

# 論文 高強度コンクリートを用いた PRC 梁におけるひび割れ特性

高木 真由子<sup>\*1</sup>・睦好 宏史<sup>\*2</sup>・De Silva Sudhira<sup>\*3</sup>・浅本 晋吾<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、80 N/mm<sup>2</sup>を超える高強度コンクリートの曲げおよびせん断ひび割れ特性を明らかにするため、RC および PRC 梁の載荷実験を行い、普通強度コンクリートのひび割れ挙動との比較検討を行った。高強度コンクリートのひび割れは骨材を貫通して進展するため、PRC 梁ではひび割れ幅のばらつきが普通強度コンクリートと比べ大きくなった。コンクリートの圧縮強度による曲げひび割れ幅の影響は小さく、80 N/mm<sup>2</sup>超の高強度コンクリートに対しても土木学会による曲げひび割れ幅算定式は適用可能である。プレストレスによりせん断ひび割れ角度が小さくなることで、せん断ひび割れに対しせん断補強筋が有効に働き、せん断ひび割れ幅は小さくなる。

**キーワード**：PRC, 高強度コンクリート, ひび割れ幅, ひび割れ間隔, ひび割れ角度

## 1. はじめに

供用中の鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物に外的あるいは内的要因によってひび割れが生じた場合、内部鉄筋腐食が促進され、耐久性の低下をもたらす。長期耐久性や使用性を確保させるには、ひび割れ幅を適切に制御することが重要といえる。

筆者らは、プレストレスト鉄筋コンクリート（以下 PRC）へのひび割れ幅算定式の適用性について検討し、曲げひび割れ幅に関しては既往の算定式<sup>1)</sup>で概ね予測できることを明らかとしている<sup>2)</sup>。また既往の研究によって、圧縮強度が

80N/mm<sup>2</sup>以下のコンクリートの曲げひび割れ幅については示方書<sup>1)</sup>を通じてひび割れ幅の予測式が確立されている。一方で、圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートのひび割れ幅は未だに不明な点が多い。特にせん断ひび割れに関してはRCとPRCの双方において挙動が複雑なため、ひび割れ幅の算定法が確立されておらず、せん断ひび割れ幅の照査方法を規定するまでに至っていないのが現状である。実橋梁において活荷重下でせん断ひび割れが生じている例も報告されており、早急に照査方法を確立する必要がある。

表-1 供試体諸元

Beam		fc' (N/mm <sup>2</sup> )	主鉄筋			PC鋼材		
			φs	ps (%)	d (mm)	φp (mm)	dp (mm)	σc,ps (N/mm <sup>2</sup> )
A-1	RC	36.6	D13	0.641	263.5	-	-	-
A-6	PRC	37.5				10.8	263.5	4.35
HA-1	RC	96.5				-	-	-
HA-6	PRC	101.6				10.8	263.5	4.35

fc': コンクリートの圧縮強度(実験値)  
 φs, φp: 主鉄筋, PC鋼材の径  
 ps: 引張鉄筋比  
 d, dp: 主鉄筋, PC鋼材の有効高さ  
 σc,ps: 引張縁でのプレストレスによる圧縮応力

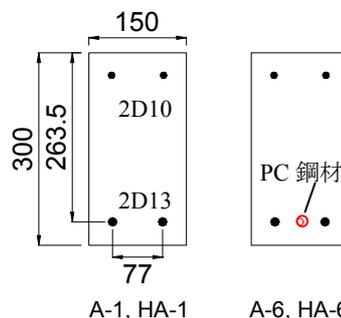


図-1 供試体断面寸法

\*1 中日本高速道路株式会社 (名古屋支社) 修士 (工学) (正会員)  
 \*2 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門教授 工博 (正会員)  
 \*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 修士 (工学) (正会員)  
 \*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門助教 博士 (工学) (正会員)

