

論文

[2119] PCポールの曲げ剛性の改善

正会員 ○六郷恵哲 (岐阜大学土木工学科)

正会員 内田裕市 (岐阜大学土木工学科)

正会員 小柳 治 (岐阜大学土木工学科)

縄田初夫 (東海コンクリート工業)

1. まえがき

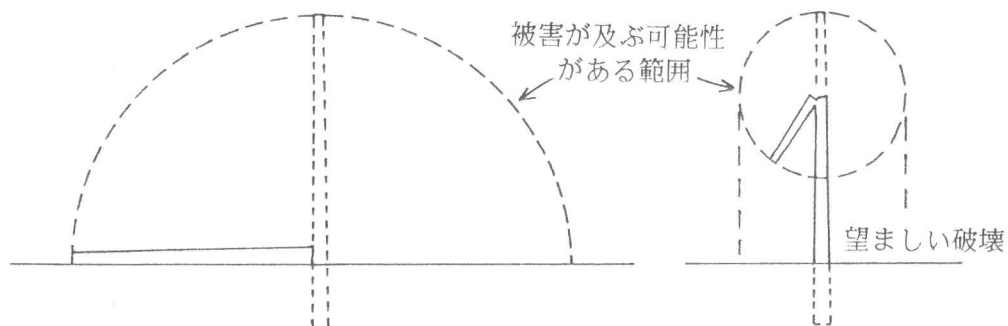
PCポールは送配電線路、電車線路、交通信号などに広く用いられている。近年、支持物の変化や大型化にともなって、より剛性の大きい高性能なPCポールが必要とされている。また、電線路の地中化にあたっては、地上電線路との接続部分でPCポールには片方のみから張力が作用するため、通常のものよりも大きな剛性が要求される。

本論文では、PCポールに要求される性能について検討するとともに、たわみの少ないPCポールを開発することを目的とし、各種の補強方法による曲げ剛性の改善効果について実験的に検討した結果について述べる。

2. PCポールに求められる性能

PCポールに求められる性能としては、美観や耐久性、経済性のほかに、力学的性能として強度、剛性、靱性などがある。PCポールはそれ自身のみで片持ち部材として使用され、部材の断面がそのまま構造物の断面となるため、不静定構造物の場合のように一部の部材が変形すると他の部材が荷重を肩代りするといった荷重の分配機能は期待できない。ポール自身には十分な耐力は必要であるが、強度破壊以降の部材断面の靱性（エネルギー吸収能）あるいは変形性能は、耐荷力の増加に直接結びつかないため、その重要性は不静定構造物の場合に比べ相対的に低いものと考えられる。

むしろ、部材の位置により断面の強度に差をつけ、強風等により万一破壊することがあっても、破壊による周囲への被害を最小限に抑えるといった破壊様式の制御が重要と考えられる。例えば図-1に示すようにポールの地際で破壊した場合に比べ、上から1/3程度の点で破壊した場合には、地上の人や車、構造物等に与える被害は小さくなると予想される。



(a) 地際で破壊した場合

(b) 上から1/3の部分で破壊した場合

図-1 PCポールが万一破壊した場合に被害が及ぶ範囲

PCポールに生じているたわみは、他の構造物に対して接触等の影響があったり見る人に不安を与える程大きいものであってはならない。PCポールの用途や使用方法が多様化し、人間の感覚も重視されるようになると、PCポールには大きな耐力とともに十分な剛性も必要となる。

### 3. 実験概要

表-1に示すように、軸方向筋の種類や量、補強材の種類（らせん筋、エキスパンドメタル、パンチングメタル）、プレストレス量、肉厚、コンクリートの種類（プレーンコンクリート、鋼繊維補強コンクリート）、外殻鋼管の有無を主な実験要因とし、これらを変化させた13種類の供試体（各1体）を遠心力成型法により作製した。すなわち、PCポールの曲げ剛性を改善する目的で、コンクリートの弾性係数E、断面2次モーメントI、軸筋量、プレストレス量を増加させたり、軸筋以外の補強鋼材を付加した供試体を作製し、実験を行った。

