

(40) アンボンドPRCはり部材の曲げ耐荷特性に関する基礎的研究

群馬大学 建設工学科 ○橋本 親典  
 群馬大学 建設工学科 正会員 辻 幸和  
 トーピー建設工業(株) 金井 昌義

1. はじめに

アンボンドPC鋼材を用いた場合には、一般に付着のあるPC鋼材を用いる場合と比較して曲げ耐力が小さくなる。現行の土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕では、アンボンドPC鋼材を用いた場合は付着のあるPC鋼材の曲げ耐力に対して30%減ずるのがよいと解説されている<sup>1)</sup>。しかし、土木学会コンクリート標準示方書改訂小委員会PC調査研究部会では、今後の検討課題の一つとして、アンボンドPC部材の曲げ耐力の低減率30%に対する現行示方書の説明不足を指摘している<sup>2)</sup>。

一方、プレストレストコンクリートの曲げ耐力は、鋼材の降伏が先行すれば鉄筋コンクリートと同じ手法で算定でき、コンクリートの圧縮縁ひずみが終局ひずみに達するときが断面破壊の終局限界状態となる。したがって、プレストレストコンクリートの曲げ耐力に関する研究はこれまでほとんど報告されていない。アンボンドPCはり部材の曲げ耐力が付着がある場合のPC部材と比べて小さくなる原因の定性的な解釈としては、PC鋼材の付着がないために断面でのPC鋼材位置のコンクリートのひずみとPC鋼材のひずみが一致しなく、断面における平面保持が成り立たないこと、およびPC鋼材がシースの中を圧縮側に移動して偏心量が小さくなることなどが挙げられている。アンボンドPCはり部材の曲げ耐力については六車らの研究<sup>2)</sup>が報告されているが、曲げ耐力低下の原因については未解明な部分が多い。

本研究では、アンボンドPRCはり部材の曲げ耐力低下の原因を明らかにすることを目的とし、PC鋼より線の付着の有無がPRCはり部材の曲げ耐力や曲げひび割れ幅に与える影響について実験的に検討する。

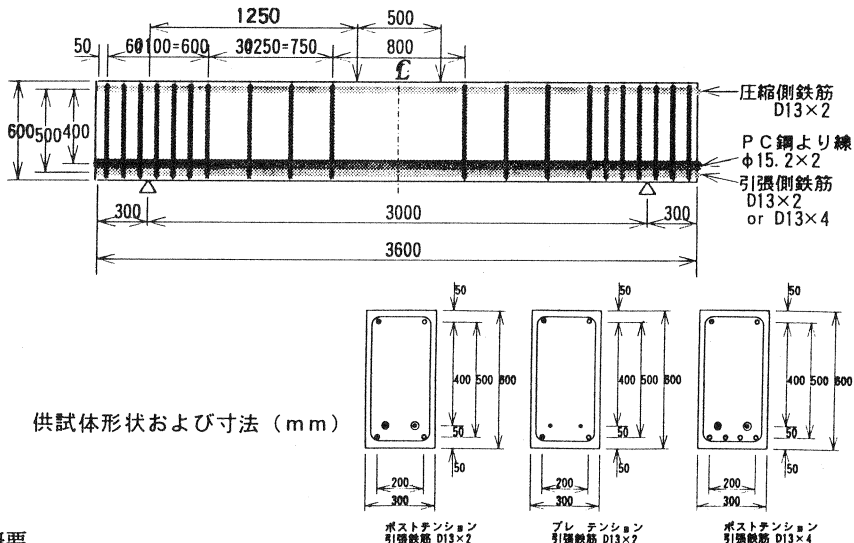


図-1 供試体形状および寸法 (mm)

2. 実験概要

2.1 供試体および使用材料

実験に用いたPRCはり供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は、60cm×30cmの矩形断面で、長さを360cmとし、圧縮鉄筋ならびに引張鉄筋としてSD345 D13鉄筋(公称断面積1.267cm<sup>2</sup>,降伏点3850kgf/cm<sup>2</sup>,引張強さ5380kgf/cm<sup>2</sup>,ヤング係数2.0×10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup>)を、PC鋼材としてSWPR7B 7本より15.2mmのPC鋼より線

