

論文 PRC 連続はり部材の基本的耐荷特性に関する研究

小野 由博*¹・小林 和夫*²・井上 晋*³・仁枝 保*⁴

要旨: ポストテンション方式の2スパンPRC連続はりに対して曲げ荷重試験を実施し、曲げひび割れ幅、たわみ、鋼材やコンクリートひずみ、終局最大耐力、曲げひび割れ発生以降から始まる曲げモーメントの再分配挙動などを同一鋼材配置のRC連続はりと比較するとともに、非線形解析による検討を実施した。その結果、PRCはりではプレストレス効果によりRCはりに比べて曲げひび割れ幅やたわみが減少することなどが示された。

キーワード: プレストレス、曲げひび割れ幅、終局耐力、モーメント再分配、非線形解析

1. はじめに

PRCに関しては、従来単純はり部材に対しては国内外で非常に活発な研究がなされてきたのに比べ、連続はり部材を対象としたものは少なかった。最近、連続はり型式としたPRCの鉄道橋や道路橋などへの適用がかなり増加するとともに、たとえば猪又ら¹⁾、津田ら²⁾のような基礎研究がなされているが、その設計法をより充実する上から使用時と終局時の耐荷挙動に及ぼすプレストレスの影響をさらに明確にし、その定量化を図ることが重要と考えられる。

そこで、本研究では2スパンのPRC連続はり供試体の荷重試験を行い、その基本的曲げ耐荷特性を同一鋼材配置のRC連続はりと比較するとともに、非線形解析による検討を行った。

2. 荷重試験概要

2.1 供試体の種類

供試体は 図-1 の幅×高さ×全長=100×160×3300mmの2スパン(2×1450mm)連続はりで、PC鋼棒($A_p: \phi 9.2$ mm、実降伏強度 $f_{p,y}=1420\text{N/mm}^2$)と異形鉄筋($A_s: 2\text{-D13}$ 、実降伏強度 $f_{s,y}=335\text{N/mm}^2$)を断面上下に対称配筋した。PC鋼棒は $0.3f_{p,y}$

で緊張したもの(PRCはり)、および同一鋼材配置でプレストレスの影響を調べるため非緊張としたもの(RCはり)の2種類とした。PRC断面の平均プレストレス量はほぼ 3N/mm^2 で、たとえば $\lambda = A_p f_{p,y} / (A_p f_{p,y} + A_s f_{s,y})$ で表される緊張率は約0.50である。また、RCはりは非緊張状態のPC鋼棒をPRCはりと同様にはり両端の

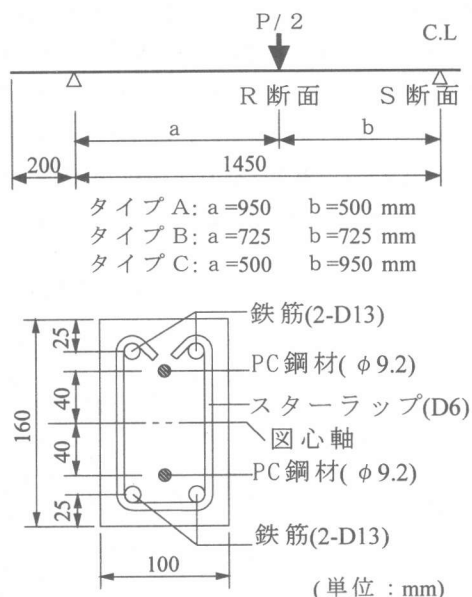


図-1 供試体断面と荷重タイプ

*1 日本コンクリート工業(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)

定着板にナット定着し、シース内にセメントペーストグラウト(W/C=35%、エヌエムビー社の高性能混和剤ポゾリスGF-700使用)を注入した。

コンクリートは、目標強度 $f'_c=40\text{N/mm}^2$ (普通強度)と 80N/mm^2 (高強度)の2種類とした。

いずれの供試体も極限解析による曲げ破壊時荷重に対して土木学会コンクリート標準示方書式によりスターラップでせん断補強を行った。

連続はり供試体の種類を表-1に示す。

2.2 荷重試験方法

荷重は左右スパン各1点の対称集中荷重方式とし、図-1で端支点～荷重点の距離を $a=950\text{mm}$ (タイプA)、 725mm (タイプB)、 500mm (タイプC)の3種類とした。タイプA、B、Cの全断面を有効とした線形弾性解析による中間支点(S断面)と荷重点(R断面)の曲げモーメントの比は $M_s/M_r=1.81, 1.20, 0.88$ である。

