

超低土被り施工を可能とする ルーフ プロテクト シールド工法の掘進実証試験

小林 信明、小林弘太郎、廣末 龍文、高島 良*¹、中根 隆*²

Keywords: shallow depth, grade separation, underpass, traffic jam, tunneling near existing underground facilities, shield machine

低土被り，立体交差，アンダーパス，交通渋滞，近接施工，シールド機

1. はじめに

本工法の特徴は、図-1 に示すようにシールド機の上部に装備した先受け機構としての「ルーフプロテクター」により、シールド掘進時の切羽の緩みを遮断し、地盤変状を抑制し、トンネル等の超低土被り施工を可能とすることである。



図-1 工法イメージ図
Conceptual Drawing of This Method

このルーフプロテクターには、低土被り掘進時の地盤変状を防止するために、一般の泥土圧式シールド工法と同様の掘削・排土・土圧調整機構が組み込まれているが、従来と形状や規模は異なる。そこで、これらの機構が、超低土被り施工時に必要である高精度な土圧値で制御可能であることを実証するために、当社と石川島播磨重工業株式会社は2002年12月に掘進試験を行った。

本論文では、ルーフ プロテクト シールド工法の概要と超低土被り施工時における泥土圧管理に関する数値解析検討、並びに掘進実証試験の内容及び結果について報告する。

* 1 成和コンサルタント株式会社
* 2 石川島播磨重工業株式会社

2. 工法の概要

本工法は、前述の通りシールド機の上部に装備した庇状のルーフプロテクターにより、トンネル等の超低土被り施工を実現するものである。この庇状のルーフプロテクターは、トンネルのフォアパイリングやパイプルーフト同様の切羽の先受け機構であり、切羽を常に先受けしながら、地中を掘削するためのものである。

通常、土被りはシールド機の直径1D以上必要とされており、本工法は土被り1D未満の低土被りや0.5D以下の超低土被りを対象とし、ルーフプロテクターの他、「外面摩擦低減工」、「最適裏込注入機構」、「シールド機姿勢制御機構」の低土被り対策技術から構成されている。

低土被り掘進時の切羽安定機構を以下に示す。

①密閉型ルーフ プロテクト シールド機

図-2 に示すようにシールド機本体掘進時に発生する切羽の緩みを、ルーフプロテクターで機械的に遮断することで、地表面への地盤変状の影響を防止する。ルーフ長は、対数螺旋式による切羽の緩み範囲としている。

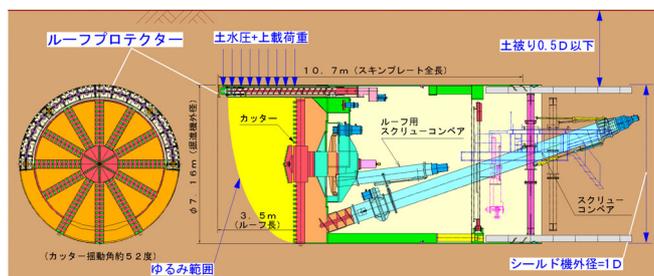


図-2 工法概要図(密閉型)
Explanation of This Method(Closed Type)

②開放型ルーフ プロテクト シールド機

図-3 に示すように主動土圧崩壊線をルーフプロテク

ターで機械的に遮断することで、地表面への地盤変状の影響を防止する。更に、円弧滑りによる滑りの安全率も大きくなり、これらのルーフ効果によって、地盤改良規模を低減することが出来る。ルーフ長は、円弧滑りに対する安全率が1.2以上となるように設定する。

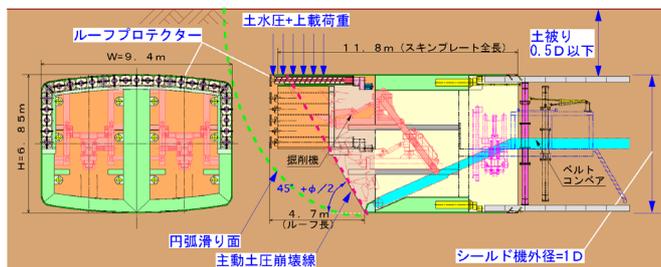


図-3 工法概要図 (開放型)
Explanation of This Method(Open Type)

