

メカニカルブラインドシールド工法（土圧バランス型シールド）

の現況と施工上の問題点

——84件の実績調査——

斎藤 二郎 羽生田 吉也
藤原 紀夫 山下 幸夫

Present Status and Problems in Construction by Mechanical Blind Shield Method (Soil Pressure Type Shield)

——Investigation of Performances in 84 Projects——

Jiro Saito Yoshinari Hanyuda
Toshio Fujiwara Yukio Yamashita

Abstract

The purposes of the study reported in this paper are to grasp the present status in construction by the mechanical blind shield method, and further, to obtain any effective detail useful for design and construction planning. The authors thus investigated the particulars of 84 construction projects and analyzed the capabilities of shield machines and results of construction, mainly in connection with soil classifications. Consequently, the principal capacities of machines such as cutter torque, amount of soil discharged by screw conveyor, jack thrust and opening ratio of cutter slit were clarified. Problems in construction such as impossibility of discharge due to arch action and how to control excavation are also considered in this paper.

概 要

この報告の目的はメカニカルブラインドシールド工法の施工現況を把握し、今後の設計・施工計画に対する有力な資料とすることにある。そのため84件の工事内容を調査して、主に土質との関連を中心に、シールド機械の装備能力と施工実績などの分析を行った。その結果、カッター駆動トルク、スクリュウコンベヤの排土量、シールドジャッキ推力、およびカッタースリット開口率などの主要な装備能力が明らかになった。またこの報告ではアーチアクションによる排土不能の状態、掘進制御の方法をはじめとする施工上の問題点についても考察を加えている。

1. まえがき

メカニカルブラインドシールド工法（土圧バランス型シールド）は、掘削土を利用した切羽の安定機構に大きな特長があり、近年特に注目を集めている。現在までの施工実績は直径8mを超える大断面シールドから、小断面の推進管に至るまで、施工中のものまで含めるとすでに100件を超えている。ただしこの工法は実施に移されてからまだ数年しか経ておらず、着実な進歩をとげている反面、早急に解決しなければならない施工上の問題点も多い。従ってこれらの問題点を整理し、順次解決すべ

く研究を続けて行く必要がある。

ここではメカニカルブラインドシールド工法に関してすでに工事が完了しているもの、または現在施工中か近近発進が予定されているものも含めて、入手できた84件の施工例を比較しながら、それらの現況と施工上の問題点について考えてみることにする。

2. メカニカルブラインドシールド工法の特長

この工法は掘削土を充満させ切羽の崩壊を防止するという機構上、原理的にはブラインドシールド工法の延長と考えられるもので、切羽での掘削型式を機械掘りとし

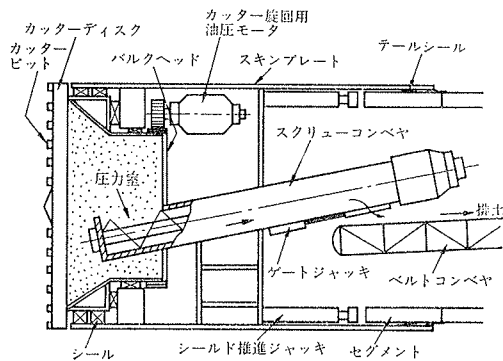


図-1 メカニカルブラインドシールド概略図

しかも圧力室後方に取り付けられたスクリュウコンベヤによって強制排土させることにより、その適用地盤の拡大をはかったものである(図-1)。この工法の特長をまとめると次のようになる。

- (1) 密閉式シールド工法としての安全性が高い。
- (2) 適用可能な土質範囲が広く、自立性のない粘性土から砂地盤までかなり広範囲な地盤で施工が可能である。
- (3) 同じ密閉式シールド工法として多く実施されている泥水シールド工法に比べて、土砂と泥水を分離するための沈澱池や脱水機等の大がかりな地上施設が必要でない。
- (4) 圧力室内に充満させた土砂で切羽を押し付けながらバランスさせるという機構上、特別な場合を除いて坑内圧気および薬液注入などの補助工法が必要でない。
- (5) 排出土の変化を直接に観察することができるので泥水シールド工法に比べて施工管理が行ないやすい。

