

プレキャストコンクリート構造物に対する 緊張システムの開発

——トンネルライニングへの適用——

池 田 弘*
本 田 勉**
河 村 彰 男**

1. ま え が き

プレキャストコンクリート構造物にプレストレスを導入する場合には、従来から PC 鋼材の軸方向延長上の外部空間を緊張作業に利用するのが一般であり、例えば PC タンクのような円筒構造物でも、外部に設けたピラスターに PC 鋼材を引き出し、定着している。ところが同じ円筒構造物でも、シールドトンネルのような地中構造物となると、外部が利用できないため、従来の方法では PC 鋼材の挿入、緊張作業等は必ずしも容易ではない。これは連続地中壁の水平方向や、ボックスカルバートのような地中構造物、あるいは緊張作業空間が限定された場合にも共通な課題である。

筆者らはプレキャスト部材の特長を活かすためアンボンド PC 鋼材に着目し、これを工場製作時に部材内に埋設することにより、作業の簡素化を図るとともに、現場組立て時に部材端にて PC 鋼材相互を結合、緊張する方法を考案し、これにより構造物内部空間から容易に緊張作業が行えるシステムを開発した。

この場合のプレキャスト部材接合部はドライジョイントであって、プレストレスで結合されているだけであるから、フルプレストレスの範囲内では本体部と同等の剛性を確保していると考えられるが、限界状態においてどの程度の耐力を保有しているかは明確ではない。

本報告は、今回開発した緊張システムの検証、およびプレキャスト部材接合部の曲げ耐力の把握と設計法の確認を目的とした曲げ載荷試験結果について述べ、あわせて実構造物への適用例として、シールドトンネルを想定したリング実験結果を紹介するものである。

2. 緊張システム

2.1 PC 鋼材のカップリング

PC 鋼材はプレキャスト部材端の接合部に設けた箱抜き内でカップリングされる。カップラーには種々の形式

* (株) 熊谷組技術研究所第四部長

** (株) 熊谷組技術研究所第四部

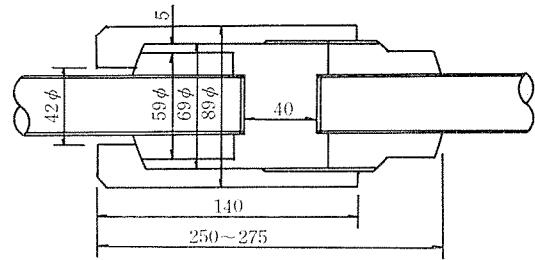


図-1 2重構造カップラー

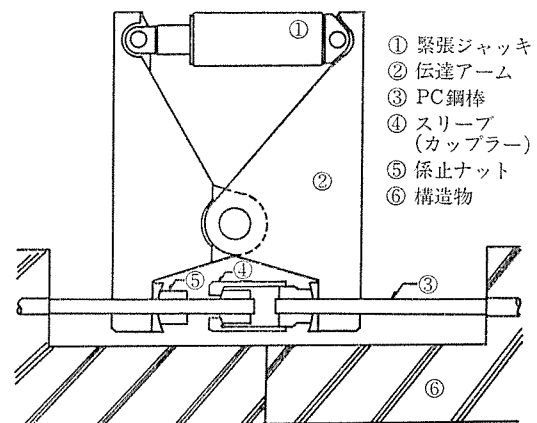


図-2 緊張システム

が考えられるが、今回の開発では、定着時のセットロスが少ない PC 鋼棒の使用を基本とし、図-1 のような 2重構造の特殊カップラーを用いた。

2.2 緊張装置

緊張装置は図-2 のようであり、従来の PC 工法のように緊張ジャッキを PC 鋼棒軸の延長上に据えるのと異なり、構造物の内空間に PC 鋼棒と平行に据えるのが特徴である。この方式により、プレキャストコンクリート構造物においても内部空間からのプレストレス導入が容易に行えるわけである。図-2 において緊張ジャッキを押し上げると、伝達アームを介して PC 鋼棒は引き寄せられ、緊張力が導入される。このときカップラー内ではスリーブと丸底ナットとが離れるので、スリーブを更ねじ込めば緊張力は固定される。

この装置の利点として次のことが挙げられる。

報 告

- ① 伝達アームの支点まわりのモーメントのつりあいから、緊張力に比してジャッキ能力が約 1/2 と小さくてよい。
- ② ジャッキを箱抜きの外に据えるので、箱抜きが小さくてよい。