本工法の主な適用範囲とその効果を以下に示す。

- ①超低土被り施工が可能のため、立体交差施設においてアプローチ部の延長短縮が図れ、立坑の浅深度化によるトータルコストの低減が可能。
- ②シールド工法であるため、従来の非開削工法と比較し、長距離施工及び曲線施工が可能。開放型では、地中障害物撤去も容易。
- ③低土被り対策技術を装備しているため、従来の非開削工法やシールド工法と比較し、地盤改良の規模を縮小し、コストの低減が可能。
- ④開放型では、矩形シールド機の断面を縦横方向に変型とし、任意の断面を構築し、転用可能となることでトータルコストの低減が可能。
- ⑤多様なシールド機 (密閉型、開放型、円形、矩形) にルーフプロテクターの取付が可能。ルーフプロテクターには、可動式、固定式、一体式の3種類があり、用途に応じた使い分けが可能。

3. 泥土圧管理に関する数値解析検討

3.1 目的と概要

(1) 目的

一般的な泥土圧式シールド工法では、「泥土圧 = 土圧 + 水圧」となるように土圧管理値を設定する。その管理土圧 P は通常、「主働土圧 + 水圧 $< P <$ 静止土圧 + 水圧」のように、水平土圧として上限値と下限値から設定されている。しかし、低土被り施工時は、切羽直上付近の地盤において、沈下や隆起 (噴発) が生ずる恐れがある。このため従来行われている水平土圧による土圧管理

の他に、鉛直土圧を考慮した土圧管理が必要となる。しかし、現状では、鉛直土圧を考慮した土圧の管理基準が明確にされていない。そこで、低土被り施工時の3次元線形弾性FEM解析を行い、鉛直土圧も考慮した管理土圧の上限値と下限値をそれぞれ求めた。

(2) 概要

本検討では、低土被り施工時の密閉型ルーフ プロテクト シールド機での、ルーフプロテクター先端部の泥土圧に対する地盤変状、応力解析を行い、その結果を基に地盤変状を発生させない泥土圧の限界値すなわち管理土圧の上限値と下限値を求めた。

泥土圧の下限値は、シールド掘進時に切羽の土水圧に対抗する泥土圧が不足し、地盤が破壊し緩むことのないように設定しなければならない。そこで、諸条件下での地盤の破壊安全率を解析によって求め、この破壊安全率が1.0となる泥土圧を下限値とした。

泥土圧の上限値は、シールド掘進時の泥土圧が過大で、地盤の隆起や泥土・泥水の噴発のないように設定しなければならない。この泥土・泥水の噴発する状態とは、地盤内に発生する最大主応力が引張側となる状態と考えられるため、この最大主応力が引張域に存在しない泥土圧の最大値を上限値とした。

地盤の剛性によっては、泥土圧が限界値内であっても地表面の地盤変位量が許容を超え、大きく発生することも想定される。泥土圧の限界値を決めるに当たり、どちらが卓越しているか確認するために、地表面の地盤変位量の検討も行った。

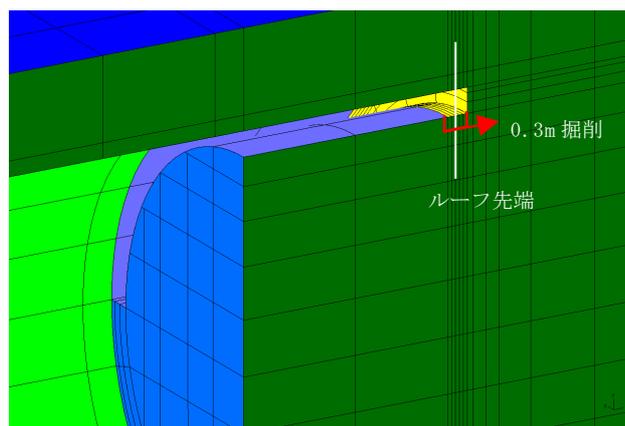


図-4 解析モデル
Numerical Model

3.2 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデル

図-4 に示すように解析モデルは、参考文献 1) に記載の開発当初に行った「地盤変状解析」の密閉型ルーフ

プロテクト シールド機の場合と同様とし、ルーフプロテクター先端部については、メッシュ分割をより細かく設定した。

(2) 解析条件

固定パラメータとして、1. 土被り (1.5m)、2. 地表面永久荷重、3. シールド機等構造諸元、4. 土質定数を設定した。また、変動パラメータとして、1. ルーフプロテクター先端部の切羽の泥土圧、2. 地表面活荷重、3. 泥土の物性値を設定した。

