

シールド工法における場所打コンクリート覆工工法の開発 (その1 ; 概念と室内実験結果)

Development of Extruded Concrete Lining for Shield Tunnelling Method (I)

熊谷 健洋*
Takehiro Kumagae
藤井 利侑***
Toshiyuki Fujii
佐藤 幸三*
Kōzō Satō
石倉 克司**
Katsuji Ishikura
西 保****
Tamotsu Nishi

要 約

シールドトンネルのセグメントに代る新しい場所打コンクリート覆工工法の開発に関する報告である。本稿はその第1報として、新しい場所打コンクリート覆工工法の概要と室内実験結果について述べている。

新しい覆工工法は、①シールドマシンテール部に内接するようにリング状にPC鋼材を組み立てる、②このPC鋼材が埋設されるように覆工コンクリートを打設する、③コンクリートが未だ固まらない状態でコンクリートを地山に押出しながらシールドマシンを推進する、④コンクリート硬化後、PC鋼材を緊張して、覆工コンクリートにプレストレスを導入するものである。

室内実験については、コンクリート配合試験と覆工体のPS導入実験結果を紹介している。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 新しい場所打コンクリート覆工工法の概要
- §3. 施工性の検討
- §4. コンクリートの配合試験
- §5. PCリング単体のプレストレス導入実験
- §6. おわりに

§1. はじめに

現在のシールドトンネルでは、セグメントを用いて一次覆工を行うことが一般的となっているが、このセグメントは工事費の約40%を占め、工事費を押し上げる大きな要因となっている。セグメント工法に代る方法として、西松建設では過去にプッシュロッドシールドと称して場

所打コンクリートライニング工法（以下、場所打ライニングという）を施工した実績があるが、推進反力・地山の支持に必要なコンクリート強度発現までに時間を要し工事進捗がおそいなどの理由で立消えになっていた。しかし、最近になって、コンクリート技術の進歩等によって、この場所打ライニング工法が見直されている。この様な情勢の下、東京都交通局の示唆もあり、新しい場所打ライニング工法の開発に着手した。新しい場所打ライニング工法として、§2. で述べる方法を発案し、室内実験、現場実験を実施した。その内、今回その1として、新しい覆工工法の概要と室内実験結果について報告する。

§2. 新しい場所打コンクリート覆工工法の概要

2-1 基本構想

本工法は従来のセグメント方式に代り場所打コンクリートでシールドトンネルの覆工を行おうとするもので、

*技術研究部土木技術課
**関東(支)都営八幡(出)所長
***土木設計部設計課係長
****技術研究部土木技術課係長

次の考えを基本にした（Fig.1 参照）。

- ① シールドテール内でコンクリートを打設する。
- ② このコンクリートをまだ固まらない状態で加圧しながら地山に押出す。

①によって、高価なセグメントを場所打コンクリートにすることによって少しでも安価にするとともに、円周方向に網ぎ目のない信頼性が高い覆工体の築造、また、②によって、裏込注入の省略、乱さない地山に密着した覆工体の構築、更に二次覆工の省略などの効果を狙ったものである。

現在、開発済または開発中の場所打ライニング工法としては、プッシュロッド工法¹⁾、直打コンクリート覆工工法²⁾³⁾、レジンモルタル覆工工法⁴⁾⁵⁾、FRC覆工工法⁶⁾（何れも通称）などがあり、覆工部材をみると鉄筋コンクリート、レジンモルタル、繊維補強コンクリート、プレストレスコンクリート（以下 PS コンクリートという）などがある。場所打ライニング工法開発に当たっては、まず、覆工部材を選定する必要があるが、ここでは、次の理由で取り敢えず PS コンクリートを想定して、以下の検討を進めた。

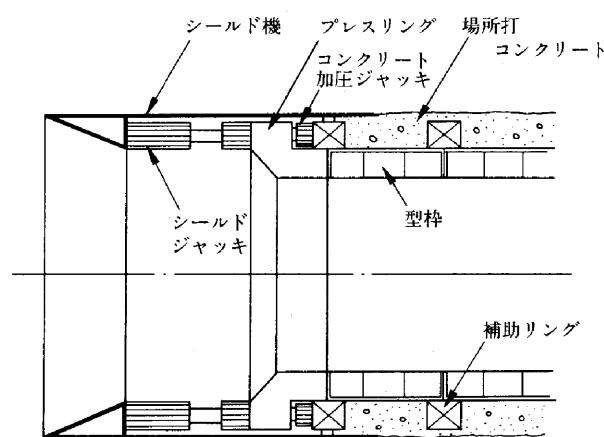


Fig.1 場所打ライニング工法概念図

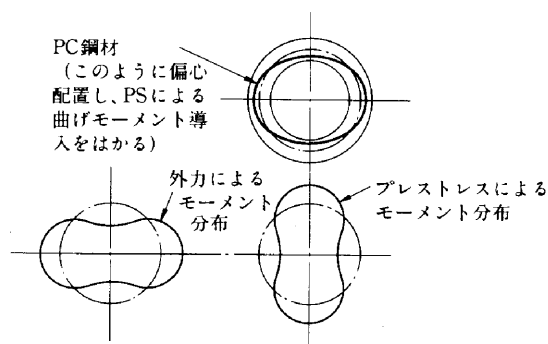


Fig.2 場所打ライニングにおけるプレストレス導入概念

- ① PC 鋼棒の配置により、外力による断面力を打消するようなモーメントを導入できる可能性がある（Fig.2 参照）。

- ② 覆工部材によって施工難易が若干異なるが、PS コンクリートを想定して検討を進めれば、鉄筋コンクリート、繊維補強コンクリートへの変更にも比較的容易に対応できる。

2-2 施工方法の想定

本工法は新しい工法であるため施工性、設計、構造力学上、経済性など未知の部分、解決すべき課題等がある。これらの検討を行う上で、施工法を想定した方が検討がより具体的で有効と考え、次の4種類の施工法を想定した（Fig.3参照）。

- ① プレキャストリング+場所打コンクリート案
- ② 溝形鋼リング+場所打コンクリート案
- ③ H形鋼リング+場所打コンクリート案
- ④ 全場所打コンクリート案