3. シールド機械の装備能力

3.1. カッタートルク

装備カッタートルクとシールド外径との関係を図-2に示す。カッタートルクの大きさについては、周知のごとく次式で示される経験式がある。

$$T = \alpha D^3 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、T: カッタートルク (t・m)

α : 土質等による係数

D: シールド外径 (m)

図中には上式における $\alpha=1.2, 1.5, 1.8$ の場合の3本の曲線を示している。

メカニカルブラインドシールドでは $\alpha=1.5$ の曲線を中心として、大部分が $\alpha=1.2\sim 1.8$ の範囲に分布している。これは泥水シールド($\alpha=0.8\sim 1.2$)¹⁾および普通の機械掘りシールド($\alpha=0.5\sim 1.2$)²⁾と比べて、相当大きな値である。

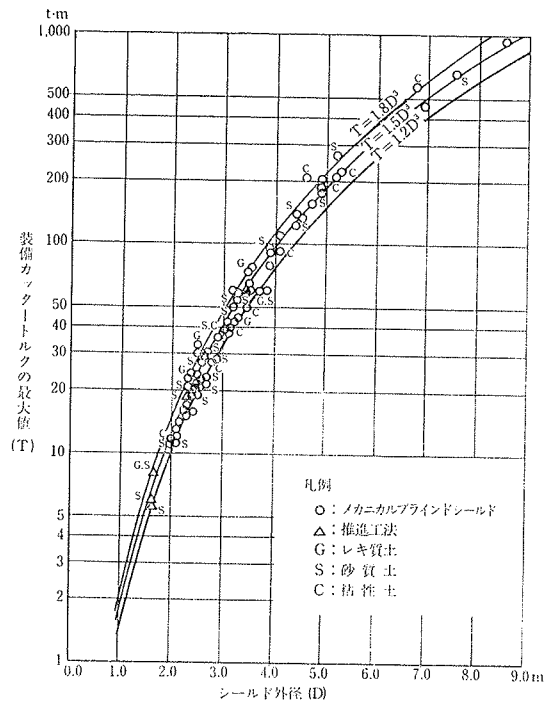


図-2 装備カッタートルク

このようにメカニカルブラインドシールドが大きな装備トルクを必要とするのは、従来の機械掘りシールドと異なり、圧力室内に土砂を充満させることによる。すなわち、圧力室内に充満した土砂が掘削土の流入を阻害しカッタースリットを通して切羽を前方に押し付けるため切削抵抗が増加する。そのためカッタートルクは切削抵抗の増加分だけ余分に装備する必要がある。

なお図中には実際の工事での適用地盤を、粒度組成により明らかにレキ分が多いものをレキ質地盤(G)、砂分が50%を超えるものを砂地盤(S)、さらにシルト・粘土分を多く含むものを粘性土地盤(C)として、それぞれ区分して表示している。この結果からは装備カッタートルクの適用地盤による差はあまり認められない。砂レキ地盤では一般に過大なトルクが必要であるように思われるが、実際にはレキのかみ込み、アーチアクションによる排土不能などの異常現象を起こさない限り、正常運転時の駆動トルクは以外に少なくすむ。

3.2. カッター回転数

機械掘りシールドでは今までの経験などから、カッター外周部での周速(円周方向の回転速度)は、通常15m/min (25 cm/sec)程度を目安として、それより若干大きくとられることが多い。今回の調査でもカッター周速は大部分が12~24 m/minの範囲内にある。

