

論文 超高強度コンクリートを用いた PRC 梁のひび割れ性状

前川 敦*1・睦好 宏史*2・De Silva Sudhira*3・浅本 晋吾*4

要旨: 本研究では, 160N/mm²を超える超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, 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。また, 初期のひび割れ幅が普通強度に比べ大きく, それに伴い曲げひび割れ幅は大きくなることが確認された。せん断挙動は非常に脆性的な破壊となり, せん断補強鉄筋の破断が観察された。せん断ひび割れ幅に関しては, 超高強度コンクリートを用いた PRC 部材で小さくなることが確認された。

キーワード: 超高強度コンクリート, プレストレス導入量, 曲げひび割れ幅, せん断ひび割れ幅

1. はじめに

近年, セメントや混和剤, 分散剤の高性能化などにより設計基準強度 100N/mm²以上の超高強度コンクリートの製造が比較的容易になっている。鉄筋コンクリート(以下 RC)部材に超高強度コンクリートを使用することは構造部材の小断面化やそれに伴う軽量化の実現が可能となり, 特にプレストレストコンクリート(以下 PRC)技術と組み合わせることで合理的な構造形式を実現できることが期待されている。しかし, こうした超高強度コンクリートを用いた部材の破壊性状やひび割れ

特性はいまだ十分に解明されていない。現行の土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では, 圧縮強度の上限値を 80N/mm²と設定しており, 超高強度コンクリートの構造特性・ひび割れ特性を理解するとともに, 超高強度コンクリートを用いた部材や構造物への各算定式の適用性について十分に検討する必要がある。

以上の背景のもと, 本研究では超高強度コンクリートを用いた RC および PRC 部材の合理的な設計法を確立するための基礎的情報の収集, および既存の予測式の適用性の検討を目的に, 曲げおよびせん断載荷実験を行った。

特に, 超高強度コンクリートのひび割れ性状に着目し, 既往の曲げひび割れ幅算定式との比較, せん断ひび割れ性状に及ぼすコンクリート強度の影響を明らかにした。

表-1 コンクリート配合

Type	Cement [※]	W/C (%)	Unit Weight (kg/m ³)					
			W	C	G	S	SP [※]	DA [※]
$f'_c=40\text{N/mm}^2$	OPC	46	168	363	757	1017	3.45	—
$f'_c=100\text{N/mm}^2$	OPC	23	165	717	940	608	12.9	—
$f'_c=160\text{N/mm}^2$	SFC	17	155	912	795	615	14.6	0.9

[※]OPC: 普通ポルトランドセメント SFC: シリカフェュームセメント
SP: 高性能減水剤 DA: 消泡剤

表-2 実験要因

Type	f'_c (N/mm ²)	Longitudinal Steel		Prestressing Steel			
		ϕ'_s	d' (mm)	ϕ_p (mm)	d_p (mm)	f_{py}	P_e (kN)
RC_40_1 ⁽³⁾⁽⁴⁾	36.6	D13	263.5	—	—	—	—
RC_100_1 ⁽³⁾⁽⁴⁾	96.5	D13	263.5	—	—	—	—
RC_40_2	39.4	D16	263.5	—	—	—	—
RC_160_2	161.7	D16	263.5	—	—	—	—
PRC_40_1 ⁽³⁾⁽⁴⁾	37.5	D13	263.5	10.8	263.5	1464	65
PRC_100_1 ⁽³⁾⁽⁴⁾	101.6	D13	263.5	10.8	263.5	1464	65
PRC_160_1	166.5	D13	263.5	10.8	263.5	1464	65
PRC_160_2	166.5	D13	263.5	15.2	263.5	1925	120

d', d_p : 鉄筋の有効高さおよび PC 鋼より線有効高さ P_e : 導入プレストレス量

2. 曲げひび割れ特性

2.1 実験概要

(1)使用材料および供試体概要

使用したコンクリートは, 圧縮強度 $f'_c=40, 100, 160\text{N/mm}^2$ のコンクリートであり, 表-1 にコンクリートの配合を示す。超高強度コンクリート ($f'_c=160\text{N/mm}^2$) については, シリカフェュームおよび高性能減水剤, 消泡剤を使用して作製した。高強度コンクリートでは低水セメント比(本実験では W/C=17%)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乾燥が進行し, 自己収縮量が大きいことが知ら

