

平行リンク掘削機構による矩形断面シールド掘進実験 EXCAVATION EXPERIMENT BY SQUARE SHIELD WITH PARALLEL LINK EXCAVATION MECHANISM

加島 豊*・井上正巳*・寺嶋 良・北村行宏
Yutaka KASIMA, Masami INOUE, Makoto TERAJIMA and Yukihiro KITAMURA

The parallel link excavation mechanism is the one to make it possible to excavate various shaped sections such as oval, square and horse shoe shapes etc. Various sections can be excavated by round moving cutter combined with parallel link excavation mechanism.

This excavation experiment, using above square shield machine (1.04m×1.35m), clarified fundamental function, driving function and driving control etc. through the driving trial in various artificial layers (fine sand, hard sand, sand and gravel, sand and gravel with boulder).

Keywords: Square, Shield, Muddy Soil, Experiment, Parallel Link

1. はじめに

近年、東京をはじめとする大都市の経済活動・生活環境の基盤整備の拡充に伴い、地下空間を有効に利用する計画が進められている。

地下を有効に利用するために、不要な幅や高さを持たない断面、即ち円形断面よりむしろ隣形、矩形、楕円形などの様々な断面形状を掘削可能にするシールドトンネル技術として、現在、平行リンク機構を利用した掘削装置を持つシールドの開発を進めている。

以下に、矩形断面シールドの掘進実験の概要と成果について述べる。

2. 平行リンク掘削機構の説明

図-1 に本機構の原理を示す。2つの回転軸の先端

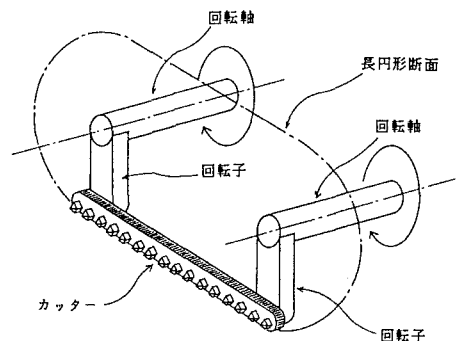


図-1 掘削の原理

には、回転軸に直角に回転子が固定されている。この回転子の端部には、掘削具が平行リンク状に設けられ、その取り付け位置には2つの軸受けを持っている。この2つの回転軸が同一方向に回転すると、掘削具は平行リンク運動を行い、一点鎖線で囲まれた部分を移動する。つまり、掘削具によって長円形断面を掘削する事が出来る。

この平行リンク掘削機構を複数組み合わせることで、円形、矩形、楕円形、円環形、馬蹄形などの多種多様の断面を円運動によって掘削することができる。

3. 矩形断面シールド掘進実験

写真-1 に示すように、矩形断面シールド機（泥土加圧式）を実用機レベルで製作し、土槽内の人工地盤を繰り返し掘進することによって、本機の基本的な性能を把握すると共に、実用化の可能性を検証した。

3・1 実験概要

本掘進実験は、図-2 に示すように土槽内に作った人工地盤を実験機により繰り返し掘進し、各種データをコンピュータにより収集解析した。

人工地盤は、表-1 に示す細砂地盤、固結砂地盤、砂礫地盤、玉石混じり砂礫地盤とした。

細砂地盤は、礫分5%、砂分92%、シルト・粘土分3%とシルト・粘土分が少なく均等係数（ $U_c = 2.3$ ）の小さい地盤で、N値が2～4と比較的小さく崩壊性の高い地盤である。

固結砂地盤は、N値が50程度の砂地盤や、発進、到達等における地盤改良区間の掘進を想定し、一軸圧縮強度4.7kg/cm²（24時間強度）のベントナイトモルタルで、土槽内に固結地盤を作った。

砂礫地盤は、礫分60～70%、砂分28～38%、シルト・粘土分2%の人工地盤とし、最大粒径30mm程度とした。また、地盤はランマで転圧し、スウェーデン式サウンディングコーン試験によれば、N値は15～25程度であった。

玉石混り砂礫地盤は、上記砂礫地盤に更にスクリーコンベアで取り込み可能な玉石（max110mm×60mm）を掘削断面内に約220個（130個/m²）層状に敷き詰めランマで転圧した。N値は15～25程度であった。