2.3 緊張システムのキャリブレーション

今回開発した緊張ジャッキは、図-2 からわかるように、伝達アームの先端は支点を中心とした円運動となるので、PC 鋼棒緊張力 P_B とジャッキ荷重 P_J とのつりあい比 α はアームの回転とともに異なってくる。そこで較正係数 $\alpha = P_B/P_J$ を実測し理論値と照合すること、および緊張システムの作動確認を目的としたキャリブレーションを行った。

試験は緊張反力体を H 鋼で構成し、PC 鋼棒を内部に貫通させたうなカップラーで結合して、ジャッキ荷重、PC 鋼棒緊張力、および伝達アームの開き間隔を測定した。ここでアーム開き間隔とは図-2 に示すジャッキ固定ピンの中心間隔を測定したもので、アームの回転を表わすパラメータである。

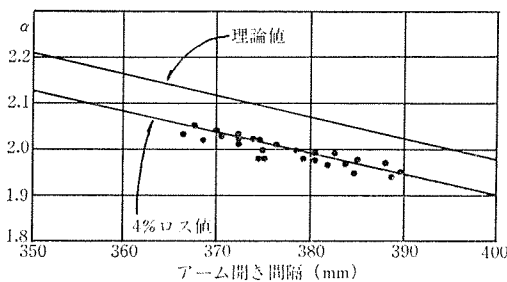


図-3 較正係数 α の測定結果

較正係数の測定結果を図-3 に示す。測定点はおおむね理論値を 4% 減じたライン上の上のっており、緊張システムが期待どおり作動すること、およびジャッキシステムにおける損失を 4% とみなしてよいことがわかる。したがって緊張管理に際しては、アーム開き間隔を測定して図-3 から較正係数を求め、これをジャッキ荷重に乗ずれば、PC 鋼棒の緊張力が得られることによる。

3. 曲げ載荷試験

この緊張システムを用いてプレストレスにより結合されるプレキャスト部材接合部は、

- ① コンクリート面相互が直接接するドライジョイントである。
 - ② 引張抵抗要素がプレストレスしかない。
 - ③ PC 鋼棒の結合、緊張のための箱抜きを有する。
- という特殊断面となっている。そこで接合部の曲げ耐力を把握し、かつ設計法を確認するため、接合部の曲げ載荷試験を行った。

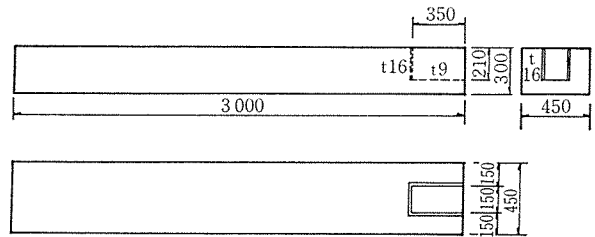


図-4 供試体寸法

3.1 試験供試体

(1) 供試体の形状寸法

供試体の形状寸法は図-4 に示すとおりであり、2 個の供試体をプレストレスにより 1 組に連結している。供試体は箱抜き側が緊張結合端で、他端が固定端である。

導入プレストレス量は 40 kg/cm^2 とし、PC 鋼棒は $\phi 32 \text{ mm}$ を用いた。PC 鋼棒は日石プロコートテープを巻き付けてアンボンド加工し、断面図心に配置した。

また箱抜き部は、コンクリートの断面欠損を補うため、等価断面積を有する鉄板で補強することとし、鉄板厚はヤング係数比を 5.6 として 16 mm である。

なお、以下この供試体を PS モデルと称する。

(2) 供試体の種類

曲げ載荷試験に用いた試験供試体は表-1 に示す 7 体である。

PS モデルの接合部は本体部に比して耐力が低下することは明らかであり、PS モデル No. 1~5 では、耐力低下に対する補強効果を調べる意味で以下のような処理を施した。

No. 1, 2 は接合部を補強せず、接合部そのものの耐力を知ろうとするものである。

No. 3 は接合部補強として、接合面にエポキシ樹脂 (トーホーダイト Epx-1; 東邦天然ガス) を塗布して突き合わせたコンクリートを一体化させ、その引張抵抗を期待するものである。

No. 4, 5 は、実際の構造物では PC 鋼棒、カップラー

表-1 試験供試体の種類

名 称	載 荷 状 態 図	接合部補強方法
RC構造モデル		1体打設
PC構造モデル		"
PSモデルNo.1		補強なし
" No.2		"
" No.3		接合面にエポキシ樹脂
" No.4		普通モルタルによる埋戻し
" No.5		レジンコンクリートによる埋戻し

の防食のため箱抜きを埋め戻すことを考慮し、No. 4では普通モルタル、No. 5ではレジンコンクリート（ブレンマー RC101；日本油脂）で埋め戻している。この付加効果として、埋戻し材がPC鋼棒、箱抜き補強鉄板との付着により箱抜き部を拘束するので、これらが一体となって引張抵抗要素となることが期待できる。

