

外殻先行シールド工法に用いるシールド機の 切羽安定性と負荷特性・姿勢制御性に関する模型掘削実験

Experimental Study on Characteristics of Shield for the Outer-Shell-Driven Shield Tunnelling Method

井田隆久^{*}、二宮康治^{**}、奥 利明^{***}、大石善啓^{****}
Takahisa IDA, Kouji NINOMIYA, Toshiaki OKU, Yoshihiro OOishi

The Outer-Shell-Driven Shield Tunnelling Method is a totally new approach to a large scale or a non-circular cross section tunnel.

In this study, an experiment is executed to clarify the basic behavior of the Outer-Shell-Driven Shield.

The results show that the cutter torque of the outer-shell driven shield is smaller than that of a circular face shield and that the outer-shell-driven shield has good characteristics in its steering control and in the stability of the cutting face.

Keywords: Outer-Shell-Driven, shield tunnelling, non-circular cross section, cutter torque, stability of cutting face

1. はじめに

外殻先行シールド工法は、トンネル掘削を行う場合にトンネルの外殻部を先行掘削し、覆工した後、内部残置土を掘削する工法であり、大断面トンネル、異形断面トンネルを建設する場合に有効な工法の一つである。

本研究では、外殻先行シールド工法のうち、外殻部を一体のシールドで同時に掘削する場合のシールドについて検討する。本研究で提案しているシールドの概念図を図-1に、このシールドによる施工イメージを写真-1、2に示す。以下、このシールドをリングシールド¹⁾と称す。

本工法は以下のような特長を有する。

- ① 掘削断面積が小さいため、地山の安定が図りやすく、大断面トンネルの施工が可能。

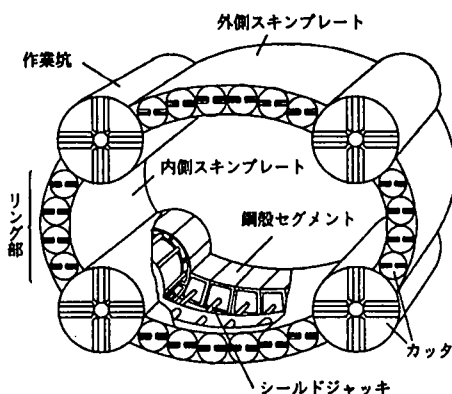


図-1 リングシールドの概念図

^{*} 正会員 (株) 銭高組 技術研究所
^{**} 正会員 日本国土開発 (株) 技術本部
^{***} 正会員 不動建設 (株) 技術開発本部
^{****} 正会員 三菱重工業 (株) 技術本部

