

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2）

Development of Extruded Concrete Lining for Shield Tunneling Method(II)

石倉 克司*
Katsuji Ishikura

川村 正身**
Masami Kawamura

藤井 利侑***
Toshiyuki Fujii

小林 正典****
Masanori Kobayashi

西 保*****
Tamotsu Nishi

熊谷 健洋*****
Takehiro Kumagae

佐藤 幸三*****
Kōzō Satō

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り、本稿は（その2）として、（その1）で述べた場所打コンクリート覆工工法の設計方法および室内・現場実験の報告である。

設計方法については、本工法の特性を加味して設計方法の考え方、課題について述べた。室内・現場実験では、①トンネル延長方向85～90cmにプレストレスを導入するとトンネル延長方向にほぼ均等にプレストレスが分布する。②プレストレスをリングの断面力として見た場合、軸力は緊張力と同等のプレストレスを導入できる。③一方、曲げモーメントは、周辺拘束がない場合、 $M = P \cdot e$ である（ M ；曲げモーメント、 P ；導入緊張力、 e ；PC鋼材の偏心量）。実トンネルのように周辺に地盤が存在する場合、その影響を受ける。その影響量は地山バネ定数に關係する。本実験では地山バネ定数 $k = 4 \text{ kgf/m}^2$ で拘束がない場合の20%であった。④施工的には、PCセグメント組立て、PC鋼材取付けおよび緊張方法などの実用化のための貴重なデータを得たなどの成果があった。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 設計上の考え方と設計方法の提案
- §3. 平板模型によるプレストレス導入実験
- §4. 現場実験
- §5. おわりに

§1. はじめに

本工法は（その1）で説明したとおり従来のセグメント工法とは施工方法が異なっている。このため、設計方

法も従来の方法をそのまま使用して良いかという観点から再検討をする必要がある。例えば、設計外力としての土圧について見ると、本工法はフレッシュなコンクリートがある圧力で地山に押しつけた状態でコンクリートを硬化させるなど、従来のセグメント工法と施工手順が異なる。これに伴って、覆工体と地山の変形・挙動・作用土圧にも影響があると推測できる。

このような観点から、設計に影響があると考えられる両工法の相違点、問題点、課題などを整理したうえで、筆者なりに新しい設計の考え方を提案してみた。

また、前回の報告¹⁾で述べた実験結果により、プレストレス（PS）の導入が可能と判断し、引き続き、PSのコンクリート内の分布を室内実験で確認し、さらに現場において実物大の実験を行って、施工法および力学的な

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

覆工体の挙動を調査したので、その結果について述べる。

§ 2. 設計上の考え方と設計方法の提案

本工法は従来のセグメント工法に代わり、プレストレスを導入する場所打コンクリート覆工工法である。従って設計方法に関しても、セグメント工法との相違点、課題を整理し、新しい設計方法を提案する必要がある。

本工法の開発に際して考えられる設計上の課題とその解決方法をまとめて Table 1 に示す。

また、設計手法に関してそのフロー図を作成すると、

Table 1 設計上の課題と解決方法

課 題	解 決 方 法
1. 脱型時（プレストレス導入前）におけるPCセグメント、場所打コンクリートの安全性	脱型を何リング毎に行いプレストレスを導入するのか。短期的でありアーチアクションなどの効果により、安定すると考えてよいか検討する必要がある。
2. 施工時、完成時における外圧の設定（設計荷重が作用しない場合、プレストレスによる抵抗モーメントは構造物に対して危険となる場合もある。	完成時における外圧は現行のセグメント設計荷重でよいか。施工時における外圧は施工段階毎のデータを積み重ね検討する必要がある。
3. プレストレス導入に関して a) 偏心量 e の効果 b) 緊張力のロスの影響 c) 鋼製リングの組立精度、PC鋼材の配置精度による影響 d) 地盤バネによる影響	室内実験・現場実験による確認が可能 室内実験・現場実験による確認が可能 室内実験・現場実験による確認が可能 種々の土質条件の所で現場実験を行いデータを集めて検討する必要がある。
4. PCセグメント～場所打コンクリートの応力伝達 PCセグメントに導入したプレストレスが場所打コンクリートにどの様に伝達するか	室内実験による確認が可能
5. 軸方向プレストレスの省略の是非	PCセグメント～場所打コンクリートの応力伝達、止水性、耐震性に関して研究を継続する必要がある。
6. 場所打コンクリートの円周方向鉄筋省略の是非	場所打コンクリートには円周方向に鉄筋を入れない計画であるが、これにより有害なひびわれの発生などがないか室内実験などを確認する必要がある。

