

機械式直接地中接合工法用のシールド機の開発

渡辺俊雄*・宮沢和夫**・大石善啓***・
杉山雅彦****

シールドトンネルの地中接合において、地山崩壊、地下水噴出を防止するための補助工法を一切使用せず、シールド機同士を直接的に機械接合させる工法を開発した。この開発においてシールド機に要求されるトルク、推力、切羽安定などの掘削性、カッタ、スキンプレートの強度特性を模型実験、現場実証実験を行って明らかにし、シールド機的设计法を確立した。

Keywords : underground docking, cutter torque, thrust force, stability of excavation face, extensible cutter, stress of parts

1. まえがき

近年、シールド工事において、東京湾横断道路のような海底下の道路トンネルや市街地を通過するライフラインの都市トンネルにおいて長距離化が求められている。1台のシールド機による施工距離には限界があるため、トンネルの中間に立坑をつくり接合するが、中間立坑の設置が不可能であったり、立坑の用地確保の困難さ、コストダウンの必要性からシールドトンネルの地中接合のニーズが増えている。¹⁾

従来の地中接合は、接合時のマシン間の土砂崩壊や高圧地下水の噴出を防ぐために、切羽周辺に薬液注入あるいは凍結固化する工法が一般的である。薬液注入工法では、地上基地の確保と環境保全の問題がある。

また、凍結工法では、その準備から凍結完了、さらに解冻までに多大な工期を要するばかりでなく、凍土形成範囲の確認や解冻時の地盤沈下防止のための綿密な施工管理が必要となる。

そこで、従来工法に代わる新工法を研究し、機械式直接地中接合工法 (Mechanical Shield Docking Method 以下MSD工法という) を開発した。MSD工法とは、シールド機フード部に接合機構を設けることによって、地中を両側から掘進してきた2台のシールド機を、機械的に直接接合する工法である。同工法の開発に当たっては、Fig. 1に示す技術課題を解明する目的から、各種実験を実施している。

ここでは、シールド機の掘削性、耐久性に関する実験結果について報告する。

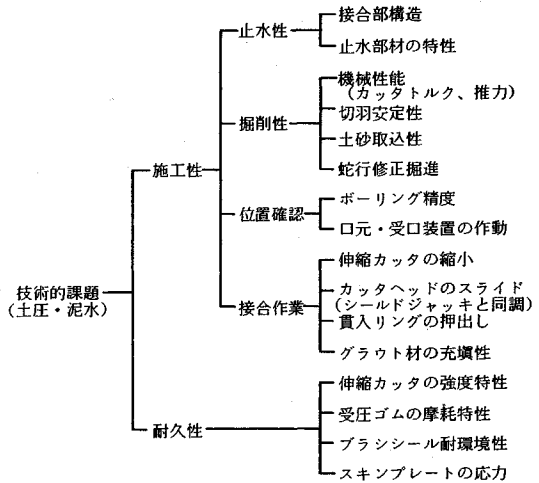


Fig.1 Technical themes of developing MSD method

2. 工法の概要とシールド機の要求性能

MSD工法は、押出側、受入側の2台のシールド機が両側から掘進してきて向かい合った時点で、カッタヘッド径を縮小し、押出側シールド機に内蔵した鋼製の貫入リングが、受入側シールド機の貫入室に入り、2台が機械的に接合して一体化するものである。その接合方法の手順を Fig. 2に示す。

- ① 両側から掘進してきた2台のシールド機のカッタが接触する寸前で掘進を停止する。シールド機内から切羽に向かって泥土または泥水圧を作用させながら、カッタヘッド径を縮小した後、シールド機を推進させながらカッタヘッドをスライドしてチャンバ内に引き込む。
- ② 2台のシールド機を接近させ、押出側シールド機

* 正会員 清水建設 技術開発本部 土木技術開発部 副部長 (〒105-07 港区芝浦1-2-3 シーパンスS館)

