

論 文

[2015] アウトケーブルを用いた PRC はりの曲げ性状

正会員 ○ 柳沼善明 (日本大学理工学部)

正会員 北田勇輔 (日本大学理工学部)

1. まえがき

諸外国ではアウトケーブルを用いた構造物(部材断面の外部にPC鋼材を配置した構造物)の設計施工が注目されている。一方、コンクリート構造物の劣化が問題となり補修や補強が必要となってきた。損傷を受けたコンクリート構造物の補強の一つの方法として、アウトケーブルの採用は有効な方法と考えられる¹⁾。

アウトケーブルの使用には数々の利点²⁾が考えられるため、今後我国においてもその使用が増加するものと予想される。しかしながら、我国におけるアウトケーブルに関する研究は数少ないため、本研究はアウトケーブルを使用するにあたっての基礎資料を得ようとするものである。著者らは、PC鋼材係数 q_p の大きな領域におけるアウトケーブルを用いたPRCはりの静的曲げ載荷実験を行ない、アウトケーブルの中間支持のないPRCはりの最大曲げモーメント M_{max} は従来工法の約4%の減少であったと報告した³⁾。この報告で用いられたPC鋼材係数 q_p ($=p_p \cdot \sigma_{py} / \sigma_{cy}$)は0.3で、鉄筋係数 q_s ($=p_s \cdot \sigma_{sy} / \sigma_{cy}$)は0.08~0.23であった。ここに、 p_p と p_s はPC鋼材比と鉄筋比であり、 σ_{py} と σ_{sy} はそれぞれPC鋼材および鉄筋の降伏強度であり、 σ_{cy} はコンクリートの圧縮強度である。ところで、PC鋼材量ならびに導入プレストレス力、はりの変形に影響を与えるものと考えられる。特に、PC鋼材係数の小さなPRCはりの変形能力が改善されるものと思われるため、PC鋼材係数と鉄筋係数とはアウトケーブルを用いたPRCはりの M_{max} に影響を与えることが予想される。そこで、本研究はPC鋼材量、導入プレストレス力ならびに主鉄筋量に着目し、アウトケーブルを用いたPRCはりの M_{max} 、PC鋼材の応力ならびに変形性状について調べることを主な目的とした。

表-1 供試体の種類

Type	Specimen	Tension reinforcement		PC-Tendon		Prestressing force P_t (tf)
		Size	p_s (%)	Size	p_p (%)	
A	NA88-1	2-D10	0.453	2- ϕ 9.2	0.422	8
	OA88-1	"	"	2- ϕ 13	0.843	8
	OA88-2	"	"	"	"	16
B	NB88-1	2-D13	0.806	2- ϕ 9.2	0.422	4
	OB88-1	"	"	"	"	4
C	NC88-1	2-D25	3.22	2- ϕ 9.2	0.422	8
	OC88-1	"	"	2- ϕ 13	0.843	8
	OC88-2	"	"	"	"	16
D	ND88-1	2-D29	4.08	2- ϕ 9.2	0.422	8
	OD88-1	"	"	"	"	8

2. 供試体ならびに実験方法

実験に用いた供試体はアンボンドのPRCばかりで、供試体の種類を表-1に、供試体の形状を図-1に示した。供試体は各タイプごとにアウトケーブルを用いたPRCばかり（シリーズO）と従来工法によるPRCばかり（シリーズN）とに大別される。シリーズOの供試体はアウトケーブルをはり両端で定着し、はりの支承部間では中間支持部を全く設けなかった。シリーズNの供試体はPC鋼材を部材断面内に配置したポストテンション方式のPRCばかりである。各供試体はシリーズ名とタイプ名とを組み合わせる供試体名とした。

使用したコンクリートの配合を表-2に、供試体の曲げ載荷実験時におけるコンクリートの力学的性質を表-3に示した。また、使用したPC鋼材ならびに鉄筋の力学的性質を表-4に示した。スターラップと組立鉄筋には呼び名D10mmの異形鉄筋を用いた。

実験方法は二点載荷で静的に曲げ破壊させた。加力には油圧ジャッキを用い、ロードセルにより荷重を検出した。供試体は各荷重ごとにたわみ、ひずみ、ひびわれの状況などを測定し、載荷荷重を漸次増加させて静的に曲げ破壊させた。コンクリートのクリープや乾燥収縮、PC鋼材の

