

論文

[2154] アンボンド PC はり部材の耐荷特性に関する一考察

政氏信之\*1 · 小林和夫\*2 · 仁枝 保\*3

1. はじめに

本研究では、PC鋼材量と一部にコンクリート強度も要因としたアンボンドPC単純はり部材の最大耐力、終局域のPC鋼材応力、フォーリングブランチ領域を含めた変形特性などの耐荷特性を、特に荷重条件を変化させて検討し、同時にその耐荷特性を同一条件のボンドはりとも比較した。荷重条件としては、①異なる荷重荷重位置で破壊まで漸増荷重する形式と②高荷重レベルまで前荷重した後に除荷し、新たに異なった荷重位置で破壊まで漸増荷重する形式を選定した。

2. 試験概要

2-1 Aシリーズ供試体

Aシリーズは、荷重荷重位置すなわち曲げモーメント分布形が異なる状態でのアンボンドPCはりの耐荷特性を調べることを目的としたものである。供試体は図-1、図-2(1)に示す幅x高さx全長=15x20x200cm(スパンL=170cm)と10x16x330cm(スパンL=300cm)の長方形断面単純はりとし、次の要因を選定した。

①PC鋼材量・付着の有無：PC鋼棒(神鋼鋼線工業社製のC種1号-φ13、φ17)とスパイラルシースとの間にセメントペーストグラウトを注入したボンドタイプ(Bタイプ)および同様のPC鋼棒をグリース充填プラスチックシースで被覆したアンボンドタイプ(Uタイプ)の2タイプとした。注入グラウトは高性能減水剤ポゾリスGF-700を用いW/C=35%(早強セメント)としたが、はり荷重試験時の圧縮強度は平均約400kgf/cm<sup>2</sup>であった。

②コンクリート強度： $f'_{ck} = 400\text{kgf/cm}^2$ としたが、一部に $f'_{ck} = 700\text{kgf/cm}^2$ のもの(NMB社製の高性能減水剤レオビルドNL-4000使用)も作製した。はり荷重試験時の実圧縮強度の平均値は、それぞれ430、720kgf/cm<sup>2</sup>であった。

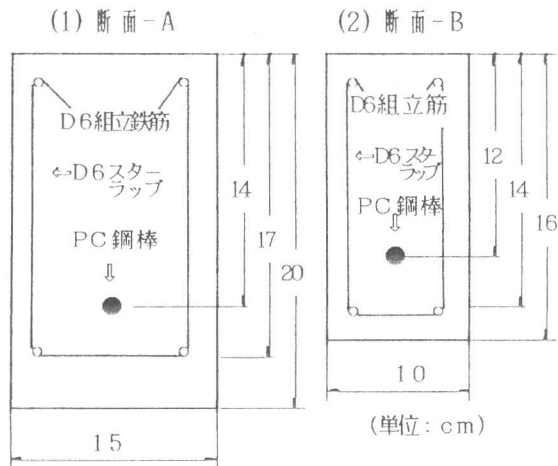


図-1 供試体断面

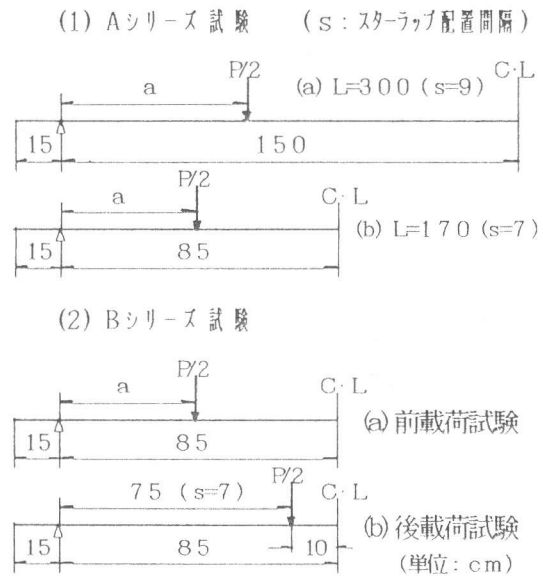


図-2 荷重試験方法

\*1 大成建設(株), 工修(正会員)

\*2 大阪工業大学教授 工学部土木工学科, 工博(正会員)

\*3 大阪工業大学講師 工学部土木工学科, (正会員)