Fig. 1 のようになる。

本報告書では、本工法の実用化に際して大きな影響を与える下記の3項目について、設計上の考え方と設計方法についてのべる。

- ① 設計荷重
- ② プレストレス導入効果
- ③ PCセグメントと場所打ライニングの一体性

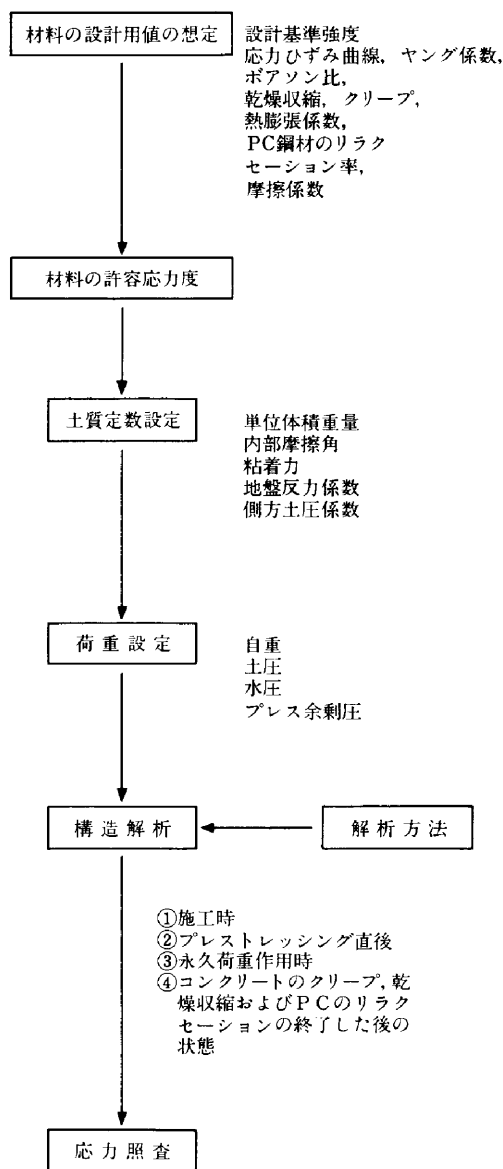


Fig.1 場所打ライニング設計フロー

(1) 設計荷重

設計荷重として、①自重 ②土圧 ③水圧 ④上載荷重がある。従来型セグメントの設計ではこれらの荷重を一度に作用させて断面力を決定し応力度を照査する。しかし、プレストレストコンクリート工法によるライニングでは、これらの荷重がいつから作用するか、また経時

本工法では、あらかじめ PC 鋼材を組み込んだ PC セグメント間に場所打ライニングを打設して、硬化後にプレストレスを導入してライニングに軸力と曲げモーメントを発生させる。従って、PC セグメントに導入されたプレストレスが場所打ライニングに伝達される必要がある。

PC セグメントに導入されたプレストレスは腹圧力としてリングに内側向きの力を発生させるため、Fig. 4 に示すようにこれによって生じるプレストレスと場所打ライニングの接触面でのせん断力が十分確実に伝達されれば、両者は一体となるはずである。

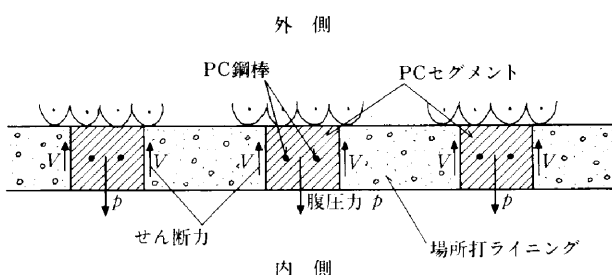


Fig.4 場所打ライニングへのプレストレス伝達機構

せん断力を伝達させる方法を大別すると次の2つの方法がある。

- ① 接触面のテーパをつけたり、突起をつけることによってせん断力を伝達する直接的な伝達方法
- ② ジベルやアンカー等によってせん断力を伝達する間接的な伝達方法

今回の現場実験では場所打コンクリートを押し出さな

いこともあり、間接的な伝達方法を採用したが、実用化の際には突出したジベルあるいは鉄筋が施工上支障となる可能性があり検討を要する。

また、荷重の伝達率は十分なジベルまたは鉄筋を配置すれば100%伝達すると考えられ、室内実験によって確認することとした。

§ 3. 平板模型によるプレストレス導入実験

本工法で構築される覆工体は、H 形鋼とコンクリートの合成構造物であることと PS の導入間隔が覆工厚さに比べて大きい、このため Fig. 5 に示すような試験体に PS を導入して鋼とコンクリートの応力分担およびコンクリートの応力分布などを調べた。

3-1 試験体および試験方法

試験体は、覆工体の一部を切り取って、試験の簡略化のため、曲率を無くして平板状にしたものである。A 試験体はコンクリートに直接 PS を導入するタイプであり、B,C 試験体はスチールに導入した PS をせん断伝達筋（スタッドジベル）によりコンクリートに伝達するタイプである。また、A,C 試験体は平板に曲げモーメントを与えるように PC 鋼棒を偏心配置した。Fig. 5 に平板試験体の概要を示す。

試験方法は、試験体を水平に置き PC 鋼棒端部を支圧板を介して片側から緊張し、この時の試験体のひずみを測定した。緊張力は、A,B 試験体99tf,C 試験体78tfとした。

