

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㈱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㈱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

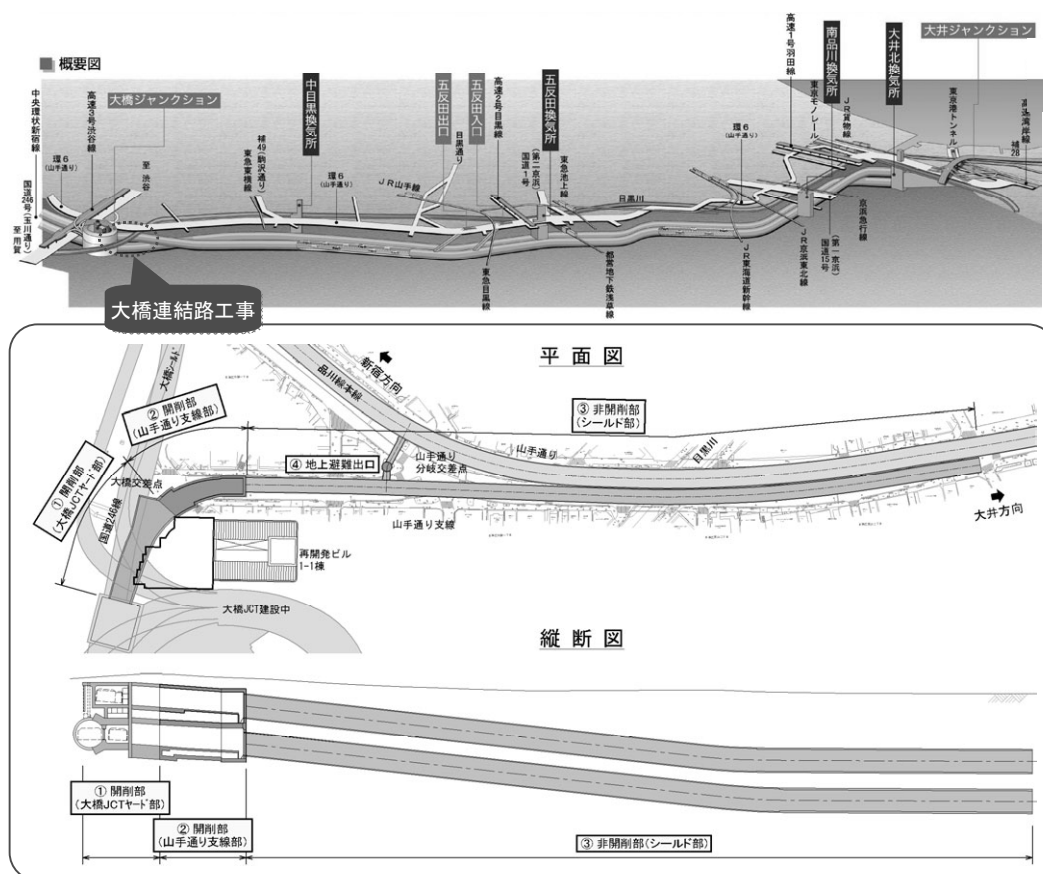


図-1 中央環状品川線および大橋連結路の概要

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、狭隘空間

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。

- 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結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。



写真-1 大橋連結路の現場状況（施工前）

2. 工事概要

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：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）。

