

シールドトンネル施工に用いる新材料

New Shield Tunnel Construction Materials

吉 迫 和 生

要 約

近年、シールドトンネル工事では、都市再開発事業において構築される地下連絡通路のような小土被り条件での矩形や非円形断面の施工、あるいは、道路トンネルのような大断面でも立坑をできるだけ浅くした小土被り発進での施工のように、非常に厳しい条件での工事が増えてきている。このような条件の場合、地盤変状が発生し易く、地表面沈下につながる恐れがある。また、大断面の泥土圧シールドの分野では、従来の掘削添加材（加泥材）に比べて使用量が少なく、排土の処理が比較的容易なことから、掘削添加材として気泡（気泡シールド工法）の採用例が増加している。このような状況を鑑み、今回、地山変状を抑止するための特殊充填材「ボイドキーパー」と、気泡シールド工法に用いる起泡剤「マジカルラスティングフォーム」を新たに開発し、その効果を現場において確認した。本報文では、それら材料の概要と施工実績について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 特殊充填材「新型ボイドキーパー」
- III. 新型起泡剤「マジカルラスティングフォーム」
- IV. おわりに

I. はじめに

従来、シールドトンネルは地山安定の観点や、地山掘進のためにカッターを回転させるという機構の点から円形断面で施工されることが通常であった。しかし、近年、都市再開発事業のように用地幅の制約が厳しい場所において構築される地下連絡通路など、目的構造物の必要形状に合わせて矩形や非円形で施工することも増えてきている (Fig.1)。また、円形の施工であっても2, 3車線の高速道路トンネルや複線の鉄道トンネルなど、10mを超える大断面のトンネルを、立坑をできるだけ浅くして小土被りで発進する施工 (Photo 1) のような、非常に厳しい条件での工事が増えてきている。

シールドトンネルの掘削においては、シールド機本体のスムーズな推進 (周辺地山との摩擦低減) のために、カッターによる地山の切削はシールド機本体の外径よりもわずかに大きく (通常 2~3cm 程度) 行われる。この時にできる隙間を「オーバーカット」と呼ぶが、円形シールドの場合、土のアーチング効果によりシールド機周囲の地山のオーバーカット部への落ち込みを抑えることが期待できる。一方、矩形シールドではシールド機上部が直線状のために土のアーチング効果が働かず、周囲の地山がオーバーカット部に落ち込み易く、それが時間経過とともに連続的に地表面へ進展し、ひいて

は地表面沈下につながる恐れがある。小土被りの場合、この現象がより発生し易くなる。このようなトラブルを避けるために、カッターでの切削直後に、シールド機から充填材を注入する対策を取る場合がある (Fig.2)。

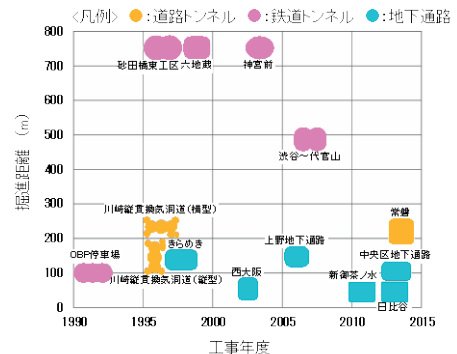


Fig.1 鹿島の矩形・非円形シールドの施工実績¹⁾を修正
(Rectangle and Non-Circular Shield Tunnels Constructed by Kajima)



Photo 1 地上発進の様子
(Launching from the Ground Surface)

キーワード: シールドトンネル, オーバーカット, 充填材, 起泡剤
Keywords: shield tunnel, overcut, grouting materials, foaming agents

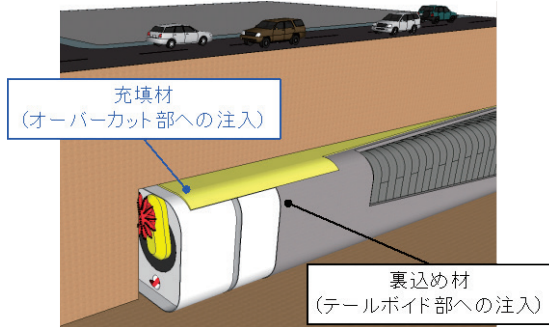


Fig.2 オーバーカット部への充填注入イメージ
(Grout Injection into the Overcut)

