

部分拡幅シールド工法の開発

飯島健¹・依田誠²・宮澤昌弘³・野田兼司¹・前田和亨¹

¹正会員 工修 前田建設工業株式会社 技術研究所（〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16）

²正会員 前田建設工業株式会社 土木部（〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-26）

³正会員 前田建設工業株式会社 土木技術部（〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-26）

大深度地下を利用した地下空間の開発においては、道路トンネルの非常駐車帯やランプ合流部、鉄道の地下駅部や待避空間といった、大断面トンネルの任意の場所に拡幅空間を構築する技術が求められる。そこで、シールド機の側部に搭載した拡幅部掘削機構で地山を掘削し、特殊な地山安定材を充填することで地山の保持を行い、その後に拡幅セグメントを坑内から押し出して拡幅部を構築する、部分拡幅シールド工法の研究開発を行った。その中で、工法の主要要素である拡幅部の掘削機構、地山安定材、拡幅セグメントに関して一連の試験・検討を行い、工法の成立性について確認した。

キーワード：大深度地下, シールドトンネル, 部分拡幅, 拡幅空間, 工法開発

1. はじめに

大深度地下を利用した地下空間の開発においては、道路トンネルの非常駐車帯やランプ合流部、鉄道の地下駅部や待避空間といった、大断面トンネルの任意の場所に拡幅空間を構築する場面が想定される。従来であれば、こうした場合、中間立坑から別マシンにより大断面を掘削したり、地盤改良後に断面を切り広げるといった工法が用いられていた。また、同一の大断面によりシールド掘削を行うことも一般的である。従来から用いられるこれらの工法は、非効率的であり、多額な費用と長い工期を要するため、一般本線断面に対し、任意の区間において拡幅断面を構築できる技術が求められている。著者らはこうした状況を鑑み、シールド機の側部に搭載した拡幅部掘削機構で地山を掘削し、特殊な地山安定材を充填することで地山の保持を行い、その後に拡幅セグメントを坑内から押し出して拡幅部を構築する、部分拡幅シールド工法の研究開発を行っている。

開発に際しては、当該工法の主要要素として、拡幅掘削機構、地山安定材、拡幅セグメントの3つを取り上げ、それぞれ要求性能を満足する機構・材料を決定するための一連の試験・検討を実施した。

まず、拡幅部の掘削機構については、地盤などの施工条件に応じて施工性・保守性・コストを考慮した最適な拡幅部掘削機構を選定できるように、ドラ

ムカッター式や多連矩形シールド式などの3タイプの掘削機構を考案した。

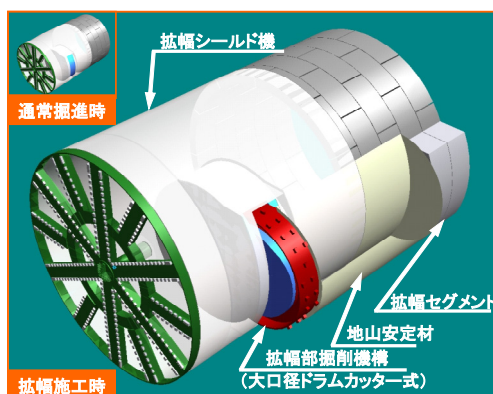
また、掘削した大規模な拡幅空間の地山を保持するための地山安定材については、地山保持性、掘削部への充填性、セグメント押出時の回収性、所定期間経過後の硬化性などに優れていることが求められ、各種室内要素試験や模型実験により所定の性能を確認した。

さらに、拡幅部の覆工構造となる拡幅セグメントについては、構造的安定性を有することと、拡幅部押出時及び完成時の止水機構を含め設計を行い、模型試験により止水性の確認を行った。

ここでは、こうした一連の試験・検討結果について報告する。

2. 工法の概要

部分拡幅シールド工法は、シールド機の側部に搭載した拡幅部掘削機構で地山を掘削し、特殊な地山安定材を充填することで地山の保持を行い、その後に拡幅セグメントを坑内から押し出して、拡幅部を構築する工法である（図-1, 2）。これにより拡幅構造が高水圧下でも大規模な地盤改良を必要とせずに、非開削で安全・確実に構築することができる。外径φ16mのトンネルで、幅2mの拡幅を行う場合の試算