3・2 矩形断面シールド実験機

本実験機は、図-3 に示す様に縦径1040mm、横径1350mm、4隅が半径150mmの矩形断面シールド機であり、カッターヘッドは、回転子と直結する4台の油

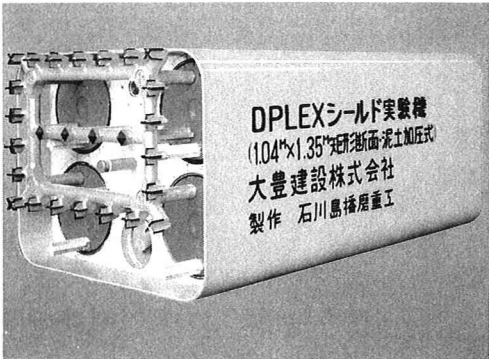


写真-1 実験機

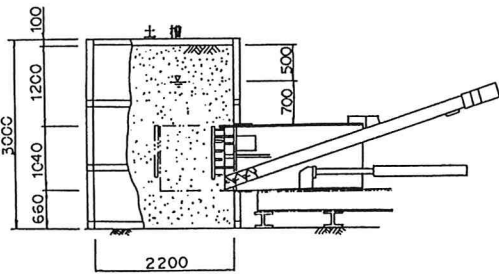


図-2 実験土槽

表-1 人工地盤

	均等係数	N 値 *	備 考
a. 細 砂	2.3	2 ～ 4	
b. 固結砂	—	40 ～ 50	qu=4.7kg/cm ² のベントナイトモルタルを使用
c. 砂 礫	76.7	1 ～ 3	粒調M30・0を使用
	10～19	15～25	単粒度のブレンド **
d. 砂 礫 (玉石混)	—	15 ～ 25	最大粒径 110mm×60mm

注) * 各土質のN値測定は、スウェーデン式サウンディング試験により換算した。

尚、各土質の柱状図は土槽セクターで測定した結果である。

** 単粒度砕石5号（粒径20～13mm）、7号砕石（粒径5～2.5mm）及び細砂を2：2：1の割合で混合した砂礫。

Technical drawing of a hydraulic system for a vehicle, showing a top view of the hydraulic manifold and a side view of the hydraulic cylinder assembly.

Top View (Left):

- Dimensions: 1380 (width), 1040 (height).
- Labels: 土圧計 (Soil pressure gauge), 注入口 (Injection port).
- Section line A-A.

Side View (Right):

- Dimensions: 130, 200, 230, 1670, 2300.
- Labels: 回転子 (Rotor), 支持軸 (Support shaft), 油圧モーター (Hydraulic motor), スクリューコンベヤ (Screw conveyor), シールドジョイント (Shield joint), 注入口 (Injection port), 土圧計 (Soil pressure gauge).
- Section line A-A.

シ ー ル ド	
シールド外径	1040(縦)×1350(横)
機 長	2300
推 力	最大80 t (約43 t/m3)
シールドジャッキ	30 t×150kg/cm2×1050mm(2+2)
ジャッキ速度	～60mm/min
パワー	油圧ポンプ 21/min × 180kg/cm2
ユニット	電動機 7.5kw×4p×400v×1台

カ ッ タ ー	
カッタートルク	1336kg-m
回 転 数	～12rpm
油 圧 モ ー タ ー	334kg-m×280kg/cm2×4台
パワー	油圧ポンプ 40l/min × 280kg/cm2
ユニット	電動機 30kw×4p×400v×1台

ス ク リ ュ ー コ ン ペ ア	
羽根径×ピッチ	φ190×160
回 転 数	0 ～ 19rpm
油 圧 モ ー タ ー	334kg-m×280kg/cm2×4台
パワー	油圧ポンプ 15l/min × 280kg/cm2
ユニット	電動機 11kw×4p×1台