上記①～③の方法は、PC 鋼材の組立のために補助リング（プレキャストコンクリート製、溝形鋼製、H形鋼製）を用いたものである。一方、④の方法は、補助リングをなくして、軸方向 PC 鋼材を定規にして円周方向 PC 鋼材を組立てる案で、便宜的に全場所打コンクリート案と称する。

各案の施工手順は次のとおりである。

(①～③案)

- a. PC 鋼材を埋設した補助リングを製作する
- b. シールドテール内で補助リングを組立
- c. 補助リング間にコンクリートを打設する
- d. このコンクリートをまだ固まらない状態で加圧しながら地山に押出す
- e. 場所打コンクリートが所定の強度に達した後、プレストレス（以下 PS という）を導入する

(④案)

- a. 軸方向 PC 鋼棒をシールドテール内で組立
- b. これをガイドにして円周方向 PC 鋼棒を組立
- c. コンクリートを打設する
- d. このコンクリートをまだ固まらない状態で加圧しながら地山に押し出す
- e. 場所打コンクリートが所定の強度に達した後、PS を導入する

上記の施工手順を①と④の方法について、Fig.4、Fig.5に示す。Fig.4、Fig.5はトンネル縦横図のシールドテール部分を拡大したものである。②③案については、①案とほぼ同じであるので省略する。