3-2 試験結果と考察

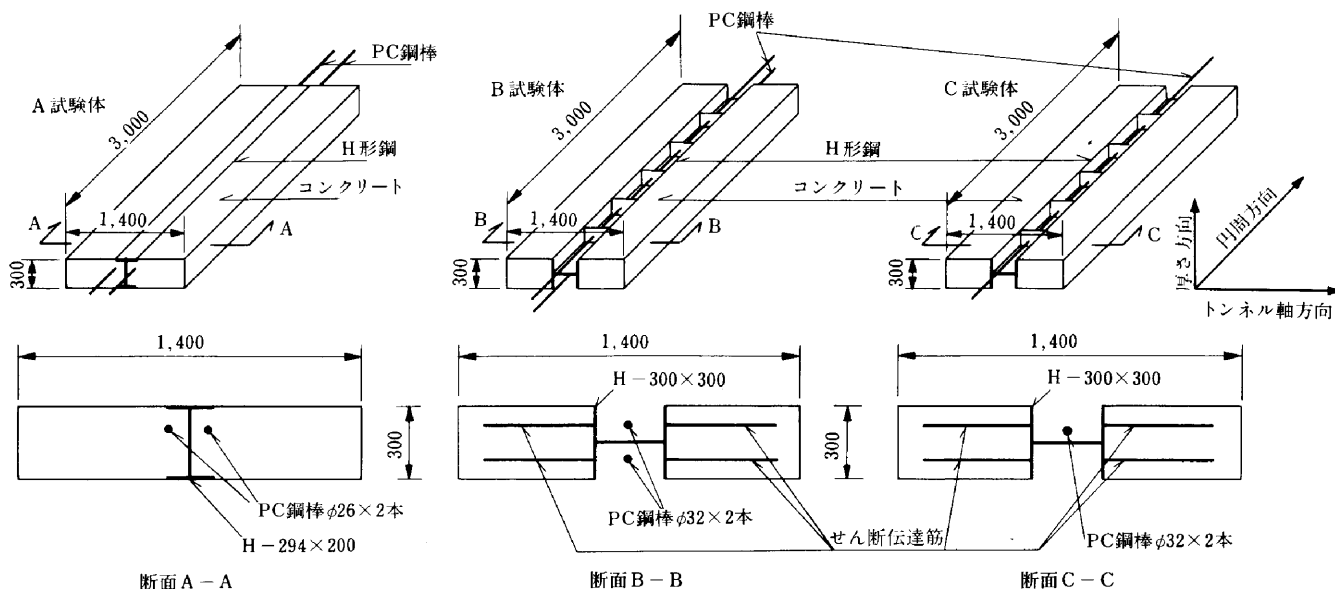


Fig.5 平板模型PS導入実験試験体

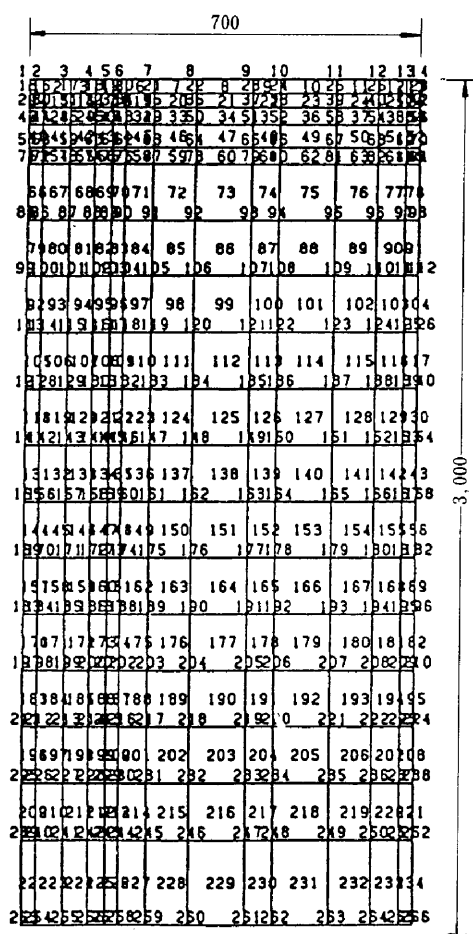


Fig. 6 解析モデル

Fig. 7 に緊張後のひずみ量の実測値と解析値を示す。Fig. 7 の点線および○印は A 試験体の解析値と実測値を示す。解析値は Fig. 6 に示すモデルを用いて解析したものである。Fig. 7 の一点鎖線と×印、二点鎖線と◆印は同様の方法で B, C 試験体の解析値、実測値を示したものである。解析値と実測値はよく一致している。緊張端では、定着部にひずみが集中するが、緊張端から離れるに従ってひずみがトンネル軸方向に分散している。

この結果と本工法の場合の定着はジャッキボックス端面にとらないで PC 鋼棒を相互に連結する方法によって定着部への応力集中が大幅に緩和されることが予想できることを考え合わせるとプレストレスはトンネルの延長方向に支障の無い範囲で分布すると判断した (このことは現場実験でも確認した; 4-3(5)参照)。

§4. 地下鉄トンネルに於ける現場実験

室内実験で一応の成果を得たので現場実験を実施した。現場実験は、本工法がまだ十分確立されていないことから立坑に到達したシールド機の内部を解体し、この中で実施した。このため、本工法の重要な課題である場所打コンクリートの押出しなどの実験は実施できなかったが、室内実験では確認できなかった施工性、力学的な性状をより実物に近い状態で把握することができた。

