘削深度 (m)	~ 65
掘削壁厚 (mm)	640 ~ 1,200
掘削幅 (mm)	2,800
カッターフレーム重量 (t)	18
カッターフレーム全長 (mm)	9,057
カッタートルク (kN・m)	0 ~ 80
カッター回転数 (rpm)	0 ~ 35
ベースマシン全装備重量 (t)	102
機械寸法 (m) 高さ×幅×奥行き	14.9 × 5.5 × 9.1

①吊り下げ方式の低空頭化

CBC25-BCM10型は空頭高さが約15m程度であり、三点式のSMW機に比べれば約半分ほどの高さであるが、高架下や路下での作業には難があった。また、工事の需要が少なかったため、試験施工1件、実施工1件のみで海外に流出してしまった。しかし、実施工においては玉石ばかりが厚く堆積した固い層においてソイルセメント壁の構築に成功しマシン能力の高さを示した。

その後、B社(独)は、BCM10型機の開発により日本における吊り下げ方式の本施工機の需要を確信し、機械高さ6.5m、施工深度65m、対応壁厚0.5~1.2mの大深度・低空頭型の非常にコンパクトなクアトロカッター機を開発した。日本ではこの機械をT社が導入した。クアトロカッター機は、写真のように回転カッターを4対を有しており、攪拌性能の向上やカッター引き上げ時の負荷低減を実現した(写真-2)。また、ベースマシンは専用機とし低空頭仕様とした。なお、クアトロとはイタリア語で数字の4を言い馬車の車輪という意味もある。これらをイメージし



写真-2 BCM5型本施工機(クアトロカッター)

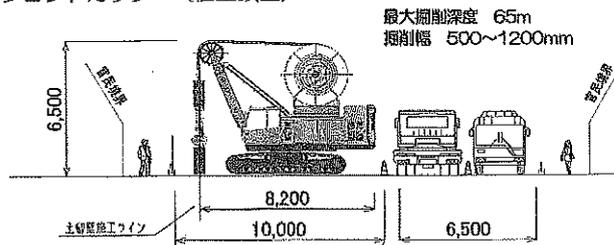
てクアトロカッターと命名された。

②クアトロカッターの狭隘地対応型への改造

クアトロカッターの施工性に着目したH社は、設計施工型の技術提案工事に採用することを決め施工時の通行車線数や歩道を考慮した機械のコンパクト化への改造に取り組んだ。道路上の作業帯の幅を6mと想定したが、クアトロカッターは、カッターからベースマシンの後部までおよそ8mあったため、B社(独)に狭隘地対応型への機械の改造を依頼し、共同でクアトロサイドカッターを開発した。

クアトロサイドカッターは、カッターをベースマシンのサイドに吊り下げられる構造にしたことによりカッター中心からキャタピラー端部までの幅を4.4mまで縮めることが可能となった(図-2)。カッターをベースマシンに対して前方のみで吊るタイプをフロントカッター、サイドでも吊れるタイプをサイドカッター

フロントカッター(低空頭型)



サイドカッター(狭隘地型)

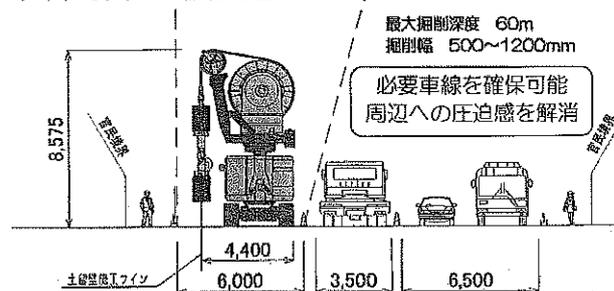


図-2 サイドカッターの適用例

表-4 BCM5型 本施工機 諸元

掘削深度 (m)	~ 65 (F) ~ 60 (S)
掘削壁厚 (mm)	500 ~ 1,200
掘削幅 (mm)	2,400
カッターフレーム重量 (t)	14.5
カッターフレーム全長 (mm)	5,160
カッタートルク (kN・m)	0 ~ 45
カッター回転数 (rpm)	0 ~ 40
ベースマシン全装備重量 (t)	~ 84 (F) ~ 87 (S)
機械寸法 (m)	6.5 × 3.3 × 8.0 (F) 高さ × 幅 × 奥行き
	8.5 × 4.4 × 8.0 (S)

ターと便宜上呼ぶことにした。これらは、パーツの組換えにより互換性がある機械となっている。表-4にクアトロカッターの諸元を示す。なお、表中の (F) はフロントカッター、(S) はサイドカッターを示す。

(2) サイドカッターの機械構造と工夫

フロントカッターからサイドカッターへの改造は、設計に約2ヶ月半、部品調達に約2ヶ月半、そして組立てに2ヶ月と7ヶ月を要した。構造的には、ベースマシンと一体となっていたホースドラムおよびカッター部を新しく製作した回転テーブル付きのポストの上に載せている。このため、高さが約8.5mとフロントカッターに比べ約2mほど高くなってしまったが、前述のとおりフロントカッターとサイドカッターはパーツの組み換えにより互換性があるので使用条件に

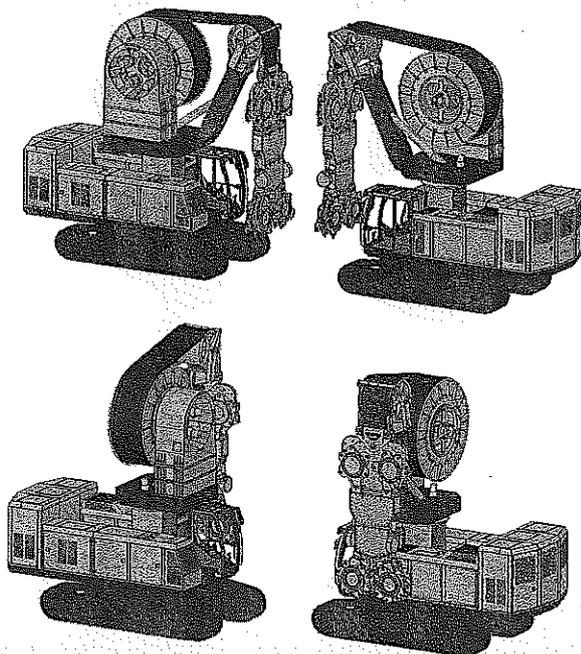


図-3 サイドカッターの動作図

応じて使い分けることができる。

具体的な改造のポイントは、図-3に示すとおり下部旋回台に加え上部旋回台を設置することにより、キャタピラー部、ベースマシン本体、カッター部がそれぞれ自由に旋回できるようにしたことである。

(3) 高トルク型タンデムカッターの誕生

クアトロカッターの実績が増えてくるにつれて、土丹層などの硬質地盤における掘削能率のアップが求められてきた。このため、B社(独)は高トルクを持つ開発当初の吊り下げタイプBCM10型の改造に着手し、クアトロカッターのベースマシンに取り付け可能な、姿勢制御装置を搭載したタンデムカッターを誕生させた(写真-3)。現在、日本に導入されているのは1台ではあるが、土丹層の掘削スピードを見る限りトルクアップは成功であった。

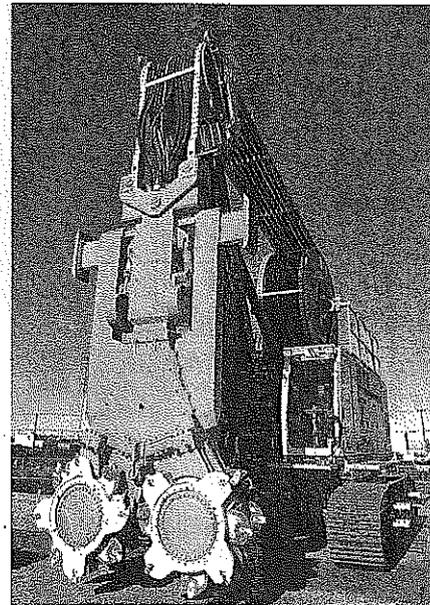


写真-3 タンデムカッター

4. 狭隘地・低空頭型機械としての施工への展開

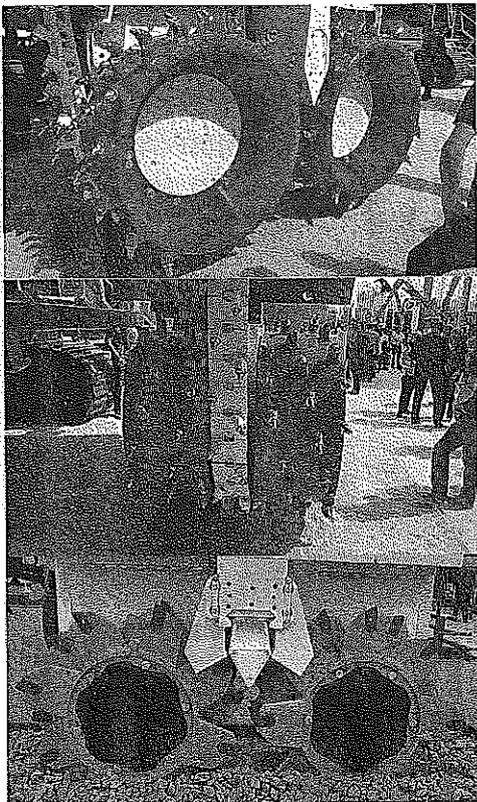
本工法の施工への展開は、東京地区や大阪地区において道路、鉄道、共同溝、地下通路、シールド立坑などにおける実績が増えており、設計に本施工機の使用が前提となっている工事も見受けられる。この背景には狭隘地施工や上空制限を受ける低空頭型施工と言った都市部独特の施工条件の厳しさがある。

パウアー工法研究会では、本工法の普及を図るために工法の技術積算資料の発刊やNETIS登録、東京都の新技術登録などを行ってきた。また、鋼製地中連続壁協会からは、鋼製地中連続壁工法-IIにおける積算

に本施工機を用いた場合の資料が発刊されている。

5. 地盤改良への適用

本施工機による地盤改良の実績は、鉄道に近接した重力式擁壁としての実績が1件あるが、格子状の改良による構造物基礎等の地盤改良にも適用可能である。また、掘削性能が高いことから固結した壁の切削が可能であるため、格子状の改良においても確実なジョイントを施工できる。このような地盤改良は、地震時の液状化対策としても有効である。さらに、全面改良する場合には矩形断面であるため、隙間無く効率的な施工が可能であり汚染土壌などの改良にも有効である。