(公称断面積 $1.387\text{cm}^2$ ,引張荷重 $27230\text{kgf}$ ,  
 $0.2\%$ 永久伸びに対する荷重 $23760\text{kgf}$ )を使用  
 した。曲げ破壊に至る前にせん断破壊を  
 しないようにSD345 D10鉄筋をせん断スパン  
 内に $25\text{cm}$ 間隔で配置し、はり端部の定着部  
 はSD345 D10鉄筋を $10\text{cm}$ 間隔で配置した。な  
 お、等モーメント区間にはせん断補強鉄筋  
 は配置していない。

作製した供試体は全部で10体であり、  
 表-1に供試体種別の詳細を示す。アンボ  
 ンドはり3体は、PCグラウトを充填しな  
 いポストテンション方式にて作製し、比較  
 用としてPCグラウトの充填によるポスト  
 テンション方式のボンドはり5体ならびに  
 プレテンション方式のボンドはり2体を作

製した。実験パラメータとしては、引張鉄筋を2本と4本の2種類とし、コンクリート圧縮強度を $500\text{kgf}/\text{cm}^2$   
 $\text{m}^2$ 程度と $700\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の2種類とし、有効プレストレス量を $9250\text{kgf}/\text{cm}^2$ と $4625\text{kgf}/\text{cm}^2$ の2種類とした。

導入した有効プレストレス量 $9250\text{kgf}/\text{cm}^2$ は、ポストテンション部材でのPC鋼より線の初期緊張力を  
 $18.0\text{t}$  ( $12978\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) /本とし、はり中央断面位置で算出した有効プレストレス量である。また、ポスト  
 テンション方式とプレテンション方式においてPC鋼より線の引張応力の減少量が異なるため、プレテンシ  
 ョン方式での初期緊張力は $15.6\text{t}$  /本とした。PC鋼より線にはひずみゲージが貼付できないため、初期緊  
 張時から載荷試験時までのPC鋼より線に与えられている引張応力(ひずみ)の経時変化は計測していない。  
 その結果、実際に各供試体に設定された有効プレストレス量が導入されているかどうかは確認できなかった。  
 また、曲げ耐荷特性の情報として必要なPC鋼より線近傍のひずみとしては、引張鉄筋に貼付したひずみゲ  
 ージから求めることとした。

供試体に用いたコンクリートの配合としては、目標圧縮強度 $500\text{kgf}/\text{cm}^2$ では粗骨材最大寸法 $20\text{mm}$ ,水セメン  
 ト比 $37.3\%$ ,細骨材率 $40.0\%$ ,目標スランプ $6\pm 1.5\text{cm}$ ,空気量 $3\pm 1\%$ であり、目標圧縮強度 $700\text{kgf}/\text{cm}^2$ では粗骨  
 材最大寸法 $20\text{mm}$ ,水セメント比 $32.3\%$ ,細骨材率 $43.0\%$ ,目標スランプ $8\pm 2.5\text{cm}$ ,空気量 $3\pm 1\%$ である。セメン  
 トは早強ポルトランドセメント(比重 $3.14$ )を使用し、細骨材および粗骨材は群馬県川場村産の砕砂(表乾  
 比重 $2.63$ ,粗粒率 $2.74$ )および碎石(表乾比重 $2.74$ ,粗粒率 $6.64$ )を使用した。PCグラウトの配合は、水セ  
 メント比 $40\%$ 、膨張剤添加率 $0.008\%$ であり、セメントは普通セメント(比重 $3.16$ )、膨張剤は反応遅延性の  
 アルミニウム粉末を主成分とするものを使用した。

## 2.2 載荷および測定方法

載荷試験方法は、スパン $300\text{cm}$ 、等モーメント区間 $50\text{cm}$ の2点集中載荷とし、曲げひび割れが発生してその  
 ひび割れが安定してくると思われる荷重 $30\text{tf}$ まで静的単調増加で載荷した。その後一度荷重を除荷し、再び  
 コンクリート圧縮縁が圧壊するか緊張材が破断して、それ以上荷重が増加しなくなるまで載荷した。

載荷試験での各種測定はすべて荷重ステップ毎に行うこととし、等モーメント区間のコンクリート圧縮上  
 面(5箇所)、引張下面(5箇所)および引張鉄筋(6箇所)に貼付したワイヤーストレインゲージにより、  
 コンクリートの圧縮縁ひずみ、引張縁ひずみおよび引張鉄筋のひずみを測定した。また、 $10\text{cm}$ ピッチで引張  
 下縁から $5\text{cm}$ 上方の供試体側面位置に貼付したパイゲージ(7箇所)によって、等モーメント区間のひびわれ  
 幅を測定した。たわみは、スパン中央と両支点位置に高感度変位計を設置し相対変位として測定した。