(1) カッター装備トルク

(2) カッター回転数

図-4 クロスビット

(3) カッタービット

図-5 四角すい形ビット

(4) 練混ぜ装置

練混ぜ翼は、図-6、図-7に示すように、泥土の共
回りを防ぎ、より練混ぜ効果を高めることができるよう
に、カッターヘッドの背面および回転子側に取り付けた。

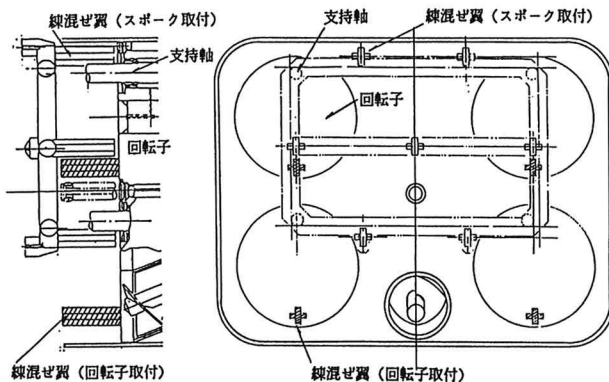


図-6 練混ぜ翼配置図

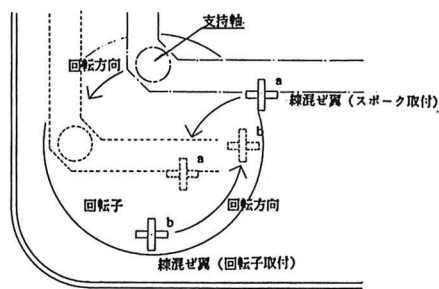


図-7 練混ぜ翼回転軌跡図

3・3 実験結果

(a) 細砂地盤掘進実験結果

本実験の掘削管理条件として、従来の円形シールドの実績を基準にトルク管理領域を50～100、100～150、150～200 kg/cm²の3段階、および回転数を5、8、11 rpmの3段階とし、各々の組み合わせにより掘削を行った。

① カッタートルク

図-8は、カッタートルクと作泥土材の注入流量を示すもので、カッタートルクは作泥土材の注入によって制御可能であり、ほぼ一定の範囲内で管理できた。掘進中の平均トルクは約0.6 tfmで本機装備トルク1.336 tfmの約45%程度で掘進可能である事が確認された。

② 掘進制御

図-9は、掘進土圧、掘進速度、スクリー回転数の状態を表すもので、各データとも多少の変動はあるもののほぼ一定の範囲の中で推移しており、泥土が均一な塑性流動性を有し、安定した掘進ができた事を示している。なお、排出泥土の性状は、スランプ7～14 cm、含水比27～29%であった。

③ カッター回転数

3段階の回転数(5、8、11 rpm)と3段階のカッタートルク(低域トルク、中域トルク、高域トルク)管理によって掘進を行い、その掘進データ及び排出泥土の性状から適正な回転数領域を探った結果、本実験では8 rpm(周速7.5 m/min)程度が適していた。

