

都市部での大深度地下構造物構築における 高品質確保のための施工上の工夫

和 家 由 宜

本工事は、都市計画道路である環状第2号線の整備工事の一部であり、逆巻きで最大掘削深度 GL-34 m まで掘削しながら換気所躯体構築を進めた。都市部での大深度地下構造物構築においては、地中埋設物が多いこと、施工ヤードが狭隘であること、地下水位が高いことなどの共通の課題が発生する。それらの課題に対して、埋設物の探査方法の選定、施工空間の確保、無収縮モルタルによる充填性の確保やアロンソイルを用いた鋼製連壁の施工など、本工事で行った様々な工夫について報告する。

キーワード：都市部、大深度、躯体構築、逆巻き施工、鋼製地中連続壁、地下埋設物探査、無収縮モルタル

1. はじめに

環状第2号線は、江東区有明を起点とし、中央区、港区などを経て千代田区神田佐久間町を終点する都市計画道路であり、事業の整備効果として、「臨海部と都心部を結ぶ交通物流の強化」「並行する晴海通りの渋滞緩和など地域交通の円滑化」「臨海地区の避難ルート多重化による防災性の向上」などが挙げられる重要な道路である（図-1）。

本工事は、未整備区間である新大橋通りから築地大橋間の延長 572 m の道路整備を目的としたもので、最大深度 34 m の大深度地下構造物で、地下 4 階構造の換気所の構築を含む。

2. 技術的な課題

本工事の換気所躯体構築における施工条件として、「最小限の施工ヤードで施工しなければならないこ



図-1 環状第2号線全体図

と、「施工位置は交通量の多い新大橋通りに近接していること」、「ビル及び築地市場の跡地のため、地中障害物が散在していること」、「都市部に34mの大深度地下構造物を、周辺へ影響を及ぼすことなく、施工を行うこと」があげられる（図-2）。これらの施工条件において考えられた技術的な課題として、「第二溜池幹線シールドの周囲を損傷することなく地盤改良すること」、「躯体本体は間仕切り壁が多く複雑な構造であること」、「逆巻き閉塞打継ぎからの漏水が懸念されること」「仮設併用鋼製連壁の嵌合部等からの漏水が懸念されること」があげられた。

3. 技術的課題克服への取組み

技術的課題を克服するために計画し、実践した施工の特徴と工夫として「地中埋設管を正確に把握する探査方法を実現すること」「地下での施工空間の確保を実現すること」「逆巻きスラブ閉塞部の充填性を確保すること」「仮設併用鋼製連壁の品質確保のための連壁施工方法を実現すること」の4点にまとめられ、これらの課題を克服するため実施した対策について具体的に説明する（図-3）。

