

(21) 100N/mm²級の超高強度P R Cはり部材の曲げひび割れ性状に関する実験的研究

群馬大学 建設工学科 正会員 ○橋本 親典
 群馬大学 建設工学科 正会員 辻 幸和
 群馬大学 建設工学科 杉山 隆文
 トービー建設工業(株) 正会員 金井 昌義

1. はじめに

現行の土木学会のコンクリート標準示方書 [設計編]¹⁾では、「P R C構造は、使用限界状態においてひび割れの発生を許容し、異形鉄筋の配置とプレストレスの導入により、ひび割れ幅を制御する構造である。」と定義されている。すなわち、P R C構造は、R C構造とP C構造の中間に位置し、R C構造とP C構造両方の性質を有する構造である。ひび割れを許すR C構造とひび割れを許さないP C構造の中間にあるP R C構造を最もよく特徴づける力学的性質は、ひび割れ挙動であり、P R C構造の設計においてはひび割れ幅の算定が重要となる。示方書¹⁾では、「P R C構造の曲げひび割れ幅の検討は、P C鋼材の外側に配置される異形鉄筋を対象として検討するため、通常の曲げひび割れ幅算定式を用いてよい。」と記述されている。

ところで、近年のコンクリート材料の技術の発展は目覚ましく、シリカフェーム、高粉末度高炉スラグ微粉末、分級フライアッシュや微粉砕石灰石粉等の各種粉末材料の利用と高性能減水剤、高性能A E減水剤等の混和剤の開発により、圧縮強度が100N/mm²以上の超高強度コンクリートの製造が可能になってきた。最近では、現場施工で設計基準強度が100N/mm²という超高強度プレストレストコンクリート橋の実験施工が報告されている²⁾。けた高を低減し、けた重量が軽くなり、支承部や下部工を軽減できたり、スパンを長大化できるなどの利点がある超高強度化の傾向は、今後、P R C構造に対しても適用されることが予想される。

しかし、圧縮強度に比べて引張強度がさほど高くないため、ひび割れに対する性能や鋼材とコンクリート間の付着応力に対する性能の向上が圧縮応力に対する性能の向上に比較して期待できないという欠点がある。したがって、超高強度P R C構造を設計する場合は、ひび割れの発生を許さないP C構造の場合とは異なり、コンクリートの超高強度化がひび割れ挙動に与える影響を明らかにする必要がある。

本研究では、構造体コンクリートの圧縮強度が100N/mm²級の超高強度P R Cはり部材を対象とし、P R Cはりの緊張材の付着状態を種々に変化させて、緊張材の付着性状が曲げひび割れ性状に及ぼす影響について実験的に検討する。また、土木学会の示方書¹⁾の曲げひび割れ幅算定式の適用性についても考察する。

2. 実験概要

2.1 供試体および使用材料

実験に用いたP R Cはり供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は、400×250mmの矩形断面で、桁長さ3600mmとし、引張鉄筋ならびに圧縮鉄筋としてSD345 D13鉄筋(公称断面積126.7mm²,降伏点385N/mm²,引張強さ538N/mm²,ヤング率2.0×10⁵N/mm²)を、P C鋼材としてSWPR7B7本より15.2mmのP C鋼より線(公称断面積138.7mm²,引張荷重273.6kN,0.2%永久伸びに対する荷重241.2kN)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SD295A D10鉄筋(公称断面積

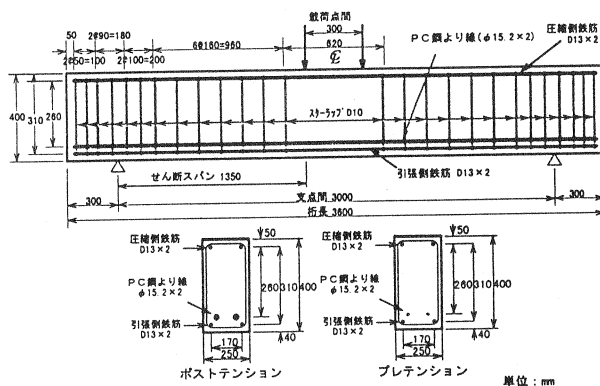


図-1 供試体の形状および寸法

71.33mm², 降伏点383N/mm², 引張強さ
535N/mm², ヤング率2.0×10⁵N/mm²)