③荷重載荷位置：図-2(1)において、スパンL=300cmの場合にはせん断スパン長a=50, 100, 140cmの3レベルとし、L=170cmの場合はa=40, 75cmの2レベルとした。

### 2・2 Bシリーズ供試体

Bシリーズでは、高荷重レベルでの前載荷によって著しい曲げひびわれ等の損傷を受けたアンボンドPCはりの耐荷特性を損傷のないもの（前載荷無）と比較する。供試体は、図-1, 図-2(2)に示すような幅x高さx全長=15x20x200cm(L=170cm)の長方形断面単純はりであり、次の要因を選定した。

①PC鋼材断面積・付着の有無：Aシリーズと同様のPC鋼棒φ13, φ17を使用し、アンボンドタイプとボンドタイプの2タイプとした。

②前載荷の有無：図-2(2)において、せん断スパン長a=35, 50cmで前載荷した後に完全除荷し、新たにa=75cmで破壊まで単調漸増載荷したものと、前載荷無で直接a=75cmで破壊まで単調漸増載荷したものの2種類とした。前載荷荷重は、各せん断スパン長に対応する最大曲げモーメントが終局抵抗曲げモーメント（ボンドタイプ計算値）の75%に等しい大きさとした。

A, BシリーズのすべてのはりのPC鋼材緊張応力はその実降伏強度 $f_{pv}$ の60%とした。アンボンドはりでは、プレストレス導入後に直ちに載荷試験を実施したので、有効プレストレスは緊張応力に等しい。ボンドタイプでもプレストレス導入後約1週間で載荷試験を実施したため、この場合も有効プレストレス力は近似的に導入時緊張力に等しいとみなすことができる。なお、スタップの間隔は図-2に示すとおりである。

A, Bシリーズ供試体を一括し表-1, 2に示す。

### 2・3 載荷試験

図-2のように、A, Bシリーズとも対称2点集中荷重方式とし、スパン中央と両支点位置の鉛直変位、上下縁コンクリートひずみ、PC鋼材応力（ボンドはり：スパン中央部のPC鋼棒に貼布した2枚の検長3mmストレインゲージのひずみ測定値から鋼棒の応力-ひずみ関係を用いて算出、アンボンドはり：図-3に示すようにはり両端部に設置したロードセルによる）を計測した。なお、Bシリーズの前載荷試験終了時におけるひびわれ発生状況例を図-4に示す。

表-1 Aシリーズ供試体

はり記号	寸法 図-2 (1)	載荷位置 a (cm)	PC鋼材		コンクリート強 度
			A <sub>p</sub>	付着	
A 1 A 2 A 3	スパン L=300 cm	50	φ13 (*1)	U	f' <sub>ck</sub> =400
		100		U	
		140		U	
A 4 A 5 A 6	断面 -B	50	φ13 (*1)	B	f' <sub>ck</sub> =400
		100		B	
		140		B	
A 7 A 8	スパン L=170 cm	40	φ13 (*2)	U	f' <sub>ck</sub> =400
		75		B	
A 9 A 10		40		B	
A 11 A 12	断面 -A	40	φ17 (*3)	U	f' <sub>ck</sub> =700
		75		B	
A 13 A 14		40		B	
A 15 A 16	断面 -A	75	φ17 (*3)	U	f' <sub>ck</sub> =700
		75		U	

\*1)  $f_{pv}=123\text{kgf/mm}^2$  \*2)  $f_{pv}=145\text{kgf/mm}^2$   
\*3)  $f_{pv}=126\text{kgf/mm}^2$

表-2 Bシリーズ供試体

はり記号	PC鋼材		前載荷の有無 (a:cm)	備考
	A <sub>p</sub>	付着		
B 1 B 2 B 3	φ13 (*1)	U	無 有 (a=35) 有 (a=50)	載荷参照 図-2
		U		
		U		
B 4 B 5 B 6	φ17 (*2)	U	無 有 (a=35) 有 (a=50)	断面-A L=170cm
		U		
		U		
B 7 B 8 B 9	φ17 (*2)	B	無 有 (a=35) 有 (a=50)	f' <sub>ck</sub> =400
		B		
		B		

