

25. 低土被りシールド機の開発と掘進実証試験の実施

大成建設㈱：*小林 弘太郎、石川島播磨重工業㈱：中根 隆

1. はじめに

交差点部や開かずの踏切部の交通渋滞解消は社会のニーズであり、国や地方自治体等の重要な施策の一つとなっている。しかし、その工事により更なる渋滞が長期間発生し、工事着手出来ない場合が多く、渋滞を発生させずに立体交差施設を構築する技術が要求されている。そこで、渋滞発生の少ない非開削工法であるシールド工法で、超浅深度施工を可能とするルーフ プロテクト シールド工法を開発した。本工法の特徴は、図-1 に示すようにシールド機の上部

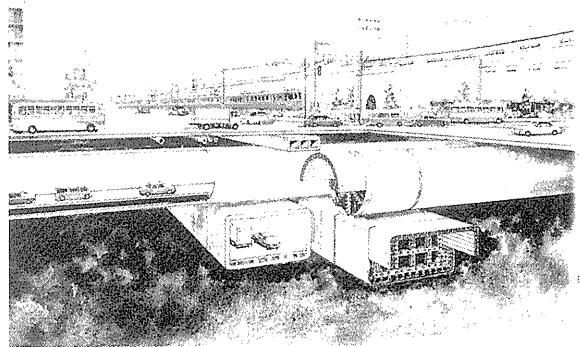


図-1 工法イメージ図

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。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。

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と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。本工法は、この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。

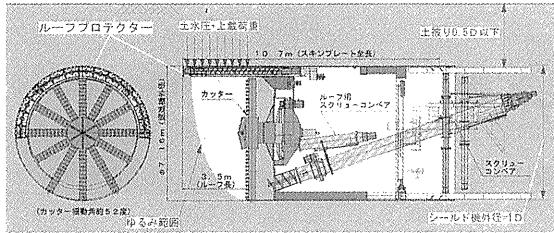


図-2 工法概要図（密閉型）

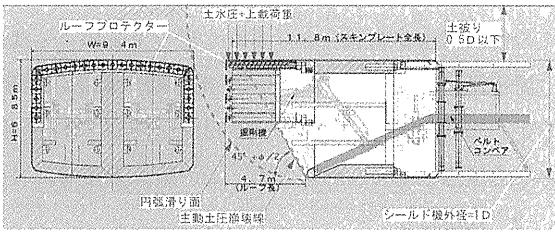


図-3 工法概要図（開放型）

②開放型ルーフ プロテクター 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。

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なため、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可変型とし、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けが可能。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

一般的な泥土圧式シールド工法では、通常、「主動土圧 + 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。ところが、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。そのため、図-4 に示す解析モデルにて、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ルーフプロテクター先端部の管理土圧の上限値と下限値を各々求めた。

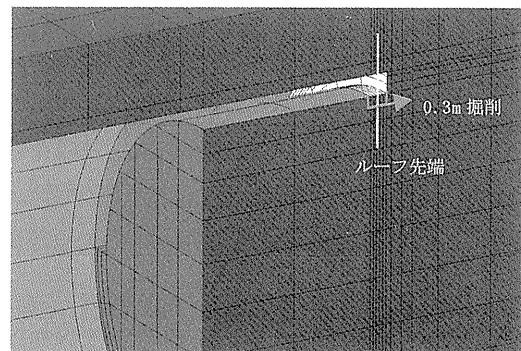


図-4 解析モデル

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。

3. 2 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。

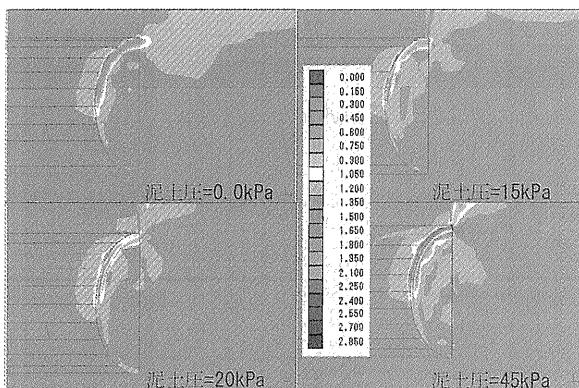


図-5 破壊安全率分布図

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であると言える。

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。

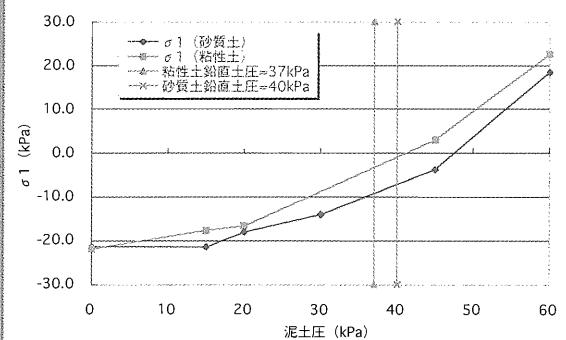


図-6 解析結果（最大主応力）

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的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。