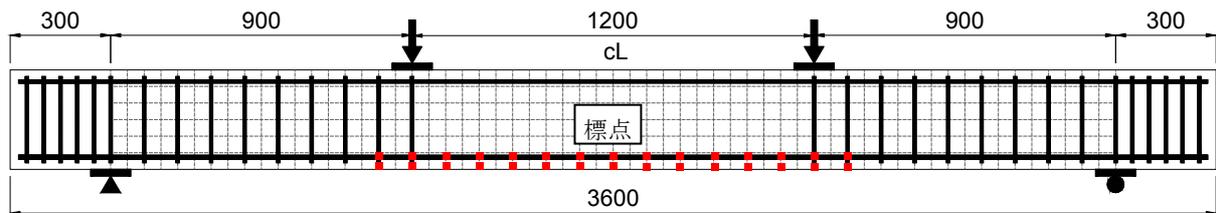


図-2 曲げひび割れ幅測定位置

本研究は、高強度コンクリートの曲げおよびせん断ひび割れ特性に着目し、既往の曲げひび割れ幅算定式の PRC への適用性の検討、せん断ひび割れ幅の照査方法の確立を目的とした。すなわち、RC および PRC 梁を作製し、コンクリートの圧縮強度、プレストレス導入量を実験パラメータとした荷重実験を行った。曲げおよびせん断ひび割れ幅、間隔を測定し、ひび割れ幅に影響を及ぼす要因について実験的検討を行った。

## 2. 曲げひび割れ特性

### 2.1 実験概要

供試体の断面寸法および鉄筋と PC 鋼材の配置を図-1、供試体諸元を表-1 に示す。供試体は高さ 300mm、幅 150mm の矩形断面で、長さ 3600mm の梁部材である。引張鉄筋比は 0.641% で、せん断スパン内にせん断補強筋を 100mm 間隔で配置した。PC 鋼材には PC 鋼より線 SWPR7AL を用いた。実験で使用した鉄筋および PC 鋼材の材料特性を表-2 に示す。

材齢 3 日で脱型した後、荷重まで湿布養生を行った。高強度コンクリートは低水セメント比であるため、部材厚が大きいと活発な水和反応によって、自己収縮量が多いことが知られている。大きな自己収縮によって初期ひび割れが発生することが懸念されたため、養生期間中、供試体温度と鉄筋およびコンクリートの収縮量を計測した。PRC 供試体は荷重試験 2 日前にプレストレスを導入し、特殊セメント系無収縮注入材によるグラウト注入を行った。

荷重方法は油圧ジャッキによる単調荷重であり、曲げひび割れ幅と圧縮域コンクリートおよび主鉄筋のひずみを荷重ステップ毎に測定した。

表-2 鉄筋および PC 鋼材の材料特性

鉄筋	SD345	$\phi_s$	$f_{sy}(N/mm^2)$	$E_s (kN/mm^2)$
		D13	380.1	201.2
PC鋼材	SWPR7AL	$\phi_p$	$f_{py}(N/mm^2)$	$E_{ps}(kN/mm^2)$
		10.8	1464	200

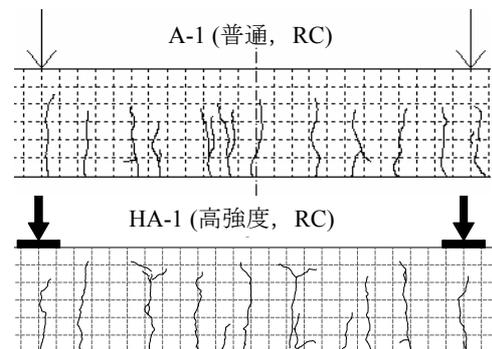


図-3 ひび割れ状況

表-3 曲げひび割れ間隔

	実験値			計算値
	Number of crack	Ave. (cm)	Max. (cm)	JSCE (cm)
A-1	11	12.2	17.9	16.5
A-6	12	10.4	20.4	
HA-1	11	12.0	16.0	
HA-6	12	10.1	15.8	

図-2 に示すように、等曲げモーメント区間の主鉄筋高さと底面より 1cm の高さで、精度 0.001mm のコンタクトゲージでひび割れ幅を測定した。標点間に複数のひび割れが発生した場合、コンタクトゲージによる一本のひび割れ幅の同定は困難であるため、同精度のデジタルマイクロスコープも併用した。荷重終了後にひび割れ幅測定位置と同位置においてひび割れ間隔を計測した。