** 清水建設 技術開発本部 土木技術開発部 課長

*** 正会員 工博 三菱重工業 技術本部 高砂研究所

**** 正会員 三菱重工業 神戸造船所 建設機械部 設計課

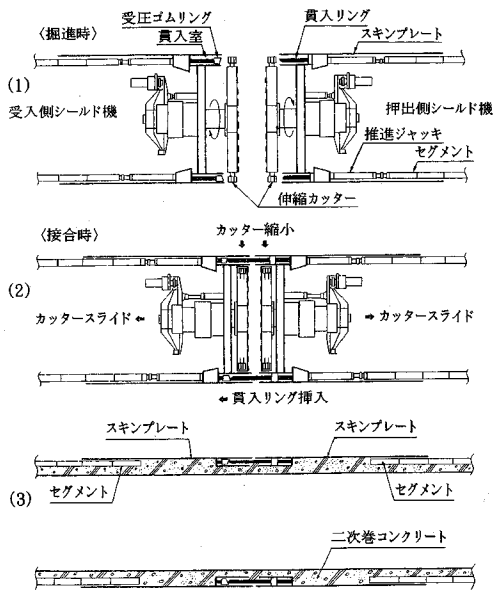


Fig. 2 Docking process of MSD method

の貫入リングを受入側シールド機の貫入室に挿入して機械的に接合する。

- ③ 接合部を残して、マシンを解体、撤去し、コンクリートで二次覆工を行う。

MSD工法用と通常のシールド機は、構造上、下記の点で異なる。

- ① 押出側シールド機は、接合時の土・水圧に対抗できる鋼製のリングを持ち、押出機構を備えている。
- ② 受入側シールド機は、押出側から貫入してくるリングを受け入れる貫入室を持ち、止水機構としてのゴムを装着している。
- ③ Fig. 3に示すように、通常のシールド機のカッターヘッドには外周リングがあるが、MSD工法用シールド機では接合時に伸縮カッターが縮小するため外周リングを内側に取付けた形状となる。
- ④ スキンプレート間距離を短くするため、カッターヘッドがチャンパー内にスライド収納することが可能になっている。

以上の諸機能を保証しつつ、なお通常掘進において従来通りの仕様が適用でき、掘削性能、施工性能を有していることが必要である。

さらに、現在の密閉型シールドの代表である泥水式、土圧式のいずれにも適用できるものでなければならない。

3. 掘削性能実験

(1) 実験概要

MSD工法に使用するシールド機は、2. に述べた通り、次の構造的特徴を有する。

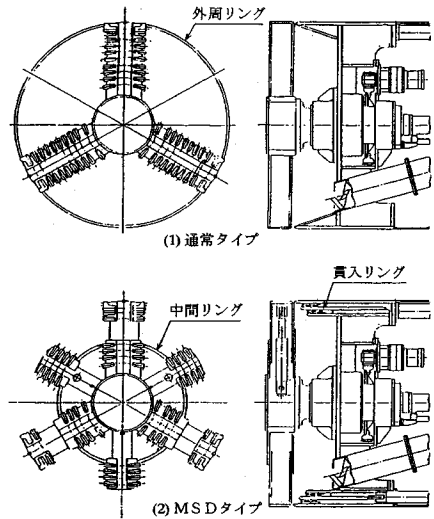


Fig. 3 Comparison of conventional shield machine and MSD shield machine

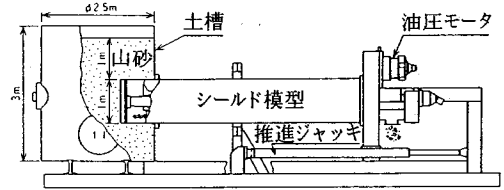


Fig. 4 Excavation and face stability testing apparatus

- ① カッターヘッド外周にリング構造がない。
 - ② フード部内周面に貫入室、貫入リング室がある。
- そこで、これらの構造上の相違が、シールド機の施工性に及ぼす影響を明らかにする目的で、直径1mのシールド機模型を用い掘削実験を行った。実験では、カッタールク、推進力等の負荷特性および地表面変位に代表される切羽安定性に着目し、カッター構造の相違による比較を行った。

(2) 実験方法

Fig. 4に模型実験装置を示す。すなわち、直径1mのシールド機模型が、直径2.5mの円筒形土槽のほぼ中央部を掘進し、掘削された土砂はスクリーンコンベヤによって排出される。なお、掘削形式は模型実験が容易な土圧式とした。

Fig. 5に比較を行ったカッターヘッド構造を示す。Cタイプは通常の土圧式シールド機に、MタイプはMSD工法用シールド機にそれぞれ対応する。またNタイプはMSD工法用シールド機の構造的な特徴を誇張した比較モデルである。

Table. 1は模型地盤の特性をまとめたものである。地盤材料としては、締固め性や取り扱いの容易さを勘案し

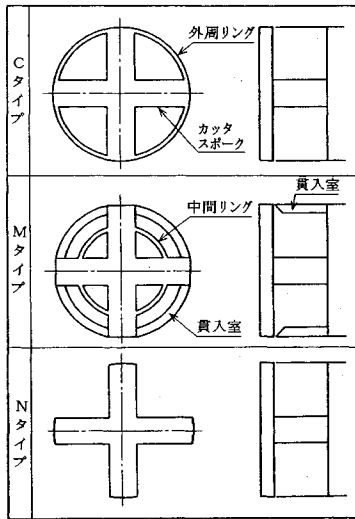


Fig.5 Cutter head models for comparison

Table.1 Characteristics of test ground

粒度	礫分 (2 mm~)	20
	砂分 (0.074 ~ 2 mm)	75
(%)	シルト・粘土分 (~0.074 mm)	5
土粒子比重		2.64
乾燥密度 (g/cm ³)		1.7 ~ 1.8
含水比 (%)		14 ~ 17
一面せん断	内部摩擦角 (°)	39
	鉄との摩擦角 (°)	22
	見掛けの粘着力 (MPa × 10 ⁻²)	0.8