表-1 供試体種別一覧

番号	供試体名*	付着 有無	PC鋼より線 の緊張方式	引張鉄筋 の本数	コンクリート圧縮強度 $f'c(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	有効プレストレス 量( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
1	UB 2 NN	なし	*ストレッチョン	D13×2	4 8 6	9 2 5 0
2	B 2 NN	あり	*ストレッチョン	D13×2	5 4 2	9 2 5 0
3	P 2 NN	あり	△ストレッチョン	D13×2	5 0 3	9 2 5 0
4	B 4 NN	あり	*ストレッチョン	D13×4	5 3 1	9 2 5 0
5	UB 2 HN	なし	*ストレッチョン	D13×2	7 2 8	9 2 5 0
6	B 2 HN	あり	*ストレッチョン	D13×2	7 0 1	9 2 5 0
7	P 2 HN	あり	△ストレッチョン	D13×2	7 2 8	9 2 5 0
8	B 4 HN	あり	*ストレッチョン	D13×4	7 1 5	9 2 5 0
9	UB 2 NL	なし	*ストレッチョン	D13×2	4 7 0	4 6 2 5
10	B 2 NL	あり	*ストレッチョン	D13×2	5 0 0	4 6 2 5

[共通事項] 圧縮鉄筋の本数: D13×2, PC鋼より線の本数:  $\phi 15.5 \times 2$   
 [供試体名の説明] "○○◎□△": ○○は付着の有無(UB:7本ボンド, B:\*ス  
 テンション方式ボンド, P:\*プレテンション方式ボンド, ◎は引張鉄筋本数, □はコンクリート圧縮強  
 度(N:普通強度, H:高強度), △は有効プレストレス(N:通常, L:半減)を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊経過

本載荷実験で得られた最終ひび割れ状況の一例を図-2に示す。供試体はすべて、曲げひび割れが発生し引張鉄筋が降伏した後に、コンクリートの圧縮部の破壊によって最大荷重に達し終局状態に至るといった破壊性状を示した。ただし、引張鉄筋量が増えたB4NNおよびB4HN供試体や有効プレストレス量が低減したB2NL供試体は、曲げひび割れ発生後にせん断スパン内に斜めひび割れが発生し、その後引張鉄筋が降伏する破壊性状であり、他の7体と若干異なる挙動を示した。

B4NNおよびB4HN供試体では、引張鉄筋量が2倍であり引張鉄筋降伏耐力が斜めひび割れ発生時せん断耐力を上回ったためと考えられる。B2NL供試体は、有効プレストレス量が半減され、プレストレスの軸方向成分による斜めひび割れ発生時せん断耐力の寄与分が小さくなり、この耐力が引張鉄筋降伏耐力よりも下回ったためと考えられる。

曲げひび割れの発生状況では、アンボンドよりは、ボンドはりと比較して曲げひび割れの本数が少なく、ひび割れ間隔が大きい。これは付着の有無によるものと考えられ、アンボンドよりはPC鋼材がはり軸方向でひずみが一定となり引張側のコンクリートや引張鉄筋に引張応力を伝達されないために、曲げひび割れが分散しなく、結果としてひび割れが1箇所集中する。また、UB2NL供試体が有効プレストレス量が半減したにもかかわらず斜めひび割れが発生していない原因としては、PC鋼材の付着がないためにせん断スパン内の引張下縁側のコンクリートに曲げひび割れを発生させるだけの十分な引張力を、PC鋼材がコンクリートに伝達させることができなかつたためと考えられる。

一方、ボンドはりでは、ポストテンション方式とプレテンション方式による違いはほとんど見られない。これは、本実験でのポストテンション方式のボンドはり部材製作工程において、シースとPC鋼材間のグラウト充填が十分に行われたことを示唆するものである。

荷重-たわみ曲線の一例を図-3に示す。曲げひび割れ発生以前の初期剛性はほぼ同一であるのに対し、30tf前後の引張鉄筋降伏時前後から、荷重レベルが増加するに従いアンボンドはりのたわみが増加する。曲げひび割れが1箇所集中するのみならず、集中したひび割れ幅がボンドはりに発生するひび割れ幅の総和以上に増大し、はり部材全体としての剛性低下を招いたものと思われる。

