

多連型シールド工法における周辺地山の挙動と切羽作用外力の実験的検討

Study on Acting Load on Face and Ground Behavior in MF Shield Driven Method

杉本 光隆* 才口 六男** 小杉 安則*** 高橋 伸裕****

Mitsutaka SUGIMOTO, Mutsuo SAIGUCHI, Ysunori KOSUGI, and Nobuhiro TAKAHASHI

Model tests on MF Shield by using MF shield model and circular one without cutting and mucking function were carried out, assuming the excentric state of operation. Based on the relative comparison of both models, the characteristics, such as, acting load on shield and ground behavior of MF shield driven method have been discussed. As results, 1) Murayama's theory can be applied to MF shield at active state and 2) Index of MF on axial force reaches 1.2 at passive state, were made clear.

Keywords: MF shield, model test, sandy ground, acting load, ground behavior

1. はじめに

近年、大都市での地下利用は複雑化かつ大型化してきているために、都市土木に代表されるシールドトンネルの施工では、近接施工の安全性及び経済性向上に努力が注がれている。こうした状況を背景にマシンの形状も円形から構築物のニーズにあった形へと多用化してきており、多連型シールドもその一つである。しかし、多連型シールドによる施工実績は数件しかなく、さらに同工法の研究は、装備能力に着目した研究が数例¹⁾あるだけで、周辺地盤挙動に着目した研究はほとんど行われていない。

そこで本研究は、円形シールドと多連型シールドの差異が顕著にあらわれると考えられる表-1に示す「異常時」を想定し、掘削取り込み機能を持たないシールド模型を用いた模型実験を行い、円形シールド工法と横三連シールド工法を相対的に比較することにより、横三連シールド工法の周辺地盤の挙動、切羽作用外力に関する横三連シールド工法と円形シールド工法の関係を明らかにすることを目的とする。施工上基本となる横三連シールド工法の切羽周辺の地盤挙動、切羽作用外力の異常時の特徴を、既存の円形シールド工法と対比して把握しておくことは重要である。

2. 実験方法・実験条件

2-1. 実験方法

横三連シールド工法の切羽の変位状態と周辺地盤変形挙動・切羽作用外力の関係を把握するため、掘削取り込み機能を持たないフラットなカッターフェイスを有する縮尺1/50の半断面のシールド模型を土槽（高さ100cm、長さ100cm、幅30～100cm）壁面に沿って設置し、シールド模型を地盤中で前進・後退させることにより、

* 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系

*** 正会員 (株) 間 組

** 東京都地下鉄建設(株)

**** 正会員 (株) 植 木 組

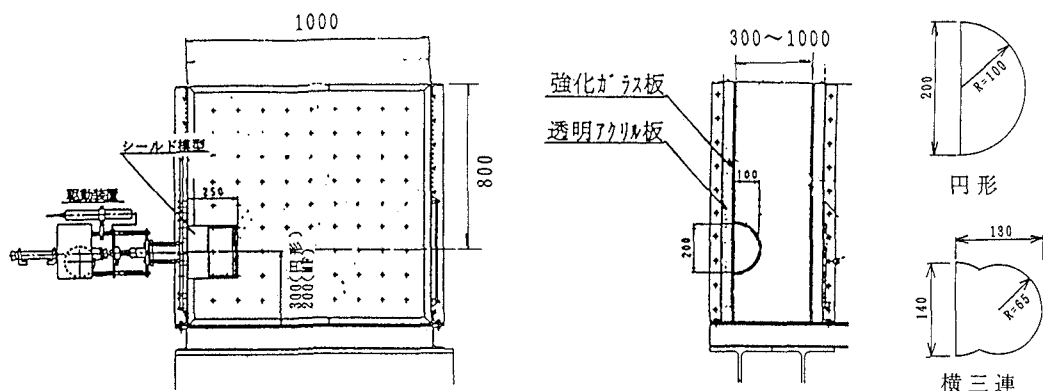


図-1 実験土槽・掘進型シールド模型概要図

表-1 想定した掘進状態

想定状態		実験の状態	実機の状態	備考
異常時	主働時	模型後退	切羽面を緩ませ気味に施工 (スラスト力・泥水圧の低下)	施工上重要
	受働時	模型前進	切羽面を押し気味に施工 (スラスト推力・掘進速度過大)	機械設計上重要
定常時		模型掘進	通常の施工	