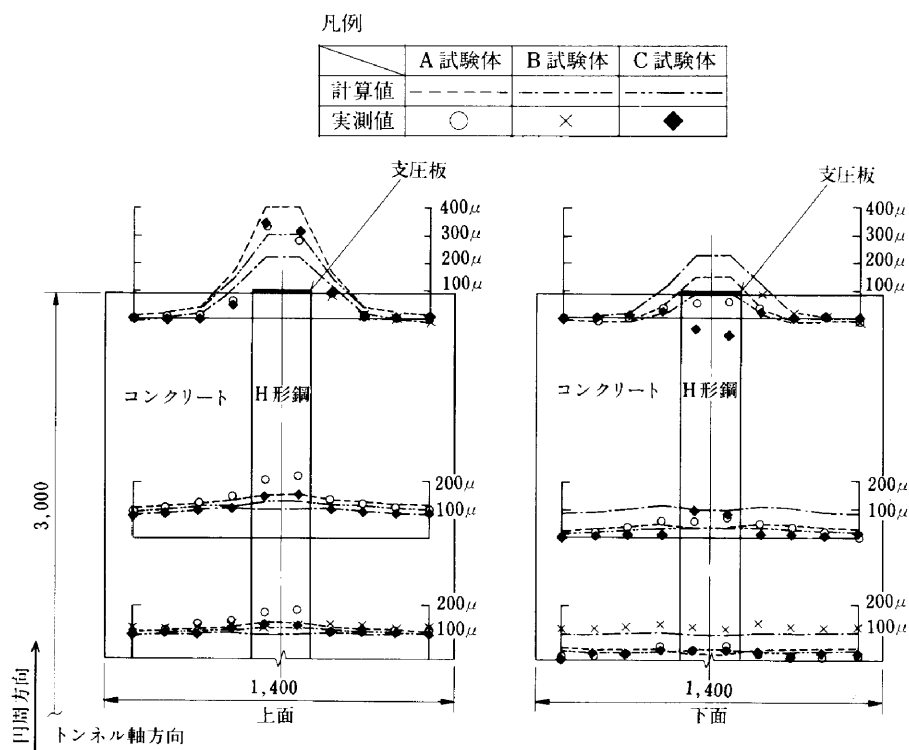


Fig. 7 PS導入後の平板試験体ひずみ分布

4-1 実験目的

現場実験では実物大規模での①PCセグメント・PC鋼棒の組立精度、緊張ほかの作業性などの施工に関するデータ入手および②周辺の抱束がある場合のプレストレス発生量、ジャッキボックス位置での応力の確認、プレストレスのトンネル延長方向への伝達などの力学的特性の把握を目的とした。

4-2 実験内容

到達後のシールド機の中において、スキンプレート内側にゴムスポンジ ($k=4 \text{ kgf/cm}^2$: 地山バネ定数相当) を貼付し、PCセグメント組立からプレストレス導入までの一連の工程を実施した (Fig. 8 参照)。

PCセグメントは次のとおり3種類、8リングを使用した (Fig. 9 参照)。

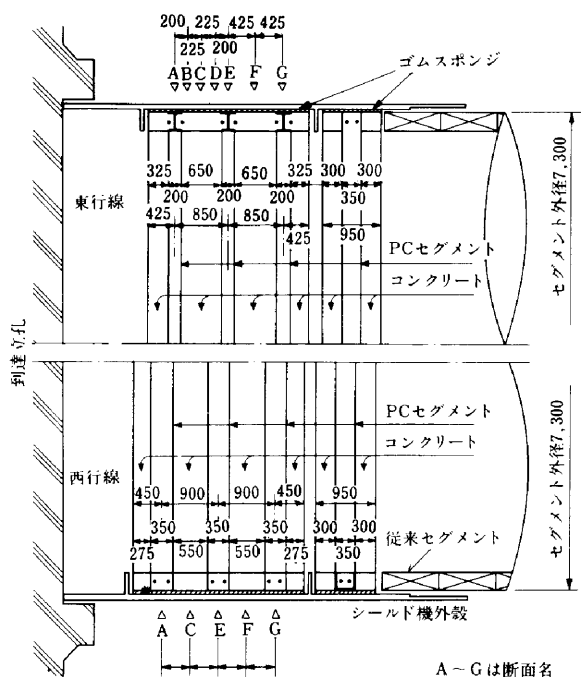


Fig.8 現場実験概略図

	東行線	西行線	計
H形鋼 PCセグメント	3		3リング
溝型 PCセグメント	1	1	2リング
プレキャスト PCセグメント		3	3リング
計	4	4	8リング

各PCセグメントは円周方向に6分割とし、接続方法は、H形鋼PCセグメントではH形鋼のウェブに添接板とボルトによる接合とし、溝型PCセグメントとプレキャストPCセグメントにおいては端面張り出し板とボルト接合とした (Fig. 9 参照)。

