

高強度コンクリートを用いた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

大阪大学大学院 正会員 ○ 李 徳基
 大阪大学大学院 西 拓馬
 大阪大学大学院 正会員 工博 大野 義照
 大阪大学大学院 中川 隆夫

1. はじめに

近年、コンクリートは高強度化し、日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準¹⁾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きている。一方、プレストレスト鉄筋コンクリート部材の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²⁾ (以下 PRC 指針と略す) 解説に取り上げられているが、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⁾。また、部材設計において、ひび割れなどの使用性のほかに地震後の修復性が設計対象となりつつあり、たわみやひび割れの復元性に関心が高まってきている。

本報告では設計基準強度 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ならびにたわみやひび割れの復元性などを検討した。

2. 実験概要

2.1 材料の性質

用いたコンクリートはレディミクストコンクリートで、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は海砂と砕砂の混合砂、粗骨材は最大粒径 20mm の砕石である。設計基準強度 24, 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、規格降伏点応力度 1251 N/mm² の φ 13mm と φ 17mm 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 に示す。実験要因はコンクリート強度、プレストレスの有無、及び PC 鋼材の付着の有無である。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

表-1 コンクリート調合表

設計基準強度 [N/mm ²]	W/C [%]	s/a [%]	単位量[kg/cm 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

表-2 コンクリートの力学的性質

設計基準強度[N/mm ²]	24	60	80
スランプ(フロー)[cm]	18	50	60
空気量[%]	5.1	3	1.9
圧縮強度[N/mm ²]	36.3	74.1	108.2
割裂強度[N/mm ²]	2.8	3.3	3.4
ヤング係数[N/mm ²]	2.57x10 ⁴	3.25x10 ⁴	4.28x10 ⁴
試験日材齢[日]	34	35	34

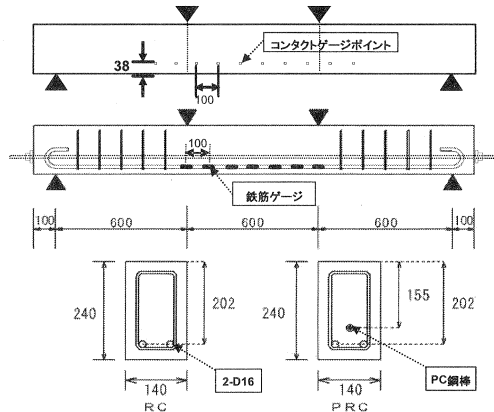


図-1 試験体の形状

鋼材は核半径位置より 5mm 上方に配置した。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、PRC 試験体は各 1 体製作した。PRC 試験体にはφ13mm 又はφ17mm の 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) 2.9, 又は 5.8 N/mm²を導入し、プレストレスの影響、及び PC 鋼材のボンドの有無の影響も調べた。なお、φ13mm の PC 鋼棒を用いた PRC (13) 試験体のプレストレス係数 λ ($=T_p / (T_p + T_s)$, T_p : PC 鋼材降伏引張力, T_s : 鉄筋降伏引張力)は 0.51, φ17mm を用いた PRC (17) 試験体の λ は 0.64 である。PC 鋼材は、シース管内に設置し、ボンド有りの試験体にはグラウトを注入した。

表-3 試験体の種類

試験体記号	コンクリート設計基準強度	鋼材種	導入プレストレス力[kN]	備考
RC24-1	24	2-D16	0	単調
RC24-2	24	2-D16	0	繰返
PRC24(13)-U	24	2-D16 Φ13PC鋼棒	98	繰返, アンボンド
PRC24(13)-B	24	2-D16 Φ13PC鋼棒	98	繰返, ボンド
PRC24(17)-U	24	2-D16 Φ17PC鋼棒	196	繰返, アンボンド
RC60-1	60	2-D16	0	単調
RC60-2	60	2-D16	0	繰返
PRC60(13)-U	60	2-D16 Φ13PC鋼棒	98	繰返, アンボンド
PRC60(13)-B	60	2-D16 Φ13PC鋼棒	98	繰返, ボンド
PRC60(17)-U	60	2-D16 Φ17PC鋼棒	196	繰返, アンボンド
RC80-1	80	2-D16	0	単調
RC80-2	80	2-D16	0	繰返
PRC80(13)-U	80	2-D16 Φ13PC鋼棒	98	繰返, アンボンド
PRC80(13)-B	80	2-D16 Φ13PC鋼棒	98	繰返, ボンド
PRC80(17)-U	80	2-D16 Φ17PC鋼棒	196	繰返, アンボンド