表-2 計測機器一覧

計測項目	方法	設置位置	数量
シールドマシン移動量	ストローク計 (mm)	マシン後部	1
軸力	ロードセル (500, 20kgf)	切羽面 内側	2

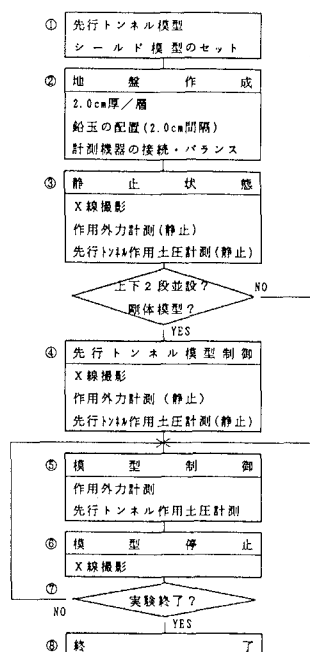


図-2 実験手順

表-1に示す「異常時」の施工状態を模擬した。なお、硬質ガラスでできた側壁による半断面模型の実験結果に与える影響は軽微であることを予備実験²⁾にて確認している。切羽の安定性については、X線³⁾または写真撮影により、切羽作用外力については模型内に設置したロードセルにより、地表面変位についてはレーザ式変位計により計測した。実験方法の概要を図-1に、実験手順を図-2に、計測機器一覧を表-2に示す。なお、実験地盤は、珪砂5号を用い空中落下法³⁾により作成した。

2-2. 実験条件

周辺地盤挙動と切羽作用外力に影響を与えと考えられる、F1 (Shape) シールド機形状 (円形、横三連)、F2 (δ) 切羽移動方向 (前進・後退)、F3 (D_r) 実験地盤の相対密度 (D_r : 70%, 40%)、F4 (W) 土槽幅 (30, 100cm) を実験因子とした。なお、実験地盤の硬軟による地盤密度 ρ_d 、内部摩擦角 ϕ はそれぞれ

硬地盤 (D_r : 70%) : $\rho_d = 1.663 \text{ gf/cm}^3$ 、 $\phi = 29.9^\circ$

軟地盤 (D_r : 40%) : $\rho_d = 1.578 \text{ gf/cm}^3$ 、 $\phi = 24.2^\circ$

表-3 実験ケース一覧

実験目的	Case No.	実験因子				模型制御			
		F1 Shape	F2 δ	F3 D	F4 W	0±2±5±10±20±30 移動量(mm)			
①基本ケース シールド機形状と切羽 移動方向の影響評価	1.1	円形 P	70	100		◇	◇	◇	◇
	1.2	横三連 ↓				◇	◇	◇	◇
	1.3	円形 A	30			◇	◇	◇	◇
	1.4	横三連 ↓				◇	◇	◇	◇
②軟地盤 地盤の硬軟による影響 評価	2.1	円形 P	40	100		◇	◇	◇	◇
	2.2	横三連 ↓				◇	◇	◇	◇
	2.3	円形 A	30			◇	◇	◇	◇
	2.4	横三連 ↓				◇	◇	◇	◇

<凡例>

・実験因子

・模型制御

F1(Shape):シールド機形状(円形,横三連)

◇:シールド模型停止・X線撮影

F2(δ):切羽移動方向(P:前進,A:後退)

◇:シールド模型停止・写真撮影

F3(Dr):実験地盤の相対密度(硬:70%,軟:40%)

◇:シールド模型停止

F4(W):土槽幅(cm)

