

論文 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ性状

西 拓馬^{*1}・大野 義照^{*2}・中川 隆夫^{*3}・グエン テ クオン^{*4}

要旨：普通強度コンクリートの鉄筋コンクリート(RC)梁の曲げ試験から求められたひび割れ幅算定式の高強度コンクリートの RC 梁への適合性を、呼び強度が 60 あるいは 80N/mm² の高強度コンクリートを用いた RC 梁およびプレストレスト鉄筋コンクリート梁の曲げ載荷実験によって調べた。ひび割れ間隔はコンクリート強度の影響を受けないこと、平均鉄筋ひずみはコンクリート強度が大きいほど小さいこと、およびこれらのことが既往のひび割れ幅算定式によって評価できることを確認した。

キーワード：高強度コンクリート, 鉄筋コンクリート梁, ひび割れ間隔, ひび割れ幅算定式

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造の性能設計への移行に伴って常時荷重下の曲げひび割れ幅の制御が部材設計において行われるようになってくる。曲げひび割れ幅の算定式が、日本建築学会プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針¹⁾(以下 PRC 指針と略記)、あるいは同 RC 構造計算規準(RC 規準)²⁾付録に紹介されているが、同算定式はコンクリート強度が 20~40N/mm²の普通強度コンクリートを対象として誘導されたものである³⁾。

一方、近年、コンクリート強度は高強度化し、RC 規準は設計基準強度 60N/mm²まで対象としている。さらに高層集合住宅などは 100N/mm²を超えるコンクリートも用いられるようになっている。

本報告では呼び強度 60 および 80N/mm²の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート(RC)

及びプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 梁の曲げ載荷試験を行い、既往の曲げひび割れ幅算定式の高強度コンクリート梁への適用性を検討した。なお、比較のために呼び強度 24 N/mm²の普通強度コンクリート梁も製作した。

2. 実験概要

実験は実施時期の異なるシリーズ I とシリーズ II の 2 つの実験よりなり、シリーズ I では呼び強度 24 と 60N/mm²のコンクリートを、シリーズ 2 では呼び強度 24, 60 および 80N/mm²のコンクリートを用いた。試験体の形状はシリーズ I, II と同じである。実験要因はコンクリート強度のほかに、プレストレスの有無、PC 鋼材の付着の有無である。なお、レディミクストコンクリートの強度は JIS では呼び強度 60 まででそれ以上は調合強度などとしているが、本報告では後者も呼び強度をとという表記を用いる。

2.1 材料の性質

コンクリートはレディミクストコンクリートを用いた。セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は砂と砕砂の混合砂を、粗骨材は最大粒径 20mm の碎石を用いた。呼び強度 24,

表-1 コンクリート調合

呼び強度 [N/mm ²]	W/C	s/a	単位量[kg/m ³]				混和剤
			W	C	S	G	
24	57	50.4	180	316	887	898	高性能AE減水剤
60	29	48.3	175	603	762	836	高性能AE減水剤
80	23	44.7	175	761	658	836	高性能AE減水剤

*1 大阪大学大学院工学研究科 大学院生 (正会員)

*2 大阪大学大学院 教授 工博 (正会員)

*3 大阪大学大学院 助教 (正会員)

*4 大阪大学大学院工学研究科 大学院生

60, 80N/mm² のコンクリートの水セメント比はそれぞれ 57, 29, 23%である。

表-1 にコンクリートの調合表を示す。梁試験体と同じ養生条件下においたコンクリートの梁試験時の力学的性質などを表-2 に示す。

鉄筋は降伏点応力度 346 N/mm², ヤング係数 1.86 N/mm² (公称断面積から算出) の SD345 の D16 の横ふし異形鉄筋を用いた。PC 鋼材は C 種 1 号, 降伏点応力度 1251 N/mm² の ϕ 13mm の PC 鋼棒を用いた。梁試験時のグラウト強度は 70.8 N/mm² である。

