

## 上向きシールド工法の開発

田 中 潔 原 修 一  
\*濱 田 和 人 \*\*佐 藤 慎

### 要 旨

上向きシールド工法は、既設シールドトンネル内より上向きにシールド機を発進して、地上に向けて掘進すると言う、世界的にも画期的な新工法であり、地上にビル、鉄道線路、幹線道路等があったり、狭隘な用地等で作業用地の確保が難しい所での採用が期待され、従来工法と比べ経済性や工期的、さらに施工環境にも優れている。

昨年は、シールド機で上向きに掘削する実証実験を行った。今年度は、シールド機排土効率の向上を図る排土機構および発進部二重セグメントについて検討し実証実験を行った。本編では、実験概要および実験結果について報告する。

### 1. まえがき

シールド工法は、鉄道・道路・河川・通信・電力・上下水道等の発達に伴って、トンネル築造の代表的な工法として発達し、その掘進技術は世界的に評価されている。シールドの技術開発の動向は、環境保全や経済性等の面から大断面・大深度・長距離化での多様化技術が要求されている。

地下鉄の換気孔などを築造する場合、地上から地下のトンネルに向かって掘削する方法が一般的であるが、これからのトンネルは、今後さらに大深度に築造される傾向にあり、地上作業用地を長期間確保する必要がある。上向きシールド工法は、トンネル内より地上に向けてシールド機を発進させて立坑などを築造するため、シールド機が地上到達直前までは地上作業が大幅に削減でき、施工用地の確保を最小限に抑えること、また、シールド機のリサイクルが可能のため、従来工法と比べ経済性や工期的にも優れている。

93年度は、シールド機で上向きに掘削する実証実験を行い、掘進のための掘進管理方法、掘削機能・性能の把握、掘進時の地盤変形等の確認を行った。94年度は、シールド機排土効率の向上を図るため、排土機構の検討と既設シールドトンネル内より発進する発進部二重セグメントの検討および各々確認実験を行った。本文は、排土機構および発進部二重セグメントの概要と実験結果について報告する。

