

論文 アンボンド PC 連続はりの終局状態までの耐荷挙動に関する研究

永 卓司*1 · 小林 和夫*2 · 井上 晋*3 · 仁枝 保*4

要旨: PC鋼材量・配筋状態、横拘束筋の有無、荷重位置を要因としてアンボンドとボンドタイプの2スパンPC連続はりの荷重試験を行い、変形、鋼材応力、最大耐力、曲げひび割れ発生以降からの曲げモーメント再分配挙動などを両タイプで比較し、併せて繰返し計算法による非線形解析を実施して実験値と比較した。その結果、アンボンドタイプはボンドタイプに比べひび割れ以降のPC鋼材応力が小さく、最大耐力や剛性が低下すること、横拘束筋により靱性と同時に部材性状が改善されることなどが示された。

キーワード: アンボンドPC連続はり、曲げ耐荷挙動、モーメント再分配、非線形解析

1. はじめに

アンボンドとボンドタイプの2スパンPC連続はりでPC鋼材量や横拘束筋の有無を要因として荷重試験を実施して両者の曲げ耐荷特性を比較し、併せてその定量化について検討した。

2. 荷重試験概要

2.1 供試体の種類

供試体は、図-1のように幅x高さx全長=10x16x330cmの長方形断面の2スパン(2x145cm)PC連続はりで、PC鋼棒(φ9.2、φ13)を用いて断面の上下に対称または非対称配筋とした。

PC鋼棒は、グリース充填プラスチックシース被覆型のアンボンドタイプとメタル製スパイラルシース内にセメントペーストグラウト(W/C=35%、エヌエムビー社製の注入用高性能混和剤ポゾリスGF-700使用)を注入したボンドタイプの2種類とした。

PC鋼棒緊張応力は $0.6f_{py}$ (f_{py} は実降伏点でコンクリート実強度 f'_c と併せ表-1註に記載)とした。組立筋と横拘束筋D6は $f_{sy}=4170\text{kgf/cm}^2$ である。

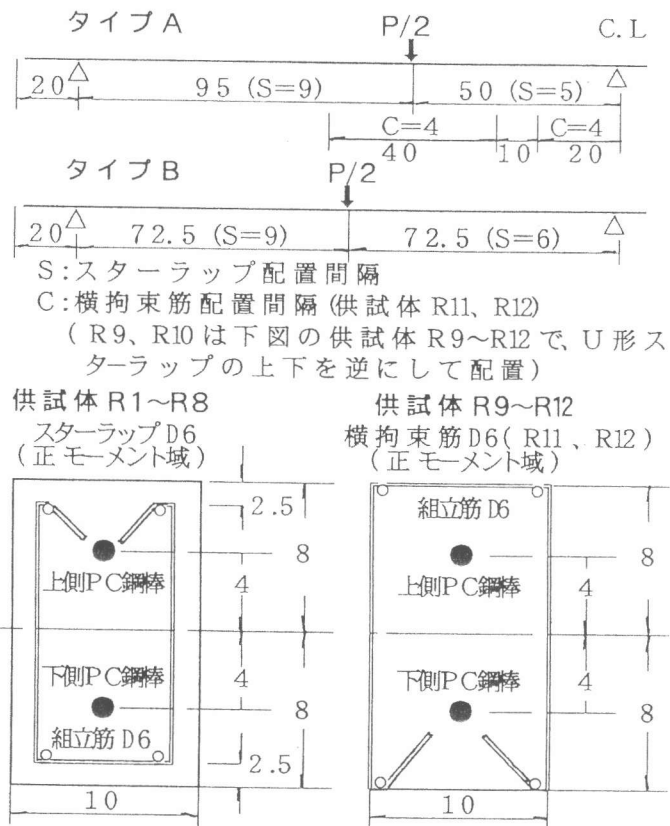


図-1 供試体寸法 (単位: cm)

- *1 (株)富士ピー・エス 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 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
- *4 大阪工業大学講師 工学部土木工学科、(正会員)