### 2.2 実験結果

最初に、養生中の収縮ひび割れについて述べる。養生中収縮を計測した結果、収縮量は最大で 50 $\mu$  程度であり、収縮によるひび割れは確認できなかった。本部材では収縮の影響は小さく、

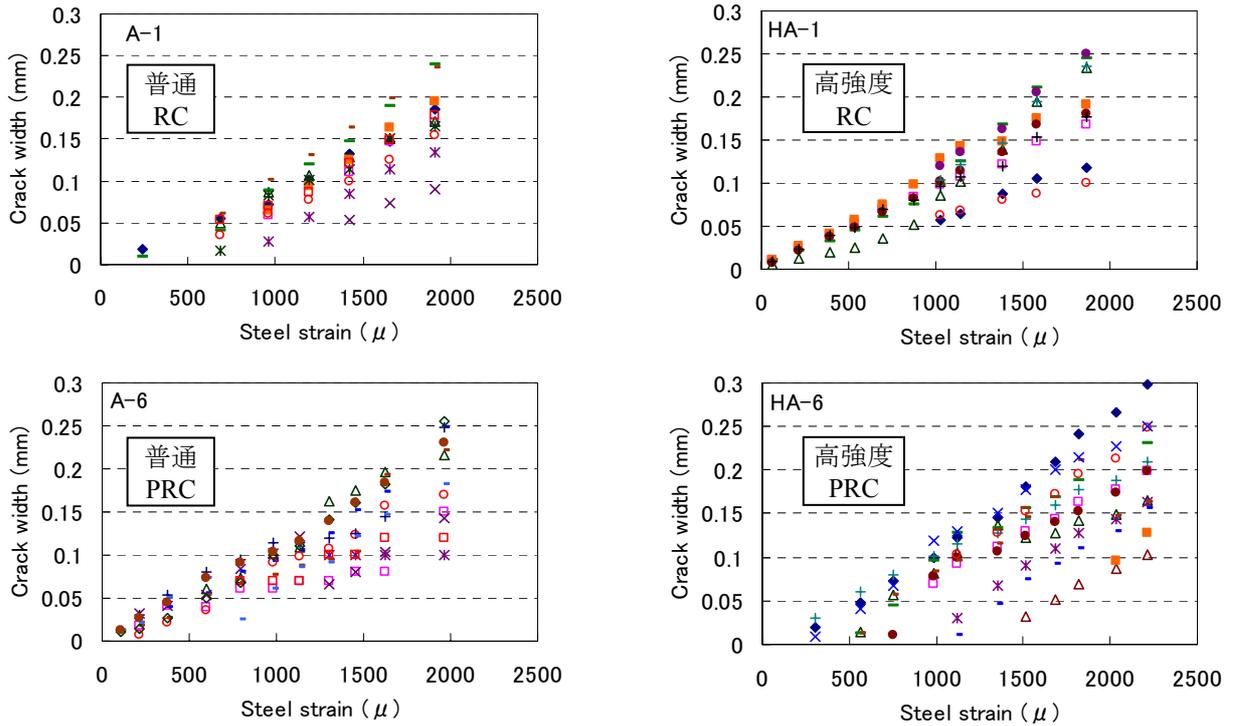


図-4 曲げひび割れ幅—鉄筋ひずみ

適切な養生が行われていたことが確認できた。

載荷実験におけるひび割れの分散性を図-3, 曲げひび割れ間隔を表-3 に示す。なお, 図, 表中のひび割れはひび割れの進行が定常状態になった時点のものである。結果として, コンクリートの圧縮強度やプレストレスの影響はさほど観察されなかった。高強度コンクリートでは鉄筋との付着性状が向上しひび割れ間隔は小さくなると考えられたが, 本研究で用いた供試体では主鉄筋比が比較的小さかったため, 付着性状の影響が顕著に現れなかったと推察される。土木学会による曲げひび割れ幅算定式<sup>3)</sup>では主にかぶりや鉄筋径, 鉄筋の中心間隔を考慮してひび割れ間隔を求めており, 算定式による計算値と実験値は比較的一致することが明らかとなった。