なお、上向きシールドの概要、掘削実証実験の概要および実験結果については、年報(Vol.24)に掲載している。

\*土木本部 土木部、\*\*土木本部 土木設計部

上向きシールド機参考図を図-1に示す。

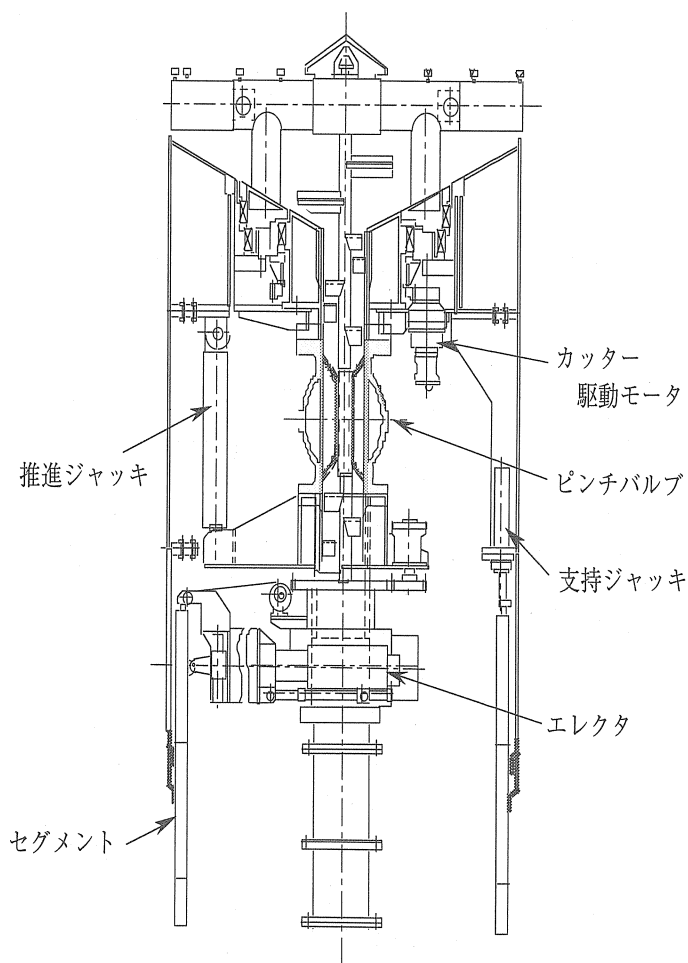


図-1 上向きシールド機参考図

## 2. 排土機構実証実験

### 2.1 実験の概要

93年度に行った掘削実験において、スクリーコンベアと掘削土の共回りにより排土効率が下がり、切羽の土圧管理が難しい場合があることを確認した。

この対策として、掘削土の共回りや閉塞を防止しながら排出を行い、切羽の土圧管理が容易に行える機構とした。

排土機構は、エア駆動のピンチバルブと土砂攪拌用のパドルを装備している。排土機構実験装置を図-2に、排土機構詳細図を図-3に示す。

実験の目的は、砂質土（山砂）と粘性土を対象に、

- 1) ピンチバルブの開度調整で設定した土圧管理ができるか
  - 2) ピンチバルブを全閉にした時に止水できるか
- 以上の項目である。

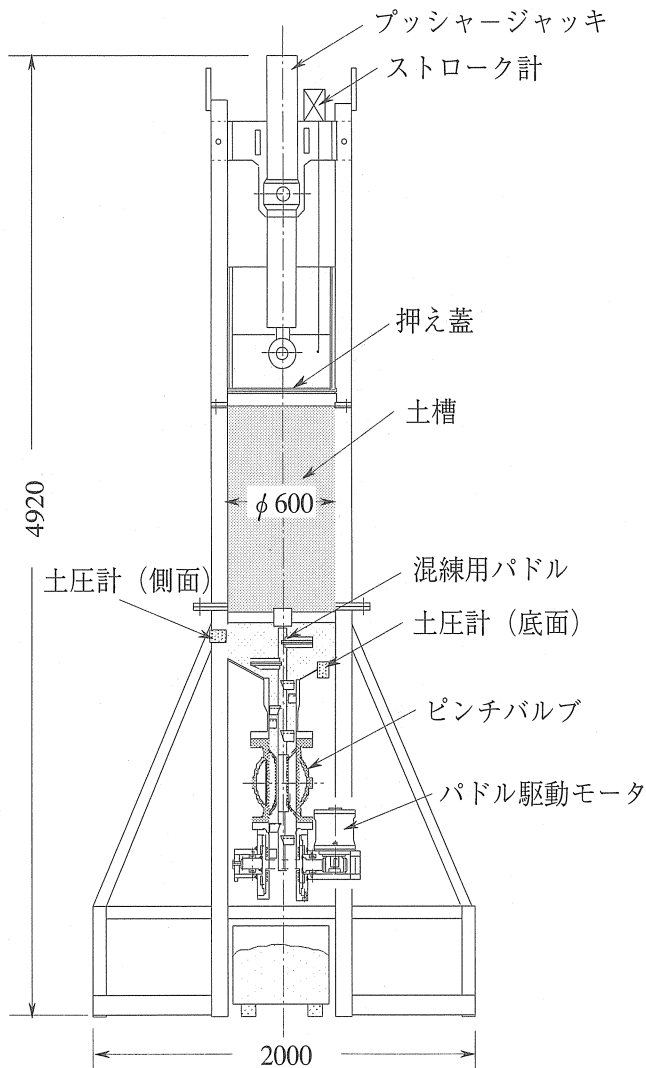


図-2 排土機構実験装置

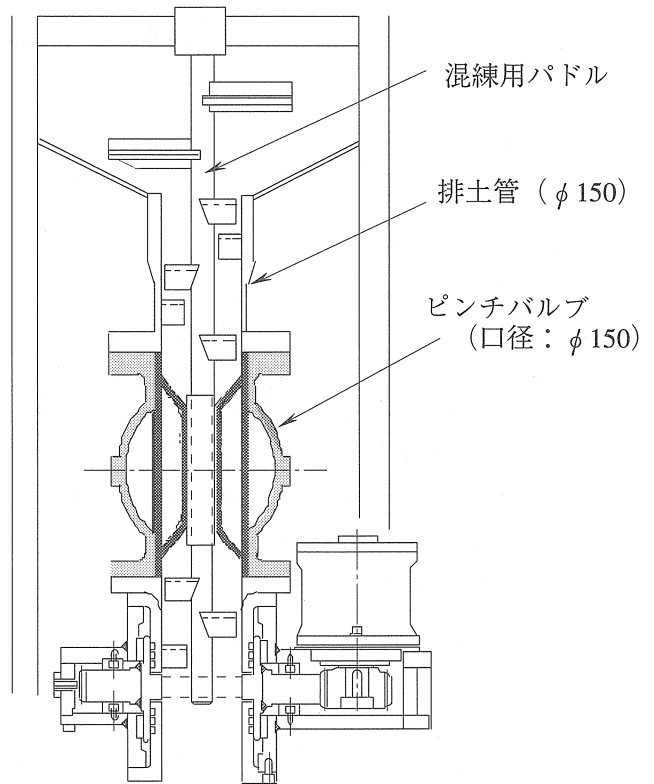


図-3 排土機構詳細図

### 2.2 実験の方法

実験の手順は、

- 1) 予め実験装置外で、実験対象の土砂と作泥材を混練し、目標スランプ(10cm±2cm)の土砂を作成した。
- 2) 混練した土砂を実験装置土槽内に投入する。
- 3) 土槽上部の押え蓋をし、プッシュージャッキをセットする。
- 4) プッシュージャッキを伸ばし土槽内を管理土圧に設定する。(目標管理土圧：0.5kgf/cm<sup>2</sup>(49KPa)、0.8kgf/cm<sup>2</sup>(79KPa)、2.0kgf/cm<sup>2</sup>(196KPa)、3.0kgf/cm<sup>2</sup>(294KPa)の4ケース)
- 6) 混練用パドルを回転させ、土槽内を攪拌する。
- 7) プッシュージャッキを伸ばしながらピンチバルブの開度を調整して土圧管理を行う。

計測項目は、プッシュージャッキストローク、ジャッキ油圧、パドル油圧、パドル回転数、土圧計(側面)、土圧計(底面)および排土量である。実験の仕様を表-1に、実験ケースを表-2に、実験の状況を写真-1、写真-2に示す。ピンチバルブの構造は内側がゴムスリーブで、作動空気圧により、バルブの開度を調整する。