2.3 荷重および測定方法

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 試験体の荷重は材齢 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。荷重は三等分点荷重で、鉄筋ひずみは 100 mm 間隔で 7 箇所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 (検長 100mm) にて測定した。

RC 試験体は単調加力荷重と繰返し荷重を行った。PRC 試験体は各種類とも繰返し荷重を行った。繰返し荷重は、原則として鉄筋の長期許容応力度の荷重、及び鉄筋の降伏荷重を少し超えた荷重から荷重ゼロまで減力する繰返しを各 1 回行った。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変形関係

1) 荷重-変形関係と復元性

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。RC 試験体におけるコンクリート強度のたわみへの影響はわずかである。φ17 の PC 鋼棒を用いた PRC24 (17) 試験体では、鉄筋・鋼材係数²⁾が 0.38 と大きく PC 鋼材が降伏に至る前にコンクリートが圧壊している。

長期荷重から荷重ゼロま

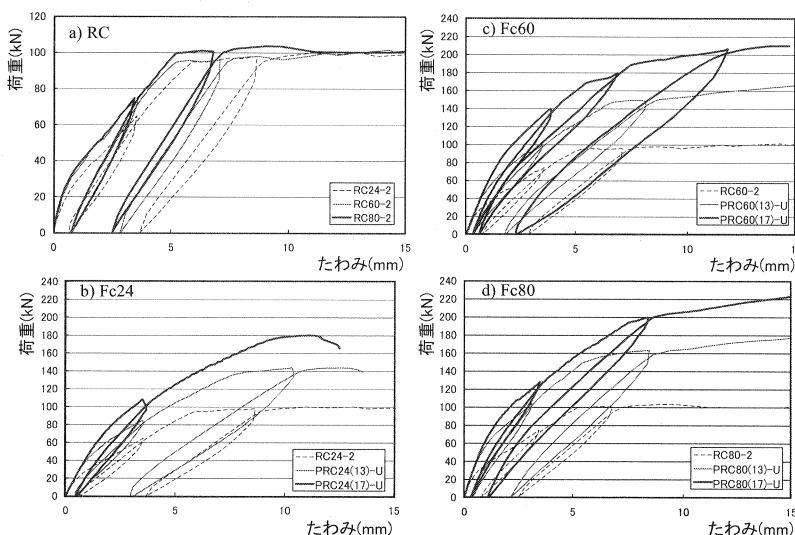
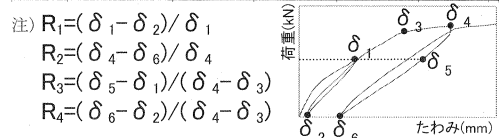


図-2 荷重-たわみ関係

で減力したときのたわみ復元性 R_1 などを表-4 に示す。 R_1 は、RC 試験体が 0.77~0.81, PRC (13), PRC (17) が 0.86~0.91 で、RC より PRC の方が復元性は大きくなっているが、PRC (13) と PRC (17) の復元性の差は小さい。鉄筋降伏後に増大したたわみの減力時の回復程度を把握するために長期荷重時における加力時と減力時のたわみ差 ($\delta_5 - \delta_1$; 表-4 注参照) 及び除荷時のたわみ差 ($\delta_6 - \delta_2$) の ($\delta_4 - \delta_3$) に対する割合をそれぞれ R_3 及び R_4 として表-4 に示している。 R_3 は 1.04~1.91 で、減力時の長期荷重においては鉄筋降伏後のたわみ増分より大きなたわみが加力時のたわみ (δ_1) に加算されている。RC の R_4 は 1.06~1.13 で鉄筋降伏後のたわみ増分が δ_2 に加わっている。Fc80 の PRC 試験体は除荷時にはプレストレスによって鉄筋降伏後のたわみ増分より大きく回復している。ただし、鉄筋が降伏するとたわみは無筋 PC 梁のように回復しない。