各荷重階で、曲げひび割れ後の曲げモーメント再分配を検討するため各支点位置にロードセルを設置して支点反力を測定した。また、スパン中央のたわみ、中間支点と荷重点位置のPC鋼棒・鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ(上下縁から1.5cm位置)を測定した。さらに、 π 型ゲージ(検長50mm)で中間支点の左右200mm区間での引張主鉄筋位置の曲げひび割れ幅を測定した。

3. 結果と考察

3.1 結果と解析方法

表-1に最大荷重、図-4、5に荷重-曲げひび割れ幅(中間支点域引張鉄筋位置)、図-6、7に荷重-スパン中央たわみ、図-8に荷重-コンクリート圧縮ひずみ(中間支点)、図-9、10に荷重-中間支点、荷重点の曲げモーメント(実験値:3支点反力測定値から算出)の各関係を示す。なお、併記の各計算値は使用材料の強度測定値を用いて算定した。

表-1の最大荷重計算値 P_{U1}, P_{U2} は中間支点断面(S)と荷重点断面(R)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。

$$P_{U1}, P_{U2}=2X[M_{US}(1/b)+M_{UR}(1/a+1/b)] \quad (1)$$

ここに、

P_{U1}, P_{U2} : 各々コンクリートの応力-ひずみ関係を下記のModel-1, 2としてS, R断面の最大抵抗曲げモーメント M_{US}, M_{UR} を算定した場合の値

a, b: 各々荷重点から端支点、中間支点までの距離

連続はりの非線形解析用の応力-ひずみ関係として、コンクリートに対しては種々³⁾の中からParkらのモデル(Model-1)、およびSheikh⁴⁾の指摘する断面内でのひずみ勾配の影響を考慮し

表-1 供試体種類および最大曲げ耐力の実験値と計算値

供試体 記号	断面 形式	荷重 位置	コンクリート 強度 f'_c (N/mm^2)	実験値 P_U (kN)	計算値				モーメント 再分配率 α (%)
					Model-1		Model-2		
					P_{U1} (kN)	$\frac{P_U}{P_{U1}}$	P_{U2} (kN)	$\frac{P_U}{P_{U2}}$	
N-1	PRC	タイプA	40(41.1)	204.9	189.9	1.08	200.9	1.02	13.1
N-2	RC			185.0	184.8	1.00	197.0	0.94	13.4
N-3	PRC	タイプB	40(40.7)	155.8	155.3	1.00	164.5	0.95	0.5
N-4	RC			149.9	151.3	0.99	161.2	0.93	7.7
N-5	PRC	タイプC	40(41.1)	158.4	154.3	1.03	163.2	0.97	-20.2
N-6	RC			147.7	150.1	0.98	160.1	0.92	1.2
H-1	PRC	タイプA	80(79.8)	224.4	210.5	1.07	216.6	1.04	17.2
H-2	RC			206.4	203.3	1.02	212.7	0.97	16.5
H-3	PRC	タイプB	80(90.4)	171.7	176.2	0.97	180.8	0.95	1.7
H-4	RC			171.1	170.1	1.01	177.1	0.97	3.8
H-5	PRC	タイプC	80(79.8)	175.9	171.0	1.03	176.0	1.00	-6.5
H-6	RC			151.7	165.1	0.92	172.9	0.88	-12.4

*1) () の数値は、連続はりの荷重試験時におけるコンクリートの実圧縮強度

て、応力が最大値 f'_c に達した後の $\Delta\epsilon_0$ 区間は f'_c が保持されるとしたModel-1の修正型モデル(Model-2: $\Delta\epsilon_0=1500\mu$)を用いた(図-2)。また、P C鋼材には Blakeleyモデル⁵⁾、鉄筋にはパイリニアモデルを採用した。

非線形解析に際しては、まず断面解析から曲げモーメント-曲率(M- ϕ)関係を求めた。次に、静定基本系として中間支点で切断した単純はりを選定し、荷重Pに対して中間支点モーメント M_s を仮定して曲げモーメント分布 M_x を与え、先のM- ϕ 関係から曲率分布 ϕ_x を定めて弾性荷重法で中間支点位置のたわみ角を算定した。計算は中間支点位置で左右スパンの変形連続条件が満足されるまで M_s 値を仮定し直し、繰返し行った。本解析では、中間支点または載荷点モーメントが M_{Us} 、 M_{Ur} に到達後は式(1)の最大荷重計算値まで一定値を保持するとした。