4.2 ルーフプロテクター試験機の設計

(1)試験機本体

写真-2及び図-7に示す試験機は、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。

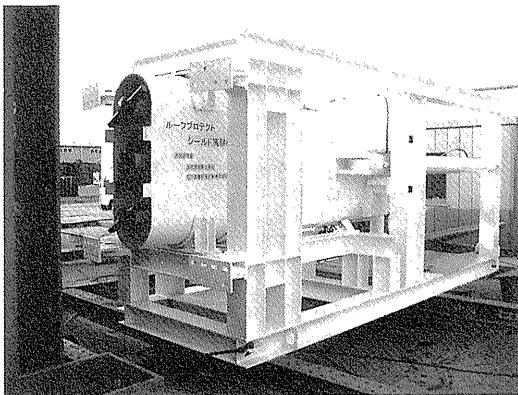


写真-2 試験機全体

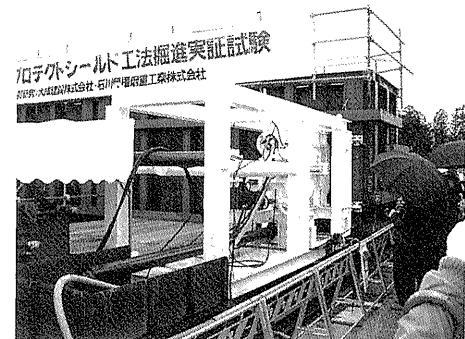


写真-1 試験状況

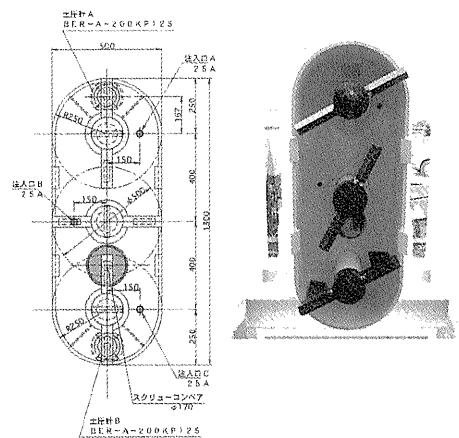


図-7 試験機正面

(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。混練効果を大きくするため、試験時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。

(6) パワーユニット

カッターワーク、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。その物性は、砂質土系と粘性土系の 2 種類とし、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 $\sigma_{28}=150\sim200\text{kN}/\text{m}^2$ とし、予備試験を行った。その結果から以下の表-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、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当たり)

| | 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

| | 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-8 及び写真-3 に示し、当試験の全体計画を以下に記す。

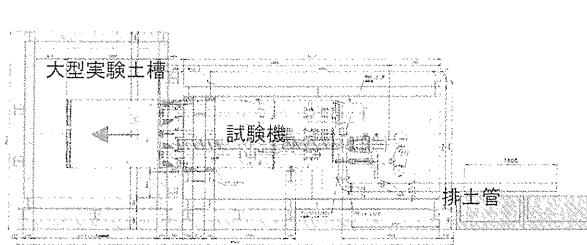


図-8 試験装置

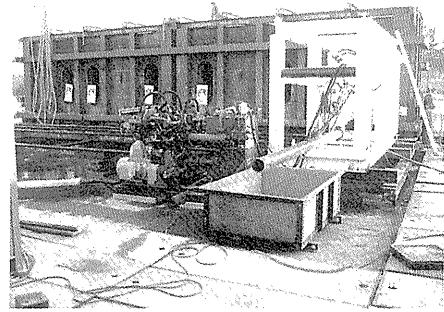


写真-3 試験装置

(1) 試験土槽及び掘進手順

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ずつ打設した。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。

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った。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/min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、排土を行った。

(2) 設定管理値

1) 前述の3次元FEM解析結果の管理土圧変動幅±10.0kPa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指とした。

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指とした。

3) 定常掘進速度を30mm/minとし、スムーズな排土の実証を目指した。

4. 6 試験結果

砂質土の場合の土圧制御結果を図-9に示し、粘性土も含めた全体の土圧制御結果を表-3にまとめた。

下図は、掘進速度一定で掘進し、スクリューの回転数を調整し、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。

(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。

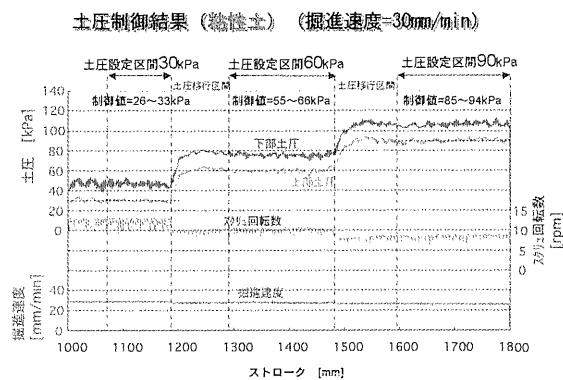


図-9 切羽土圧の制御結果

表-3 切羽土圧の制御結果

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「ルーフプロテクターシールド工法」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。

| 七 質 | | 粘 性 土 | | | 砂 質 土 | | |
|----------|------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 土 圧 | 設定土圧 [kPa] | 30 | 60 | 90 | 30 | 60 | 90 |
| | 制御値 | 26~33 | 55~66 | 85~94 | 25~34 | 54~64 | 84~95 |
| | 変動幅 [kPa] | +3 -4 | +6 -5 | +4 -5 | +4 -4 | +4 -6 | +5 -6 |
| スクリュー回転数 | 制御値 | 13.0 10.3~16.5 | 10.4 8.5~9.8 | 8.7 13.8~14.0 | 13.9 12.8~13.3 | 13.1 12.0~12.8 | 12.4 |
| | 平均値 | 13.0 | 10.4 | 8.7 | 13.9 | 13.1 | 12.4 |