供試体種類を表-1に示す。

表-1のように、ここでは、端部フック付きU形スターラップ(D6鉄筋)の底部を断面の圧縮縁側にして配置したものを横拘束筋、底部を引張縁側にして配置したものを非拘束筋(せん断補強筋としてのみ作用)とし、横拘束筋を荷重点正モーメント域と中間支点負モーメント域に4cm間隔(拘束筋体積比 $\rho_v=2.5\%$)で配置したもの(R11, R12)とこれらと比較用に非拘束筋として同様に配置したもの(R9, R10:各々R1, R2とPC鋼材配筋は同じであるが、R11, R12と同一条件で別途作製)も選定し、横拘束筋の影響を検討した。なお、供試体の断面寸法が小さいので、横拘束筋に対するかぶりコンクリートの存在とその寸法効果の影響を除去するため、R11, R12および比較用のR9, R10では図-1のように各断面縁に対するかぶり厚が0となるように横拘束筋(U形スターラップ)を配置した。

2.2 荷重試験方法

荷重は左右スパン各1点の対

称集中荷重とした。アンボンドはりの鋼材応力やモーメント再分配に及ぼす荷重点位置の影響を調べるため図-1のように端支点~荷重点間の距離を95cm(タイプA)、72.5cm(タイプB)の2種類を設定した。コンクリート全断面を有効とした弾性理論による中間支点と荷重点モーメントの比はタイプA, Bで各々1.81, 1.20である。曲げひび割れ発生後の荷重レベルから始まるモーメントの再分配挙動を調べるため、3支点位置にロードセルを設置し支点反力を測定した(図-2)。

ボンドはりでは上側PC鋼棒の中間支点、下側PC鋼棒の荷重点位置に貼付したひずみゲージ(ゲージ長3mm)で鋼棒ひずみ(応力-ひずみ関係の試験値より応力に換算)を測定した。アンボンドはりでは、はり片端で2枚の定着板間にロードセルを挿入した状態でPC鋼棒をナット定着し、鋼棒作用力を直接測定した。また、変位計で各はりの左右スパン中央位置のたわみを測定した。タイプA荷重のたわみは塑性ヒンジ位置でクリティカルな荷重点直下で測定する方が望ましく、荷重点直下のたわみと計算上10%程度の差があったが、ここではスパン中央の測定値を基に検討した。

表-1 供試体種類および曲げひび割れ発生荷重と本数

はり種類 *1)	鋼材付着 *2)	P C 鋼材	荷重位置 *3)	拘束筋 ρ_v (%)	荷重点下 *4)			中間支点上		
					実験値	計算値	本数 *5)	実験値	計算値	本数 *6)
					P_{CRB} (tf)	P'_{CRB} (tf)		P_{CRA} (tf)	P'_{CRA} (tf)	
R1	U	上側 $\phi 9.2$	タイプA	0	6.20	7.00	9	4.40	3.78	5
R2	B				7.80	7.09	12	4.50	3.98	6
R3	U	下側 $\phi 9.2$	タイプB		4.90	4.38	8	4.80	3.69	5
R4	B				4.80	4.49	10	4.20	3.78	7
R5	U	上側 $\phi 13$	タイプA	0	7.80	6.26	9	6.40	5.84	6
R6	B				8.60	6.32	12	6.10	6.27	7
R7	U	下側 $\phi 9.2$	タイプB		4.90	4.14	9	6.40	5.90	6
R8	B				4.80	4.31	13	5.70	6.26	7
R9	U	上側 $\phi 9.2$	タイプA	0	6.60	7.47	5	3.80	4.15	3
R10	B			0	7.00	8.30	9	5.20	4.53	5
R11	U	下側 $\phi 9.2$		2.5	7.10	7.46	6	4.70	4.13	4
R12	B			2.5	9.20	8.34	9	4.70	4.55	7

- *1) R1~R4: $f'_c=380$ Kgf/cm², $\phi 9.2$ ($f_{pv}=143$ kgf/mm²)
R5~R8: $f'_c=432$ Kgf/cm², $\phi 9.2$ ($f_{pv}=143$ kgf/mm²), $\phi 13$ ($f_{pv}=123$ kgf/mm²)
R9~R12: $f'_c=522$ Kgf/cm², $\phi 9.2$ ($f_{pv}=143$ kgf/mm²)
*2) U:アンボンドタイプ, B:ボンドタイプ *3) 図-1 参照
*4) ひび割れ発生荷重の実験値は左右スパンでの平均値
*5) 正モーメント領域での曲げひび割れ発生本数の合計
*6) 負モーメント領域での曲げひび割れ発生本数