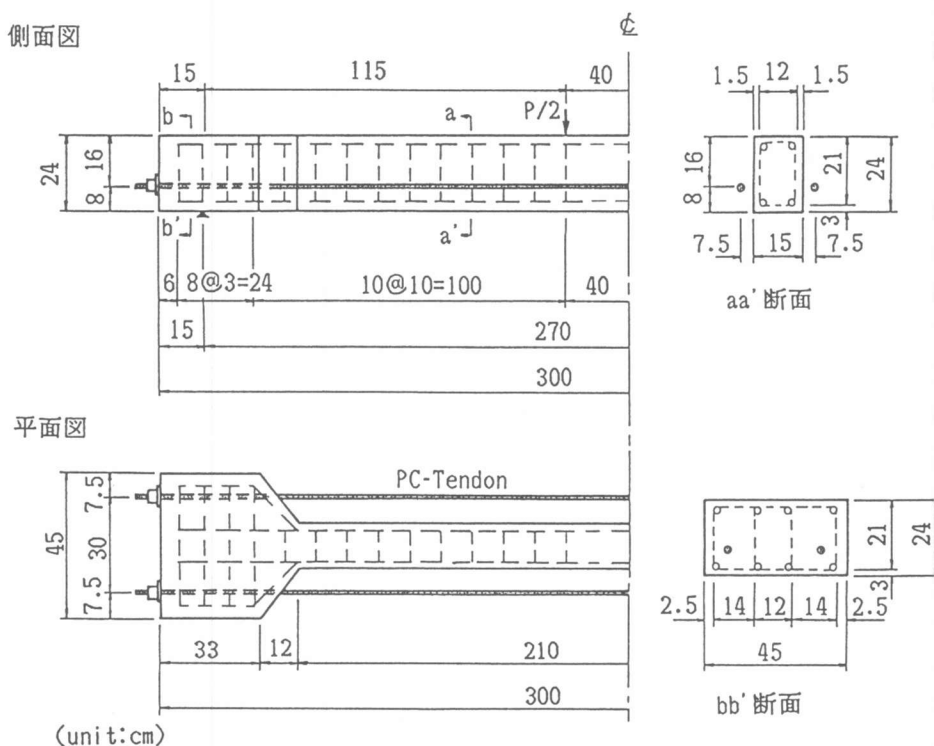


図-1 供試体の形状（シリーズO）

表-2 コンクリートの示方配合

Slump cm	W/C %	S/a %	Unit weight (kg/m ³)				
			Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture
15.0	36.5	36.2	168	460	606	1079	5.52

リラクセーションなどによるPC鋼材の応力減少を極力少なくするため、供試体の曲げ載荷実験はプレストレスの導入後ただちに行なった。

PC鋼材の応力はひずみゲージによるひずみ測定から求めた。

表-3 コンクリートの力学的性質

Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Flexural strength (kgf/cm ²)
431.1	33.7	39.8

表-4 PC鋼材と鉄筋との力学的性質

Type	Size	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elastic modulus (kgf/mm ²)
PC-Tendon	φ9.2	115	117	2.05×10 ⁴
	φ13	114	117	2.05×10 ⁴
Deformed bar	D10	41.3	60.2	1.95×10 ⁴
	D13	35.3	52.1	1.99×10 ⁴
	D25	36.1	53.8	2.03×10 ⁴
	D29	34.8	52.6	1.94×10 ⁴

3. 実験結果と考察

3-1 最大曲げモーメント

最大曲げモーメントの実測値と計算値との比較を表-5に示した。各計算値には Mattock⁴⁾、Baker⁵⁾、Gifford⁵⁾、ならびに竹本⁶⁾ による略算式を用いて算出した。これらはいずれもアンボンドPCばりにおける提案式である。各計算値は土木学会⁷⁾によるコンクリートのモデル化された応力-ひずみ曲線ならびに終局ひずみを用いて算出した。表-5によれば、各計算値はともに実測値と良く一致した。ところで、 l/d (l :スパン、 d :有効高さ)が約11の場合におい