をせん断スパン内に160mm間隔で配置した。また、はり端部の定着部付近にはP C鋼材の定着破壊を防止するためにSD295A D10鉄筋を支点外側300mmの定着端部内に4本および支点内側300mmのせん断スパン内に3本配置した。なお、等曲げモーメント区間にはせん断補強鉄筋は配置していない。ポスト

表-1 供試体種別

番号	供試体名	P C鋼より線の緊張方式/付着状態	構造体コンクリート強度(N/mm ²)	有効プレストレストレ質量(N/mm ²)	クラウト強度(N/mm ²)
1	PRE80	プレテンション/完全付着	102.6	898.5	—
2	POST80H	ポストテンション/クラウト充填	111.2	(0.2%永久伸び)	48.3
3	POST80L	ポストテンション/クラウト充填	112.0	び荷重の80%	16.8
4	UNBOND80	ポストテンション/クラウトなし	111.6	相当応力度)	—
5	PRE50	プレテンション/完全付着	113.7	562.8	—
6	POST50H	ポストテンション/クラウト充填	106.6	(0.2%永久伸び)	48.3
7	POST50L	ポストテンション/クラウト充填	103.5	び荷重の50%	16.8
8	UNBOND50	ポストテンション/クラウトなし	105.2	相当応力度)	—

テンション方式のP R Cはりに用いたシース管は薄鋼板製でφ42mmである。

作製した供試体は全部で8体であり、表-1に供試体種別の詳細を示す。構造体コンクリートの圧縮強度はすべて100N/mm²以上である。P C鋼より線の付着状態は、プレテンション方式とポストテンション方式のP R Cはりを作製し、クラウト強度とクラウト充填の有無によって、完全付着状態から完全非付着状態まで4段階に変化させた。プレテンション方式のP R Cはりの付着状態が最も良好で完全付着状態とし、ポストテンション方式でクラウトを充填しないP R Cはりを完全な非付着状態のアンボンドはりとして想定した。ポストテンション方式でクラウト充填したP R Cはりには、プレテンション方式のP R CはりとしてアンボンドP R Cはりの中間に位置すると考え、クラウト強度を50N/mm²と20N/mm²の2種類とし、完全付着と完全非付着状態の間を2段階に変化させた。

緊張材の付着状態に影響を及ぼす要因として、緊張材の引張ひずみの増分がある。当然のことながら、導入される有効プレストレス量が小さい場合、曲げひび割れ発生荷重が小さくなり、同一曲げモーメントに対する緊張材の引張ひずみの増分が大きくなり、有効プレストレス量大きい場合と比較して、小さな荷重レベルにおいて緊張材に発生する付着応力度が増大する。したがって、有効プレストレス量を減少させることにより、小さな荷重レベルで緊張材の付着状態が曲げひび割れ性状に与える影響を顕著にさせることができる。

本研究では、有効プレストレス量を898.5N/mm²と562.8N/mm²の2種類に変化させた。この898.5N/mm²は、ポストテンション方式のP R Cはり部材でのP C鋼より線1本あたりの初期緊張力を、0.2%永久伸びに対する荷重の規格値である222kNの約80%である171.6kN (171.6kN÷222kN=0.773)とし、P C鋼より線のリラクセーションによる減少、弾性変形による減少、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による減少や残留リラクセーションによる減少等を考慮して、P R C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。すなわち、171.6kN/138.7mm²=1242.8N/mm²と898.5N/mm²の差が、前述した各要因による初期導入プレストレスの減少量である。また、プレテンション方式のP R Cはりの初期緊張力は、153.0kN/本とした。これは、プレテンション方式のP R Cはりがポストテンション方式よりもP C鋼より線のプレストレスの減少量が小さく、はり中央断面の有効プレストレス量が同一の場合、初期緊張力が小さくなるためである。

同様に、有効プレストレス量562.8N/mm²は、ポストテンション方式のP R Cはり部材での初期緊張力を、0.2%永久伸びに対する荷重の規格値である222kNの約50%である115.8kN/本 (115.8kN÷222kN=0.522)として、各要因による初期導入プレストレスの減少量を考慮して、P R Cはり中央断面位置で有効に作用するプレストレス量である。有効プレストレス量562.8kN/mm²に対するプレテンション方式のP R Cはり部材の初期緊張力は、95.6kN/本である。

以後、有効プレストレス量が898.5N/mm²および562.8N/mm²を導入したP R Cはり供試体を、それぞれ「プレストレス導入率80%の供試体」、「プレストレス導入率50%の供試体」と称する。

