

(101) 超高強度コンクリートを用いたプレテンションPRCはりの曲げひび割れ性状

群馬大学 大学院 ○山口 光俊
 群馬大学 工学部 正会員 辻 幸和
 ドービー建設工業(株) 正会員 金井 昌義
 徳島大学 工学部 正会員 橋本 親典

1. はじめに

近年コンクリートの高強度化が進み、圧縮強度が 100N/mm^2 を超える超高強度コンクリートの製造が可能となった。また、コンクリート技術の発展により、シリカフューム、フライアッシュ等の各種混和材の利用と、高性能減水剤、高性能AE減水剤等の混和剤の開発により、超高強度コンクリートであり、かつ流動性に富んだ超高強度高流動コンクリートの製造も可能となってきた。しかしながら、超高強度コンクリートを用いたPRCはりの研究および施工例は少なく、プレテンション方式による超高強度高流動コンクリートを用いたPRCはりの研究はこれまで報告されていない。

橋本ら^{1) 2)} はこれまでに、高性能AE減水剤とシリカフュームを用いて単位粉体量を増加させ、スランプフロー 55cm 程度の高流動系の超高強度コンクリートを用いて、圧縮強度 100N/mm^2 程度のポストテンション方式によるPRCはりの曲げ耐荷特性に関する実験的研究、および高性能減水剤のみを用い単位水量を減らし、スランプ 10cm 程度の高強度系の超高強度コンクリートを用いたポストテンション方式によるPRCはりとの曲げ耐荷特性の比較をそれぞれ報告してきた。

本研究ではプレテンション方式によるPRCはりに着目し、コンクリートの設計圧縮強度を 100N/mm^2 、 70N/mm^2 とした高流動系および高強度系の超高強度コンクリート部材を対象とし、曲げひび割れ性状に及ぼすコンクリート強度の影響について実験的に検討する。また、土木学会コンクリート標準示方書³⁾ における曲げひび割れ幅の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

実験に用いたプレテンション方式によるPRCはり供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は $400 \times 250\text{mm}$ の矩形断面で、桁長 3600mm とした。引張鉄筋および圧縮鉄筋としてSD345 D13 鉄筋(公称断面積 126.7mm^2 、降伏点 385N/mm^2 、引張強さ 538N/mm^2 、ヤング率 $2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$) 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 138.7mm^2 、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しないように、SD295A D10 鉄筋(公称断面積 71.33mm^2 、降伏点 383N/mm^2 、

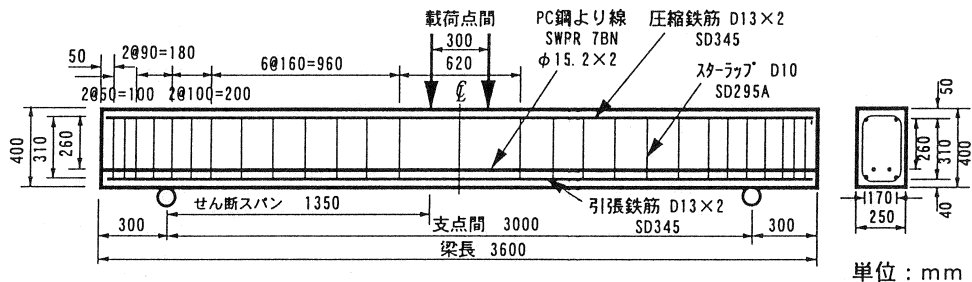


図-1 供試体の形状寸法

引張強さ 535N/mm², ヤング率 2.0×10⁹N/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内にはせん断補強鉄筋は配置していない。

表-1 に供試体種別の詳細を示す。研究に用いた供試体は全部で 5 体であり, うち HS100-2 を除く 4 体の P R C はりを今回作製した。また, P C 鋼より線の付着状態はすべてプレテンション方式による完全付着状態である。

本研究では, 有効プレストレス量を 898.5N/mm² とした。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。なお, 今回作製し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のに比べ, 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。