2.2 試験体の種類

試験体の種類を表-3 に, 試験体の形状を図-1 に示す。試験体は単筋梁で, 等曲げ区間にはせん断補強筋を配置していない。PRC 試験体の PC 鋼材は核半径位置に配置した。RC 試験体は普通強度コンクリート, 高強度コンクリートとも各 2 体作製し, PRC 試験体には PC 鋼棒を用いて平均プレストレス (プレストレス力/梁断面積) 2.9N/mm² を導入しプレストレスの影響, 及びグラウトの有無によって PC 鋼材のボンドの有無の影響も調べた。PC 鋼材は, シース管 (ϕ 23 mm) 内に設置し, ボンド有の梁では緊張後グラウトを充填した。

2.3 载荷および測定方法

RC 試験体は普通強度コンクリート, 高強度コンクリートとも単調加力载荷と繰返し载荷を行った。PRC 試験体は各種類で繰返しを行った。ただし, 本報告では PRC 指針のひび割れ算定式の高強度コンクリート部材への適合性を検討することを主目的にしていることから繰返しによるひび割れ幅の復元性などは別報に譲ることにして繰返しの挙動については言及しない。

PRC 試験体のプレストレスの導入は材齢 15~17 日に行い, RC, PRC 試験体の载荷

表-2 コンクリートの力学的性質

コンクリートの種類	シリーズI		シリーズII		
強度[N/mm ²]	24	60	24	60	80
スランプフロー[cm]	20.5	21	18	50	60
空気量[%]	4.4	3.5	5.1	3	1.9
圧縮強度[N/mm ²]	25.5	76	36.3	74.1	108.2
割裂強度[N/mm ²]	2.28	4.07	2.8	3.3	3.4
ヤング係数[N/mm ²]	2.17×10 ⁴	3.23×10 ⁴	2.57×10 ⁴	3.25×10 ⁴	4.28×10 ⁴
試験日材齢[日]	28	28	34	35	34

表-3 試験体の種類

試験体記号		コンクリート 呼び強度	鋼材種	導入プレスト レス力[kN]	備考
シリーズⅠ	N-RC-1	24	2-D16	0	単調
	N-RC-2	24	2-D16	0	繰返
	N-PRC-B-2	24	2-D16 Φ 11PC鋼棒	98	繰返,ボンド
	N-PRC-U-2	24	2-D16 Φ 11PC鋼棒	98	繰返,アンボンド
	H-RC-1	60	2-D16	0	単調
	H-RC-2	60	2-D16	0	繰返
	H-PRC-B-2	60	2-D16 Φ 11PC鋼棒	98	繰返,ボンド
	H-PRC-U-1	60	2-D16 Φ 11PC鋼棒	98	単調,アンボンド
	H-PRC-U-2	60	2-D16 Φ 11PC鋼棒	98	繰返,アンボンド
シリーズⅡ	RC24-1	24	2-D16	0	単調
	RC24-2	24	2-D16	0	繰返
	PRC24-U	24	2-D16 Φ 13PC鋼棒	98	繰返,アンボンド
	PRC24-B	24	2-D16 Φ 13PC鋼棒	98	繰返,ボンド
	RC60-1	60	2-D16	0	単調
	RC60-2	60	2-D16	0	繰返
	PRC60-U	60	2-D16 Φ 13PC鋼棒	98	繰返,アンボンド
	PRC60-B	60	2-D16 Φ 13PC鋼棒	98	繰返,ボンド
	RC80-1	80	2-D16	0	単調
	RC80-2	80	2-D16	0	繰返
	PRC80-U	80	2-D16 Φ 13PC鋼棒	98	繰返,アンボンド
	PRC80-B	80	2-D16 Φ 13PC鋼棒	98	繰返,ボンド