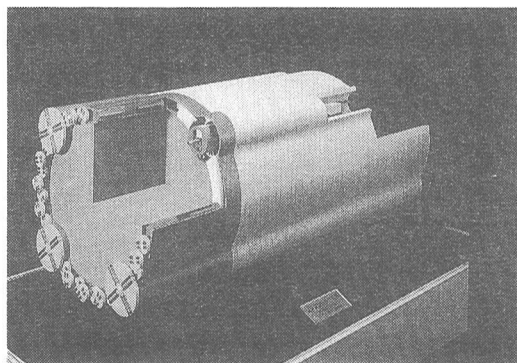


写真-1 前方から見た施工状況

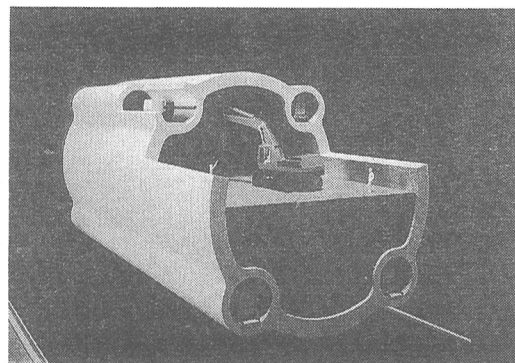


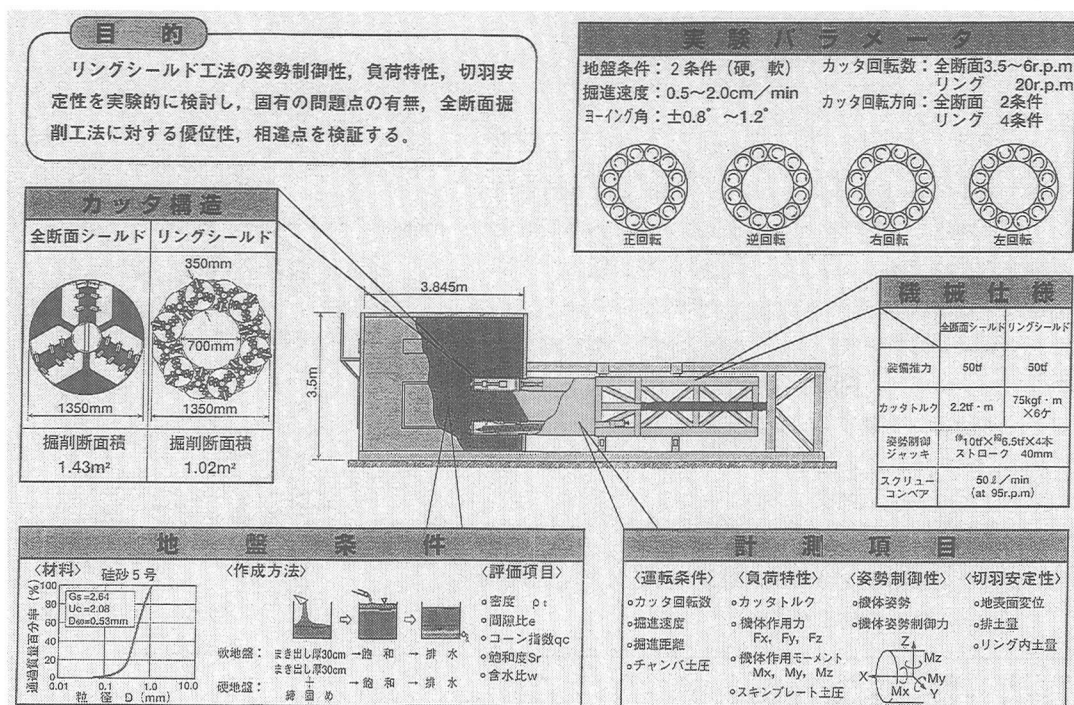
写真-2 後方から見た内部掘削状況

- ② 作業坑間を直線や円弧で構成することにより、断面形状を任意に選定できる。
- ③ 覆工部のみシールド掘削するため、産廃土の低減が可能。
- ④ シールドの軽量化・地上設備の簡略化が可能である。

しかしながら、本工法のシールドは、内外二重のスキンプレートをもち、外殻部のみを先行して掘削し、マシン内部に地山を抱えたまま掘進するという従来にない掘削機であり、その特性は十分に把握されていない。

そこで本研究では、円形リング状掘削シールドおよび円形全断面掘削シールドの1/10スケール相当の模型掘削実験を行い、切羽安定性の確認、姿勢制御性、負荷特性などについて検討する。

円形的全断面掘削のシールドでは、模型と実機の挙動の相関がある程度得られていることから、円形全断面掘削の模型シールドと円形リング状シールドの模型掘削実験を行い、それらの結果を比較することにより、外殻先行シールド工法に用いるシールド機の特性を把握することができる。



なお、円形と楕円の形状による差異、作業坑の有無による影響などは別途検討中である。

2. 実験概要

2. 1 実験装置

実験の概要を図-2に示す。

実験装置は、土かぶり1D(D:シールド外径)の位置をD=1.35mのシールド模型が油圧ジャッキにより直進する構造となっている。カッタは面板式で、装置制作上の都合から掘削方式は開放型であり、チャンパー内の排土はスクリーコンベアーにより行っている。リング状シールドの12のカッタは2個づつが対になっており6組それぞれのカッタは独立の駆動が可能である。

また、姿勢変化ジャッキを用いて強制的に±1.5°の範囲内で姿勢変化を与えることも可能である。全断面シールドの模型を写真-3に、リングシールドの模型を写真-4に示す。