表-4 たわみ復元性

試験体	R_1	R_2	R_3	R_4
RC24-2	0.81	0.58	1.45	1.09
PRC24(13)-U	0.87	0.71	1.91	1.05
PRC24(13)-B	0.87	0.68	1.82	1.10
PRC24(17)-U	0.86	0.63	1.34	0.78
RC60-2	0.79	0.60	1.56	1.13
PRC60(13)-U	0.90	0.78	-	1.13
PRC60(13)-B	0.91	0.83	-	-
PRC60(17)-U	0.91	0.91	1.41	0.22
RC80-2	0.77	0.63	1.54	1.06
PRC80(13)-U	0.89	0.74	1.18	0.60
PRC80(13)-B	0.86	0.45	1.04	0.77
PRC80(17)-U	0.90	0.74	1.12	0.47



2) ひび割れ荷重と降伏荷重

表-5 に載荷時の PC 鋼材引張力、鉄筋の圧縮力、及びこれらの力から計算される下縁有効プレストレスを示す。コンクリートのクリープ・乾燥収縮による PC 鋼材の引張力の損失は少ないが、負のプレストレス力とも言える鉄筋の圧縮力が大きいことが分かる。これは鉄筋の断面積が大きいためであり、偏心距離も大きいことからプレストレス損失への影響も大きい。

表-6 にひび割れ、降伏、最大荷重の実験値と計算値を示す。

ひび割れ荷重の計算値は次式から求めた。

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

ここに、 $0.56\sqrt{\sigma_b}$: コンクリートの曲げ強度¹⁾,

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_c : 鉄筋コンクリート断面の断面係数

なお、下縁有効プレストレスは鉄筋の圧縮力を考慮している。

表-5 PC 鋼材有効引張力、鉄筋の圧縮力、下縁有効プレストレス(載荷開始時)

試験体	鉄筋圧縮力 (kN)		鉄筋によるコンクリート下縁引張応力 (N/mm ²)		PC鋼材引張力 (kN)		PC鋼材引張力有効率		PC鋼材によるコンクリート下縁圧縮応力 (N/mm ²)		鉄筋・PC鋼材によるコンクリート下縁圧縮応力 (N/mm ²)		コンクリート下縁プレストレス有効率	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
RC24-1	6.4	0.6	-	-	-	-	-	-	-0.6	-	-	-	-	-
RC24-2	6.0	0.5	-	-	-	-	-	-	-0.5	-	-	-	-	
PRC24(13)-U	18.1	1.5	97.9	0.999	5.5	5.9	4.0	4.3	0.72	0.72	0.72	0.72	0.59	0.59
PRC24(13)-B	27.0	2.3	97.6	0.996	5.5	5.9	3.2	3.5	0.59	0.59	0.71	0.71	0.68	0.68
PRC24(17)-U	38.2	3.2	195.4	0.997	11.1	11.9	7.8	8.4	0.71	0.71	-	-	-	-
RC60-1	17.3	1.6	-	-	-	-	-	-	-1.6	-	-	-	-	-
RC60-2	15.5	1.4	-	-	-	-	-	-	-1.4	-	-	-	-	-
PRC60(13)-U	27.4	2.3	97.8	0.998	5.5	5.9	3.2	3.4	0.58	0.58	0.58	0.58	0.49	0.49
PRC60(13)-B	33.0	2.8	97.7	0.997	5.5	5.9	2.7	2.9	0.50	0.49	0.68	0.68	0.70	0.70
PRC60(17)-U	42.1	3.6	195.3	0.997	11.1	11.9	7.5	8.0	0.68	0.68	-	-	-	-
RC80-1	9.0	0.8	-	-	-	-	-	-	-0.8	-	-	-	-	-
RC80-2	11.9	1.1	-	-	-	-	-	-	-1.1	-	-	-	-	-
PRC80(13)-U	24.2	2.0	97.8	0.998	5.5	5.9	3.5	3.7	0.63	0.63	0.63	0.63	0.72	0.72
PRC80(13)-B	18.5	1.6	97.8	0.998	5.5	5.9	4.0	4.3	0.72	0.72	0.70	0.70	0.70	0.70
PRC80(17)-U	39.3	3.3	195.1	0.995	11.1	11.8	7.7	8.3	0.70	0.70	-	-	-	-