写真一4 本施工機の類似カッター

6. おわりに

狭隘地・低空頭下を対象とした工事における建設機械の開発は、時間と費用が掛かるが、特殊条件下の工事が常にあるとは限らないのでなかなか採算が合わないものである。しかし、今回紹介したCSM機は、狭隘地・低空頭下の工事のみならず大深度、大壁厚のソイルセメント壁や地盤改良が施工できるため汎用性が広い機械であるので今後のさらなる普及が期待される。また、海外ではCSM機に類似した機械が開発されており、今年の4月にミュンヘンで開催された「BAUMA 2013」(建設機械の国際展示会)においては、写真一4に示すように水平多軸回転カッターを用いた類似工法の機械がいくつか出展されていた。BAUMAでは、他にも数多くの最先端の建設機械が展示、紹介されており建設現場の省力化、効率化に大いに寄与するものと感じられた。

JCMA

(参考文献)

- 1) 佐久間誠也、梅本慶三、パワー工法研究会：寄稿「大深度・低空頭型CSM工法の開発と試験施工」基礎工2006年5月号Vol.34, No.5 P89～92：総合土木研究所
- 2) 佐久間誠也他：「硬質地盤における新しいソイルセメント壁の造成工法」土木学会トンネル工学報告集Vol.16 2006年11月P433～438
- 3) 佐久間誠也/パワー工法研究会：報文「ケリーバー及び吊り下げ方式のCSM機と施工事例」基礎工2008年3月号Vol.36, No.3 P53～56：総合土木研究所
- 4) 原田啓伸・井上隆広・岩倉孝幸：狭隘地における大深度地下連続壁の施工—CSM工法クアトロカッター機の開発と品川線大橋連絡路工事への適用—土木施工 平成21年4月号
- 5) 佐久間誠也：各論「最近の土留め・板締切り工法の特徴と課題」基礎工2012年3月号Vol.40, No.3 P6～10：総合土木研究所

【筆者紹介】

佐久間 誠也 (さくま せいや)
 鶴安藤・間
 土木事業本部
 技術第一部長
 (パワー工法研究会 CSM 委員会委員長)



土木
技術

vol.69 No.11

2014
11

Civil Engineering for Life

特集・支える

世界中に橋を架ける
港町，横浜を歩く〈その1〉
三島の新たな魅力，発見
外国人土木女子としての鉄鋼企業の一年目



土留め技術の変遷

—山留柵から大深度・大壁厚の土留めまで—

さくま せいや
佐久間 誠也*



はじめに

土や水を支える土留めや締切りといった技術は、古来より多くの土地や空間を生み出してきた。日本におけるこれらの技術の歴史は古く、約2500年前の縄文・弥生時代までさかのぼることができると考えられる。その規模は小さいものの、水田や畦道を造るために土留めとして木杭や板杭が多用されており、その遺構が登呂遺跡や針江浜遺跡などで発掘されている。写真-1に古墳時代前期頃に作られた畦道の土留めを示す。また、石垣も土留め構造物(図-1)と捉えると多くの古墳、お堀、お城などにその技術と歴史が見られる。さらに、海外まで目を向ければ、世界四大文明等の古代文明における石積みや盛土を利用した治水、利水技術も土留め・締切り技術のルーツとなるものである。

土留め・締切り技術には、このように長い

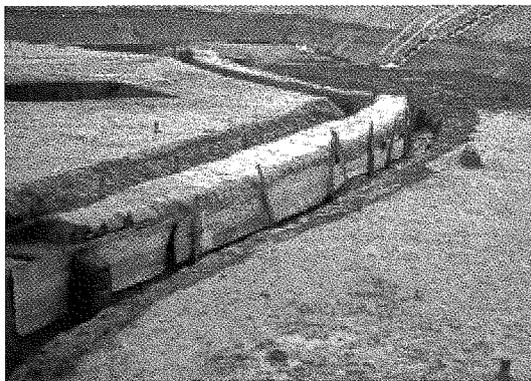


写真-1 遺跡から出土した畦道の土留め¹⁾

歴史がある。日本において掘削工事に伴う土木技術として、これらの技術が急速に発展してきたのは、地下構造物の構築が必要となってきた明治時代以降である。特に発展を遂げたのは戦後の復興期からその後の高度成長期にかけてであろう。また、高度成長期の後は、コストダウン・工期短縮に着目した技術や大深度に適応できる新技術・新工法の開発が進み現在に至っている。本稿では、「支える」というテーマに沿って、明治時代から現在までの土留め技術の発展について振り返ってみたい。ただし、水のみを支える締切りについては、地下水を持つ地山に対する土留め技術と同様と考え特に区別しない。また、単に土木と建築の慣習の違いだけなので、土留めは山止めまたは山留めと読み替えても構わないものとする。

1. 明治・大正時代

明治の初頭までは、図-2に示すような山

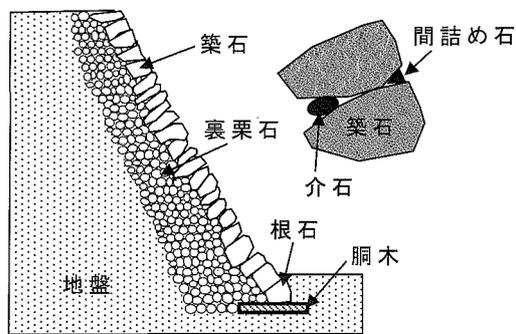


図-1 石垣の内部構造²⁾

*安藤ハザマ 土木事業本部 副本部長

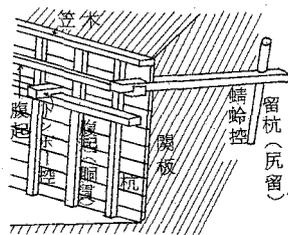


図-2 山留柵^{3) 4)}

留柵と呼ばれる構造が掘削工事において用いられていた。それを記録した図書によると、山留めとは「根切脇、若クハ土手等ノ崩壊ヲ防グタメニ設ケタル柵ヲイフ。杭、関板、腹起、蟻蛉控ナドヨリ成ル。山留めしがらみトモイフ」と書かれている。設計・施工面では、この当時は設計手法も確立されておらず、経験的な判断で安全を考慮しながら施工されていたものと思われる。一方、海外では擁壁や土留めの設計についての基礎となる土圧理論が17世紀に考えられ始め、クーロンの土圧論として実用の域に達していた。また、ランキンの土圧論が発表されたのは、明治時代に入る約10年前（1856年）のことであった。

明治時代になってからは、徐々に土木・建築ともにヨーロッパの技術者が日本に招かれ始め、多くの建設・建築技術が紹介される様になった。しかし、土留め技術に関しては、現在のように地下深く掘削するような建築様式や土木構造物ではなかったので、大規模な土留め技術はまだ不要であった。

土留め工事を伴った建築構造物で当時としては規模の大きなものの一つに、明治29年（1896年）に完成した日本銀行がある。掘削深さは、6 m程度であり同規模の建物の基礎工事の資料から判断すると、木製の簡単な土留めが用いられていた様である。

その頃、欧米では、鋼材が使われ始めており、土留めに関してもさまざまな工夫が行われていた。現在のような鋼矢板の専用断面が圧延されるまで1890年代の欧米各国においては、図-3に示すようなI型断面や溝型断面の鋼材を組み合わせたものが使われていた。

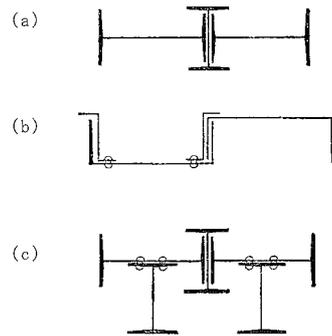


図-3 初期の鉄矢板の断面の例⁵⁾

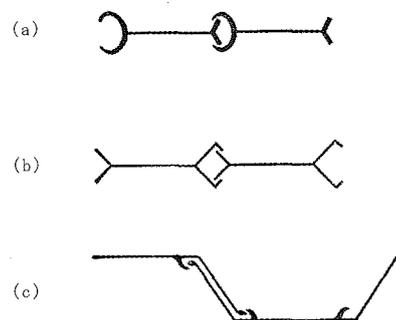


図-4 20世紀当初の鋼矢板の断面の例⁵⁾

見るからに不経済な断面の組み合わせであることが分かる。

その後、1900年前後になって図-4のような鋼矢板が圧延製造されたという記録がある。日本において鋼矢板がいつ頃から使われ始めたかは定かではないが、明治35年（1902年）竣工の三井本館の土留め工事に鋼矢板が使われたという記録が中村達太郎著の日本建築辞彙にある。

大正時代に入ると、打撃式の杭打ち機が日本に導入されており、その後の土留め工法の変遷に大きく影響を与えたものと考えられる。しかし、この時代には長さ15m程度の長尺な米松杭が輸入されていたが土留め支保工用材料として利用されてはいるものの、土留め壁の主部材として適用されたという記録はなく、土留め工に技術的な発展はほとんど見られなかった。

2. 昭和時代

2.1 昭和初期から戦争終了まで

昭和の初期には、大正12年（1923年）に起きた関東大震災の復旧工事のために、港湾や河川整備に鋼矢板が護岸工などの土留め部材として大量に使われた。この時期は、世界各国の製鉄会社が鋼矢板の生産量を高め輸出を増やし始めた時期と同じである。また、開削土留め工事による東京地下鉄道の浅草～上野間（現在の銀座線）が開業したのも昭和2年（1927年）の事である。図-5にこの計画の概要を表すイラストを示す。

この工事の調査及び設計では、ドイツ人技師のルードル・プリスケを技術顧問に迎え技術指導を受けていた。掘削深さは、10mほどであり土留めは、I形鋼による親杭横矢板工法がすでに用いられていた(写真-2)。また、路面覆工は、I形鋼を覆工桁に用い桁間に木材を渡して作っていた(写真-3)。