実験期間は東行線昭和61年9月～同10月、西行線昭和61年11月～同12月である。

PC鋼材、カプラーはTable 2に示すとおりとした。

型枠およびコンクリートは、4リング分のバラセントルを用いて東行線と西行線に分けて4リングを一度に打設した。

緊張作業は、コンクリート打設後8～14日経過後にA, E, G, H断面の順に行った。導入緊張力は、H形鋼PCセグメントでは60tf、溝型PCセグメントでは120tf、プレキャストPCセグメントでは136tfとし、これを東行線では50%、100%の2段階に分けて、西行線では100%の1段階で導入した。

コンクリートひずみ量は東行線ではB, C, D, F断面の4断面とし、西行線ではC, F断面の2断面とし、各断面での測点数はFig. 10に示すとおり8箇所の内側と外両側の16点とした。

4-3 実験結果

(1) PCセグメント、PC鋼棒の組立精度

Table 3に測定結果を示す。PCセグメント組立誤差は直径で $-10 \sim +11 \text{ mm}$ 、PC鋼棒配置誤差は $|e| - |e_0| = -12 \sim +3 \text{ mm}$ であり、双方共1 cm程度の精度で施工できた。ただし、PC鋼棒の**の箇所は緊張装

Table 2 PC鋼材およびカプラー

PCセグメントの種類	PC鋼棒 径×本数	分割数	カプラー 接続部/緊張部	取付方法
H形鋼 PCセグメント	$\phi 26 \times 2$ 本	4	普通カプラー 特殊カプラー	PCセグメントを組立後、鋼棒を←の方向に挿入した
溝型 PCセグメント	$\phi 36 \times 2$ 本	6	普通カプラー 特殊カプラー	PCセグメントに内挿しておいた鋼棒をPCセグメントを組立後、円周方向にずらしながらカプラーで接続した
プレキャスト PCセグメント	$\phi 36 \times 2$ 本	6	特殊カプラー 特殊カプラー	プレキャストコンクリート部に埋設しておいた鋼棒をPCセグメントを組立後、円周方向にずらしながらカプラーで接続した