\*1)  $f_{pv}=142\text{kgf/mm}^2$  \*2)  $f_{pv}=117\text{kgf/mm}^2$

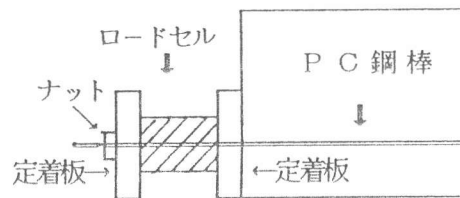


図-3 アンボンドタイプ

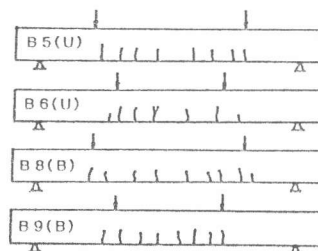


図-4 前載荷終了時のひびわれ

### 3. 結果と考察

#### 3.1 Aシリーズ

最大荷重とその時のPC鋼材応力を表-3に示す。また、荷重-PC鋼材応力、たわみ関係を図-6~9、図-10~12に示す。各々併記の計算値は構成材料の応力-ひずみ関係を図-5のように仮定し、アンボンドはりでは、部材全長におけるPC鋼材の伸びとその位置でのコンクリートの伸びが等しいという変形適合条件[1]を考慮し算定した。解析は部材の最大耐力以降も含めて行った。

コンクリートの応力-ひずみ関係として、Parkら[2]による提案モデル(MODEL-1)とSheikh[3]の指摘する断面内のひずみ勾配の影響を考慮し、応力が最大値 $f'_c$ に達すると、 $\Delta\epsilon_o$ のひずみ量の区間はその最大応力が維持されると仮定したモデル(MODEL-2)の2種類を用いた。ここでは大略値として $\Delta\epsilon_o=1500\mu$ としたが、これは土木学会コンクリート標準示方書式での $\epsilon'_{cu}=3500\mu$ 点の後にParkらの応力下降域を連結したものに相当する。

PC鋼材にはBlakeley[4]のモデル式を用いた。

#### (1) 耐力

荷重載荷位置に関係な

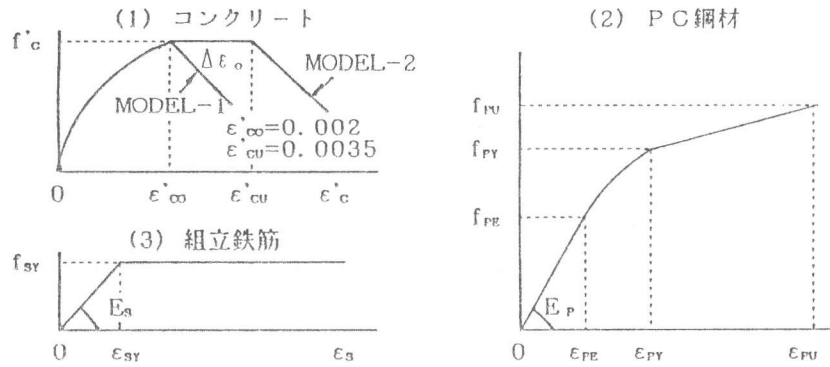


図-5 構成材料の応力-ひずみ関係モデル

表-3 Aシリーズ 載荷試験結果

はり 記号	最大荷重時鋼材応力				最大耐力							
	実験値 $\sigma_{pu}$	実験値 $\Delta\sigma_{pu}$	計算値*1		実験値		計算値 *1					
			$\Delta\sigma_{pu1}$	$\Delta\sigma_{pu2}$	$P_u$ (tf)	$M_u$ *2 (tf·cm)	$P_{u1}$ (tf)	$P_u$ $P_{u1}$	$P_{u2}$ (tf)	$P_u$ $P_{u2}$		
A 1	9630	2230	4080	4500	5.45	136.3 (1.00)	6.23	0.87	6.48	0.84		
A 2	9910	2540	3190	4080	2.72	136.0 (1.00)	2.92	0.93	3.17	0.86		
A 3	9620	2230	1340	1960	1.77	123.9 (0.91)	1.77	1.00	1.89	0.94		
A 4	12240	4810	4720	4880	8.10	202.5 (1.00)	6.49	1.25	6.71	1.21		
A 5	12300	4900	4690	4900	3.86	193.0 (0.95)	3.21	1.20	3.32	1.16		
A 6	12150	4680	4090	4840	2.49	174.3 (0.86)	2.17	1.15	2.33	1.07		
A 7	13420	4640	4590	5200	14.98	299.6 (1.00)	13.40	1.12	14.00	1.07		
A 8	12400	3660	1750	3190	7.75	290.6 (0.97)	6.11	1.27	6.59	1.18		
A 9	14530	5670	5640	5700	16.12	322.4 (1.00)	14.33	1.12	14.57	1.11		
A 10	13700	4750	5680	5740	8.10	303.8 (0.94)	7.64	1.06	7.77	1.04		
A 11	11270	4030	3380	4000	20.55	411.0 (1.00)	16.78	1.22	17.73	1.16		
A 12	9670	2390	1330	1950	9.36	351.0 (0.85)	7.73	1.21	8.22	1.14		
A 13	11910	4600	4360	4740	21.17	423.4 (1.00)	17.88	1.18	18.69	1.13		
A 14	11240	3880	4240	4700	9.79	367.1 (0.87)	9.28	1.05	9.82	1.00		
A 15	11820	4580	4220	4770	22.83	456.6 (1.00)	18.95	1.20	19.87	1.15		
A 16	11480	4160	2150	2970	11.32	424.5 (0.93)	8.76	1.29	9.43	1.20		