ピンチバルブの原理図を図-4に、外観を写真-3に示す。

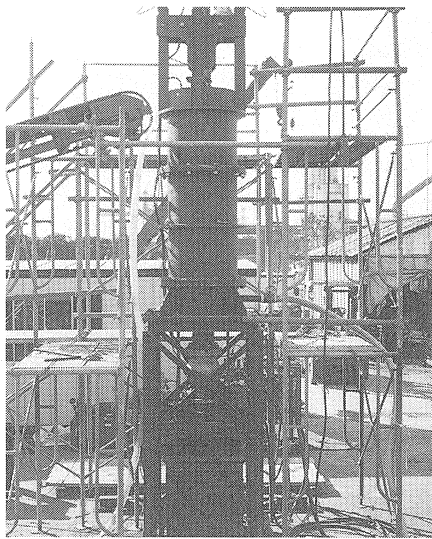
表一 実験の仕様

項目	仕様
土槽内径	φ 600 mm
排土管内径	φ 150 mm
バドルスクリー回転数	最大 34 rpm
バドルスクリートルク	2.26 kgf・m (2.2KN・m)
プッシャージャッキ	18T×120K×950ストローク×1本
プッシャージャッキ押し速度	最大 5.5 cm/分
土槽有効容量 (理論値)	0.268m <sup>3</sup> (φ 600×950)
ピンチバルブ流体圧力	最大 3 kgf/cm <sup>2</sup> (294KPa)
ピンチバルブ作動方式	空気加圧式
ピンチバルブ作動圧	最大 6 kgf/cm <sup>2</sup> (588KPa)

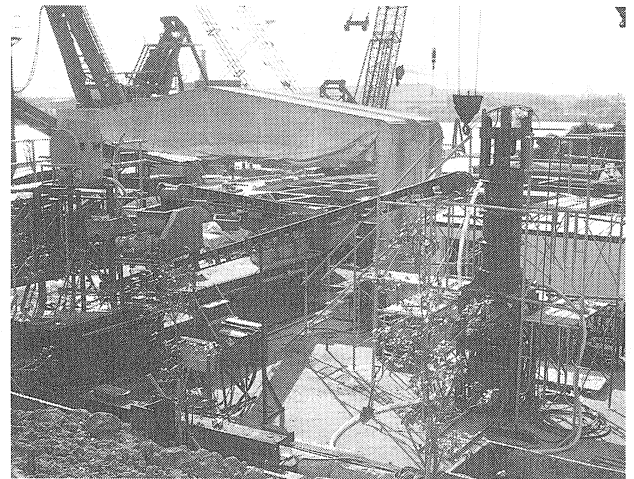
表二 実験ケース

ケース	土砂	作泥材	スラップ値 [cm]	管理土圧 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	ケース	土砂	作泥材	スラップ値 [cm]	管理土圧 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	砂質土	ベント粘土	13	0.8	11	砂質土	ベント粘土	12.5	0.8
2	〃	〃	8.5	3.0	12	〃	〃	〃	2.0
3	砂質土	WAP	10	0.8	13	〃	〃	〃	0.5
4	〃	〃	10	2.0	14	粘性土	〃	12.5	0.8
5	粘性土	ベント粘土	9.5	0.8	15	〃	〃	〃	2.0
6	〃	〃	〃	2.0	16	互層	〃	10~18	0.8
7	〃	〃	18	0.8					
8	〃	〃	〃	3.0					
9	粘性土	WAP	12.5	0.8					
10	〃	〃	〃	3.0					

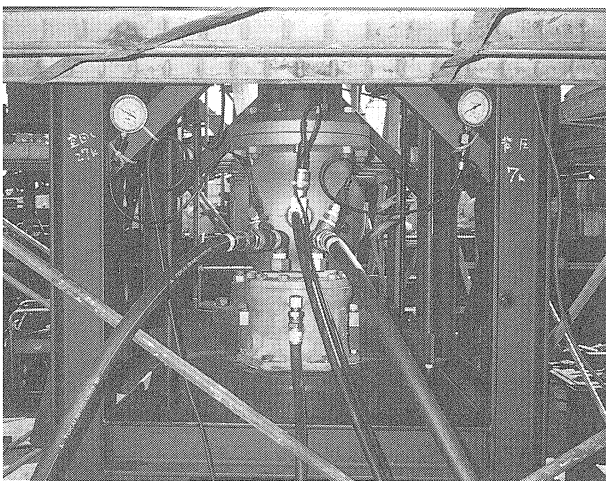
(1 Pa=1.01972×10<sup>-5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>)



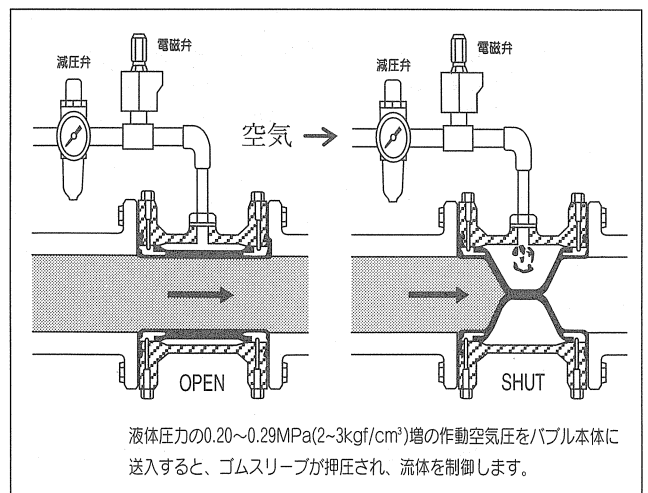
写真一 実験状況



写真二 実験状況



写真三 ピンチバルブ



図一 4 ピンチバルブ原理図

2. 3 実験結果

1) 土圧管理について

実験は、砂質土（山砂）と粘性土の2ケースに作泥材（ベントナイト粘土、WAP（高吸水性樹脂））を混練した土砂を作成してジャッキで押し、ピンチバルブ開度調整で排土を行い、土圧管理できるか確認した。実験計測データを図-5～図-8に示す。