使用したコンクリートの圧縮強度試験結果を表-2に示す。F12、PF1には波付きストレート鋼繊維（直径0.5mm、長さ10mm）をプレーンコンクリートに容積比で2%混入した鋼繊維補強コンクリートを用いた。鋼繊維補強コンクリートおよびオートクレーブ養生のコンクリートについては圧縮強度試験は行わなかったが、それぞれ別の機会に行った同じ配合のコンクリートの圧縮強度試験の結果を参考として表-2に示す。PLAはオートクレーブ養生（180℃、10気圧、3時間）とし、残りはすべて蒸気養生（70℃、2時間）とした。PL1を除く供試体のプレストレス導入時強度は500kgf/cm<sup>2</sup>以上とした。

鋼材は軸方向筋として3種類の鋼棒、φ7mm（公称径7.02mm、 $f_{p,v}=146.8\text{kgf/mm}^2$ ）、φ11mm（公称径10.97mm、 $f_{p,v}=68.6\text{kgf/mm}^2$ ）、φ13mm（公称径13mm、 $f_{p,v}=110\text{kgf/mm}^2$ ）を用いた。表-3に使用した鋼材の機械的性質を示す。らせん筋はφ3mmのものを100mmピッチで使用した。エキスパンドメタル、パンチングメタルの形状を図-2に示す。パンチングメタルは、楕円穴（φ16x34、厚さt=3.2mm）、丸穴（φ32、t=3.2mm）、丸穴（φ32、t=6.0mm）の3種類を使用した。なお、これらのパンチングメタルやエキスパンドメタルを使用したPCポール供試体を工場で作製する上で、コンクリートの充填等に特に問題は生じなかった。

表-1 供試体の種類

供試体	導入応力・方法 (kgf/cm <sup>2</sup> )	軸方向筋	軸直角方向筋 等	肉厚 (mm)	特徴
PL1	0 -	φ7-12本	らせん筋 φ3-100mmピッチ	69.5	RC構造
PL2	80 プレテン	//	// //	69.1	現行型
PL3	80 プレテン	φ7-12本 φ11-12本 RC	// //	68.3	P RC構造
PL5	160 ポステン	φ13-12本	// //	70.0	プレストレス量増加
PL6	80 プレテン	φ7-12本	// //	89.0	肉厚増加
PLA	80 プレテン	//	// //	61.4	オートクレーブ養生
F12	80 ポステン	φ13-12本	// //	81.0	鋼繊維混入(φ0.5x10mm 2%)
XS1	80 ポステン	//	エキスパンドメタル XS43	80.4	エキスパンドメタル(t=3.2mm)
PU1	80 ポステン	//	パンチングメタル PU16-34	66.3	パンチングメタル(楕円穴 t=3.2mm)
PU2	80 ポステン	//	// PU φ32	76.0	// (丸穴 t=3.2mm)
PU3	80 ポステン	//	// //	81.3	// (丸穴 t=6.0mm)
PF1	80 ポステン	//	// //	88.9	PU2+鋼繊維(φ0.5x10mm 2%)
SC1	80 プレテン	φ7-12本	鋼管	68.2	外殻鋼管

表-2 コンクリートの圧縮強度試験結果

使用している 供試体	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (x10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
PL2	604	3.87	0.19
PL3	654	3.63	0.18
PL1、XS1 PU2、PU3	690	4.06	0.21
PL6、PU1	701	3.92	0.18

※ 鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度 : 725 kgf/cm<sup>2</sup>  
 ホトクレブ養生コンクリートの圧縮強度 : 845 kgf/cm<sup>2</sup>

表-3 鋼材の強度

鋼材	降伏点強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	破断時の伸び (%)
φ7	146.8	167.9	6.5
φ11	68.6	78.5	7.8