カッター回転数と周速との間には次のような関係式がある。

$$n = v / \pi D \quad \dots\dots\dots(2)$$

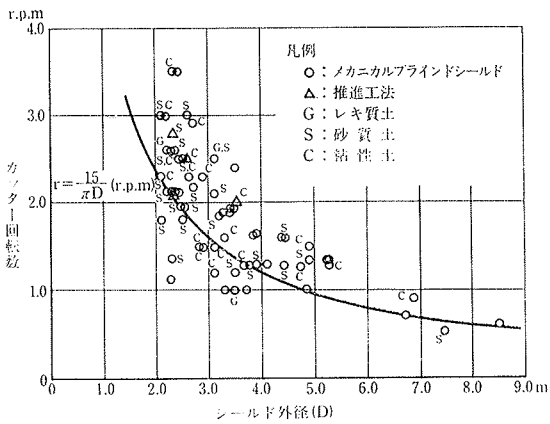


図-3 カッター回転数

ここに、 n : カッター回転数 (rpm)
 v : カッター周速 (m/min)
 D : シールド外径 (m)

カッター回転数とシールド外径との関係を図-3に示す。ここではカッター周速の代表値として上記した15m/minを選び、それに対する(2)式の曲線を、図中に表示している。

シールド機械でカッター周速をある一定値に保つためには、シールド断面が小さくなる程、カッター回転数は増加させなければならない。調査結果でもこの傾向がよく表わされている。

3.3. 圧力室の幅

メカニカルブラインドシールドにとって、圧力室とは掘削土量と排土量のバランスを図り切羽の崩壊を防止すると同時に、掘進制御に関する多くの情報をもたらす点で非常に重要である。また土砂の付着およびアーチアクションなどの発生を防止し、土砂の流動が阻害されないことも大切な要素であり、その内部構造については慎重な配慮のもとに決定しなければならない。

圧力室の幅（バルクヘッドとカッターフェース間の距離）とシールド外径との関係を図-4に示す。両者の間には密接な関係があり、ほとんどが次式に示す範囲内に分布している。

$$0.25D \leq b \leq 0.25D + 0.6 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 b : 圧力室の幅 (m)
 D : シールド外径 (m)

3.4. カッタースリットの開口率

カッタースリットの開口率とシールド外径との関係を図-5に示す。開口率は15~30%の範囲内に分布しており、その平均は20.5%である。これは泥水シールドの平均開口率約10%、ブラインドシールドの平均開口率約5%と比べてはるかに大きい。