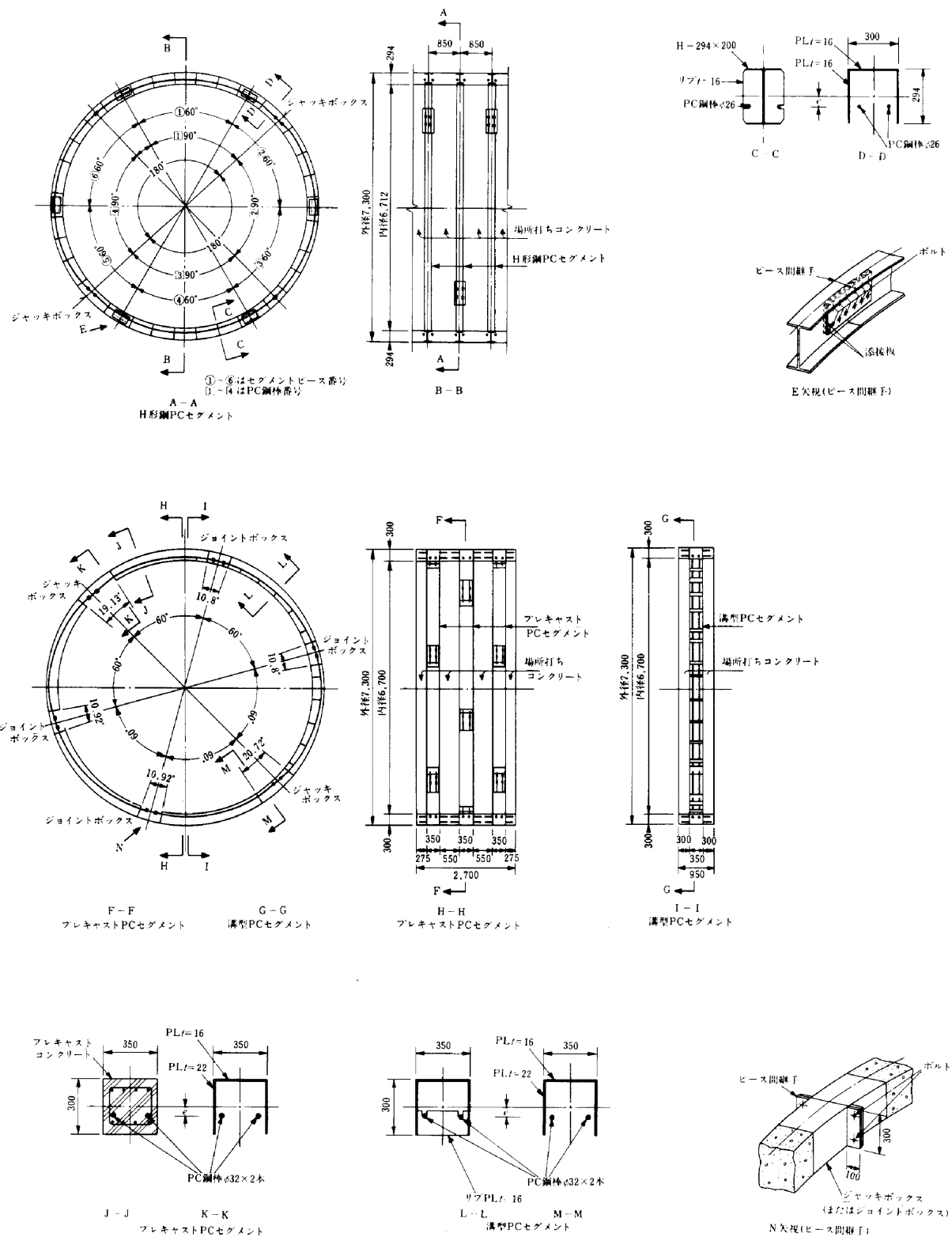


Fig.9 PCセグメント概要

Table 3 PCセグメント、PC鋼棒の組立精度

測定項目 断面	内 空 断 面				P C 鋼 棒 偏 心 量*								備 考 (場所、PCセグメントタイプ)
	①～⑤	②～⑥	③～⑦	④～⑧	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
西A	6,705	6,704	6,710	6,708	-47	-26**	+39	-2	-52	-22**	+38	-4	(東行線, H)
西E	6,705	6,711	6,706	6,706	-49	-4	+39	-20**	-44	-4	+41	-26**	(" , H)
西G	6,700	6,703	6,703	6,695	-50	-21**	+41	-4	-47	-15**	+41	-4	(" , H)
西溝	6,697	6,695	6,703	6,700	-49	-5	+39	-9	-49	-6	+38	-8	(" , 溝)
東溝	6,690	6,698	6,697	6,702	-49	-6	+38	-9	-49	-6	+38	-8	(西行線, 溝)
基準値	6,700	6,700	6,700	6,700	-50	±0	+50	±0	-50	±0	+50	±0	
東A	6,900	6,950	6,705	6,709	-57	-1	+58	-2	-61	-4	+57	-2	(西行線, プレキャスト)
東E	6,690	6,705	6,695	6,710	-61	+1	+57	-5	-63	-3	+54	-3	(")
東G	6,694	6,698	6,700	6,705	-61	-3	+57	-5	-58	-3	+57	-2	(")
基準値	6,700	6,700	6,700	6,700	-60	±0	+60	±0	-60	±0	+60	±0	

* PC鋼棒偏心量は外側+, 内側-とした

** は緊張装置取付け箇所

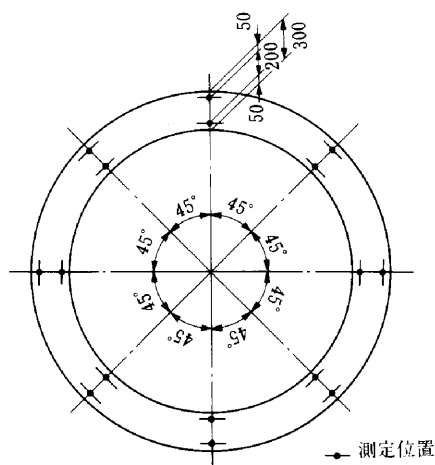


Fig.10 B, C, D, F断面のひずみ測定点

置の設置部分を直線にしたため内側に2～3 cm 偏った。

(2) 施工性の把握

今回の実験では実験規模は小さいため十分な実工事対応の設備を設けなかったことと計測作業の錯綜作業であったため各作業に時間を要した。従って、施工サイクルタイムは参考にならないが、実用化の為の貴重なデータを得た。その内、改良又は工夫が必要なものについてのみあげると次のとおりである。

① (PCセグメントの組立)

従来のセグメントのように隣接リングをガイドにして組立ることが不可能なため PCセグメントの組立と緊張装置の取付けに時間を要した。組立定規を備えた特殊なエレクトなどの工夫が必要である。

② (PCセグメントの組立)

キーセグメントがないため6分割の最終ピースの組立に困難を伴った。設計的に工夫をすれば従来型のテ

ーパ付のキーセグメントでも支障がないと考えられるのでキーセグメントを設けた方が得策と考える。

③ (PCセグメントの組立)

H形鋼 PCセグメントの添接板継手はリングを真円に組立するのに困難を伴った。ボルト～孔の遊間が悪影響した為添接板継手の場合、遊間のないテーパピンに代えるなどの工夫が必要である。

④ (緊張)

1リング当たり45°斜線の対角線上の2箇所緊張したが、斜上方の緊張箇所への緊張治具取付に時間を要した。緊張治具の軽量化、取付装置の工夫が必要である。あるいは、室内実験で緊張の摩擦ロスが $\mu=0.1$ 程度と小さいことが分っているので1リング当たり1箇所にする 것도検討の価値がある。

(3) 緊張によるプレストレス発生量

Fig. 11, 12に緊張によるプレストレス発生量(断面力)を示す。◇, ○, △, ×はコンクリートのひずみ量実測値から算出した断面力であり、破線はバネ(ゴムスポンジのバネ定数4 kgf/cm²:圧縮時のみ有効)による変形拘束を考慮し計算値である。拘束がない場合に比べて20%になっている。ちなみに、バネによるモーメント発生量はバネ定数に大きく依存する。参考までに本実験に使用した H形鋼 PCセグメントを例にとって地盤バネを変化させた時のモーメント変化率 $\beta=M/M_0$ (ここに M :地盤の拘束を考慮した時のモーメント発生量 M_0 :地盤拘束ない時のモーメント発生量)を Fig. 13に示す。