また、以上の各タイプの接合部における耐力低下がどれほどかを知るため、一体打設したPC構造モデルを用いて比較を行う。更にプレストレスによる耐力増加を知るために、PC構造モデルと比較する意味でRC構造モデルを用いた。

なお、主鉄筋はPSモデル、PC構造では6×D13、RC構造では6×D19を用いている。

(3) 使用材料

コンクリートの配合および試験結果を表-2, 3に、箱抜きの埋戻しに用いたモルタル、レジンコンクリートの試験結果を表-4に示す。

また、鉄筋、PC鋼棒の試験結果を表-5に示す。

3.2 試験方法

曲げ荷重試験は写真-1に示す100t荷重装置を用いた。供試体長6mに対して、支持スパンは5m、荷重スパンは1.4mである。

荷重重は0.5tピッチとし、各荷重段階ごとに

- ① コンクリート・鉄筋・補強鉄板・PC鋼棒のひずみ
- ② スパン中央でのたわみ

表-2 コンクリートの配合

σ_{ck} (kg/cm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	G_{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	Po. 10L
450	6±1.5	2±1	20	42.5	40	173	407	708	1221	11.14

表-3 コンクリートの試験結果

項 目	材 令	
	7 日	28 日
圧縮強度 (kg/cm ²)	450	572
曲げ強度 (kg/cm ²)	53.7	55.0
ヤング係数 (kg/cm ²)	—	4.18×10 ⁵

表-4 埋戻し材の試験結果

埋 戻 し 材	圧縮強度 (kg/cm ²)
普通モルタル	$\sigma_6=236, \sigma_{28}=287$
レジンコンクリート	$\sigma_{1h}=677$

表-5 鉄筋、PC鋼棒の試験結果

種 類	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)
鉄 筋 D13	36.6	53.7	26.9
〃 D19	35.8	56.7	26.1
PC鋼棒 $\phi 32$	116	130	11

を計測した。

3.3 プレストレスの導入

試験緊張により測定したアンボンドPC鋼棒の摩擦損失係数 λ は0.0015と非常に小さい値であった。また、PC鋼棒の戻り量を測定して得たカップラーのセットロスは1~1.5mmであった。

PSモデルのプレストレス分布の一例を図-5に示す。

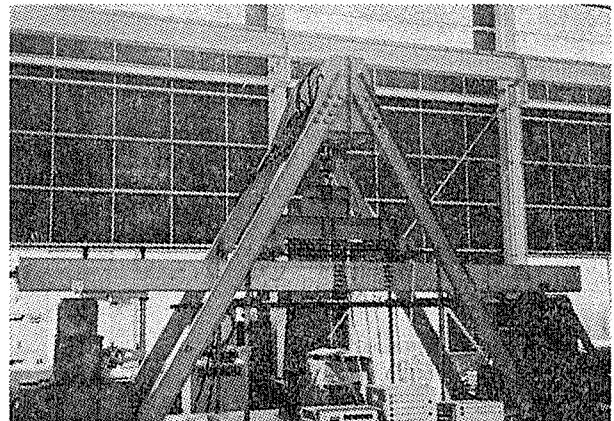


写真-1

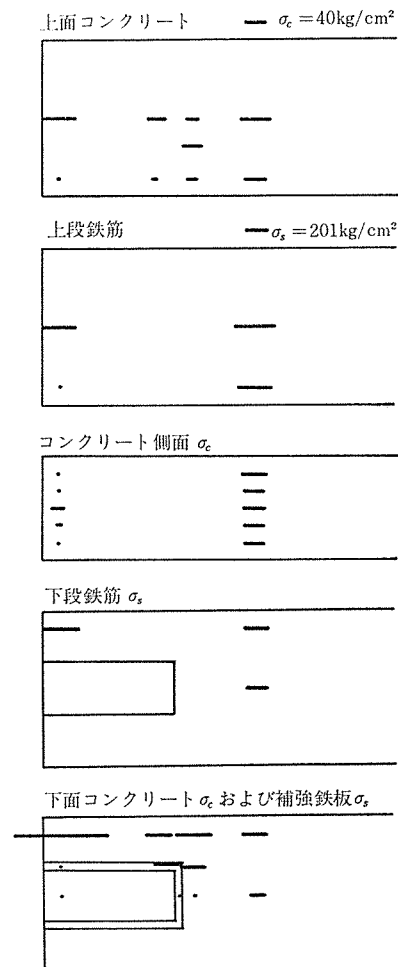


図-5 プレストレスの分布

プレストレスの期待値はコンクリートで $\sigma_c = 40 \text{ kg/cm}^2$ 、鉄筋および補強鉄板で $\sigma_s = n \cdot \sigma_c = 201 \text{ kg/cm}^2$ であるのに対して、本体部では約 40 kg/cm^2 のほぼ様な分布となっているものの、接合部の箱抜き周辺では、値はかなりバラついている。これは接合面では供試体コンクリートがじかに接しているため、微小な凹凸によって局部的な当たりができている影響と考えられる。