\*1) 計算値の添字 "1", "2" はそれぞれコンクリートに[MODEL-1], [MODEL-2]を適用  
\*2)  $P_u$ に対応する最大曲げモーメントの値 \*3) ( )内の値は、A1~A6では $a=50\text{cm}$ の $M_u$ を1.00、A7~A16では、 $a=40\text{cm}$ の $M_u$ を1.00とした相対値

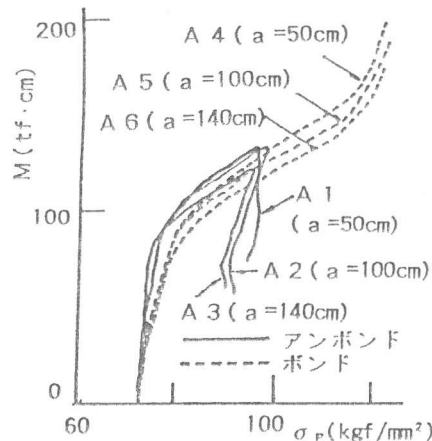


図-6 M- $\sigma_p$

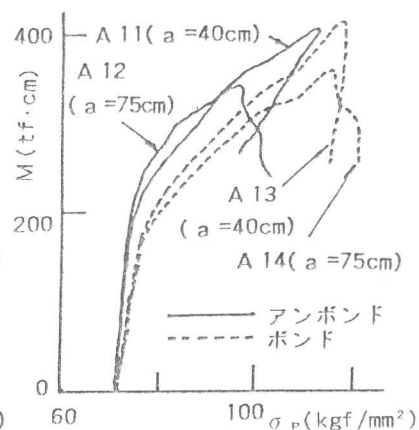


図-7 M- $\sigma_p$

く全て曲げスパン内で曲げ破壊した。破壊性状はP C鋼材付着の有無で顕著な差はなく、せん断スパン長(a)が短いほどコンクリート圧壊が急激に生じ脆性的性状を呈した。

表-3の計算値には最大耐力の曲げモーメント表示は省略したが、アンボンドはりのその実験値 $M_u$ は計算結果と同様にa値が増大すると減少する様相がみられる。これは鋼材量が多いほど顕著である(L=170cm)。アンボンドはりでは部材全長でのP C鋼材とコンクリートの伸びが等しいという条件下で挙動するので、最大抵抗曲げモーメントは荷重載荷位置(モーメント分布形)に影響されると考えられる。しかし本実験ではボンドはりでも同様で、この場合の理由は明確でなくさらにデータの蓄積が必要である。アンボンドでは、高強度コンクリートの使用により最大耐力が10~20%増大し、載荷位置の影響は普通強度のものに比べ多少小さい。

スパン・有効高さ比(L/d<sub>p</sub>)が増加すると、アンボンドはりの最大曲げ耐力の低下が顕著となり、L/d<sub>p</sub>=25(L=300cm)の場合は荷重の載荷位置に関係なくアンボンドはりの曲げ耐力はボンドタイプより約30%低下している。

全体的に最大耐力の計算値は、コンクリートにMODEL-1を用いた場合よりMODEL-2の方が実験値とよく一致する。なお、コンクリートの応力-ひずみモデルの相違が曲げ耐力算定値に与える影響はアンボンドタイプの方が大きい。