以上よりPに対する所要の M_x 分布を定め、断面解析結果より荷重と諸量の関係を算出した。

3.2 考察

(1) ひび割れ状況と荷重-ひび割れ幅関係

図-3 に載荷試験終了時の ひび割れ状況を示すが、全体的にP RCはりはRCはりに比べ多少曲げひび割れの発生本数は少ないが、両者で顕著な差異はみられない。また、高強度コンクリートはりは普通強度コンクリートはりに比べて曲げひび割れ本数が少ない傾向にある。

図-4、5 に示す荷重-曲げひび割れ幅(中間支点負モーメント域の主鉄筋位置での各測定値の中で大きさが第1、2番目の値の平均値)の関係より、P RCはりではプレストレス効果によって同一荷重に対するひび割れ幅がRCはりより減少している。また、高強度と普通強度コンクリートはりの間では、曲げひび割れ幅に特に明瞭な差異はみられない。

図-4、5 には、次式の土木学会コンクリート標準示方書の設計式を適用して算定した曲げひび割れ幅の計算値を併記した。

$$\omega = k\{4C + 0.7(C_s - \phi)\}(\epsilon_s + \epsilon'_{cs,d}) \quad (2)$$

ここに、

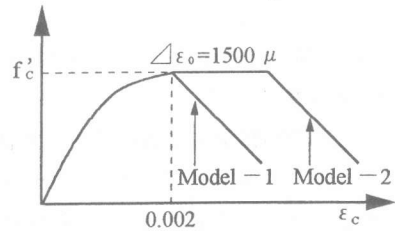


図-2 コンクリートの応力-ひずみ

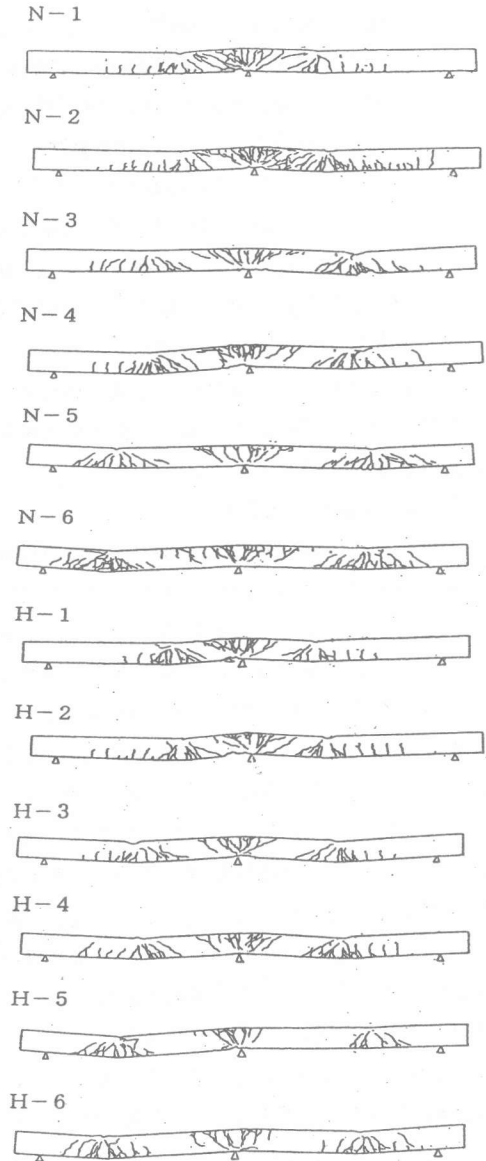


図-3 ひび割れ性状(載荷試験終了時)

k: 鋼材の付着性状を表す係数(異形鉄筋の場合は $k=1.0$)

C, C_s: 各々かぶり、鉄筋の中心間隔

φ: 鉄筋径

ε_s: ひび割れ断面の鉄筋ひずみ増加量で、PRCでは鉄筋位置のコンクリート応力が圧縮から0に変わるまでの鉄筋ひずみを差し引いた値(ε_sは先の非線形解析で求めたが、後記の荷重-たわみ関係などと同様に終局荷重近傍を除いた図-4、5に示す範囲の荷重域ではModel-1とModel-2の間でε_s値、すなわち曲げひび割れ幅計算値に差はなく、図中の計算値はModel-1およびModel-2による値を意味する)

ε'_{c,s,d}: コンクリートのクリープと収縮によるひび割れ幅の増加を考慮する値(本供試体は作製から荷重試験までの期間が非常に短期のためε'_{c,s,d}=0)