設定管理土圧は0.5kgf/cm<sup>2</sup>（49KPa）、0.8kgf/cm<sup>2</sup>（79KPa）、2.0kgf/cm<sup>2</sup>（196KPa）、3.0kgf/cm<sup>2</sup>（294KPa）の4ケースで行ったが、砂質土および粘性土とも土圧管理が容易にできた。

実験では、砂質土のスランプ値を12cm以上、粘性土では9cm以上の場合、安定した土圧で管理できた。作泥材として2種類を使用したか、どちらの場合も土圧管理できることを確認した。また、今回の実験により、地下30m程度から地上付近までの土圧変化にも安定した土圧で管理できることが明らかになった。

2) 止水について

実験中、ピンチバルブを全閉し排土が遮断できることを確認した。また、実験最後に土槽内に水を投入し、水圧3.0kgf/cm<sup>2</sup>（294KPa）で止水できることを確認した。

2. 4 まとめ

今回の実験では、排土機構にピンチバルブを一台装備して実験を行ったが、実機では常用と予備と最低二台装備して、閉塞時、破損時など、一台では土圧管理が困難な場合に備え、また、混練用パドルを装備しない時は、緊急用仕切ゲートを排土管上部に装備することが望ましい。なお、今回の実験ではチャンバー内の攪拌効果の向上のため、混練用パドルを装備したが、土質により排土の通過粒径やパドルへの土砂の固結等を考慮して、装備の否かを決定すべきである。比較実験の結果、パドルの有無による土圧管理への影響はない。

		スランプ値	管理土圧	パドル
ケース3	砂質土+WAP	10.0cm	0.8kgf/cm <sup>2</sup>	あり
ケース9	粘性土+WAP	12.5cm	〃	〃

(1 Pa=1.01972×10<sup>-5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>)

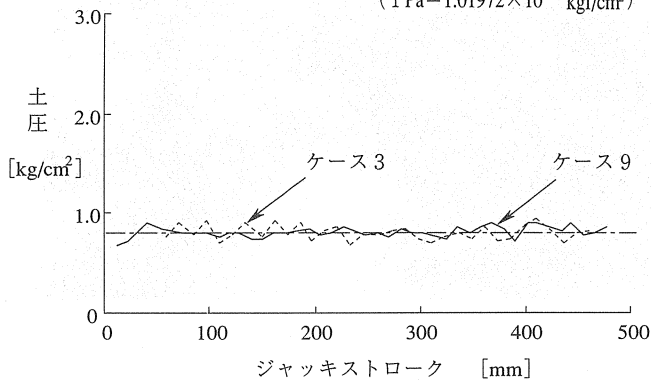


図-5 制御土圧の変化（管理土圧0.8kgf/cm<sup>2</sup>）

		スランプ値	管理土圧	パドル
ケース2	砂質土+ベントナイト	8.5cm	3.0kgf/cm <sup>2</sup>	あり
ケース8	粘性土+ベントナイト	18.0cm	〃	〃

(1 Pa=1.01972×10<sup>-5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>)

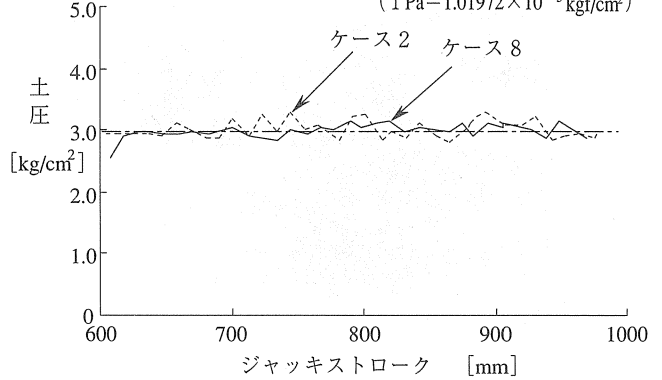


図-6 制御土圧の変化（管理土圧3.0kgf/cm<sup>2</sup>）

		スランプ値	管理土圧	パドル
ケース11	砂質土+ベントナイト	12.5cm	0.8kgf/cm <sup>2</sup>	なし
ケース14	粘性土+ベントナイト	〃	〃	〃

(1 Pa=1.01972×10<sup>-5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>)