なお施工例の中にはカッターフェース（面板）が全然なく、スポークだけ装備した完全開放型のシールドが数

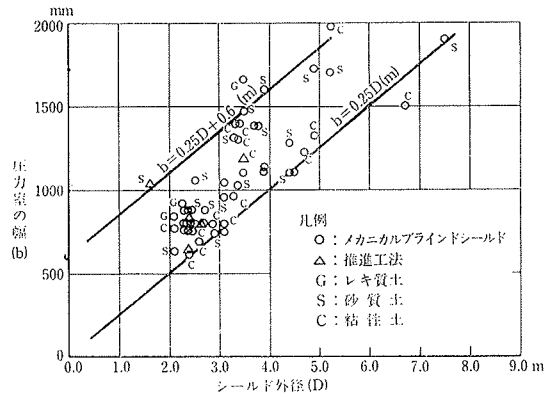


図-4 圧力室の幅

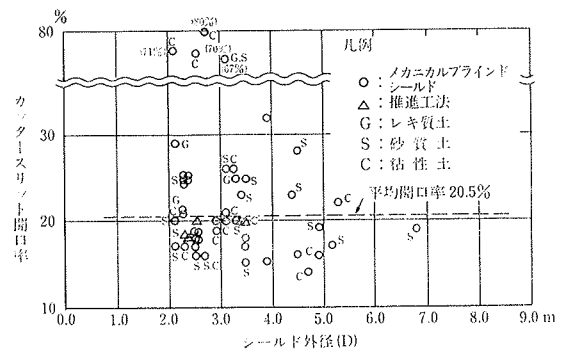


図-5 カッタースリットの開口率

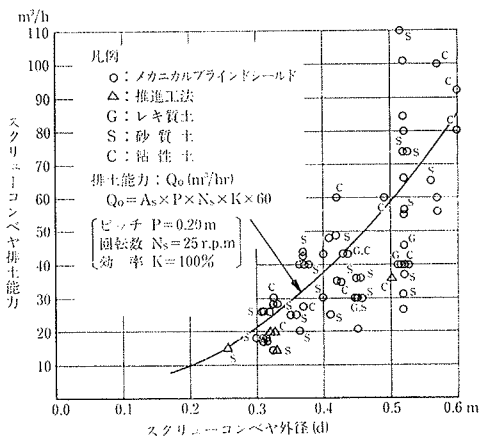


図-6 スクリューコンベヤの排土能力

件実施されている。カッタースリットの開口率に換算すると70~80%程度になる。これらの機械は特殊なもので先述した平均開口率の計算からは除外しているが、圧力室内の充満状態を厳重に管理することにより、原理的にはこのような施工も可能である。

3.5. スクリューコンベヤの排土能力

スクリューコンベヤは圧力室内に充満した土砂を強制的に排土する目的のほか、連続した止水壁をつくり、砂地盤に対する噴砂現象などを防止する役割がある。そのためには、安定した排土を行なうために十分な搬送能力と、排出口で水を絞る砂の噴出を防止する排土調整装置の設置が必要である。

スクリーコンベヤの排土能力（単位時間当りの排土量）と外径との関係を図-6に示す。スクリーコンベヤに要求される排土能力はシールド推進速度，土量変換率，排土効率などによって決定される。図中には，参考までにスクリーピッチ0.2m，回転数25rpm，排土効率100%と仮定した場合の排土曲線を表示している。

3.6. シールド推進ジャッキ

装備ジャッキ推力とシールド外径との関係を図-7に示す。この工法では装備ジャッキ推力は120 t/m²（切羽面積に対して）の曲線を中心として，100~140 t/m²の範囲にあり，泥水シールド工法と比べて約20 t/m²ほど大きい。これは圧力室内の充満により土砂の流入抵抗が増え，その分だけジャッキ推力を大きくする必要があるためである。

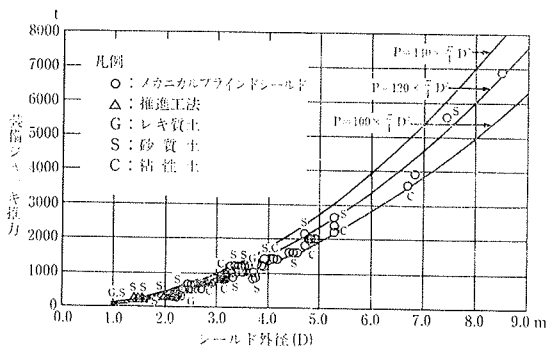


図-7 装備ジャッキ推力

4. 施工実績

4.1. 適用地盤

メカニカルブラインドシールド工法は砂レキ地盤から粘性土地盤に至るまで，非常に広範囲な地盤に適用されている。ただしアーチアクションの発生，付着によるデッドスペースの増大など，まだ解決されていない施工上の問題点も多く，場合によっては掘進不可能になることもある。

この工法が適用できるかどうかは掘削土砂にどの程度の流動性があるかによって決まる。すなわち地盤中の砂分と粘土分の混合割合，均等係数，含水比などが流動性を判定する場合の重要な指標となる。施工に当たって特に注意を要すると思われる地盤は次のようなものである。

- (1) 砂の含有量が90%以上の砂地盤
- (2) 透水係数が10⁻³ cm/sec以上の砂地盤
- (3) 地下水位が高い地盤，特にシールド頂部より2m以上になる場合。
- (4) 粘着力が3.0 t/m²以上の粘性土地盤。
- (5) 大径レキのある地盤，土被りが小さい地盤。