表-1 供試体種別

	供試体名	緊張方式	圧縮強度(試験時) (N/mm ²)	有効プレストレス量 (N/mm ²)
高流動 コンクリート	HS100-1	プレテンション方式	89.4	898.5 (0.2%永久伸びに 対する荷重の約80%)
	HS100-2		102.6	
	HS70		71.1	
高強度 コンクリート	HF100		84.4	
	HF70		53.5	

供試体に用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリートの配合は, 高流動系と高強度系の 2 種類とし, 設計圧縮強度は, 超高強度コンクリートとして 100N/mm² および高強度コンクリートとして 70N/mm² とした。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) および砕石(表乾比重 2.74, 粗粒率 6.61) を使用した。また高流動系のコンクリートには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 A E 減水剤の標準形をセメントに対する 2.2% とした。混和剤としてはシリカフェームを用い, 置換率を 10% とした。高強度系のコンクリートには混和剤としてアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤および混和剤として高強度用混和剤を使用した。なお, 練混ぜ水は

表-2 コンクリートの配合

高流動 コンクリート	水結合 材比 W/C+SF (%)	細骨 材率 s/a (%)	スラン プ 70- (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					高性能 AE 減水剤 (G+SF) C×(%)
					水 W	セメ ント C	シリ カ フェ- ム SF	細骨材 S	粗骨材 G	
HS100-1	23.0	39.0	50×50	3.8	160	626	70	605	980	2.2
HS100-2	23.0	39.0	50×50	2.0	160	626	70	605	980	2.2
HS70	33.0	45.0	55×52	4.0	160	436	49	789	980	2.4

高強度 コンクリート	水セメ ト比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					高性能 減水剤 C×(%)	
					水 W	セメ ント C	シリ カ フェ- ム SF	細骨材 S	粗骨材 G		高強度 用 混和材
HF100	22.8*	41.0	14.0	2.2	138	550	—	728	1100	55	1.75
HF70	35.0	41.0	19.5	1.8	175	500	—	711	1056	—	1.4

* 水結合材比

上水道水を用いた。

養生方法としては、コンクリートの打込み後、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。曲げ載荷試験時における各供試体のコンクリート圧縮強度は表-1に示す。

2.2 載荷および測定方法

載荷試験方法は、支点間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、引張鉄筋が降伏するまで静的漸増載荷した。その後、一旦荷重を除荷し、破壊に至るまで再び静的漸増載荷した。

載荷試験における各測定はすべて荷重ステップ毎に行った。等曲げモーメント区間のコンクリート圧縮上面(3箇所)、引張下面(5箇所)、圧縮鉄筋(4箇所)および引張鉄筋(6箇所)に貼付したワイヤ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、圧縮鉄筋ひずみおよび引張鉄筋のひずみを測定した。また、100mm間隔で供試体側面の引張鉄筋位置に設置したパイ型変位計(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、はり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 曲げひび割れ発生荷重と最大荷重

供試体はすべて、曲げひび割れ発生後、引張鉄筋が降伏し、コンクリートの圧縮縁の圧壊によって終局状態に至るといふ破壊性状を示した。各供試体の曲げひび割れ発生荷重と最大荷重を実験値と解析値を併せて図-2、図-3に示す。

解析値は構造体コンクリートとPC鋼材が完全付着状態であるため、通常ファイバーモデルを用いた。コンクリート圧縮縁ひずみ ϵ'_{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鋼材の力の釣合い条件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鋼より線の応力-ひずみ関係もモデルは、すべて土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕で提案されているモデルである。また、本解析ではコンクリートの引張応力を考慮し、最大引張応力を $f_t = 0.27 f_c^{2/3}$ (N/mm²)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。

解析に用いた材料特性値としては、コンクリートの圧縮強度は、試験時における圧縮強度そのまま用い、引張鉄筋の材料特性値は、降伏強度である385kN/mm²を用いた。また、PC鋼より線の材料特性値である引