(1) 音響トモグラフィ地盤探査

換気所直下には、シールド外径9mの下水道管が



図-2 施工ヤード図

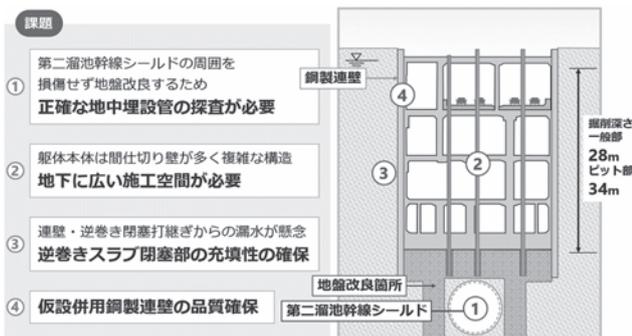


図-3 換気所断面図

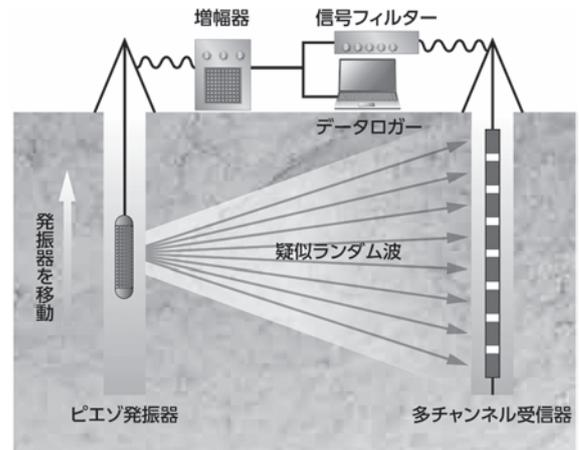
埋設されており、掘削に伴うリバウンド等の影響を低減するために、下水道管の周囲を地盤改良で覆う計画であった。地盤改良の削孔工事で、埋設管を損傷する可能性があったが、従来の電磁レーダ法では地表面から5m程度が限界であるため、地中39mに埋設されている下水道管の実際の位置を特定することは困難であった。

そこで、音響トモグラフィ地盤探査により埋設管の正確な位置を探査することを計画した。音響トモグラフィ探査は、孔内発振器と多連の受信器を2つの孔に配置して、この孔間の地盤情報を可視化する技術である（図-4）。

この探査方法は、超音波と地震波の中間の周波数帯域である音響波（数100 Hz～数10 kHz）を用いることと、連続波の一種である擬似ランダム波を用いることで、ボーリングに近い精度を維持しつつ、従来の弾性波探査と同等の探査距離を可能にしていることが特徴である。受信器を所定の深度に設置し、発振器を任意のピッチで移動させていくことにより、音の波線が対象断面全体を横切るように計測を行う。この時の到達時間と振幅値の逆算により、速度分布と減衰率分布の地盤物性情報を得ることができる。

調査断面は、現場計測レイアウト断面図で、2断面実施し、受信器と発信器を配置する調査孔間の距離は12.8mとし、計測深度は27m～51mとした。また、データ取得前に発振周波数を1kHz～8kHzまで変えて送受信を行い、SN比が低下せず、かつ最も高周波数の6kHzの波を用いてデータ取得を行い、今回の調査では、地中障害物の影響に対して、速度分布より強い反応を示す減衰率に着目した。

探査結果から得られた情報を図示したものが図-5



発振側、受信側ともに内径50mmの塩ビ管に挿入して使用します。(小型、中型発振器の場合)

図-4 音響トモグラフィ地盤探査概念図

になる。カラースケールで表示されている分布図が、ボーリング孔間の減衰率分布図、その右側に図示されているものが、水平波線の振幅読取り結果、受信波形記録から読取った第二溜池幹線の影響を受けた波線記録は、図の点線になる。

「減衰率が大きくなっている部分(0.026 dB/kHz/m)」, 「②水平波線の振幅の記録から読み取れる深度方向の位置」, 「受信波形記録」の3つが一致する場所にシールド外径であるφ 9,000 mmの円を記入した。断面2