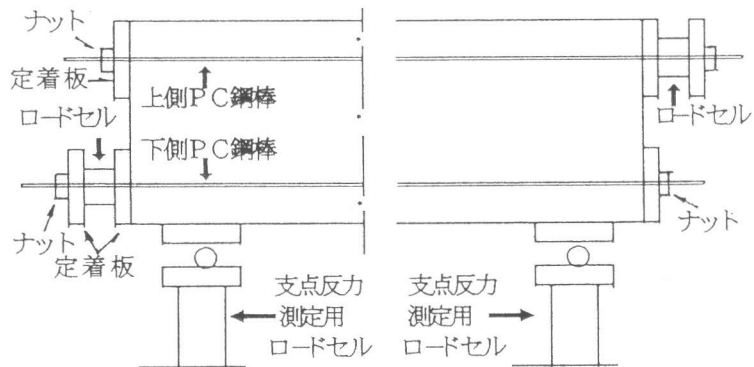


図-2 アンボンドタイプのPC鋼棒応力と支点反力の測定

3. 結果と考察

3.1 結果と解析方法

表-1、2に曲げひび割れ荷重、最大荷重、さらに図-4、5に荷重-スパン中央たわみ、図-6、7に荷重-下側PC鋼棒応力、図-8~10に荷重-中間支点、載荷点モーメント（実験値：支点反力測定値による）関係の例を示す。併記の各計算値は、各材料特性の実測値を基に算出した。

表-1の曲げひび割れ荷重計算値は、中間支点と載荷点モーメントの弾性計算値がひび割れ抵抗モーメントの計算値（弾性理論による全断面有効時の縁引張応力がコンクリート曲げ強度（実測値）に等しくなる時の値）に達した時の荷重を表す。

表-2の最大荷重の計算値 P'_u は中間支点断面(A)と載荷点断面(B)に塑性ヒンジを仮定し、次式の極限解析法から算定した値である。

$$P'_u = 2 [M_{uA}(1/b) + M_{uB}(1/a+1/b)] \quad (1)$$

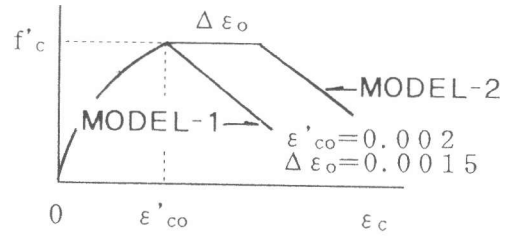
ここに、 M_{uA} 、 M_{uB} ：それぞれA、B断面の終局最大モーメントの計算値

a、b：それぞれ載荷点と端支点の距離、
載荷点と中間支点の距離

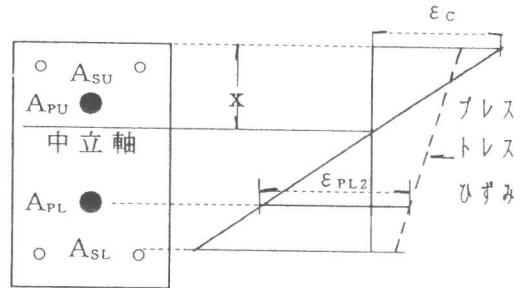
式(1)の計算も含めて下記の非線形解析では、応力-ひずみ関係としPC鋼材にはBlakeley[1]のモデル、組立筋(D6:計算に考慮)にはパイリニアモデルを用いた。一方、コンクリートの応力-ひずみには、図-3(1)に示すParkら[2]のモデル(MODEL-1)とSheikh[3]の指摘する断面内ひずみ勾配の影響を考慮し、応力が最大値 f'_c に達すると $\Delta\varepsilon_o$ の区間は f'_c が維持されたとしたモデル(MODEL-2)を用いた。大略値とし $\Delta\varepsilon_o=1500\mu$ としたが、これは土木学会示方書のモデルで $\varepsilon'_{co}=3500\mu$ の後にParkらの応力下降域を連結したものに相当する。

まず、断面解析で曲げモーメント-曲率($M-\phi$)関係を求めた。この際、PC鋼材変形適合係数 β をポンドはりは $\beta=1.0$ 、アンポンドはりは先の研究[4]を参考に近似的に $\beta=0.2$ とした(図-3(2))。

次に、静定基本系に中間支点で切断した単純はりを選定し、任意荷重Pに対し中間支点モーメント M_A を仮定しスパンの曲げモーメント分布 M_x を求め、対応する曲率 ϕ_x を $M-\phi$ 関係から定める。曲率