表-6 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
RC24-1	10	10.9	0.91	100	84	1.19	107	87	1.23
RC24-2	12	11.1	1.08	95	84	1.13	107	87	1.23
PRC24(13)-U	36	37.3	0.97	141	112	1.26	144	131	1.10
PRC24(13)-B	42	33.3	1.26	150	111	1.35	158	123	1.28
PRC24(17)-U	67	57.1	1.17	160	149	1.08	180	171	1.05
RC60-1	15	12.8	1.17	93	84	1.11	100	89	1.12
RC60-2	12	13.4	0.89	95	84	1.13	107	89	1.20
PRC60(13)-U	34	35.2	0.97	146	112	1.31	169	131	1.29
PRC60(13)-B	35	32.7	1.07	160	111	1.44	180	123	1.46
PRC60(17)-U	75	62.4	1.2	203	149	1.36	213	171	1.25
RC80-1	25	26.2	0.95	99	84	1.18	109	91	1.20
RC80-2	24	25.2	0.95	100	84	1.19	109	91	1.20
PRC80(13)-U	46	54.9	0.84	151	112	1.35	190	131	1.45
PRC80(13)-B	53	57.4	0.92	153	112	1.37	190	123	1.54
PRC80(17)-U	80	76.8	1.04	215	149	1.45	225	171	1.32

表-7 平均ひび割れ間隔

試験体	平均ひび割れ間隔(mm)		
	実験値	計算値	実/計
RC24-1	98	116	0.84
RC24-2	122		1.05
PRC24(13)-U	108		0.93
PRC24(13)-B	109		0.94
PRC24(17)-U	113		0.97
RC60-1	120		1.03
RC60-2	111		0.96
PRC60(13)-U	118		1.02
PRC60(13)-B	105		0.91
PRC60(17)-U	107		0.92
RC80-1	102		0.88
RC80-2	104		0.90
PRC80(13)-U	108		0.93
PRC80(13)-B	111		0.96
PRC80(17)-U	107		0.92

降伏荷重及び最大荷重(終局荷重)の計算値は, PRC 指針解説²⁾の式から求めた。

ひび割れ荷重の計算値はほぼ実測値と一致している。

降伏荷重及び最大荷重へのコンクリート強度の影響は, RC 試験体においては認められない。しかし, PRC 試験体においてはコンクリート強度が大きくなるほど降伏荷重及び最大荷重が大きくなっている。また, PRC 試験体における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 である。

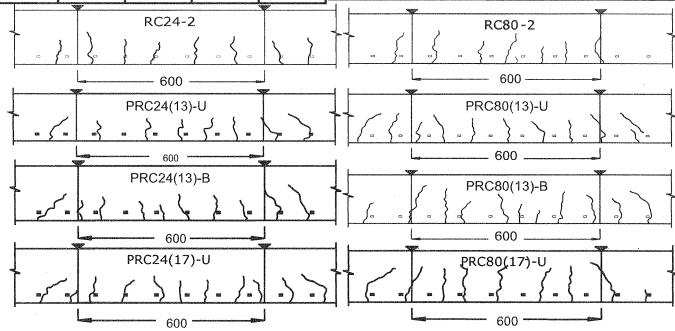


図-3 ひび割れ状況

3.2 ひび割れ状況と平均ひび割れ間隔

Fc24 と 80 の試験体の曲げスパンにおける, 荷重を増加しても新たなひび割れの生じないひび割れ定常状態でのひび割れ状況を図-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および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。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ことで, 両者のひび割れ間隔に及ぼす影響が相殺され, 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。PC 鋼材の影響は, PC 鋼材のかぶり厚は鉄筋よりも大きく, その断面積は小さく, 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-7 示す。RC 及び PRC のひび割れ間隔は, 高強度コンクリートと普通強度コンクリートの値はほぼ同じで, 日本建築学会 PRC 指針²⁾の計算式(式(2))による計算値 116 mm (PRC 梁の PC 鋼棒の存在を無視している)の±20%の範囲にある。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