表-4 切羽中心軸を含む鉛直断面内の緩み領域

実験条件 (Case No.)	緩み領域の幅 切羽部からの水平距離		緩み領域の高さ 切羽部からの鉛直距離	
	円	横三連	円	横三連
基本ケース (Case13,14)	①	42	41	294
	②	0.21	0.29	1.47
	③	0.42	0.32	2.94
	④	1.00	0.98	1.00
軟地盤 (Case23,24)	①	46	43	298
	②	0.23	0.31	1.49
	③	0.46	0.33	2.98
	④	1.10	1.02	1.01

(注意) ①:単位mm(地中変位ベクトル図よりスケールアップ)

②:距離/マシン高さ(横三連の場合マシンの中央での鉛直高さ)

③:距離/マシン幅(円:100mm 横三連:130mm)

④:距離/距離(円:基本ケース)

表-5 緩み領域理論値との比較

実験条件 (Case No.)		緩み領域の幅(mm) 切羽部からの水平距離			緩み領域の高さ(mm) 切羽部からの鉛直距離		
		円	横三連(1)	横三連(2)	円	横三連(1)	横三連(2)
基本ケース (Case13,14)	①実測値	42	41	43	294	214	195
	②理論値	56	39	37	256	179	166
	①/②	0.75	1.05	1.16	1.15	1.20	1.17
軟地盤 (Case23,24)	①実測値	46	43	44	298	216	215
	②理論値	52	43	40	262	184	170
	①/②	0.74	1.00	1.10	1.14	1.17	1.26

(注意) 円、横三連(1):切羽中心軸
横三連(2):側部カッター中心軸

であり、シールド模型移動速度 $V_z=5\text{mm/min}$ 、トンネル軸深さ $H=80\text{cm}$ とした。また、土槽幅は予備実験⁴⁾をもとに3次元結果が得られるように主働時30cm、受働時100cm、とした。実験ケース一覧を表-3に示す。