*1 首都高速道路(株) 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 University of Ruhna, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Senior Lecturer Ph.D (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)

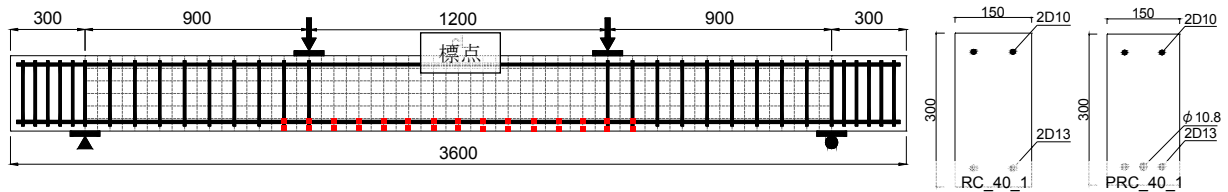


図-1 供試体の形状寸法 (RC_40_1, PRC_40_1)

れている。このため、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ひずみを計測した。

本研究で用いた供試体の形状寸法を図-1に、実験要因を表-2に示す。表中の圧縮強度の値は実測値である。

供試体は幅150mm、高さ300mm、長さ3600mmの矩形断面で、せん断スパン内にせん断補強筋を100mm間隔で配置した。また、高強度PC鋼より線を用いて導入プレストレス量を増加させた試験体 (PRC_160_2) を作製しその影響を検討した。実験で使用した鉄筋およびPC鋼材の材料特性を表-3に示す。供試体は湿潤養生を行い、載荷直前にプレストレスを導入した。プレストレスは供試体端に設置されたロードセルを測定することによって、所定の力が導入された。

(2) 載荷方法および計測方法

載荷方法は油圧ジャッキによる単調載荷であり、曲げひび割れ幅と圧縮縁コンクリートおよび主鉄筋のひずみを5kNごとに測定した。

ひび割れ幅は図に示すように、等曲げモーメント区間1200mmの主鉄筋高さより1cmの高さで、精度0.001mmのコンタクトゲージを用いて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使用した。載荷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。また、鉄筋ひずみに関しては試験体中心、支点位置に取り付けたひずみゲージの平均値から算出した。

2.2 実験結果

(1) 自己収縮

養生中の収縮ひび割れについて述べる。養生中、試験体内部に埋め込んだひずみゲージから収縮ひずみを計測した結果、超高強度RC部材の収縮量は最大で300 μ 程度で、大きな収縮ひずみが発生しているものの収縮によるひび割れは確認できなかった。

(2) 曲げひび割れ間隔

図-2に全供試体のひび割れ図を、表-4に計測された曲げひび割れ間隔の最大値と平均値を示す。ひび割れ図はひび割れが発生しなくなる定常状態のときのものである。普通コンクリートではひび割れは分散し、ほぼ同じ長さで進展しているのに対し、超高強度コンクリート

表-3 鉄筋およびPC鋼材の材料特性

Type			f_y (N/mm ²)	E (kN/mm ²)
Steel	SD345	D10	377.9	173.2
		D13	371.6	183.5
		D16	401.4	182.4
PC Strand	SWPR7A	ϕ 10.8	1464	200.0
	High Strength	ϕ 15.2	1925	200.0