④ 姿勢特性

図-10に実験機のピッチング、ローリング変化図を示す。ピッチングは、掘進データからはわずかに上向き傾

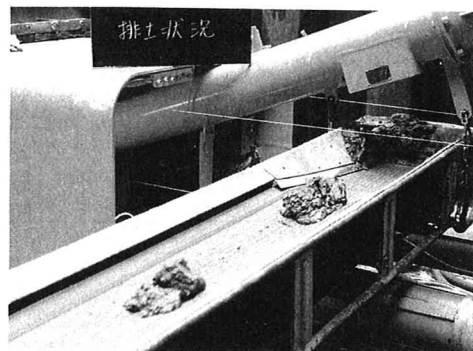


写真-2 排土状況

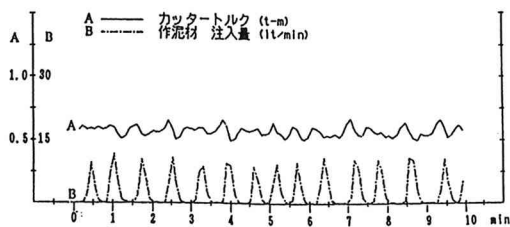


図-8 作泥・カッタートルク図

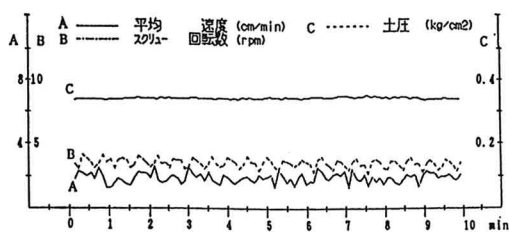


図-9 速度・スクリー回転数・土圧変化図

向を示しているが、これは本実験装置に装着されている推進ジャッキの取付位置が掘進機の中央よりやや下側であるため、やや上向きの傾向を示したものと思われる。

従来の円形シールドはカッター回転方向と逆方向にローリングする傾向を持つが、本実験機においても同様な傾向がみられた。ローリングの発生量は図-10に見られるように非常に微少であった。尚、掘進中のカッター回転方向は、同一とした。

(b) 固結砂地盤掘進実験結果

掘進は細砂地盤の実験結果より選定したカッター回転数約8 rpm および同等のトルク管理(0.5 tfm ~ 0.7 tfm)によって、掘進速度を低速から開始し、掘削の状況を確認しながら徐々に速度を上げてどの程度までの掘進が可能かを検証した。

① カッタートルク

図-11は、カッタートルクの変化図である。図中A部は、切削前の無負荷トルクで、図中B部は掘進速度0.4 cm/minにおける掘削土砂が充填する前のカッター切削トルク(0.1 tfm ~ 0.2 tfm)であり、切削のみにかかるトルクは非常に小さい。

更に作泥土材を注入しながら同じ掘進速度で掘進していくと、練混ぜ抵抗が加わってC部の如くカッタートルクの増加及び変動幅の増加がみられた。掘進速度を徐々に上げて、最終的にカッタートルクは約0.6 tfm ~ 0.75 tfmで、掘進速度は約15 mm/min程度での掘進が可能であった。

(c) 砂礫地盤掘進実験結果

① カッタートルク

図-12はカッター回転数8 rpm時のトルク変化図であるが、変動幅は一定範囲内で管理され、細砂地盤掘進実験の時とはほぼ同程度のカッタートルク約0.6 tfm程度で掘進可能であった。

② 掘進制御

土圧の変動幅とカッタートルクの変動を主に、排土の性状を観察しながら掘進した。土圧、掘進速度、スクリー回転数の変化を図-13に示すが変動は一定範囲内に管理されており、安定した掘進ができた。

③ 姿勢制御

図-14はピッチング、ローリングの変化図である。微小変動を起こしているが、全体的にはほぼ一定値を保っている。ピッチングは開始前、終了時で変化はなく、ローリングにおいてもわずか0.02°の変化量であった。