3. 実験結果と考察

3-1 主働時

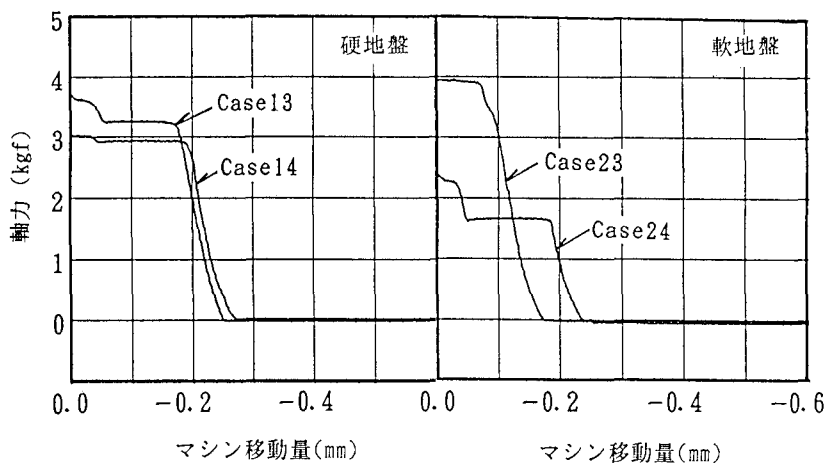
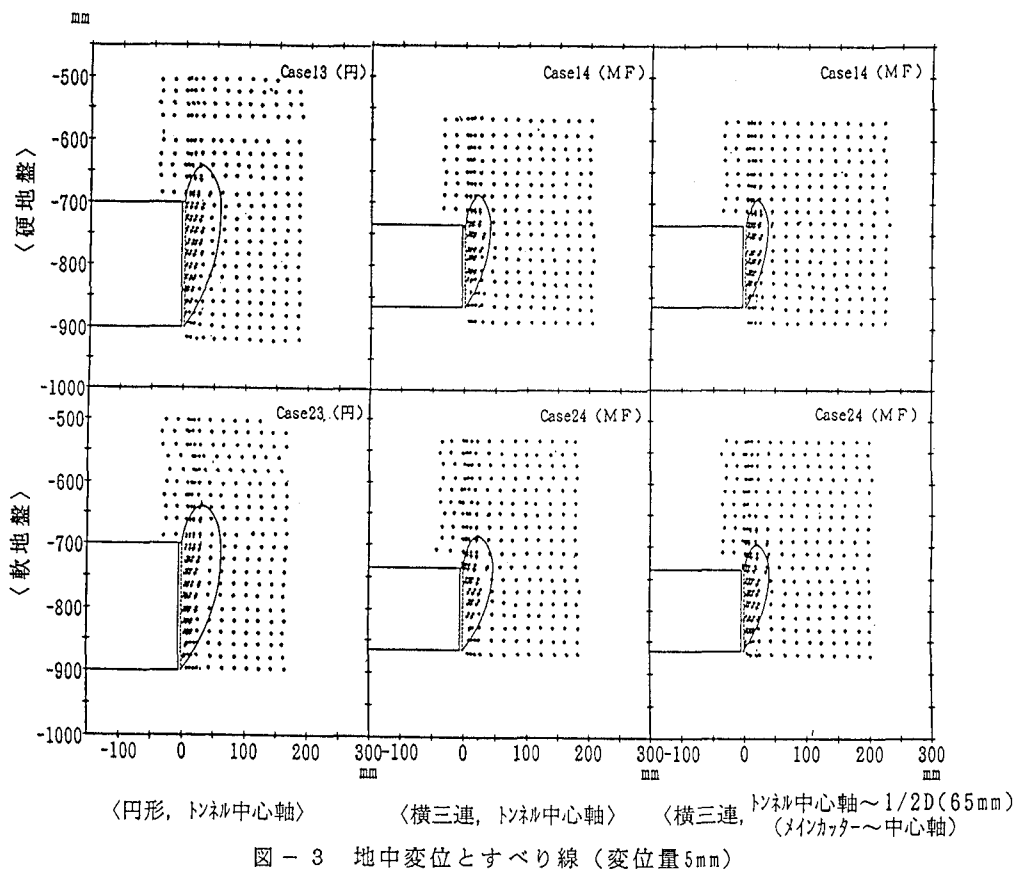
変位量5mmにおける地中変位ベクトル図に村山の理論(Kötterの塑性釣合式)により求めたすべり線を記入した地中変位図を図-3に、変位量5mmでの緩み領域の分布を表-4にまとめ、切羽中心軸及び、横三連側部カッター中心軸での実測値と理論値との比較を表-5に示す。これより以下のことがわかる。

これより

- ①円、横三連ともに理論とよい一致を示している。
- ②トンネル軸方向への緩み領域の拡がり(緩み領域幅)については、マシン高さで緩み領域幅を除いた値は、横三連は円より大きくなっている。さらに、理論値で緩み領域幅を除いた値も、横三連は円よりも大きく、かつ、1に近くなっている。
- ③鉛直方向への緩み領域への拡がり(緩み領域高さ)については、マシン直径で緩み領域高さを除いた値は、横三連と円でほぼ同じとなっている。さらに理論値で緩み領域高さを除いた値も同様な傾向で、かつ、1より少し大きな値となっている。
- ④地中変位は切羽中心軸からマシン外周部までの切羽近傍にのみ発生し、それより遠方には影響を及ぼしていない。
- ⑤軟地盤では、硬地盤より緩み領域幅・高さがともに数%~10%拡大するが、理論値で除した緩み領域幅・高さは、硬地盤と軟地盤でほぼ同じとなっている。

これらは以下のように考えられる。

- ①円形と横三連のマシンの幅/マシンの高さはそれぞれ、1.00と1.86のため、横三連に比較して、円形の緩み領域形状はマシン幅方向に対して3次元的な分布となっている。このため初期の緩み形状で決定される緩



み領域幅は円形より横三連の方が大きくなり、進行性破壊を示す緩み領域高さは土量収支の関係で、たまたま円形と横三連がほぼ同じとなっている。

②硬地盤より軟地盤の方が内部摩擦角が小さいために、軟地盤の方が緩み領域が広い。

変位量と軸力の関係を図-4に示す。これより、軸力は円、MFともに後退を開始してから変位量0.2mm位まで一定値を示した後、急激に低下し、0に近い一定値に収束する。これは以下のように考えられる。