※ φ13についてはC種1号(JIS)を使用した。

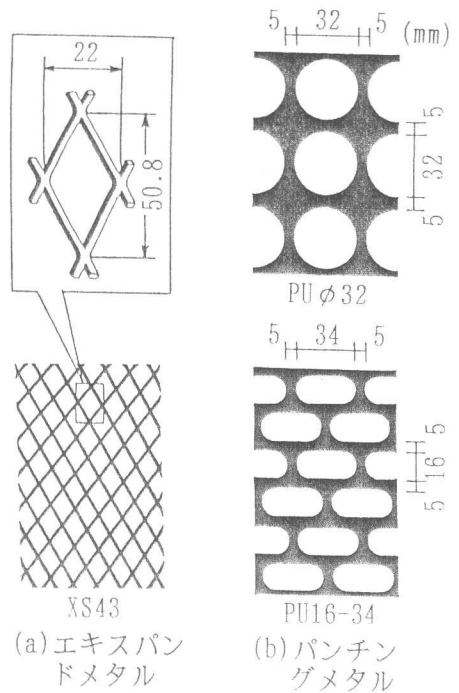


図-2 補強材の形状

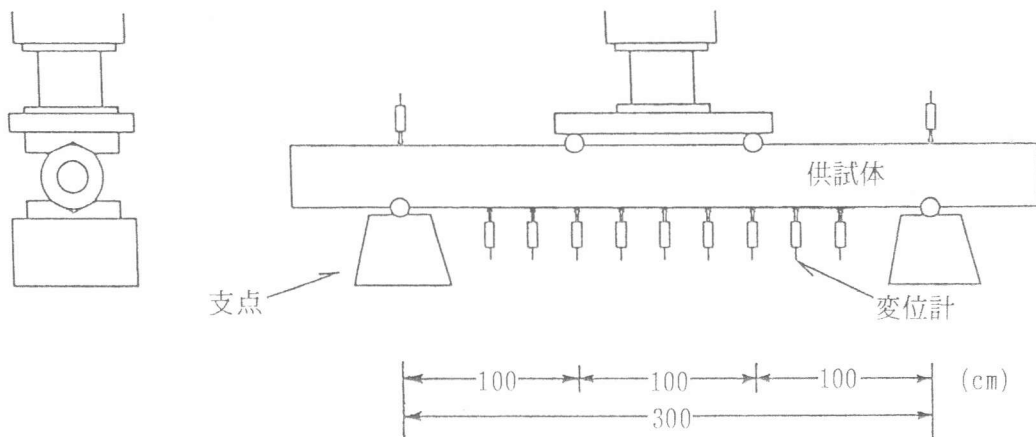


図-3 荷重試験方法

供試体寸法は全て外径30cm、長さ350cmで、断面は中空である。軸方向筋の配置径を24cmとし、らせん筋、エキスパンドメタル、パンチングメタルは軸方向筋の外側に配置した。PL2は現在主に使用されているPCボールと同じ特性を持つ供試体であり、断面の設計破壊曲げモーメントは7.5tonf・m (図-3に示す荷重方法では設計破壊荷重は15tonf) である。SC1は蒸気養生を終えた供試体を鋼管内(肉厚6mm)に挿入し、その間隙をセメントミルクでグラウトしたものである。

試験方法は、スパン長300cm(モーメントスパン100cm、せん断スパン100cm)の3等分点荷重とした。図-3に示すように、支点の沈下ならびに供試体のたわみの分布を合計11個の変位計により計測した。試験機に取り付けた油圧計により荷重を計測した。荷重は1方向単調荷重とし変位速度がほぼ一定となるように油圧バルブを手動で調整し、圧縮側鋼材の座屈や引張側鋼材の破断などの明確な破壊が現象生じた時点で荷重を中止し、また大変形となり危険な状態となった場合にも荷重を中止した。