Fig. 11, 12によると、軸力は室内実験と同様実測値と計算値はよく一致している。一方、曲げモーメントは、測定値にバラツキがあるが平均的にみると実測値と

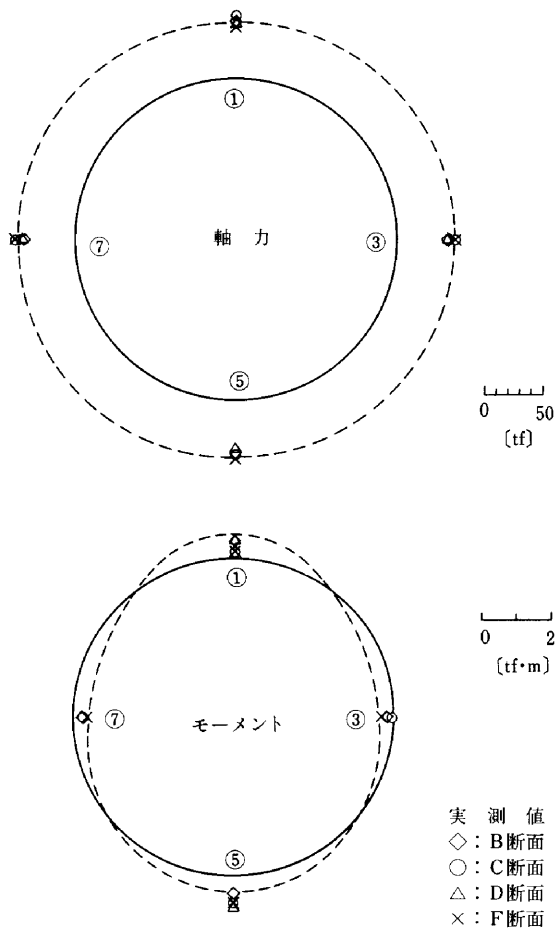


Fig.11 PS導入による断面力図(東行線)

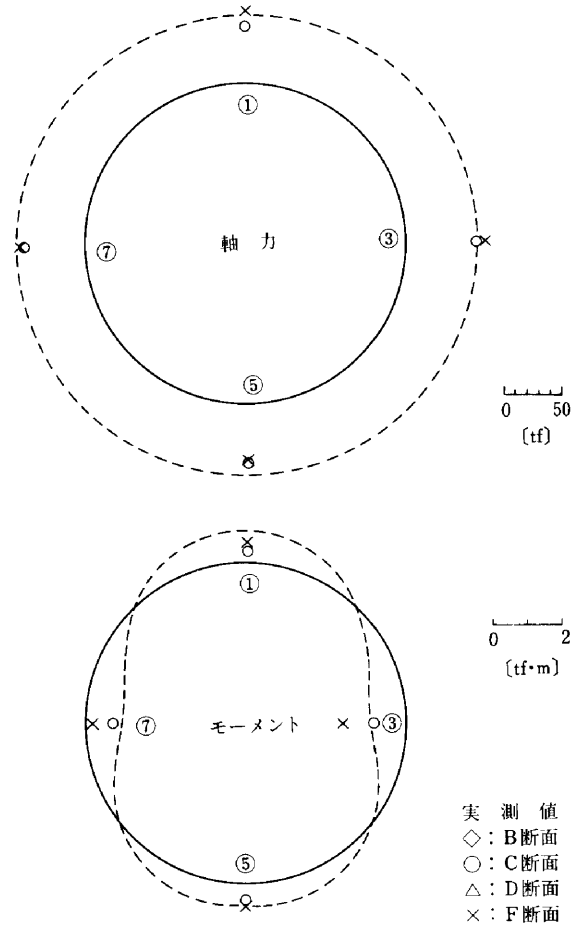


Fig.12 PS導入による断面力図(西行線)

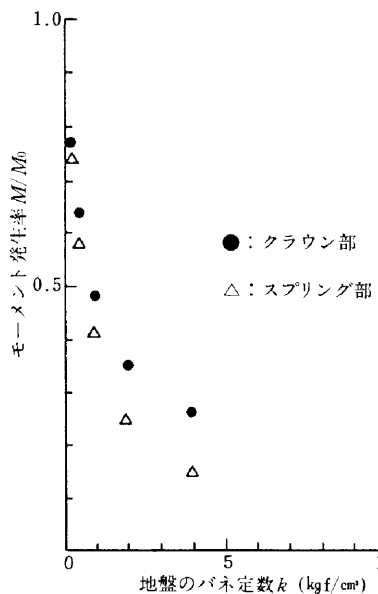


Fig.13 モーメント発生率～地盤バネ定数

計算値は比較的一致している。室内実験結果でみられたような継手部の接触不良に起因すると考えられる悪影響はなかった。これは前回の報告¹⁾で述べたように接触不

良を周辺のコンクリートが補足したものと考えられる。

(4) ジャッキボックス位置での応力の確認

Fig. 14 に東行線における A, E, G 断面を緊張した時の測点 B, C, D, F 断面の②, ④, ⑥, ⑧の曲げモーメントを示す。この様に緊張箇所にて $-1 \sim -2 \text{ tf} \cdot \text{m}$ のモーメントが発生している。原因としてはジャッキボックス部と一般部とでは断面形状が異なるために中立軸がずれていることや、ジャッキボックス突合せ面の接触不良が考えられる。