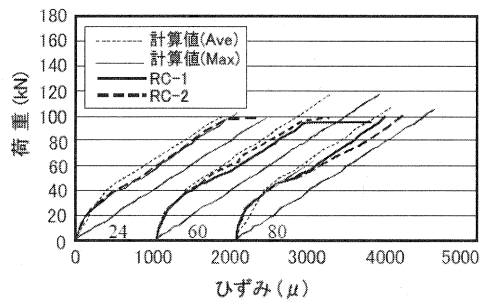


図-4 荷重-平均鉄筋ひずみ

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の一例を図-4に示す。同図には RC 規準¹⁾の断面算定式から計算されるひび割れ断面の鉄筋ひずみの計算値 (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。高強度コンクリート RC 梁の平均鉄筋ひずみは普通強度コンクリートより小さくなるが、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 (Tension Stiffening 効果) の増大を適切に評価しているといえる。

平均鉄筋ひずみ計算式 ε_{sav}

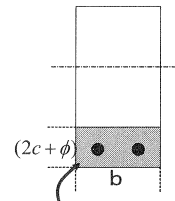
$$\varepsilon_{sav} = (\sigma_t - k_1 k_2 \cdot \frac{F_t}{P_e}) / E_s \quad (3)$$

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 σ_b)

E_s : 鉄筋のヤング係数,



$$P_e = \text{引張有効鉄筋比} (=a_f/A_{ce})$$

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。コンクリート強度のひび割れ幅への影響が小さいこと (a) 図参照)、プレス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 (b), c), d) 図) が示されている。なお、図には示していないが、PC 鋼材の付着の有無の影響は現れていない。

3.5 ひび割れ幅の復元性

鉄筋降伏後のひび割れ幅の復元性を検討するために、鉄筋降伏後の減力開始時までひび割れ幅が測定できたひび割れのうち、ひび割れ幅が大きい2つのひび割れ幅の平均で繰返し時の荷重とひび割れ幅の関係の例を図-6に示す。また、たわみと同様に求めた $R_1 \sim R_4$ を表-8に示す。長期荷重からの復元性を示す R_1 は RC が 0.69~0.74 であるのに対して PRC は 0.91~1.0 で、プレストレスによってひび割れはほぼ閉じている。鉄筋降伏後の復元性 R_2 は 0.93

以下で、PRC の復元性は RC より大きいもののひび割れの閉合には至っていない。

鉄筋降伏により増大したひび割れ幅に対する、減力時の長期荷重における、あるいは除荷時の増大量の割合をそれぞれ R_3 および R_4 として示す。

R_3 は 1.17~1.74 で、たわみと同様に減力時の長期荷重においては鉄筋降伏による増分より大きな値が W_1 に加算されている。しかし、PRC の R_4 は 0.29~0.78 で、除荷されると鉄筋降伏による増分はある程度回復している。

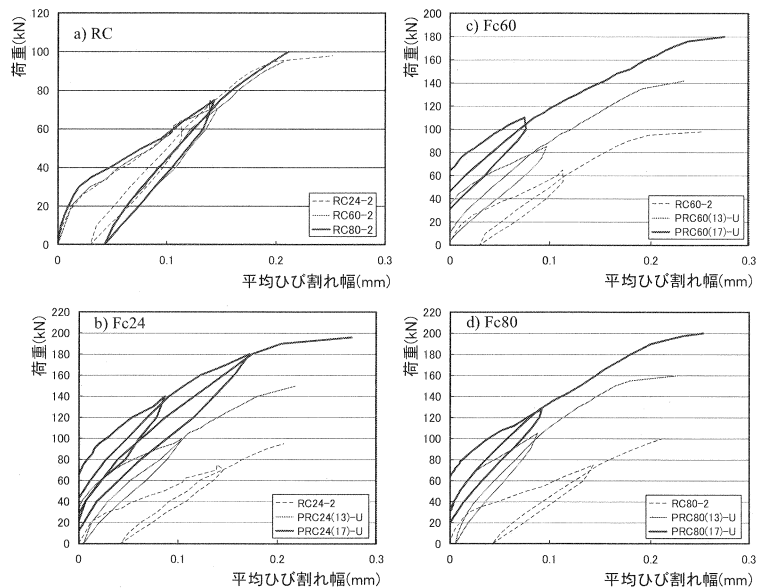


図-5 荷重-平均ひび割れ幅

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, 80N/mm²クラス)を用いた鉄筋コンクリート(RC)梁及びプレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)梁の曲げひび割れ性状を調べた結果をまとめると以下になる。