* 拡張シールド機は日立造船(株)との共同開発。

図-1 部分拡張シールド機のイメージ

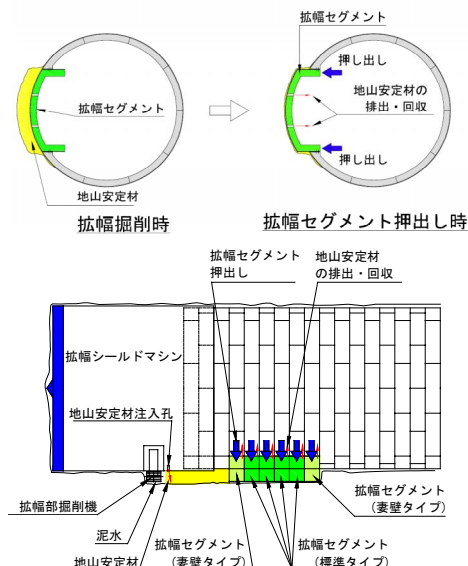


図-2 部分拡張シールド機の概要

表-1 拡張シールド機の特徴

掘削機構	大口径ドラムカッター式	揺動ドラムカッター式	多連矩形シールド式
概要図			
概要	直径φ8.5mのドラムカッターをスライドしながら回転させて、拡張掘削する	直径φ4.0mのドラムカッターを揺動させて、拡張掘削する	4連の矩形シールド(OHM)をスライドさせて、拡張掘削する
特徴	- 掘削形状は円弧であり地山のアーチング効果が期待できる - ドラム側面で土留め効果が得られる - 掘削時間が一番短い(3.5mの拡張掘削で約22分) - 回転ゲートにて遮水し、メンテナンスしやすい - 幅広い地山条件に適應できる	- 掘削形状は円弧であり地山のアーチング効果が期待できるが揺動時に地山を乱す可能性あり - 掘削時間が短い(3.5mの拡張掘削で約26分) - 防護ゲートにて遮水し、メンテナンス可能 - 比較的地山条件が良い場合に適應できる	- 掘削形状は直方体であり地山のアーチング効果は期待できないが、フードがあるため地山を保持しやすい - 掘削時間は一番長い(3.5mの拡張掘削で約37分) - 防護ゲートにて遮水し、メンテナンス可能であるが作業性には劣る - 崩壊性のある地山でも適應できる

では、従来の地盤改良を主体とする非開削工法と比べて、約20%の工期短縮、約10%のコスト縮減が可能となる。

本工法の主な特徴は以下の通りである。

- ① トンネル内からの補助工法を用いないで、大深度・高水圧下でも安全に部分拡張ができる。
- ② 拡張部以外の区間は標準の円形断面であり、工事量を最小限に抑えられる。
- ③ 拡張部の掘削は本線セグメントの組立時に行い、またセグメント押し出し作業は掘進とは別の工程となるため、通常の掘進工程に影響を与えること

が少ない。

- ④ ルート上、何箇所でも任意の場所で部分拡張が可能である。
- ⑤ 拡張部の掘削は泥水式であり、本掘進用の流体輸送設備・泥水処理設備を兼用できる。

3. 拡張シールド機に関する検討

大断面对応の拡張シールド機として、地盤などの施工条件に応じて施工性・保守性・コストを考慮し

表-2 地山安定材の要求性能

要求品質	内 容	室内試験	要求水準
①充填性	泥水と確実に置換でき、掘削部への充填性が良好であること	・比重試験 ・泥水との置換試験	・比重 1.15 以上 ・置換率 100% ※
②地山の保持性	地山や礫の肌落ちを防止できるせん断強さを有すること	・ポケットベーン試験 ・三軸圧縮試験 ・保持性確認試験	・ベーンせん断強度 0.3～0.6kN/m ² ※ ・上記と同等 ・(定性的確認)
③物理的な安定性	・地下水等で希釈されないこと ・ブリージングがほとんど生じないこと	・希釈性試験 ・ブリージング試験	・水に希釈されない ・ブリージングが生じない
④回収性	拡幅セグメント押出し時に回収が容易な流動性を持つこと	・スランプ試験 ・小規模模型試験	・スランプ 15～20cm ※ ・(定性的確認)
⑤硬化性	・拡幅セグメント押出し時に硬化していないこと ・拡幅終了後に硬化を開始すること	・ブリージング試験の試料を目視、触診	・10 日間程度硬化しないこと ・一定期間経過後に自硬性を示すこと