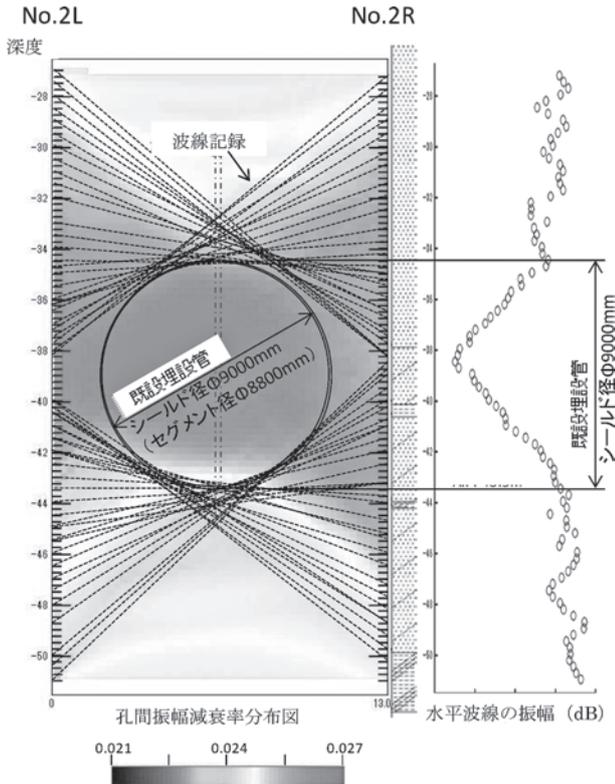


図-5 探査結果一覧図

の結果としては、設計位置に対して、水平方向では432 mm 右側、延長方向では同じ深度にあるという結果となった。この調査結果の検証を行うため、実際に直接ボーリングでの調査も併せて実施した。

断面2において、2カ所のチェックボーリングを実施した結果、設計位置との差は、図面右側に162 mm、下側に45 mmであった。この位置と探査結果を比較すると、探査結果の誤差は水平方向で270 mm、深度方向で45 mmであることがわかった(図-6)。

この誤差に関しては、本調査で使用した発振周波数である6 kHzから理論的に200 mm~300 mmと考えられ、この結果と整合的であった。特に、波線が多く通る深度方向への精度が高いことがわかった。

(2) 地下での施工空間の確保を実現

(a) 逆巻きスラブと鋼製地中連続壁の採用

換気所は、大深度掘削のため、通常の開削工法では、サイズの大きい切梁を密に配置する必要があった。しかし、躯体本体は間仕切り壁が多く複雑な構造であるため、大きな施工空間を確保する必要があった。その対策として、地下1階スラブから下の下層階スラブを逆巻きスラブとし、切梁として兼用することにし、山留壁には剛性が高く、狭隘なヤードでも施工可能な鋼製地中連続壁工法Ⅱを利用した。

これにより、密に配置する予定の切梁が省略でき、施工空間を確保できた。

(b) 地下での施工空間の確保を実現(クロスH)

当初計画の中間杭はH400が1.5 mピッチで配置され、0.08 m³ミニバックホウも通り抜けが困難な状況であった。また、逆巻工法に変更することで、躯体自重を全て中間杭で受けるため、中間杭を非常に密に配置する必要になり、掘削効率の大幅な低下が懸念された。

中間杭を弱軸の無いクロスH型の鋼材にすることにより、ブレース材、水平継材を省略でき、0.25 m³バックホウが路下全面で稼働可能となり、掘削効率を大幅に向上することができた。また、ブレース材、水平継材の省略は、鉄筋組立作業の効率性も向上し、躯体工の工程促進につながった。