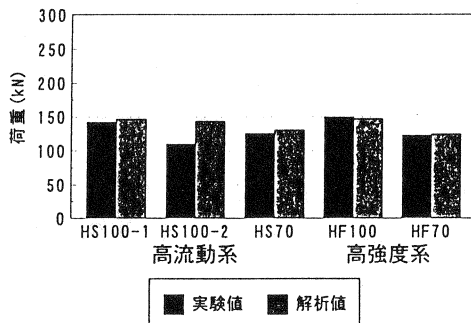


図-2 曲げひび割れ発生荷重

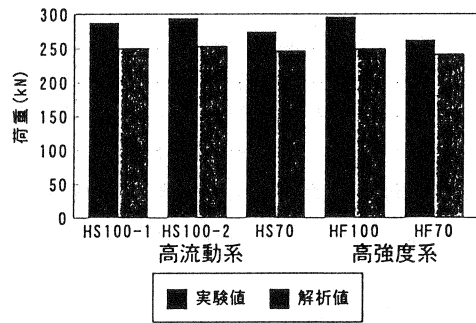


図-3 最大荷重

張強度は、材料特性である0.2%永久伸びに対する荷重をPC鋼より線の公称断面積で除した値、すなわち $241.2\text{kN}/138.7\text{mm}^2=1739.0\text{N}/\text{mm}^2$ を用いた。ただし、実際のPC鋼より線の引張破壊時は、より線の断面積が公称断面積よりも相当減少するものと考えられ、引張強度はこの値よりも増加するものと思われるが、安全側の値としてこの値を用いた。

曲げひび割れ発生荷重の実験値は、供試体下面の等曲げモーメント区間に貼付した引張縁のひずみゲージの急変点とした。解析値においても同様に、算出した引張縁の応力-ひずみ曲線の急変点をひび割れ発生荷重とした。

同一圧縮強度における曲げひび割れ発生荷重および最大荷重は、高流動系と高強度系に顕著な差は見られない。また、高強度系で認められるコンクリートの圧縮強度が増加すると曲げひび割れ発生荷重および最大荷重が増加する傾向は、高流動系についてもほぼ同様な傾向が見られるが、顕著ではない。

曲げひび割れ発生荷重の実験値および解析値はHS100-2を除き、ほぼ一致している。また、最大荷重の実験値が解析値に対してすべて大きい値を示しているのは、PC鋼より線の引張強度の材料特性値を安全側に設定したためと考えられる。

3.2 曲げひび割れ発生状況

本載荷試験で得られた最終ひび割れ状況を図-4に示す。高強度系は、圧縮強度が高くなるとひび割れ本数の減少とひび割れ間隔が広がる傾向が見られる。この傾向は高流動系においても同様である。

一方、同一圧縮強度における高流動系と高強度系のコンクリートの配合による差はほとんど認められない。したがって、プレテンション方式によるPRCはりにおいても超高強度コンクリートの配合の影響はないと考えられる。

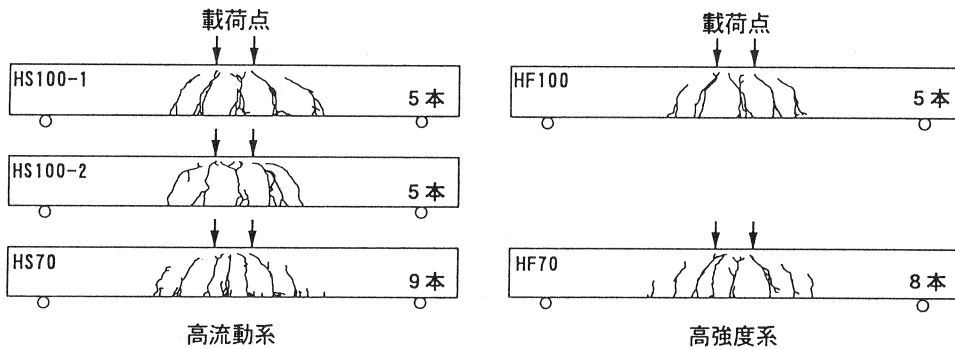


図-4 最終ひび割れ状況

3.3 曲げひび割れ発生以前の曲げ挙動

図-5は、載荷開始から曲げひび割れが発生する直前までのコンクリートの引張縁ひずみと荷重の関係を示したものである。解析値は実験値と比較して引張剛性が高い。これは、解析に用いたコンクリートの引張弾性係数を実際と異なって大きく設定したためと考えられる。