(1) コンクリートの応力-ひずみ



例えば：鋼材 A_{PL} の総ひずみ $\varepsilon_{PL} = \varepsilon_{PL1} + \beta \cdot \varepsilon_{PL2}$
 ε_{PL1} ：鋼材の有効張力によるひずみ
 ε_{PL2} ：荷重によるコンクリートひずみ
 β ：PC鋼材に対する変形適合係数

(2) ひずみ分布

図-3 断面解析

表-2 最大荷重の実験値と計算値

はり種類	実験値 P_u (tf)	計算値 (MODEL-1)		計算値 (MODEL-2)	
		*) P'_u (tf)	$\frac{P_u}{P'_u}$	*) P'_u (tf)	$\frac{P_u}{P'_u}$
R 1	14.03	11.64	1.21	12.60	1.11
R 2	17.40	13.54	1.29	14.33	1.21
R 3	11.29	9.55	1.18	10.34	1.09
R 4	13.52	11.10	1.22	11.73	1.15
R 5	16.55	13.21	1.25	14.48	1.14
R 6	18.78	15.18	1.24	16.71	1.12
R 7	12.78	10.67	1.20	11.69	1.09
R 8	14.58	12.27	1.19	13.48	1.08
R 9	15.58	13.96	1.12	15.52	1.00
R 10	17.84	16.10	1.11	16.74	1.07
R 11	17.38	16.41	1.06	16.48	1.05
R 12	18.49	16.82	1.10	16.89	1.09

*) PC鋼材の変形適合係数をポンドタイプ： $\beta=1.0$ 、アンポンドタイプ： $\beta=0.2$ として算定した値

分布より、弾性荷重法で中間支点位置のたわみ角 θ を求め、連続条件（本供試体は左右スパン対称： $\theta=0$ ）が満足されるまで M_A を仮定し直し、計算を繰り返す。中間支点または載荷点モーメントが M_{UA} 、 M_{UB} に到達後は最大荷重の計算値まで一定とした。以上より各荷重階の M_x 分布が求まると、断面解析結果より諸量が算定できる。

3.2 考察

(1) 曲げひび割れ発生および最大耐力

表-1のように、曲げひび割れ発生荷重の実験値(引張ひずみ測定値より推定)はバラツキがあるが、計算値と大略一致している。

PC鋼材付着の有無で曲げひび割れの分散性状に差がみられたが(表-1)、最終的にはいずれも中間支点と載荷点部でコンクリートが圧壊し曲げ破壊した。横拘束筋を配置したものは韧性に富んだ破壊性状を示した。

本供試体は極限解析法で算定($\beta=1.0$)した最大荷重時せん断力に対して安全なように土木学会示方書式でせん断補強したが、PC鋼材付着の有無に関係なく、終局時までせん断ひび割れの著しい進展はみられなかった。

表-2から、最大耐力の実験値はPC鋼材量や載荷位置にかかわらず、アンボンドよりはポンドはりに比べ10~20%低下している。単純はりでの著者らの研究[5]では、アンボンドはりでは横拘束筋による最大曲げ耐力の増大率がポンドはりより多少大きく、例えば前者では横拘束筋比 $\rho_v=2.0\%$ の場合は $\rho_v=0\%$ に比べて耐力が15%程度増大した。本連続はりの供試体数が少なくさらに検討を要するが、 $\rho_v=2.5\%$ の $\rho_v=0\%$ に対する最大耐力増大率はポンドはりで4%、アンボンドはりで12%程度で、横拘束筋の影響は単純はりの場合に類似している。

最大耐力の実験値と計算値の比 P_u/P'_u は、各6体の平均で、コンクリートの応力ひずみ MODEL-1ではアンボンド:1.17、ポンド:1.19、MODEL-2ではアンボンド:1.08、ポンド:1.12となり、付着の有無によらずMODEL-2の方が実験値との適合性が良い。また、このようにアンボ