また、泥土圧シールド工法の一つとして位置付けられる「気泡シールド工法」は、特殊起泡剤を発泡させて作製した気泡を掘削添加材としてシールド機チャンパー内に注入しながら掘進する工法で、微細なシェービングフォーム状の気泡 (Photo 2) を掘削土と混合させて塑性流動状態 (Photo 3) とすることで切羽の安定を保持し、スムーズな掘進を可能とする。



Photo 2 気泡シールド用の気泡
(Foams for Foam Shield Construction Method)



Photo 3 自立状態 (左) と塑性流動状態 (右) の土砂
(Soil of the Self-Supported State (left) and the Plastic Fluidized State (right))

気泡は従来のベントナイトや高分子材を用いた掘削添加材 (加泥材) と比較して材料の使用量が少なくて済むため、排出土量の削減につながる。さらに、スクリーコンベアから排出された土砂は大気圧下に解放され、含まれていた気泡が消泡することにより気泡混

合前に近い状態に戻り、運搬や処理も容易になる。このようなことから、近年、大断面の泥土圧シールドにおいて気泡シールド工法を採用する事例が増えている。

このように、シールドトンネル工事の施工条件はより厳しく、多様になってきている。当社でもこれらに対応していくため、今回、新たに空隙充填用の特殊充填材「新型ボイドキーパー」と、気泡シールド用の特殊起泡剤「マジカルラスティングフォーム」を開発し、現場適用した。以下に、それらの概要について報告する。

II. 特殊充填材「新型ボイドキーパー」

1. 概要

余掘り部が引き起こす地盤変状への対策として、シールド機に設けた注入孔よりオーバーカット部へ充填材を充填注入する方法がある。当社では、この用途に供する特殊充填材「ボイドキーパー」(以下、旧型ボイドキーパー、VK とも表記) を 2002 年に開発し、これまでに 10 件に及ぶ現場で適用している^{2), 3)} など。

今回、旧型ボイドキーパーに対して施工性、強度を向上させた「新型ボイドキーパー」(以下、VK-KTS とも表記) を新たに開発し、現場で適用した。

2. 新型ボイドキーパーの基本性能

新型ボイドキーパーの特長を旧型ボイドキーパーと比較して Table 1 に示す。新型ボイドキーパーでは、旧型ボイドキーパーの地山保持性を保ちつつ、施工性、強度を向上させる配合を新たに開発した。

Table 1 新型ボイドキーパーと旧型ボイドキーパーの比較
(Comparison between the New Type Void-Keeper and the Old Type One)

	新型ボイドキーパー	旧型ボイドキーパー	評価
施工性	A 液 (主材, Photo 4, 粘性 1~3dPa・s 程度), B 液 (硬化促進剤) の 2 液混合タイプとすることで長距離圧送, 大量施工が可能で, 中口径~大口径のシールドトンネル工事への適用も容易である。	1 液タイプの粘土状のもの (Photo 5) を余掘り部に圧入するので圧送性が悪い。大量製造は難しく中口径以上のシールドトンネル工事への適用は困難である。	向上
地山保持性	注入孔手前で A 液, B 液をミキシングすることによって直ちにゲル化してシールド機通過時には地山を保持するだけの硬さを有する (Photo 6)。	1 液タイプの粘土状のものを余掘り部に圧入することで地山保持効果は高い。	同等
強度	シールド機の通過に必要な柔らかさを 1 週間程度保ち, そこから徐々に強度が発現し 2~3 ヶ月後には地山相当の一軸圧縮強さ (約 600~900kN/m ²) になる (Photo 7, Fig.3)。	掘削機の通過に必要な柔らかさを 1 週間以上保ち, そこから徐々に強度が発現し 2~3 ヶ月後には地山相当の一軸圧縮強さ (約 350~400kN/m ²) になる (Fig.3)。	向上



Photo 4 新型ボイドキーパーの A 液
(Main Material of the New Type Void-Keeper)



Photo 5 旧型ボイドキーパー
(Old Type Void-Keeper)