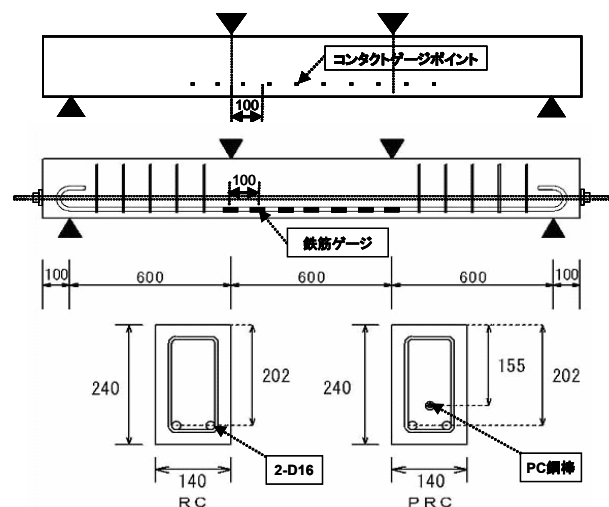


図-1 試験体形状

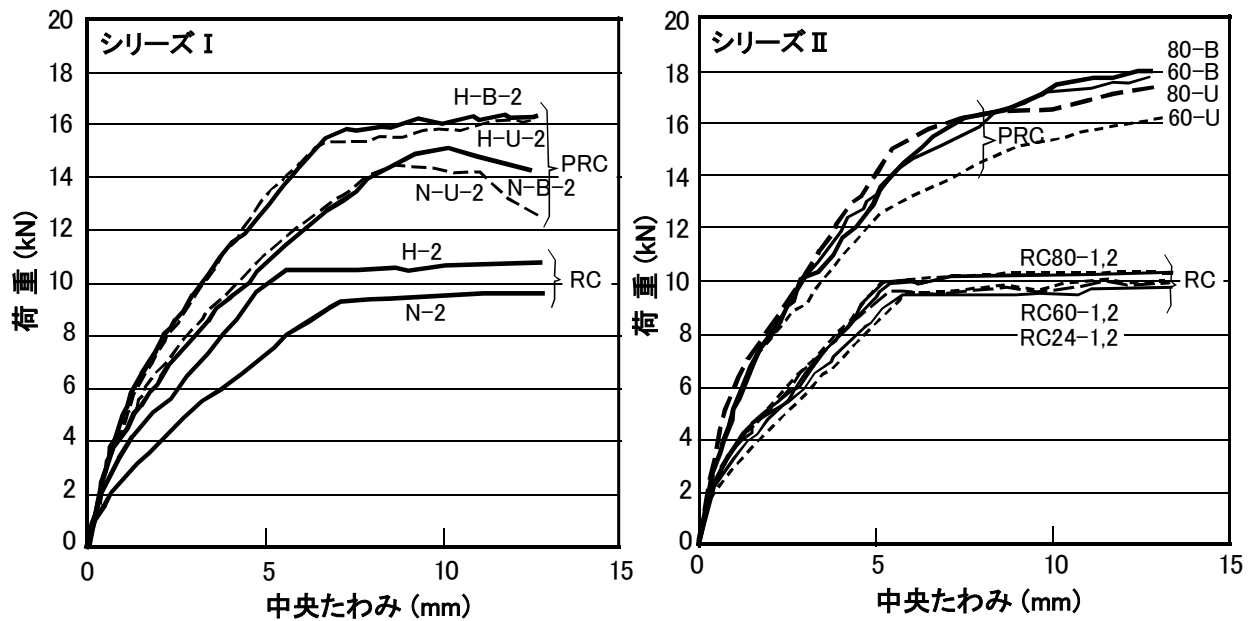


図-2 荷重－変位関係

は材齢 21～28 日に行った。プレストレス導入材齢までは湿潤養生を行い、導入後は気中養生を行った。載荷は三等分点載荷で、鉄筋ひずみは等曲げ区間において 100mm 間隔で 7 箇所にて貼付した箔ゲージにて測定した。ひび割れ幅は等曲げスパン内の鉄筋位置両側面に貼付したコンタクトストレインゲージにて測定した。繰り返し載荷は鉄筋の長期及び短期許容応力度近傍で各 1 回行った。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重－変形関係

RC 及び PRC 梁の荷重と梁中央部のたわみの関係を図-2 に示す。繰り返し試験体のたわみは包絡線で示している。シリーズ I では RC 及び PRC 梁ともにたわみは高強度コンクリートの方が小さく、シリーズ II ではコンクリート強度のたわみへの影響はわずかである。これはシリーズ I の呼び強度 24 のコンクリート強度が小さく、ヤング係数