図示のように、コンクリート強度に係らず、全体的にPRCはりに関しても計算値は実験値と比較的よく一致している。

(2) 破壊状況と最大耐力

本供試体は、極限解析法の式(1)による終局曲げ耐力時のせん断力に対し、土木学会示方書によりスターラップでせん断補強を行った。その結果、いずれも最終的には中間支点部と荷重点部でコンクリートが圧壊して曲げ破壊した。

表-1 から、PRCはりの最大耐力はRCはりに比べて、 $f'_c=40\text{N/mm}^2$ では4~11%(平均7%)、 $f'_c=80\text{N/mm}^2$ で0~16%(平均8%)大きい。このように、全鋼材配置を同一とした連続はりではプレストレスの導入により最大曲げ耐力が向上し、断面の平均プレストレス量をほぼ 3N/mm^2 とした本供試体での耐力増大率はコンクリート強度に係らず7~8%である。

$f'_c=80\text{N/mm}^2$ の高強度はりの最大耐力は $f'_c=40\text{N/mm}^2$ の場合よりPRCで10~11%、RCで3~14%大きい。その増大率は個々で多少差のある場合もあるが、PRCとRCで大略等しい。

実験値と計算値の比(平均値)は、 $f'_c=40\text{N/mm}^2$

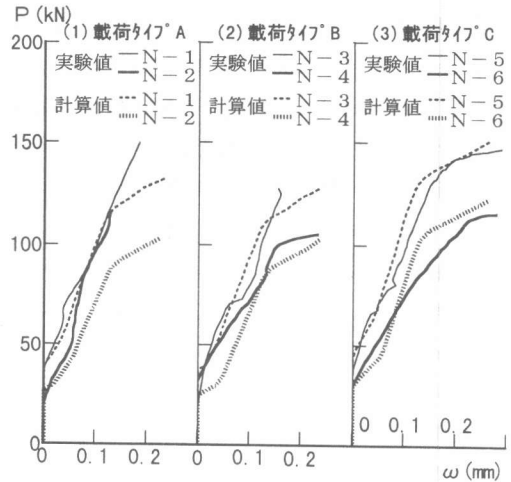


図-4 荷重-ひび割れ幅関係 ($f'_c=40\text{N/mm}^2$)

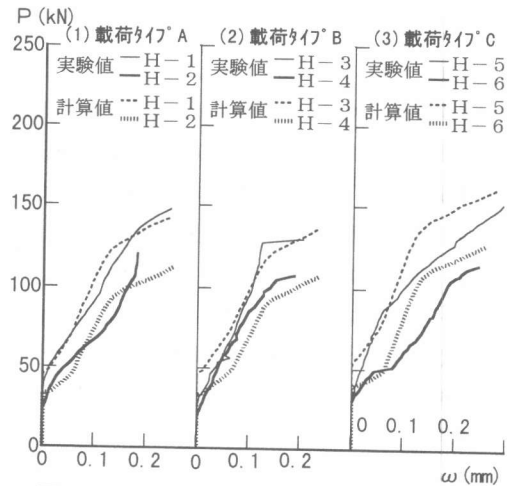


図-5 荷重-ひび割れ幅関係 ($f'_c=80\text{N/mm}^2$)

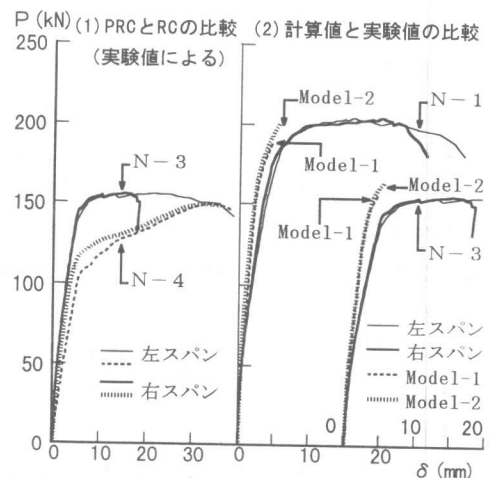


図-6 荷重-たわみ関係 ($f'_c=40\text{N/mm}^2$)

では $PRC:P_U/P_{U1}=1.04$, $P_U/P_{U2}=0.98$, $RC:P_U/P_{U1}=0.99$, $P_U/P_{U2}=0.93$ である。一方、 $f'_c=80N/mm^2$ では $PRC:P_U/P_{U1}=1.02$, $P_U/P_{U2}=1.00$, $RC:P_U/P_{U1}=0.98$, $P_U/P_{U2}=0.94$ である。このことから、コンクリートの応力-ひずみ式としては、Model-2 は若干危険側になるが、Model-1、2のいずれでも極限解析法でPRC、RC連続はりの曲げ耐力をかなりよく算定できる。