図-2に示した計測項目のうち、機体作用力(Fx, Fy, Fz, Mr, Mp, My)は、6本の軸力計を図-3に示すように配置し、その測定値を用いて式-(1)の関係から算出した。

$$F=J^T C \quad \text{-----(1)}$$

ただし、

$$J = \begin{bmatrix} u_1^T (S_1 \times u_1)^T \\ u_2^T (S_2 \times u_2)^T \\ \vdots \\ u_n^T (S_n \times u_n)^T \end{bmatrix}$$

F：機体作用力

C：軸力計の軸力

u_i：軸部材後胴部取付点から前胴部取付点
 に向かう単位ベクトル

S_i：前胴側中心から軸部材前胴部取付点ま
 での距離ベクトル

2. 2 実験条件

実験条件を表-1に示す。

実験地盤は、切羽が崩壊しにくい地盤(以後 硬地盤と称す)としやすい地盤(以後 軟地盤と称す)の2種類の地盤状態を設定した。地盤材料には、珪砂5号を使用した。平均的な土質定数を表-2に示す。また、湿潤密度、含水比などの土質定数は、Radio Isotope 式水分密度計を使用して測定した。

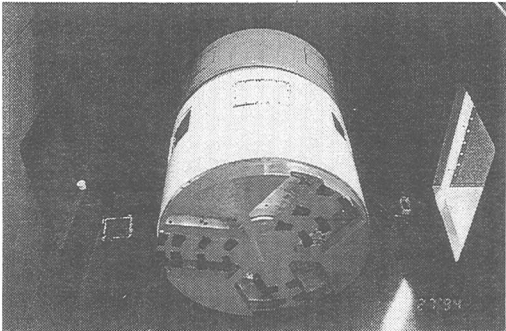


写真-3 全断面シールド模型

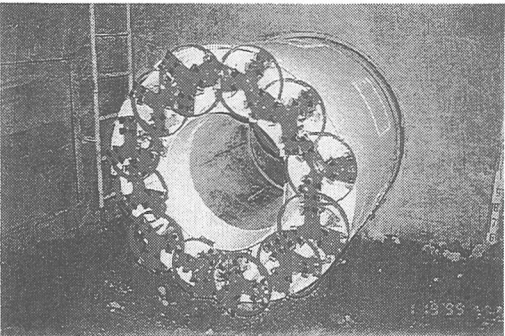


写真-4 リングシールド模型

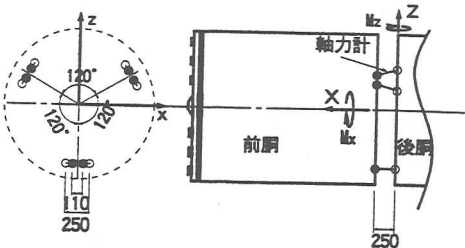


図-3 機体作用力測定軸力計配置

表-2 実験条件

掘削形式	リングシールド方式, 全断面シールド方式
地盤条件	硬地盤, 軟地盤 (珪砂5号使用)
掘進条件	v/f (v:掘進速度, f:カッター回転数) カッター回転方向(図-5参照)
機体姿勢	ヨーイング角

表-3 地盤条件

	硬地盤	軟地盤
湿潤密度 ρ _w (g/cm ³)	1.80~1.85	1.60~1.70
乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	1.58~1.62	1.43~1.47
間隙比 e	0.63~0.67	0.80~0.85
相対密度 D _r (%)	88~99	39~52
含水比 ω (%)	13.0~14.3	14.0~16.2
飽和度 S _r (%)	45~65	40~65
コーン指数 q _c (kgf/cm ²)	22~61.8	3.6~16.7

掘削条件は、マシン外径1.3mの全断面タイプ及びリングタイプのシールド模型で、掘進速度、カット回転数、カット回転方向の運転条件をパラメータとして掘削した。また、リングシールドのカッター回転方向を図-2のように定義した。

計測項目は、シールドに関しては負荷特性としてカットトルク、機体作用力を、姿勢制御性として機体姿勢、機体姿勢制御力を計測した。

切羽安定性に関しては、地盤の地表面変位、地盤のコーン指数、排土量を計測した。

3. 実験結果

3. 1 負荷特性

(1) カッタートルク

カッタートルクが定常状態にある安定掘進条件下での硬軟両地盤における全断面シールドとリングシールドの総カッタートルクを比較したものを図-4に示す。リングシールドの総カッタートルクは合計12個のカッタートルクの総和で示した。