表-4 ひび割れ荷重、降伏荷重、最大荷重の実験値と計算値

試験体		ひび割れ荷重[kN]			降伏荷重[kN]			最大荷重[kN]		
		実験値	計算値	実/計	実験値	計算値	実/計	実験値	計算値	実/計
シリーズⅠ	N-RC-1	12	17	0.71	90	86	1.05	99	88	1.13
	N-RC-2	14	17	0.82	93	86	1.08	96	88	1.09
	N-PRC-B-2	45	41	1.10	144	132	1.09	144	137	1.05
	N-PRC-U-2	49	41	1.20	139	118	1.18	150	124	1.21
	H-RC-1	20	30	0.67	105	87	1.21	100	93	1.08
	H-RC-2	20	30	0.67	103	87	1.18	116	93	1.25
	H-PRC-B-2	49	55	0.89	151	136	1.11	177	155	1.14
	H-PRC-U-1	55	55	1.00	150	127	1.18	167	134	1.25
	H-PRC-U-2	53	55	0.96	150	127	1.18	165	134	1.23
シリーズⅡ	RC24-1	10	15	0.67	100	84	1.19	107	87	1.23
	RC24-2	12	15	0.80	95	84	1.13	104	87	1.20
	PRC24-U	36	47.2	0.76	141	128	1.10	144	129	1.12
	PRC24-B	42	49.6	0.85	150	150	1.00	158	159	0.99
	RC60-1	15	21.5	0.70	93	84	1.11	100	89	1.12
	RC60-2	12	21.5	0.56	95	84	1.13	107	89	1.20
	PRC60-U	34	49.7	0.68	146	131	1.11	169	139	1.22
	PRC60-B	35	49.7	0.70	160	153	1.05	180	161	1.12
	RC80-1	25	26	0.96	99	84	1.18	109	91	1.20
	RC80-2	24	26	0.92	100	84	1.19	108	91	1.19
	PRC80-U	46	54	0.85	151	131	1.15	187	140	1.34
	PRC80-B	53	54	0.98	153	153	1.00	190	162	1.17

も小さかったことなどによるものと考えられる。表-4 にひび割れ荷重や最大荷重などを示す。ひび割れ荷重はひび割れ幅の計測値から判断した。ひび割れ荷重の計算値は次式から求めた。

$$M_{cr} = (0.56\sqrt{\sigma_b} + \sigma_p)Z \quad (1)$$

ここに、 σ_b ：コンクリートの圧縮強度

σ_p : 下縁有効プレストレス

Z : 断面係数

降伏荷重及び最大荷重（終局荷重）の計算値は、PRC 指針解説¹⁾の式から求めた。

ひび割れ荷重はコンクリートの強度が大きくなると大きくなるが、全般に実測値は計算値よりも小さい。これはコンクリートの自己収縮や乾燥収縮を鉄筋が拘束することによって生じる引張応力の影響と考えられる。

呼び強度 60 と 80 N/mm² の試験体において、降伏強度及び最大強度にはコンクリート強度の影響は認められない。PRC アンボンド試験体の降伏荷重はボンド試験体の 0.91~0.99 で PC 鋼材の付着の有無の影響が現れている。

3.2 ひび割れ状況と平均ひび割れ間隔

荷重を増加しても等曲げスパン内に新たなひび割れの生じないひび割れ定常状態におけるひび割れ状況を図-3 に示す。いずれの試験体においてもほぼ等間隔にひび割れが発生し、その間隔は 100mm 前後でコンクリート強度の影響は認められない。コンクリート圧縮強度が大きくなると引張強度が大きくなるが付着強度も大きくなるので、ひび割れ間隔には強度の影響が現れなかったものと考えられる。また、プレストレ

スの有無、PC 鋼材の付着の有無の影響は認められない。PC 鋼材の影響は、PC 鋼材のかぶりは鉄筋よりも大きく、断面積は小さく、付着力は小さいことから無視し得るといえる。

平均ひび割れ間隔を表-5 示す。RC 及び PRC 梁のひび割れ間隔実測値は、PRC 指針¹⁾の計算式（式(2)）による計算値 116 mm（PRC 梁では PC 鋼棒の存在を無視している）の±20%の範囲にあり、高強度コンクリートと普通強度コンクリートのひび割れ間隔はほぼ同じである。したがって高強度コンクリートにも式(2)の PRC 指針のひび割れ間隔計算式が適用できるといえる。