(3) 逆巻きスラブ閉塞部の充填性を確保

(a) 無収縮モルタル配合

逆巻きスラブは、立上げられた壁との閉塞での止水性が懸念されたが、独自で開発した、無収縮モルタルを用いた閉塞方法で、止水性を確保することができた。

逆巻充填部が多い換気所では数十 m³/日程度の大

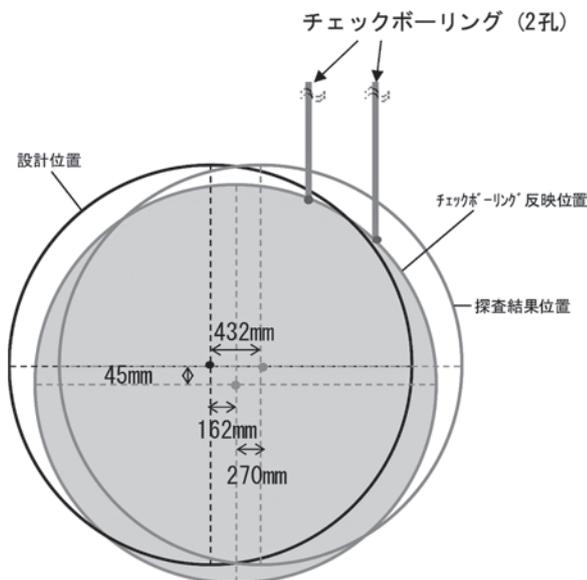


図-6 検証結果図

量打設が必要であったため、以下の要求性能を満たして工場出荷が可能、かつ締固め不要な無収縮モルタルの配合を計画した。

- ①硬化開始までノンブリージングかつ膨張率が0%以上であること
- ②スランプフローの保持性能及び自己充填性を有し、材料分離を生じないこと
- ③定量的な品質管理が可能であること

初期配合の中庸熟ポルトランドセメントを用いた1:2モルタル(表-1)では、ブリージング率2.3%、膨張率-2.4%であり要求性能を満足しないため、混和材タイプのユーロックスに切り替えて(表-2)の1:1.75モルタルでの配合を行った。実機ミキサの試験練りでは、練混ぜ後(ミキサー車攪拌時に対応)及び舟静置(打設時に対応)のそれぞれでスランプフローの経時変化を比較した。練上がり温度30℃において120分の静置状態でもスランプフロー650mm以上を保持し、ノンブリージングかつ膨張率1.2%を達成した。なお、ユーロックスは低温時に粘性が卓越しフローが低下する傾向にあり、冬季打設の練上がり温度10℃程度では現着フローの下限値600mmを満足しないことがわかった。そこで練上がり温度に応じて、ユーロックスと相性の良いナフタレン系の高性能減水剤であるマイティ150を混和剤として用いることで、冬季でも十分なスランプフロー保持性能を担保した。

(b) 無収縮モルタルの打設方法

後施工壁躯体打設時のパイプレーター挿入性を考慮して、無収縮モルタルの打設高さは逆巻先行壁躯体と後施工壁躯体との間50cmとした。地下30m以上の水圧が作用する換気所での無収縮モルタルの打設方法においては、以下の課題を解決する必要があった。

- ①無収縮モルタルの打継ぎをできる限り少なくすること
- ②複数の圧入口からの圧入による中間部での空気溜りの発生に起因する未充填を避けること
- ③万が一のブリージング等にも対応するため、打設終

了後にもヘッド圧を作用させ続けられること

無収縮モルタルの未充填を避けるには空気溜りを排除する必要があるため、型枠上部にφ30mmの空気孔を等ピッチで設けた。空気孔にはφ100mmの塩ビ管をエルボーで1m立ち上げ、充填が進行すると空気孔から無収縮モルタルが自然と漏れ出して1mのヘッド圧が作用し続ける仕組みとした(図-7に設置状況を示す)。無収縮モルタルの圧入は端部1ヵ所の圧入口から行い、1mのヘッドが作用した塩ビ管には順次キャップをかぶせて充填完了箇所への圧逃げを防止することで、最大60m以上の長距離片押しにより打継ぎを最小限にした。充填確認には透明型枠からの目視と充填検知センサーを使用した。脱型後の躯体には目視で空隙は見られず、事前に設置したインジェクトチューブからの樹脂注入量から判断される平均的な空隙は0.1mm程度と良好な仕上がりがであった。

(4) 本体利用鋼製連壁の品質確保のための連壁施工方法の実現

換気所は、大都市部の大深度掘削のため、仮設併用の鋼製連壁を採用したが、高水圧下での本体壁のため連続性を確保する施工が要求された。

鋼製地中連続壁の施工方法として採用したCSM工法の課題は、下記に示す3要因により芯材の建込が困難になることであった。

- ①掘削溝内に挿入された駆動部の発熱によりソイルモルタルの水和反応が促進する
- ②施工深度が大きく、注入材の混合攪拌に時間を要するため、芯材建込までにソイルモルタルが硬化する
- ③芯材同士を連結する必要があるため、芯材の建て込みに手間がかかる