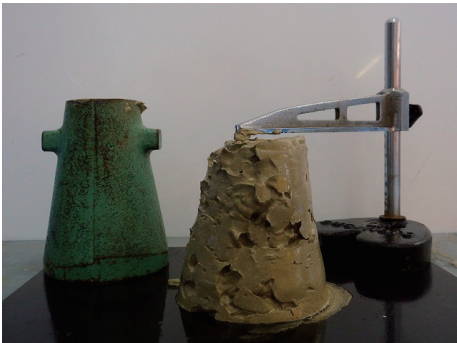


Photo 6 ミキシング直後の新型ボイドキーパー
(New Type Void-Keeper just after Mixing)



Photo 7 固化後の新型ボイドキーパー
(New Type Void-Keeper after Solidification)

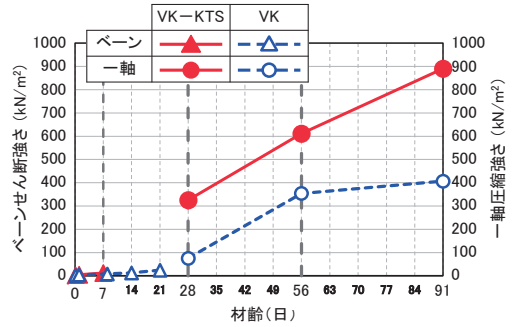


Fig.3 材齢と強度の関係例
(Relationship between Strength and Material Age)

3. 新型ボイドキーパーの現場適用

(1) 工事概要

新型ボイドキーパーを、阪神高速道路常磐工区開削トンネル工事の出口ランプ矩形シールドに適用した。出口ランプ矩形シールドは、高さ 8.09m×幅 8.48m×長さ 9.05m のアポロカッターシールド機 (Photo 8) で、延長 225m を施工した。

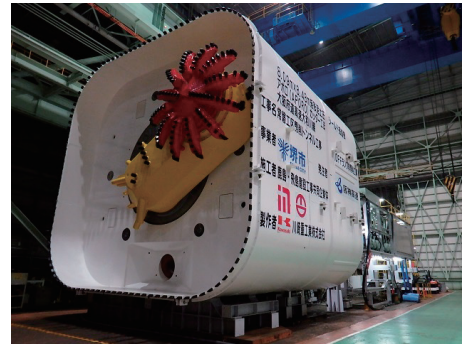


Photo 8 アポロカッターシールド機
(APORO-Cutter Shield Machine)

この工事では、

- 矩形断面でシールド機上部が直線状 (平坦) であること。
- 小土被り (最小土被り 1.5m) 発進であること。
- 本線開削部の土留壁と近接 (セグメントとの離隔約 50cm) して併走すること。
- 周辺は住宅街で、地表面への影響を最小限に抑える必要があること。

などから、シールド機前胴部から掘進と同時にオーバーカット部へ新型ボイドキーパーを充填注入した。また、裏込め注入もシールド機からの掘進同時注入方式を採用した。

掘進地山の地表部は埋土層で、その下層には洪積の砂質土、粘性土、砂礫層が互層で堆積していた。発進部の最小土被りはわずか 1.5m で (Fig.4)、縦断線形は下り 8% 勾配と非常に急であった。小土被り対策として、発進部地表面には高さ 2.5m の押え盛土を施工した (Photo 9)。

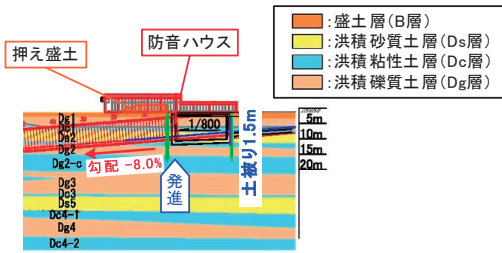


Fig.4 土質縦断面図

(Geological Map with Longitudinal Sections)

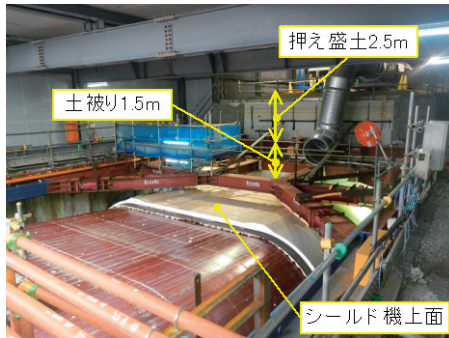


Photo 9 発進部押え盛土

(Counter Weight Fill on the Launching Place)