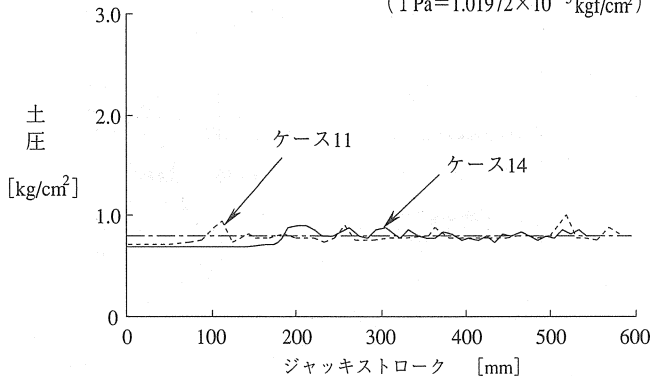


図-7 制御土圧の変化（管理土圧0.8kgf/cm<sup>2</sup>）

		スランプ値	管理土圧	パドル
ケース12	砂質土+ベントナイト	12.5cm	2.0kgf/cm <sup>2</sup>	なし
ケース15	粘性土+ベントナイト	〃	〃	〃

(1 Pa=1.01972×10<sup>-5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>)

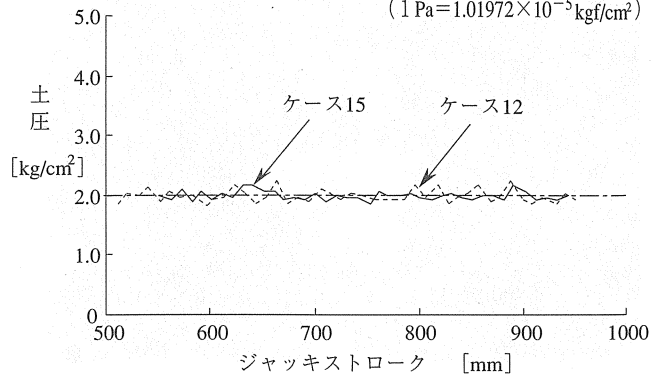


図-8 制御土圧の変化（管理土圧2.0kgf/cm<sup>2</sup>）

### 3. 発進部二重セグメント実証実験

#### 3. 1 実験の概要

上向きシールド用のセグメントはスチール製とし、発進部既設セグメントは外側を無筋コンクリート製、内側をスチール製の二重構造セグメントとしている。上向きシールド機の発進方法は、本線トンネル内で上向きシールド機を組立、発進部二重セグメント内側のスチールセグメントを取外し、カッターで外側の無筋コンクリートセグメントを削りながら発進する。なお、無筋コンクリートセグメントは発進直前までPC鋼線で緊張している。実験は、この二重セグメントの曲げ性能実験、コンクリートセグメント曲げ性能実験、ジャッキ推力実験を行い、設計荷重に耐えるか否かの確認と合理的な発進方法について検討を行った。

二重セグメントの概念図を図-9に、発進の概念図を図-10に示す。

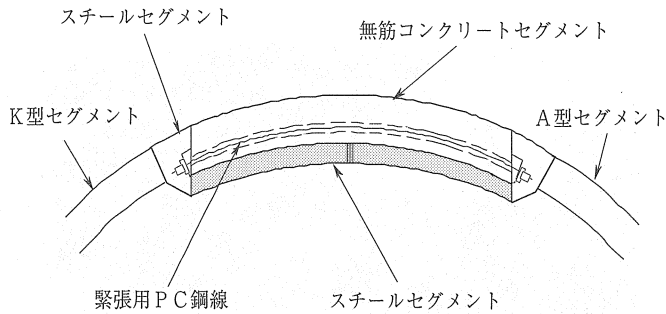


図-9 発進部二重セグメント

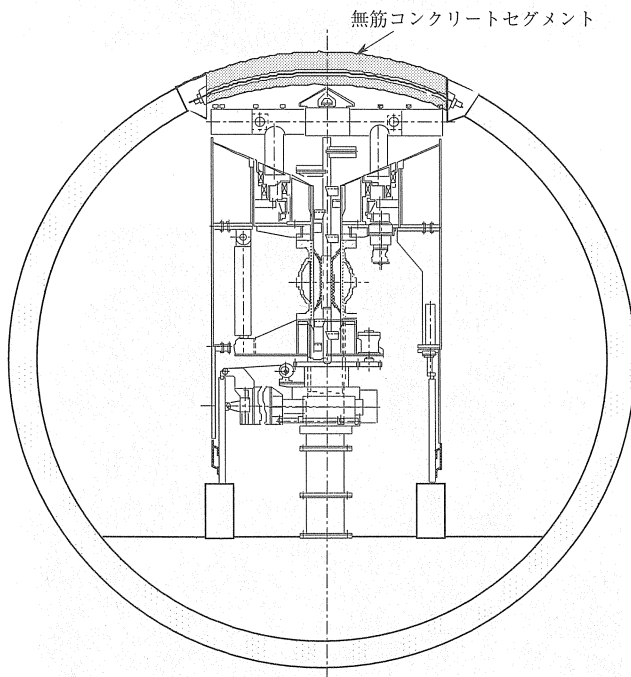


図-10 発進概念図

#### 3. 2 実験の方法

実験に使用する供試体は、本線トンネル径 $\phi 3\text{m}$ 、上向きシールド径 $\phi 1\text{m}$ を想定した幅500mmのセグメントを製作し行った。載荷位置と支持位置を図-11に、変位計及び歪みセンサ取付位置を図-12に示す。