P C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P C鋼より線に与

えられる引張応力(ひずみ)の経時変化は、供試体のはり中央部のコンクリート側面の上下縁に貼付したコンタクトチップ間の距離の経時変化を計測し、弾性変形と仮定したコンクリートの変形量から間接的に求めた。その結果、載荷試験開始前までには緊張材1本当たり最大で13.3kN(供試体名:UNBOND80)の損失が計測された。設計ではプレストレス導入率80%のポストテンション方式のPRCはりでプレストレスの損失量を約47.8kNとしており、初期に設定したプレストレスは十分に導入されていることを確認した。

供試体に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。超高強度コンクリートとして設計圧縮強度を100N/mm²とし、セメントは早強ポルトランドセメント(比重3.14,比表面積4500cm²/g)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2.67)および碎石(表乾比重2.74,粗粒率6.61)を使用した。混和剤としてはポリカルボン酸塩と変性リグニンを主成分とするポリカルボン酸系の高性能AE減水剤の標準形を使用した。混和材としてシリカフェーム(商品名:ミックスタイト,輸入代理店:エルケムジャパン(株))を用いた。なお、練混ぜ水は上水道水を用いた。

養生方法としては、コンクリート打込み後型枠全体をビニールシートで覆い、24時間蒸気養生し、その後、屋外のはり製作ヤード内で気中養生とした。はり供試体と同時に作製した圧縮試験用の円柱供試体の圧縮強度試験を行い、プレストレス導入時強度として60N/mm²以上の強度発現を確認したのち、供試体間の乾燥収縮やクリープの影響を排除するために、8体の供試体とも同じ日にプレストレスの導入を行った。曲げ載荷試験時における各供試体の構造体コンクリートの圧縮強度は、表-1に示す。

ポストテンション方式のPRCはりのうち、グラウト充填に用いたPCグラウトの配合ならびに諸性状を表-3に示す。PCグラウトの設計圧縮強度は、50N/mm²(高強度グラウト)と20N/mm²(低強度グラウト)の2種類とした。セメントは、高強度グラウトにはシリカフェーム混入セメント(比重3.01,粉末度約6000cm²/g)を、低強度グラウトには普通ポルトランドセメント(比重3.16,比表面積3310cm²/g)を用いた。混和剤は、高強度グラウトには水溶性ビニル共重合体を主成分とする高性能AE減水剤と遊離した酸化カルシウムを主成分とする高性能膨張材を、低強度グラウトにはアルルスルホネートを主成分とする高性能減水剤と反応遅延性のアルミニウム粉末を主成分とする膨張剤を用いた。練混ぜ水は上水道水を用いた。

表-3に示すように、低強度グラウトの圧縮強度以外の2種類のグラウトの諸性状は、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]の「27.2.6 P Cグラウト³⁾」で定められている品質規準を満たすものである。

表-2 超高強度コンクリートの示方配合

粗骨材 最大 寸法 (mm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	水結合 材比 W C±SF (%)	シリカフェ- A 置換率 SF C±SF (%)	細骨 材率 s a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						結合材			高性能 AE 減水剤 (×C)		
						水 W	セメント C	シリカフェ-A SF		細骨材 S	粗骨材 G
20	50±5	2±1	23	10	39	160	626	70	605	980	2.2%

表-3 グラウト充填に用いたPCグラウトの配合および諸性状

	水セメ ント比 (%)	減水剤 添加率 (%)	膨張材(剤) 添加率 (%)	J A 漏斗 流下時間 (sec)	膨張率 (%)	ブリーデ ィング率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
高強度グラウト	30	2.5	3.0	26	2.70	0.00	48.3
低強度グラウト	40	1.0	0.008	18	1.52	0.23	16.8

2.2 載荷および測定方法

載荷試験方法は、スパン3000mm,等曲げモーメント区間300mmの2点集中載荷とし、曲げひび割れが発生して引張鉄筋が降伏ひずみに達する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し、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、等曲げ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圧縮鉄筋のひずみを測定した。また,10cmピッチで引張下縁から5cm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,等曲げモーメント区間のひび割れ幅を測定した。たわみは,スパン中央と両支点位置に変位計を設置し相対変位として測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 曲げひび割れ発生状況

本載荷実験で得られた最終ひび割れ状況図を図-2に示す。供試体はすべて、曲げひび割れが発生した後にせん断スパン内に斜めひび割れが発生し、引張鉄筋が降伏した後に、コンクリートの圧縮部の圧壊によって最大荷重に達して終局状態に至るといった破壊性状を示した。