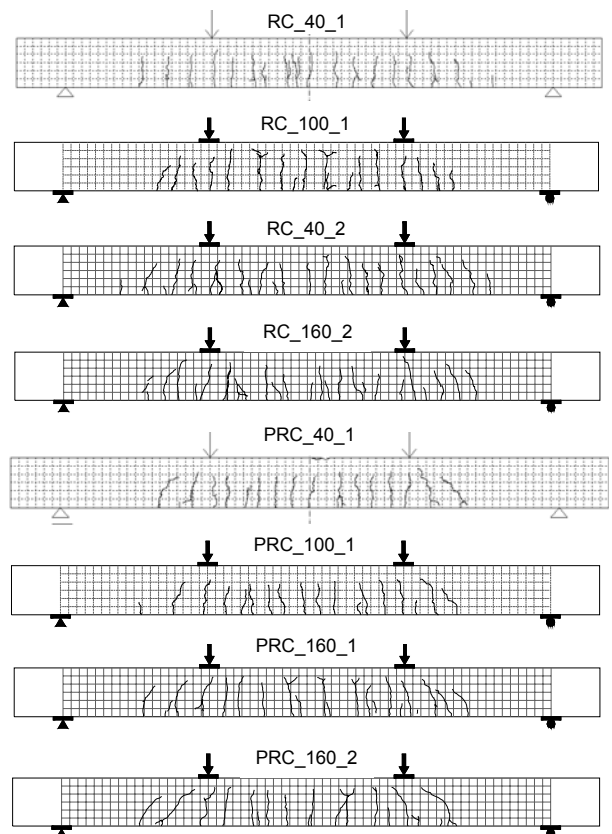


図-2 ひび割れ状況

ではひび割れ発生時に大きな音とともに、試験体高さ半分程度まで急激に進展した。ひび割れの長さにもばらつきが見られた。ひび割れ本数は圧縮強度が大きくなるにしたがって、全ひび割れ本数は増加しているが、中立軸位置でのひび割れ本数は減少し、曲げひび割れは局所化する傾向が観察された。ひび割れ間隔についても、普通コンクリートではひび割れはほぼ等間隔で同等の値であったが、高強度コンクリートではひび割れ間隔にもばらつきが見られた。

表-4 曲げひび割れ間隔

Type	Number of Cracks	Max. (cm)	Ave. (cm)	Max./Ave.
RC_40_1	11	17.9	12.2	1.47
RC_100_1	11	16.0	12.0	1.33
RC_40_2	12	16.7	9.2	1.82
RC_160_2	14	17.2	9.0	1.91
PRC_40_1	12	20.4	10.4	1.96
PRC_100_1	12	15.8	10.1	1.56
PRC_160_1	15	19.7	9.2	2.14
PRC_160_2	14	17.5	10.0	1.75

(3)曲げひび割れ幅

PRC 試験体において、計測した全てのひび割れ幅を図-3 に示す。普通強度コンクリートと比較すると、 $f'_c=100\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートではひび割れ幅が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ではセメント硬化体と骨材との界面付着が高く、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。さらに $f'_c=160\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートでは曲げひび割れ幅のばらつき傾向は顕著であり、圧縮強度の増加によって、“セメント硬化体-骨材界面に沿って進展するひび割れ”と“骨材を貫通して進展するひび割れ”とが混在するようになることが明らかになった。また、このことから、高強度コンクリートでは、コンクリート中の骨材の分布状態、骨材径、強度も曲げひび割れ幅のばらつきに影響を及ぼすと考えられる。写真-1 は普通コンクリートと高強度コンクリートのひび割れ状況である。この写真からも、高強度コンクリートのひび割れは直線的であり、ひび割れが骨材を貫通して進展している様子が確認される。

次に最大曲げひび割れ幅-鉄筋ひずみ関係を図-4 に示す。最大曲げひび割れ幅とは、測定されたひび割れ幅のうち、荷重ステップごとで上位3つのひび割れ幅を平均した値である。圧縮強度 $f'_c=40\text{N/mm}^2$ と $f'_c=100\text{N/mm}^2$ で比較すると、コンクリートの圧縮強度による影響はRC, PRC 両者において大きな差は見られない。しかし、 $f'_c=160\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリート試験体では、同一ひずみにおいて最大曲げひび割れ幅は他の強度の試験体に比べ大きくなっている。この理由として、低ひずみ領域で大きなひび割れ幅が観察されていることからわかるように、初期のひび割れ幅が大きいということが挙げられる。すなわち、先述したように、超高強度コンクリートでは、ある断面（最も強度が弱い）にひび割れが発生すると、このひび割れが卓越して他のひび割れより大きくなるものと考え得られる。PRC_160_1, PRC_160_2 におけるプレストレス導入量の曲げひび割

れ幅への影響に顕著な違いは見られなかった。しかし、一般的にコンクリート圧縮強度の増大に伴い、高プレストレスの導入が可能となるため、ひび割れ発生荷重は増加し、同一荷重レベルで鉄筋ひずみの値が小さくなることから、高強度コンクリートに高プレストレスを導入することは使用状態において非常に高性能な部材となり得ることが確認できた。