上記対策として本工事では、対策として施工深度や構造等の施工条件に限定されることなく確実に施工を行うためSMW工法でも用いるアロンソイル(分散効

表-1 配合計画(1:2モルタル)

W/C (%)	セメント	混和材	水	細骨材		混和剤
	C	AD1	W	S ₁	S ₂	Ad1
48.2	594	20	286	636	636	1.0%

表-2 配合計画(ユーロックス)

W/C (%)	セメント	混和材	水	細骨材		混和剤
	C	AD1	W	S ₁	S ₂	Ad1
42.5	659	80	280	581	581	C×0.5%

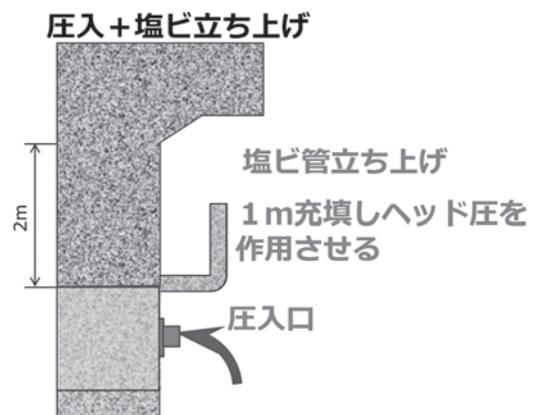


図-7 設置状況図

果および遅延効果を備える)を添加しソイルセメントの流動性の向上をはかることとした。

CSM工法は、下記の3つの工程に分けることができる。

「掘削工程」掘削用カッターの駆動部とを有する掘削機本体により地山を掘削して掘削溝を形成する。

「造成工程」掘削溝内において、掘削機本体を利用して注入液と掘削土とを混合攪拌する。

「建込工程」掘削溝内に芯材を建て込む。

配合の要求性能として、建込工程時に流動性を確保し(練り混ぜ後10時間後までフロー値 ≥ 200 mm)次の掘削工程時に自立性を確保(24時間後に硬化)することが求められた。この性能を満たす配合を選定するため現地盤の土をボーリング試験によって採取し表-3の配合で試験練りを実施した。

実施工にあたり室内配合試験結果のA-2配合を用いて最初のエレメントの造成を行った。ソイルのフローを計測したところ、フロー値の硬化時間が室内試験の約1/2程度となったため次エレメントにおいてはA-2配合よりアロンソイルの添加量の多いA-9配合により造成を行った。しかし、A-9配合についてもフロー降下が速く目標の流動性が確保できなかったため、現場での掘削液を使用して現場配合試験を行った。

現場でのフロー降下時間が室内試験より短い要因については、以下が考えられた。

- ①先行エレメントで造成されたソイルを一部掘削するため、掘削液に掘削されたソイルが含まれ、室内試験よりも掘削液のシルト分が多くなっている
- ②掘削中に掘削機のカッターの温度が上昇し、造成液の温度も上昇している

現場試験での要求性能は実施でのフロー値の降下時間が、室内試験の約1/2程度となっているため、本来

10時間後まで流動性を確保し(フロー値200mm以上)、その後硬化するというフロー特性を目標としていたものを現場試験においては、時間を2倍とし、20時間後まで流動性を確保し、その後硬化するというフロー特性もつ配合を選択する。

また、①の要因が考えられるため、掘削時に先行エレメントで造成されたソイルを掘削する幅を2パターン(大(1,000mm)(基準杭等, 1ELの掘削で1条建込の場合)、小(150mm)(通常の施工, 1ELの掘削で3条建込の場合))に分けて試験を行った。

アロンソイルの添加だけでは、ソイルセメントの流動性を20時間まで保持することが難しかったため、遅延剤(パワーキャリブ)も添加することで硬化開始時刻を遅らせることを試みた。