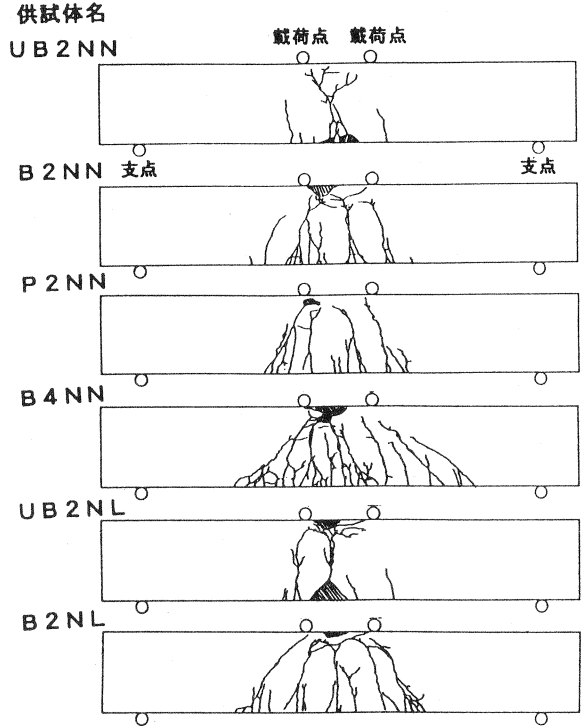


図-2 最終ひび割れ状況

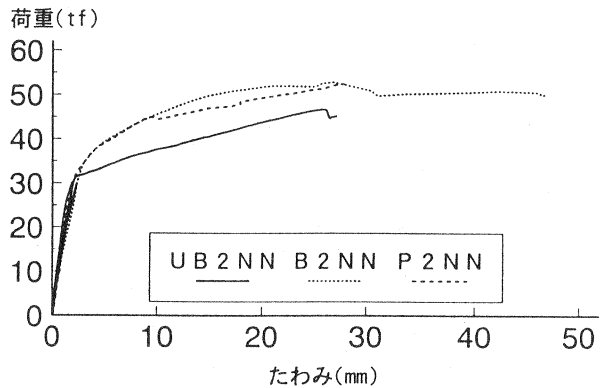


図-3 荷重-たわみ曲線の一例

### 3.2 曲げひび割れ幅

本実験で求められた曲げひび割れ幅の実験結果を図-4に示す。曲げひび割れ幅は、等モーメント区間に7箇所貼付したパイゲージによるひび割れ幅の測定値のうち、最大3点の平均値によって、各荷重レベルにおけるひび割れ幅とした。したがって、曲げひび割れ1本の最大ひび割れ幅を測定したものではない。なお、パイゲージによるひび割れ幅の測定は最大2.5mmまでであるため、それ以上のひび割れは測定していない。

有効プレストレス量が $9250\text{kgf/cm}^2$ の供試体では、供試体種別に関係なく、30tfの荷重レベルまではほとんど同程度の曲げひび割れ幅である。しかし、35tfおよび40tfの荷重レベルでは、アンボンドはりの曲げひび割れ幅が、ボンドはりと比較して著しく増大する。これは、前節の曲げひび割れ発生状況において説明したように、アンボンドはりでは付着が無いために曲げひび割れが1箇所に集中するためと考えられる。

引張鉄筋量が2倍になったB4NNおよびB4HN供試体では、他のボンドはりと比較し各荷重レベルでの曲げひび割れ幅が小さく半分程度である。引張鉄筋量が2倍になり、引張鉄筋1本当たりに発生する引張応力が半減するために、曲げひび割れ幅も1/2程度に減少したと考えられる。したがって、PRCはりの曲げひび割れ幅の制御に対して、引張鉄筋量を増加させることは有効であると思われる。

コンクリートの圧縮強度が曲げひび割れ幅に及ぼす影響に関

しては、本実験ではほとんど有為な差が認められなかった。すべての供試体の破壊モードが、引張鉄筋降伏した後に圧縮部のコンクリートが破壊するという鉄筋コンクリート部材での曲げ引張破壊モードであったために、同一抵抗モーメントにおいて圧縮強度の増加に伴い引張鉄筋のひずみが減少するという結果に至らなかったためと思われる。したがって、コンクリートの圧縮強度が $500\text{kgf/cm}^2$ から $700\text{kgf/cm}^2$ 程度増加しても、引張鉄筋ひずみの増加を顕著に抑制することはできなく、曲げ引張破壊モードのPRCはりでは、曲げひび割れ幅の抑制に対してコンクリートの圧縮強度を増加することは有効ではないと判断される。