図-4 に曲げひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係を示す。PRC では, 高強度コンクリートのひび割れ幅は, 普通強度コンクリートに比べわずかながらばらついている。これは, 高強度コンクリートにおいてセメント硬化体と骨材の界面付着が高く, ひび割れが骨材を貫通して進展する場合があるためであると考えられる。図-5 に示

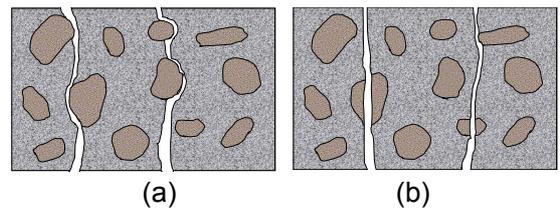


図-5 ひび割れ進展のパターン

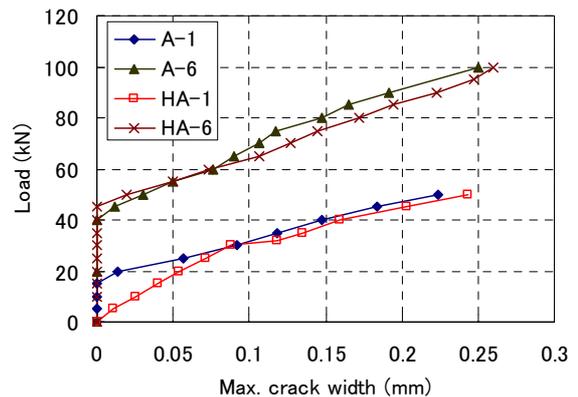


図-6 荷重—最大曲げひび割れ幅

すようにひび割れの進展にいくつかのパターンがある。パターン(a)はひび割れがセメント硬化体—骨材界面に沿って進展するもので, 普通コンクリートでよくあるパターンである。コンクリートの圧縮強度が高くなるにつれ, (b)骨材を貫通する進展およびセメント硬化体—骨材界面に沿った進展が混在するようになる。高強度コ

ンクリートはパターン(b)にあたり、ひび割れ幅がコンクリート中の骨材強度に依存するためわずかながらひび割れ幅がばらついたと考えられる。一方で、RCでは高強度コンクリートと普通強度コンクリートでひび割れ幅のばらつきに顕著な違いは観察されなかった。これが実験上の誤差範囲であるのか、プレストレスによってひび割れ幅のばらつきが大きくなり得るのか論ずる精緻な情報を現在著者らは持ち合わせていない。これについては、再度検討を行うこととする。

荷重と最大曲げひび割れ幅の関係を図-6に示す。最大曲げひび割れ幅とは、ひび割れ幅上位3つの値を平均したものである。図中のHA-1（高強度、RC）において低荷重レベルでひび割れが発生している理由は、実験の不備により25kN付近まで急激に荷重し、その後除荷し再荷重を行ったため、初期の導入荷重によりひび割れが拡幅しやすくなったからである。したがって、HA-1については25kN以上に発生したひび割れ幅に着目して検討を行うこととする。図-6に示すようにプレストレスにより曲げひび割れ発生荷重は大幅に増加したが、コンクリートの圧縮強度による影響はさほど顕著に現れていない。これは普通強度コンクリートに対し高強度コンクリートは、圧縮強度が2.7倍程度であるが、引張強度が1.9倍程度で圧縮強度ほど差がないためであると考えられる。一般にひび割れ幅はひび割れ間隔と鉄筋ひずみの積で表される。普通強度コンクリートと高強度コンクリートのひび割れ間隔に顕著な差がなかったことを考慮しても妥当な結果といえる。

荷重と鉄筋ひずみの関係（図-7参照）においても、荷重と最大曲げひび割れ幅の関係と同様コンクリートの圧縮強度よる差は小さく、コンクリートの圧縮強度の影響は無視できる程度であることが明らかとなった。図-8は最大曲げひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係を示したものである。この図からもプレストレスやコンクリートの圧縮強度の影響はさほど見られない。上述し