試験の結果、先行造成ソイル掘削幅が大(1,000mm)の場合はB-1 EL6(図-8参照)、小(150mm)の場合はC-2 EL11(図-9参照)が設定条件を満足する配合となった。実施工においてもこの配合を標準配合として施工を無事に完了させている。

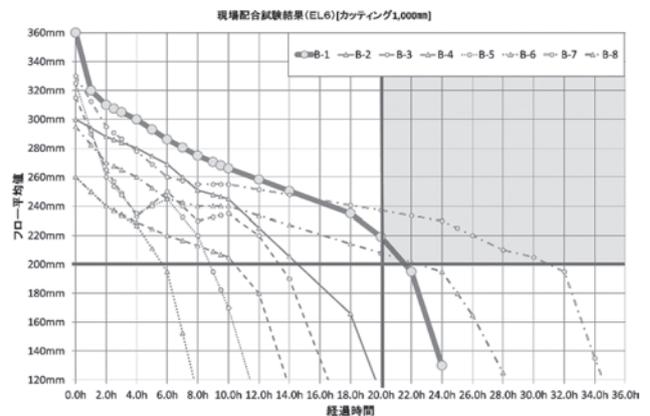
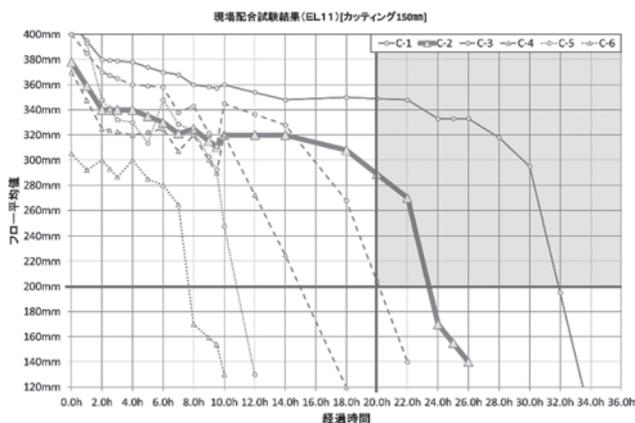


図-8 現場配合結果(大(1,000mm))

表-3 試験練り配合

配合 No.	掘削液混合土 (kg)	セメント (kg)	ペントナイト (kg)	水 (kg)	アロンソイルA (kg)	アロンソイルB (kg)	水/セメント比 (%)
A-1	1,814	135	5.7	81	4.8	2.4	60
A-2	1,814	135	5.7	81	5.6	2.8	60
A-3	1,814	135	5.7	81	6.4	3.2	60
A-4	1,814	135	7.6	108	4.8	2.4	80
A-5	1,814	135	7.6	108	5.6	2.8	80
A-6	1,814	135	7.6	108	6.4	3.2	80
A-7	1,814	135	9.5	135	4.8	2.4	100
A-8	1,814	135	9.5	135	5.6	2.8	100
A-9	1,814	135	9.5	135	6.4	3.2	100



図一 現場配合結果 (小 (150 mm))

大深度鋼製連壁のソイルモルタル流動性を確保する技術を駆使し、品質の高い大深度地下構造物の構築を完遂したものである。これらの工夫は、大都市部の大深度地下構造物構築工事例として評価に値するとともに、大都市部再開発工事として見込まれる今後の類似工事に対して実績に裏付けられた有益な知見を提供するものと考えられる。

JCMA

《参考文献》

- 1) JFE シビル(株)：音響トモグラフィ地盤探査カタログ，平成 28 年 7 月。

4. おわりに

本業績は、厳しい制約条件がある大都市部の大深度地下構造物の構築工事で、本体利用鋼製連壁を使用し、地中障害物の探査方法、逆巻きスラブの閉塞方法、



【筆者紹介】

和家 由宜 (わけ よしのり)
 大成建設(株) 東京支店
 環2 地下トンネル (仮称) 及び築地換気所 (仮称) ほか
 築造工事 (27 一環 2 築地工区)
 監理技術者