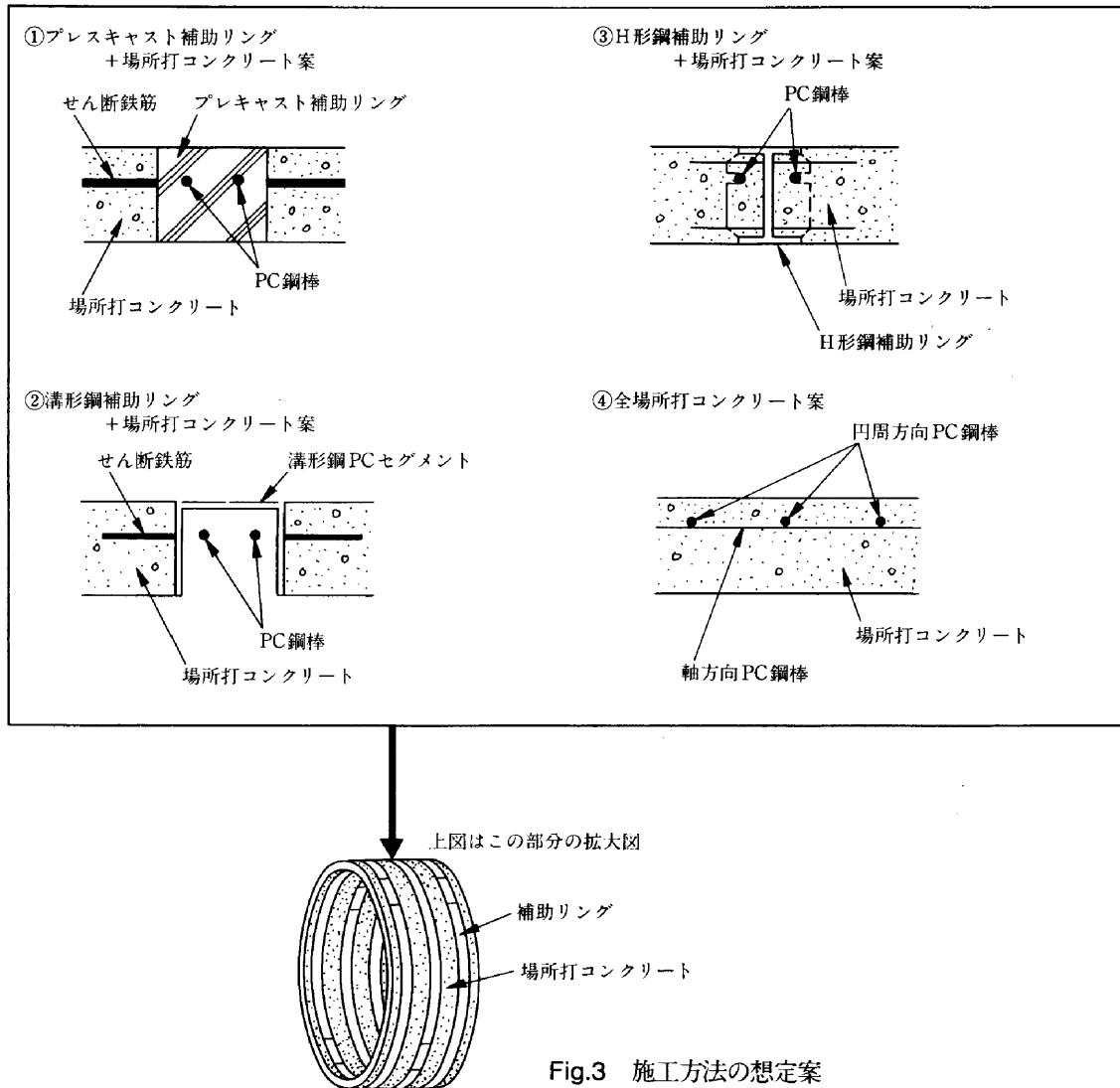


Fig.3 施工方法の想定案

施工順序（案）

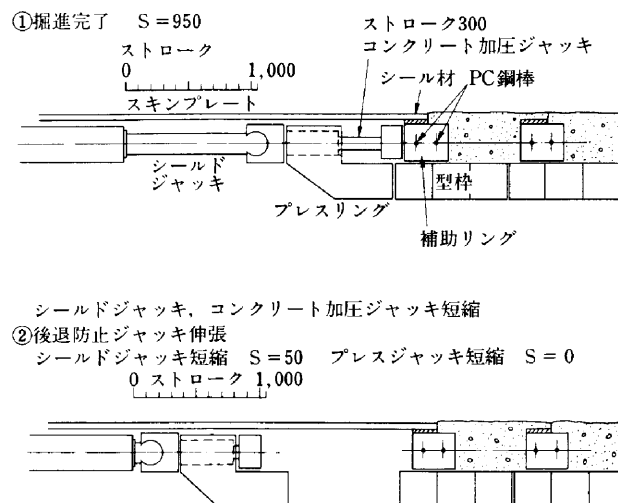


Fig.4 施工順序案 (①案) その1

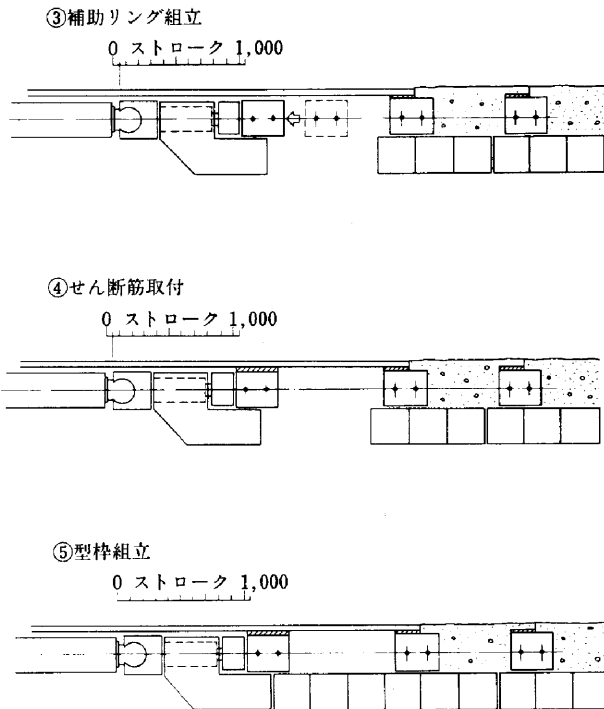


Fig.4 施工順序案 (①案) その2

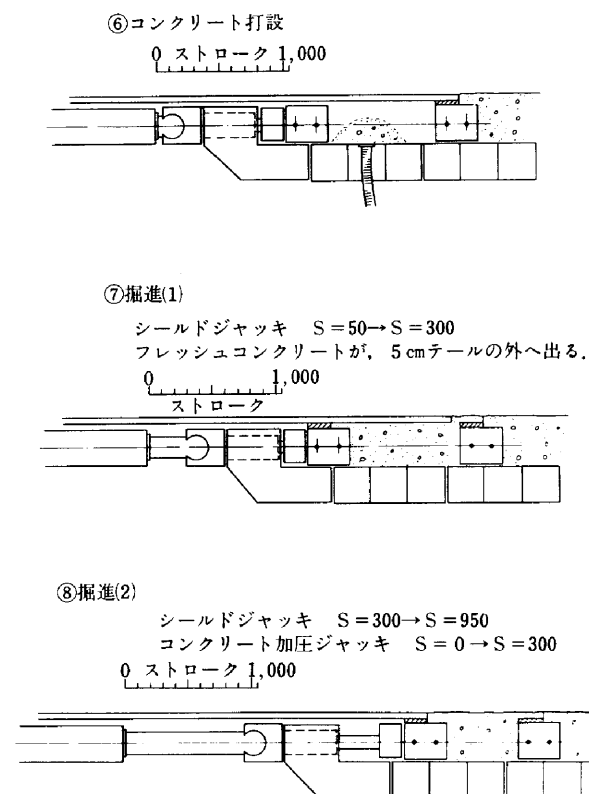
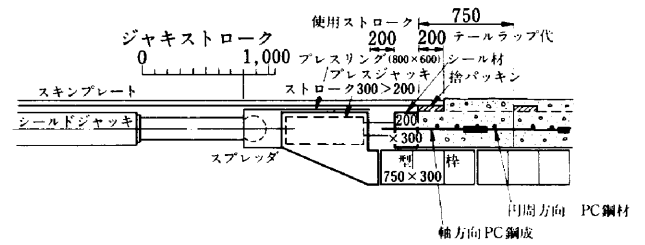


Fig.4 施工順序案 (①案) その3

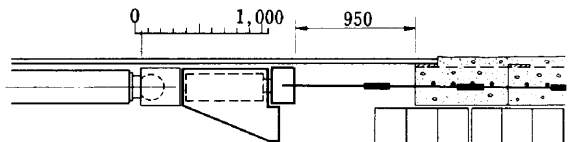
施工順序 (案)

①掘進完了 S=800



②後退防止ジャッキ伸張

シールドジャッキ短縮 (S=50),
コンクリート加圧ジャッキ短縮 (S=0)



③捨パッキン取付

円周方向PC鋼より線取りつけ

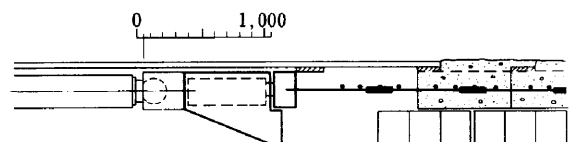
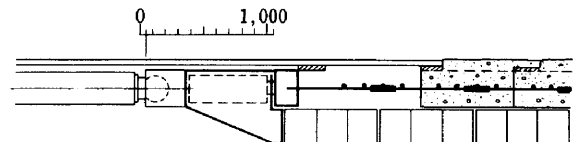
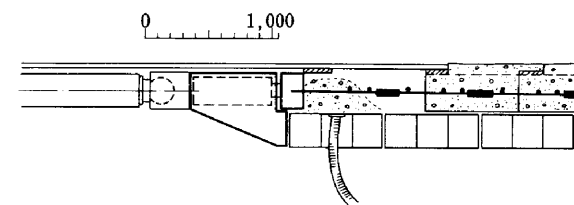


Fig.5 施工順序案 (④案) その1

④型枠取付



⑤コンクリート打設



⑥シールドジャッキ伸張

S=300 フレッシュコンクリートから5cmはみでる

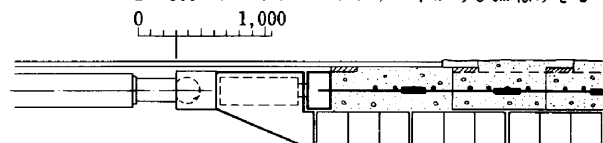
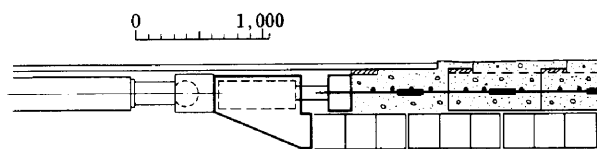