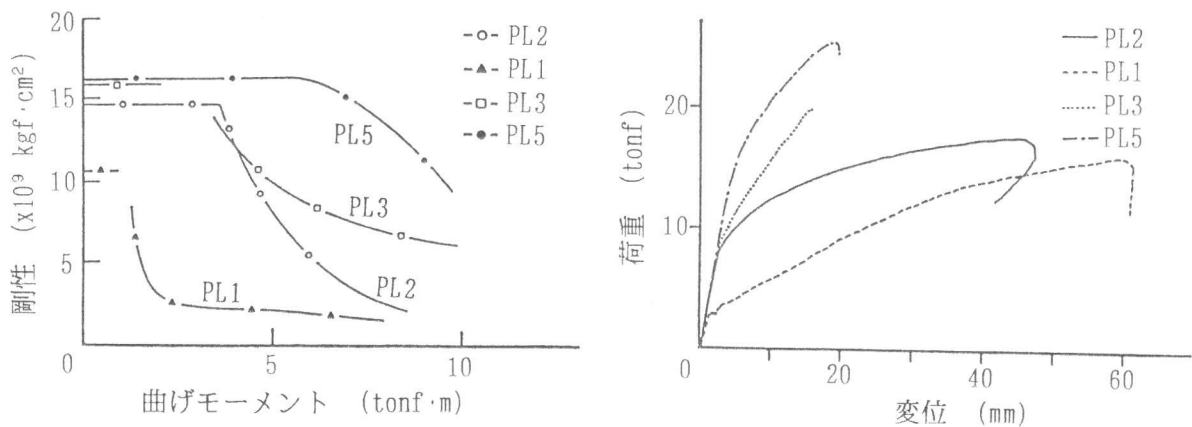
#### 4. 結果と考察

ひびわれ荷重、破壊荷重、破壊性状、剛性等の試験結果を表-4に示す。PL2(現行型)と対比させて、実験要因別に荷重-変位曲線および剛性と曲げモーメントの関係を図-4~8に示す。ひびわれ発生前については、供試体を弾性はり部材と考えて、スパン中央のたわみと荷重の関係から初期の曲げ剛性 $E_a I_a$ を求めた。表-1に示すように供試体の肉厚が供試体により多少異なるため、断面2次モーメント $I_a$ で初期の剛性 $E_a I_a$ を除してみかけの弾性係数 $E_a$ を求め、表-4に示す。また、ひびわれ発生後についてはモーメントスパンにおけるたわみ分布を円弧と仮定し、計測されたたわみ分布から曲率を求めモーメントを曲率で除した値を剛性とした。表-4には、PL2(現行型)の設計破壊曲げモーメント(=7.5 tonf·m)に対応する時点の剛性 $(E I)_d$ を各供試体について示す。

図-4からわかるように、軸方向のPC鋼材量を増やしプレストレス量を増加させることにより、耐力と剛性がともに大きく改善された(PL5)。特にひびわれ発生荷重が大きくなりひびわ

表-4 試験結果

供試体	ひびわれ荷重 (tonf)	破壊荷重 (tonf)	破壊形状	ひびわれ発生前		設計破壊曲げモーメント(7.5tonf·m)時の剛性 $(E I)_d$ ( $\times 10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ )	剛性残存率 $\frac{(E I)_d}{E_a I_a}$
				初期剛性 $E_a I_a$ ( $\times 10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ )	みかけの弾性係数 $E_a$ ( $\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ )		
PL1	2.5	16.3	せん断破壊	10.8	2.95	1.6	0.15
PL2	7.7	17.8	曲げ破壊	14.5	3.98	3.0	0.21
PL3	6.3	25.9	せん断破壊	16.8	4.63	6.8	0.41
PL5	13.0	25.4	曲げ破壊	16.0	4.39	14.3	0.89
PL6	7.8	17.7	//	15.5	4.00	3.1	0.20
PLA	8.4	19.9	//	15.3	4.38	4.3	0.28
F12	8.5	22.1	//	16.9	4.44	5.0	0.30
XS1	8.3	25.6	//	17.2	4.53	8.8	0.51
PU1	6.8	24.5	//	17.3	4.82	5.2	0.30
PU2	6.5	23.3	//	18.9	5.07	5.6	0.30
PU3	6.0	27.1	//	17.5	4.62	8.0	0.46
PF1	8.0	24.5	//	17.3	4.49	6.9	0.40
SC1	16.5	80以上	-	32.3	3.87	34.0	1.05