山砂を使用した。地盤の造成法は、山砂を層厚 30 cm ごとに撒き出して層ごとに飽和させ、シールド模型天端からの土被り高さが 1 m になるまで撒き立てた後、土槽下部のドレーンから排水して締め固めた。

この結果、強度、含水状態ともほぼ再現性のある実験地盤が得られた。

主要な計測項目を Table. 2 に示す。実験では、土圧式シールドを模擬したため、カッタチャンバ内が掘削土砂で充填された状態を保つことを目標とし、カッタチャンバ内の土圧計によって土圧管理を行った。この結果、掘進速度がおよそ 3 cm/min、カッタ回転数が 4.5rpm なる安定掘進条件を得た。

(3) 実験結果

各実験中に掘進速度等が多少変化し、測定値に影響を与えたため、各データが定常状態にある区間を選定して評価を行った。以下に主要な結果をまとめて示す。

a) カッタトルク

Fig. 6 にカッタトルクの出力例を示す。掘進中のカッタ

Table.2 Items or measurement

計測項目	計測手段
推進力 F	電気式油圧センサー
カッタトルク T	電気式油圧センサー
チャンバ土圧 p ₁	φ 86 mm 壁面土圧計
スキンプレート土圧 p ₂	φ 30 mm 壁面土圧計
掘進距離 s	ポテンシオメータ式変位計
掘進速度 v	ポテンシオメータ式変位計
スクリュコンベア回転数 ns	光電式近接スイッチ方式回転計
カッタ回転数 f	タコメータ
排出土砂重量 W _o	20.0KN 用ロードセル
地表面変位量 δ i	差動トランス式変位計

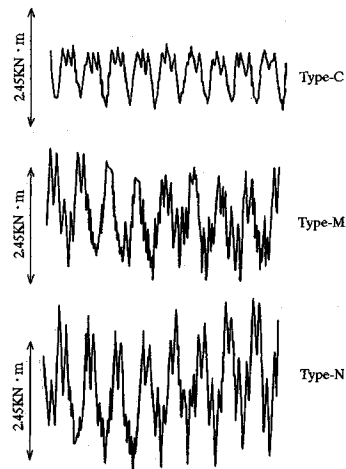


Fig.6 Examples of measured cutter torques

トルクは周期的に変動したため、中央値を代表値として評価を行った。

Fig. 7 にカッタヘッド構造によるカッタトルクの比較を示す。カッタトルクの大きさはカッタヘッド構造によって異なり、C-タイプ < M-タイプ < N-タイプとなる。

カッタトルクの発生要因は、主としてカッタヘッドと周辺地盤とのせん断抵抗と考える。一般に土同士のせん断抵抗角 (内部摩擦角) は、土と鋼との摩擦角よりも大きいので、中間リング位置等のカッタヘッド構造の相違によってカッタトルクに変化が生じる。カッタトルク的主要成分は、切羽前面およびカッタヘッド外周面が発生し、カッタヘッド構造による大小関係は次の通りである。

- ① 切羽前面のせん断カッタトルク (C < M < N)
- ② カッタヘッド外周面のせん断によるカッタトルク (C < M = N)

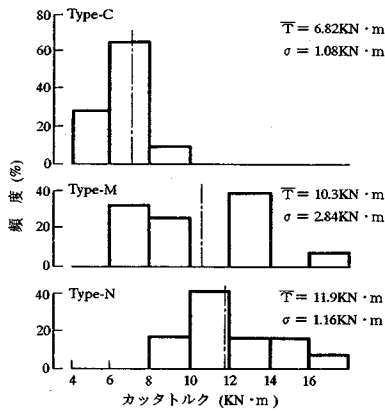


Fig.7 Comparison of cutter torques

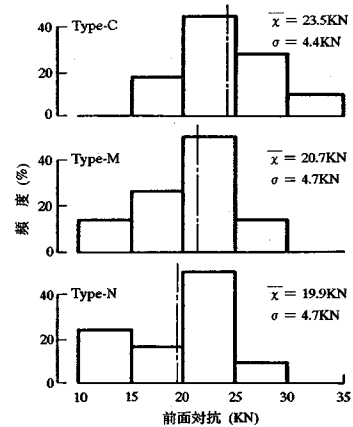


Fig.9 Comparison of front resistances

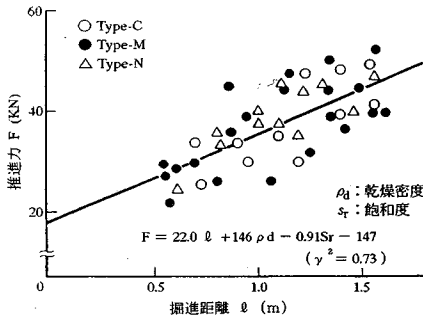


Fig.8 Relation between stroke and thrust jack force

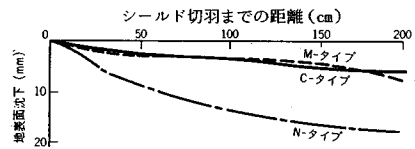


Fig.10 Surface settlement after face passing of shield machine

したがって、MSD工法用のシールド機のカッタトルクは、通常のシールド機に比べて増大する傾向にあるが、中間リング位置を外周に近づけることによって両者の差は小さくなる。カッタトルク評価法の詳細については次節で記述する。