有効プレストレス量が曲げひび割れ幅に及ぼす影響に関しては、当然ながら有効プレストレス量が半減すると曲げひび割れ幅は約2倍程度に増加する。アンボンドはりの場合、その傾向が非常に顕著であり、UB2NL供試体は30tfの荷重レベルにおいて既に2.5mm以上のひび割れ幅が発生した。ボンドはりでの比較でも、有効プレストレス量が半減すると、各荷重レベルで約2倍の曲げひび割れ幅が測定された。

### 3.3 曲げ耐荷特性

表-2に、実験により得られた曲げひび割れ発生荷重、引張鉄筋降伏荷重および最大荷重を解析値と併せて示す。高強度コンクリートを用いたボンドはりB2HN、P2HNならびに有効プレストレス量を低減させたアンボンドはりUB2NL供試体では、引張鉄筋降伏荷重において解析値が実験値を上回るものの、その他の解析値は概ね実験値をよく推定している。

ボンドはりの解析は、通常ファイバーモデルを用いコンクリートの圧縮縁ひずみ $\epsilon'_{cm}$ を入力データとして各荷重レベルでのひずみ分布を平面保持の仮定から決定し、そのひずみ分布におけるコンクリート、鉄筋、PC鋼材の力の釣合から抵抗モーメントを算出した。解析に用いたコンクリート、鉄筋およびPC鋼より線

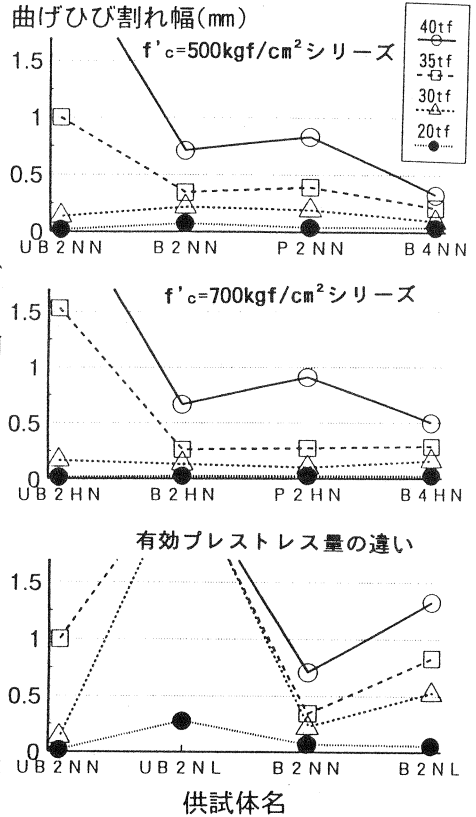


図-4 各荷重レベルでの曲げひび割れ幅

の応力-ひずみ関係のモデルは、すべて土木学会平成3年度版コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>4)</sup>で提案されているモデルである。なお、PC鋼より線の材料特性値は、引張強度  $f_{ud}=23000\text{kgf/cm}^2$ 、ヤング係数  $E_p=2.0 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$  とし、コンクリ

表-2 曲げ耐荷特性に関する実験結果一覽

番号	供試体名	曲げひび割れ発生荷重(tf)			引張鉄筋降伏荷重(tf)			最大荷重(tf)		
		実験値 <sup>1)</sup>	解析値 <sup>2)</sup>	実/解	実験値	解析値	実/解	実験値	解析値 <sup>3)</sup>	実/解
1	UB 2 NN	22.5	27.1	0.83	30.0	26.6	1.13	46.8	43.8	1.07
2	B 2 NN	13.0	15.0	0.87	35.0	31.0	1.13	52.8	52.4	1.03
3	P 2 NN	13.5	15.4	0.88	35.0	30.9	1.13	53.0	52.5	1.01
4	B 4 NN	15.6	17.5	0.89	41.8	37.5	1.11	60.2	59.8	1.01
5	UB 2 HN	25.0	27.2	0.92	28.1	27.3	1.03	53.8	48.0	1.12
6	B 2 HN	21.0	21.4	0.98	42.0	31.9	1.32	52.8	53.4	0.99
7	P 2 HN	23.0	22.0	1.05	40.0	31.7	1.26	53.8	53.5	1.01
8	B 4 HN	20.0	21.7	0.92	37.0	38.9	0.95	56.6	60.7	0.93
9	UB 2 NL	16.0	17.2	0.93	23.0	18.9	1.22	43.6	36.7	1.19
10	B 2 NL	16.0	15.9	1.01	24.5	23.0	1.07	50.3	52.5	0.96