ここに、※印の数値は「充填式シールド急曲線工法 技術マニュアル」¹⁾を参考とした。

た最適な掘削機構を選定できるように、

- ①「大口径ドラムカッター式掘削機構」
- ②「揺動ドラムカッター式掘削機構」
- ③「多連矩形シールド式掘削機構」

の3タイプを開発した。それぞれの掘削機構の特徴は表-1の通りである。

4. 地山安定材に関する検討

(1) 地山安定材に求められる要求性能

拡幅部掘削後、拡幅セグメントが押出されるまでの間は地山安定材が掘削部の空間を保持することとなる。そのため、工事の安定性、確実性、施工性の面から地山安定材には様々な性能が要求される。ここでは地山安定材に要求される性能について示す。

① 充填性

地山安定材の充填は拡幅部掘削機の格納時に併行して行われることとなるが、拡幅部掘削機と地山の間は掘削時に用いられた泥水で満たされている。そのため地山安定材は泥水と確実に置換可能かつ、拡幅空間部への充填性が良好となる比重及び流動性が求められる。

② 地山の保持性

高水圧下の拡幅空間部を保持するためには、基本的には土水圧相当の注入圧を地山安定材に付加することで圧力バランスさせる必要があるが、地山安定材が拡幅空間部を保持している間に、拡幅空間部の地山表面が剥落すると地山の崩壊を引き起こす可能性がある。また剥落した礫等は拡幅セグメント押出し時に障害となり、工事の確実性を損なう恐れがある。そのため、拡幅空間部保持中の地山安定材の性

能としては地山の剥落を防止可能な程度のせん断強度を有することが必要となる。

③ 物理的な安定性

拡幅空間部保持中は、地下水への希釈抵抗性が強いことやブリージングが小さいこと等の物理的な安定性を有することが必要となる。

④ 回収性

地山安定材は拡幅セグメント押出し時に回収を行う。そのため、地山安定材は容易にトンネル内部に回収される流動性を有する必要がある。

⑤ 硬化性

地山安定材回収後、裏込注入を施すことを前提としても、余掘り部などに未回収となる範囲が生じる可能性があり、トンネルの長期的な安定性が危惧される。そこで地山安定材は一定期間経過後に自硬性を示すものが望ましい。つまり拡幅セグメント押出し時までは未硬化状態で可塑性（流動性）を示すが、一定期間後は自硬性を示すといった性状である。施工サイクルの試算より、拡幅部への地山安定材注入からセグメント押し出しまでの期間は3日程度であるが、施工トラブルによる工事の中断等を懸念すると、注入後10日間程度は未硬化状態を保持し、その後硬化する性能が必要と考えられる。

これらの要求性能を満たすために必要な要求水準（基準値）の設定において、流動性、せん断強さ、泥水との置換性については、「充填式シールド急曲線工法 技術マニュアル」¹⁾（以下マニュアルと記す）を参考とした。これは、シールド工法の急曲線部施工においては、可塑性の充填材（塑性流動化材）を用いて曲線内側の余掘り部の緩みを防止することがあり、この時に用いられる充填材に対する要



写真-1 泥水との置換試験
(試験途中の状態)

求性能（空隙への充填性、空隙の保持性、裏込め材との置換性等）が本工法における地山安定材に対する要求性能と同様である点や、塑性流動化材を用いたシールド急曲線工法の施工実績が多数存在する、といった点から、同マニュアル記載の要求水準値により、本工法における地山安定材の要求性能が満足できると判断したためである。以上のように挙げられた地山安定材の要求性能を表-2にまとめる。