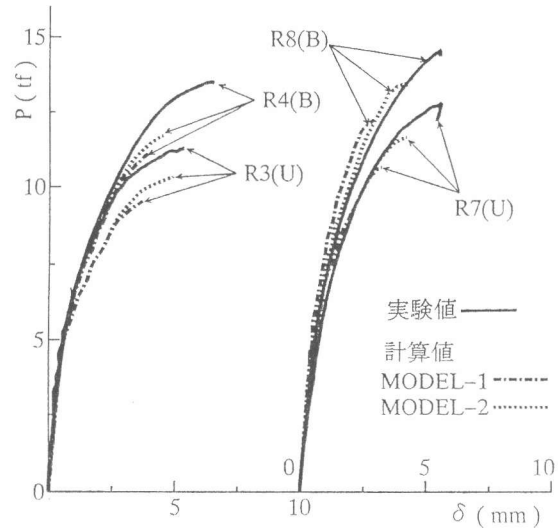


図-4 荷重-スパン中央たわみ関係

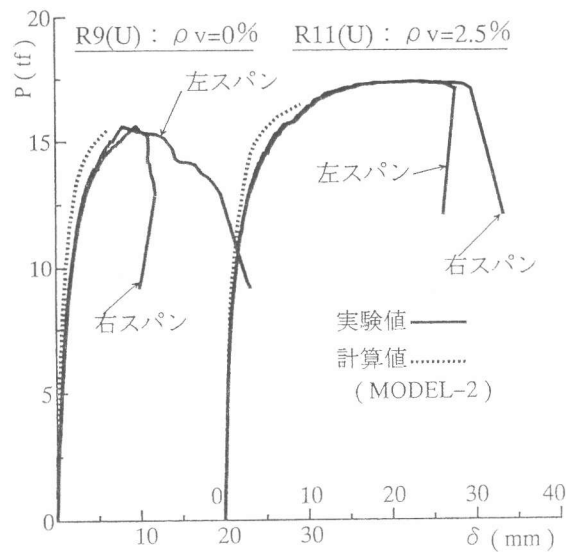


図-5 荷重-スパン中央たわみ関係

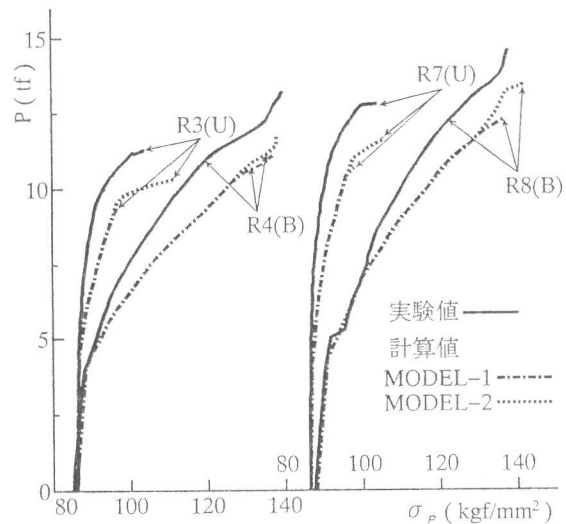


図-6 荷重-下側PC鋼棒応力関係

ンドはりでは $\beta=0.2$ と仮定した時の P_u/P'_u 比は
 ボンドはり($\beta=1.0$:完全付着)でのその比に近
 く、式(1)よりボンドはりと同程度の精度で最大
 曲げ耐力が推定できた。なお、参考のため別途
 にアンボンドはりでは $\beta=0.15$ とし試算した時
 の P_u/P'_u 比は1.19(MODEL-1)、1.11(MODEL-2)
 でボンドはりの比とほぼ一致したが、データ数
 が少なくこの点はさらに検討が必要である。

(2) 荷重-たわみ関係 ($P-\delta$)

図-4より、曲げひび割れ発生以降、PC鋼
 材量・配筋によらずアンボンドはりはボンドは
 りに比べてたわみが大きく、PC鋼材の付着が
 無いと部材剛性がかなり低下する。

また、図-5のように、最大耐力時までは横
 拘束筋の有無で $P-\delta$ 曲線に差異はみられない
 が、アンボンドのPC連続はりにおいても横拘
 束筋を配置すると、無拘束はりに比べてかなり
 大きな塑性変形域まで耐力の低下が生じず、韌
 性の優れた耐荷性状を示す。なお、R9、R11
 はりとも片側スパンでは荷重低下とともにたわ
 みが減少している。これは、左右スパンが完全
 には対称でなく、先にどちらかのスパンでコン
 クリート圧壊の著しい進展によりフォーリング
 プランチ領域に達して荷重の低下が顕著になり
 始めると、十分にその領域に達していない他ス
 パン側では変形が戻るためと考えられる。