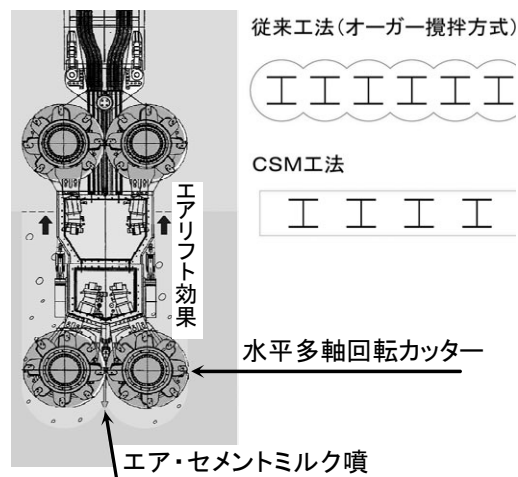


図-2 CSM工法クアトロカッター概念図

- 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

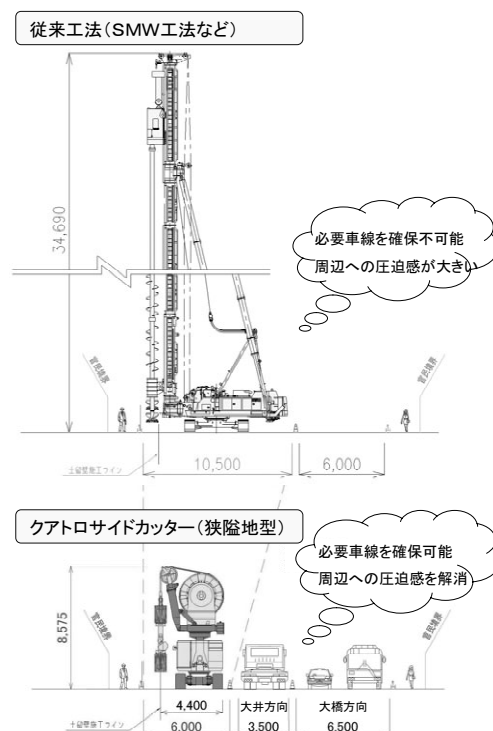


図-3 施工条件（低空頭・狭隘地）への対応

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， $q_u=1\sim4\text{N}/\text{mm}^2$ 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， $q_u=1\sim3\text{N}/\text{mm}^2$ 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