b) 推進力

シールド機の推進力は、カッタヘッドにおける前面抵抗とスキンプレート周辺における摩擦抵抗によって定まる。Fig. 8に推進力と掘進距離との関係を示すが、両者を直線で回帰すると、周面摩擦は直線の傾きに、前面抵抗は切片項に対応する。シールド機周面の形状は同一であるため、実験結果も一つの直線で回帰できることがわかる。Fig. 9は、推進力から周面摩擦抵抗を差し引いて求めた前面抵抗の比較を示すが、カッタヘッド構造による相違は小さい。

なお、地盤のばらつきを考慮に入れた回帰式の掘進延長に関する偏回帰係数は、22.0KN/mとなる。これにより地盤とスキンプレートの摩擦角δを求めると、δ = 20° となり、Table. 1に示した一面せん断試験結果と良く一致する。

c) 地表面変位

Fig.10にシールド機通過後の地表面沈下の測定例を示す。今回の実験では、土槽寸法が十分大きくないため、地表面沈下量は土槽側壁の影響を受けており、絶対値の議論は妥当ではない。そこで、各カッタヘッドタイプにおける相対比較を行うと、CタイプとMタイプがほぼ同じであり、Nタイプの地表面沈下量が大きいことが分かる。

このことから、MSD工法用シールド機程度のカッタヘッド構造の相違では、切羽安定性に及ぼす影響はほとんどないものと判断できる。

d) カッタトルク評価式

前節に述べた通り、カッタトルクの発生機構はカッタヘッドと周辺地盤とのせん断抵抗が支配的であると考えられる。安定掘進状態におけるカッタヘッドへの側方作用土圧が静止土圧に一致すると考えれば、Fig.11を参考にカッタトルク評価式は次の通りとなる。