(3) 荷重-たわみ関係

図-6、7の荷重-たわみ($P-\delta$)関係から、PRCはりは同一荷重に対してRCはりよりたわみが小さく、大きな剛性を示す。また、 $P-\delta$ 関係での急激な折曲点は鉄筋の降伏に対応するが、その荷重はPRCはりの方が大きい。

直接には図示していないが、図-6、7のN-1とH-1、N-3とH-3、N-4とH-4の比較より、高強度コンクリートはりの初期から最大耐力の約90%までの範囲のたわみは普通強度はりより小さく、高い剛性を有する。

図-6、7のように、非線形解析で算定したPRCはりの最大耐力時付近までの $P-\delta$ 曲線は、十分ではないが実験値と比較的よく一致している。なお、下記 $P-\epsilon_c$ や $P-M$ 関係でも同様であるが、最大荷重値の相違により終局時付近ではModel-1、2で $P-\delta$ 曲線の計算値は多少異なるが、他の荷重域では両計算値間の差はみられない(図中の計算値 Model-1、2の矢印点は各々の最大荷重計算値 P_{U1} 、 P_{U2} を示す)。

(4) 荷重-コンクリートひずみ関係

図-8の中間支点断面の $P-\epsilon_c$ 関係から、 $P-\delta$ 関係と同様、PRCはりはRCはりに比べ同一荷重時のコンクリート圧縮ひずみ ϵ_c (圧縮縁から15mm位置の測定値)が小さい。しかし、終局付近では両者とも 3000μ 程度の値を示している。また、高強度コンクリートはりは普通強度はりに比べ同一荷重時のひずみ量が小さい。

図示のように、PRCはりにおける ϵ_c の計算値は実験値と大略一致している。

(5) 荷重-曲げモーメント関係

図-9の中間支点断面の $P-M$ 関係から、荷

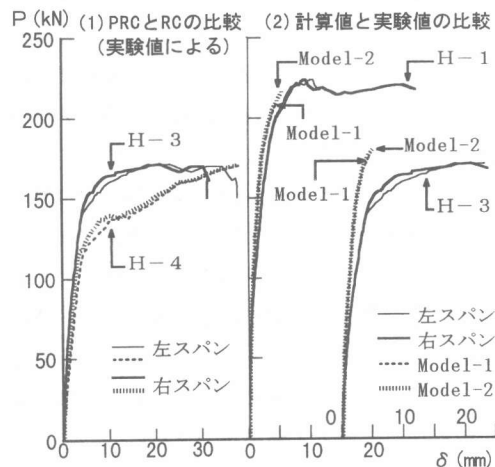


図-7 荷重-たわみ関係 ($f'_c=80N/mm^2$)

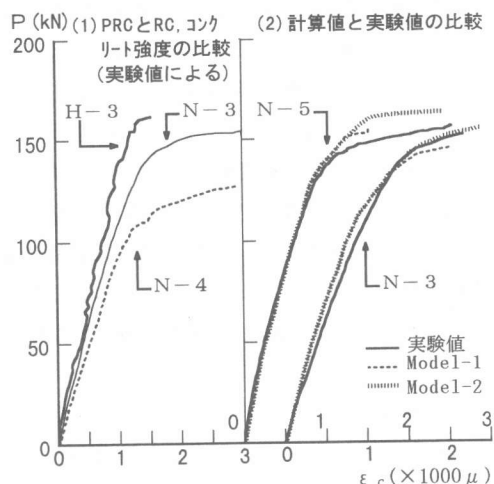


図-8 荷重-コンクリートひずみ(中間支点)関係

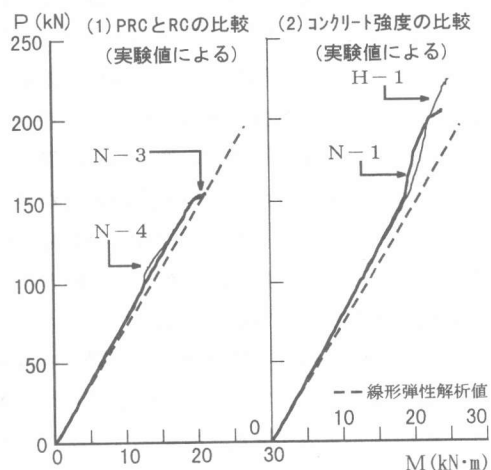


図-9 荷重-曲げモーメント(中間支点)関係

重の増大に伴う曲げモーメントの増加挙動に関しては、PRCはりとRCはりの間で顕著な差はなく、コンクリート強度による明瞭な差もみられない。なお、終局時の最大曲げモーメントに関しては、PRCはりはRCはりに比べて、また高強度コンクリートはりは普通強度はりに比べて全体的に平均で10%程度大きかった。