表-5 最大曲げモーメントの実測値と計算値との比較

Series	Specimen	Tested result tf・m	(Calculated) / (Tested)			
			Mattock's method	Baker's method	Gifford's method	Takemoto's method
N	NA88-1	3.429*	0.806	0.828	0.885	0.773
	NB88-1	3.762	0.758	0.782	0.856	0.728
	NC88-1	8.051	0.948	0.926	0.949	0.939
	ND88-1	8.819	0.981	0.962	0.976	0.975
	Average		0.873	0.875	0.917	0.854
O	OA88-1	3.081	0.935	1.023	1.195	0.892
	OB88-1	3.010	0.933	0.965	1.056	0.895
	OC88-1	7.867	0.981	0.959	0.983	0.972
	OD88-1	8.604	1.026	1.006	1.021	1.019
	OA88-2	3.920	1.015	1.036	1.194	0.982
	OC88-2	8.998	0.981	0.957	0.989	0.972
	Average		0.994	0.991	1.073	0.955

*) PC鋼材の破断によりはりが破壊した。

ては q_s が0.08~0.23で q_p が0.3のときシリーズOの M_{max} はシリーズNの約4%の減少であった³⁾。しかし、本実験の場合($l/d=12.9$)タイプBにおけるシリーズOの M_{max} はシリーズNと比較して約20%もの大きな減少を示した。この大きな M_{max} の減少は、 q_s 、 q_p ならびに導入プレストレス力が小さいためはりの変形量が増加することになり、その結果としてアウトケーブルの偏心距離が小さくなることに起因していると考えられる。

NA88-1においては、定着部におけるPC鋼材ねじ部分の破断によりPRCばりが破壊した。これは、アンボンドのPRCばりであるため、載荷荷重の増加に伴い定着部においてもPC鋼材の引張応力が増加したためである。本実験で使用したPC鋼材はねじ谷部の断面積が母材の断面積よりも小さかったため、ねじ部においては母材で受けている引張応力の1.13倍の引張応力が作用していることになる。このためNA88-1の破断直前におけるPC鋼材の引張応力は113.7kgf/mm²であったが、この時のねじ部の引張応力は128.4kgf/mm²となり引張強度を超えていた。以上により、アウトケーブルを用いたPRCばりの場合、定着部でのPC鋼材の引張応力はかなり増加するため、定着部においてPC鋼材が破断する可能性を考慮する必要がある。

3-2 PC鋼材の引張応力

図-2に $\Delta\sigma_{pt}$ と($q_p + q_s$)との関係を図示した。ここに、 $\Delta\sigma_{pt}$ はプレストレス導入時から M_{max} 時までのPC鋼材の増分応力である。図-2によれば($q_p + q_s$)が増加するにしたがい、シリーズO、Nともに $\Delta\sigma_{pt}$ は減少する傾向にあった。

次に、図-3に $\Delta\sigma_{pt}$ の実測値と計算値との比較を示した。Mattock、竹本の提案式はPC鋼材量とコンクリートの圧縮強度により $\Delta\sigma_{pt}$ が算出されるため主鉄筋量にかかわらず $\Delta\sigma_{pt}$ の計算値はほぼ一定値を示している。Gifford、Bakerによる計算値は M_{max} 時のはり断面のひずみ分布からそれぞれ算出されるため、主鉄筋量が小さくなれば $\Delta\sigma_{pt}$ が大きく算出された。 $\Delta\sigma_{pt}$ の実測値は主鉄筋量が小さくなれば $\Delta\sigma_{pt}$ が大きくなる傾向にあったが、計算値においてもこの傾向が表れた。