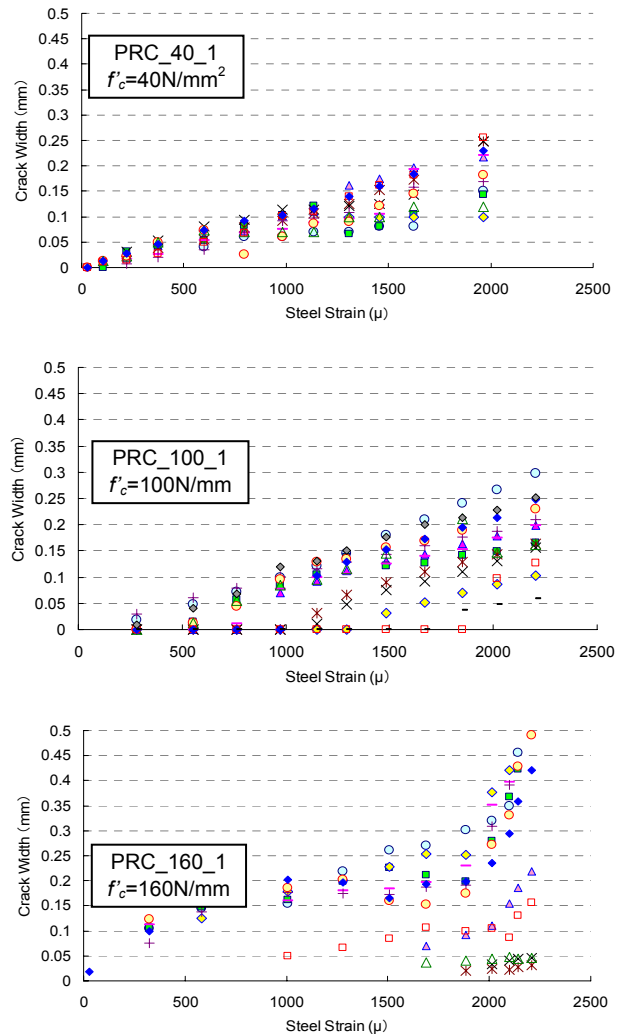


図-3 曲げひび割れ幅-鉄筋ひずみ



(a) 普通コンクリート (b) 高強度コンクリート

写真-1 ひび割れ進展パターン

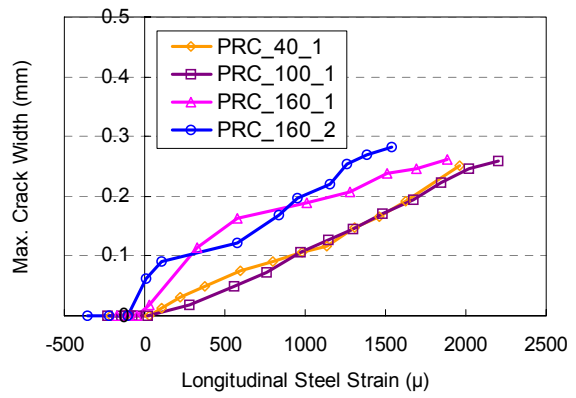
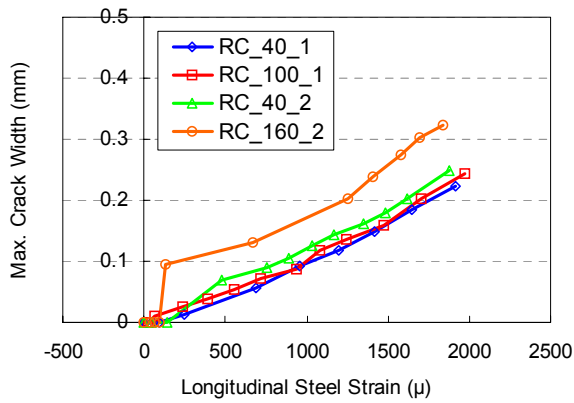


図-4 最大曲げひび割れ幅—鉄筋ひずみ

(4)曲げひび割れ幅算定式との比較

図-5 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測値と曲げひび割れ幅算定式の計算値とを比較したものである。計算値には、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾による曲げひび割れ幅算定式を用いた。なお、算定式において、コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 ϵ'_{csd} は実験から得られた超高強度コンクリート試験体の収縮量 300μ を使用した。