リングシールドの総カッタートルクは、全断面シールドに比べ小さく、その比は1/10程度である。これは、掘削断面積が全断面シールドに比べ小さいことと個々の面板の径が小さいことによる。

次にカット径を考慮に入れたトルク係数を比較したものを、図-5に示す。なお、トルク係数 α は次式で算定した。 $\alpha = D^3 / T$ (T: シールドのカッタートルク、D: カッター径) リングシールドの α は、個々のトンネル径が小さく切羽安定性が増すため、全断面シールドに比べて硬地盤で1/2、軟地盤で1/5程度である。また、リングシールドの場合軟地盤条件下でも硬地盤と同程度の値となっている。

また、全断面シールドの α も一般の α に比べると小さな値となっており、実験で作成した地盤は実際の地盤と比べると切羽安定性の良い地盤であると言える。

(2) 推進力

全断面シールドとリングシールドの推進力 F_x を図-6に示す。 F_x は、掘進条件、地盤条件によって変動はあるが、全断面シールドとリングシールドに大差はない。これは、掘削断面積の減少分が内部土砂との摩擦により相殺されたためと考えられる。しかし、本実験に用いた模型のリングシールドでは未掘削部分の実機より大きかったことから、スキンプレートと土砂との摩擦係数 μ の値によっては、全断面シールドに

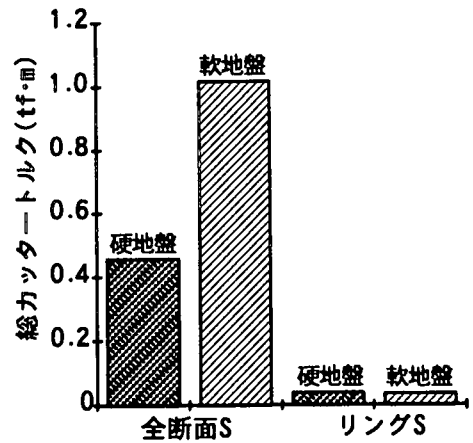


図-4 総カッタートルクの比較

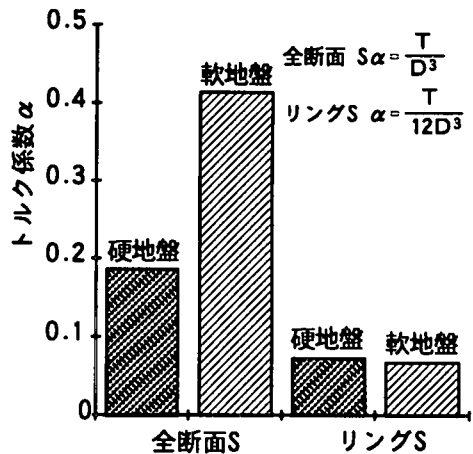


図-5 トルク係数の比較

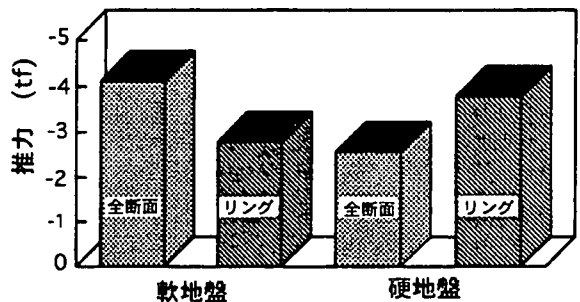


図-6 推進力の比較

比べ小さな推進力で掘進可能となることも考えられる。

3. 2 姿勢制御性

(1) ローリングモーメント M_r

全断面シールドおよびリングシールドのカッター回転方向と M_r の関係を図-7に示す。全断面シールドでは、カッターの回転方向と逆方向の M_r が作用している。また、リングシールドの場合も、右回転、左回転の場合に全断面シールドと同様な傾向が認められる。しかし、 M_r の絶対量は、リングシールドが全断面シールドの場合の1/10程度である。