ひび割れ間隔 l_{av} 算定式

$$l_{av} = 2\left(c + \frac{s}{10}\right) + \frac{0.1\phi}{p_e} \quad (2)$$

ここに、c : かぶり厚さ

s : 鉄筋間隔

ϕ : 鉄筋径

p_e : 有効引張鉄筋比

3.3 平均鉄筋ひずみ

荷重と鉄筋の両側面に 100mm 間隔で貼付したひずみゲージで測定した平均鉄筋ひずみの関係を図-4 に示す。同図には常用計算式²⁾から計算されるひび割れ断面の鉄筋ひずみの計算値

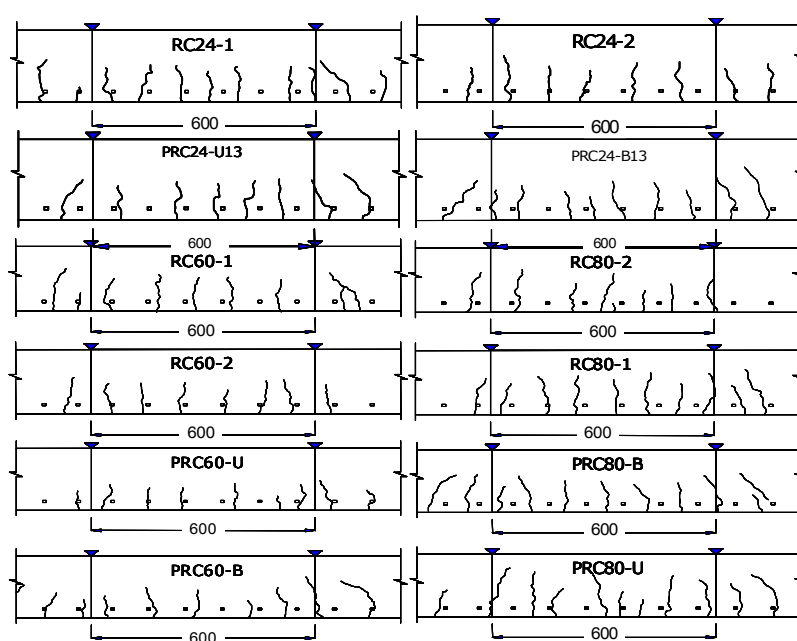


図-3 ひび割れ状況

表-5 ひび割れ間隔

試験体	平均ひび割れ間隔		
	実測値	計算値	実/計
Ⅰ 普通強度	N-RC-1	120	1.03
	N-RC-2	96	0.83
	N-PRC-B-2	95	0.82
	N-PRC-U-2	92	0.79
	H-RC-1	105	0.91
	H-RC-2	115	0.99
	H-PRC-B-2	94	0.81
	H-PRC-U-1	107	0.92
Ⅱ 高強度	H-PRC-U-2	125	1.08
	RC24-1	98	0.85
	RC24-2	122	1.05
	PRC24-U	109	0.94
	PRC24-B	108	0.93
	RC60-1	120	1.03
	RC60-2	111	0.96
	PRC60-U	118	1.02
	PRC60-B	105	0.91
	RC80-1	102	0.88
	RC80-2	104	0.89
	PRC80-U	108	0.93
	PRC80-B	111	0.96

(Max)と式(3)の PRC 指針の計算式による平均鉄筋ひずみの計算値(Ave)を示している。計算式に用いるコンクリートの引張強度には PRC 指針の式を用いた。平均鉄筋ひずみの計算値は高強度コンクリート梁の実測値ともほぼ一致し、コンクリート強度の増加によるひび割れ間コンクリートの協力作用の増大を適切に評価されているといえる。

平均鉄筋ひずみ計算式 ε_{sav}

$$\varepsilon_{sav} = (\sigma_t - k_1 k_2 \cdot \frac{F_t}{p_e}) E_s \quad (3)$$

ここに、 σ_t ：ひび割れ断面における鉄筋応力度

$$k_1 k_2 = 1 / (2 \times 10^3 \times \varepsilon_{sav} + 0.8)$$

F_t ：コンクリートの引張強度

$$(= 0.07 \sigma_b)$$

E_s ：鉄筋のヤング係数

3.4 平均ひび割れ幅

荷重と平均ひび割れ幅との関係を図-5に示す。図中の実線は実測値で、破線で示す計算値は、表-5に示したひび割れ間隔の実測値と図-4に示した平均鉄筋ひずみの実測値との積である。両者は一致し、このことは、ひび割れ幅はひび割れ間隔と平均鉄筋ひずみの積で求めてもよいことを示している。