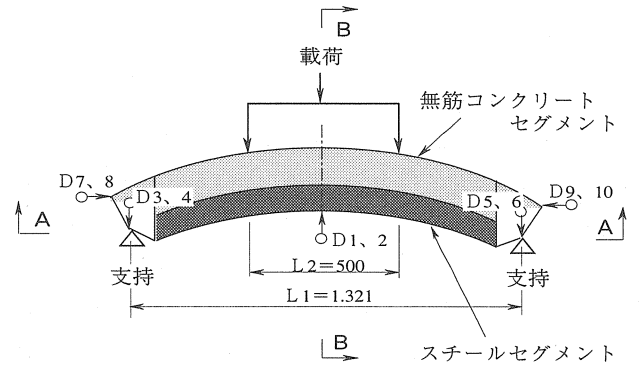
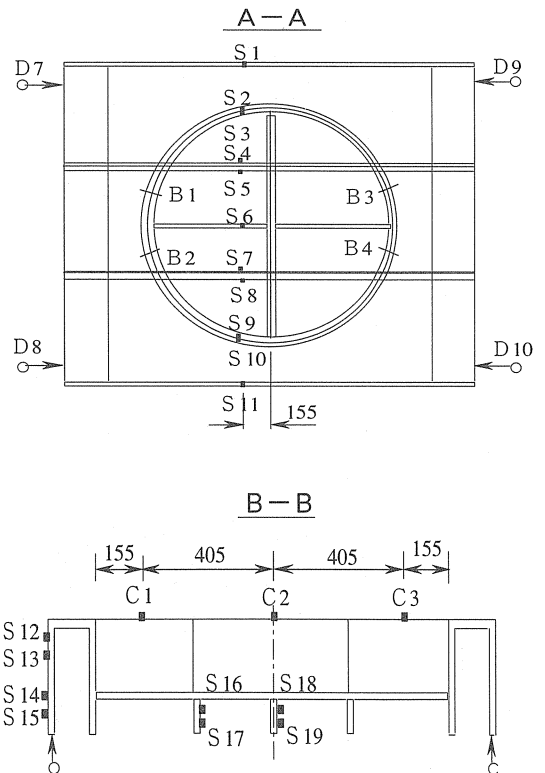


図-11 載荷位置と支持位置



計測センサ	計測対象	計測点数	センサ記号
変位計	鉛直変位計	6	D1~D6
	水平変位計	4	D7~D10
歪みゲージ	コンクリート	3	C1~C3
	主桁	19	S1~S19
	ボルト	4	B1~B4

図-12 変位計・歪みゲージ取付位置

1) 二重セグメント曲げ性能実験

載荷方法は2点集中載荷で破壊まで2tf (19.6KN) ピッチで載荷する。測定は、破壊荷重、コンクリート部歪み、主桁歪み、鋼製セグメントボルト歪み、鉛直変位、水平変位、ひび割れ発生状況等について行った。

2) コンクリートセグメント曲げ性能実験

PC鋼線緊張ありとなしでの実験を行った。

①PC鋼線緊張あり

実験は、内側のスチールセグメントを外し、コンクリートセグメントにPC鋼線を軸力10tf (98KN) で緊張し、2点集中載荷で、設計荷重 (40tf(392.2KN)) まで5tf (49KN) ピッチで載荷し、その後破壊まで載荷した。

②PC鋼線なし

設計荷重まではPC鋼線で緊張し、その後PC鋼線を取外した状態で破壊まで載荷した。測定は、二重セグメント性能実験と同じ項目について行った。3リング分に緊張したPC鋼線5本の配置図を図-13に示す。

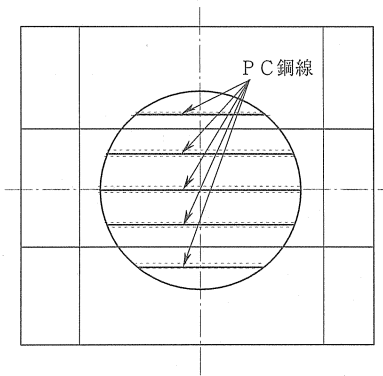


図-13 PC鋼線配置図

3) ジャッキ推力実験

ジャッキ推力実験の概念図を図-14に示す。載荷方法は、スプレッダーシューによる面載荷とし、シールド機の推進ジャッキを80tf (785KN) と仮定し、5tf (49KN) ピッチで、120tf (1.2MN) まで載荷した。測定は、主桁縦リブの歪み、ひび割れ発生状況について行った。