Fig.5 施工順序案 (④案) その2

⑦プレスジャッキを伸張

(S=200)しながらシールドジャッキ伸張(S=300-800)



⑧掘進完了

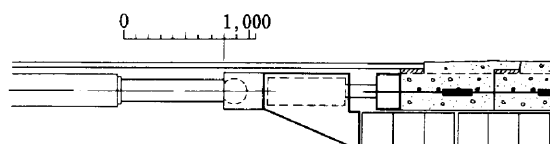


Fig.5 施工順序案 (④案) その3

§3. 施工性の検討

3-1 検討課題

2-2 ①~④の方法は、従来のセグメント工法に比較して、未経験の施工方法が含まれており、かなりの項目について解決しなければならない課題がある。その主な項目は次のとおりである。

◇補助リング関係 (①~③)

形状・分割数、組立方法、ピース間・リング間の止水性

◇コンクリート関係

配合、締め固め、打設時のエア抜き=充珍、スキンプレートとの付着、漏れ・止水、余掘量による仕上長変化

◇緊張関係

緊張箇所、鋼材、緊張装置、鋼材の接続方法、曲げ加工精度

◇掘進関係

後退防止、掘進長、推進反力、方向制御

3-2 検討結果

トンネル径、地質、掘進工法などによって検討内容が異なる。ここでは、「トンネル径は地下鉄単線断面」、「地質は特に限定しない」、「掘進工法は泥水式」という想定を行って、机上でできる範囲で検討を行った。

1) PC補助リング関係

(1) 形状、分割数

形状は①箱形(コンクリート)②溝形(鋼)③H形(鋼)とする (Fig.3 参照)。

分割数は円周方向に6等分割とし、キーセグメントは設けない。

ピース間継手は、①箱形②溝形は、突き合せ継手、③

H形は添接板継手とする。

(2) 組立方法

隣接セグメントがない、キーセグメントがない、ピース間継手がない等の理由により、従来工法にない組立困難さがある。この為、Table 1, Fig.6 の様な組立方法が必要と考える。

Table 1 場所打ライニング工法における補助リング(セグメント)組立

	嵌め込み	リング形状保持
A~Eピース	従来どおり	特殊装置を設ける
Fピース	トンネル軸方向にずらす (Fig.6 参照)	特殊装置を設ける

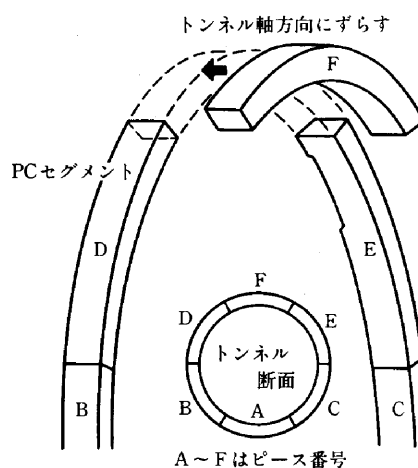


Fig.6 補助リング組立説明図

2) コンクリート関係

(1) 配合

本工法に使用するコンクリートは

- 打設時にポンプ圧送、充填が可能なワーカビリティを持つ
- 練り混ぜから、打設・押出し終了まで2~3時間かかる
- 押出し後、地山、地下水、泥水と接する
- 材令3日程度でPS導入を行う

などの特殊な施工条件に対応可能な性状を要求される。

上記条件の内、a, dの条件については、従来技術で十分対応可能な範疇に属するものであるが、b, cの条件については、この様な使用法を実施した事例がなく、今後実験等を実施する必要がある。ちなみに、cの条件に関しては水中コンクリート等が有望であると考えている。

予定している現場実験ではコンクリートの押出しは実施しないので、ここではa, dの条件を満足する配合を試

験練りによって求めることにした。

(2) その他

「型枠の剛性が高い（推進反力を型枠にとる）ため型枠バイブレータの締固め効果があるか」

「スキンプレートとの付着によって掘進に支障がないか」

「スキンプレートとプレスリングの隙間からコンクリートが洩れないか」

「コンクリートを介して地下水、泥沼を止水可能か」

「予掘量に差によって仕上り長が異なる」

の5項目については、過去の事例がないので、今後、実験等で確認する必要がある。

3) 緊張関係

(1) 緊張箇所

緊張箇所数は力学的には、曲げによる摩擦ロスが大きい、導入PSはできるだけ円周方向に均等であること等の理由からできるだけ多い方がよい。一方、施工性・経済性からは、緊張作業・接続作業が煩雑、接続具が高価等の理由で、できるだけ少ない方がよいという相反する条件があるが、施工性・経済性を重視し、1～3箇所緊張として室内実験を実施して、摩擦損失係数を測定することにした（結果は§5. 室内実験参照）。

(2) PC鋼材

鋼材については、鋼より線と鋼棒が考えられ、Table 2の様な特徴がある。

①～③案については6箇所の接続が必要、PC鋼棒の方がコンクリート押込み時の変形の懸念が小さいという理由からPC鋼棒を適当と判断した。但し、④案については、PC鋼より線も十分検討の余地がある。

(3) 緊張・定着方法および装置

緊張・定着については緊張装置、緊張反力、定着部位、定着具を数種類検討し、これらを組合せてTable 3, Fig. 7の案を考えた。

Aの方法は、突起を設けるのが煩雑、PC鋼棒の曲率が大きく力学上好ましくない。ただし、緊張箇所が1箇所でも良い場合、インバートを利用して上記欠点は解消できる。

Bの方法は、PS導入が箱抜き部で連続しない。

D, Eの方法は、テンションロッドの強度が不足する。ただし、細くて強度が大きい材料が製作可能になれば、有望な方法と考える。

以上の理由でCの方法を溝形鋼補助リングで、F方法をプレキャストコンクリート製補助リングで室内試験を実施し、性能、施工性、摩擦ロス等を調査することにした。

Table 2 PC鋼棒とPC鋼より線の比較

	持 続	現場での 曲げ加工	工場での 曲げ加工	曲げ 剛性
鋼より線	困 難	容 易	容 易	低い
鋼 棒	容 易	困 難	困 難	高い

Table 3 緊張・定着方法および装置

方 法	定 着 部 位	定 着	緊張反力	緊 張 装 置
A	突起部	ナット	本 体	センターホール式 ジャッキ
B	箱抜き部	ナット	本 体	センターホール式 ジャッキ
C	箱抜き式	ボックス	本 体	シリンダー式 ジャッキ
D	箱抜き部	テンション ロッド	PC鋼棒 相 互	センターホール式 ジャッキ
E	箱抜き部	テンション ロッド	PC鋼棒 相 互	挟み式ジャッキ
F	箱抜き部	特殊カブラ	PC鋼棒 相 互	特殊緊張装置