3.4 試験結果

(1) 理論解析

応力解析は以下の仮定に基づいて行った。

- ① 破壊に至るまでの断面は平面保持の仮定に従う。
- ② 付着のない PC 鋼棒の緊張力は外力として考える。
- ③ 付着のある PC 鋼棒、鉄筋および補強鉄板とその位置のコンクリートとは同じひずみを生ずる。
- ④ コンクリートはひびわれ発生までは全断面有効であり、ひびわれ発生後は引張抵抗を無視する。
- ⑤ 埋戻しを行った場合は、埋戻し材の付着拘束があるものとして PC 鋼棒の緊張力は内力として考える。
- ⑥ コンクリートの応力度～ひずみ曲線は 図-6 とする。
- ⑦ コンクリートの終局時の圧縮応力度分布は 図-7 とする。
- ⑧ 鉄筋、補強鉄板および PC 鋼棒の応力度～ひずみ曲線は 図-8, 9, 10 とする。

また変形解析は、曲げ载荷スパン中央のたわみを弾性荷重法で求めた。なお、曲げひびわれ発生後の有効断面 2 次モーメントは ACI 318-71 によった。

(2) 曲げモーメントとひずみの関係

図-11 に曲げモーメントと、コンクリート圧縮縁ひずみ ϵ_c および引張鉄筋ひずみ ϵ_s との関係を理論

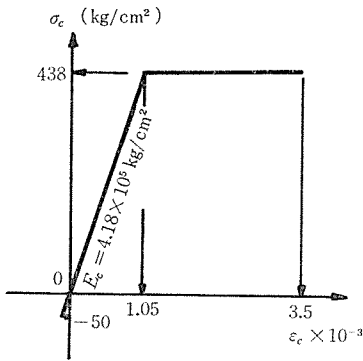


図-6 コンクリートの応力度～ひずみ曲線

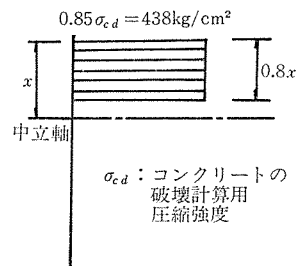


図-7 終局時のコンクリート応力度分布

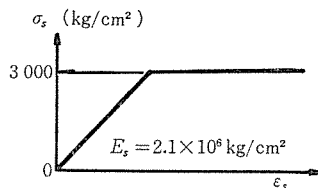


図-8 鉄筋の応力度～ひずみ曲線

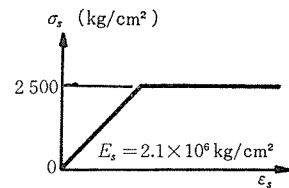


図-9 補強鉄板の応力度～ひずみ曲線

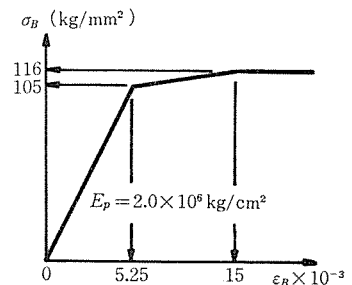


図-10 PC 鋼棒の応力度～ひずみ曲線

値と比較して示す。

(a) の RC 構造モデルでは、曲げひびわれが理論値よりも小さい荷重で発生したために、試験結果と理論値の間にずれが見られるが、ひずみの増加勾配は理論値とよく一致している。