関東大震災の復旧工事にも多く使われた鋼矢板の輸入量は、昭和2年度から昭和5年度までに2万t台から3万t台まで増加したが、昭和初期の大不況に入った昭和6年度には9,000tに激減した。鋼矢板の国産化については、官営八幡製鉄所が昭和4年（1929年）から開発を始め昭和6年（1931年）には現在の鋼矢板に似た部材を約2,500t販売している。

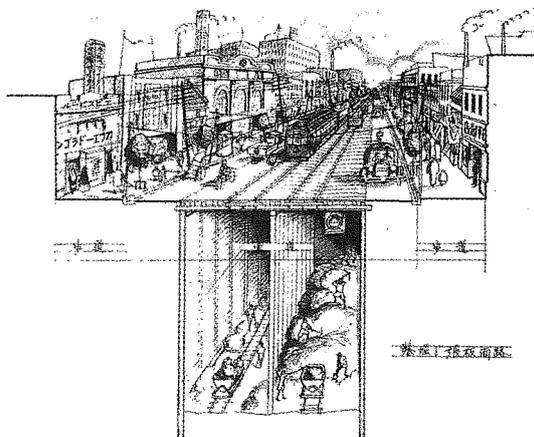


図-5 銀座線施工計画の概要⁷⁾

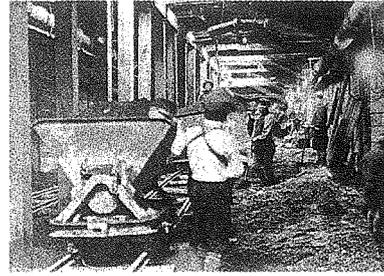


写真-2 親杭横矢板土留めによる掘削⁷⁾



写真-3 路面覆工の施工状況⁷⁾

海外からの輸入はこれを機にほとんどなくなったそうである。

当時は、すでに鋼矢板やI形鋼の普及は始まっていたものの、土木・建築とも市街地の開削工事においては、まだまだ木製土留めが主流であった。しかし、掘削深さが地下2階となる一部の工事でスチームハンマーによって打ち込まれた鋼矢板（当時は鉄矢板と呼ばれていた）を土留め壁とした工法が用いられ始めたのもこの頃である。国産の高価な鋼矢板が初めて使われたであろうと言われている市街地の土留め工事は、昭和9年（1934年）に着工された三菱銀行本店増築工事である。ここでは、15mの鋼矢板が打ち殺し（埋め殺し）として使われた記録がある。当時の地下掘削工法は、人力によるところが多かったが、現在の開削土留め工法に見られる切梁・腹起し形式が確立していた。また、土留め工法以外の土や水を支える工法であるニューマチックケーソンが建築の基礎工事に初めて用いられたのもこの頃で、昭和7年（1932年）に大阪の伊藤万ビルで施工されている。その他、木田式深礎工法が新工法として採用されたのもこの頃である。そして、昭和10年頃には現在のプレキャスト部材の先駆となる鉄筋コン

クリート矢板が市販されるようになった。鉄筋コンクリート矢板は、主に岸壁の築造や河川の護岸工事に用いられており市街地の土留めとしての利用は重量が重く施工性に難があったので普及しなかった。

第二次世界大戦（昭和14年～昭和20年）に入ると、大きな土木・建築工事は軍の仕事以外にほとんどなく、土留め工法の更なる進展は見られなかった。ただし、土質調査や土質力学に対する研究が進み、土や基礎に関する図書がこの頃多く発刊されている。

2.2 戦後の復興期から高度成長期へ

敗戦後の復興期は、昭和30年頃まで続いたが、国土の復興に忙しく、基礎技術を戦前の技術水準まで戻すのが精一杯であった。一方、この時期には将来の技術開発の基礎となる土や基礎に関する研究がさらに進み、海外からも技術や建設機械に関する情報が多く入るようになった。昭和30年代に入ってから、経済復興に沿って鉄鋼業が急成長を遂げている。鋼矢板の生産量で見ると昭和31年（1956年）から昭和36年（1961年）の5年間に3万tから30万tと10倍になっている。現在の鋼矢板の継ぎ手形状を持つ部材ができたのもこの頃である。

また、その後の土留め工法の新しい技術に繋がるソイルセメント杭工法の普及が始まったのも同時期である。ソイルセメント杭は、アースオーガーまたは類似の機械で地盤を削孔する際にオーガー等の先端からセメントミルクなどの固化材を注入しながら、掘削土と原位置で攪拌してソイルセメント杭を造成する工法である。この工法は、昭和29年（1954年）にアメリカ合衆国オハイオ州のリーターチロ氏により発明され、同年日本においてもその特許権が認められ普及が始まった。昭和40年（1965年）には、この技術を応用してソイルセメント杭をオーバーラップさせて施工し、その杭の中に応力材として鋼材を挿入す

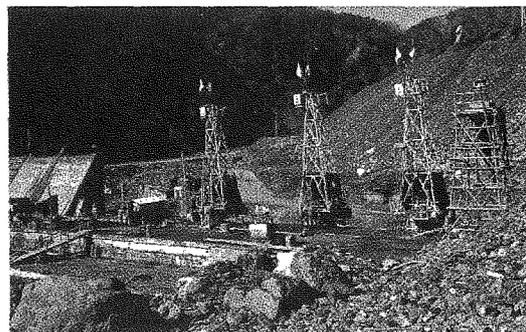


写真-4 畑薙ダム河床部止水工事⁸⁾

る工法が生み出され、現在の柱列式ソイルセメント土留め壁に至っている。

さらに、安定液掘削による地中連続壁工法が日本に導入されたのも昭和30年代である。地中連続壁工法は、ヨーロッパが発祥であり、日本にはその工法の一つであるイコス工法が昭和34年（1959年）に導入されダムの遮水壁として採用された（写真-4）。

この工法は、高度成長時代の大規模な土木・建築工事に多用され大深度、大壁厚の土留め壁として様々なビッグプロジェクトに用いられている。

戦後の土木工事において土留め工法が多用されたのは、何と言っても地下鉄工事である。東京の地下鉄工事を例に土留め工法の変遷を追ってみたい。戦後の地下鉄工事は、東京の丸の内線から始まった。丸の内線の工事は、昭和20年代の後半から昭和30年代前半まで続き、土留めの標準工法はI形鋼を打ち込んだ親杭横矢板工法が採用されていたが、軟弱地盤に置いては鋼矢板工法が用いられた。さらに、特殊工法として、前述のイコス工法がRC（鉄筋コンクリート）地中連続壁の構築に早くも試験的に用いられている。また、初期の頃は、支保工部材に生松丸太が使われていたが徐々に木製尺角材に変わっていった。

昭和30年代後半から40年代前半は、日比谷線、東西線の建設が行われた。土留め工法は、丸の内線と同様であったが、後半はI形鋼に代わってH形鋼をせん孔・建込み方式によって施工するようになった。支保工部材も木製

尺角材から切梁にH形鋼，腹起しにI形鋼が用いられるようになり，軟弱地盤において切梁プレロード工法が初めて使われたのもこの頃である。

昭和40年代に入ると千代田線，有楽町線の建設が始まり，新しい工法として柱列式地下連続壁（PIP工法）やRC地中連続壁が採用され始めた。切梁・腹起しはH形鋼に統一され，軟弱地盤においては切梁プレロード工法が標準化されると同時に支保工としてPCアンカー工法も施工されている。

昭和50年以降になると徐々に掘削深さが深くなる路線が多くなり，大規模掘削や用地の制約に対応できるように鋼材の大型化や機械類の輸入・開発が進み，SMWなどのソイルセメント壁，泥水固化壁およびRC地中連続壁の適用が多くなって来る。また，土留めの歯抜け部の処理に適用できる薬液注入工法や高圧噴射攪拌工法など，多くの地盤改良工法が改良・開発されてきたのもこの頃である。土留め工法は，非常に多岐に渡り工法名を挙げていくとつきりがないので，分りやすく分類したものを表-1に示す。

地下鉄工事の土留め工法の変遷を例に話を進めてきたが，道路トンネル，上下水道施設，エネルギー施設，諸立坑など多くの開削工事においても，昭和40年以降平成元年頃まで設計・施工の応用技術開発から発展期を迎えている。ソイルセメント系，プレキャスト系などの新工法の開発・展開とRC地中連続壁の大壁厚化，大深度化が進展したのもこの頃である。

3. 平成時代

平成に入ってから，土留め技術の成熟期となり平成10年頃までは，様々なプロジェクトが進行する中で施工条件に最適な工法が選定され工事に貢献してきた。大規模なRC地中連続壁の施工件数を見ても平成7年（1995年）から平成11年（1999年）の5年間で最も多い（図-6）。それ以降は，日本経済の失速と共に大型の公共工事が激減し，民間の投資意欲も萎えてしまったため各種土留め工法の実績も減少傾向をたどるようになった。また，地中連続壁の掘削機械の海外流出も平成17年頃から顕著になり始めた。

技術的な実績としては，鋼材系で，ハット型鋼矢板900（平成17年製造・販売開始）や連結鋼管矢板（平成17年研究会設立）などが，品質向上，コストダウンおよび省力化を目指して生まれた。また，ソイルセメント系の原

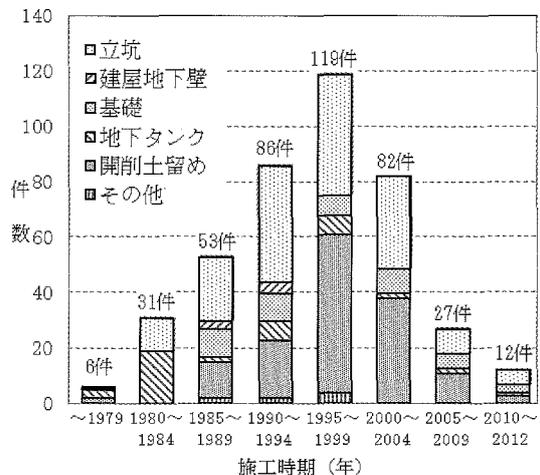


図-6 RC地中連続壁の施工件数の推移⁸⁾

表-1 土留め工法の分類⁹⁾

分類	ソイルセメント系 (原位置土混合攪拌)	プレキャスト系	場所打ち系	鋼材系
主な 施工法	SMW工法・TRD工法 ・CSM工法	PC-壁体工法 H型PC杭工法	鉄筋コンクリート地中連続壁工法 鋼製地中連続壁工法-I	鋼矢板工法 鋼管矢板工法
概要図 (平面形)	 	 	 	