図-10のように、荷重の増加とともにP-M関係は線形弾性解析値による直線関係を示さなくなり、曲げモーメントの再分配が認められるが、初期から終局状態までのP-M関係は非線形解析法によって大略推定できる。

さらに、中間支点断面に対して次式から求めた終局最大荷重時の曲げモーメント再分配率の測定値 α を表-1中に併記した。

$$\alpha (\%) = [(M_E - M_M) / M_E] \times 100 \quad (3)$$

ここに、 M_E 、 M_M ：実測最大荷重時における中間支点モーメントの線形解析値と測定値

個々ケースで変動があり、さらに検討を要するが全体的にみてPRCとRCはりで α 値に顕著な差はないようである。また、 α 値とコンクリート強度の間に明確な相関性はみられない。

4. 結論

本研究の主な結果は、次のとおりである。

(1)断面の平均プレストレスをほぼ $3\text{N}/\text{mm}^2$ としたPRCはりはRCはりに比べ曲げひび割れ幅がかなり減少し、また、それらの値は $f'_c=40$ 、 $80\text{N}/\text{mm}^2$ のいずれの場合も非線形解析の鉄筋ひずみと土木学会示方書式から大略推定できる。

(2)全鋼材配置を同一とした本供試体の場合、PRCはりはRCはりより最大曲げ耐力が7~8%大きかった。 $f'_c=40$ 、 $80\text{N}/\text{mm}^2$ のPRCはりとRCはりともに最大曲げ耐力は極限解析法の適用によりかなり精度よく算定できた。

(3)PRCはりはRCはりに比べて同一荷重下でのたわみやコンクリートの圧縮ひずみが小さく、剛性が大きい。また、高強度コンクリートはりは普通強度はりより高い剛性を有する。

(4)終局時の最大曲げモーメントは多少異なる

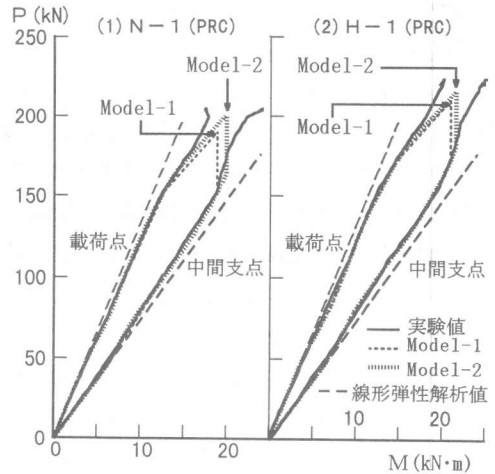


図-10 荷重-曲げモーメント関係

が、荷重の増加に伴う中間支点や載荷点モーメントの増加挙動は、PRCはりとRCはりの間で、また $f'_c=40\text{N}/\text{mm}^2$ と $80\text{N}/\text{mm}^2$ の間で特に顕著な差異はみられない。

(5)精度的にはさらに検討を要するが、ここで用いた簡易な非線形解析法によって終局時までの曲げ耐荷挙動を比較的良好に推定できる。

参考文献

- 1)猪又 稔・藤田嘉夫：使用状態におけるパシヤルPC桁の変形挙動把握と連続桁への適用、土木学会論文集、403号/V-11、pp.157-165、1989.8
- 2)津田 守ほか：持続荷重を受けるPRC連続はりの挙動について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.697-702、1995.6
- 3)たとえば、Park,K. & Paulay,T.:Reinforced Concrete Structures,A Wiley-Inter.,pp.26-29,1975、六車 照ほか：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、pp.10-16、1984.1
- 4)Sheikh,S.A.:Confined Concrete Subjected to Axial and Bending Loads, Proc. of 8th WCEE, pp.869-876, 1984
- 5)Blakeley,R.W.G.:PC Sections with Cyclic Flexure, Proc.of ASCE, Vol.108,No.ST-8, pp.1717-1742, 1973