(2) 施工結果

Fig.5 に地表面沈下測量結果（シールド機が図中の位置まで来た時点でのシールド中心線上での地表面沈下量）を示す。シールド機全長が地山内に入るまでは新型ボイドキーパーを充填することができないため、その区間を含めカッターによるオーバーカットに相当する沈下（最大約40mm）が発生している。一方、新型ボイドキーパーの充填開始以降、沈下量は5~10mm以下に抑制されており、新型ボイドキーパーを充填した効果が出ているものと考えている。事前の影響範囲把握解析では、土被り4m（0.5D相当）の断面においてシールド中心線上で最大21mmの沈下発生が予測されており、それと比較しても小さな沈下量で収まっている。

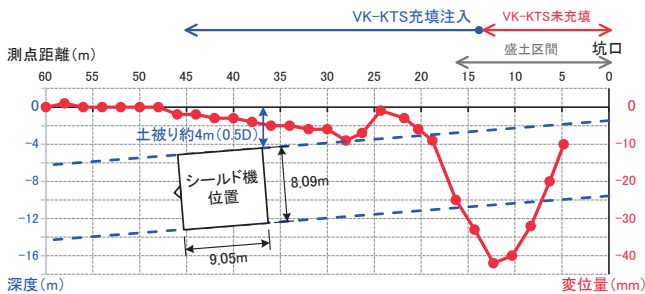


Fig.5 地表面沈下測量結果（シールド中心線上）

(Results of the Survey of the Ground Surface Settlement)

Ⅲ. 新型起泡剤「マジカルラスティングフォーム」

1. 概要

気泡シールドに用いられる特殊起泡剤は、長らくα-オレフィン

スルホン酸塩（AOS）を原料にした材料が用いられてきた。しかし、AOSは魚毒性が強く、掘削土砂を海面埋立てにも利用するシールドトンネル工事では水生環境への影響が懸念されるようになってきた。

このような状況に鑑み、当社では気泡の元となる陰イオン界面活性剤として魚毒性の低い新たな原料を採用し、さらに、起泡力を高めるブースター剤、気泡の安定性を保持する安定剤などから構成される環境負荷の低い新型起泡剤「マジカルラスティングフォーム（MAJIKAL LASTING FOAM）」（以下、MLFとも表記）を開発した。

2. マジカルラスティングフォームの基本性能

(1) 気泡の持続性（耐消泡性）

Fig.6 にマジカルラスティングフォームによって発生させた気泡の持続性確認試験結果を示す。試験は、メスシリンダーに充填した気泡が時間経過とともに液化する量を測定し、残存している気泡量を算出して気泡持続率として示している。図には比較のため従来型起泡剤 a, b による試験結果も併記している。マジカルラスティングフォーム、従来型 a, b とも溶液濃度1%、発泡倍率10倍の条件で発泡させている。

従来型起泡剤で発泡させた気泡はいずれも10分で60%以上、30分で90%以上の気泡が消泡している。一方、マジカルラスティングフォームは30分で50%以上、60分経過時にも20%以上の気泡が残存しており、耐消泡性に優れた材料であることを確認した。

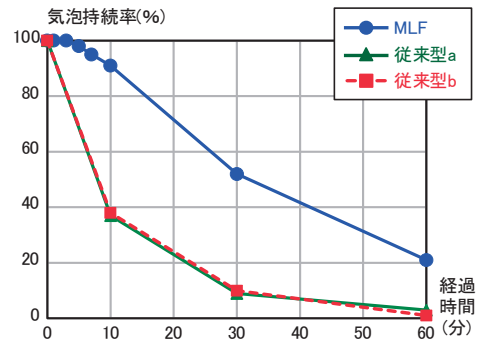


Fig.6 気泡持続率の比較

(Comparison of Sustainability of the Foams)

(2) 起泡剤の水生環境有害性（魚毒性）

Fig.7 にマジカルラスティングフォームの水生環境有害性確認試験（ヒメダカを用いた魚類急性毒性試験）結果を示す。気泡の持続性と同様、図には比較のため従来型起泡剤 a, b による試験結果も併記している。半致死濃度96時間LC₅₀は、その数値が大きいほど毒性が低いことを示している。