また同図には、 2.9N/mm^2 の平均プレス

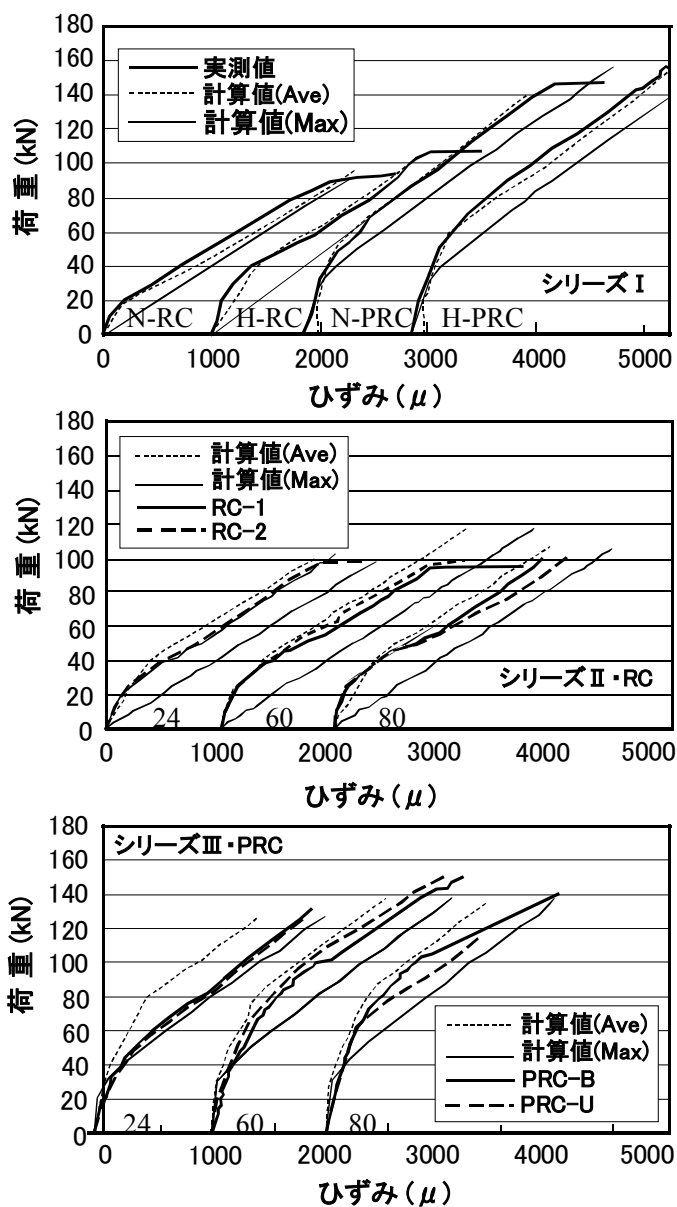


図-4 荷重と鉄筋ひずみの関係

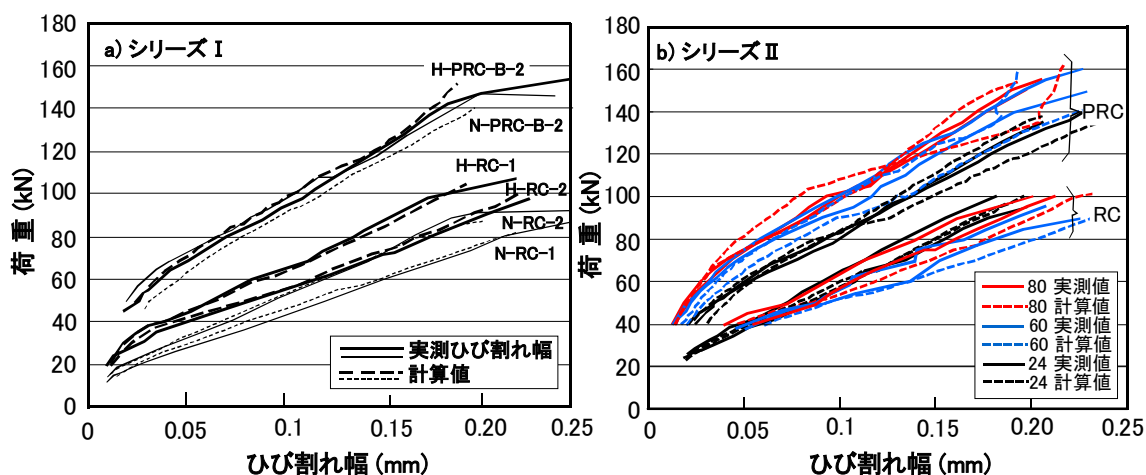


図-5 荷重－ひび割れ幅

表-6 ひび割れ幅

	試験体	実測値	計算値	実測/計算
シリーズⅠ	N-RC-1	0.120	0.130	0.92
	N-RC-2	0.090	0.120	0.75
	N-PRC-B-2	0.110	0.150	0.73
	N-PRC-U-2	0.120	0.180	0.67
	H-RC-1	0.100	0.120	0.83
	H-RC-2	0.110	0.120	0.92
	H-PRC-B-2	0.120	0.170	0.71
	H-PRC-U-1	0.130	0.160	0.81
	H-PRC-U-2	0.140	0.160	0.88
シリーズⅡ	RC24-1	0.100	0.080	1.25
	RC24-2	0.080	0.090	0.89
	PRC24-U	0.127	0.089	1.43
	PRC24-B	0.091	0.091	1.00
	RC60-1	0.092	0.095	0.97
	RC60-2	0.120	0.100	1.20
	PRC60-U	0.110	0.120	0.92
	PRC60-B	0.090	0.100	0.90
	RC80-1	0.080	0.085	0.94
	RC80-2	0.090	0.100	0.90
	PRC80-U	0.080	0.090	0.89
	PRC80-B	0.080	0.070	1.14

トレスによってひび割れ幅が大きく制御されていることや、コンクリート強度の増大によって RC、PRC 梁ともひび割れ幅が小さくなっていることが示されている。なお PC 鋼材の付着の有無の影響は現れていない。鉄筋応力度 200N/mm^2 付近におけるひび割れ幅の実測値と PRC 指針の算定式による算定値を表-6 に示す。平均ひび割れ間隔の実測値が算定値より小さいのでひび割れ幅も実測値は全般に算定値より小さくなっている。