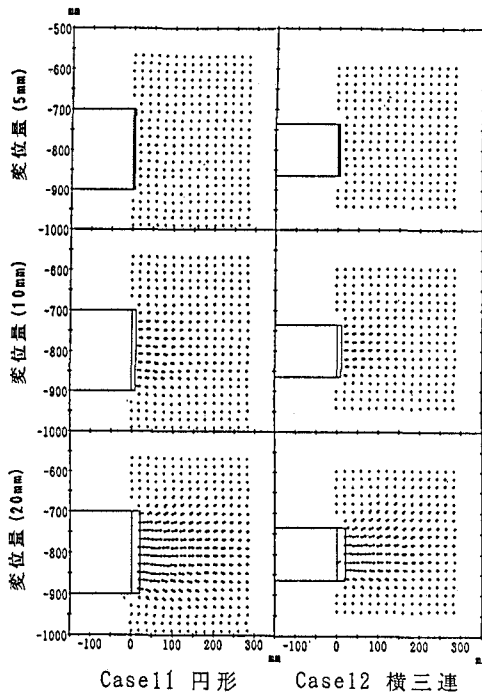


図 - 5 地中変位

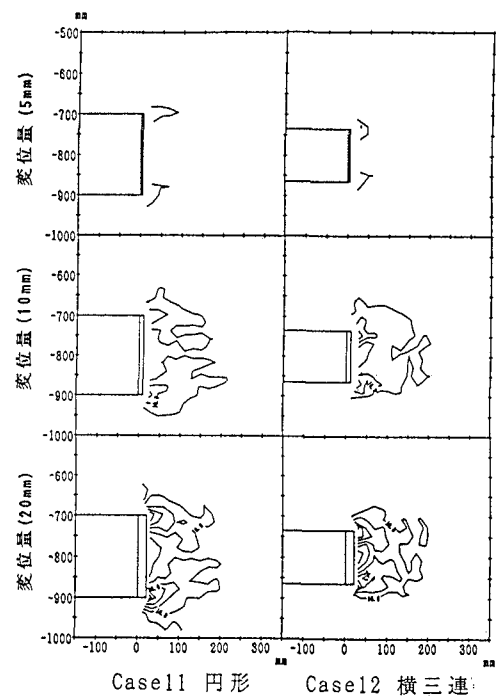


図 - 6 最大せん断ひずみ分布

- ①マシンの後退開始直後にグラウンドアーチが形成され、軸力は緩み土圧を示す。
- ②その後マシンが後退を続けると、グラウンドアーチが崩れ、残留状態に移行し、軸力は0に近い一定値に収束する。
- ③上記の現象は、硬質ガラスを側壁とする土槽では、側壁の摩擦の影響が軽微であることを示唆している。

3-2 受働時

地中変位と最大せん断ひずみ分布図をそれぞれ図-5, 6に示す。これより以下のことがわかる。

- ①同一変位量の場合、前方の影響範囲はほぼ等しく、高さ方向への影響範囲は円形に比し横三連の方が小さい。
- ②インバート部、クラウン部に大きなせん断ひずみが発生している。

変位量と切羽に作用する軸力 N の関係を、図-7に示す。さらに、ここで円形と横三連の軸力および、硬地盤と軟地盤での軸力を比較するために、横三連指数 (N) と軸力比 N^* を次式のように定義する。

$$\text{横三連指数 } (N) = \frac{N(\text{横三連})}{N(\text{円形})} \quad \text{軸力比 } N^* = \frac{N(\text{軟地盤})}{N(\text{硬地盤})}$$

