

# 泥水シールド工法の現況と問題点

齋藤二郎 崎本純治  
藤原紀夫 山下幸夫

## Present Status and Problems of Slurry Shield Tunneling Method

Jiro Saito Junji Sakimoto  
Toshio Fujiwara Yukio Yamashita

### Abstract

The purpose of this paper is to grasp the present status and problems in construction with the slurry shield tunneling method, and further, to obtain any effective detail useful for design and construction planning. The authors thus investigated 66 construction reports and examined the capabilities of shield machines and results of construction. Consequently, the principal capacities of machines such as cutter torque, agitator torque and jack thrust were clarified. At the same time, the authors found the usefulness of the slurry shield tunneling method with regard to driving rate and ground settlement in gravelly strata. Problems in construction such as control of excavation volume and handling systems for slurry are also considered in this paper.

### 概要

この報告の目的は、泥水シールド工法における現況と施工上の問題点を把握し、今後の設計および施工計画に対する有力な資料とすることにある。そのため施工報告書などの中から66件の工事内容を調査して、主として土質との関連を中心にシールド機械の装備能力、施工結果などについて検討を行なった。その結果、カッタートルク、アジテータトルク、シールドジャッキ推力などの主要な機械装備能力が明らかになるとともに、掘進速度および砂レキ層での地表面沈下などに対し、泥水シールド工法の有用性が認められた。また掘削土量の管理、坑外での泥水処理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

泥水シールド工法は、従来施工が難かしいとされていた滞水砂レキ層あるいは軟弱地盤に適用できる工法として開発されたもので、現在シールド工法の主流になりつつある。近年その施工実績も着実に増加し、推進泥水シールド工法を含めると100件に近づこうとしている。

この工法が現在高く評価されている背景は、密閉式のシールド工法としての安全性と、泥水圧を利用した切羽の安定機構にある。特に従来のシールド工法にとって不可欠の分野であった薬液注入および坑内圧気などの補助工法が、公害防止などの社会的な要求から、一部で使用制限の行政措置を受けたことも、この工法の発展に拍車をかけた一因ともいえよう。またズリの搬出方法にも大きな特徴がある。これまでバッテリー機関車に頼っていたズリの搬出を流体輸送に変えたもので、坑内の輻湊を緩和する上からも、画期的な工法として注目される。

しかし泥水シールド工法にもこの工法独特の欠点があり、土砂を泥水から分離するため沈澱池や脱水機等の大がかりな地上施設が必要で、環境汚染として新たな公害問題が生じる恐れもある。したがって掘削土砂の搬出方法も含めて、残土処理の方法にも改善の余地は残されており、今後とも研究を続けて行く必要がある。またそのためにも同工法の現況を理解し施工実績の概要を把握しておくことは大切である。

ここでは泥水シールド工法に関して、今までに入手できた66件の施工実績を比較しながら、それらの現況と問題点について考えてみることにする。

### 2. 施工済泥水シールドの概要

調査の対象とした施工済泥水シールドの総数は66件で、その内訳は泥水シールド47件、推進泥水シールド19件である。

これらを用途別にみると下水道トンネルとしての利用

が最も多く、施工件数は全体の70%に達している。また泥水シールドの場合、シールドの規模は外径3~4m、施工延長600~800m、セグメント幅90cmのものが、それぞれ一番多い。

### 3. 泥水シールド機械の能力

#### 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-1に示す。ここではシールド機械に装備されたカッタートルクの最大値を表示すると同時に、実際の工事での適用地盤を、砂レキ地盤(G)と軟弱地盤(C)に区分して記入している。ただし実際の地盤は非常に複雑で、深さ方向とともに工事延長方向でも大きく変化しているのが普通である。そこで地盤性状を全体的にみて、切羽部分において明らかにレキを含む地盤を砂レキ地盤とし、N値が10以下で自然含水比が60%を越えるものを軟弱地盤として、この2種類に分けることにした。なお図中で無印のものはどちらの地盤にも分けられないものである。また“トルク不足”と表示しているのは、報文においてトルク不足であったと明記しているものである。

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)

図中において、上式の  $\alpha=0.8, 1.0, 1.2$  の場合の3本の曲線を示している。

泥水シールドでは  $T=1.0 \times D^3$  の曲線を中心に装備トルクが分布しているのがみられるが、推進泥水シールドにおいては、これよりも幾分か小さい値となっている。また装備カッタートルクを地盤性状との関連から分析してみると、砂レキ地盤の方がわずかながらトルクが大きくなるようであるが、地盤による差はあまり顕著には認められない。