いずれの圧縮強度においても、実験値は高流動系と高強度系の配合による差異は見られず、一致している。したがって、曲げひび割れ発生以前において材料特性の違いが高強度コンクリートに与える影響はないと考えられる。

3.4 曲げひび割れ発生後の曲げ挙動

圧縮強度別に最大曲げひび割れ幅と荷重の関係を図-6に示す。最大曲げひび割れ幅とは、等曲げモー

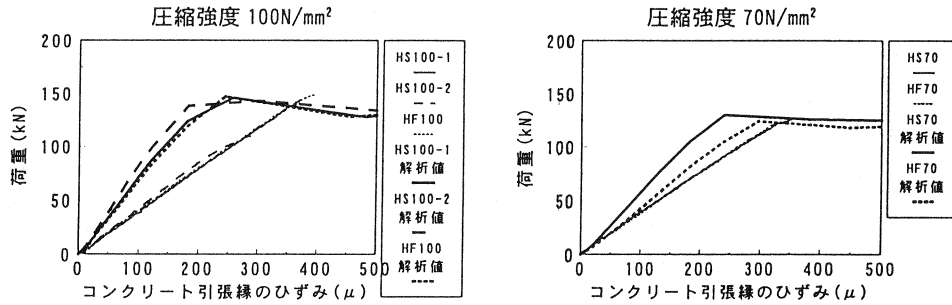


図-5 引張縁ひずみと荷重の関係

ント区間で測定された曲げひび割れのうち最大値を計測したものである。基本的にパイ型変位計は 100mm の区間の変形量を計測する高感度の変位計であり、ひび割れの発生していない荷重初期段階では、はりのその位置における伸びを示している。

コンクリートの圧縮強度が 70N/mm² において、高流動系と高強度系の最大ひび割れ幅の増加傾向はほぼ一致しており、曲げひび割れ発生状況と同じ傾向である。また、コンクリートの圧縮強度が 100N/mm² では、同一荷重において高流動系が高強度系よりも比較的大きな曲げひび割れ幅となっているが顕著な差ではない。これも、圧縮強度が 70N/mm² と同様で、曲げひび割れの発生状況を良く反映している。

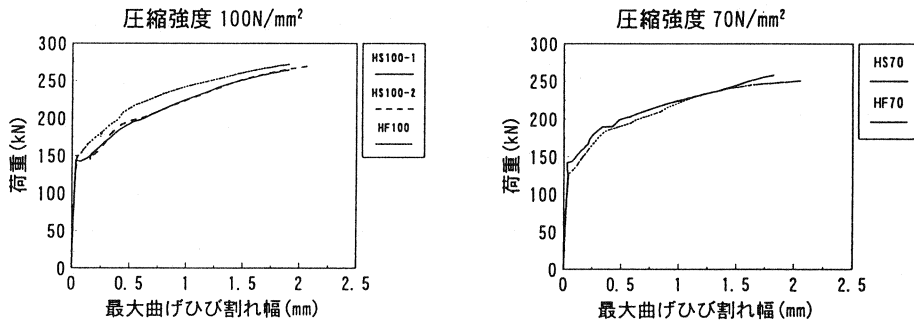


図-6 最大曲げひび割れ幅と荷重の関係

3.5 曲げひび割れ幅算定式の適用性の検討

前節の荷重試験で得られた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〕の中に規定されている、次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。

$$w_{max} = k1 \{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \} (\sigma_{sc} / E_s + \epsilon_{cs}') \quad (1)$$

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 PC 鋼材の場合には 1.3 としてよい。 c はかぶり、 c_s は鉄筋の中心間隔、 ϕ は鉄筋径、 σ_{sc} 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係数で、一般に 150×10^{-6} としてよい。

図-7 に各供試体の最大曲げひび割れ幅の実験値と解析値を示す。算定式を適用するにあたり、 σ_{sc} は曲げ解析により得られた曲げモーメント-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。また、本荷重試験の供試体は蒸気養生後の屋外放置および実験室内での放置中にお