<sup>1)</sup>等モーメント区間のはり下面に貼付したひずみゲージの急変点から決定した。  
<sup>2)</sup>コンクリート最大引張縁ひずみが $150 \times 10^{-6}$ に達したときの抵抗モーメントから算出した。  
<sup>3)</sup>コンクリート最大圧縮縁ひずみが $3500 \times 10^{-6}$ に達したときの抵抗モーメントから算出した。

ートの圧縮強度や引張鉄筋の材料特性は実験値をそのまま用いた。本解析ではコンクリートの引張応力を考慮し、最大引張応力  $f_t=0.58 f'_c$  とし最大引張ひずみ  $\epsilon_t=150\mu$  と一義的に決定し、コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線の放物線形状と相似形の応力-ひずみモデルを用いた。さらに、ボンドはりの解析では、PC鋼材の緊張方式による違いは考慮してなく、ポストテンション方式、プレテンション方式のいずれともPC鋼材とコンクリートの付着状態は完全付着であると仮定した。

アンボンドはりの解析方法は、六車<sup>2)</sup>や睦好<sup>5)</sup>が提案しているアンボンドPCはりの解析方法を用いた。アンボンドはりは付着がないために、ある断面におけるPC鋼材位置のコンクリートとPC鋼材のひずみが一致しなく、ボンドはりで適用したひずみの平面保持の仮定が成り立たない。そのため、PC鋼材の伸びとPC鋼材位置のコンクリートの変形(ひずみの総和)が、はり部材全長にわたり等しいという変形の適合条件を用いる。曲げ解析におけるはりの終局状態(最大荷重)は、ボンドはり・アンボンドはりとも最大圧縮縁ひずみ  $\epsilon'_{cm}$  を入力データとし  $\epsilon'_{cm}=3500\mu$  で終局状態(最大荷重)に達するという仮定を用いた。

図-5および図-6に、実験および解析値による荷重-引張鉄筋のひずみ関係および荷重-コンクリートの圧縮縁ひずみ関係の一例を示す。引張鉄筋のひずみは引張鉄筋の6箇所貼付したひずみゲージのうち最大値とした。圧縮縁ひずみは、コンクリート上面に貼付した5箇所のひずみゲージの平均値である。