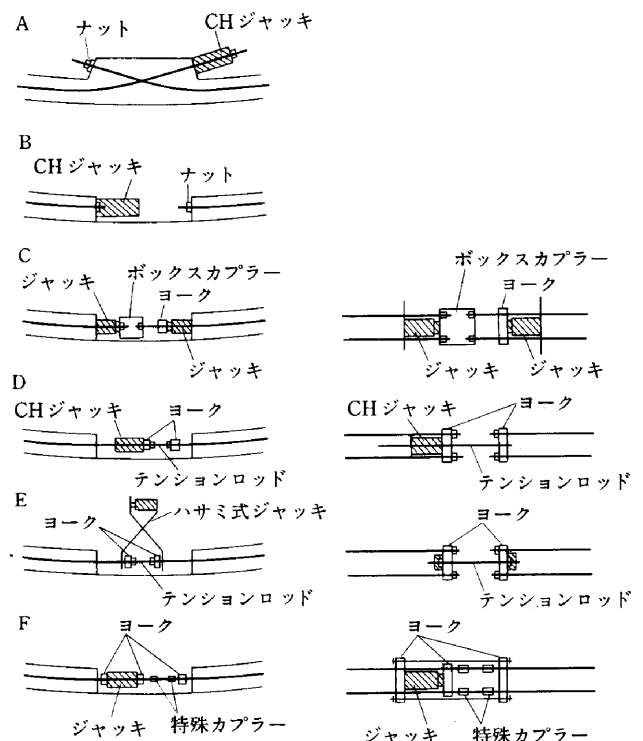


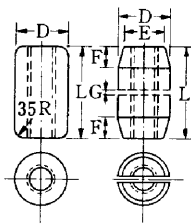
Fig. 7 緊張定着方法および装置案

(4) PC鋼材の接続方法

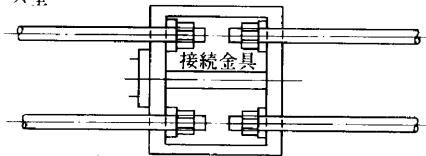
従来のPC鋼材接続具としては、PC鋼棒用はFig. 8Aがあるが、この接続具は接続しようとするPC鋼材

の少なくとも一方は固定されていないで、自由に PC 鋼材の軸芯位置、方向、ネジ山ピッチをカプラーのそれの合せられることが必要である。本工法の場合、①案を例にとると PC 鋼棒はプレスキャストに埋設されているため相互の PC 鋼材は軸芯の位置と方向、ネジ山ピッチは拘束されており Fig.8A の接続具では接続不可能である。このため、Fig.8B, C, D の様な接続具を考察した。Fig.8B, C, D の接続具を試作し、室内実験で使用し、性能を比較し、検討することにした。

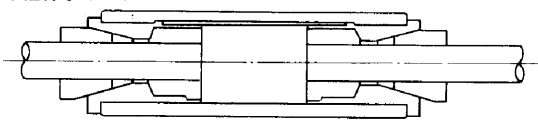
A: 従来型カプラー



B: ボックス型



C: 球座付きカプラー



D: 球座付きダブルカプラー

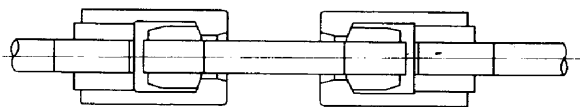


Fig.8 PC鋼棒接続具

4) 掘進関係

(1) 後退防止

Fig.4 の②③の状態ではシールド機後退を防止する反力がなくなる。この為、Fig.9 の様な後退防止ジャッキが必要と考えられる。

(2) 掘進長

従来のセグメント工法の場合、掘進長はセグメント幅で決り、900mmが一般的であるが、経済性等の点から幅広化の傾向がある。

本工法では、1回の打設長が掘進長となるが、①～③の補助リングを使用する案では、基本的に1打設長当たり1緊張断面となるので、PC 鋼材配置間隔に制限をう

ける。PC 鋼材配置間隔は、導入力、プレストレスのトンネル方向分布等に影響を与えるので、最適間隔の選定は単純ではない。予定している現場実験では現在の標準的なセグメント長に相当する0.85～0.95m 間隔とした。

④全場所打案では、掘削長の決定に PC 鋼材配置間隔は直接影響はしない。

尚、PC 鋼材配置間隔以外に問題がない場合は、1打設長当たりの緊張断面数を複数とすることも考えられる。

(3) 推進反力

a. フレッシュコンクリート

b. 型枠

c. プッシュロッド

c は本工法の基本構想である押出してできないので、対象から除外する。a, b の方法は Table 4 に示すとおり長短相半ばするが、Fig.10 の様な a, b を折衷した案が型枠の負担を軽くし、且つ方向制御が可能な方法として妥当であると考えられる。