3. 3 解析結果

1) 泥土圧の下限値

上載荷重 10kPa の土被り 1.5m での砂質土地盤の破壊安全率の分布図を図-5 に示す。この分布図で示すように、緩みや噴発等の掘削による影響範囲は、泥土圧が静止土圧である 20kPa の時に最も小さい。そこで、泥土圧が静止土圧の時の破壊安全率が 1.0 以上であることを確認し、粘性土の場合も同様の結果が得られた。以上より、低土被り施工時での泥土圧の下限値は、静止土圧程度であると言える。

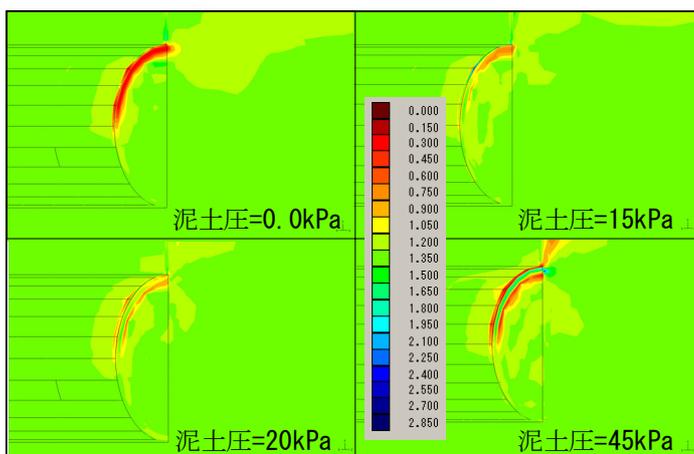


図-5 破壊安全率分布図
Distribution of Safety Factor

2) 泥土圧の上限値

図-6 に示すように、砂質土地盤の場合、ルーフプロテクター先端部の泥土圧が鉛直土圧 40kPa の 1.2 倍の約 48kPa を超えると、地盤の最大主応力 $\sigma_1 > 0$ となり地盤内に引張応力が発生し、地盤の隆起や噴発の恐れが生じる。粘性土地盤の場合も同様に、鉛直土圧 37kPa の 1.1 倍の約 41kPa を超えると、地盤の最大主応力 $\sigma_1 > 0$ となる。以上から、低土被り施工時での泥土圧の上限値は鉛直土圧程度であると言える。

3) 地表面の地盤変位量

今回の解析の地盤条件では舗装や路盤を考慮せず、均一な軟弱地盤としているため、上載荷重の影響を大きく受け、掘削していない状態でも地表面で沈下が発生した。

そこで、図-7 ではこの沈下量との差分、すなわち相対変位量で示した。泥土圧の付加による変位は、どのケースにおいても 1mm 程度以下であった。よって、今回の解析では泥土圧の管理値は地表面の地盤変位量より決定されない。

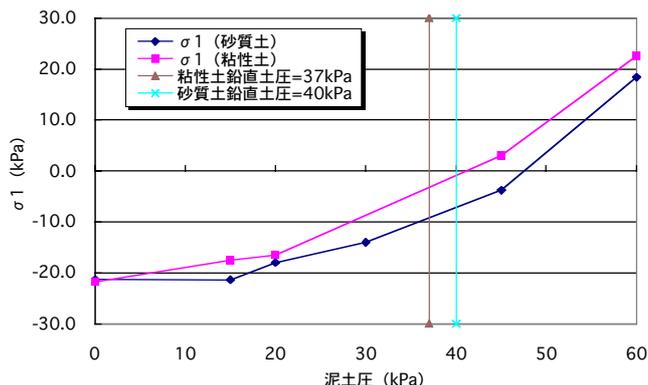


図-6 解析結果 (最大主応力)
Results of Analysis (Stress)

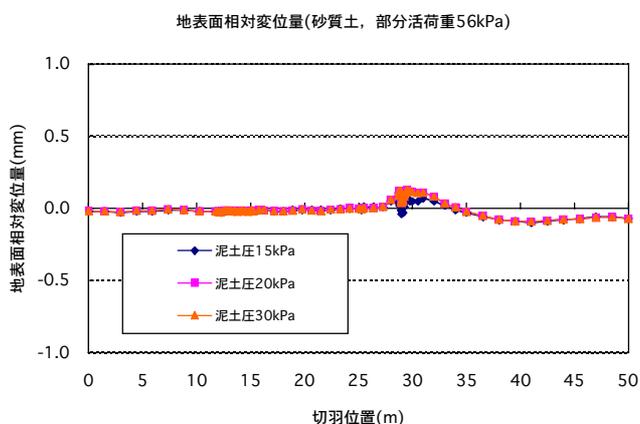


図-7 解析結果 (地表面沈下量)
Results of Analysis (Settlement)