#### 3.2. アジテータトルク

アジテータを装備する目的は、シルト塊・葉注塊の破碎、水圧室内の泥土の状況検知とカッター施回の補助にある。

装備アジテータトルクとシールド外径との関係を図-2に示す。一般に泥水シールドが小口径の場合はアジテータ1基を装備するのが普通であるが、大口径になると2基装備するものが多くなっている。このように2基装備されたものは、区別するため図中に線で結んで表示している。なお地盤性状による区分は前述のように砂レキ地盤と軟弱地盤に分けて表示しているが、ここでも地盤

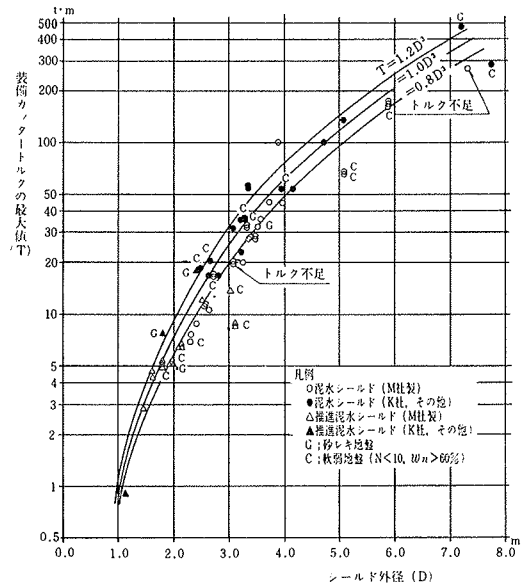


図-1 カッタートルク

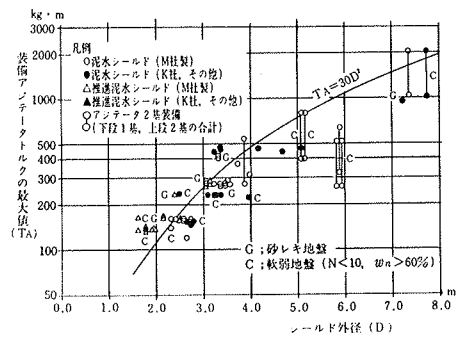


図-2 アジテータトルク

による差は明らかでない。

#### 3.3. カッタースリットの開口率

一般にカッターフェイスは切削刃を備えた数条のホークを持ち、切削刃の裏側にカッタースリットと呼ばれる開口部を残して、他は鋼板で閉塞される。このスリットが大きすぎると切羽の崩壊をまねき、小さすぎると掘削土砂を取り込めないことになる。

スリットの開口率(切羽面積に対する百分率)とシールド外径との関係を図-3に示す。ここでスリットの面積はシールド機械製作図面から求めたものである。その結果、開口率は平均して8~10%で、ブラインドシールド工法の開口率(平均5%)の約2倍となっている。

図中には地盤による分類も表示しているが、砂レキ層では開口率の大きいものが多い。これは大径レキを取り込むために、開口部が必要以上に大きくなっているためと思われる。

#### 3.4. 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-4に、

またジャッキ装備本数とシールド外径との関係を図-5に示す。

ジャッキ推力は全体的に 100~120 t/m<sup>2</sup> の範囲内のも  
のが多く、普通シールドの場合に比べて 10~20 t/m<sup>2</sup> と、  
切羽の泥土圧の分だけ大きくなっている。また砂レキ地  
盤の方が装備ジャッキ推力は幾分大きいようである。し  
かし筆者の経験から述べれば、滞水砂レキ地盤では実際  
は以外に小さな推力ですむことが多い。

ジャッキ装備本数はセグメントの組立てとジャッキ操  
作の便のため、ほとんどの場合偶数本数で、次式に示す  
範囲内のものが圧倒的に多い。

$$N = \pi D \pm 3.5 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、N: 推進ジャッキの装備本数(本)

D: シールド外径(m)

これは普通シールドの場合とまったく同じ結果である。

### 3.5. シールド長さ外径比(L/D)

シールド本体の長さは、土質との適合性および曲線施  
工の有無などの施工条件を考慮して、慎重に決定しなけ  
ればならない。特に本体の長さとお径とのバランス(シ  
ールド長さ外径比, L/D) は重要で、運転操作面からは、  
できるだけ小さい方が望ましい。