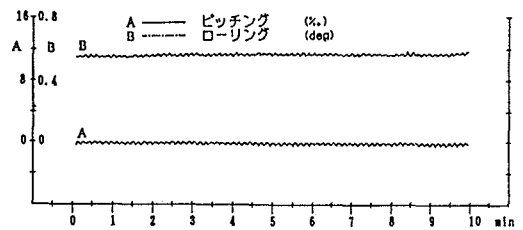


図-10 ピッチング・ローリング図

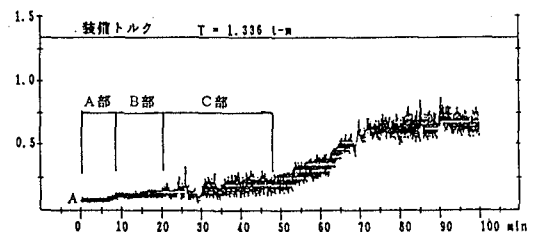


図-11 カッタートルク変化図

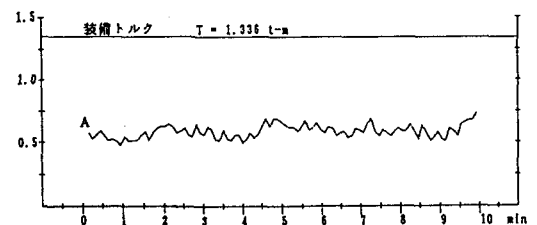


図-12 カッタートルク変化図

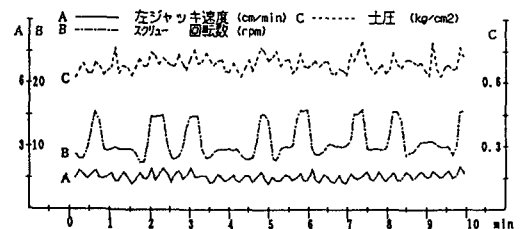


図-13 速度・スクリー回転数・土圧変化図

(d) 玉石混り砂礫地盤掘進実験結果

① カッタートルク

玉石混り砂礫地盤を掘進したとき、掘進中幾度かカッターが停止した。

しかし、その都度カッターの回転方向を切り替える事によって、予定のストロークを掘進することができた。カッターの停止は、練混ぜ翼がフード部下側で玉石を噛み込んだ事により生じており、破碎された玉石が多数排出された。

また、カッター圧力のリリース時を除く全体的トルクは、細砂地盤及び砂礫地盤掘進実験の時とほぼ同等であった。

② 掘進制御

土圧管理は、カッターのリリースによって断続的な掘進となったことと、破碎された玉石等の噛み込みによって土圧計のゼロ点が度々狂い、一定の土圧範囲内で掘進することはできなかった。しかし、前回の砂礫実験と同様に、土圧の変動幅、カッタートルクの変動幅および排土の性状を観察しながら掘進した。

尚、平均掘進速度は約0.75 cm/minであった。

③ 玉石排出状況

玉石は掘削断面内に約130個/m³の割合で混入したが、排出された個数は約120個/m³であり、ほぼ掘進量に見合った割合で排出された。

写真-3は排出された玉石であり、破碎の割合は30～40%であった。

3・4 ビット摩耗状況

各ビットは、平行リンク掘削機構によって半径150 mmの円を描いて掘削するため、各ビットの摺動距離は全て等しく、各人工地盤における全摺動距離は約4.8 kmとなる。

全実験終了後のビットの摩耗状況は、クロスビット、四角すい形ビットとも、取付け位置による特異な摩耗形態はみられず、掘削前面が均等に約5 mm摩耗していた。

(写真-4、図-15参照)

4. おわりに

以上の実験結果より、軟弱地盤や比較的硬質な人工地盤における掘進実験の結果、平行リンク掘削機構を装備した矩形断面シールド機の基本的な性能は、円形泥土加圧シールドと特別な差異はなく、本機構による任意断面シールド機の実用化は可能と考える。特に玉石混じり砂礫層の実験では、多数の玉石が破碎されたことから、砂礫層の掘削も可能であることが解った。

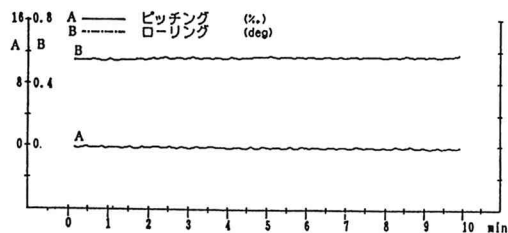


図-14 ピッチング・ローリング図



写真-3 玉石排土状況

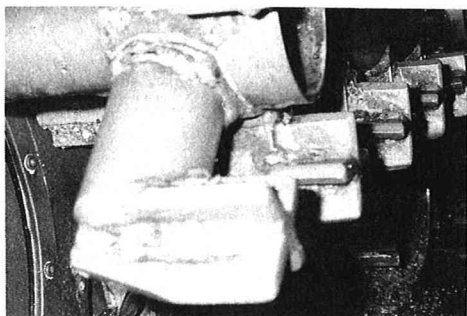


写真-4 ビット摩耗状況

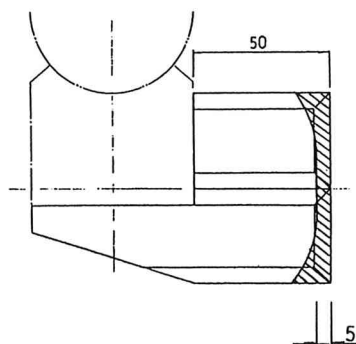


図-15 ビット摩耗図