以上より、上載荷重を 10kPa とし、砂質土地盤で土被り 1.5m の超低土被り施工時の場合、ルーフプロテクター先端部の管理土圧は、下限値が静止土圧より 20kPa、上限値が鉛直土圧より 40kPa と各々算定される。したがって管理土圧の変動幅は ±10.0kPa 以内となり、超低土被り施工時には非常に高精度な土圧制御が必要であることがわかる。

4. 掘進実証試験

4.1 目的と概要

(1) 目的

ルーフプロテクターは一般の泥土圧式シールド工法と同様の掘削・排土・土圧調整機構が組み込まれている。従来とは形状や規模の異なるこれらの機構が、前述の3次元FEM解析により算出した、超低土被り施工時に必要な高精度土圧値で制御可能であることを実証するために掘進試験を行った。

(2) 概要

ルーフ プロテクト シールド実機のルーフプロテクターと同様の掘削・排土・土圧制御機構を装備した幅 500mm、高さ 1300mm の小断面形状の試験機を 1 台製作し、2002 年 12 月に大型実験土槽により、粘性土及び砂質土での掘進実証試験を行った。その試験状況を写真-1 に示す。



写真-1 試験状況
Overview of Demonstration Test

今回の試験は、低土被り施工時の地表面の地盤変状を計測するものではなく、低土被り施工時に必要な高精度な土圧制御が行えるかを確認するものとした。その理由は、管理土圧以内で高精度に土圧を制御し、スムーズに排土が行えれば、地表面の地盤変状を抑制できるからである。

4.2 ルーフプロテクター試験機的设计

4.2.1 概要

本試験はルーフ プロテクト シールド工法を実証するために行うものであるから、写真-2 及び図-8 に示す掘削試験機は、実機のルーフプロテクターの一部の断面を取り出した形状とした。その形状を縦型とした場合、掘削した土砂が鉛直下方に重力落下し、チャンバー内での攪拌翼による混練り効果の低下すなわち塑性流動化不足

で土圧制御しにくい状況となる可能性が大きい。よって、最も土圧制御しづらい形状として、縦型を選定した。

4.2.2 試験機

(1) 試験機本体

長さ 500mm、幅 50mm の一文字状カッター3 基が回転時に互いに干渉しない機構とした。切羽側から装置を見て、それぞれのカッターの切削軌跡内の隔壁部に加泥材注入孔を 3 箇所、隔壁上下に土圧計を 2 箇所設置した。掘進時の受台、転倒防止架台、反力装置の兼用と輸送・組立・移動性から、試験機本体をH鋼等で周囲を取り囲む構造とした。



写真-2 試験機全体
Experiment Machine

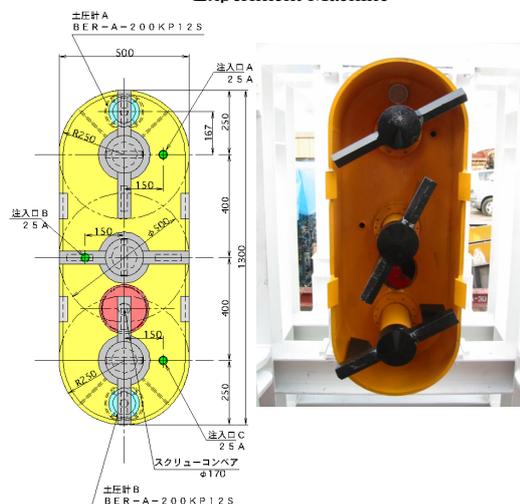


図-8 試験機正面
Front View of Experiment Machine

(2) カッター

チャンバー内の土砂を確実に混練し、塑性流動化させるため、それぞれのカッター背面に攪拌翼を設けた。攪拌翼の回転速度が速い程、混練効果が大きくなるため、試験でのカッターの回転速度は通常のカッターの周速2倍程度で回転させた。カッター回転時に掘削土砂の流動

性を確保するため、攪拌翼先端部を切り欠いた形状とした。

カッター位置は、未切削領域を最小とするように、個々のカッターを互いに寄せるように配置した。そのため、カッター回転駆動は1台の油圧モーターから、3基のカッターロッドに設置されたスプロケットに、チェーンで伝達し機械的に同期する構造とし、カッターの干渉防止を図った。