なお、各記号の添字C, MはそれぞれCタイプ, Mタイプのカッタヘッド構造を表す。

① 切羽前面のせん断によるカッタトルク

Fig.11において、開口部が土同士で、スポーク部、リング部が土と鋼とでせん断されるとすると、次式を得る。

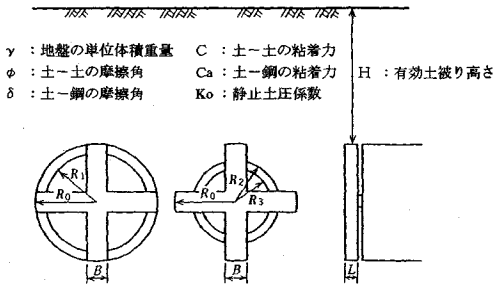


Fig.11 Notation of marks used

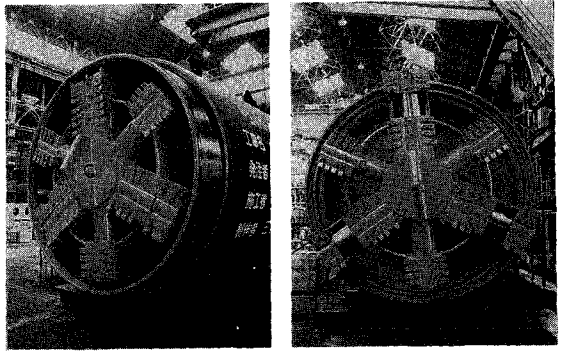


Photo.1 φ 3470-mm shield machine for MSD method

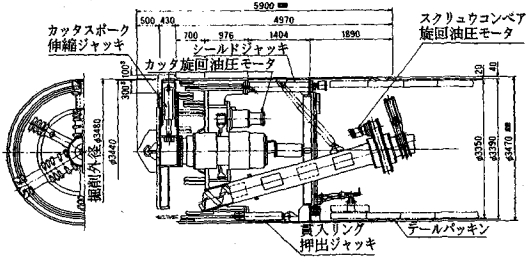


Fig.12 φ 3470 mm shield machine for MSD method

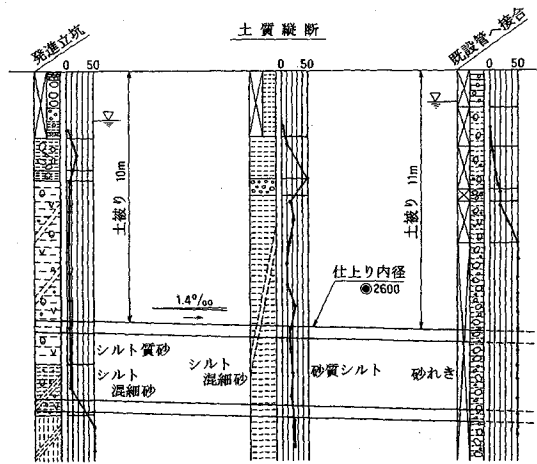


Fig.13 Longitudinal soil sections

$$T_c = 2\pi K_o \gamma \left\{ (\tan\phi - \tan\delta) \left(\frac{H}{3} R_1^3 + \frac{1}{4} R_1^4 \right) + \tan\delta \left(\frac{H}{3} R_0^3 + \frac{1}{4} R_0^4 \right) \right\} - BK_o \gamma (\tan\phi - \tan\delta) \cdot \left(2HR_1^2 + \frac{4}{3}R_1^3 \right) + \frac{2}{3}\pi c R_0^3 - 2(C - Ca)BR_0^2 \quad (1)$$

$$T_M = 2\pi k_o \gamma \left\{ (\tan\phi) \left(\frac{H}{3} R_0^3 + \frac{1}{4} R_0^4 \right) - (\tan\phi - \tan\delta) \cdot \left(\frac{H}{3} R_2^3 + \frac{1}{4} R_2^4 - \frac{H}{3} R_3^3 - \frac{1}{4} R_3^4 \right) \right\} - BK_o \gamma (\tan\phi - \tan\delta) \cdot \left(2HR_0^2 + \frac{4}{3}R_0^3 - 2HR_2^2 - \frac{4}{3}R_2^3 + 2HR_3^2 + \frac{4}{3}R_3^3 \right) + \frac{2}{3}\pi c R_0^3 - (C - Ca) \left(2BR_0^2 + \frac{2}{3}\pi (R_2^3 - R_3^3) \right) \quad (2)$$

② カッタヘッド外周面のせん断によるカッタトルク外周リングの有無を考慮して次式を得る。

$$T_c = \pi L \gamma R_0^2 (H + R_0) (1 + K_o) \tan\delta + 2\pi Ca L R_0^2 \quad (3)$$

$$T_M = \pi L \gamma R_0^2 (H + R_0) (1 + K_o) \tan\phi + 2\pi CL R_0^2 \quad (4)$$

以上より、カッタトルクの大きさは中間リングの位置によって変化し、カッタヘッド外周に近づくほどC-タイプとM-タイプとの差は小さくなる事が分かる。

Table. 1 に示した地盤データを用いて試算を行ったところ、C-タイプの評価カッタトルクが 6.86KN・m、M-タイプの評価カッタトルクが 9.31KN・m となった。

評価値と実験結果との対応は良好であり、カッタトルク評価式の考え方が妥当なものである事が分かる。

e) まとめ
以上より、MSD工法用シールド機の掘削性、切羽安定性について次のことが分かった。

- ① カッタトルクは、通常のシールド機に比べてやや増加するが、推進力は同程度である。
- ② 切羽安定性は通常のシールド機と同等であり、施工上問題となるような固有の問題点はみられない。
- ③ 土圧管理によって安定した掘進が可能であり、掘進条件は通常のシールド機と変わらない。

4. 掘削耐久性実験

(1) 実験概要

実工事での掘削を通じて本工法用シールド機の耐久性を確認した。Fig.12, Photo.1 にシールド機を、Fig.13 に土質図を示す。土圧式(泥土圧)のMSDシールド機で約 760 m掘削し、以下の項目について実証、確認した。

- ① 掘進データの収集、解析により、MSDシールド機に必要な装備能力を算定する。掘削性能実験の結果

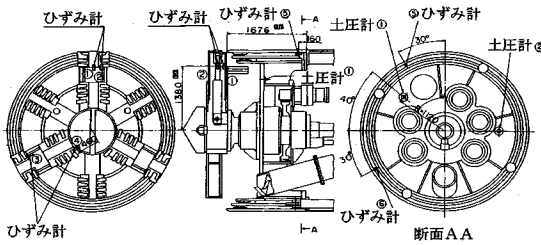
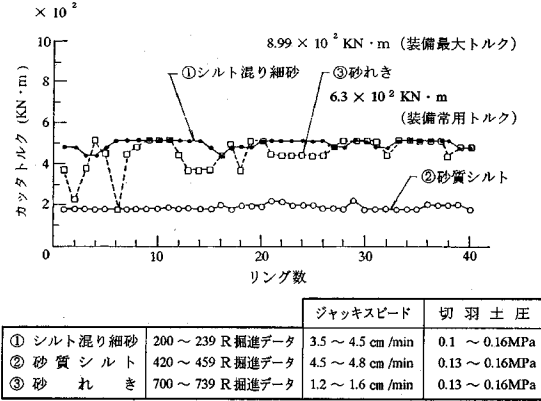
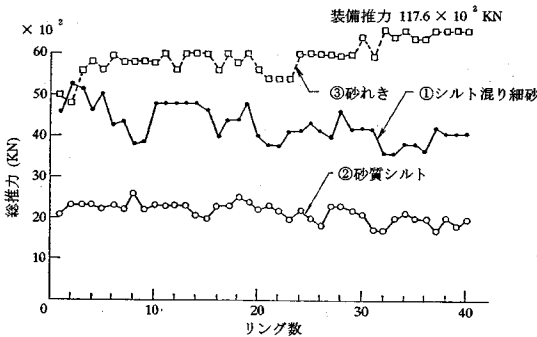