土木学会式ではコンクリートの品質を考慮する係数 k_2 によってコンクリートの圧縮強度が増加すると最大曲げひび割れ幅は低減される表現になっているが、本研究の範囲においては、超高強度コンクリートでは初期ひび割れ幅が大きく、上述のひび割れ幅低減効果は見られなかった。しかし、図に示すように実験値と計算値はほぼ一致している。これは k_2 の低減効果は、計算値に対して影響が小さいためであると考えられ、本実験結果に対して概ね妥当に推定可能となっている。

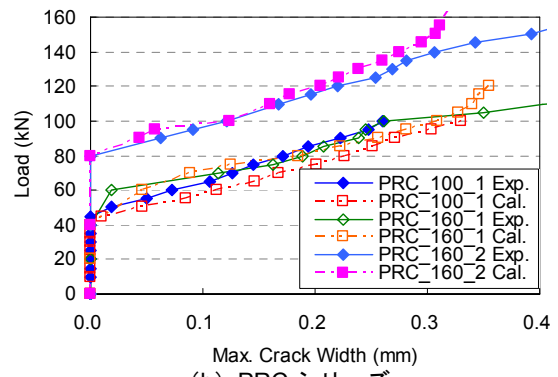
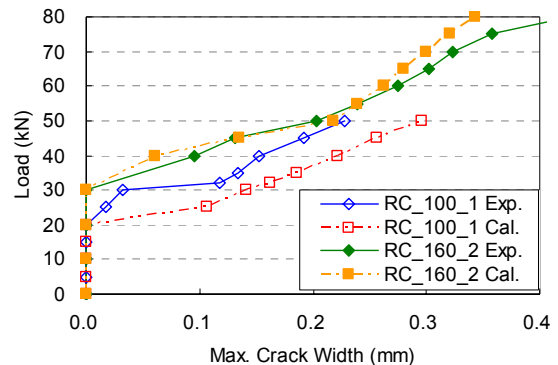


図-5 実験値と計算値の比較

3.せん断ひび割れ特性

3.1 実験概要

(1)使用材料および供試体概要

供試体寸法および配筋図を図-6に、実験要因を表-5に示す。表中の圧縮強度は実測値である。また、比較対象のため用いた既往の研究³⁾⁴⁾の試験体(IRC-1, HIRC-1, IPRC-1)についても記載した。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。せん断破壊箇所を特定するため、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を125mmで配置し、左せん断スパンにおいて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。図中の赤線をひずみゲージ取り付け位置とし、ひび割れ位置でのひび割れ幅とせん断補強筋ひずみを測定した。

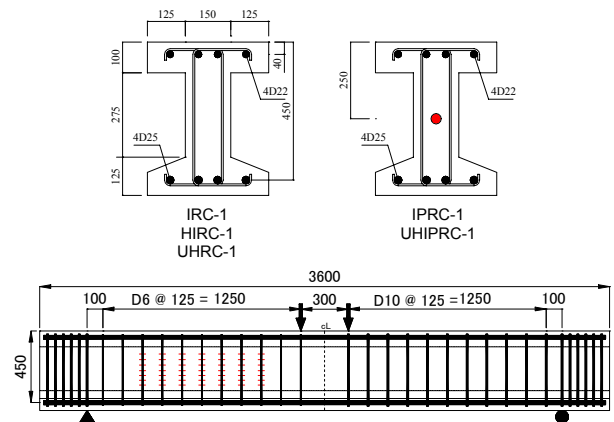


図-6 供試体寸法、配筋図

表-5 実験要因

Type	f'_c (N/mm ²)	Longitudinal Steel		Prestressing Steel	
		Ps (%)	ϕ_p (mm)	P_e (kN)	
IRC-1 ^{3) 4)}	40.3	1.13 (4D25)	—	—	
HIRC-1 ³⁾⁴⁾	82.5	1.13 (4D25)	—	—	
UHRC-1	176.5	1.13 (4D25)	—	—	
IPRC-1 ^{3) 4)}	44.0	1.13 (4D25)	$\phi 26$	375.0	
UHPRC-1	169.8	1.13 (4D25)	$\phi 26$	375.0	