- 1) ひび割れ荷重はコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるPC鋼材の引張力の損失だけでなく鉄筋の圧縮力を考慮することによって精度よく算定できた。
- 2) PRC梁の除荷時におけるたわみの復元性はRC梁の復元性よりは大きいもののその差は小さい。
- 3) 長期荷重からの除荷時には、RC梁のひび割れは閉じないが、PRC梁のひび割れはほぼ閉じる。鉄筋が降伏した後の除荷時にはPRC梁ではRC梁よりもひび割れ幅は減少するが、ひび割れが閉じる迄には至らない。
- 4) 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²⁾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。
- 5) 高強度コンクリート梁の平均鉄筋ひずみは普通強度コンクリートより小さくなるが、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。
- 6) 高強度コンクリートを用いたRC梁及びPRC梁の曲げひび割れ幅の算定に、PRC指針の曲げひび割れ幅算定式が適用できる。

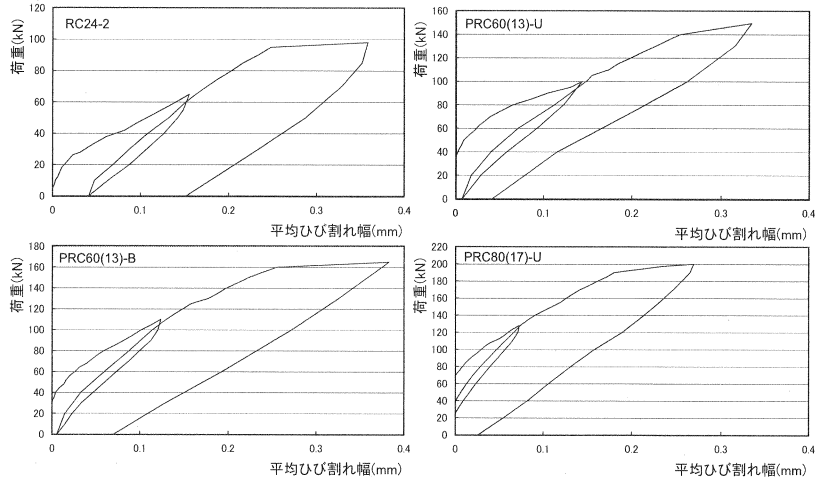
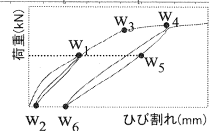


図-6 荷重-ひび割れ幅(一例)

表-8 ひび割れ幅の復元性

試験体	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
RC24-2	0.74	0.58	1.20	1.00
PRC24(13)-U	1.00	0.93	-	-
PRC24(13)-B	1.00	0.76	1.35	0.72
PRC24(17)-U	1.00	0.85	1.29	0.45
RC60-2	0.69	0.74	-	-
PRC60(13)-U	0.95	0.87	1.44	0.42
PRC60(13)-B	0.96	0.82	1.17	0.51
PRC60(17)-U	1.00	0.80	1.22	0.48
RC80-2	0.72	0.74	-	-
PRC80(13)-U	0.91	0.80	1.74	0.78
PRC80(13)-B	0.93	-	-	-
PRC80(17)-U	1.00	0.90	1.32	0.29

注) R₁=(w₁-w₂)/w₁
 R₂=(w₄-w₆)/w₄
 R₃=(w₅-w₁)/(w₄-w₃)
 R₄=(w₆-w₂)/(w₄-w₃)



謝辞: 本実験には㈱神鋼鋼線からPC鋼材の提供をいただきました。また、実験にあたり本学院生グエンテクオン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: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 2) 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
- 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), 日本建築学会論文報告集, 第303号, 1981.5
- 4) 西 拓馬, グエン テクオン, 中川 隆夫, 大野 義照: 高強度鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ性状; 日本コンクリート工学協会, 年次論文集 Vol.29, No.2 2007.7