(2) 地山安定材の選定

前節で抽出した地山安定材の要求性能を満足できる可能性のある材料として、高炉スラグ、粘土等を主成分とする、後硬化性を有する可塑性材料を最適材料として選定した。当材料は、推進工法の摩擦減少材、テールボイド充填材兼裏込材などに利用されている材料に改良を施したものである。

(3) 充填性確認試験

a) 試験方法

地山安定材の充填性に関しては、まず比重試験を行うと共に、泥水と地山安定材の置換性については、泥水で満たされた容器に地山安定材を注入しその置換率を測定することで確認した。試験に用いた容器はφ200mm、H600mmの円筒形で、側面下方に設けた注入孔から地山安定材を注入、側面上方に設けた排出孔から泥水を回収することで材料の置換を行った。

b) 試験結果

今回の地山安定材の比重は、1.20～1.25程度であり、一般的な掘削泥水の比重1.05～1.15より大きいことから、泥水との置換が可能と考えられる。

泥水との置換試験は置換率100%を目標とし、ほぼ100%の置換率を得た。試験状況を写真-1に示す。

(4) 地山保持性確認試験

a) 試験方法

地山保持性の確認は、地山安定材のせん断強度をポケットベーン試験により求めることで行った。さ

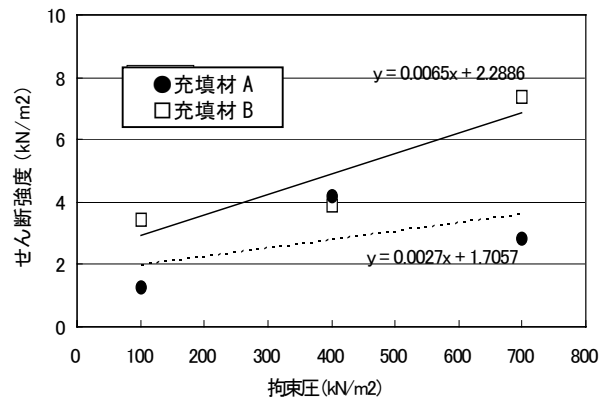


図-3 三軸圧縮試験結果

らに拘束圧100、400、700kN/m²の条件下での三軸圧縮試験（CU-bar試験）による確認も行った。

さらに、視覚的・定性的に地山保持性を確認する目的で、容器内に中仕切り板を設け、片方に飽和砂、片方に地山安定材を詰め、中仕切り板を撤去した際に飽和砂が地山安定材側に流動しないことを確認する試験「保持性確認試験」を実施した（写真-2）。

b) 試験結果

高水圧下の拡幅空間部を保持するためには、基本的には土水圧相当の注入圧を地山安定材に付加することで圧力バランスさせることになる。この際、地山安定材の体積は拘束されており、容易に変形しない状態にあることを前提とする。こうした状態の場合、地山安定材には過大な強度は必要なく、地山土粒子の剥落・崩壊を防止する程度の強度があれば良いと考えられる。マニュアルでは、ポケットベーン試験によるせん断強度で0.3～0.6kN/m²程度を充填材の必要強度としており、一つの参考値となる。今回のベーンせん断強度は、練混ぜ直後で0.4kN/m²、1週間後で2.2kN/m²と、要求性能を満足した。

三軸圧縮試験結果は図-3に示す通りであり、材料の拘束圧依存性は $\phi = 0.2^\circ$ と低く、 $\phi = 0^\circ$ 材として評価できる。三軸圧縮試験における粘着力は、平均値で $c = 2.8\text{kN/m}^2$ であり、1週間後のベーンせん断強度と同等であった。

「保持性確認試験」の状況は写真-2に示す通りであり、中仕切り撤去の際に飽和砂が地山安定材側に流動することはなく、保持性が確認された。写真-2の(c)は試験後に砂部分を薬液で固化させ、地山安定材を撤去し、両材料の境界部分を確認した状況であり、飽和砂のはらみだし、剥落等はほとんど確認されていない。