図-4にPC鋼材の応力割合 σ_p / σ_{pt} と M/M_{max} との関係を示した。ここに、

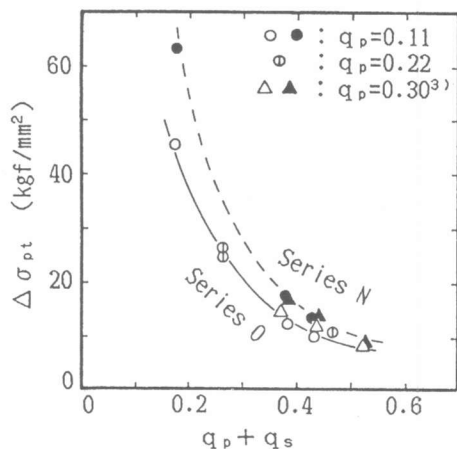


図-2 $\Delta\sigma_{pt}$ と($q_p + q_s$)との関係

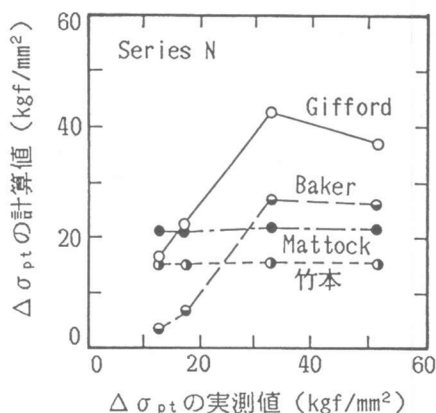


図-3 $\Delta\sigma_{pt}$ の実測値と計算値との比較

σ_p はPC鋼材の応力、 σ_{pt} はプレストレス導入時におけるPC鋼材の応力、 M は曲げモーメントである。本実験の場合、プレストレス導入後即荷重のため σ_{pt} は有効応力に等しい。図-4によれば、主鉄筋量の小さなタイプBの場合、はり降伏時の σ_p / σ_{pt} はシリーズO、Nともに同様な値1.27を示した。 M_{max} 時の σ_p / σ_{pt} はシリーズOで2.47、シリーズNで2.90となり、アウトケーブルを用いたシリーズOの σ_p / σ_{pt} は従来工法のシリーズNと比較して15%の減少を示した。これは、前節で述べたように主鉄筋量の小さなはり降伏から M_{max} まで大きな変形が生じるために(図-5参照)、はり断面の図心位置から中間支持のないアウトケーブルまでの偏心距離が小さくなることに起因していると思われる。

3-3 変形状

図-5、図-6に変形曲線を示した。図-5によれば、主鉄筋量が小さい程大きな変形能力が得られた。シリーズOの $M_{max}/bd^2\sigma_{cy}$ はシリーズNと比較してタイプDでは6%、タイプAでは11%の減少となり、主鉄筋量が小さい程減少割合は大きくなった。次に図-6によれば、各タイプともに導入プレストレス力が増加すれば M_{max} は増加するが変形能力は低下する傾向にあった。導入プレストレス力を増加させた場合タイプAの $M_{max}/bd^2\sigma_{cy}$ は1.28倍、タイプCでは1.06倍の増加となった。

次にエネルギーの比較を表-6に示した。表中のエネルギー U は曲げモーメントとスパン中央のたわみからその囲む面積として求め、 U_{max} と U_y とはそれぞれ M_{max} 時ならびにはり降伏時におけるエネルギーである。 Pt は導入プレストレス力である。表-6によれば、シリーズOの U_{max} / U_y はシリーズNと比較して各タイプともに減少する傾向を示している。 q_s の小さなタイプAの場合において、0A88-2の U_{max} / U_y は0A88-1の

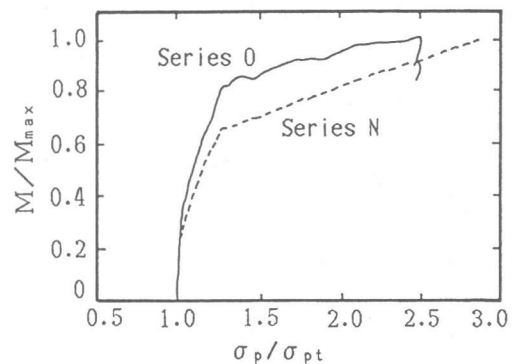


図-4 M/M_{max} と σ_p / σ_{pt} との関係 (タイプBの場合)

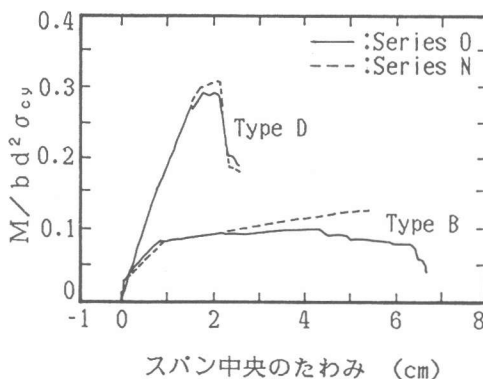


図-5 変形曲線 (アウトケーブルと従来工法との比較)