Fig.14 Installation of earth pressure meters and strain gages



a) カッタトルク



b) シールド推力

Fig.15 Cutter torque and thrust jack force measurement data

果により、MSD工法用シールド機は、通常のシールド機と比較して掘削に必要なカッタトルクがやや大きくなるのが判明した。掘削径 3,470 mmのMSD工法用シールド機について、3. (3) d) のトルク評価式を用いれば、所要トルクは約 549KN・mとなる。一方、カッタトルク T の設計式としては、シールド径 D を用いて、経験的に次式が用いられている。

Table.3 Performance table of cutter torque and thrust force

項目	カッタトルク (KN・m × 10 ²)	推進力 (KN × 10 ²)	掘進速度 (mm/min)
装備能力	6.3	117.6	50 (全数使用)
土質	礫層	4.9	12 ~ 16
	シルト層	1.9	45 ~ 48

Table.4 Stress data of various sections of MSD shield machine

測定箇所	計算値と実測値	計算応力値 (MPa)	計算歪値 × 10 ⁻⁶	実測歪値 × 10 ⁻⁶
① カッタスポーク内筒背面		-7.8	-39	-20 ~ -30
②③ カッタスポーク内筒背面		17.0 ~ 51.0	83 ~ 243	0 ~ 120
④ カッタスポーク根元側面		-30.1	-146	-140 ~ 0
⑤ 本体フード部 天		-4.2	-20	-10 ~ -5
⑥ 本体フード部 左		-4.7	-24	-15 ~ -5

$$T = \alpha D^3 \quad (5)$$

ここに、 α はトルク係数と呼ばれ、土圧式シールドの実機では、通常、 $\alpha = 13.7 \sim 22.5 \text{KN/m}^3$ 程度の値をとる。式 (5) より、上記径のシールド機の装備トルクは 578 ~ 951KN・mとなる。したがって、MSD工法用シールド機の所要カッタトルクは、装備上問題ない範囲にある。

また、操舵性についても問題点の有無を確認する。

② 伸縮カッタスポークおよび本体フード部の応力を掘進中に測定し、その耐久性を確認する。

Fig.14 に取付位置を示す。

③ 伸縮カッタを掘進途中で作動し、地盤変状計測から伸縮カッタ作動による地盤への影響の有無を確認する。

④ 掘進終了後、伸縮カッタおよび貫入リングを作動し、その荷重を測定して機構の耐久性を確認する。

(2) 実験結果

掘進データから各土質ごとにカッタトルク、推進力をまとめ Fig.15, Table.3 に示している。カッタトルク、推進力とも従来通りの装備で何等問題ないことが分かった。カッタトルクを α 値 (装備能力算定用便宜値) に換算すると 1.2 (一般的に土圧式は 1.4 ~ 2.3) となる。また、トルク評価式の値の約 9 割で式の妥当性を裏付けた。

推進力は、土木学会標準寸方書による計算値の 81%、掘削断面積 1 m² 当り 640KN (一般的に 980 ~ 1,270KN) となった。シールド機の蛇行修正は、従来機と同様計画線に対し ± 50 mm の範囲で掘削を終了した。

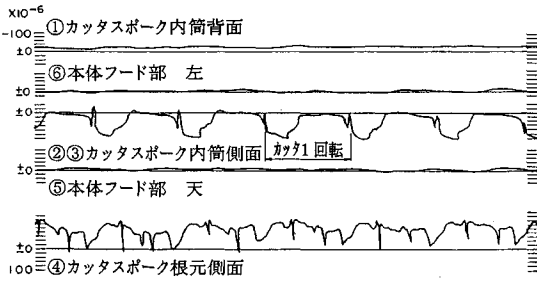


Fig.16 Strain pen-recorder data

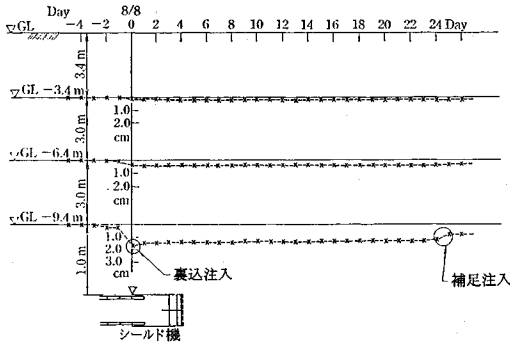


Fig.17 Time-elapsed change of underground displacement before and after passing a 400 m point