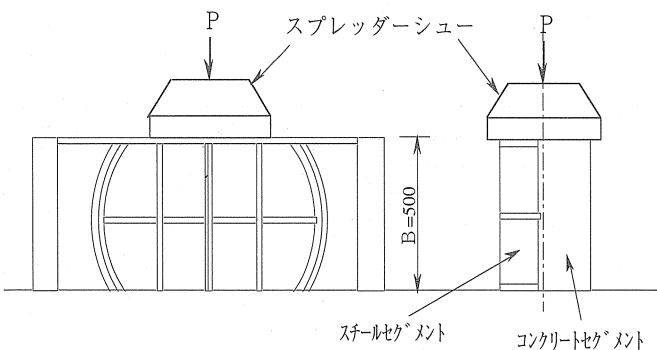


図-14 ジャッキ推力実験概念図

実験状況を写真-4～写真-6に示す。

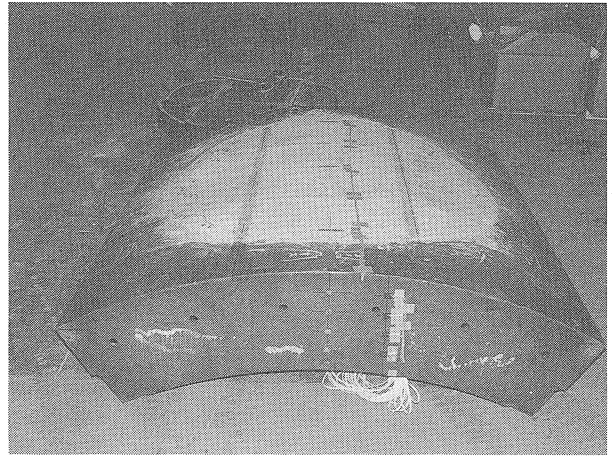


写真-4 二重セグメント

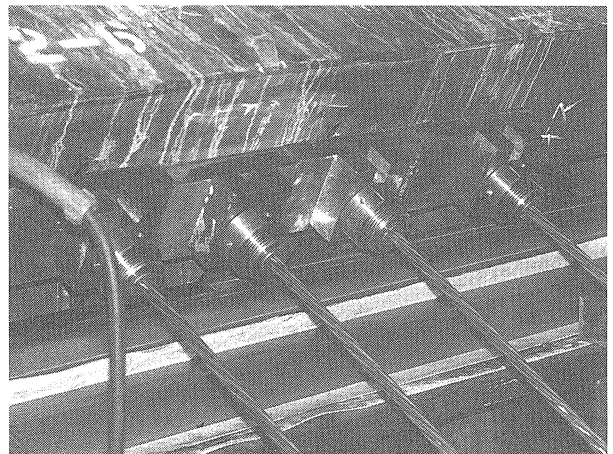


写真-5 PC鋼線緊張状況

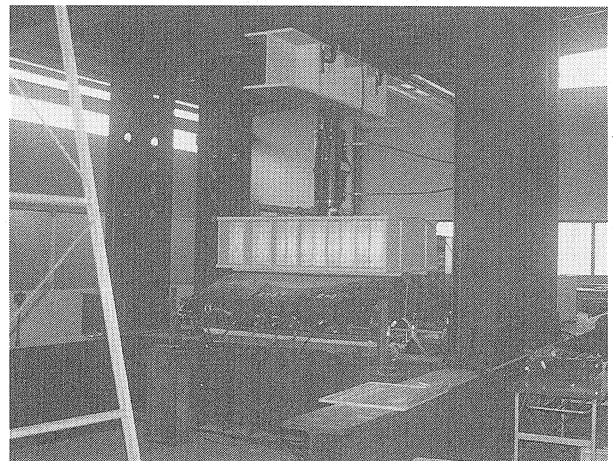


写真-6 実験状況

3. 3 実験結果

実験により二重セグメントの安全率（破壊荷重／設計荷重）は、2.5倍以上であり十分な強度を有している事を確認した。二重セグメント曲げ性能実験、コンクリートセグメント曲げ性能実験の設計荷重、破壊荷重データ表を表-3～表-5に示す。

表-3 二重セグメント実験データ

項目	荷重 (tf)	モーメント (tf・m)	安全率
設計値	46.10	9.77	3.94
実測値	181.66	38.51	

(1 N・m=1.01972×10<sup>-4</sup>tf・m)

表-4 コンクリートセグメント (P C鋼線あり) 実験データ

項目	荷重 (tf)	モーメント (tf・m)	安全率
設計値	40.00	8.48	2.89
実測値	115.60	24.51	

(1 N・m=1.01972×10<sup>-4</sup>tf・m)

表-5 コンクリートセグメント (P C鋼線なし) 実験データ

項目	荷重 (tf)	モーメント (tf・m)	安全率
設計値	40.00	8.48	2.57
実測値	102.77	21.79	

(1 N・m=1.01972×10<sup>-4</sup>tf・m)

1) 荷重-鉛直変位関係について

コンクリート (中央) 鉛直変位データを図-15に示す。P C鋼線のある場合は、直線的に変位が進んだが、50tf (490.3KN) 載荷付近でコンクリート部がずれ、それ以降は変位量が大きくなっている。また、P C鋼線がない場合は、最終荷重まで、ほぼ直線的に変位が進んでいる。しかし、両者を比較するとP C鋼線ありの方が、なしの方よりも変位量は小さく、剛性が高いと考えられる。この結果、P C鋼線を緊張することによって、コンクリート・スチール間継手のバネ定数が大きくなり剛性が高くなることがわかった。

2) 荷重-スチール、コンクリート歪み関係について

スチール歪みデータを図-16に、コンクリート歪みデータを図-17に示す。三種類の実験すべてにおいて、歪みデータは直線性の増加傾向であった。また、歪みの大きさで比較すると、二重セグメントとコンクリートセグメント (P C鋼線あり) は、どちらの場合もほぼ同等である。