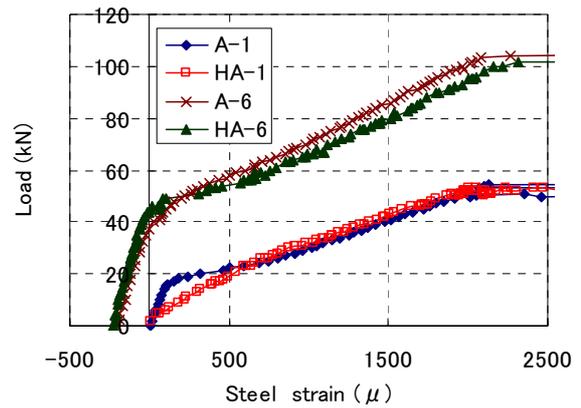


図-7 荷重—鉄筋ひずみ

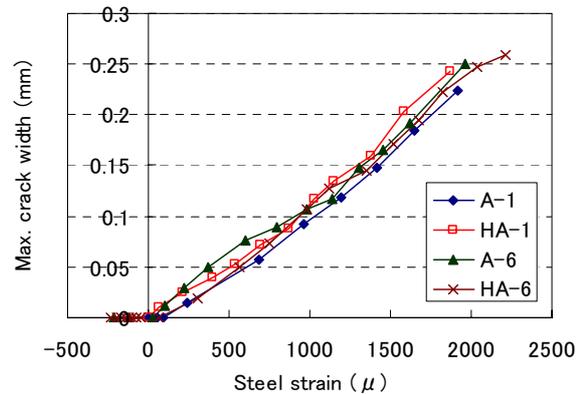


図-8 最大曲げひび割れ幅—鉄筋ひずみ

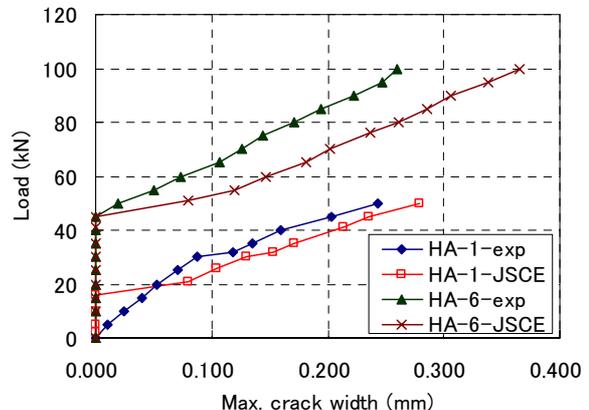


図-9 実験値と土木学会式による計算値の比較

たように本研究の範囲ではひび割れ間隔に大きな差が生じなかったため、同一鉄筋ひずみにおいて最大曲げひび割れ幅がほぼ変わらない結果となった。一方で同じ荷重レベルで鉄筋のひずみを抑えるという点で、プレストレスが有効であることが確認された。

図-9は高強度コンクリートの供試体について、最大曲げひび割れ幅の実験値と土木学会

による曲げひび割れ幅算定式の計算値を比較したものである。JSCE 式ではコンクリートの圧縮強度の影響を係数で考慮しているが、その影響量は比較的小さく、本実験結果を安全側に比較的精度よく評価していると言える。

### 3. せん断ひび割れ幅特性について

#### 3.1 実験概要

供試体寸法および配筋図を図-10、供試体諸元を表-4 に示す。供試体は高さ 500mm、ウェブ幅 150mm の I 型断面で、長さ 3600mm の梁部材である。せん断補強筋として左せん断スパンに D6、右側せん断スパンに D10 鉄筋を 125mm で配置し、左側せん断スパンでせん断補強筋ひずみおよびせん断ひび割れ幅を測定した。図-11 に示した 1 番から 7 番のせん断補強筋に、それぞれウェブ高さの範囲で 7 つのひずみゲージを添付した。せん断ひび割れ幅の測定は図-11 に示した 1 番から 7 番のせん断補強筋を交差する全ての位置においてデジタルマイクロスコープにて行った。PC 鋼材には PC 丸鋼 C 種 1 号 SWPR7AL を用いた。実験で使用した鉄筋および PC 鋼材の材料特性を表-5 に示す。

養生、プレストレスの導入、載荷の方法は 2.1 の曲げひび割れ特性に関する実験と同じである。

#### 3.2 実験結果

図-11 に 7 番のせん断補強筋が降伏した時点でのひび割れ状況を示す。高強度コンクリートにプレストレスを導入した HIPRC-4 供試体で部材軸に対するひび割れ角度が最小となった。