4.2. 掘進速度

シールド掘進速度を図-8に示す。ここで掘進速度は

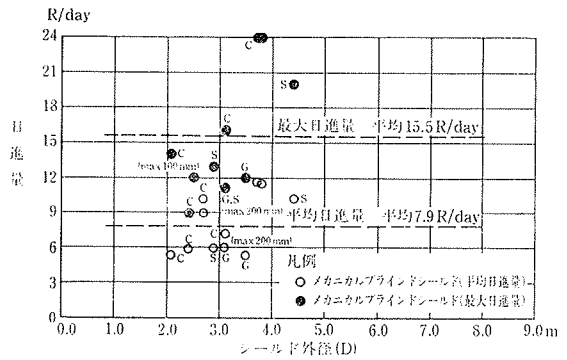


図-8 シールド掘進速度

平均日進量と最大日進量に区分して表示している。

平均日進量は5~10 Ring/dayが多く，総平均7.9 Ring/dayである。この日進量をm単位に直すと，セグメント幅が大部分900mmであることから，上記の値を0.9倍することにより概略的に求めることができる。また最大日進量は12~20 Ring/dayの範囲が多く，その平均は15.5 Ring/dayである。

シールド適用地盤と日進量との関連は調査件数が少ないため明らかではないが，大径レキの多い地盤，砂レキ地盤などでは掘進能率が低下しているようである。

5. 施工上の問題点

5.1. アーチアクションによる排土不能

砂地盤の掘進中に生じるアーチアクションは，圧力室内の砂が順次締め固められ，脱水状態を起こして流動性がなくなることにより生じるもので，通常スクリーコンベヤ取込口の直前に発生する。その結果，圧力室内の

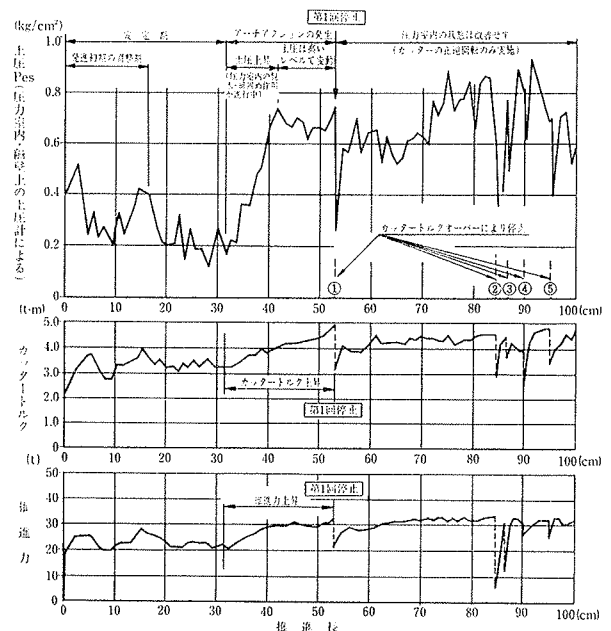


図-9 シールド推進実験の結果（砂地盤）

砂がスクリーコンベヤに供給されず、排土不能となつて安定した掘進ができなくなる。

このような現象は比較的粒度分布の良い、締め固まりやすい砂地盤において多く発生するようである。

図-9は筆者らの行なったシールド推進実験（シールド外径1,500mm）の結果から、アーチアクションが生じた場合の測定例を示したものである³⁾。締め固めにより圧力室内の土圧、カッタートルク、推進力などが上昇する様子が理解できる。

5.2. スクリューコンベヤ排土口からの土砂の噴出

地下水圧が高い滞水砂地盤ではスクリーコンベヤ内の止水効果が十分発揮されず、シールド掘進に伴って砂が流動化し、排土口から水と共に噴出する、いわゆる噴砂現象が起きる。その結果切羽の崩壊が誘発され、特に土被りが小さい場合には急激に地表面の陥没が生じる危険もある。

このように一度噴砂現象が起きると、その対象は非常に厄介であり、実施工においては十分注意する必要がある。砂の噴出を防止するため現在使用されている排土調整装置としてはスライドゲート方式、フラップゲート方式、ロータリーフィーダ方式などがあり、それぞれ特長を備えている。