(3) スクリューコンベア

スクリューコンベアには通常の軸付フライトを採用した。スクリューコンベアの下流にゲートバルブを設置し、バルブ開度調整可能な仕様とした。

(4) 土圧計

低土被り施工時を対象とした試験であるため、切羽土圧を高精度に検出するために定格容量 200kPa、測定精度 2kPa の精密な壁面土圧計を採用した。

(5) 推進装置

試験機本体の推力用として、500kN ジャッキを2本設置した。推進反力は、試験機前面に設置した接続プレートを、試験土槽のH鋼とボルトや万力で接続することで、試験土槽の自重から確保した。

4. 2. 3 パワーユニット

カッター回転、スクリューコンベア回転、ジャッキ推進は全て油圧で駆動を行った。回転数、推進速度の調整はパワーユニットに設置されているフローコントロールバルブにより作動油量を手動調整した。

4. 3 掘削地盤の選定

掘削地盤は地山相当地盤を想定し、流動化処理土による人工地盤を作成した。

流動化処理土の物性は、砂質土系と粘性土系の2種類とした。砂質土系は細骨材(川砂)、泥水、固化材(セメント系特殊土用固化材)、粘性土系は泥水、固化材(セメント系特殊土用固化材)による配合を行った。

N値で5~10程度の地盤とするために、設定一軸圧縮強度を $\sigma_{28}=150\sim 200\text{kN/m}^2$ とし、予備試験を行った。予備試験での目標強度を $\sigma_{28}=50, 200\text{kN/m}^2$ の2水準とし、砂質土系を5ケース、粘性土系を6ケースの試験により、以下の表-1に示す試験時の計画配合を決定した。

4. 4 加泥材の選定

本試験では砂質土系には粘土付与用として水溶性高分子系の加泥材、粘性土系には付着防止用として界面活性剤系の加泥材を選定した。

選定に当たっては、対象土質を前述の流動化処理土(材令28日)とし、参考文献2)の泥土加圧シールド工法協会の積算資料により、砂質土系と粘性土系について

各々濃度と注入率を算定し予備試験を行った。この結果から以下の表-2に示す試験時の計画配合を決定した。

表-1 流動化処理土計画配合(1.0 m³当り)
Planned Mix Proportion

	泥水 (L)	硬化材 (kg)	細骨材 (kg)	遅延剤 (kg)
砂質土系	818	100	401	2.1
粘性土系	960	120	—	1.8

表-2 加泥材計画配合
Planned Mix Proportion

	加泥材種類	水溶液濃度 (%)	地山土量に対する注入率 (%)
砂質土系	水溶性高分子系	1.50	25
粘性土系	界面活性剤系	0.05	10

4. 5 掘進実証試験計画

試験装置の全体を図-9及び写真-3に示し、当試験の全体計画を以下に記す。

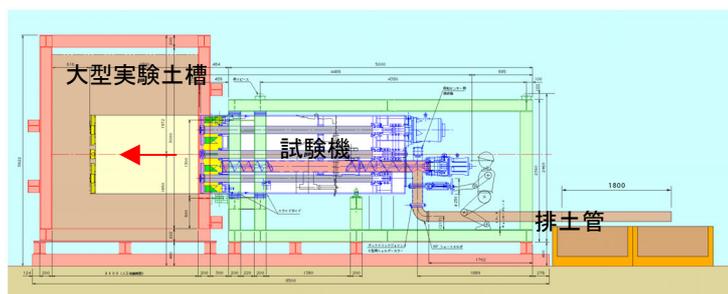


図-9 試験装置
Experiment Devices



写真-3 試験装置
Experiment Devices

(1) 試験土槽及び人工地盤

試験土槽は山留材、鉄板、矢板等を用いた構造で中央部を仕切り、左右に各々粘性土系と砂質土系の流動化処

理土を 50 m³ずつ打設する。また、掘進試験機による掘削時の土被りを 1m とし、有効掘進ストロークを 1700mm とし、掘進終了後の水平移動により計 10 回掘削可能なものとした。

(2) 掘進手順

通常の泥土圧式シールド工法と同様の下記手順で試験を行う。1. ゴムパッキン式のエントランスを設置後、鏡割を行い、掘進試験機を発進させる。2. 試験土槽中を掘進速度 30mm/分に設定し、加泥材を注入しながらジャッキ推進し、掘削する。3. 掘削土砂を混練り・塑性流動化させ、切羽土圧を制御しながら、排土を行う。