Table.5 Result of determination of operation loads

実験名 作動荷重		横浜の実工事 (KN × 10 ²)			
		無負荷時	装備 最大値	設定値	実測値
接合動作 伸縮スポーク	伸縮	2.5	5.9	4.5	2.6
	伸縮	3.1	3.2	2.0	3.2
貫入リング挿入	伸	0.5	23.5	13.7	15.7
	戻	0.5	11.0	0.5	—

Table. 4にカッタスポークおよび本体フード各部の計算値と実測歪値を、また、Fig.16に歪ペンレコーダ出力記録例を示す。カッタスポークの応力値はほぼ計算値か、それ以下であった。

200 mと400 mの2地点で伸縮カッタを作動した。シールド機直上1 mの測点においてテール通過後最大沈下量はそれぞれ34 mmと16 mmであり、テールポイド60 mmに比し十分小さく、伸縮カッタ作動による地盤への影響は微小と推定できる。Fig.17は400 m地点の地中変位記録である。

Table. 5に掘進終了後における伸縮カッタおよび貫入リングの作動荷重と設定値を示す。

伸縮カッタ縮小に要する荷重が設定値をかなり上回っている。これは伸縮カッタの回転防止用枠が両側側面2本であることが原因であると考えられる。今後のMSD機では背面1本に改良することとした。

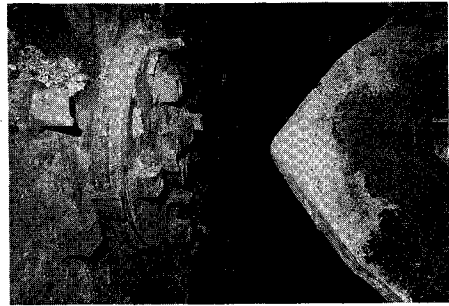


Photo.2 Front end of shield machine at docking point (Right side : worked this time)

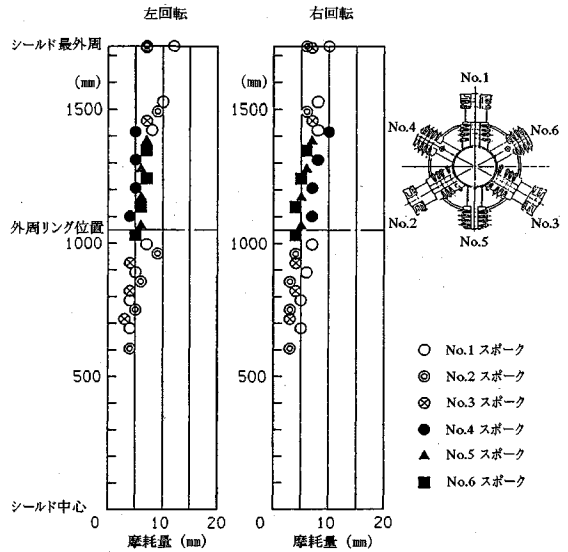


Fig.18 Excavation radius and cutter piece wear

また、貫入リング押出力は設定値をやや上回ったが、これは接合部の土質がほとんど砂礫であり、地盤改良も施されていることから、切羽にかなり強度があったものと考えられる。以上より貫入リングの作動性は760 m掘進後でも良好であることが認められた。Photo.2は接合地点のシールド機先端の写真で先着シールド機との誤差は20 mmであった。

所定の760 m掘進後カッタビット、貫入リング先端部の摩耗状況を計測観察したが、従来実績の摩耗と何等変わりがないことが判明した。Fig.18にビット摩耗量の計測結果を示している。

5. 実機設計

(1) 実機設計での特徴

2.で示した要求性能を発揮することが検証されたので、その点も踏まえて以下に実機設計での特徴を整理した。

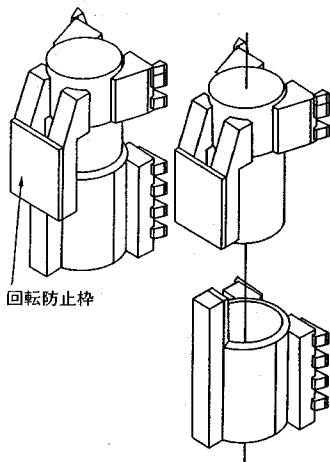


Fig.19 Rotation stopper frame

(2) 押出側シールド機

押出側シールド機には伸縮カッタ、貫入リング、カッタヘッドスライド機構を装備する。

① 伸縮カッタ構造：伸縮カッタは内外筒の構造とし、Fig.19の回転防止枠を持ち、伸縮用の油圧ジャッキをその中に格納する。ジャッキのストロークを正確に計測するために、油圧ジャッキの中に超音波ストローク計を内蔵する。この構造を採用することにより、ジャッキセンサーが直接地盤に曝されることがなく、信頼性の確保が可能である。