位置土混合攪拌工法では、等壁厚のソイルセメント壁の構築ができるTRD工法（平成7年工法協会設立）やCSM工法（平成16年ドイツのパウアーマシーネン社より導入）が生まれ、設計の自由度が増すと同時に深度65m、壁厚1.2mの施工が可能となった。最近では、環境面に配慮して気泡掘削工法を従来のソイルセメント壁工法に応用し、排泥量を低減する新しい工法も誕生している。さらに、RC地中連続壁では、外郭放水路の第三立坑で最大深度140m（平成5年頃）、再開発ビルの基礎で最大壁厚3m（平成23年頃）の実績を残している。そして、昭和の終わり頃に開発された場所打ち系土留めの一つである鋼製地中連続壁も平成12年（2000年）にはソイルセメント鋼製地中連続壁を新しく開発し、省スペース・薄壁化に寄与するようになった。また、実績は少ないがプレキャスト系のPC壁体も平成23年（2011年）には技術審査証明を受け、打込み方式やソイルセメント壁への建込み方式などの施工法の開発を進め適用範囲を広げている。

このように、工事が減少していく中でも施工の効率化やコストダウンを目指して技術開発を継続した工法は発展を遂げてきた。また、土留め工法に関する計測技術や設計・解析手法の研究も進んでおり、各種土留めの本体利用や三次元的な解析による設計の安全性の検証なども十分実用化の域に入ってきている。

おわりに

「支える」というテーマから土や水を支える土留め技術について変遷を述べてきたが、数ある工法に共通の課題は、厳しい施工条件下における品質確保、コストダウン、工期短縮である。さらに、環境面からは施工機械や材料に関するCO₂削減も重要な開発要件と

なっており、単純に効率やコストダウンを追いかければ良いわけではなく、将来も見据えて多面的に物事を考えていく必要がある。最近になって東京オリンピックの誘致も決まり、大型のプロジェクトが具体的に動き出し始め、建設業界も明るさを取り戻しつつあるが、技術の伝承が途切れだした工法もあるため、早急に技術の棚卸しが必要ではないだろうか。土や水を支えるという技術は、文中でも少し述べたケーソンや深礎に類するものや山岳トンネル、シールドトンネル、推進、沈埋、ダム、堰など多岐に渡る。それぞれの技術に歴史があり、厳しい施工条件に対してより良い品質、経済的な工法をめざして開発・展開が図られてきた。しかしながら、これから急速に進む職人、熟練工、技術者不足に備えては、大胆な機械化を含む生産性の向上や新技術の開発が必要と考える。

参考文献

- 1) 公益法人滋賀県文化財保護協会、滋賀県教育委員会：あの遺跡は今！ Part18, 「木製品に見る古代の知恵と技術」木, p11下段写真（針江浜遺跡）, 平成26年2月16日
- 2) 笠 博義, 山本 浩之：城郭石垣の維持管理と補修, p17図-1, 地盤工学会誌 第59巻 第9号 (2011)
- 3) 橋本良介：土留め工法の歴史, p3図-1, 日本建築学会近畿支部, 土留工事の諸問題, 1969.11
- 4) 中村達太郎：日本建築辞彙, 丸善出版
- 5) 石黒 健, 白石 基雄, 海輪 博之：p5図-1.7, 図-1.8, 鋼矢板工法（上）, 三海堂
- 6) 渡邊 健：開削工法における土留技術および解析技術の変遷, 土木学会論文集, 第349号/VI-1, 1984年9月
- 7) 小林将志：土木いまむかし, 東京地下鉄ものがたり(3), p26図-2, p28写真③②, 土木技士会, 第13号, 東京土木施工管理技士会, 1999年12月25日
- 8) 地中連続壁基礎協会, 佐久間 誠也：鉄筋コンクリート地中連続壁の本体利用の変遷, p22写真-1, p24図-4, 基礎工, 2013, Vol.41, No.6
- 9) 佐久間 誠也：最近の土留め・仮締切り工法の特徴と課題, 基礎工, 2012, Vol.40, No.3

位置土混合攪拌工法では、等壁厚のソイルセメント壁の構築ができるTRD工法（平成7年工法協会設立）やCSM工法（平成16年ドイツのパウアーマシーネン社より導入）が生まれ、設計の自由度が増すと同時に深度65m、壁厚1.2mの施工が可能となった。最近では、環境面に配慮して気泡掘削工法を従来のソイルセメント壁工法に応用し、排泥量を低減する新しい工法も誕生している。さらに、RC地中連続壁では、外郭放水路の第三立坑で最大深度140m（平成5年頃）、再開発ビルの基礎で最大壁厚3m（平成23年頃）の実績を残している。そして、昭和の終わり頃に開発された場所打ち系土留めの一つである鋼製地中連続壁も平成12年（2000年）にはソイルセメント鋼製地中連続壁を新しく開発し、省スペース・薄壁化に寄与するようになった。また、実績は少ないがプレキャスト系のPC壁体も平成23年（2011年）には技術審査証明を受け、打込み方式やソイルセメント壁への建込み方式などの施工法の開発を進め適用範囲を広げている。

このように、工事が減少していく中でも施工の効率化やコストダウンを目指して技術開発を継続した工法は発展を遂げてきた。また、土留め工法に関する計測技術や設計・解析手法の研究も進んでおり、各種土留めの本体利用や三次元的な解析による設計の安全性の検証なども十分実用化の域に入ってきている。

おわりに

「支える」というテーマから土や水を支える土留め技術について変遷を述べてきたが、数ある工法に共通の課題は、厳しい施工条件下における品質確保、コストダウン、工期短縮である。さらに、環境面からは施工機械や材料に関するCO₂削減も重要な開発要件と

なっており、単純に効率やコストダウンを追いかければ良いわけではなく、将来も見据えて多面的に物事を考えていく必要がある。最近になって東京オリンピックの誘致も決まり、大型のプロジェクトが具体的に動き出し始め、建設業界も明るさを取り戻しつつあるが、技術の伝承が途切れだした工法もあるため、早急に技術の棚卸しが必要ではないだろうか。土や水を支えるという技術は、文中でも少し述べたケーソンや深礎に類するものや山岳トンネル、シールドトンネル、推進、沈埋、ダム、堰など多岐に渡る。それぞれの技術に歴史があり、厳しい施工条件に対してより良い品質、経済的な工法をめざして開発・展開が図られてきた。しかしながら、これから急速に進む職人、熟練工、技術者不足に備えては、大胆な機械化を含む生産性の向上や新技術の開発が必要と考える。

参考文献

- 1) 公益法人滋賀県文化財保護協会、滋賀県教育委員会：あの遺跡は今！Part18、「木製品に見る古代の知恵と技術」木、p11下段写真（針江浜遺跡）、平成26年2月16日
- 2) 笠 博義、山本 浩之：城郭石垣の維持管理と補修、p17図-1、地盤工学会誌 第59巻 第9号（2011）
- 3) 橋本良介：土留め工法の歴史、p3図-1、日本建築学会近畿支部、土留め工事の諸問題、1969.11
- 4) 中村達太郎：日本建築辞彙、丸善出版
- 5) 石黒 健、白石 基雄、海輪 博之：p5図-1.7、図-1.8、鋼矢板工法（上）、三海堂
- 6) 渡邊 健：開削工法における土留技術および解析技術の変遷、土木学会論文集、第349号/VI-1、1984年9月
- 7) 小林将志：土木いまむかし、東京地下鉄ものがたり(3)、p26図-2、p28写真③②、土木技士会、第13号、東京土木施工管理技士会、1999年12月25日
- 8) 地中連続壁基礎協会、佐久間 誠也：鉄筋コンクリート地中連続壁の本体利用の変遷、p22写真-1、p24図-4、基礎工、2013、Vol.41、No.6
- 9) 佐久間 誠也：最近の土留め・仮締切り工法の特徴と課題、基礎工、2012、Vol.40、No.3

気泡掘削ソイルセメント地中連続壁(AWARD-Hsm 工法)の施工品質について

地中連続壁、気泡掘削工法、一軸圧縮強さ

安藤ハザマ：○三反畑勇,佐久間誠也,増田浩二
 マグマ：近藤義正,上原精治
 太洋基礎工業：俵 豊光、青山機工：一瀬 猛

1. はじめに

気泡掘削工法は、気泡のベアリング効果により少量の加水でも流動性を確保できるため、固化材スラリーの水固材比(W/C)が低減でき、使用する固化材量および余剰汚泥量の低減に効果がある。AWARD-Hsm 工法は水平多軸回転カッター (horizontal multishaft rotating type cutter) を使用して気泡掘削により等厚式のソイルセメント地中連続壁を造成する工法である。本報告では、本工法を実工事(開削道路トンネルの土留壁)に適用した事例について、施工手順と施工管理、事前の室内配合試験と施工後の品質確認試験結果(一軸圧縮強度)などについて報告する。

2. 施工概要

AWARD-Hsm 工法の標準的な施工手順を図1に示す。今回の現場は図2のように、大深度(深さ54.5m)かつ硬質地盤で芯材継手も多く、施工時間がかかる。そこで、施工中のセメント硬化によるトラブルを避けるため、掘削工程と造成・芯材建込み工程を分けた2サイクル施工方式とした。掘削は、水平多軸回転カッター掘削機の先端部から掘削液(気泡+水)を吐出して掘削土と混合攪拌し、気泡安定液として溝壁を保持しながら行う(写真1, 写真2)。造成工では、消泡剤を添加した固化液を気泡安定液と混合攪拌してソイルセメント壁を造成し、造成完了後に芯材を建込む。気泡は消泡剤により破泡して地上に排出される。

今回の壁厚は0.9mでエレメント幅は2.4mである(図3)。ソイルセメント壁体の必要強度は500kN/m²で、室内配合試験により掘削液および固化液の基本配合を事前に設定した。そして、実施工では施工状況に応じて掘削液の気泡添加量などを調整しながら適切な配合を選定した。