なお、RC および PRC 梁における最大ひび割れ幅の平均ひび割れ幅に対する比は、普通強度コンクリート梁で 1.17~1.48、高強度コンクリートで 1.23~1.40 であり、いずれも PRC 指針のひび割れ幅計算式の 1.5 より小さい値であった。

4. まとめ

普通強度コンクリート及び高強度コンクリート ($60, 80\text{ N/mm}^2$ クラス) を用いた鉄筋コンクリート梁及び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を調べた結果をまとめと以下ようになる。

1) ひび割れ間隔はコンクリート強度の影響を受けず、PRC 指針の算定式で算定することができた。また本実験の範囲では PC 鋼材のひび割れ間隔に及ぼす影響は認められず PRC 梁のひび割れ間隔は RC 梁とほぼ同じであった。

2) 高強度コンクリート RC・PRC 梁の平均鉄筋ひずみはひび割れ間コンクリートの協力作用の増加により普通強度コンクリート RC・PRC 梁より小さくなるが、PRC 指針式でコンクリート強度の影響を評価することができた。

3) ひび割れ幅の最大値と平均値の比率は普通強度コンクリートで 1.17~1.48 倍、高強度コンクリートで 1.23~1.40 倍で、いずれも 1.5 倍以下であった。

4) 高強度コンクリートを用いた RC 及び PRC 梁の曲げひび割れ幅の算定に、普通強度コンクリートのデータから導かれた PRC 指針の曲げひび割れ幅算定式が適用できる。

謝辞：本実験には(株)神鋼鋼線から PC 鋼材の提供をいただきました。また本研究を行うにあたって本学大学院生李德基氏の協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種 PC）構造設計・施工指針・同解説， 1986
- 2) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説， 1999
- 3) 鈴木，大野：プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅に関する研究（その 1），日本建学会論文報告集，第 303 号，1981.5
- 4) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート計算規準・同解説 1999