このことより、シールドそのものの直進性は確保し易いと判断される。

(2) ピッチングモーメント M_p

カッター回転方向と M_p の関係を図-8に示す。全断面シールドおよびリングシールドにはカッターの回転方向によらず、-1.0~-2.0 $\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度の M_p が認められる。また、リングシールドのピッチングモーメントがやや大きい。これは模型シールドの上載荷重およびリング内土砂によるものと考えられる。

(3) ヨーイングモーメント M_y

全断面シールドおよびリングシールドのカッター回転方向と M_y の関係を図-9に示す。全断面シールドでは、カッター回転方向に応じた M_y が発生している。リングシールドの場合も基本的には同様な特性を示しているが、その絶対量は全断面シールドの1/3程度である。

模型シールドに強制的にヨーイングを与えた場合の M_y とヨーイング角 $\Delta\theta$ との関係を硬地盤について図-10に示す。リングシールドも全断面シールドも M_y と $\Delta\theta$ の間には比例関係が認められ、リングシールドと全断面シールドの比例係数は同程度であった。このことより、リングシールドの姿勢制御は、従来のシールドと同様のジャッキ操作で行えるものと判断される。

3. 3 切羽安定性

(1) 地表面変位

硬軟両地盤におけるシールド掘進に伴うシールド横断面方向の地表面変位分布の例を図-11に示す。

地表面変位量は、全断面シールドよりもリングシールドの方が小さく、断面中央のリングシールドの沈下

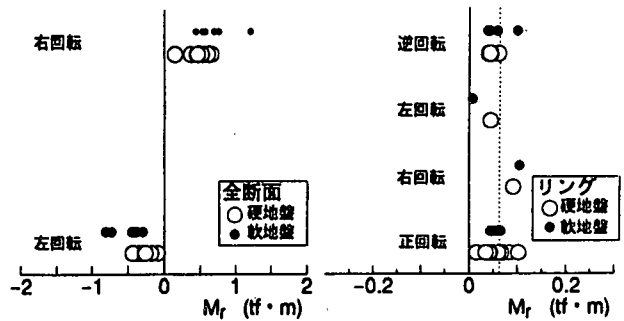


図-7 カッター回転方向と M_r の関係

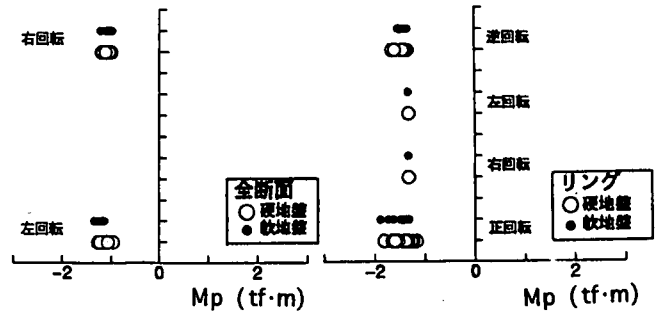


図-8 カッター回転方向と M_p の関係

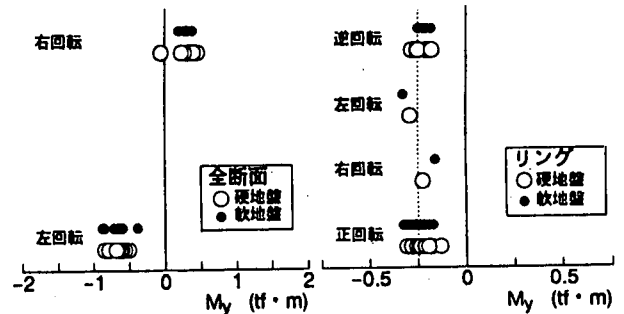


図-9 カッター回転方向と M_y の関係

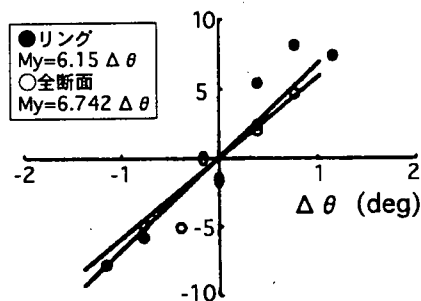


図-10 M_y とヨーイング角 $\Delta\theta$ との関係

量は、軟地盤で1/2、硬地盤で1/4程度である。これは、リングシールドの方が応力解放する断面積が小さいうえ、カッター径が小さいために掘削に伴う地盤の乱れが少なく、切羽安定性が優れているためと考えられる。