(3) 設定項目及び測定項目

試験前の設定項目を以下に示す。

掘進速度、加泥材注入量、カッター回転数、設定土圧
試験実施時の主な測定項目を以下に示す。

土圧値、スランプ値、排土量、スクリー回転数、
ゲート開度

(4) 設定管理値

試験実施時の設定管理値を以下に示す。

- 1) 前述の 3 次元 F E M 解析結果の管理土圧変動幅 ± 15.0kPa に対して、変動圧の管理値を ± 7.5kPa 以内とし、高精度な土圧制御の実証を目標とした。
- 2) 排土スランプ値を 12~19cm とし、ルーフプロテクターによる確実な塑性流動化の実証を目標とした。
- 3) 定常掘進速度を 30mm/min とし、スムーズな排土の実証を目標とした。

4. 6 試験結果

砂質土の場合の土圧制御結果を図-10 に示す。

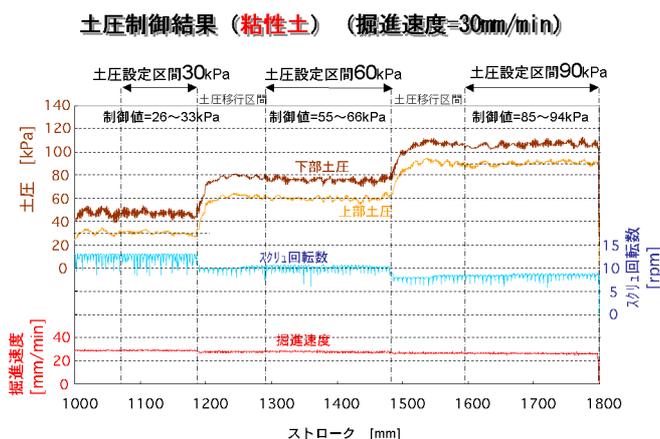


図-10 切羽土圧の制御結果
Results of the Chamber-Pressure Control

上図は、掘進速度一定で掘進し、スクリー回転数を調整し、予め定めた土圧設定値に土圧をスムーズにコントロール出来ていることを示している。

粘性土の場合も同様であり、土圧制御結果を表-3 にまとめた。

試験結果を以下に記す。

- (1) 土圧設定値に対するルーフプロテクター先端部での土圧の変動幅を ±3~6kPa にて制御でき、高精度な土圧制御を実証した。この数値は、通常のシールド掘進時の土圧変動値が 30kPa であるから、通常の 5~10 倍の精度であると言える。
- (2) 排土スランプ値が 18cm 程度であり、ルーフプロテクター先端での掘削土砂の確実な塑性流動化を実証した。
- (3) 定常の掘進速度 30mm/min にて試験を実施し、スムーズに排土出来ることを実証した。

表-3 切羽土圧の制御結果

Results of the Chamber-Pressure Control

土質	設定土圧 (kPa)	粘性土			砂質土		
		30	60	90	30	60	90
土圧	制御値	26~33	55~66	85~94	26~34	54~64	84~95
	変動幅 (kPa)	+3	+6	+4	+4	+4	+5
		-4	-5	-5	-4	-6	-6
スクリー回転数	制御値	13.0	10.3~10.5	8.5~8.8	13.8~14.0	12.8~13.3	12.0~12.8
	平均値	13.0	10.4	8.7	13.9	13.1	12.4

試験の結果、通常の泥土圧式シールド機とは形状や規模の異なるルーフプロテクターであっても、高精度な土圧制御を実現した。従来の一般的な泥土圧理論が「ルーフプロテクト シールド工法」にも適用されることが実証されたことより、本工法の超低土被りでの安定掘進が確認されたと言える。

5. おわりに

アンダーパスによる立体交差化工法として、業界に先駆けて開発した本工法は、低土被り対策技術を装備しているため、近接施工工事など幅広く適用できる。様々な技術を駆使し、トータルコストダウンを可能とした本工法を都市再生事業に大きく貢献できる工法として積極的に提案し、早期実用化を目指している。

参考文献

- 1) 小林信明他, 超低土被りを施工可能とするシールド機の開発, 大成建設技術センター報, 第 34 号, 2001。
- 2) 泥土加圧シールド工法協会, 泥土加圧シールド工法積算資料, 昭和 61 年 6 月