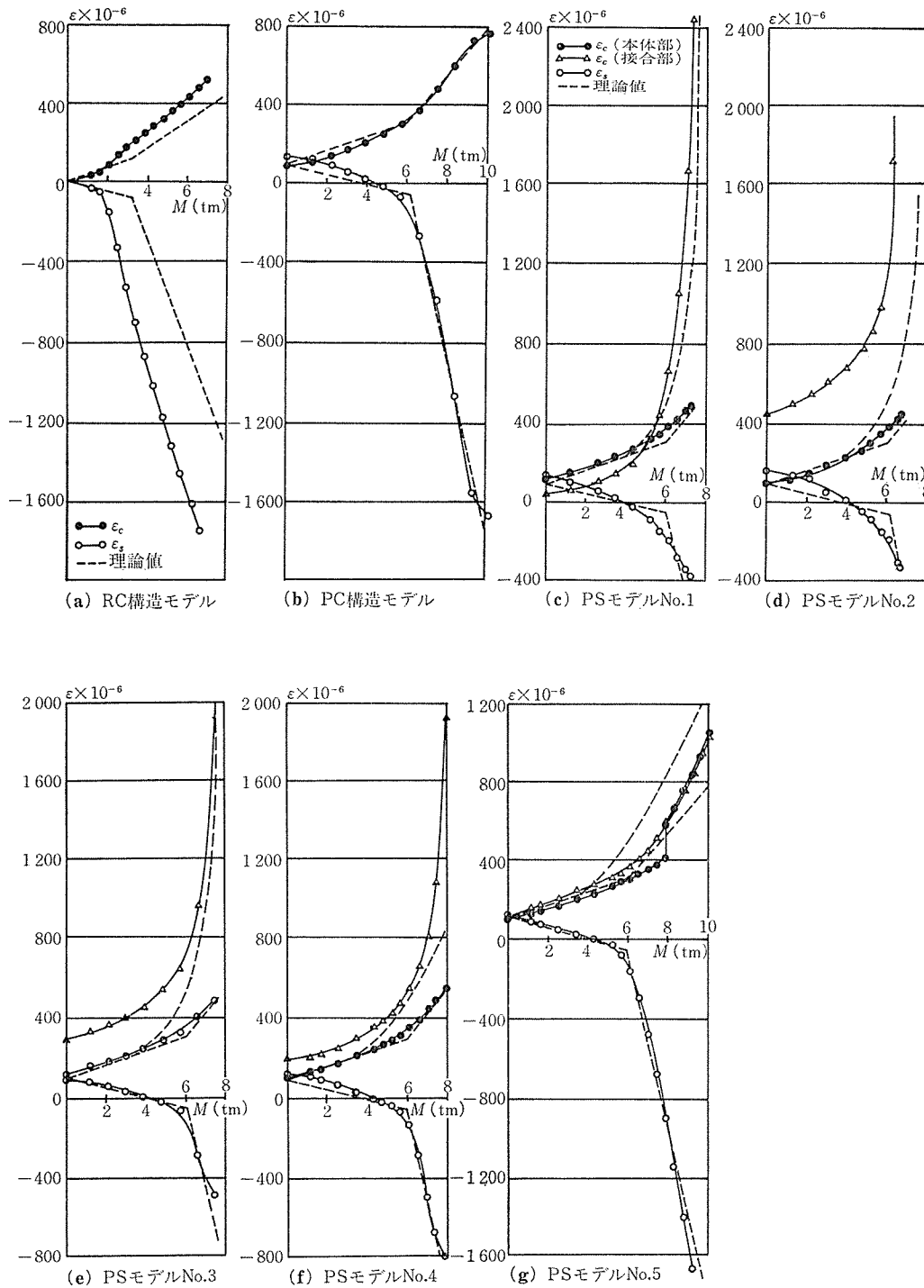
(b) の PC 構造モデルでは、試験結果と理論値とが非常に良い対応を示している。更に、ひびわれ発生後の除荷時における残留ひずみは極めて小さく、PC 構造の優位性を裏付けている。

(c)～(g) の各 PS モデルとも本体部に関しては、PC 構造モデルと同様に試験結果と理論値とがよく対応している。

また、No. 1～3 の接合部に関しては前述したようにプレストレス導入量(分布性状)がバラついているため、初期値が理論値と大きく異なっている場合があるが、曲げひずみの増加傾向は理論値とよく一致していると言える。No. 4 の場合には、試験結果は荷重の増加とともに理論値より隔たり、むしろ埋め戻さない No. 1～3 の結果に近づいている。これは緊張力を内力とした仮定とは異なり、普通モルタルの付着による拘束がさほど強くないことを示しているものと思われる。一方、No. 5 では試験結果は接合部理論値を上回ってむしろ本体部に近い挙動を示している。これはレジンコンクリートの付着拘束がかなり強いことを示しているものと思われ、レジンコンクリートの使用は接合部の曲げ耐力向上のうえで極めて有効な補強方法であると言える。

(3) 曲げひびわれモーメント

曲げひびわれモーメントの一覧表を表-6 に示す。本体部に関しては、RC 構造において試験結果が理論値を



図—11 曲げモーメントとひずみの関係

やや下回っているが、その他は両者が良く一致していると言える。接合部に関しては、接合面にエポキシ樹脂を塗布した No. 3 が本体部の 70% に達しているのを除くと、本体部の 50% 程度である。しかしプレストレスが導入されているため、短期的に M_{cr} を超える荷重が加わっても、除荷後はひびわれが完全に閉合しており、問題はないものと考えられる。