② 貫入リング構造：貫入リングは完全なリング体で、このリングの内側に貫入リング摺動のための軸受を取り付ける。この構造により、地盤から貫入リングは直接荷重を受けず、滑らかな摺動機能を確認することが可能である。

貫入リングの先端には、高土水圧（2.0MPa）に耐抗可能なリップシールを装備し、水・土砂の流入を完全に阻止する。

貫入リングは特殊油圧回路の採用により、常にシールド軸心と平行にスライド可能とする。また、各貫入リングジャッキの圧力を独立制御して、接合部での適正面圧を常に、管理・維持することを可能とする。

③ カッタヘッドスライド機構：カッタヘッドを回転させながら、スライド引き込みを可能な構造として、カッタチャンバに付着した土砂を完全に除去でき、カッタヘッドの引込信頼性を確保する。

④ 測量設備：接合相手シールド機の位置を確認するための、先行ボーリング（4B）可能な口元装置、シールド線形制御のためのレーザ測量装置などを搭載する。

(3) 受入側シールド機

受入側シールド機には、伸縮カッタ、受圧ゴムリング、貫入室、カッタヘッドスライド機構を装備する。

① 受圧ゴムリング：受圧ゴムリングは完全なリング体で、貫入リングとの接合面での適正面圧確保のための大きな変形が許容できる断面形状とする。

受圧ゴムリングには、高土水圧（2.0MPa）に対抗可能なリップシールを装備し、水・土砂の流入を完全に阻止する。

受圧ゴムリングは、同調油圧回路を採用し、貫入リングの押出力により、適正面圧を常に維持した状態で後退することが可能である。

② 貫入室：シールを装備し、接合作業時の耐圧性能向上を図る。計画接合精度（ ϕ 3,500クラスで軸ズレ ± 5 cm, 面角ズレ $\pm 1^\circ$ ）に対応した貫入室の大きさ（ ϕ 3,500クラスで190 mm）とする。

6. あとがき

MSD工法を実現するために必要なシールド機の各種性能は、従来の要素技術の延長にあるもので構成されているが、実験、実工事を通して得られた成果を、「5. 実機設計」での特徴として整理することができた。

MSD工法の実証実験機（ ϕ 3,470 泥水式）の設計・製作を経て、現在東京都水道局発注による東南幹線において、機械式地中接合の第一号工事が進捗している。マシン外径 3,430 mmの先着シールド機は泥水式（受入側）で既に掘進を完了し、後着シールド機（押出側）は鋭意掘進中である。

今後、東南幹線での掘進データからの反省と下記に示すような課題を克服し大口径に向けた開発を進めていく。

① カッタのセンター支持方式以外の支持方式

② 崩壊性の高い地盤における面板形状と切羽安定

工法確立とシールド機研究に御指導頂いた、民間開発建設技術審査証明の委員会（委員長 山本稔 都立大名誉教授）の各位、ならびに（社）日本建設機械化協会・建設機械化研究所の皆様へ深く感謝する次第です。

参考文献

- 堀内公雄：シールド工法の進歩 建設機械 P.35～P.36 1986年2月
- 姫路昭夫：シールドの地中接合の自動化技術について 土木学会 第7回建設用ロボットに関する技術講習会 1988年4月
- 後藤・宮沢・大石：MSD工法（メカニカル・シールド・ドッキング工法）の開発－その2 土木学会 第42回年次学術講演会 1987年9月
- 渡辺・宮沢・西岳：MSD工法（メカニカル・シールド・ドッキング工法）の開発－その3 土木学会 第43回年次学術講演会 1988年10月
- 渡辺・宮沢・西岳：MSD工法（メカニカル・シールド・ドッキング工法）の開発－その4 土木学会 第44回年次学術講演会 1989年10月

(1992.3.10 受付)

DEVELOPMENT OF SHIELD MACHINE FOR MECHANICAL SHIELD DOCKING METHOD

Toshio WATANABE, Kazuo MIYAZAWA,
Yoshihiro OISHI and Masahiko SUGIYAMA

This paper explains the development of "shield Machine" applied for the Mechanical Shield Docking (MSD) method. In this method, two shield machines start excavating either side and mechanically dock without any auxiliary work method for hardening the ground around the excavation face to prevent the ground collapse of the face top and spouting out of the pressurized water.

The shield machine applied for the MSD method has developed upon the model and practical work durability test results on the excavatability such as the cutter torque, thrust force and excavation face stability, and strength characteristics of the cutter and shield skin plate.