変位量と横三連指数 (N) の関係を図-8に、変位量と軸力比 N^* の関係を図-9に示す。これより以下のことがわかる。

- ①全ケースとも貫入移行状態を示していて、貫入状態に到達していない。
- ②変位量が小さいところでは、軸力初期値のデータに微小なばらつきがあり、横三連指数 (N) 、 N^* に大きく影響するため変動が大きい、変位量が大きくなるにつれて一定値に収束する。
- ③切羽中心軸でのマシン移動影響範囲は、円形より横三連の方が小さいにもかかわらず、軸力は円形より横三連の方が大きく、最終的には横三連の軸力は円形の1.2倍となっている。これは、円形に比べ横三連のマシン幅が広いのでマシン移動に伴う地盤の影響範囲が円形より横三連の方が大きくなるためである。
- ④軟地盤における軸力値は、硬地盤の0.6~0.7倍であり、地盤の硬・軟が軸力に大きな影響を与えていること

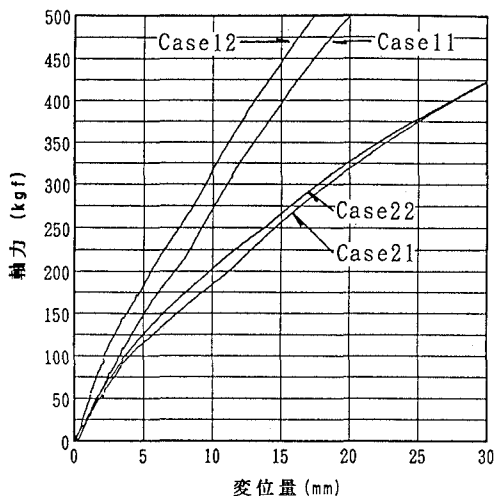


図-7 変位量と切羽作用外力の関係

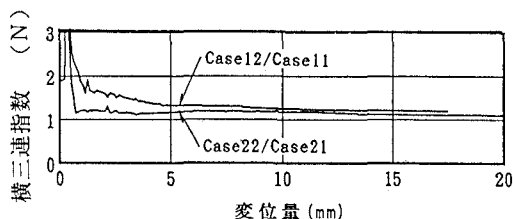


図-8 変位量と横三連指数の関係

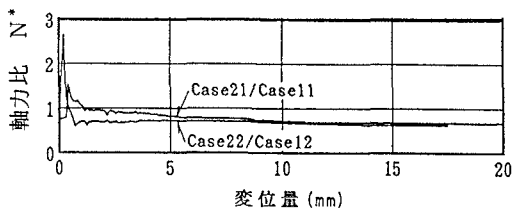


図-9 変位量と軸力比 N^* の関係

がわかる。これは、軟地盤では内部摩擦角が小さく、密度が低いためである。

4. まとめ

本研究において以下のような知見が得られた。

- ①主働時：緩み領域形状による3次元効果のために、緩み領域は、横三連より円形の方が若干小さくなっているが、概ね村山の理論と良い一致を示す。
- ②受働時：マシン移動に伴うトンネル軸方向への影響範囲は、円形と横三連で差異はほとんどなく鉛直方向の影響範囲は、円形より横三連の方が小さいがマシン幅方向への影響範囲は円形より横三連の方が大きい。この結果本実験の場合地盤の硬軟によらず横三連指数(N)は約1.2に収束した。
- ③地盤の硬・軟について：主働時では、硬地盤に比し軟地盤で緩み領域が数%~10%拡大する。一方、受働時には地中変位に地盤の硬・軟による差はみられないが、軸力は硬地盤に比し軟地盤で0.6~0.7倍に減少する。

5. 参考文献

- 1) たとえば松本嘉司, 新井時夫, 波多腰明:「多円形断面シールドの掘削特性に関する実験的研究」, 土木学会論文集N0.406, 1989.6.
- 2) 杉本光隆, 西尾誠高, 団昭博:「全断面・半断面シールド模型を用いた切羽周辺地盤挙動の比較」土木学会第49回年次学術講演会Ⅲ, 1994
- 3) DS研究会機械分科会:「斜坑シールド工法における切羽安定性の評価に関する研究」, 1991.
- 4) 杉本光隆, 小杉安則, 高橋伸裕:「シールド模型実験時における土槽幅の影響」土木学会第49回年次学術講演会Ⅲ, 1994