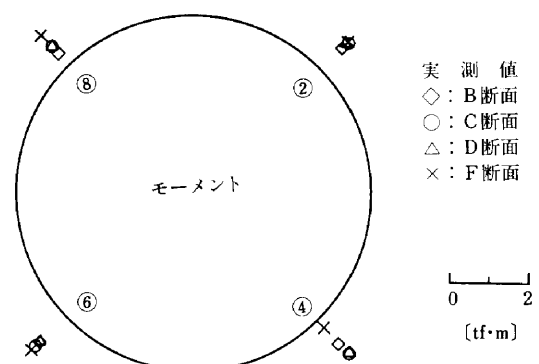


Fig.14 PS導入によるジャッキボックス位置の曲げモーメント

前者の原因については、負のモーメントが発生するがその値は小さく主原因とは考えにくい。

後者については、室内実験の結果からも突合せ面のトンネル中心側に空隙がある（外側のみで接触している）ことが分かっている。異なる点は、室内実験では突合せ面でのみ軸力を伝達させるために、応力が外側に集中して正のモーメントが発生した。これに対し、現場実験では突合せ面内側の接触不良を近傍の内側のコンクリートが補うために、コンクリートの内外の応力を比較した場合、内側の応力が大きくなり、負のモーメントとして計測されたと考えられる点である。

なお、ジャッキボックス部近傍での場所打コンクリートの軸力増加は認められず、ジャッキボックス部でも、接触不良ながら軸力は伝達しているものと判断できる。

(5) 導入したプレストレス力のトンネル延長方向への伝達

Fig. 15 は H 形鋼 PC セグメントを使用した区間の断面 B, C, D, F のコンクリートの応力度の変化を緊張段階毎に示したものである。実測値は各断面の 8 箇所の内・外側の 16 点の平均値である。計算値は円筒シェルに円周方向の軸力のみが作用した時のトンネル延長方向の応力分布を算出したものである。このように計算値と実測値が一致し、かつ 85cm 程度の間隔で緊張力を導入してもトンネル延長方向に均等に分布している。

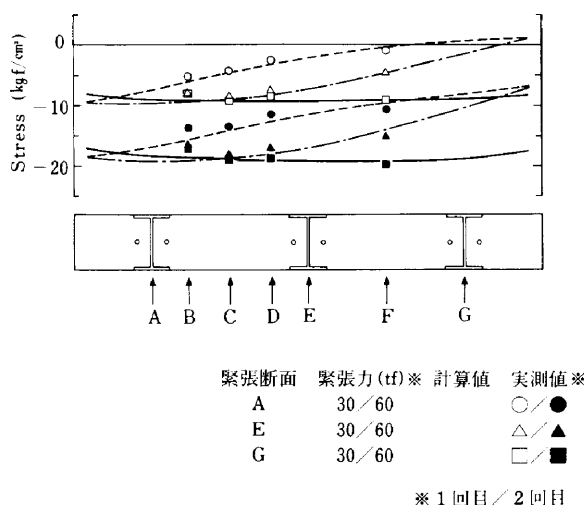


Fig.15 PSのトンネル延長方向への伝達

§ 5. あとがき

以上、一連の検討と実験結果について述べたが、この結果から以下のことがいえる。

設計方法については、設計荷重など不明な点があり、

今後、これらの不明点の検討を行った上で設計方法を確立する必要がある。

一方、施工性については、到達したシールド機内で実施したことと実工事に対応した設備を設けなかったことから、今回の結果で実物のトンネルの施工性を結論付けることはできない。しかし、今回得たデータをもとに改良を加えることによって十分に実工事への対応が可能でほぼ実用化の目途を得たと考える。例えば、PC セグメントの組立に時間を要したが、これは事前に予測したことであり、専用の組立装置を設けることにより解決可能と考える。

力学特性については、プレストレスの導入についての検討と実験を中心的に実施したが、ほぼ事前の予測どおりの結果を得た。すなわち、軸力については計算値どおり、一方、曲げモーメントについては地盤の拘束の影響を考慮した計算どおりのプレストレス導入を確認した。ただし、地盤の拘束については地盤を弾性体と見做した検討・実験内容およびその結果であって、実際の地盤の場合、長期的には塑性体とみなした方が自然な地盤もあり、この場合は地盤拘束の影響は小さいと考えられる。

本実験は開発の第一段階として実施したもので、今回の実験内容で十分とは考えていないが、一連の実験で得たデータ、ノウハウは貴重なものであり、今後、これをもとに更に検討を進め、本工法の改良あるいはこの工法を踏台にして、より良い場所打ライニング工法の開発を実施したい。

最後に、本研究に当って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東京都交通局 PC セグメント小委員会の方々および都交通局の諸氏の多大な御指導をいただいたことを報告し、この紙面を借りて謝意を表する。

参考文献

- 1) 石倉ほか「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)」
西松建設技報 Vol. 10, pp. 31~41, 1987.6