マジカルラスティングフォームのLC₅₀は100mg/Lを超えており、従来型起泡剤の3~6倍、魚毒性に優れることが確認できる。また、GHS（Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals；化学品の分類および表示に関する世界調和システム）に基づく化学品の分類方法では100mg/L<LC₅₀であれば有害分類対象外とされており、マジカルラスティングフォームが水生環境に対して負荷の低い材料であることが確認できる。

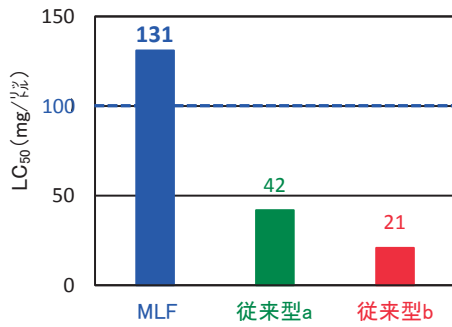


Fig.7 96時間LC₅₀の比較
(Comparison of LC₅₀ at 96hours)

(3) 起泡剤の生分解性

Table 2 にマジカルラスティングフォームの生分解性確認試験 (DOC法; 溶存性有機体炭素 (Dissolved Organic Carbon) 量を指標として生分解性を調べる方法) 結果を示す。7日後の生分解度は66%, 14日後で70%, 28日後で88%であり, 良好な生分解性を有していると判断される。

Table 2 生分解性確認試験結果
(Test Results of Biodegradability)

経過日数	7日	14日	28日
生分解度	66%	70%	88%

(4) 起泡剤の植物に対する生育障害性

植物の生育障害性を確認するため, 小松菜の発芽と, 発芽後の生育への障害の有無, および, その程度を確認した。試験は, マジカルラスティングフォーム 1%溶液を8倍発泡させた気泡を, 土に対して10, 30, 50%の割合 (体積比率) で混合し, 小松菜の種を撒いて生育状況を確認した。

Photo 10 に播種18日後の状況を示す。いずれのケースも, 気泡を混合しないものに対して同等の発芽率, 草丈, 生体重を示し, 葉の黄化, しおれなども見られず, 生育障害は認められなかった。



Photo 10 小松菜の生育状況
(Growth Situation of Japanese Mustard Spinach)

3. マジカルラスティングフォーム混合土の力学的性状評価

気泡混合土の力学的性状を評価する指標として, ベーンせん断強さと, ポリマーセメントモルタルの試験に用いられるスランブコン (上端内径 50mm, 下端内径 100mm, 高さ 150mm) を用いたスランブ値 (以下, ミニスランブ値と呼ぶ) を測定した。評価に用いた試料土は, 阪神高速道路大和川線シールドトンネル工事で採取したもの (最大礫径 19mm, 砂分: 51.2%, 細粒分含有率: 27.5%) を用いた。試験はマジカルラスティングフォームのほか, 比較のために従来型起泡剤 a でも実施し, とともに溶液濃度 1%, 発泡倍率 10 倍の気泡を作製し, 試料土と混合した。

Fig.8 にベーンせん断強さ, Fig.9 にミニスランブ値の測定結果を示す。試料土に対する気泡の混合率は, マジカルラスティングフォームで 25%, 従来型 a で 30%と, マジカルラスティングフォームの方を 5%少なく設定した。

その結果, マジカルラスティングフォームのベーンせん断強さは従来型と同等以下の値, ミニスランブ値は同等以上の値を示し, マジカルラスティングフォームの方が 5%少ない使用量でも従来型と同等以上の塑性流動性を示すことを確認した。また, 3 時間経過後にはそれぞれ従来型と同等の測定値となった。これは, 気泡の消泡が進んで塑性流動性が低下したことを表している。以上よりマジカルラスティングフォームは, 現場において運搬処理する場合にも, 従来型と同様に容易に処理できることが分かった。

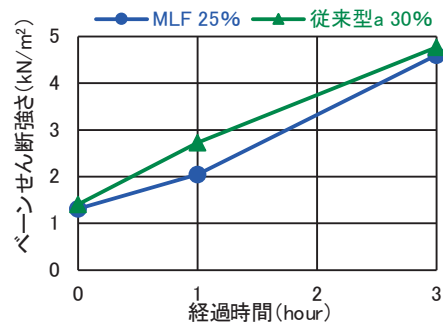


Fig.8 ベーンせん断強さの比較
(Comparison of Vane Shear Strength)