図-12 にせん断力と最大せん断ひび割れ幅の関係を示す。以下、せん断ひび割れ発生荷重とはせん断補強筋ひずみが急激に増加したときと

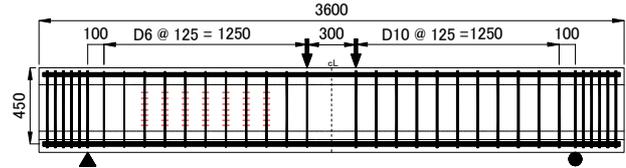
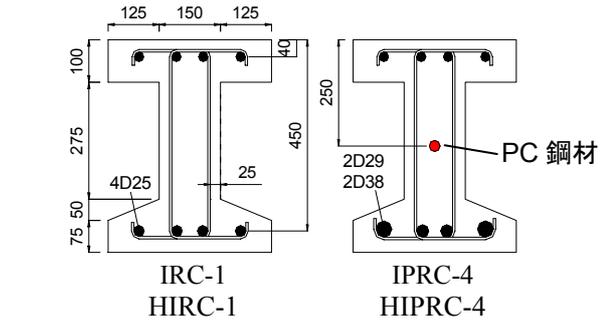


図-10 供試体寸法，配筋図

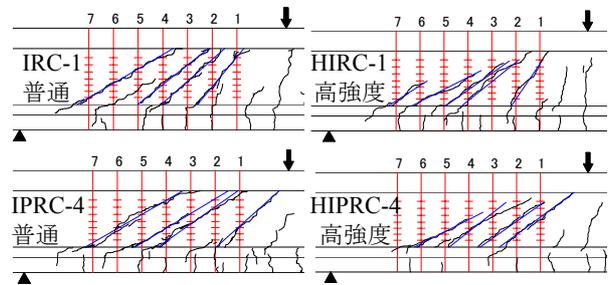


図-11 ひび割れ状況

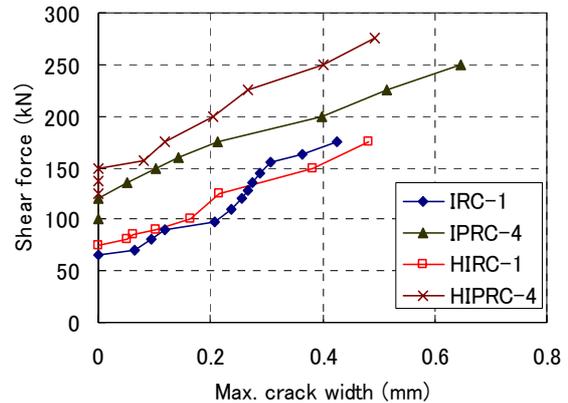


図-12 せん断力—最大せん断ひび割れ幅

表-4 供試体諸元

	$f_c$ ( $N/mm^2$ )	PC鋼材		せん断補強筋間隔 (mm)	主鉄筋 ps (%)
		$\phi_p$ (mm)	$\sigma_{c,ps}$ ( $N/mm^2$ )		
IRC-1	40.3	-	-	125	1.13 (4*D25)
IPRC-4	43.2	$\phi 26$	3	125	1.98 (2D29,2D38)
HIRC-1	82.5	-	-	125	1.13 (4*D25)
HIPRC-4	103.2	$\phi 26$	3	125	1.98 (2D29,2D38)

$f_c$  は実測値

表-5 鉄筋および PC 鋼材の材料特性

鉄筋		$f_{sy}$ ( $N/mm^2$ )	$E_s$ ( $kN/mm^2$ )
D6	SD345	447.9	262.1
D25	USD685B	720	201
PC鋼材		$f_{py}$ ( $N/mm^2$ )	$E_{ps}$ ( $kN/mm^2$ )
$\Phi 26$	SBPR1080/1230	1224	200