表-6 鉄筋およびPC鋼材の材料特性

Type			f_y (N/mm ²)	E (kN/mm ²)
Steel	SD345	D6	447.9	262.1
	USD685B	D25	720	201
PC Bar	SBPR1080/1230	$\phi 26$	1224	200

せん断ひび割れ幅の測定は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SBPR1080/1230を用い、PRC供試体における導入プレストレス量は $P_e=375.0\text{kN}$ で統一した。実験で使用した鉄筋およびPC鋼材の材料特性を表-6に示す。養生方法、載荷方法は曲げひび割れ特性に関する実験と同様である。

3.2 実験結果

(1)せん断破壊状況

破壊に至る状況は、荷重の増加によって斜めひび割れが数本入り、それが進展・開口することによってせん断破壊に至っている。特に超高強度コンクリートのPRC試験体であるUHIPRC-1においては、その破壊は脆性的かつ爆発的な破壊性状であり、ひび割れの開口と同時に、圧縮部・支点近くの主鉄筋に沿うコンクリートが飛散した(写真-2)。開口した斜めひび割れ部のせん断補強筋は破断に至った(写真-3)。このような爆発的な破壊に至った理由としては、超高強度コンクリートが持つ高い付着性能が一要因と推測されるが、詳細な議論に至るほどの情報を持ち得ておらず、プレストレスの影響も含めて、更なる検討が必要である。

(2)せん断ひび割れ幅

図-7はせん断ひび割れ-せん断補強筋補強筋ひずみ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が、概してせん断補強筋ひずみと強い相関を示していることが確認された。

RCではせん断ひび割れ幅に大きな違いは見られないが、PRCでは超高強度コンクリートにおいてばらつきは



写真-2 UHIPRC-1破壊状況

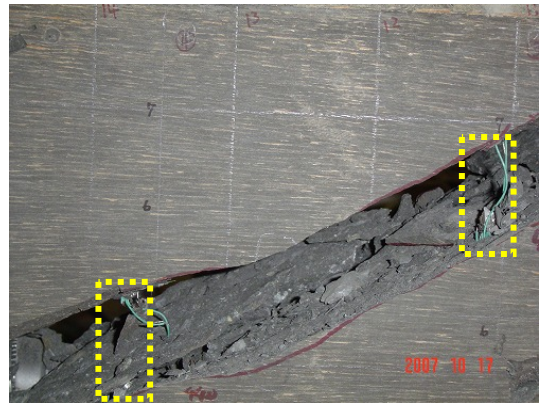
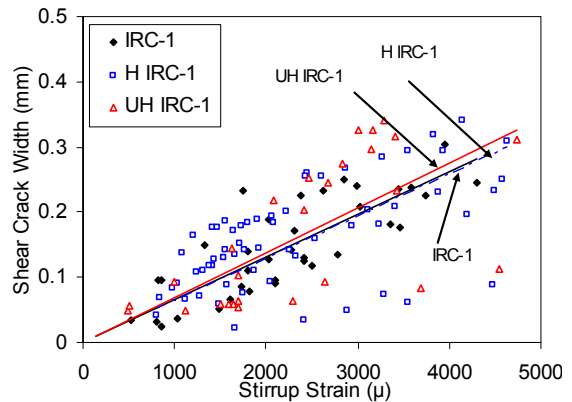
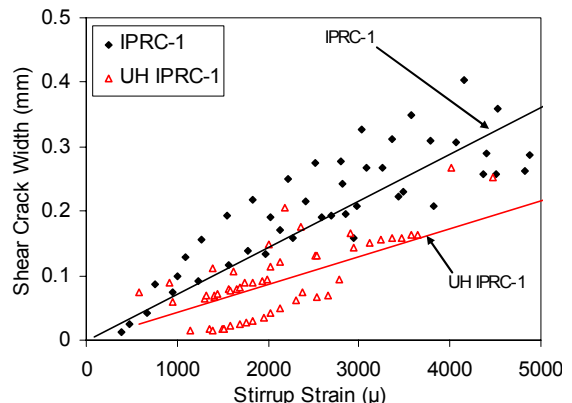