## (2) P C鋼材応力

図-6、7の曲げスパン内の曲げモーメント-P C鋼材応力(M- $\sigma_p$ )関係から、曲げひびわれ発生後の荷重域ではアンボンドはりの鋼材応力はボンドはりに比べて次第に小さくなり、最大耐力時にはかなり大きな差が認められる。

最大耐力時におけるP C鋼材応力増分に及ぼす荷重載荷位置の影響は、L/d<sub>p</sub>比で著しく異なっている。L/d<sub>p</sub>=12(L=170cm)の場合、アンボンドタイプにおいて特にその影響が顕著で、せん断スパンが長くなると最大耐力時の鋼材応力増分が小さくなる(表-3、図-7)。これに対して、L/d<sub>p</sub>=25(L=300cm)の場合、ボンドタイプと同様、アンボンドタイプでも最大耐力時の鋼材応力増分に対する載荷位置の影響はほとんどみられない(表-3、図-6)。また、 $f'_{ck}=700\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートを使用したアンボンドはりでは $f'_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ に比べ最大耐力時の鋼材応力増分の増大が著しい(表-3、図-8)。

図-9、表-3に示すように、ボンドはりでは断面でのひずみ適合条件を、一方アンボンドはりでは部材全長に対

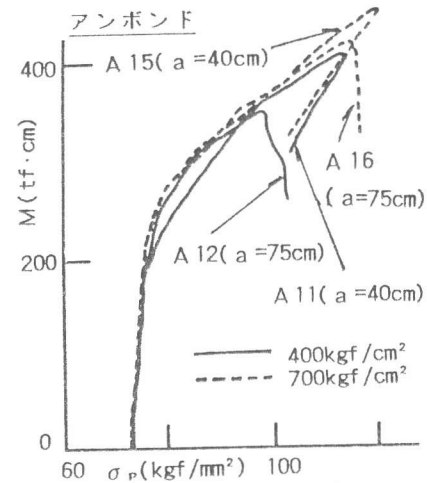


図-8 M- $\sigma_p$

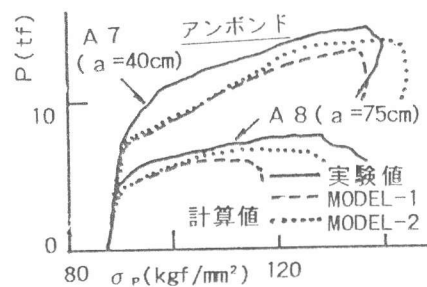


図-9 P- $\sigma_p$

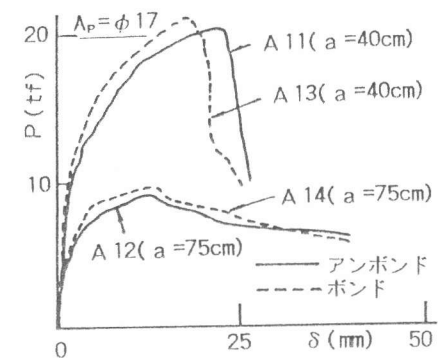


図-10 P- $\delta$

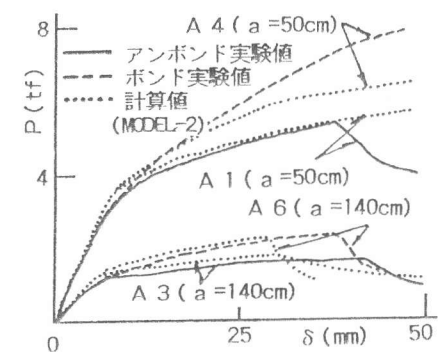


図-11 P- $\delta$

する変形適合条件を考慮することにより終局荷重域までのP- $\sigma_p$ 曲線や最大耐力時のPC鋼材応力・応力増分をかなりよく推定できる。なお、本解析結果では、コンクリートの応力-ひずみ関係にMODEL-1を用いた計算値は実験値に比べ全体的にみて小さく、MODEL-2の方が適合性がよい。

### (3) 荷重-たわみ関係

図-10, 11のように、 $L/d_p$ の大小に関係なく、最大荷重に至るまでアンボンドはりはボンドはりに比べて部材剛性が若干小さい。最大耐力以降のフォーリングブランチ域のP- $\delta$ 曲線の低下勾配は両者で顕著な差はみられず、せん断スパンの短いほど急激で脆性的性状を示す。