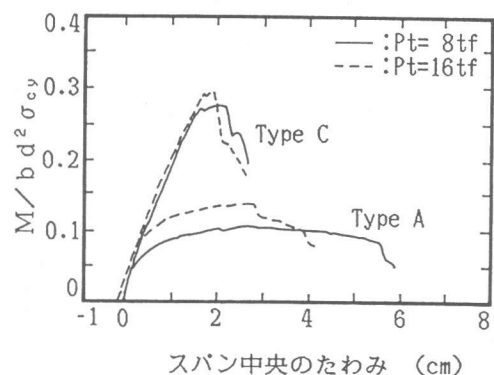


図-6 変形曲線 (導入プレストレス力による比較)

表-6 エネルギーの比較

Series	Specimen	q_s	q_p	P_t (tf)	U_y	U_{max}	U_{max}/U_y
N	NA88-1	0.043	0.111	8.17	17.06	173.1	10.15
	NB88-1	0.064	0.110	4.43	14.90	151.5	10.17
	NC88-1	0.270	0.113	8.22	66.65	122.9	1.84
	ND88-1	0.328	0.112	8.06	81.39	112.5	1.38
O	OA88-1	0.043	0.219	8.29	11.40	66.4	5.82
	OB88-1	0.065	0.111	4.14	13.48	109.1	8.10
	OC88-1	0.266	0.111	8.18	68.76	105.7	1.54
	OD88-1	0.322	0.110	8.16	85.28	109.2	1.28
	OA88-2	0.043	0.219	16.18	22.13	87.5	3.95
	OC88-2	0.256	0.216	16.29	79.94	110.2	1.38

U_y 、 U_{max} の単位は $\times 10 \text{tf} \cdot \text{cm}^2$ である。

0.64倍となり、導入プレストレス力が増加すれば U_{max}/U_y は大きく減少した。

4. まとめ

アウトケーブルの中間支持のない PRC ばりと従来工法の PRC ばりとの静的曲げ載荷実験を行ない、本実験の範囲内で得られた結果をまとめると次の通りである。

(1) PC 鋼材量の増加あるいは導入プレストレス力の増加により、PRC ばりの M_{max} が増加し、変形能力が低下する傾向にある。この傾向は主鉄筋量が少ないほど著しく表れる。

(2) PC 鋼材量が少ない場合、主鉄筋量を少なくすればはりのたわみが大きくなるため、アウトケーブルを用いた PRC ばりの M_{max} は従来工法と比較して大きく減少する。

以上により、PC 鋼材量、主鉄筋量ならびに導入プレストレス力が少ない程、中間支持のないアウトケーブルを用いた PRC ばりの M_{max} は、従来工法と比較して減少割合が大きくなるものと考えられる。

最後に、本実験の実施にあたり日本大学理工学部土木材料研究室ならびに構造工学第2研究室の関係者各位に感謝致します。特に、図表の整理に協力してくれた宮川潔君に感謝致します。

<参考文献>

- 1) 第14回フレッシュー技士海外研修団：プレストレストコンクリートにおける補修・補強例と損傷対策、プレストレストコンクリート、Vol.25、No.5、1983、pp.41-48
- 2) 猪俣俊司：PC橋設計・施工上の発展、プレストレストコンクリート、Vol.25、No.1、1983 pp.8-16
- 3) Yaginuma, Y. and Kitada, Y. : Mechanical Behavior of Partially Prestressed Concrete Beams with Exterior Cables, Transactions of the JCI, Vol.9, 1987, pp.351-358
- 4) Mattock, A.H., Yamazaki, J. and Kattulla, B.T. : Comparative Study of Prestressed Concrete Beams, with and without Bond, J. of ACI, Vol.68, No.2, 1972, pp.116-125
- 5) 宮本征夫、岩崎岩雄：アンボンド PC 部材の静的曲げ強度、鉄道技術研究所報告、No.826、1973、pp.1-24
- 6) 建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（III種PC）構造設計・施工指針・同解説、1986
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、1986