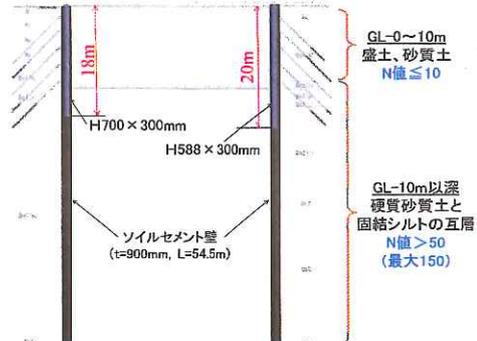


図2 山留壁と地盤の概要(断面図)



写真1 掘削機

写真2 掘削液(気泡+水)の吐出

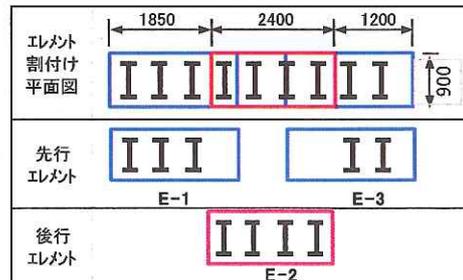


図3 標準的な施工順序(エレメント割付、平面図)

1. 掘削機据付 (掘削開始 掘削液(水+気泡)注入)
2. 掘削・攪拌 (掘削液(水+気泡)注入)
3. 掘削・攪拌完了 (掘削液(水+気泡)注入)
4. カッター引上完了 (掘削液から固化液及び消泡剤に切替)
5. 造成攪拌 (固化液及び消泡剤注入)
6. 引上攪拌 (掘削液及び消泡剤注入)
7. 造成完了
8. 芯材建込み

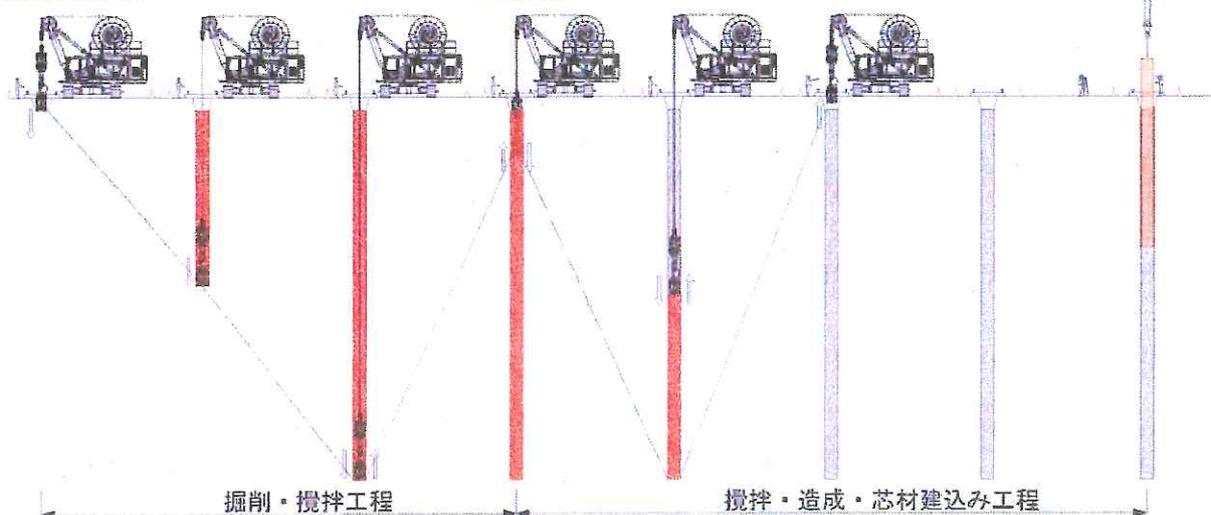


図1 AWARD-Hsm 工法の施工手順(2サイクル方式)¹⁾

3. 室内配合試験

現場の2か所からボーリング採取した土を用いて、表1に示す12種類の配合試験を行った。試料土にまず掘削液(気泡+水)を加え十分に攪拌混合して気泡安定液を作り、流動性をテーブルフロー試験で確認する。次に消泡剤を添加した固化液(セメントスラリー)を加え、さらに攪拌混合し、消泡後に一軸圧縮試験用の供試体(φ5cm×10cm)を作製して28日強度を確認する。なお、既往の研究成果などから気泡剤の添加量は0.5%とした(表1の備考欄参照)。また、気泡安定液のテーブルフロー値(TF)≥150mmを基準に、一軸圧縮強度が設計強度の2倍(1000kN/m²)以上になると想定される配合を基本配合として選定した。

図4、図5に試験結果を、表2に基本配合案を示す。

4. 施工結果

まず、本体壁とは少し離れた位置で試験施工を1エレメント実施し、基本配合案による施工性などを確認してから本施工に着手した。本施工では、図6に示すように硬質な砂質地盤のため掘削に2日間、造成・芯材建込みを含め1エレメント3日間というサイクルタイムであった。掘削に時間を要したのと砂礫層での逸水対策などのために、掘削液や固化液の使用量が想定よりも増加し、気泡添加量は基本設計(170ℓ/m³)の約2倍となった。施工管理記録から算出した固化材量(ソイルセメント壁に残留したと考えられる固化材の量)は、エレメント毎にばらつきはあるが、概ね180kg/m³程度であった。

図6の右端グラフには、ソイルセメント壁体の一軸圧縮試験結果を示す。土留壁内側の掘削工事中にブロックサンプリングした試料は(材齢28日を超過しているが)いずれも目標強度($qu_{28} \geq 500 \text{ kN/m}^2$)を大きく上回った。なお、基本配合案(表2)に準じて試験施工したソイルセメント(施工中にウェットアンプリングしたモールド試料)の圧縮強度は7日で480kN/m²と、室内配合試験結果(28日)の約半分であったが、材齢による強度増加を考慮すれば、前記の目標強度を充分クリアできる施工品質であった。

5. おわりに

本工事ではAWARD-Hsm工法によって18エレメント(壁面積1,480m²)の施工を無事に完了し、掘り出した土留壁のソイルセメントの一軸圧縮試験結果からも良好な品質が確認できた。また、排泥量は、気泡を使用しない従来工法に比べ1割程度削減することができた。

本工法は水平多軸掘削機の利点を活かし大深度(最大65m)、大壁厚(1.2m)にも対応でき、低空頭下で狭隘なヤードでも施工が可能である。今後は各種地盤条件への適用性も見極めながらさらなる展開を図りたい。

参考文献

- 1) 気泡工法研究会：AWARD-Hsm工法 技術・積算マニュアル(案)
- 2) 近藤義正ほか：掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用，土木学会論文集C，Vol.64，No.3，p.505-，2008.7.

表1 室内配合試験表(土2×加水量2×固化材量3=12配合)

土試料の種類	配合試験ケース名	掘削液		固化液				
		気泡添加量(ℓ/m ³)	加水量(ℓ/m ³)	固化材量 [3ケース](kg/m ³)		W/C (%)	消泡剤量(ℓ/m ³)	
砂A	砂A水50	170	50	100	150	200	80	7
	砂A水100	170	100	100	150	200	80	7
砂B	砂B水50	170	50	100	150	200	80	7
	砂B水100	170	100	100	150	200	80	7

(備考) 気泡添加量=土の乾燥重量(1m³当たり)×気泡剤の添加率(0.5%)×起泡倍率(25倍)
=1360kg/m³×0.005×25ℓ/kg≒170ℓ/m³
消泡剤量=気泡剤量=土の乾燥重量(1m³当たり)×起泡剤の添加率(0.5%)≒7ℓ/m³

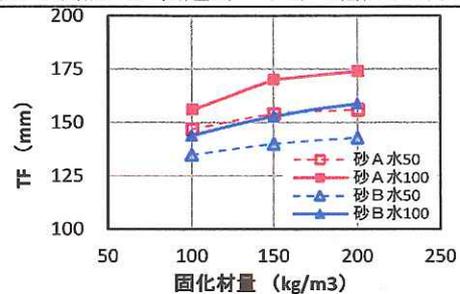


図4 室内配合試験結果(固化材量とテーブルフローの関係)

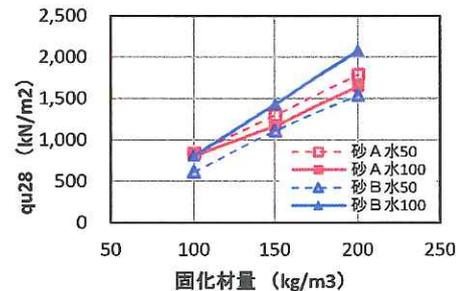


図5 室内配合試験結果(固化材量と一軸圧縮強さの関係)

表2 室内配合試験に基づく掘削液、固化液の基本配合案

気泡剤の添加率	掘削液		固化液		
	気泡添加量(ℓ/m ³)	加水量(ℓ/m ³)	固化材量(kg/m ³)	水固化材比 W/C (%)	消泡剤量(ℓ/m ³)
0.5%	170	90	150	80	7

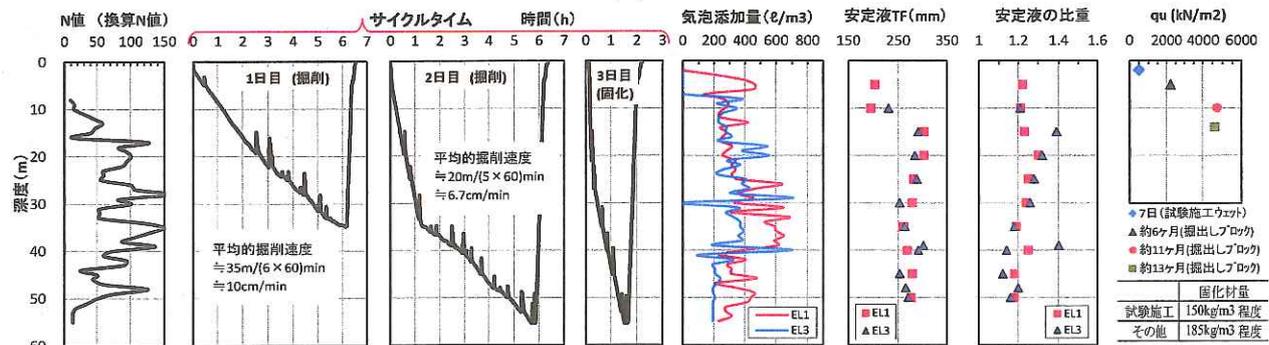


図6 地盤概要と代表的な施工結果

AWARD-Demi工法及びAWARD-Hsm工法の概要

安藤ハザマ 土木事業本部 佐久間誠也

アブストラクト：気泡工法研究会で開発された気泡を用いた工法の内、地盤改良工法であるAWARD-Demi（アワード・デミ）工法についてはその概要を、また、ソイルセメント土留め壁建造工法であるAWARD-Hsm（アワード・エイチエスエム）工法については、大規模な開削トンネルの土留め壁に部分的に適用した事例をもとに、工法原理と施工方法及び施工品質について紹介する。