このシールド長さ外径比は泥水シールドと推進泥水シ  
ールドでは明らかに差がみられ(図-6), 推進泥水シ  
ールドの方がセグメントの組立てや、テールシールドの取  
り付けが不用な分だけ、その値が小さくなっている。図  
中に示した2本の曲線は、それぞれのデータをもとに二  
次関数で近似させたものである。さらに参考のため、普  
通シールドにおけるシールド長さ外径比を破線により併  
記した。この図より、泥水シールドの場合は普通シールド  
に比べて、シールド長さ外径比が大きいことがわかる。  
これは泥水シールドの施工可能な最小曲線半径が、  
それだけ大きいことを意味している。なお図中に示した  
アンダーライン上の数値は、実際に施工した最小曲線半  
径を示したもので、表示されていないものは直線か不明  
のものである。

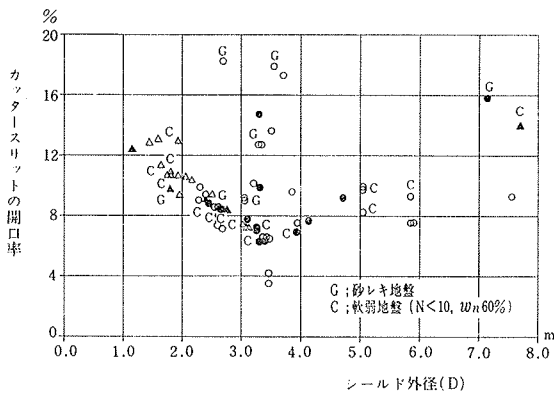


図-3 カッタースリットの開口率

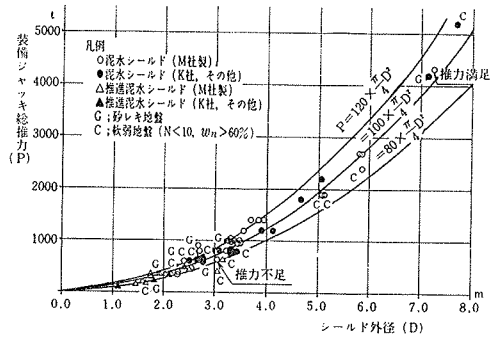


図-4 装備ジャッキ推力

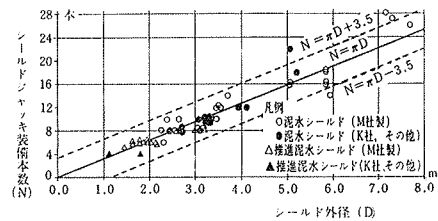


図-5 装備ジャッキ本数

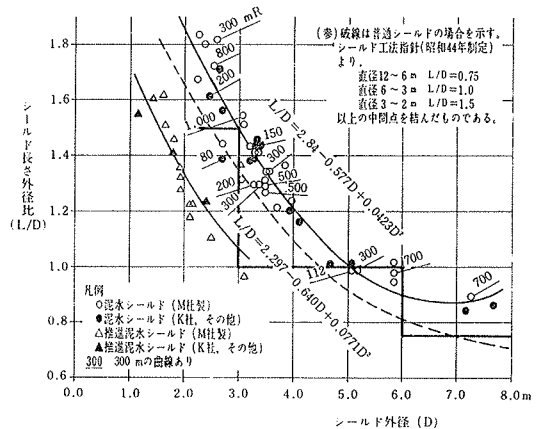


図-6 シールド長さ外径比

## 4. 施工実績

### 4.1. 送・排泥水比重と管内流速

送・排泥水比重の実態を図-7に示す。泥水シールド工  
法では掘削中の送泥水と排泥水の比重差は、一般に0.05  
~0.10と言われているが、この調査からはあまり明瞭な  
結果は得られなかった。また土質による相違もほとんど  
認められない。ただし、現在でも泥水比重の測定方法そ  
れ自体にも問題があり、記載された測定値の正確さには  
疑問も多い。

一方、排泥管内の流速を図-8に示す。排泥管内の流  
速を決定するには、一般に Durand の公式が用いられ  
る。すなわち、

$$V_L = F_L \sqrt{2gd(\rho/\rho_0 - 1)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