また普通モルタルの埋戻し効果は、後埋め部にはプレ

ストレスが導入されていないため、ひびわれ制御に対しては効果がない。しかしレジンコンクリートで埋戻したのものについては、レジンコンクリートの曲げ強度が高い(推定 150 kg/cm^2) ために、接合部に開きが生じても後埋め部はひびわれず、したがって変形は制御されており、非常に効果があると言える。

(4) 終局曲げモーメント

終局曲げモーメント M_u をまとめたものが表—7 で

表-6 曲げひびわれモーメント

供 試 体	M_{cr} (tm)				
	接 合 部			本 体 部	
	理論値	試験結果		理論値	試験結果
RC 構造モデル	—	—	—	3.38	2.56
PC 構造モデル	—	—	—	6.08	6.60
PSモデル No.1	2.70	3.05	—	6.08	6.63
” No.2	2.70	3.53	—	6.08	6.20
” No.3	4.46	4.84	—	6.08	6.63
” No.4	2.70	3.08	3.96*	6.08	6.63
” No.5	2.70	3.04	7.97*	6.08	6.62

* 穴埋め材

表-7 終局曲げモーメント

供 試 体	M_u (tm)		破壊箇所
	理論値	試験結果	
RC 構造モデル	8.05	7.32	本体部
PC 構造モデル	10.01	10.13	”
PSモデル No.1	7.36	7.32	接合部
” No.2	5.54	6.78	”
” No.3	7.36	7.60	”
” No.4	11.25	8.00	”
” No.5	11.25	10.66	”

ある。PSモデル接合部の M_u は、PC構造本体部に比べて、No.5を除いて約70~80%となっている。しかしながら、これら接合部の耐力はRC構造本体部に比べると、いずれも同等以上となっており、プレストレス導入の効果が確認できる。また、埋戻し効果についてみると、No.5のレジコンクリートによるものが耐力上最も効果的である。しかし、樹脂の有臭性、可使時間の短さ、高価な材料などの問題点があるため、これらの解決とあわせて、普通モルタルによる埋戻し効果および方法についても今後更に検討してみる必要がある。

(5) 曲げモーメントとスパン中央たわみの関係

各供試体の試験結果とPC構造モデルの理論値を比較して示したものが図-12である。PSモデルのたわみ曲線はいずれの場合も、PC構造モデルの試験結果と似ており、ひびわれ発生(すなわち接合部が開く)までは同じようなたわみを示すが、ひびわれ発生後はPC構造より大きくなっている。しかしながら、いずれの場合もRC構造本体部のたわみより小さく、PSモデル構造の優位さを示しているものと言えよう。

4. セグメントリング実験

曲げ載荷試験の成果により、緊張システムの実用性、箱抜き部の補強方法、接合部の設計方法などの基本的な考え方が検証され、実用化に向けての展望が開けたと考えられる。そこで、実構造物への適用例として、コンクリートセグメントを用いたリング実験を行い、トンネルライニングへの適用性を確認した。

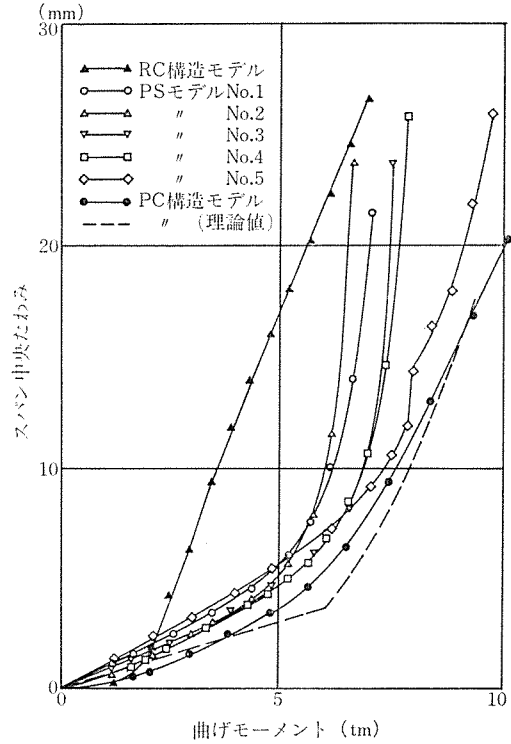


図-12 曲げモーメントとスパン中央たわみの関係

セグメントライニングにプレストレスを導入することによって期待される効果は、次のとおりである。

- ① 曲げ耐力の増大
- ② リング変形の減少
- ③ 短期荷重除荷後の真円復元性の向上
- ④ 止水性の向上

なお今回の実験に用いたセグメントは、外径7m、幅90cm、桁高30cmの平板型セグメントである。

4.1 プレストレスの導入

(1) 緊張計算

導入プレストレス量は、設計荷重に対してフルプレストレスとなるよう、既往の設計例を参考に 40 kg/cm^2 とした。このため1リング当たりの所要緊張力は108tとなり、種々の損失を考慮して有効率を85%とすると、初期緊張力は127tを要する。したがって、 $\phi 32 \text{ mm}$ C種1号PC鋼棒を1リング当たり2本配置した。