(a) 剛性と曲げモーメントとの関係

(b) 荷重-変位曲線

図-4 軸方向筋の種類とプレストレス量を変化させた場合の結果

れ発生後の剛性低下は小さくなった。プレストレス量を増やすことにより、耐力と剛性が大きいPCポールをつくることが可能となる。RC筋を増やすことによっても初期剛性は改善されるが、ひびわれ発生荷重は高くなり、破壊形態は曲げ破壊からせん断破壊へ移行した(PL3)。

図-5に示すように、肉厚を増やした場合(PL6)、初期剛性は改善されるが、ひびわれ発生後の剛性やひびわれ発生荷重は改善されていない。肉厚を増加することによって断面2次モーメントが増加する分だけ初期剛性 $E_0 I_0$ は増加するが、ひびわれ発生後、変形が大きくなった段階では軸方向筋で引張力を負担するようになり、中立軸の位置も中空部の上部にあるため、コンクリートの剛性や耐力に対する肉厚増加の効果が小さいものと考えられる。

図-6からわかるように、鋼繊維補強コンクリートを使用したり(F12)、オートクレーブ養生(PLA)により初期剛性やひびわれ発生後の剛性はある程度は大きくなるが、その効果は小さい。

図-7に示すように、エキスバンドメタル(XS1)やパンチングメタル(PU1~3)による補強は、いずれも初期剛性やひびわれ発生後の剛性の改善に対し効果があった。特にひびわれ発生後の剛性に対してはエキスバンドメタルが改善効果が高くひびわれ発生後の剛性低下が小さい。パンチングメタルは厚さ $t=6.0\text{mm}$ のものはひびわれ発生後の剛性低下が小さくなった(PU3)。エキスバンドメタルによる補強はひびわれ発生荷重を大きくするが、一方パンチングメタルを使用した場合にはいずれも現行型よりもひびわれ発生荷重が低くなった。同じ厚さのエキスバンドメ