(2) コーン指数測定

実験前後にコーン貫入試験を実施し、シールドの掘削による地盤のゆるみ領域の広がりを調べた。掘削断面中央の硬地盤における全断面シールド、リングシールド掘進前後のコーン指数の変化を図-12に示す。

リングシールドでは、掘進前後のコーン指数の変化はほとんど認められないが、全断面シールドではシールドクラウン部からおよそ1 m程度上部までコーン指数の低下が認められ、ゆるみ領域は地盤内で閉じている。このことより、リングシールドの方が全断面シールドより切羽安定性の点で有利である。

4. まとめ

今回の実験により以下の知見が得られた。

- リングシールドの総カッタートルクは、全断面シールドの1/10程度である。また、リングシールドのトルク係数は全断面シールドに比べて硬地盤で1/2、軟地盤で1/5程度である。
- リングシールドの推進力は、掘削断面積の減少分が内部土砂との摩擦により相殺され、全断面シールドと変わらない。
- リングシールドの機体作用力は、全断面シールドと比較して小さく、ヨーイングモーメントは1/3、ローリングモーメントは1/10程度であり、シールドの直進性は確保し易い。
- シールドの姿勢変化に必要なヨーイングモーメントは、リングシールドおよび全断面シールドとも同程度である。これは、リングシールドの姿勢制御が、従来のシールドと同様のジャッキ操作で行えることを示唆している。
- リングシールドの地表面沈下は全断面シールドの1/2程度であり、コーン指数の低下は、全断面シールドでは見られるものの、リングシールドの場合認められない。

以上、本実験により開発中のリングシールドが切羽安定性、負荷特性、姿勢制御性のいずれにおいても、従来の全断面シールドと同等以上の性能を有することが確認された。

なお、本研究は五洋建設(株)、住友建設(株)、(株)銭高組、東急建設(株)、日本国土開発(株)、不動建設(株)の6社の共同研究として、三菱重工業(株)の協力を得て実施したものである。また、本研究を進めるにあたっては、早稲田大学 小泉教授にご指導をいただいております、ここに深く感謝する次第である。

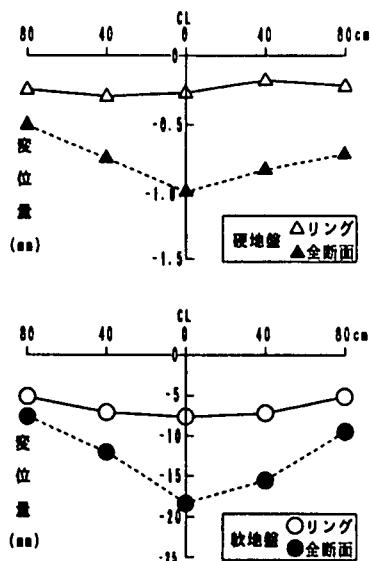


図-11 地表面沈下の比較

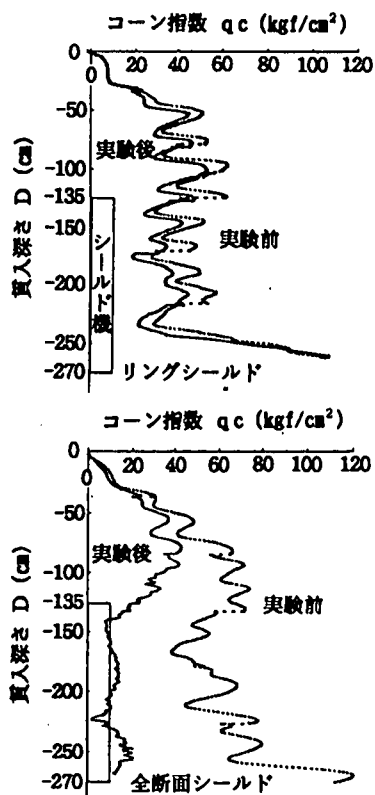


図-12 掘削前後のコーン指数の変化