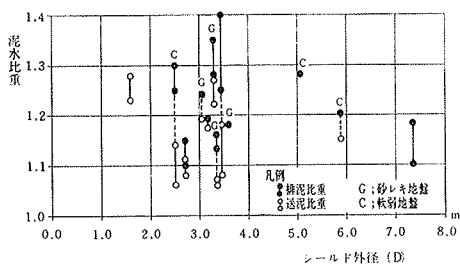


図-7 送・排泥水比重

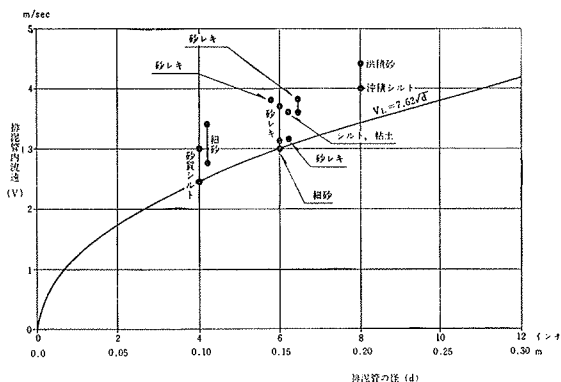


図-8 排泥管内の流速

ここに、 $V_L$ : 限界堆積流速 (m/sec)  
 $F_L$ : 粒子径とスラリー濃度によって決まる係数 (粒径 1 mm 以上では  $F_L=1.34$ )  
 $g$ : 重力加速度 (9.8 m/sec<sup>2</sup>)  
 $\rho$ : 固体の比重 (土砂の場合  $\rho=2.65$ )  
 $\rho_0$ : 母液の比重 (水の場合  $\rho_0=1.0$ )  
 $d$ : 管径(m)

上式に各値を代入すると、図中に示す  $V_L=7.62\sqrt{d}$  の関係式が得られる。実際に用いられている流速は、図からみられるように、Durand の公式から得られる値よりも 1~2 割増の値を用いているようである。

#### 4.2. 裏込め注入

泥水シールドの場合、設計裏込め注入量は普通シールドに比べて多少大きめの値となっている。これはテールシールドを完全にするために、それだけクリアランスが大きくなっているためである。実際の裏込め注入量はデータが少ないのではっきりとは分からないが、設計量に対して 100~200% である。

泥水シールドにおける裏込め注入は普通シールドの場合と同様に、原則として 1 回の推進ごとに行わなければならない。しかし実際には泥水がセグメントの裏側まで回り込むため、裏込め注入を泥水圧より大きな圧力で行なうと、切羽水圧の変動や裏込め材の切羽への流出を生じる。このため実際には数リング後で裏込め注入を実施するのが現状である。即時注入による完全な裏込め注入は、地表面沈下を極力さけるためにも重要であり、今後とも注入工法と裏込め材料に関する研究が必要である

う。

#### 4.3. 掘進速度

平均日進量とシールド外径との関係を図-9 に示す。土質別の考察を加えると、砂レキ地盤や軟弱地盤は掘進速度の面からは不利のようである。総平均日進量の 9 リング/日は、普通シールドの掘進速度の約 2 倍であり、これが泥水シールド工法を普及させた主要原因であると思われる。

#### 4.4. 地表面沈下

地表面沈下とシールド外径との関係を図-10 に示す。泥水シールドは泥水圧によって坑壁外周をさきえているため、沈下に対しては普通シールドよりも有利であると言われているが、この図からは断定することはできない。しかし砂レキ層で沈下量が少ないことは明瞭であり、砂レキ層における泥水シールドの有用性を示していると言えよう。

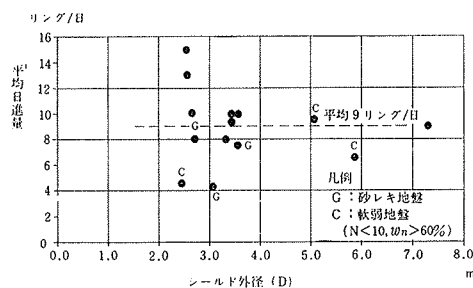


図-9 シールド掘進速度

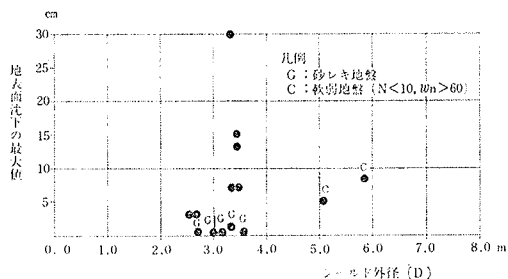


図-10 地表面沈下

### 5. 施工上の問題点

#### 5.1. 切羽の安定

泥水シールドにおける切羽の安定は、①泥水圧による支持、②機械的な支持、の二つによって行なう。このうち泥水圧によって切羽を安定させる方法は本工法の基本である。特に滞水砂レキ層では切羽が崩壊しやすいため、泥水添加剤、泥水比重および泥水圧の変化に対して十分な管理が必要である。