プレストレス導入率80%では、高強度グラウトを充填したポストテンション方式のPOST80Hが、ひび割れ間隔が小さくかつひび割れ本数が多い、最も良好な曲げひび割れ

の分散状態である。これに対し、グラウト未充填のアンボンドP R CはりのUNBOND80は、曲げひび割れが等曲げモーメント区間では1カ所に集中し、P R Cはりのひび割れ制御の目的で配置された異形鉄筋によるひび割れの分散効果が全く現れていない。また、低強度グラウトを充填したPOST80Lに関しては、UNBOND80ほどはひび割れが集中していないが、POST80Hと比較すると、ひび割れ間隔が大きくひび割れ本数も少ない。プレテンション方式でP C鋼より線の付着状態が4体の供試体のうち最も良好と考えられたPRE80のひび割れ発生状況は、概ねPOST80Lと同程度であり、POST80Hよりもひび割れ性状が劣っている。この現象は、緊張材と超高強度コンクリートとの複合機構の観点から以下のように説明できる。

構造体コンクリートの超高強度化によって、緊張材と周囲のコンクリート間の付着性能が良好になり、異形鉄筋のような機械的付着はコンクリートのひび割れ部の近傍で付着応力度が著しく増大する。一方、コンクリートの曲げ引張強度も大きくなるために、緊張材から周囲のコンクリートに伝達される引張応力が最初のひび割れ発生位置で集中的に伝達され、超高強度コンクリートに対して新たな曲げひび割れを発生させるだけの引張応力が異形鉄筋に伝達されにくくなる。その結果、最初のひび割れ位置の緊張材に大きな引張ひずみが発生して高い付着応力を負担し、近傍の緊張材や異形鉄筋には付着応力が伝達されなく、次のひび割れが発生しにくくなり、ひび割れ間隔が大きかつひび割れの本数が少なくなる。

これに対し、グラウト強度が $50\text{N}/\text{mm}^2$ 程度でP C鋼より線の周囲を充填されたPOST80Hでは、緊張材と構造体コンクリートが直接接していないため、構造体コンクリートよりも $50\text{N}/\text{mm}^2$ 程度小さいグラウト層が緩衝材となり、緊張材とコンクリート間に高い付着応力度が発生しなく、その応力増分は異形鉄筋を介して次々に周辺のコンクリートに伝達される。その結果、良好なひび割れ分散状況に至る。

プレストレス導入率50%では、アンボンドP R CはりのUNBOND50が曲げひび割れが等曲げモーメント区間では1カ所に集中し、UNBOND80の場合と同様である。これは、P C鋼より線の付着応力度が零であるために、周囲のコンクリートや異形鉄筋に引張応力が伝達されずに最初にひび割れが発生した箇所ですべてのP C鋼より線の伸びが集中してしまうためである。また、PRE50、POST50HおよびPOST50Lともひび割れ発生状況はあまり変化してなく、POST80Hと比較すると良好なひび割れ状況とは言い難い。ただし、PRE50とPOST50Hのひび割れ発生状況とPOST50Lのそれとは原因が異なるものと考えられる。すなわち、PRE50とPOST50Hのひび割れ発生状況があまり良好でない原因は、有効プレストレス量が小さいために曲げひび割れ発生以降のP C鋼より線の引張ひずみの増分が大きくなり、プレストレス導入率80%の場合よりも相当大きな付着応力度が発生

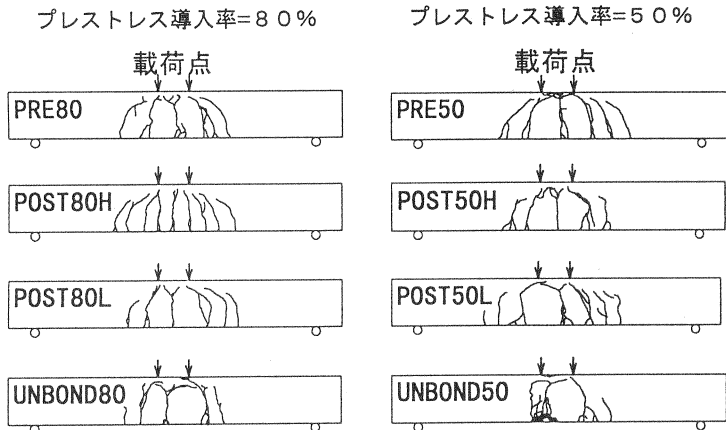


図-2 最終ひび割れ状況図

し、上述したPRE80の場合と同様なメカニズムによるものと考えられる。一方、POST50Lの場合は、曲げひび割れ発生以降に生じたP C鋼より線の引張りひずみの増分に対して、低強度グラウトとP C鋼より線間の付着強度が低下し、UNBOND50と同様に付着状態がアンボンドはりの場合に近くなったためと想像される。