(2) アンボンドPC鋼棒の摩擦損失

セグメント1ピースおよび2ピースを連結したものをを用いて行った試験緊張の結果、摩擦損失係数は $\mu = 0.098$ と小さく、通常のアンボンド鋼材における値 $\mu = 0.1 \sim 0.15$ と一致した。

(3) 緊張方法

プレストレスの導入は、試作の緊張システムを図-13に示した3か所のジャッキ位置に順次設置し、1/3ずつの緊張力を導入することとした。1か所だけで全緊張力

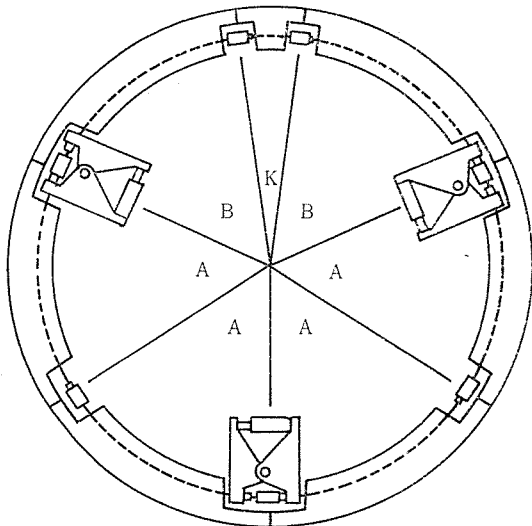


図-13 セグメントリングの緊張

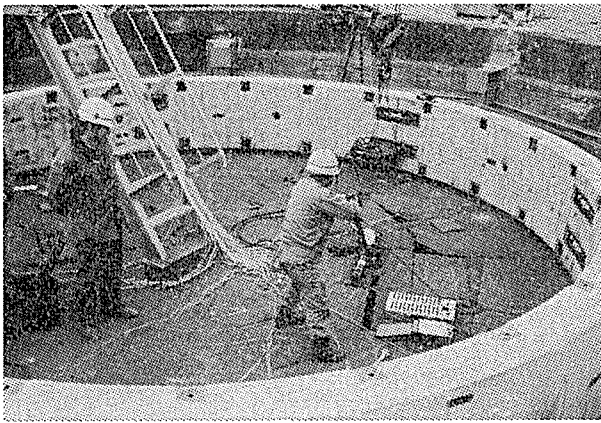


写真-2

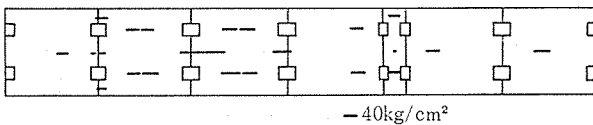


図-14 リング内のプレストレス分布

を導入すると、カップラーの構造上、伸びしろが不足すること、および摩擦損失のため緊張力が不均等な分布となることを考慮したものである。

また、実験はセグメントを横置きした状態で行うので、PC 鋼棒は1セグメント当たり上下2段に配置された形となる。そのため緊張作業は上下段ずつ交互に行うこととした。

緊張状況を写真-2に示す。

(4) プレストレスの分布

リング内のプレストレス分布を図-14に示す。

プレストレスの分布は、本体部はほぼ一様に導入されているものの、接合部の箱抜き周辺では値がバラついており、先の曲げ荷重試験と同様な結果となっている。

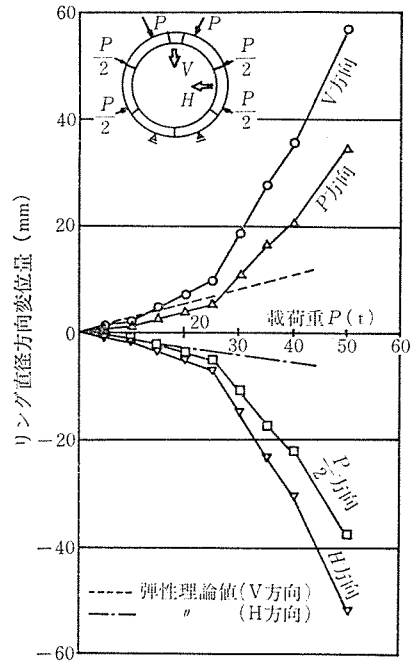


図-15 リングの変位量と荷重の関係

4.2 リング荷重試験

(1) 試験方法

リング荷重は荷重方向を8等分点とし、上方より P 荷重、側方より $P/2$ 荷重を載荷する方法とした。

載荷パターンは、ひびわれ発生までは P 荷重を5tピッチ、ひびわれ発生確認後は終局荷重まで10tピッチとした。

なお、リング試験に際しては箱抜きの埋戻しは行わず、応力解析方法は曲げ荷重試験の場合と同様である。

(2) 試験結果

リングの変位量と荷重の関係を図-15に示す。図-15では明らかに変位勾配が3点で変化している。すなわち、載荷重10~15tでセグメントの接合部が開口することにより変形が増大し、最初の変化点となる。この段階までの変位勾配は、図中に示した全断面有効、剛性一様の理論値とよく対応しており、プレストレスにより

表-8 曲げひびわれ荷重 (t)

発生箇所	理論値	試験結果
接合部 $+M_{max}$	15.2	—
接合部 $-M_{max}$	25.1	—
本体部 $+M_{max}$	22.9	25.0
本体部 $-M_{max}$	26.0	29.7

表-9 終局荷重 (t)

破壊箇所	理論値	試験結果
接合部 $+M_{max}$	50.0	57.0
接合部 $-M_{max}$	36.3	
本体部 $+M_{max}$	41.3	
本体部 $-M_{max}$	49.7	

報 告