いて、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れは肉眼では観察されなかった。このことを勘案して、解析ではコンクリートの乾燥収縮による影響は小さいとして ϵ_{cs} を零と仮定した。

図-7より、曲げひび割れ発生初期の段階において解析値と実験値に差が見られるが、解析値の鋼材の材料特性値を安全側に設定したことによると考えられる。また、全体的には曲げひび割れ幅の解析値と実験値は5体の供試体いずれにおいても、概ね一致している。このことは、土木学会で規定されている算定式により、従来の高強度P R Cはりと同様に、超高強度コンクリートを用いたプレテンション方式によるP R Cはりにおいても、使用限界状態における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。

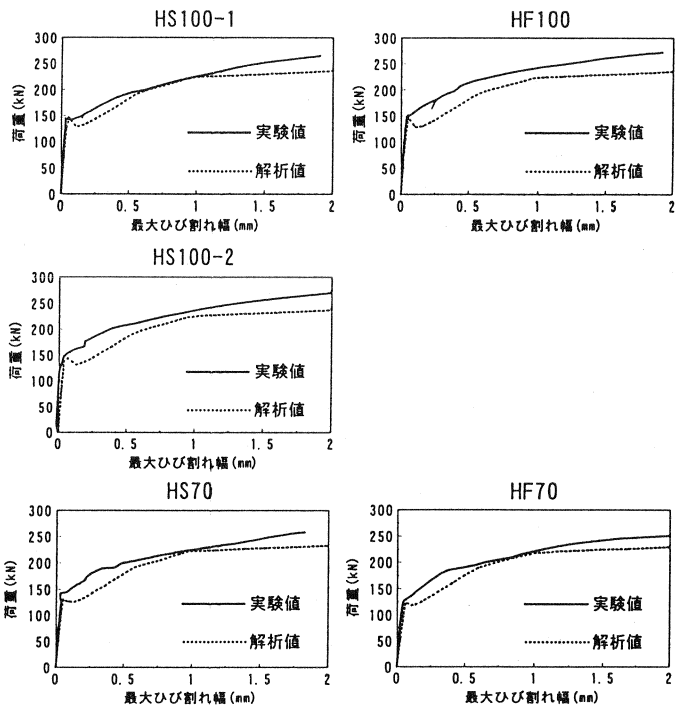


図-7 曲げひび割れ幅と算定式による解析値の比較

4. 結論

超高強度コンクリートを用いたプレテンション方式によるP R Cはりを作製し、曲げひび割れ性状および曲げひび割れ幅の算定式の適用性について検討した。本研究の範囲内で以下のことがいえる。

(1) プレテンション方式によるP R Cはりにおいて、高性能A E減水剤およびシリカフュームを用いた高流動系の超高強度コンクリートは、高性能減水剤を用い単位水量を低減した高強度系の超高強度コンクリートとはほぼ同様の曲げひび割れ性状を示し、圧縮強度が同程度であれば、使用材料に依存せず同様な曲げ挙動を示す。

(2) コンクリートの圧縮強度が $70\text{N}/\text{mm}^2$ のプレテンション方式によるP R Cはりだけでなく、圧縮強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ の超高強度コンクリートを用いたプレテンション方式によるP R Cはりにおいても、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕における曲げひび割れ幅算定式が、適用可能であると同時に、材料特性の異なる高流動コンクリートにも適用できる。

<謝辞> 本研究において供試体の作製および載荷試験にあたり、ドービー建設工業株式会社 関東工場に多大なるご援助を頂き、心からお礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 橋本親典・辻幸和・杉山隆文・金井昌義： $100\text{N}/\text{mm}^2$ 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、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 6, pp. 103~108, 1996. 10
- 2) 橋本親典・辻幸和・金井昌義：超高強度コンクリートの種類がP R Cはりの曲げ耐荷特性に与える影響について、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 7, pp. 811~816, 1997. 10
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕, pp. 85~92, pp. 127~146, 1996. 3