キーワード：気泡掘削、地盤改良工法、地中連続壁工法、ソイルセメント、排泥量低減

1. はじめに

（一社）気泡工法研究会で開発された気泡掘削¹⁾²⁾³⁾を伴う工法には、地盤改良に応用したAWARD-Demi工法、ソイルセメント土留め壁の造成に応用したAWARD-Ccw、AWARD-Trend、AWARD-Hsm工法の4つがある。いずれも基本的な工法原理は同じで施工品質の向上や施工費の低減を実現できるものであり、排泥量も減らすことができるので環境に優しい工法であるとも言える。本文においては、これらの工法の内、弊社が開発メンバーとなったAWARD-Demi工法の概要とAWARD-Hsm工法の実施工についてそれぞれ紹介する。

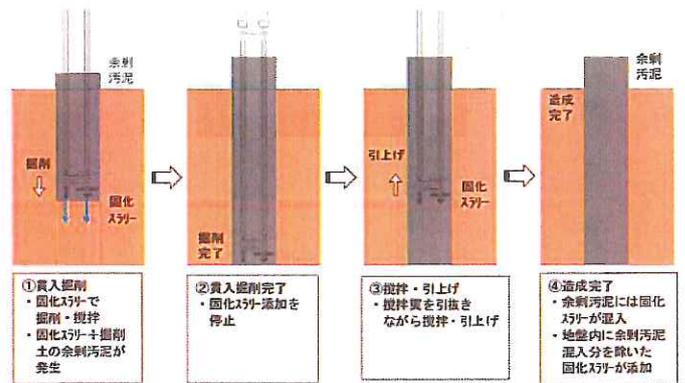


図-2.1 従来の地盤改良工法の施工手順⁴⁾

2. AWARD-Demi工法の概要⁴⁾⁵⁾⁶⁾

2.1 AWARD-Demi工法とは

AWARD-Demi (Deep-mixing)工法は、気泡掘削工法を地盤改良工法に適用したもので、まず、気泡を吐出しながら地山へのオーガー貫入掘削を行い、掘削土と気泡の混合土を造成する。次に、気泡のベアリング効果により攪拌混合性が向上した地山（気泡混合土）に、引抜時に改良材（消泡剤を添加したセメントスラリー）を添加・攪拌し、気泡を消泡しながら気泡混合土とセメントスラリーとの混練りを行い改良体を造成するものである（図-2.1、2.2 参照）。

気泡の添加により加水量を低減できるため、排泥土量を抑制できるほか、添加したセメントスラリーが余剰汚泥の一部として流出しないので、セメント量を削減することができる環境配慮型のコストパフォーマンスに優れた地盤改良工法でもある。

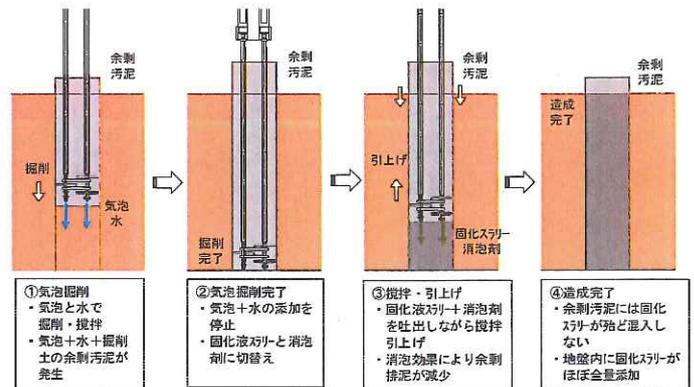


図-2.2 AWARD-Demi工法の施工手順⁴⁾

2.2 AWARD-Demi工法の特徴

2.2.1 環境負荷に対する特徴

(1) 排泥土量と固化材使用量

気泡混合土は、①高い流動性による加水量の低減、②高い強度発現性による固化材添加量の低減、③高い混練性によるW/C比の低減などによりセメントミルク注入量を削減できる。また、攪拌翼の引抜時に消泡剤を添加

したセメントミルクを注入して気泡を消すため、気泡混合による排泥土量の増加は僅かであり、初期の試験施工の結果によると図-2.3に示すように従来工法に対して排泥土量が約30%削減できた。また、実施工の前に実施した2回目の試験施工では約50%の削減が見られている(参考文献 7), 8), 9), 10)参照)。

加によるW/C低減効果) したが従来工法と同等以上の改良強度を確保できた。

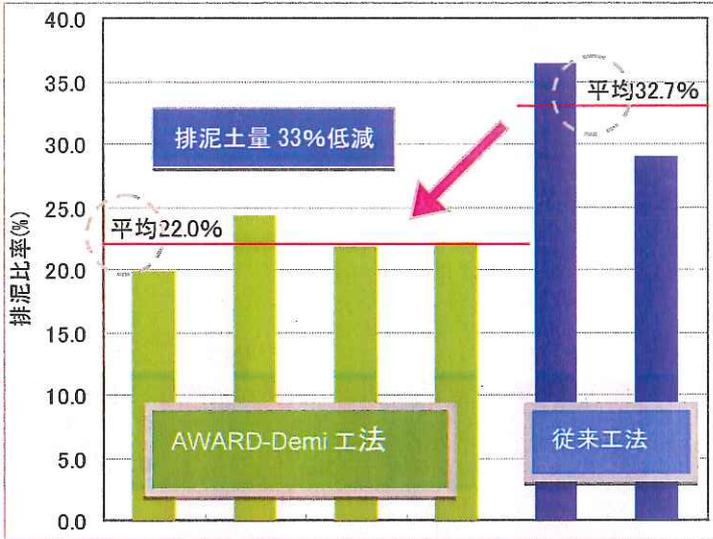


図-2.3 試験施工による排泥土量の比較⁶⁾



写真 2.1 気泡¹³⁾

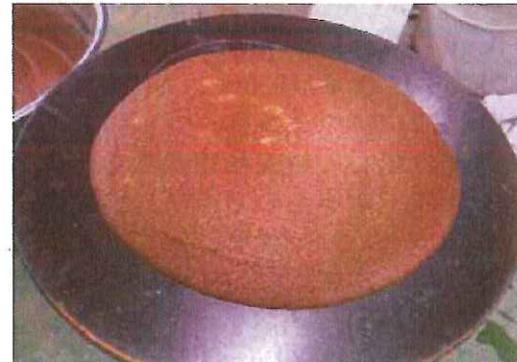


写真 2.2 気泡混合土¹³⁾

(2) 地下水への影響

気泡混合土は、地中への逸泥が少なく、また使用する気泡剤および消泡剤は地下水環境に対し安全性が高い材料が用いられている。

(3) 排泥土の再利用

排泥土は、膨潤作用のあるベントナイトのような細粒分を添加していないため、地山土の状態に復元しやすく、処理・再利用が容易である。

(4) CO²の排出量

気泡工法は、排泥土量低減による搬出車両台数の減少、固化材使用量の低減により間接的に工事全体のCO²排出量が削減できる。

(5) 大深度掘削

気泡混合土が非硬化性のため、長時間の掘削を要する大深度の地盤改良に対しても有効である。

2.2.2 施工品質

気泡混合土は、高い流動性により掘削土と固化材の混合攪拌性が向上し、所要の強度を満足する均質なソイルセメント改良体が造成できる。試験施工⁴⁾⁵⁾⁶⁾の結果によるとセメント添加量を従来工法に比べ25%低減(気泡添

2.2.3 施工費の縮減

気泡工法は、排泥土量の低減による固化材ロスと、気泡混合土の高い流動性によるW/C比の低減により単位セメント量を従来工法に対して概ね30~50%削減できる。また、間接的ではあるが、気泡混合土は、掘削破碎土塊の再結合や混合攪拌翼への付着を防止できるため、掘削機械のオーガートルクが低減できる。これにより、高速混合攪拌が可能となり、施工品質や施工能率が向上する。さらに、排泥土量が低減できる。一方、気泡プラントが小規模であるため作業用地は従来工法と同等で済む。

施工費は、気泡剤や消泡剤の薬剤費と気泡プラントの追加設備がコスト増となるが、セメントの材料費や汚泥の産廃処分費がコスト減となる。試験施工⁸⁾の試算によると汚泥の産廃処分費を考慮しない場合は2~3%、考慮した場合は約20%のコスト縮減となった。

3. AWARD-Hsm工法の実施工

3.1 AWARD-Hsm工法の概要¹³⁾

AWARD-Hsm (Horizontal multishaft rotating type cutter soil mixing) 工法は、水平多軸回転カッターを使用し、気泡掘削により等厚式のソイルセメント地中連続壁を造成する工法である。気泡掘削は、地盤を掘削する際に気泡を添加することで、掘削土の流動性や遮水性を向上させ、固化材量、排泥量の低減を図るものである。掘削時は、水平多軸回転カッターの先端から掘削液（気泡＋水）を吐出しながら掘削・攪拌を行い、掘削土を流動性の高い気泡混合土にする。造成時は、固化液（消泡剤を添加した固化材スラリー）を注入し、気泡を消泡しながら混合・攪拌を行いソイルセメント壁を造成する。施工中は注入材（気泡、水、消泡剤、固化材スラリー）の添加量、気泡混合土のテーブルフロー値や密度および掘削機の各種計測データを測定・管理して施工性を確認する。AWARD-Hsm工法の概要を図-3.1に示す。