切羽の安定に関する模型実験の結果を図-11 に示す。ここでは泥水比重と切羽の泥水圧を種々変化させて、切羽の安定と崩壊とを調べたものである。これらの結果は

あくまでも模型実験によるものであり、ただちに現場の資料として使用することには問題があるが、添加剤等の効果をよく示していると言えよう。

5.2. 掘削土量の管理

掘削土量の管理は通常、排泥管と送泥管のそれぞれに流量計と密度計を取り付け、これらの測定値から掘削された乾砂量を計算して行なう。また実際の掘削土量の算定には乾砂量のほかに、地質調査による土の比重と間ゲキ率が必要である。これらの問題点を報文からまとめると次のようになる。

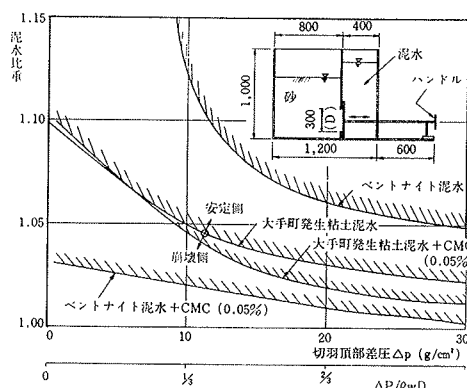
- (1) 実際の地山は土質の変化が激しく、間ゲキ比なども場所により大きく異なる。そのため掘削土量を正確に把握することが困難である。
- (2) 全体の測定管理機構が複雑で、これを使いこなす技術が必要である。
- (3) 流量計と密度計での測定において、特に密度計に精度面での問題がある。またr線密度計を用いる場合には、r線の取扱い資格者と放射線使用許可を得る必要がある。

このため実際の掘削土量管理は、いくつかの測定値のなかから数個を選んで、これらの値から管理する方法がとられている。すなわち筆者らの経験した例では排泥流量、循環排泥流量、循環ポンプ電流とクラッシャー電流の4個の測定値に着目し、それぞれに安定値範囲と危険値を決め常時これらを監視・制御した。

5.3. 大径レキの処理

地山に排泥管で輸送不可能な大径レキがある場合には、これをどう処理するかが大きな問題となる。この対策として、レキ除去装置による大径レキの処理方法が従来から多く利用されている(トロンメル方式)。この方法は排泥管の途中にレキ溜め装置を配し、その中で大径レキをふるい分けして中にたくわえ、ある量以上になればハッチを開き中のレキを取り出すものである。またロータリーバルブ方式、その他の方法も考案されている。しかしこれらの方法では、除去されたレキはズリトロなどで坑外へ搬出するか、または坑内に仮置きをしなければならない。そのため泥水シールド工法の大きな特徴であるスラリー輸送の長所を生かせなくなる。大径レキの処理に関するこのような問題点を解決するため、最近では水中クラッシャー方式のレキ破碎装置も開発され、すでに実用化され成果を収めている。

5.4. テールシールド



図一11 切羽の安定崩壊限界曲線

泥水シールド工法において、テールシールドの成否はその工事の成否につながるものであり、施工報告のなかにも改良の必要性を訴えているものが多い。またテールシールドの破損はシールドの推進力によるものがおもな原因であるため、外周長付近の推力が大きくなる大口径のシールドでは特に注意が必要である。

5.5. 泥水処理

泥水処理とは一度泥水に溶かした掘削土を再び土砂として取り出すことをいう。したがって砂やレキ地盤では、この処理はスクリーンとサイクロンで済む場合が多く、あまり大きな問題点とはならない。また硬質シルト層でも土塊として掘削される場合は処理が楽であったとの報告もある。大きな問題となるのは軟弱な粘土シルト層におけるもので、薬品処理を必要とするものである。ここでは薬品使用量の増加および薬品添加による二次弊害を訴えているものが多い。さらに、大口径の場合には処理量も膨大なものとなり、この処理能力がシールドの掘進を左右するようになる。したがって処理設備のコンパクト化と能率アップを計って行かなければならない。

6. むすび

本来この調査の目的は土質との関連をおもに調べるものであったが、これについてはあまり満足のいく結果が得られなかった。しかし泥水シールド工法の現況と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。またこの報告を書くにあたって、トンネル標準示方書(シールド編)をはじめ多数の文献・施工報告書を参考にさせていただいた。ここに深甚なる謝意を表します。