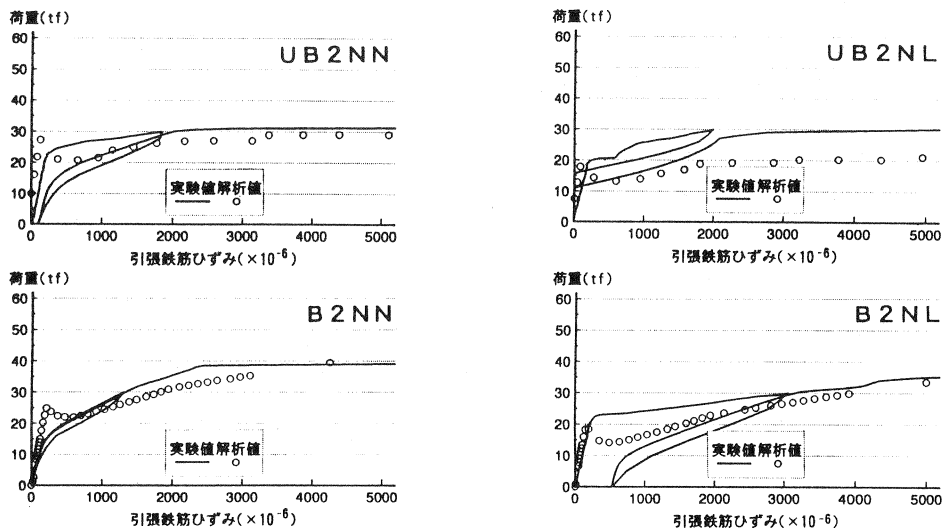


図-5 荷重-引張鉄筋のひずみ関係

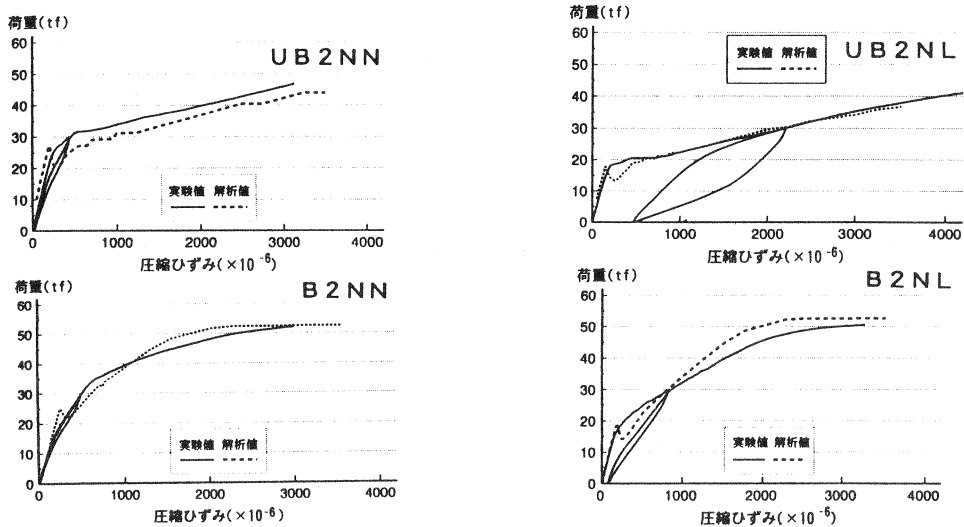


図-6 荷重-コンクリートの圧縮縁ひずみ関係

引張鉄筋のひずみに関しては、曲げひび割れの影響を受けて実験値に多少のばらつきがあることを考慮すると、解析値と実験値は概ね一致していると思われる。さらに、コンクリートの圧縮縁ひずみに関しては、載荷初期から終局状態まで解析値は実験値と非常に良好な整合性を示す。

本実験の範囲では、アンボンドはりの曲げ耐力がボンドはりの曲げ耐力に比べ30%程度低下した供試体はなかった。実験値において最大の低下率は、有効プレストレス量が小さいB2NL供試体に対するUB2NL供試体の最大荷重の低減率13%である。一方、それらの供試体の解析値では低減率が30%となり、示方書の解説の低減率30%と一致する。アンボンドはりの場合、付着がないためにPC鋼材のひずみが部材軸全長で平均化されるためにボンドはりのPC鋼材と比較してひずみが増大せず、PC鋼材の応力が高応力レベルに達する前にコンクリートの圧縮縁ひずみが終局ひずみに達する。その結果として、曲げ耐力が低下する。

したがって、有効プレストレス量が小さく部材軸が長いはり部材ほど、アンボンドはりの曲げ耐力が低下するものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- ① アンボンドPRCはり部材の曲げ耐荷特性は、従来アンボンドPCはりの解析で用いられている部材軸全長にわたるPC鋼材とPC鋼材位置のコンクリートの変形の適合条件を適用することにより、精度よく予測することができる。
- ② PRCはりの曲げひび割れ幅の制御に関して、引張鉄筋量を増加させることは有効である。
- ③ 引張鉄筋降伏後の曲げ破壊形式のPRCはりの場合、コンクリートの圧縮強度の増加は曲げひび割れ幅の制御に有効ではない。
- ④ 付着のあるPRCはり部材に対してアンボンドPRCはり部材の曲げ耐力の低下がより顕著になる条件としては、有効プレストレス量が小さく部材軸が長い場合であると予想される。

謝辞 本研究は公益信託斎藤記念プレストレスト・コンクリート技術研究奨励基金平成5年度(第17回)研究助成を受けて行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年度版】設計編11章プレストレストコンクリート，pp.127～128，1991.9.30
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成3年版)改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向6.プレストレストコンクリート，コンクリートライヴ79-70，pp.93，1991.9.30
- 3) 六車・渡辺・西山：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，Jan.1984
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年度版】設計編3章材料の設計用値，pp.16～34，1991.9.30
- 5) 睦好宏史・町田篤彦：FRPを外ケーブルに用いたPCはりの力学的性状および曲げ耐力，土木学会論文集，No.442-V-16，pp.153～159，1992.2