図-4、5のように、アンボンドはりでは β
 $=0.2$ 、ボンドはりでは $\beta=1.0$ として非線形解析
 法で計算した最大耐力時までの $P-\delta$ 曲線は、
 いずれの供試体も実験値と大略一致している。

(3) 荷重-PC鋼材応力関係 ($P-\sigma_r$)

図-6、7は断面下側のPC鋼棒の引張応力
 を示す。PC鋼材量・配筋状態や荷重位置によ
 らず、無拘束のアンボンドはりではボンドタイ
 プに比べて荷重の増大にともなうPC鋼材応力
 の増加量が著しく小さい。その結果、後者では
 終局時にほぼ実降伏点まで達しているのに対し
 て、前者では実降伏点よりかなり小さい。断面
 上側のPC鋼棒についても同様であった。

特に、アンボンドはりでは、図-7のように

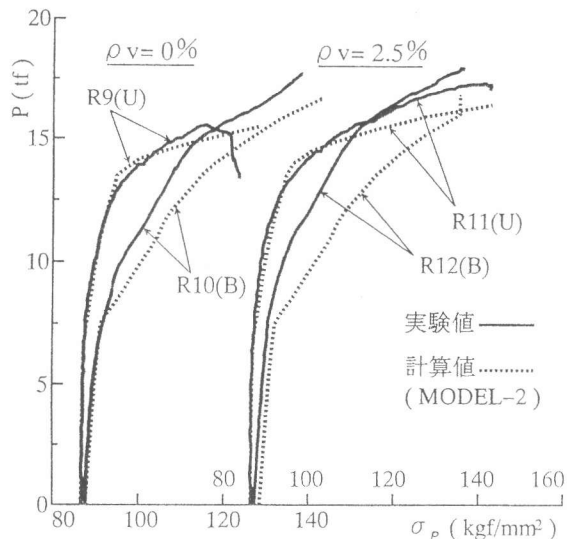


図-7 荷重-下側PC鋼棒応力関係

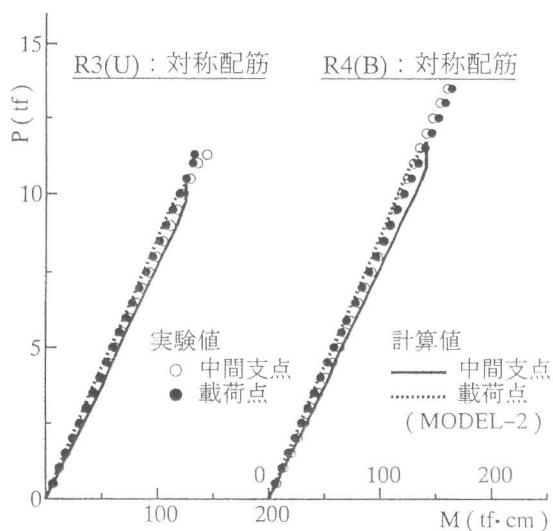


図-8 荷重-曲げモーメント関係

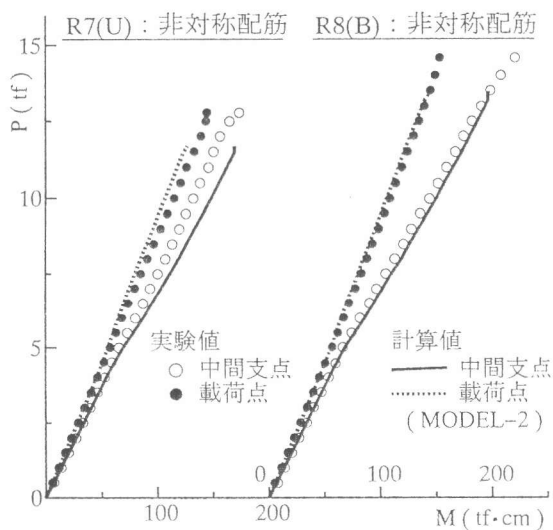


図-9 荷重-曲げモーメント関係

横拘束筋を配置すると無拘束時に比べ終局時までのPC鋼材応力の増大が顕著である。

ボンド、アンボンドはりに対し各々 $\beta=1.0$ 、 $\beta=0.2$ としMODEL-2で計算した $P-\sigma_p$ 関係は、実験値との一致は十分とはいえないが、両はりにおける実挙動を傾向的にはよく表している。