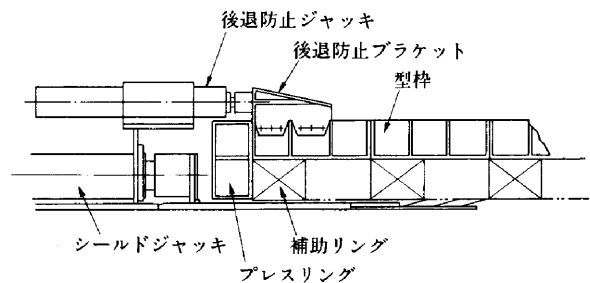


Fig.9 後退防止装置

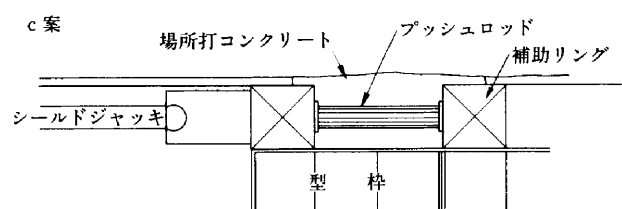
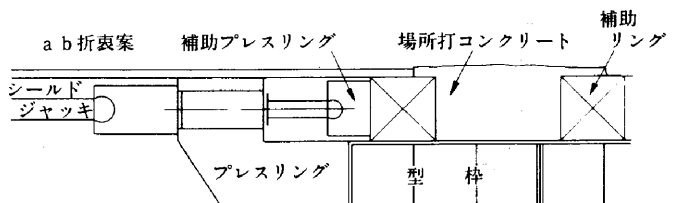
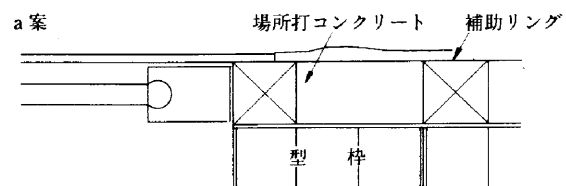


Fig.10 シールド推進反力

Table 4 推進反力の比較

方法	方向制御	型 枠		スキンプレート	工数	費用	押出し
		半径	トンネル延長方向				
a	×*	×**	○	×**	○	△	○
b	○	○	△***	○	○	△	△
c	○	○	○	○	×	△	×

*まだ固まらないコンクリートに反力をとるため方向制御が困難

**コンクリート加圧力(5kgf/cm²程度か)が型枠、スキンプレートに悪影響を与える危険性あり

***推力に耐える型枠が必要

Table 5 試験体

		溝 形 鋼 補助リング	プレキャスト 補助リング
補助 リング	外 径	7300mm	
	内 径	6700mm	
	幅	350mm	
P C 鋼 棒	種類・径	C種 φ26	C種 φ32
	偏 心 量	50mm	60mm
	接 続 具	4 種	1 種
緊 張 装 置		リング反力タイプ 自己反力タイプ	自己反力タイプ

§ 4 . コンクリートの配合試験

この段階においては、打設と押出しの時間間隔の標準値や最大値、また押出しが可能であるワーカビリティの程度などが不明であったので、予定している現場実験に対応できるものとして、次のような条件を設定した。

条件① 練り混ぜ後、90分間スランプ15cm以上

条件② $\sigma_3 = 350\text{kgf/cm}^2$ 以上

条件③ $\sigma_1 = 140\text{kgf/cm}^2$ 以上

条件①については遅延形流動化剤を、条件②③については早強セメントを用いることで対応した。遅延形流動化剤は初期強度の発現も遅らせるので、条件③との関係から添加量に制限を受ける。今回は、添加量を1.4%とすることで条件①③の双方を満足することができ、条件②に影響を与えることもなかった。

§ 5 . PC リング単体のプレストレス導入実験

場所打 PC ライニング工法開発の1ステップとして、現場実験に先立ち、実権棟内において補助リング単体のプレストレス導入実験を行った。

本工法では、外力によって発生するモーメントを打消すようなモーメントを導入するために、PC 鋼棒を非円

形に配置しプレストレスを有効に作用させている (Fig. 2 詳細は「その2」参照)。

この室内実験は、上記、非円形配置効果の確認の他に

- ・緊張力ロスの測定
- ・緊張装置の開発
- ・PC 鋼棒接続具 (カプラー) の性能試験
- ・ピース間継手挙動の測定

などを目的として行った。

5-1 試験体

試験体の補助リングは、溝形鋼・プレキャストコンクリートタイプの2種類で、外径7,300mm (地下鉄単線断面) で (Fig.11), PC 鋼棒はC種 φ26, φ32の2種、緊張装置もリング反力タイプと、自己反力タイプの2種類を用いた、(Fig.12, Table 5)。

試験体は、重力の影響を受けないように水平に組み立て、摩擦についてはリングと架台の間に滑動面をもうけこれに対処した。

5-2 緊張カロス

一般に、ある位置での緊張力は次式で表される。

$$P_l = \exp \{ -(\lambda \cdot l + \mu \cdot \alpha) \} \cdot \delta_p \cdot P_0$$

ここに、 P_l : ある位置での引張力

P_0 : 緊張材のジャッキの位置での引張力

λ : 緊張材単位長さ当たりの摩擦係数

l : 鋼棒長

μ : 単位角 (ラジアン) 当たりの摩擦係数

α : 角変化 (ラジアン)

δ_p : ジャッキロス

溝形鋼補助リングでは、PC 鋼棒はリブのみで支えられ点接触とみなされるので、鋼棒長は考慮せず角変化だけを対象とし、60°, 120°, 180°で実験を行った。計測結果は、 $\mu = 0.092$, $\delta_p = 0.88$ であった。

プレキャストコンクリート補助リングでは、PC 鋼棒の埋設長が角変化量にほぼ比例するので両者の影響を分離することが困難である。よって、鋼棒長を付加角変化に置き換え、 $\Delta\alpha = 0.012$ とした。また、先の試験結果から緊張装置を自己反力タイプに変更、1リング当たり2カ所緊張とし、PC 鋼棒接続具を球座付ダブルカプラー (Fig.8) とした。計測結果は、 $\mu = 0.038$, $\delta_p = 0.96$ であった。