接合部が剛結されていることが確認できる。ついで載荷重が 25 t となるとセグメント本体部にひびわれが発生し、剛性が低下するので第 2 の変化点となる。更に第 3 の変化点は引張鉄筋の降伏によるものである。

表—8, 9 には曲げひびわれ荷重, および終局荷重の試験結果と理論値を比較して示してある。

試験結果はおおむね理論値と一致しており, このような緊張システムによるトンネルライニングが, 期待される性状を満足しているものと言えよう。

5. あとがき

一連の実験成果から, プレストレスで結合されたプレキャストコンクリート構造物は, その接合部においても RC 構造本体部と同等以上の曲げ耐力を有していることが確認され, 今回開発した緊張システムが, シールドトンネルのような内部空間しか利用できないプレキャストコンクリート構造物に対しても適用できることを確認できた。

【昭和 58 年 12 月 8 日受付】

◀刊行物案内▶

第 23 回 研究発表会講演概要

体 裁 : B 5 判 62 頁

定 価 : 1500 円 送 料 : 250 円

内 容 : (1) 高強度 PC 鋼より線の諸特性について, (2) PC 鋼材定着部の終局強度設計法に関する基礎的研究, (3) 逆対称曲げをうけるアンボンド PC 梁の曲げ解析, (4) アンボンド PC 梁断面の曲げ破壊耐力略算法について, (5) 横拘束コンクリートによるアンボンド PC 部材の力学的性質改善, (6) PC III 種の鉄筋応力の測定, (7) 緊張管理に関する統計的考察 (1), (8) 同前 (2), (9) プレストレストコンクリート部材の変形性状に関する研究 (その IV 変形性状の定量化), (10) 同前 (その V 既往の設計式との比較検討), (11) 矩形開口を有するプレレストコンクリート部材の強度と変形性状に関する実験的研究 (その 1 無補強部材の性状), (12) 同前 (その 2 補強部材の性状), (13) PC 版の耐衝撃性向上に関する研究, (14) 円形スパイラル補強筋を用いたプレレストコンクリート住宅 (その 1 設計について), (15) 同前 (その 2 実験的検討), (16) PCR 工法の結合部に関する実験, (17) PRC はりの長期曲げ性状について, (18) 「特別講演」設計者の意図と PC の基本 (省略), (19) 滑りゴム沓及びソールプレートの各種確認試験, (20) SPC 合成構造による三郷浄水場, (21) プレストレストコンクリート造円筒壁の水平加力実験, (22) 長大ケーブルのグラウト注入試験, (23) 低温下に於ける RC および PC 円環体の熱応力に関する研究, (24) セグメントによるトンネルライニングの緊張システムの開発, (25) バイプレ方式による PC 桁の設計について, (26) 400 t デイビダークストランド工法の開発, (27) PC ボックスカルパートの設計施工, (28) 門崎跨道橋の設計施工の概要とたわみの測定結果, (29) 豊後橋の施工について