図-11, 12のように、アンボンドはりのたわみ計算値は、荷重載荷位置に関係なく、フォーリングブランチ域も含めて実験値と比較的よく一致している。なお、一般的にコンクリートにMODEL-2を用いた方がMODEL-1よりフォーリングブランチ域も含めたP- $\delta$ 関係の実挙動をよく推定できた。

### 3.2 Bシリーズ

後載荷試験時の最大荷重、その時のPC鋼材応力と上記方法による計算値を表-4に示す。図-13, 14, 図-15, 16にP- $\sigma_p$ , P- $\delta$ 関係を示す。

#### (1) 耐荷力

すべて最終的に曲げスパン内で曲げ破壊した。

表-4のように、ボンドはりと同様、アンボンドはりでも、終局抵抗曲げモーメントの75%に相当するかなり高い荷重レベルで、しかも後載荷時と著しく異なる短いせん断スパン長で前載荷して広領域に曲げひびわれ(図-4)を導入した後においても、前載荷無のものと同等の最大曲げ耐力を保有している。

#### (2) PC鋼材応力

鋼材付着の有無に関係なく、前載荷を受けると早期にひびわれが再開し始めるため初期の鋼

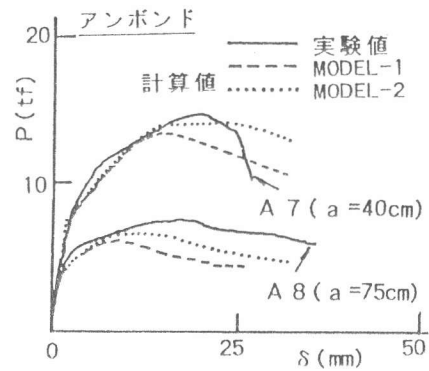


図-12 P- $\delta$

表-4 Bシリーズ 載荷試験結果

はり 記号	最大荷重時鋼材応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )				最大荷重				
	応力 実験値	応力増分			計算値 *1				
		実験値	計算値 *1	計算値 *1	P <sub>u</sub> *2	P <sub>u1</sub>	P <sub>u</sub>	P <sub>u2</sub>	P <sub>u</sub>
	$\sigma_{pu}$	$\Delta\sigma_{pu}$	$\Delta\sigma_{pu1}$	$\Delta\sigma_{pu2}$	(tf)	(tf)	P <sub>u1</sub> (tf)	P <sub>u2</sub> (tf)	P <sub>u2</sub>
B 1	11930	3350	1940	2900	6.01(1.00)	6.10	0.99	6.56	0.92
B 2	12330	3810	1940	2960	6.31(1.05)	6.06	1.04	6.54	0.96
B 3	11840	3300	1940	2960	6.00(1.00)	6.04	0.99	6.52	0.92
B 4	9590	2490	1540	2360	8.81(1.00)	7.77	1.13	8.39	1.05
B 5	9440	2390	1540	2360	9.08(1.03)	7.74	1.17	8.36	1.09
B 6	9830	2810	1540	2360	8.81(1.00)	7.72	1.14	8.34	1.06
B 7	11320	4200	4200	4620	8.78(1.00)	9.21	0.95	9.67	0.91
B 8	11230	4130	4300	4630	10.04(1.14)	9.21	1.09	9.67	1.04
B 9	11630	4540	4310	4650	10.31(1.17)	9.21	1.12	9.67	1.07

\*1) 計算値の添字 "1", "2" はそれぞれコンクリートに[MODEL-1], [MODEL-2]を適用

\*2) ( ) の値は、前載荷の無い場合のP<sub>u</sub> 値を1.00 とした相対値

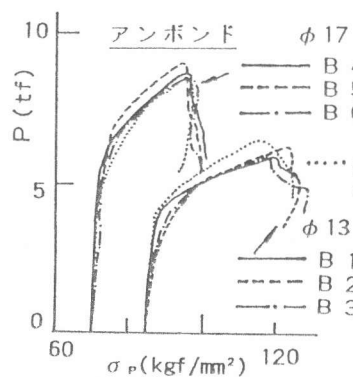


図-13 P- $\sigma_p$

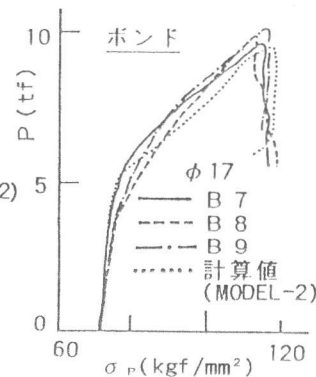


図-14 P- $\sigma_p$

材応力は多少大きくなる。しかし、前載荷の影響は次第に小さくなり、最大耐力時の鋼材応力やそれ以降の $P-\sigma_p$ 曲線への前載荷の影響はみられない(表-4、図-13,14)。