5-3 断面力

プレキャストコンクリート補助リングでの軸力・モーメントを Fig.13 に示す。図中破線は、緊張力から計算した理論値である。

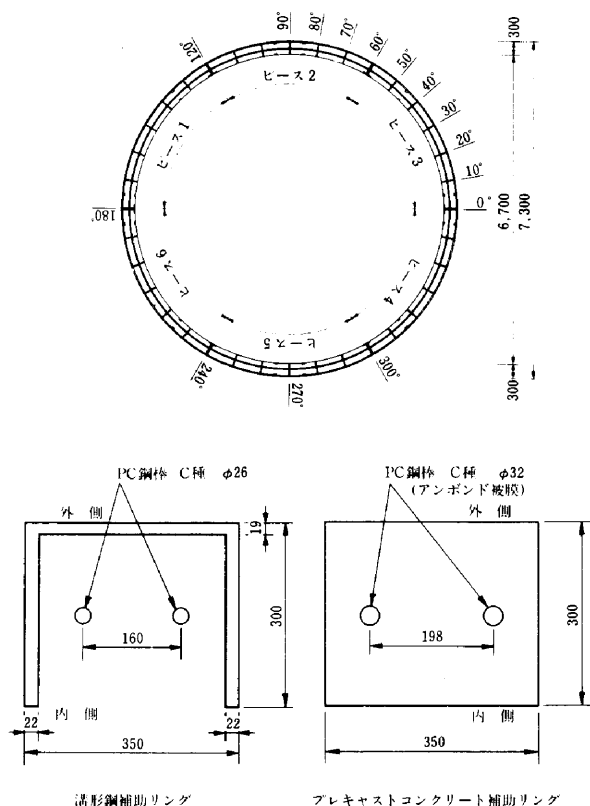


Fig.11 試験体

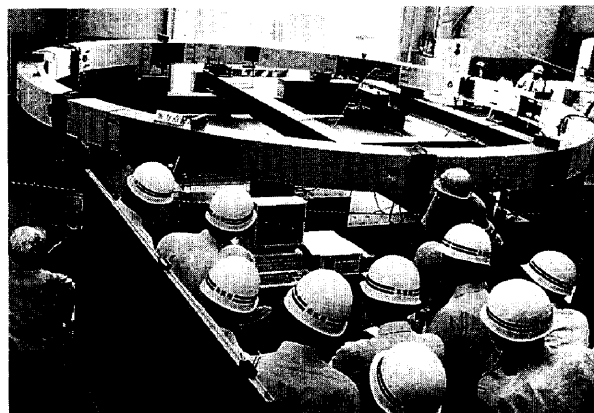


Photo 1 室内実験

軸力は理論値より平均4～5%小さいが、これはリング躯体内の応力分布を直線であると仮定しコンクリート表面に貼付したゲージの測定値から軸力を算出したことに主たる原因があると思われる。また、緊張力の摩擦ロスによる軸力の変化は測定結果からは読取れない。