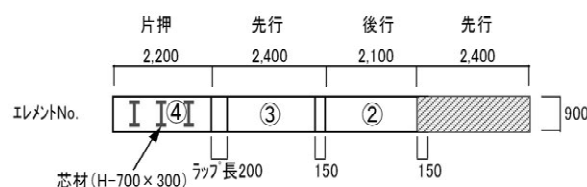


図-4 エレメント割付図

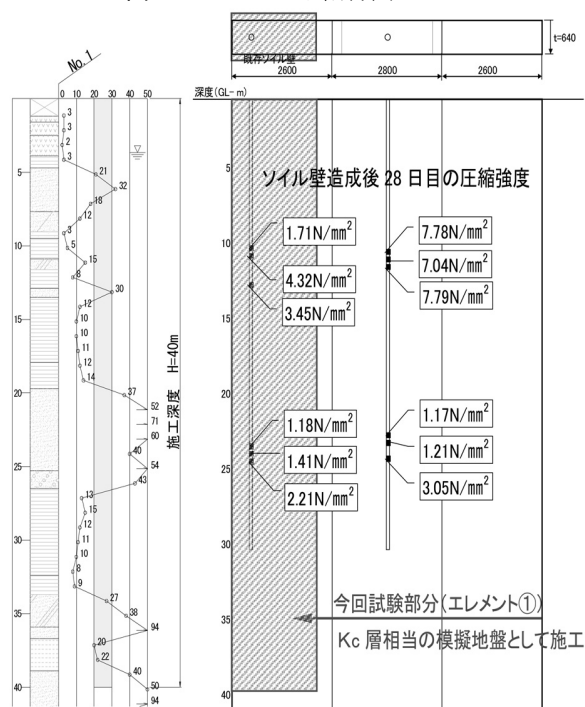


図-5 試験施工における地盤条件

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。

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

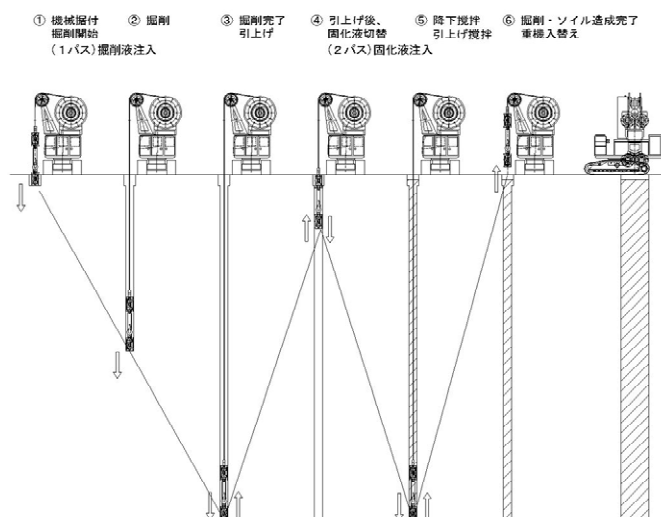


図-6 2サイクル施工概要図

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。

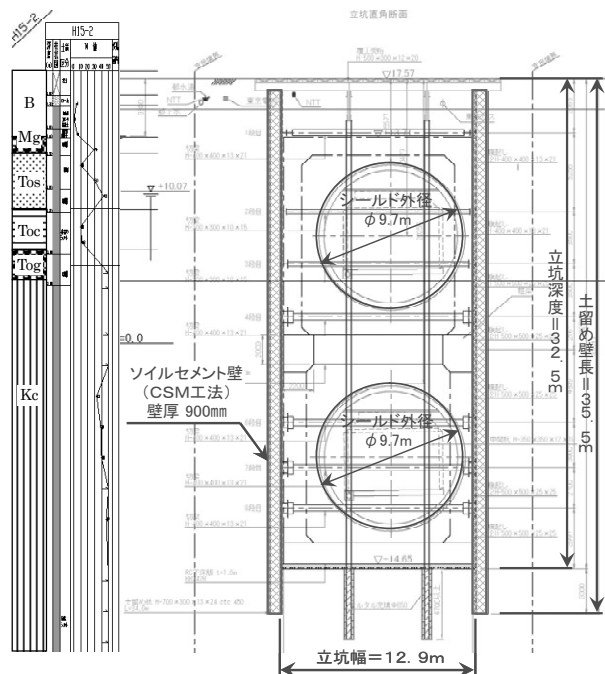
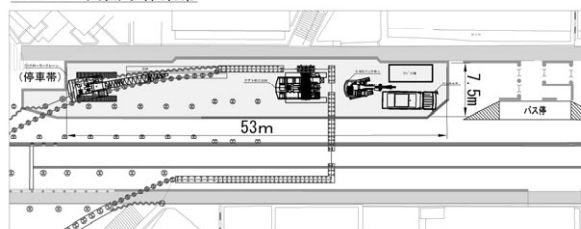
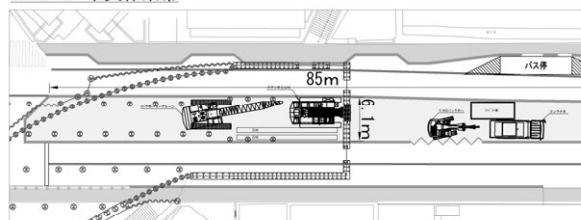


図-7 立坑概要図

STEP-1 内回り作業帯



STEP-2 中央作業帯



STEP-3 外回り作業帯

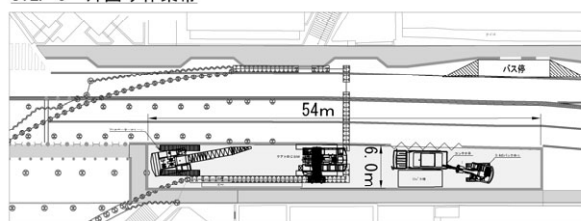


図-8 各作業帯の施工配置



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。

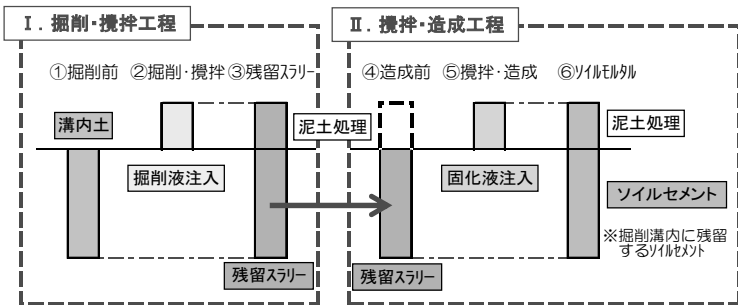


図-10 2サイクル施工における配合の考え方

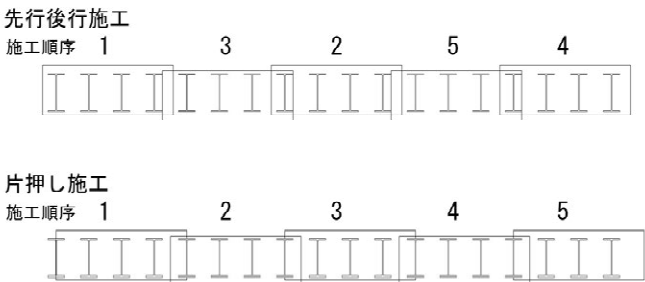


図-9 1サイクル目（掘削）の施工順序

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

表-4 掘削・固化液配合（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	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

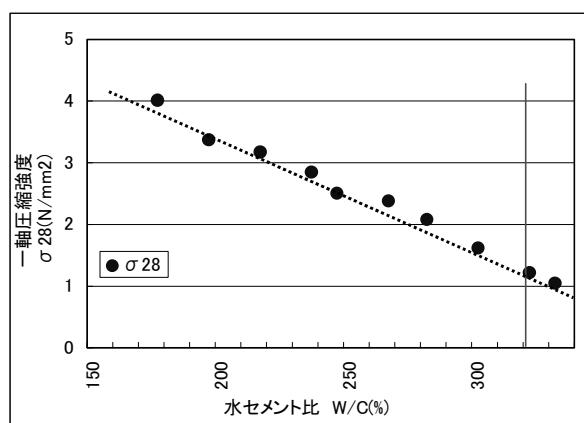


図-11 水セメント比と強度（ σ_{28} ）の関係

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 (m³)	723	247	887	1,857
注入率 (%)	1サイクル	61.0	71.6	67.4
	2サイクル	26.1	28.1	27.7
	計	87.1	99.8	95.0
排泥率 (%)	/造成量	84.6	113.6	92.4
	/注入量	97.1	113.9	97.3



写真-6 芯材搬入状況



写真-7 芯材建込み状況

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85m²）/2.5日程度（34m²/日）の施工となった。

6. おわりに

当工事においてC S M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、C S M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：C S M工法標準積算資料，平成20年度版