Aシリーズと同様、ボンドはりに比べアンボンドはりは荷重の増大にともなう鋼材応力の増加量がかなり小さい。

### (3) 荷重-たわみ

前載荷を受けたアンボンドはりは、受けないものに比べひびわれの早期開口により初期のたわみが増大し部材剛性が低下するが、本実験範囲内では前載荷時のせん断スパン長の影響は明確でない。前載荷の初期剛性への影響度は鋼材付着の有無で明瞭な差はなかった。また、アンボンド、ボンドはりの最大耐力時のたわみやそれ以降の $P-\delta$ 曲線の低下勾配へも前載荷の影響はみられない(図-15,16)。

表-4、図-13~16のように、Aシリーズの場合と同様に、コンクリートに対してMODEL-2を用いた最大耐力やその時のPC鋼材応力、 $P-\sigma_p$ 曲線、フォーリングブランチ域を含めた $P-\delta$ 曲線の計算値は、アンボンド、ボンドタイプのいずれの場合も実験値とかなりよく一致している。

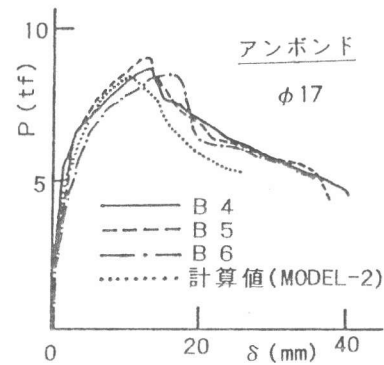


図-15 P-δ

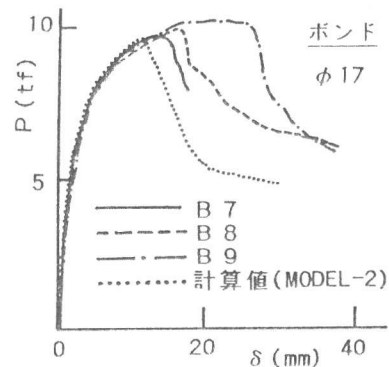


図-16 P-δ

## 4. 結論

- (1) スパン・有効高比( $L/d_p$ )が同じ時、計算結果と同様にせん断スパンが長くなるとアンボンドはりの最大抵抗モーメントは減少する。ボンドはりも同様であったが、この理由は明確でなくデータの蓄積を要する。アンボンドはりの最大耐力の低下は $L/d_p$ が大きいほど顕著である。
- (2) 最大抵抗曲げモーメント時のPC鋼材応力に及ぼす荷重載荷位置の影響度は $L/d_p$ 比で著しく異なり、その影響はアンボンドはりで $L/d_p$ 比が小さい場合に特に顕著に認められた。
- (3) アンボンドはりでは、 $f'_{ck}=700\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートの使用により最大曲げ耐力やその時のPC鋼材応力は $f'_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ の普通強度のものに比べかなり増大する。
- (4) アンボンドはりに終局抵抗モーメントの75%の高荷重を後載荷時と著しく異なる短いせん断スパン長で前載荷しても、最大曲げ耐力は低下しない。また、曲げひびわれの早期再開口によって初期のたわみや鋼材応力は多少増大するが、終局域ではその影響はみられない。
- (5) アンボンドはりでは、スパン全長の変形適合条件を考慮し、材料の応力-ひずみ関係を適切に設定することにより最大耐力以降を含めた曲げ耐荷特性をかなりよく推定できた。

### [参考文献]

- 1] 六車 照・渡辺史夫・西山峰広: アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol.26, No.1, Jan.1984
- 2] Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Inter.Pub., 1975
- 3] Sheikh, Shamimi A.: Confined Concrete Subjected to Axial and Bending Loads, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.V, 1984
- 4] Blakeley, Roger W.G. and Park, R.: Prestressed Concrete Sections with Cyclic Flexure, Jour. of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST-8, Aug.1973