(5) 物理的安定性確認試験

a) 試験方法

物理的安定性の確認は、ブリージング試験及び希



(a) 供試体作成時



(b) 中仕切り撤去時



(c) 砂部分を固化し境界面を確認

写真-2 保持性確認試験

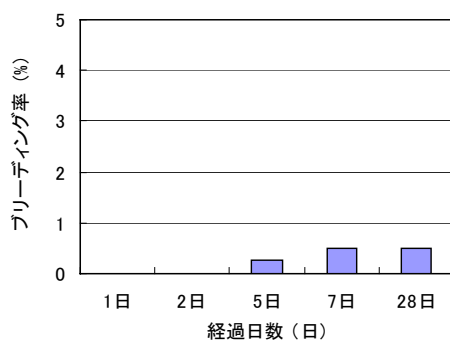


図-4 ブリージング試験結果

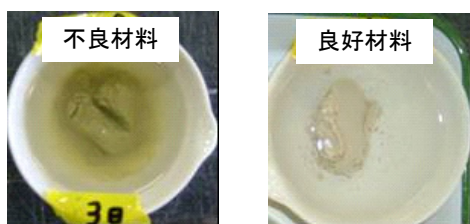


写真-3 希釈性試験状況

釈性試験（静水中に地山安定材を投入し、水の濁りを目視により確認する試験）により行った。

b) 試験結果

ブリージング試験における経過時間とブリージング率の関係を図-4に示す。1月経過後のブリージング率は0.5%程度であり、実用上問題のない範囲と考える。

「希釈性試験」の状況を写真-3に示す。1月経過後においても材料が水に溶け出す状況は確認されず、地下水による希釈に対する抵抗性が確認された。比



写真-4 スランプ試験状況

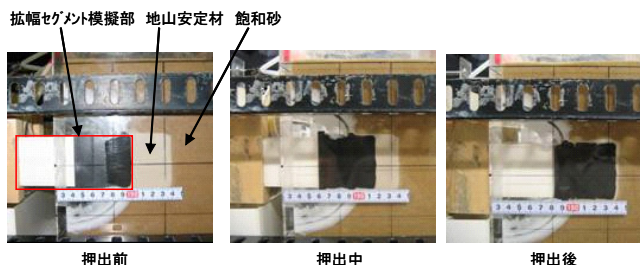


写真-5 小規模模型試験状況

較として、水に対する希釈抵抗性の小さい他材料の状況も写真-3に併記した。

(6) 押出時における回収性確認試験

a) 試験方法

セグメント押出時における回収性に関しては、コンクリートで一般的なスランプ試験（底面φ200mm、上面φ100mm、高さ300mmのスランプコーンによる）により確認した。

また、上記で設定したスランプを有する材料が妥当なものであるかを視覚的・定性的に確認するために、セグメント拡張及び地山安定材回収の過程を模擬した小規模な模型を作成し、実際の回収状況を確認した。

b) 試験結果

スランプ試験の状況を写真-4に示す。当材料のスランプは18cmであった。マニュアルではスランプ15～20cm程度の材料を推奨しており、今回の材料はその範囲内であった。

上記のスランプ量が考案している工法に対し妥当であるかを視覚的・定性的に確認するために実施した小規模模型試験の状況は写真-5の通りであり、押出しに伴い、地山安定材がスムーズに回収できることを確認した。今回の試験では、幅112mm、高さ52mm、押出量40mmの拡張部に対し、φ12mmの回収孔によりスムーズな回収が可能であった。実際の設計段階においては、地山安定材のような物性（粘性等）を有する材料が回収管内を流動する際における、拡張部から回収孔の管径変化部での損失、管路内の損失などを想定する必要がある。現在、幅375mm、高さ335mm、押出量200mmの拡張部規模での同様の模