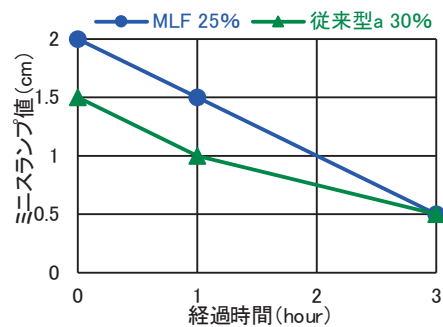


Fig.9 ミニスランブ値の比較
(Comparison of Mini-Slump Test)

4. マジカルラスティングフォームの現場適用

(1) 工事概要

阪神高速道路大和川線シールドトンネル工事（シールド機外径12.47m、延長約2kmの往復で全長約4km）のうち、復路の最終約900m区間を対象にマジカルラスティングフォームを使用した。当該区間は砂泥互層地盤で、粘性土優勢～砂質土優勢と変化していたが（Fig.10）、気泡の発泡倍率、注入率を調整することにより、良好な排土状態で掘進をすることができた（Photo 11）。

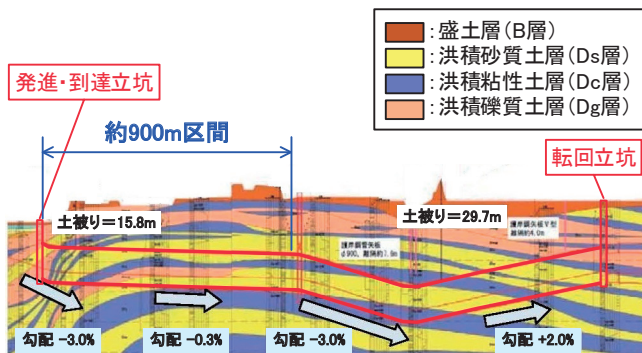


Fig.10 土質縦断面図

(Geological Map with Longitudinal Sections)



Photo 11 現場での排土状況

(Muck at the Construction Site)

IV. おわりに

シールドトンネル工事は、1995年には約250件/年の工事が発注されていたが、最近5年間は約50件/年程度で推移しており、工事件数は減少している。しかしながら、近年、開発が進んだ都市部では、従来、開削工法で施工されていたような浅層部の工事を、既設埋設物を避けるために非開削（シールド工法、大口径推進工法）で実施することも増えてきた。また、大深度地下活用の観点から、これまでにあまり経験のない硬質の洪積層、高い地下水圧の土層を長距離で施工する工事も増えている。さらに、これまであまりシールド工事が行われていなかった地方部でもシールド工事が採用されるなど、未知の地盤条件、施工条件での工事の割合が増えている。

これらに対応していくためにも、今後もシールドトンネルに関する技術開発を進めていく必要がある。

謝 辞

本報告に記載した新技術を導入、施工の場を提供して頂いた発注者、現場の皆様には謝意を表し、結びとする。

参考文献

- 1) 鹿島建設株式会社；シールド工法パンフレット，2016.
- 2) 石川ら；阪神なんば線併設シールドの近接施工 その2(施工実績)，土木学会第63回年次学術講演会講演集，6-022，2008，pp.43-44.
- 3) 吉弘ら；営業線直下でのR&C工法を用いたアンダーパス工事，土木建設技術発表会概要集，2010，pp.137-144.

New Shield Tunnel Construction Materials

Kazuo Yoshizako

In recent years there has been an increase in demand for shield tunneling works with severe conditions, including underground connecting passages with little overburden, rectangular and other noncircular tunnels, and shallow road tunnels with a large cross section and little overburden. Such works often result in collapse of the ground into the overcut volume, causing subsidence of the ground surface.

In addition, in the field of large-cross-section EPB (Earth Pressure Balanced) shield construction, a reduction in the amount of excavation additives (mud material) used and the comparatively easy treatment of excavated soil waste have led to an increase in the use of foam agents (foam conditioned EPB method).

In view of this situation, the author has developed a new grouting material, Void-Keeper, for grouting overcut voids, and a foam, Magical Lasting Foam (MLF), for use in the foam shield construction method, and has confirmed the effectiveness of these materials on construction sites.