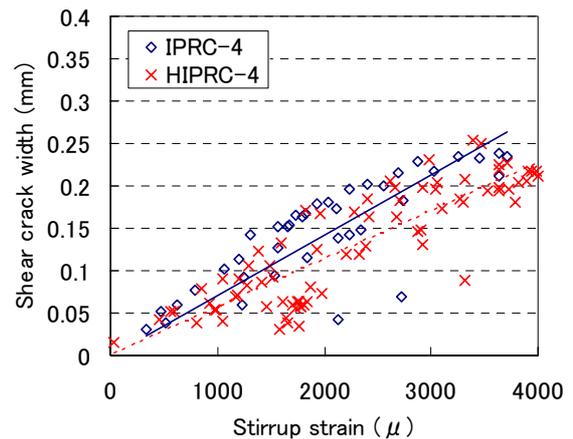
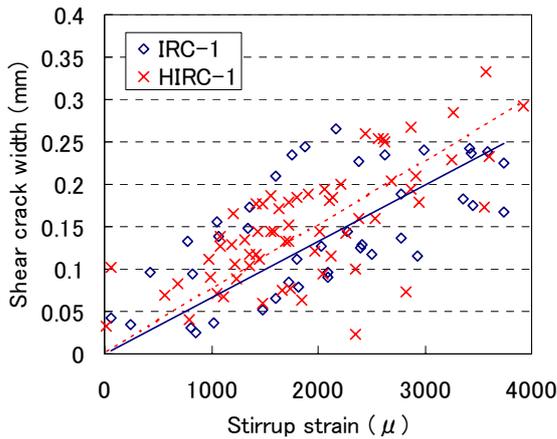


図-13 せん断ひび割れ幅—せん断補強筋ひずみ

定義する。プレストレスによりせん断ひび割れ発生荷重が大幅に増加した。高強度コンクリートでは RC と PRC の双方においてわずかながらせん断ひび割れ発生荷重が増加した。HIPRC-4 と IPRC-4 を比較すると、高強度コンクリートである HIPRC-4 の方がせん断ひび割れ発生後、ひび割れ幅の増加の割合がわずかながら小さくなった。HIPRC-4 では、IPRC-4 に比べ長手方向に対するひび割れ角度が小さくなり、せん断ひび割れに対しせん断補強筋が有効に働いたためせん断ひび割れ幅が小さくなったと考えられる。

図-13 はせん断ひび割れ幅とせん断補強筋補強筋ひずみの関係を示したもので、図中の線はデータを直線近似したものである。いずれの供試体においてもせん断ひび割れ幅は大きくばらついている。RC では高強度コンクリートの方がせん断ひび割れ幅がわずかに大きいですが、PRC では逆に高強度コンクリートでせん断ひび割れ幅は小さくなっており、ばらつきも考慮に入れるとコンクリートの圧縮強度による影響は小さいと推察される。RC のせん断ひび割れ幅よりも PRC のせん断ひび割れ幅が小さくなっているのは、上述のようにせん断補強筋が有効に働いたことと、PRC では主鉄筋比が大きかったため部材としての変形が小さくせん断ひび割れ幅拡大を低減したことに起因すると考えられる。

#### 4. まとめ

圧縮強度の異なる RC および PRC 梁の載荷実

験から、曲げおよびせん断ひび割れ特性について以下のことが明らかとなった。

- (1) 高強度コンクリートの曲げひび割れ幅は、普通強度コンクリートの曲げひび割れ幅とほぼ同じ挙動を示す。
- (2) 高強度コンクリートではひび割れが骨材を貫通して進展する場合があります。骨材強度によってひび割れ幅が大きくばらつくことがあります。
- (3) 土木学会による曲げひび割れ幅算定式は、高強度コンクリートに対してもある程度の精度で推定可能である。
- (4) コンクリートの圧縮強度の影響がせん断ひび割れ幅に及ぼす影響は小さい。
- (5) 主鉄筋比が大きいと変形が小さくなるため最大せん断ひび割れ幅は小さくなる。
- (6) PRC ではプレストレスによりせん断ひび割れ角度が小さくなるため、せん断補強筋がせん断ひび割れに対して有効に働きひび割れ幅が小さくなる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002
- 2) 高木真由子，睦好宏史，Eakarut Witchukreangkrai，浦松達也：プレストレス鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vo27，No.2，pp.755-780，2005