モーメントは理論値と比較すると、頂底部で小さく、両側部では大きく、モーメントの発生しないはずの右上・左下45°方向で正のモーメントが発生している。

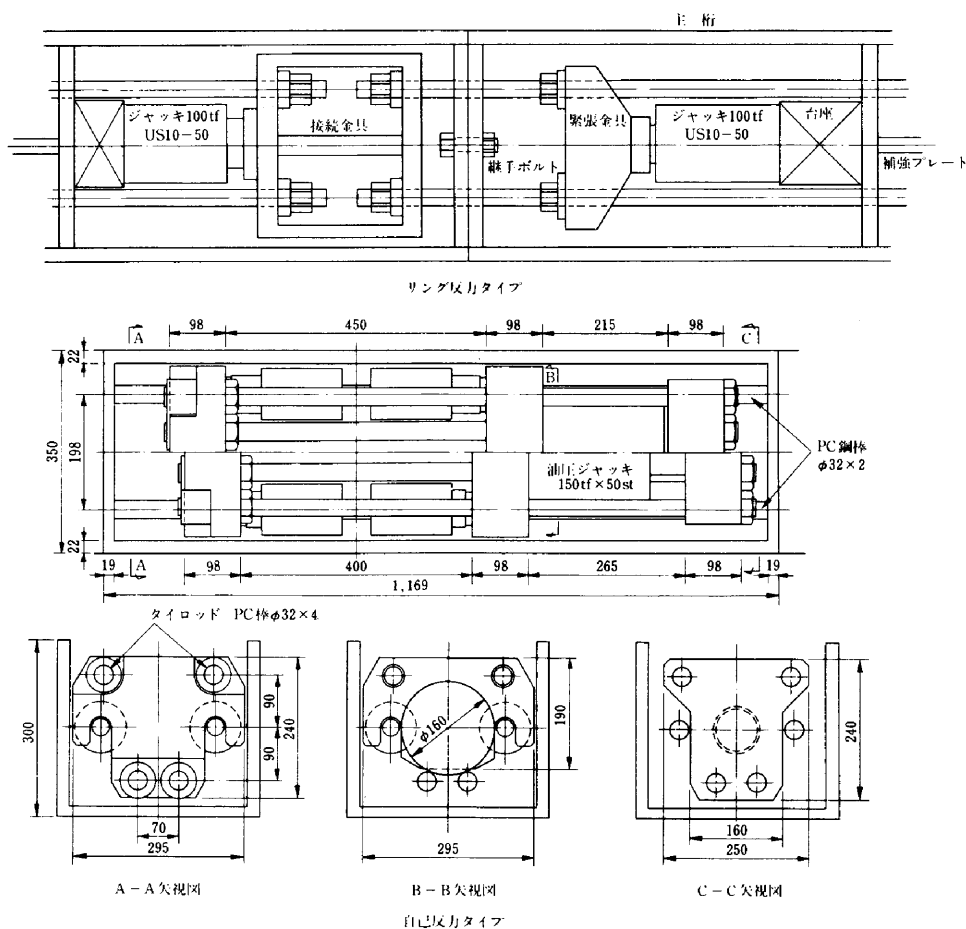


Fig.12 緊張装置

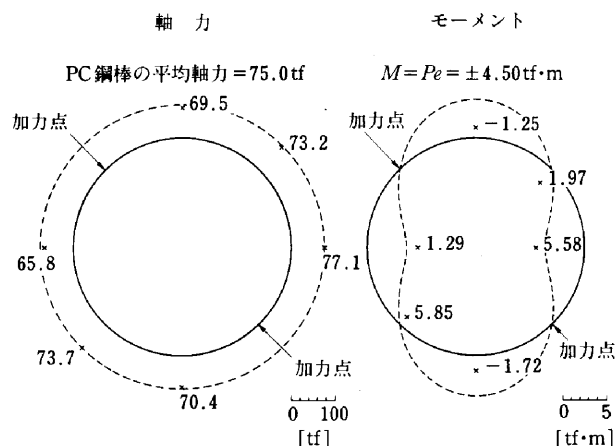


Fig.13 断面力

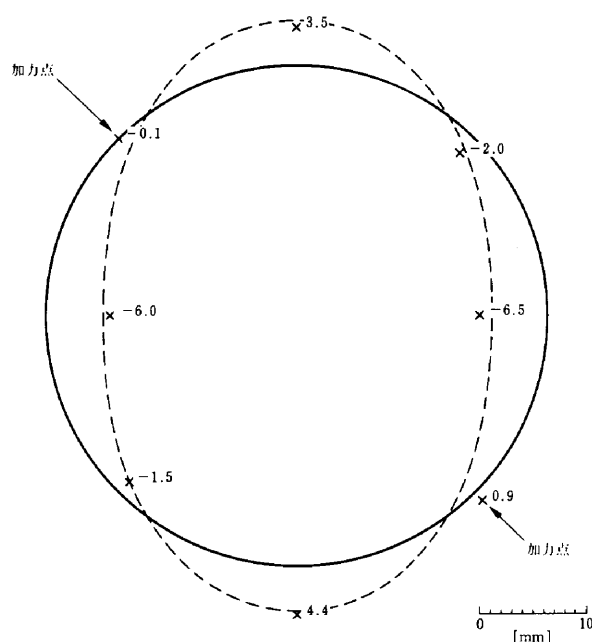


Fig.14 変形

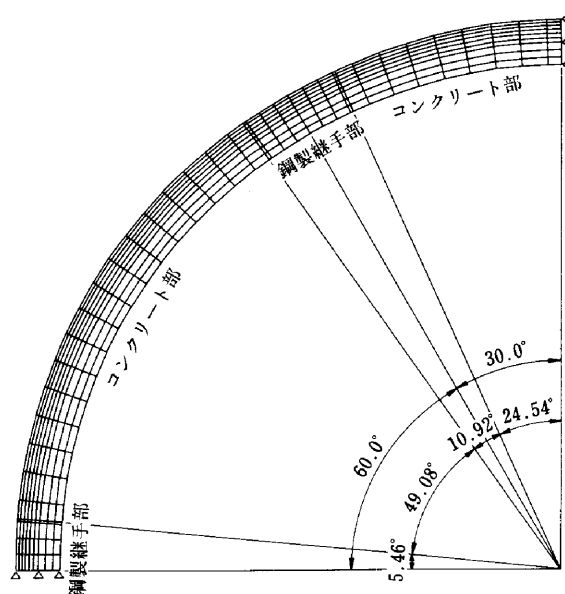


Fig.15 計算モデル

5-4 変形

リングの変形を Fig.15 に示す。破線は理論値である。全体的にやや大きめの変形をしているのは、鋼製継手部がコンクリート部に比べ剛性が低いと思われる。緊張点では大きく外に変形している。

5-5 考察

PC 鋼棒の摩擦係数や軸力の分布などから、順調に実験されたと考えられるが、モーメントの分布は理論値と異なっている。

この実験値の分布は、PC 鋼棒の偏心配置によるモーメントに他の要因による正のモーメントが重なったと考えられる。

他の要因とは、リング組み立て時の状況、継手部の応力分布から、継手部の接触面が完全ではなく、リング外周部だけで接触していることであると考えられる。Fig.15 のモデルを用いて計算を行った結果からも、PC 鋼棒を円形に配置した場合でも継手面の状況によっては 1 ~ 2 tf·m の正のモーメントがリング全体に発生することがわかった。また、これは継手部の外への変形も説明することができる。

リングのような不静定構造物ではブロック構造の場合、その継手部の僅かな不整が応力異常（モーメント）を発生させる。実施工では場所打部が一体構造であり、継手の応力異常が全体に波及することはないと考えられるが、③H形鋼案や④全場所打案のような、リングの応力負担分が小さい形式が望ましいと考えられる。

§ 6. おわりに

以上、シールド工法における場所打コンクリート覆工工法の開発について、その1として、その概念と室内実験結果の一部について述べた。引続いて、次号にその2、3として設計上の考え方と設計方法の提案、平板模型覆工体によるPS導入実験、実工事における現場実験結果などについて述べる予定である。

本工法の開発にあたり、東京大学松本嘉司教授、東京都立大学山本稔教授をはじめとする都交通局 PC 小委員会の方々および都交通局の諸氏の多大なご指導・ご協力をいただいた。この紙面を借りて謝意を表する。

参考文献

- 1) 「プッシュロッド式シールド機」, 特殊シールド工法, 西松建設, P.36~45
- 2) 松尾節夫, 牧野雅紀, 「シールド工事における場所打ちライニング工法の開発」, 建設の機械化No.365, 日本

建設機械化協会, 1980.7, P.45～50

- 3) 松尾節夫, 崎本順治, 十河茂幸, 「場所打ちライニング工法によるシールドトンネル覆工工事」, コンクリート工学 Vol.19, No.8, コンクリート工学協会, 1981.8, P.31～38
- 4) 鶴田秀典, 杉本禎男, 高塚外志夫, 阿南修平 「レジントンネル自動築造技術の開発」, 土木学会誌 Vol.69No.4, 土木学会, 1984.4, P.2～8
- 5) 高塚外志夫, 岡田武氏司, 近藤章司, 中西信輔, 「自動トンネル築造工法におけるライニング技術の研究開発」, 土木学会論文集No.335, 土木学会, 1985.3, P.91～99
- 6) 岡崎登, 「西独フランクフルト地下鉄工事」最新のシールド直か打設工法を考える」, 新シールド工法の設計・施工ーセグメント不要の先進技術, 山海堂, 1983.3
- 7) 岡崎登, 「五条川シールド工事($\phi 2.2\text{m}$)の直か打設コンクリート覆工の施工」, 建設の機械化No.437, 日本建設機械化協会, 1986.7
- 8) 小山幸則, 飯田廣臣, 善如寺太, 「シールド工法に用いる場所打プレストレスライニングについて」, 土木学会第41回年次学術講演集III, 土木学会, 1986. 11, P.811～812