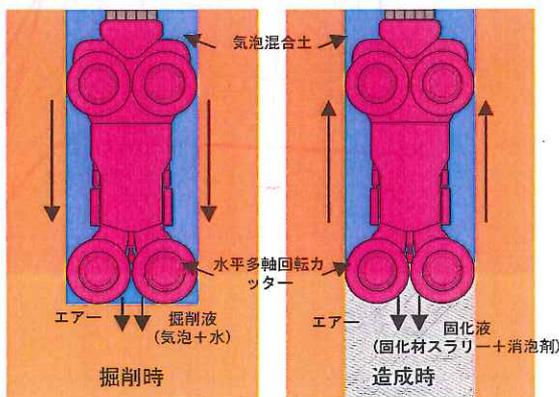


図-3.1 AWARD-Hsm 工法の概要図¹¹⁾

3.2 施工機械

AWARD-Hsm 工法の施工機械を写真-3.1、掘削液の吐出状況を写真-3.2 に示す。施工機械（CSM 機：クアトロサイドカッター）は、高さ 8.6m、幅 4.5m 程度とコンパクトであるため、低空頭下や狭隘なヤードでも施工が可能である。さらに、大深度（H=60m）や大壁厚（t=1.2m）の施工が可能である。

3.3 地盤条件

地盤条件とソイルセメント壁との関係を図-3.2 に示す。地盤は GL-0~10m までは N 値 0~15 程度の粘性土と砂質土の互層、GL-10m

以深は N 値 50 以上の硬質な砂質土を主体とし、一部に固結した粘性土が薄く介在している。なお、砂質土の透水係数は $2.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度と比較的高く、逸水が懸念される層である。ソイルセメント壁の深度は 54.5m、開削トンネルの掘削深度は約 15m である。

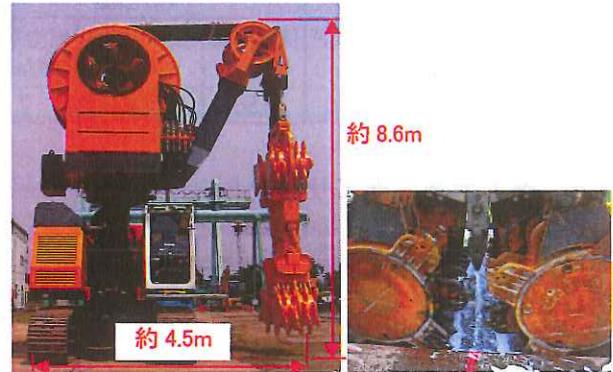


写真-3.1 施工機械¹¹⁾ 写真-3.2 掘削液¹¹⁾

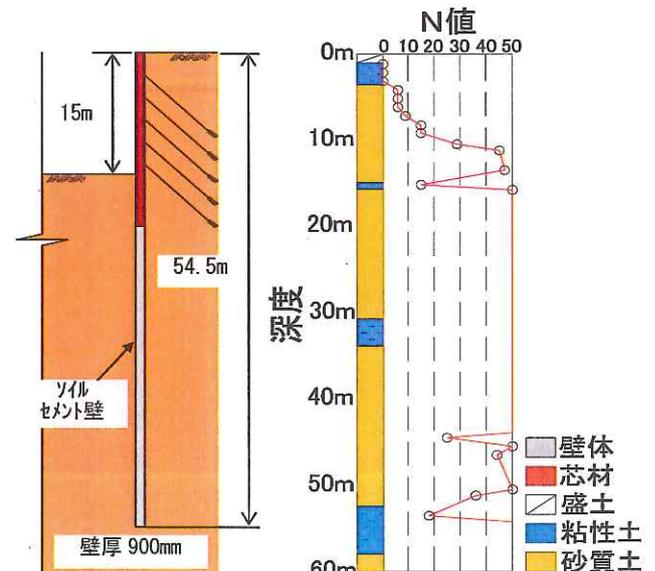


図-3.2 地盤条件¹¹⁾

3.4 基本配合

現位置でボーリングを行い、採取した土を用いて室内配合試験を行った。気泡剤の添加量は、気泡混合土のテーブルフロー試験（TF $\geq 150\text{mm}$ ）や既往の研究成果をもとに 0.5%とした。固化材量は、ソイルセメント壁の一軸圧縮強度が設計基準強度（ $\sigma_{28} = 500 \text{kN/m}^2$ ）の 2 倍以上となるように設定した。掘削液および固化液の基本配合を表-3.1 に示す。なお、気泡のベアリング効果によって加水量が少なくても掘削土の流動性が確保できるため、水固化材比は一般的なソイルセメント壁工法に比べ小さくなっている。また、消泡剤を添加した固化材スラリー

により気泡を消泡しながらソイルセメント壁を造成するため、排泥量が低減できる。実施工においては、施工状況に応じて掘削液の気泡添加量などを調整しながら適切な配合を選定することとした。

表-3.1 掘削液、固化液の基本配合案

掘削液			固化液		
気泡剤の添加率(%)	気泡添加量 (ℓ/m ³)	加水量 (ℓ/m ³)	固化材量 (kg/m ³)	水固化材比 W/C(%)	消泡剤量 (ℓ/m ³)
0.5	170	100	150	80	7

3.5 施工手順と施工サイクル

AWARD-Hsm 工法の標準的な施工手順を図-3.3 に示す。深度 54.5m の掘削を 2 日、造成・芯材建込みを 1 日で行う 2 サイクル施工を基本とした。実施工では、まず開削トンネルの掘削工事予定場所で試験施工（1 エレメント）を行い施工性や品質を確認し、その結果を踏まえて本施工（18 エレメント）を実施した。1 エレメントの長さは 2,400mm で、本施工では、先行エレメントを施工し、後行エレメントはカッティング掘削を行いながら施工して、連続した土留め壁体を構築した。標準的なエレメントの割付を図-3.4 に示す。

3.6 施工管理・品質管理方法

掘削・攪拌時の気泡混合土の管理には、気泡安定管理図（図-3.5 参照）を使用する。掘削深度 5m ごとに気泡混合土のテーブルフロー値（以下 TF 値）と比重を測定し、図-3.5 に示す範囲から大きく外れないように管理した。

また、ソイルセメント造成完了後 GL-10m 付近でウェットサンプリングにより試料を採取し、一軸圧縮試験を行った。

なお、試験施工で造成したソイルセメント壁体は、開削トンネルの掘削時に掘り出して試料を採取し、一軸圧縮試験を行った。試料の採取位置は、GL-3.5m、-10.0m、-14.0m とした。