コンクリート (中央) 鉛直変位

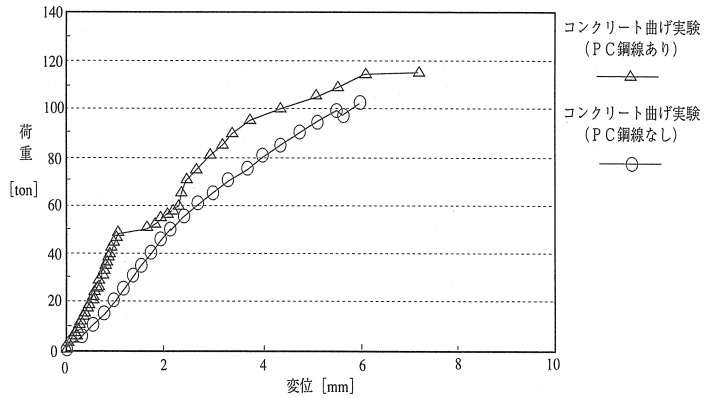


図-15 コンクリート (中央) 鉛直変位データ

スチール歪み (センサ: (S1~S4) /4)

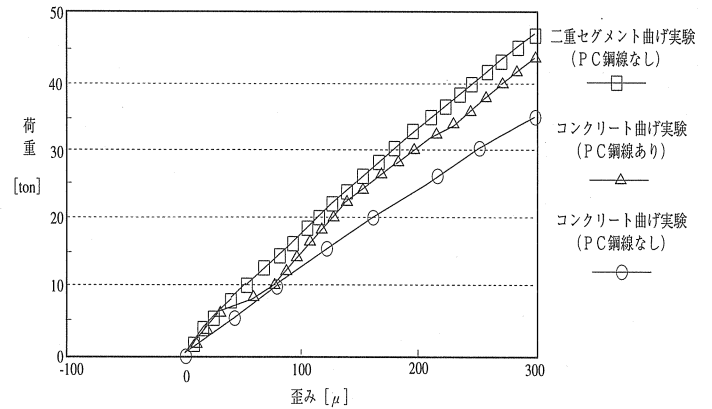


図-16 スチール歪みデータ

コンクリート歪み (センサ: C2)

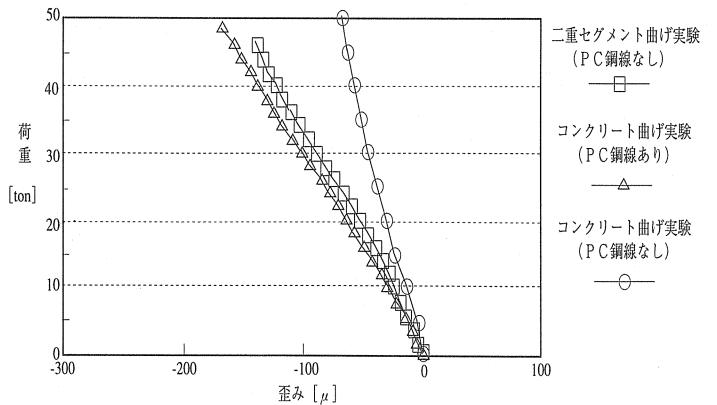
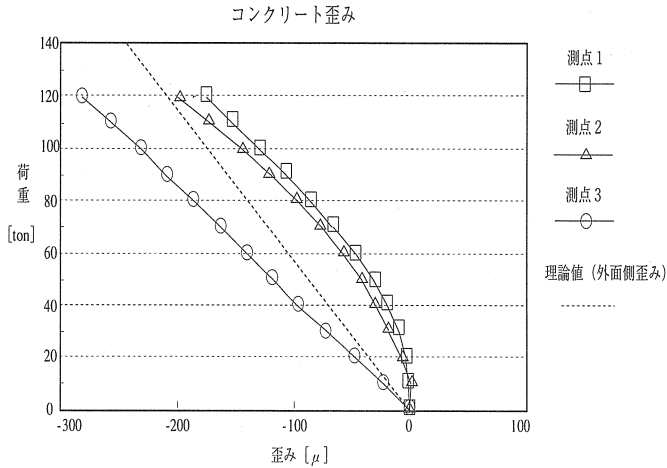


図-17 コンクリート歪みデータ

コンクリートセグメント (P C鋼線あり) と (P C鋼線なし) を比較すると、スチール歪みは、(P C鋼線なし)の方が大きく、コンクリート歪みは、(P C鋼線なし)の方が小さい、この結果、負担率はスチール部分の方が大きいと考えられる。

3) ジャッキ推力実験について

ジャッキ推力実験でのコンクリート歪みデータを図一18に示す。120tf (1.2MN) まで載荷したが、コンクリート歪みは、ほぼ理論どおりの値であった。コンクリートの厚みが薄い場合、軸剛性の異なる部材で抵抗するため、コンクリート側にひび割れが発生する可能性がある



図一18 コンクリート歪みデータ

あるので、コンクリートの厚さは十分確保する必要があるものと思われる。

4. あとがき

今回の実験により排土機構については、地下30mから地上付近まで安定して土圧管理できることを確認した。また、発進部セグメントは、二重セグメントで耐久性があり実施に適用できるものと思われる。93年度の掘削実験や94年度の実証実験により、工法として確立した。なお、上向きシールド適用径の最大は、本線トンネル径の約2/3程度である。本開発は、本年度で完了し、今後は、本工法による実工事適用を目指し、アピールして行きたい。

なお、本開発は、大成建設(株)、石川島播磨重工業(株)、石川島建材工業(株)との共同開発である。

最後に、開発に当たりご支援、ご協力をいただいた関係各位に対し、紙面を借りて深謝する次第です。

参考文献

- 1) 原、田中他；「既設シールド内から発進する上向きシールド工法の開発」、五洋建設技術研究所年報Vol.24 1994 p p 161~166