5.3. 大径レキの処理

大径レキの処理は地盤中の木根あるいは薬注塊などの処理と並んで、密閉式シールドの遭遇する困難な問題の一つである。施工例の中には最大径300~400mmの玉石が点在するレキ層地盤での掘進記録もあり、レキ対策に大変な労苦をしたことが報告されている。

レキの処理方法としては積極的に破砕する方法と、機構上の工夫により除去する方法（例えばスクリーコンベヤ取込口の直前にレキ溜め用ポケットを設ける方法など）がある。

5.4. 掘進制御および施工管理

シールド掘進中に測定され、施工管理のために使用される計測項目を表-1に示す。

掘削土量と排土量をバランスさせ安定した掘進を行なうためには、圧力室内が常に充満されるよう厳重に管理されるべきであり、シールド周辺の地山の状態、および土砂の取込み状況などを常時把握し、適切な掘進制御を行なう必要がある。この掘進制御には土量管理による方法と圧力管理による方法がある。

土量管理による方法は排土量を測定することにより、推進速度などの設定値にフィードバックさせ、掘削土量を制御するものである。そのため排土量と掘削土量を直接的に比較することができるため、圧力室内のバランスを図る手段としてはすぐれた方法である。ただし坑内で排土量を連続的に計ることが難かしく、また測定に時間的な遅れが伴うことが欠点となっている。

計測項目	測定目的	重要度
圧力室内 土圧、間ゲキ水圧	圧力室内の充満度の把握	◎
フード部 土圧、間ゲキ水圧	シールド頂部のゆるみ範囲	△
カッター前土圧、間ゲキ水圧	切羽の崩壊、押付け力	△
スクリー内土圧、間ゲキ水圧	スクリー内での締め固め状況	○
カッタートルク	シールド負荷	◎
スクリートルク	シールド負荷	◎
ジャッキ推力	シールド負荷	◎
推進速度	シールド操作、管理値の設定	◎
カッター回転数	シールド操作、管理値の設定	○
スクリー回転数	シールド操作、管理値の設定	◎
排土ゲート開口率	排土口での脱水作用、効果	○
排土量	掘削土量とのバランス	◎

表-1 施工管理のための計測項目
(シールド機械関係のみ)

圧力管理による方法は、圧力室内の充満状態を土圧計などによって検知し、排土量の調整を行なうものである。この方法は計測が比較的簡単で、圧力室内の状態が直ちに把握できるなどの利点があるが、その反面計器の耐久性および計測結果の信頼性に難がある。また計器の取付け位置による影響も強く受け、必ずしも満足のいく結果が得られていない。

そのため実際の工事では圧力室内の土圧と排土量のほかに、シールド推進力、カッタートルク、スクリーコンベヤ駆動トルクなどの測定を併用することにより、総合的な管理を行なっている場合が多い。

6. むすび

ここではメカニカルブラインドシールド工法に関する施工例を調査し、シールド機械の装備能力と施工性などを中心に検討を加えてきた。その結果、この工法の現況と施工上の問題点を把握する上からは、十分な成果が得られたものと思っている。ただし適用地盤の土質工学的な区分については残念ながら詳細な掘進記録などもなく詳しく分析することができなかった。この点については今後とも検討を加えて行くつもりである。

最後に、この報告を書くにあたってシールド工事に関して発表されている多数の工事報告書、および工事関係の資料を参照させて頂いた。また日立建機(株)、日立造船(株)、川崎重工業(株)、三菱重工業(株)、石川島播磨重工業(株)各社の多大なる御協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤、藤原、崎本、山下：泥水シールド工法の現況と問題点、大林組技術研究所報、No. 17、(1978)、pp. 66~70
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド編）・同解説、(昭和52年版)、pp. 65~98
- 3) 藤原、羽生田、山下：メカニカルブラインドシールド工法に関する推進実験報告書・同データ編、大林組技術研究所報告書、(昭和53. 9)