写真-3 せん断補強鉄筋破断状況



(a) RC シリーズ



(b) PRC シリーズ

図-7 せん断ひび割れ幅-せん断補強筋ひずみ

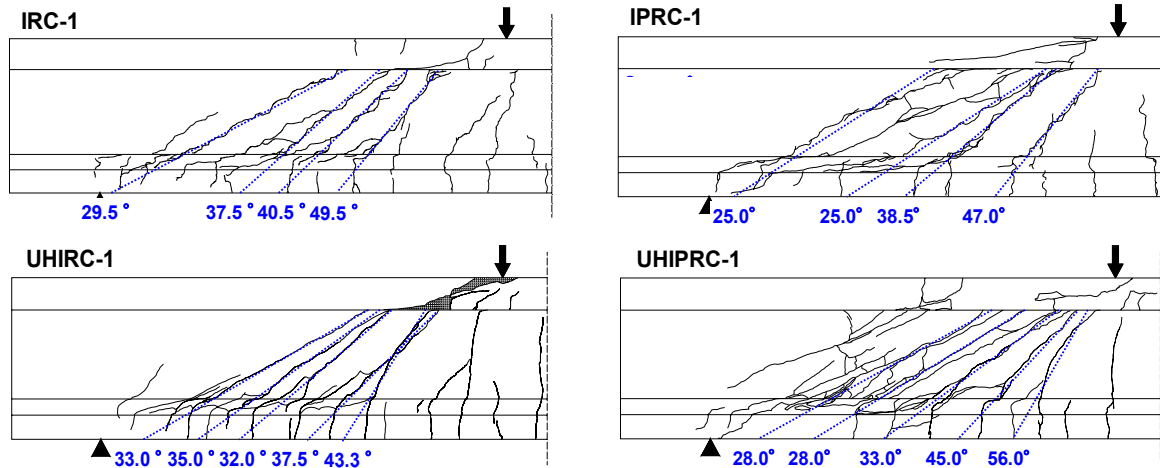


図-8 ひび割れ状況

見られるものの、せん断ひび割れ幅は概して小さくなっている。

(3)せん断ひび割れ角度

図-8 は普通コンクリートと超高強度コンクリートのひび割れ状況を示したものである。RCの場合は、ひび割れ状況は普通強度と高強度ではあまり大きな違いは見られないが、PRCでは、高強度を用いた場合にはひび割れ間隔が小さくなっており、これによりひび割れ幅も小さくなったものと推定される。

4.まとめ

圧縮強度 $f'_c=40, 100, 160\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いた RC および PRC 梁の荷重実験を行い、圧縮強度が曲げおよびせん断ひび割れ特性に与える影響について以下のことが明らかとなった。

- (1) 超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、骨材のコンクリート内での分布状態や骨材径によってひび割れ幅が大きくばらつく傾向がある。
- (2) 超高強度コンクリートではひび割れの発生も脆性的であり、大きな初期ひび割れが発生する。
- (3) 初期ひび割れが大きいことから、普通強度コンクリートに比べて、超高強度コンクリートの曲げひび割れ幅は大きくなる。
- (4) 土木学会による曲げひび割れ幅算定式は、超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。
- (5) 超高強度コンクリートの破壊状況は非常に脆性的であり、本実験において、せん断補強筋の破断が観測された。
- (6) せん断ひび割れ幅は、RC においてはコンクリートの圧縮強度の影響は見られないが PRC においては小さくなる。

謝辞

本研究は PC 技術協会「高強度コンクリート PC 構造物研究委員会」の一環として行われたものである。本研究で使用した圧縮強度 $f'_c=160\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートの作製には、鹿島建設(株)の一宮利通氏、盛田行彦氏に多大なるご協力、貴重なご意見を賜った。また、実験の実施に当たり、埼玉大学大学院生の Lam huu Quang 君、武田亮祐君に大きな協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

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) 日本コンクリート工学協会：高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会 報告書・論文集，2006.7
- 3) 高木真由子，睦好宏史，Eakarath Witchukreangkrai，浦松達也：プレストレスト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
- 4) 高木真由子，睦好宏史，De Silva Sudhira，浅本晋吾：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，コンクリート工学年次論文集，Vo22，No.3，pp.577-582，2006