3.2 曲げひび割れ幅

プレストレス導入率別に最大曲げひび割れ幅と荷重の関係を図-3に示す。8供試体とも等曲げモーメント区間中央に貼付したパイゲージで計測された曲げひび割れ幅が他の計測位置の曲げひび割れ幅よりも常に大きい値であったため、等モーメント区間中央に発生した曲げひび割れ幅を最大曲げひび割れ幅とした。

基本的にパイゲージは検長10cm区間の変形量を計測する高精度の変位計であり、ひび割れが発生していない載荷初期段階では部材の弾性変形を計測し、パイゲージの測定データから曲げひび割れが発生する時点は判断できない。そのため、荷重-たわみ曲線の載荷初期剛性が変化する変曲点の荷重を曲げひび割れ発生荷重と見なし、この曲げひび割れ発生荷重時に対応する曲げひび割れ幅を最大曲げひび割れ幅と荷重の関係の始点とした。したがって、図-3の曲線群の個々の始点は原点とは一致していない。

プレストレス導入率80%では、同一荷重におけるひび割れ幅が最も小さい供試体がPOST80Hであり、逆に最も大きい供試体はUNBOND80である。PRE80とPOST80Lはほとんど同様な傾向であり、POST80HとUNBOND80の曲線の間に存在する。これは、曲げひび割れ発生状況と同じ傾向である。

プレストレス導入率50%でも、80%の場合と同じで曲げひび割れ発生状況とほぼ同じ傾向である。すなわち、UNBOND50のみが曲げひび割れ発生後に急激にひび割れ幅が増大する。PRE50、POST50HとPOST50Lはほぼ同じ傾向である。この傾向は、プレストレス導入率80%の場合と同様で、前節の曲げひび割れ発生状況で得られた知見と一致する。

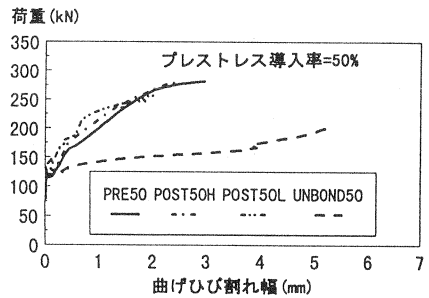
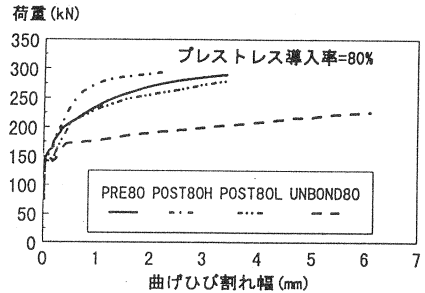


図-3 曲げひび割れ幅と荷重の関係

3.3 曲げひび割れ幅算定式の適用性の検討

本載荷実験で得られた超高強度コンクリートP R Cはり部材の最大曲げひび割れ幅の実験値に対して、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕の中で(1)式で示す曲げひび割れ幅 w_{max} の算定式の適用性について検討する。

$$w_{max} = k1 \{ 4c + 0.7 (cs - \phi) \} (\sigma_{se} / E_s + \epsilon_{cs}) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $k1$ は鋼材の付着性状の影響を表す定数で、一般に異形鉄筋の場合には、1.0、普通丸鋼およびP C鋼材の場合には1.3としてよい。 c はかぶり、 cs は鉄筋の中心間距離、 ϕ は鉄筋径、 σ_{se} は鉄筋応力度の増加量、 E_s は鉄筋の弾性係数、 ϵ_{cs} はコンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値で、一般に 150×10^{-6} としてよい。

図-4に各供試体の最大曲げひび割れ幅と荷重の関係を示す。検討すべき曲げひび割れ幅の最大値は、異形鉄筋の一般環境下での許容ひび割れ幅($w_a = 0.005c$)の2倍程度とし、 $2w_a = 2 \times 0.005 \times 40 = 0.4mm$ とした。(1)式を適用するにあたり、 σ_{se} は曲げ解析によって得られる曲げモーメント-引張鉄筋のひずみの関係から、任意の荷重レベルに対する引張鉄筋のひずみの増分とした。プレテンション方式とグラウト充填のポ