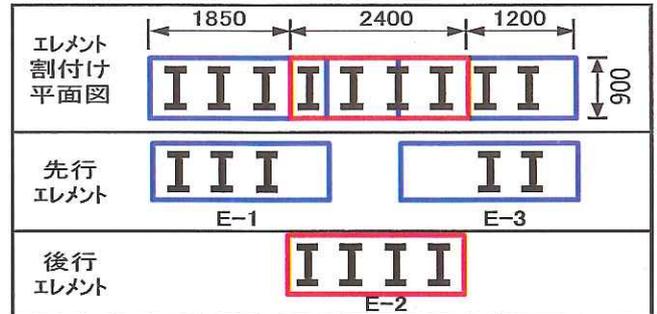


図-3.4 エレメント割付¹¹⁾

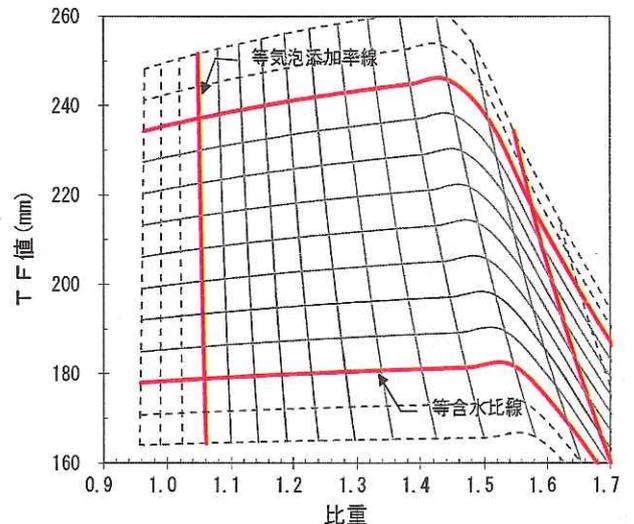


図-3.5 気泡安定管理図¹¹⁾

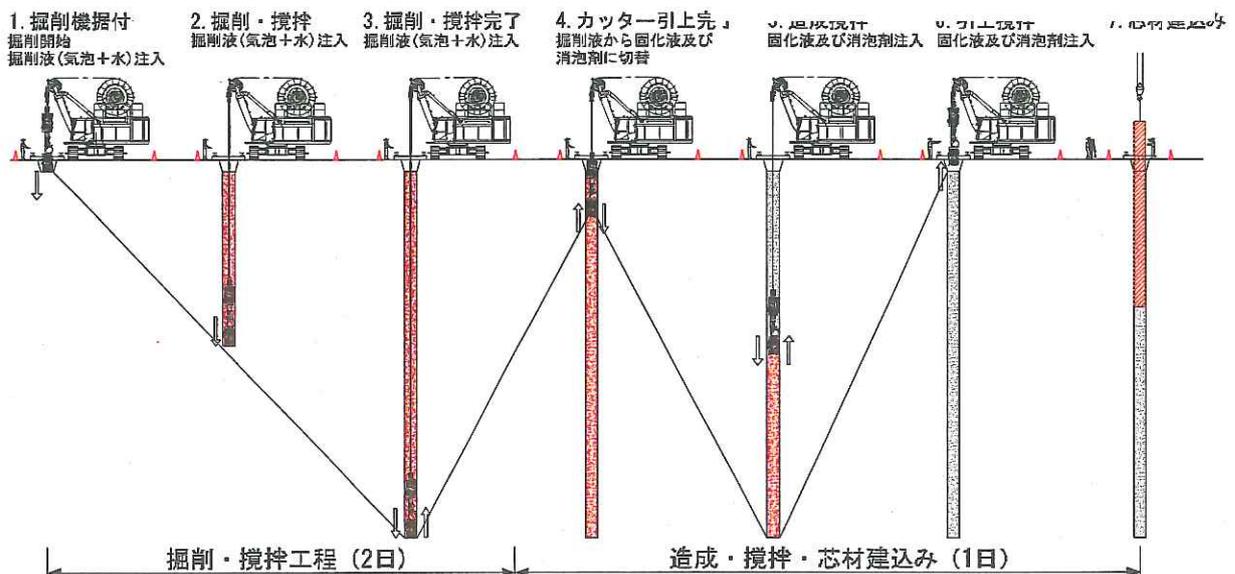


図-3.3 AWARD-Hsm 工法 施工手順図 (2 サイクル施工)¹¹⁾

3.7 施工性

本施工（18 エレメント、合計 1,480m²）での施工サイクルタイム結果の一例を図-3.6、掘削・攪拌状況を写真-3.3 に示す。当初計画通り、深度 54.5m の掘削を 2 日、造成・芯材建込みを 1 日で完了した。掘削速度は 7～10cm/min となり、従来工法と同等の施工性を確認した。また、施工中は、溝壁の安定を確保できるよう掘削液（気泡+水）の添加量や気泡混合土の品質を確認しながら慎重に施工を行った。ただし、以下の要因により掘削液の使用量が増加し、気泡添加量は基本配合（1700 /m³）の約 2 倍となった。①掘削精度を確保するため、硬質地盤で掘削速度を低下させたことに加え、カッターのターニング掘削・引上げ時においても、常にカッター先端から少しずつ水を吐出し、配管内の閉塞を防止する必要があった。②掘削・攪拌時に GL-10m 付近の砂質土地盤で 50～100ℓ /min 程度の逸水が発生した。なお、施工管理記録から算出した固化材量（ソイルセメント壁に残留したと考えられる固化材の量）は、エレメント毎にばらつきはあるが、概ね 180kg/m³ 程度であった。

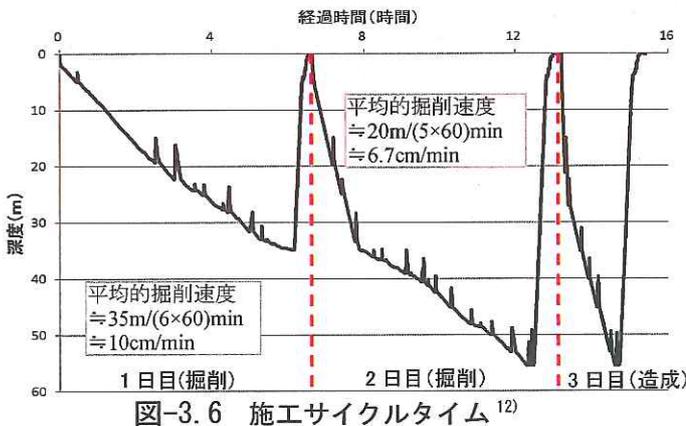


図-3.6 施工サイクルタイム¹²⁾



写真-3.3 掘削・攪拌状況¹²⁾

3.8 気泡混合土の品質管理

気泡混合土は、掘削深度 5m 毎に地表面付近で試料を採取し、比重と TF 値を測定して管理した。ただし、前述した要因により掘削液の使用量が計画より増えたため、比重は低くなり TF 値は大きくなった。なお、AWARD-Hsm 工法はカッターの自重（約 150kN）が大きいので、引上げ時の抵抗を低く抑えるためにも、気泡混合土の比重は低めの値で管理した。また、流動性の指標である TF 値に関しては、一般に 240mm を超えると土粒子の分離・沈降が生じやすくなるため常に溝壁の安定やカッターに作用する掘削土の荷重など、施工状況に留意しながら掘削液吐出量などの管理を行った。

本施工5エレメントの比重とTF値の測定結果を図-3.7に示す。比重は概ね1.1～1.4と溝壁安定（気泡安定液管理図）の管理範囲内で施工することができたが、TF値については、GL-10mより深くなると通常の気泡安定液の管理範囲（180mm～240mm程度）を超えることが多くなった。

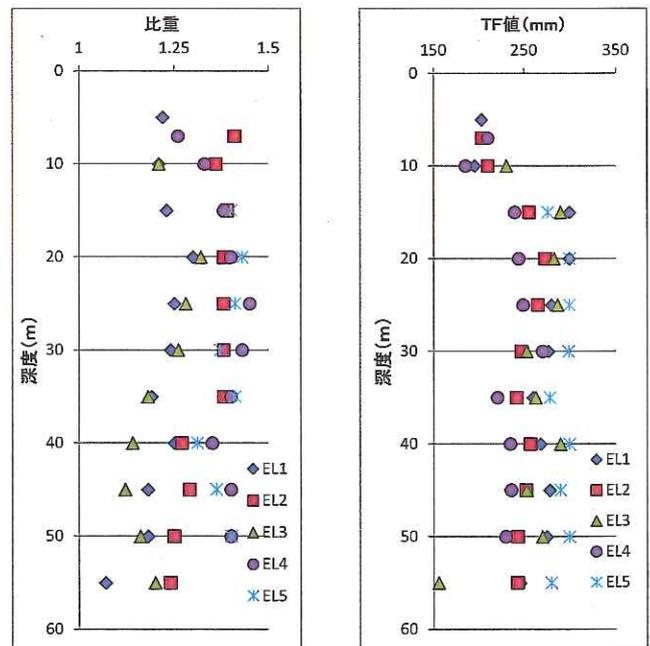


図-3.7 比重とTF値の測定結果¹²⁾

3.9 排泥量

気泡掘削工法は、気泡のベアリング効果により、加水量や固化材量を少なくすることで排泥量の低減効果が期待できる。本施工では、排泥量は1エレメントあたり20m³程度発生し、従来工法に比べ1割程度の低減にとどまった。これは、前述した逸水対策などにより、掘削

液の使用量が増加したことが要因と考えられる。

3.10 壁体の品質

ソイルセメント壁体の一軸圧縮強度の試験結果を図-3.8に示す。本施工において、GL-10m付近でウエットサンプリングした試料の28日強度は1,260kN/m²となり、設計基準強度 ($\sigma_{28}=500\text{kN/m}^2$) の2倍以上であった。

一方、開削トンネルの掘削時にブロックサンプリングしたソイルセメント壁（試験施工）の強度は、材齢28日を超えているものの、強度はすべて2,000kN/m²以上となり、設計基準強度を大きく上回ることを確認した。また、開削トンネルの掘削完了後に土留め壁面の状況を確認したところ、壁面からの漏水は、ほとんど見られず、従来工法と同等の止水性を確保できている（写真-3.4参照）。

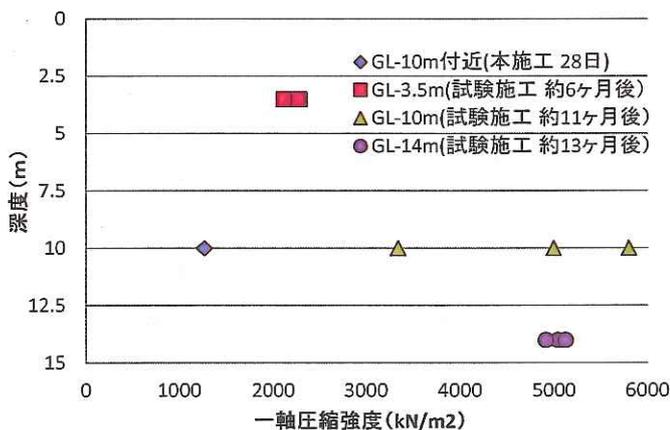


図-3.8 一軸圧縮強度試験結果¹²⁾



写真-3.4 完成した土留め壁面の状況¹²⁾

4. おわりに

地盤改良に応用したAWARD-Demi工法については、すでに道路工事における地盤改良として大規模な適用実績があり、今後のさらなる展開を見込んでいる。また、AWARD-Hsm工法については、大深度の土留め壁の施工を無事に完了し、本体構造物の施工も竣工している。仮設土留め壁としての出来形は、ソイルセメントの一軸圧縮試験結果や土留め壁面の状況などから、強度や止水性は良好であり、施工性、品質ともに従来工法と同等であることを確認した。今後は、各種地盤条件への適用性も見極めながら実施工へ採用していきたい。

参考文献

- 1) 栗橋, 赤木ら: 気泡を用いたソイルセメント壁工法用掘削安定液の流動特性, 土木学会第64 回年次学術講演会, pp715-716, 2009. 9
- 2) 近藤義正, 他: 掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用, 土木学会論文集, vol. 64 No. 3, P505-518, 2008, 7
- 3) 赤木寛一: 気泡を利用した掘削工法, 土木技術, vol. 69, No. 71, 2014. 1
- 4) 請川誠, 他: AWARD-Demi 工法の開発(その1: 工法概要), 土木学会第 67 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 599-600, 2012. 9
- 5) 三反畑勇, 他: AWARD-Demi 工法の開発(その2: 試験施工概要), 土木学会第 67 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 601-602, 2012. 9
- 6) 安井他, 他: AWARD-Demi 工法の開発(その3: 試験施工結果), 土木学会第 67 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 603-604, 2012. 9
- 7) 田中孝, 他: AWARD-Demi 工法のフィールド試験(その1: 試験概要), 土木学会第 69 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 1337-1338, 2014. 9
- 8) 増田浩二, 他: AWARD-Demi 工法のフィールド試験(その2: 施工性・経済性評価), 土木学会第 69 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 1339-1340, 2014. 9
- 9) 安井利彰, 他: AWARD-Demi 工法のフィールド試験(その3: 品質評価), 土木学会第 69 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 1341-1342, 2014. 9
- 10) 三反畑勇, 他: 気泡掘削による深層混合処理工法(AWARD-Demi 工法), 基礎工, pp. 66-69, 2014. 3
- 11) 増田浩二, 他: 気泡掘削土留め壁 AWARD-Hsm 工法の施工と品質管理(その1: 施工概要), 土木学会第 70 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 1573-1574, 2015. 9
- 12) 佐久間誠也, 他: 気泡掘削土留め壁AWARD-Hsm工法の施工と品質管理(その2: 施工結果), 土木学会第70 回年次学術講演会, (社) 土木学会, pp. 1575-1576, 2015. 9
- 13) 気泡工法研究会: AWARD-Hsm 工法 技術・積算マニュアル, パンフレット