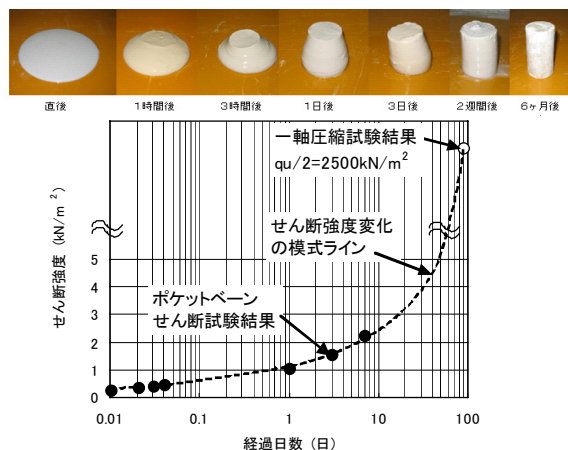


図-5 硬化性確認試験結果

型試験により、回収孔径、個数、押し出しスピード等をパラメータとした検討を通して、実際の設計に有用なデータを蓄積中である。

(7) 硬化性確認試験

a) 試験方法

ここで言う硬化性は、拡幅セグメント押出時までは硬化しないことと、拡幅終了後に硬化することの2つの意味を持つ。硬化性の確認試験はブリージング試験に供した試料を時間経過に従って、目視・触診することで行った。また別途、経過日数毎のポケットペーンせん断試験も実施した。

b) 試験結果

経過日数とポケットペーンせん断強度の関係は図-5の通りである。また、経過日数に伴う試料物性の変化状況を図中に併記して示す。これより、作成後1ヶ月程度は可塑性を示していた材料が、3ヶ月後には $q_u = 5000 \text{ kN/m}^2$ まで硬化することが確認された。

従来の工法では、可塑性材料をシールドトンネル背面の余掘部などに充填する場合、裏込材との置換性を向上させるために様々な処置が施されていたが、後硬化性を有する材料を採用することにより、裏込材と地山安定材とを積極的に置換することが不要となる。

5. 拡幅セグメントに関する検討

(1) 拡幅セグメントの構造

拡幅部の覆工構造となる拡幅セグメントについては、大断面拡幅トンネルとして押出前及び押出後の構造的安定性を有することと、拡幅押出時・完成時の止水機構も含めて設計を行った。

外力条件としては、トンネル天端での土被り 60m を想定した。また、トンネルの構造条件としては、

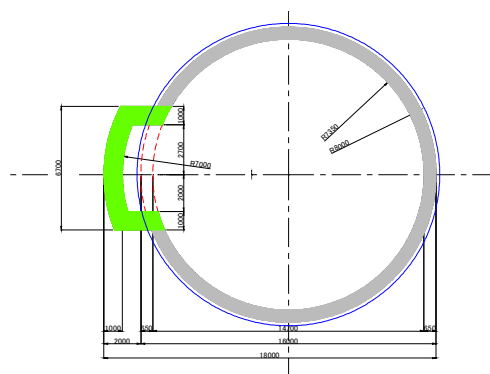


図-6 拡幅トンネル構造概要図



図-7 拡幅セグメント止水試験の概要

大断面トンネル内の非常駐車帯設備を想定し、トンネル内径 14.7m、拡幅部 2m、拡幅高さ 6.7m とした。

二次元及び三次元構造解析の結果、拡幅部は鋼製セグメントとし、セグメント桁高 1m、セグメント幅 1.5m により構造の安定性が確保できる (図-6)。

(2) 拡幅セグメントの止水機構

拡幅セグメントジョイント部はセグメント押出前、押出後及び摺動時において高水圧に対する止水性を確保する必要がある。そこで、止水材料及び止水構造として塗布型の水膨張シールとリップシール型の仮設特殊シールを組み合わせた構造を選定し、模型試験により止水性能を確認した (図-7)。

6. おわりに

大断面トンネルの任意の場所に拡幅空間を構築する技術として開発した部分拡幅シールド工法において、工法の主要要素である拡幅部の掘削機構、地山安定材、拡幅セグメントに関して実施した一連の試験・検討について、主に地山安定材を中心に報告した。今後も実施工を念頭にした詳細な検討を継続していく予定である。

参考文献

- 1) (財)下水道新技術推進機構：充填式シールド急曲線工法 技術マニュアル，2000。