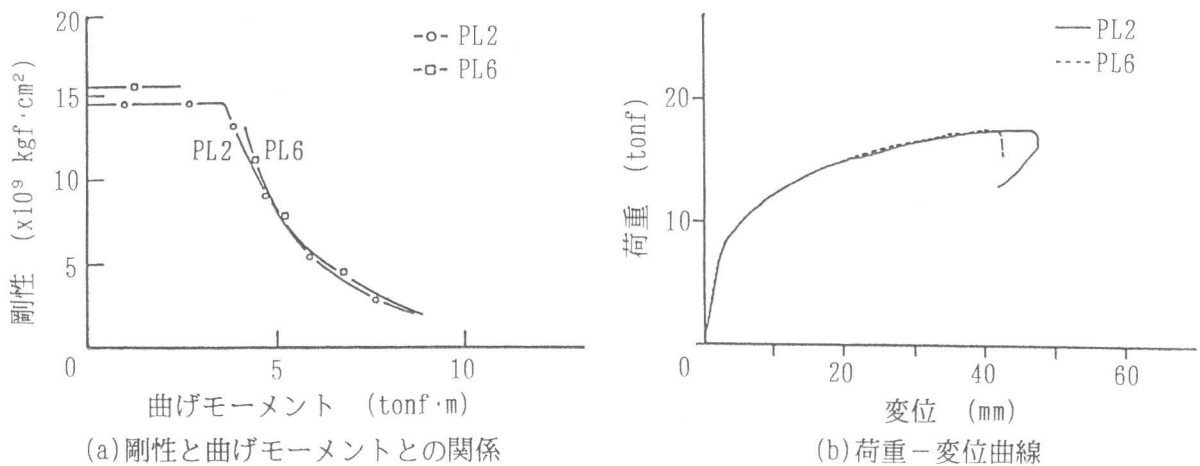


図-5 肉厚を変化させた場合の結果

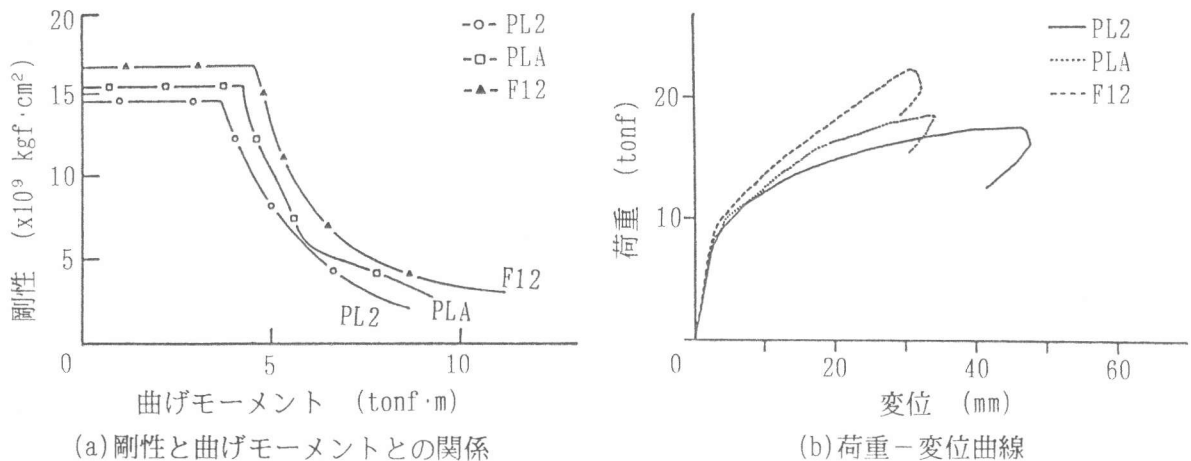


図-6 コンクリートの種類を変化させた場合の結果

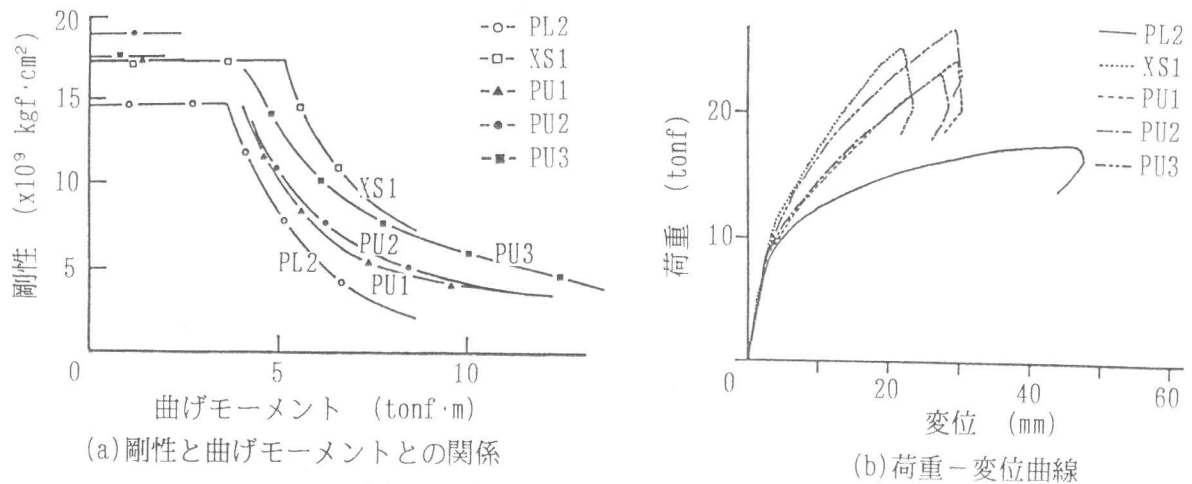


図-7 補強材を変化させた場合の結果

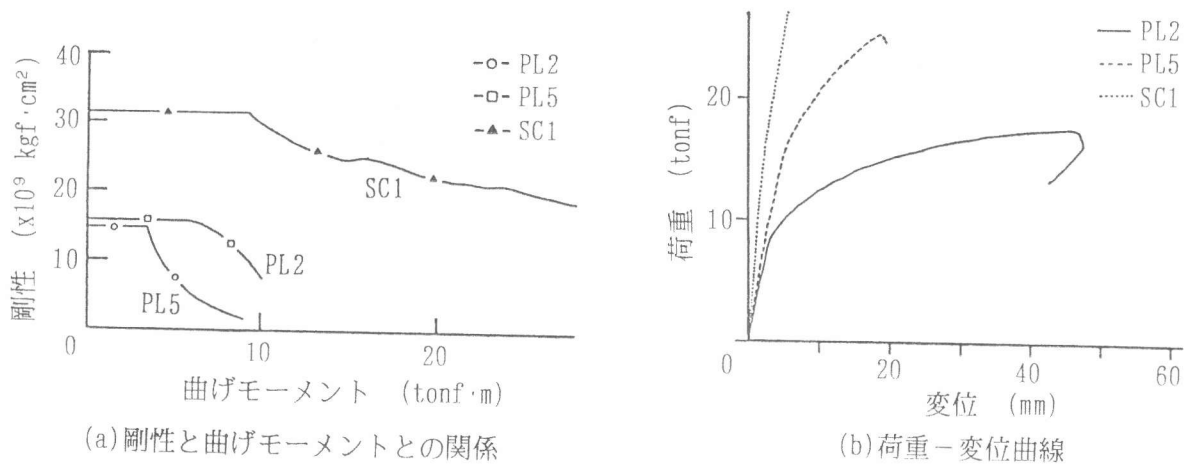


図-8 外殻鋼管を使用した場合の結果

タルとパンチングメタルとを比べるとエキスパンドメタルの方が剛性改善に効果があった。

表-4からわかるように、パンチングメタルと鋼繊維補強コンクリートを併用すると(PF1)パンチングメタルのみによる補強の場合(PU2)に比べ初期剛性はむしろ低い値となった。なお、PF1の荷重-変位曲線はPU2と同様であった。

図-8に示すように、外殻鋼管による補強は剛性、耐力いずれにも大幅な改善効果がみられ、設計破壊荷重時のたわみも現行型に比べ約10%程度と非常に小さい値となった(SC1)。しかし外殻鋼管により補強したPCポールは、実用化に関しては絶縁性や耐久性などの点で検討を要する。

##### 5. あとがき

送配電線用のPCポールに必要な性能として、強度が大きいことの他に剛性が大きいことが重要であることを指摘した。軸筋量、プレストレス量、補強材の種類等の条件を変えて供試体を作製し荷重試験を行った結果、耐力と剛性がともに大きいPCポールを作製するには、従来のものよりもPC鋼材量を増やしプレストレス量を増加させることが特に有効であった。エキスパンドメタルやパンチングメタルによる補強も初期剛性やひびわれ発生後の剛性の改善に効果があった。

本研究を行うにあたり、鈴木直希氏、稲熊唯史氏(東海コンクリート工業(株))ならびに高柳伸浩氏(岐阜大学土木工学科4年生)の協力を得たことを記し、謝意を表す。