ステンション方式のボンドP R Cはりに対しては、通常のファイバーモデルを用いコンクリートの圧縮縁ひずみ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、P C鋼より線の力の釣合から抵抗モーメントを算出し、各荷重レベルにおける引張鉄筋のひずみを求めた。したがって、緊張方式やグラウトの強度の違いによる付着性状は考慮していない。

グラウト未充填のアンボンドP R Cはりに対しては、六車らや睦好らが提案しているアンボンドはりの解析方法を用いた。すなわち、P C鋼材の伸びとP C鋼材位置のコンクリートの変形(ひずみの総和)が、はり全長にわたり等しいという変形の適合条件を用いて、曲げ解析を行い、各荷重レベルにおける引張鉄筋の増分を算出した。なお、解析値の最大曲げひび割れ幅が0.4mmのとき、いずれの供試体の場合も引張鉄筋は降伏していない。

また、本載荷実験の供試体は、約2ヶ月間の養生期間中ならびに約2時間の載荷試験中に、乾燥収縮によるひび割れは肉眼でははり全長にわたって1つも観察されなかった。したがって、コンクリートの乾燥収縮の影響は小さいとして ϵ_{cs} を零とした。

8体の供試体いずれにおいても、曲げひび割れ幅の解析値と実験値は概ね一致している。これは、(1)式の曲げひび割れ幅算定式を用いて使用限界状態における超高強度P R Cはり部材の曲げひび割れ幅を予測することが可能であることを意味する。

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 100N/mm²級の超高強度P R Cはりでは、プレテンション方式よりも高強度グラウトを充填したポストテンション方式のP R Cはりの方が曲げひび割れ性状が良好である。
- ② 100N/mm²級の超高強度P R Cはりでは、発生する緊張材の付着応力が大きくなると、ひび割れ間隔が大きくなりひび割れ本数が少なくなり、必ずしも超高強度化はひび割れ性状に有効ではない。
- ③ 超高強度P R Cはりの使用限界状態における最大曲げひび割れ幅に対して、土木学会のコンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅算定式が適用可能である。

謝辞 本研究の一部は、平成7年度科学研究費補助金(一般研究(C)07650524, 研究代表者:辻幸和)を受けて行いました。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[設計編]「10章プレストレストコンクリート」,pp.127~146,1996.3
- 2)三井健郎他:高強度コンクリートの施工-CNTスーパーブリッジの施工-,pp.45~50,コンクリート工学,Vol.32, No.7,1994.7
- 3)土木学会:コンクリート標準示方書[施工編]「27.2.6 P Cグラウト」,pp.293~296,1996.3

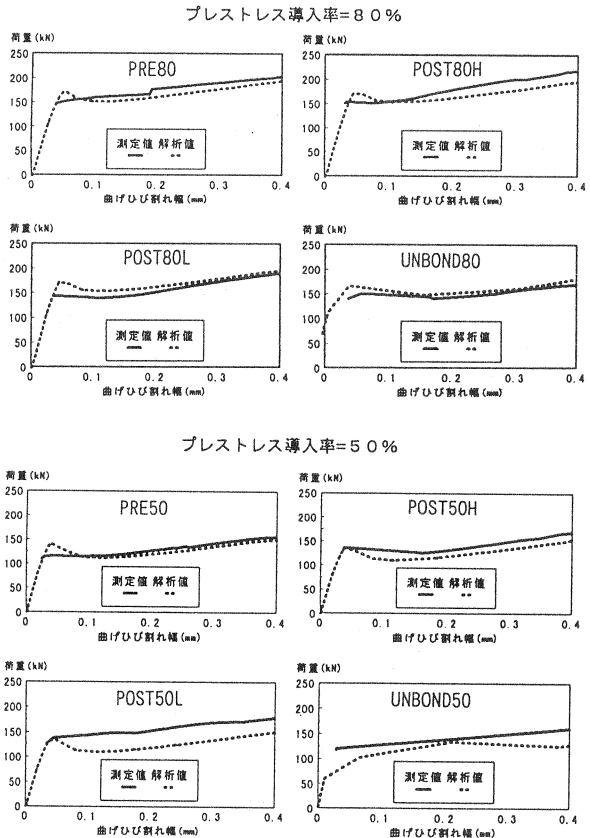


図-4 曲げひび割れ幅と算定式による解析値の比較