(4) 荷重-曲げモーメント関係 ($P-M$)

図-8~10から、荷重の増大にともなう中間支点、載荷点断面の曲げモーメントの増加挙動に関しては、PC鋼材量・配筋と載荷位置によって明瞭な差が認められる。しかし、図-10のように、横拘束筋の配置による影響は顕著でない。また、図-8、9から、PC鋼材付着の有無で $P-M$ 曲線の全体形状には明瞭な差はみられないが、終局時の最大到達曲げモーメントは

ボンドはりに比べアンボンドはりではかなり小さい。さらに、図-8~10によると、いずれに対しても非線形解析による $P-M$ 関係は実挙動をかなりよく表しており、前述の非線形解析法でボンドはりと同様にアンボンドはりの終局時までの曲げモーメント再分配挙動の推定が可能である。

4. 結論

アンボンドPC連続はりの耐荷挙動に関する本研究の結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) PC鋼材配筋状態や載荷位置によらず、アンボンドはりの最大曲げ耐力はボンドはりに比べて10~20%低下する。前者の横拘束筋($\rho_v=2.5\%$)による耐力の増大は後者より多少大きい。
- (2) 曲げひび割れ発生以降の荷重域ではアンボンドはりではボンドはりに比べて剛性が低下する。また、横拘束筋を配置すると最大耐力以降の塑性変形性能(靱性)が著しく向上する。
- (3) PC鋼材配筋状態や載荷位置によらず、アンボンドはりでは荷重によるPC鋼材引張応力の増加量がかなり小さい。この場合、横拘束筋を配置すると終局時鋼材応力はかなり増大する。
- (4) 初期から終局時までの荷重-中間支点、載荷点モーメント関係の曲線形状は、PC鋼材の配筋状態や載荷位置で異なるが、PC鋼材付着や横拘束筋の有無で特に顕著な差はみられない。
- (5) コンクリートの応力-ひずみ関係に断面のひずみ勾配の影響を考慮したMODEL-2を用い、ボンドはりは $\beta=1.0$ 、アンボンドはりは近似的に $\beta=0.2$ と仮定した簡易な非線形解析法で終局時までの挙動が大略推定でき、式(1)で両はりの最大耐力が同程度の精度で比較的良好に算定できたが、解析精度の向上や特にアンボンドの β 値に関してはさらにデータを蓄積し検討する必要がある。

[参考文献]

- 1] Blakeley, R. W. G.: PC Sections with Cyclic Flexure, Proc. of ASCE, Vol. 108, No. ST-8, pp. 1717-1742, 1973
- 2] Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Inter. Pub., pp. 26-29, 1975
- 3] Sheikh, S. A.: Confined Concrete Subjected To Axial and Bending Loads, Proc. of 8th WCEE, pp. 869-876, 1984
- 4] 西永 卓司、小林 和夫、七枝 保: アンボンドPCを適用した連続はりの耐荷特性に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、第17巻、第2号、pp. 713-718、1995
- 5] 小林 和夫、七枝 保: 横拘束筋を配置したアンボンドPCはりの曲げ耐荷性状、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、第2号、pp. 565-570、1992

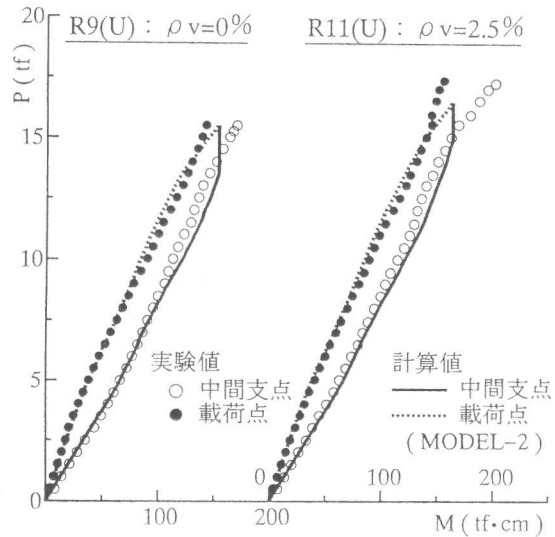


図-10 荷重-曲げモーメント関係