

論文 鉄筋コンクリート梁のせん断ひび割れ幅

柳瀬 圭児^{*1}・大野 義照^{*2}・李 振宝^{*3}・南 宏明^{*4}

要旨：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)梁のせん断
 載荷試験を行い、せん断ひび割れ幅の加力時、減力時の特性(荷重とひび割れ幅の関係、
 せん断補強筋歪とひび割れ幅の関係など)を調べた。RC、PRC 梁の曲げ載荷試験もを行い、
 せん断ひび割れ幅と曲げひび割れ幅の特性を比較した。

キーワード：せん断ひび割れ幅、残留ひび割れ幅、せん断補強筋比、プレストレス

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、ひび割れの発生により鉄筋の腐食が進行する可能性が大きく、それにより耐久性が損なわれる。またひび割れにより美観も大きく損なわれる。

ひび割れのうち、曲げひび割れ幅の算定については、これまで多くの研究がなされ計算式が提案されている¹⁾²⁾が、せん断ひび割れ幅については、長期荷重下でのせん断ひび割れが許容されないことや、せん断挙動の複雑な機構からせん断ひび割れ幅に関する研究は少なく、その制御方法は確立されていない³⁾⁴⁾。

一方、改正された建築基準法施行令では、地震などの外乱の作用後も構造物の使用性や耐久性などが低下せず、したがって補修を必要としない損傷限界が定義された。すなわち使用性や耐久性の観点からは、外乱作用後に過大な残留ひび割れが生じないことが要求される。

そこで本報では、せん断補強筋径、せん断補強筋比、プレストレスの有無を要因に梁のせん断試験を行い、加力時および減力時のせん断ひび割れ幅の特性について調べた。また梁の曲げ載荷試験もを行い、繰返し載荷時の曲げひび割れ幅について検討すると共に、その残留ひび割れについて検討し、せん断ひび割れと曲げひび割れの特性の比較を行った。

2. 実験概要

試験体の種類を表-1に、試験体の形状・配筋詳細を図-1に示す。試験体はせん断試験用5体、曲げ試験用2体で、せん断試験体のせん断補強筋にはD6とD10を用い、せん断補強筋比 P_w は0.42%、0.84%である。せん断補強筋は溶接閉鎖型である。

せん断試験体では、せん断破壊が曲げ破壊に先行するように、引張・圧縮鉄筋としてそれぞれ5-D16(SD495)を配置している。曲げ試験体では、試験区間である等曲げスパン内には、せん断補強筋は配置していない。プレストレスの導入は載荷直前にを行い、PC鋼材緊張力は300kNである。PC鋼材位置は、せん断試験体では断面重心位置、曲げ試験体では核半径位置である。

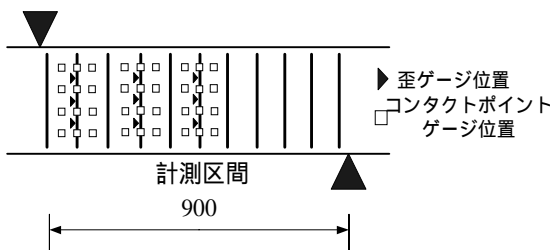
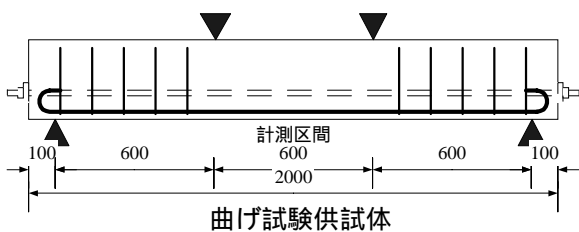
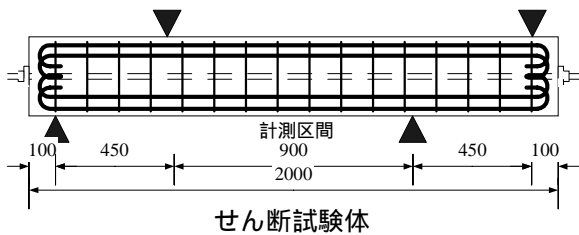
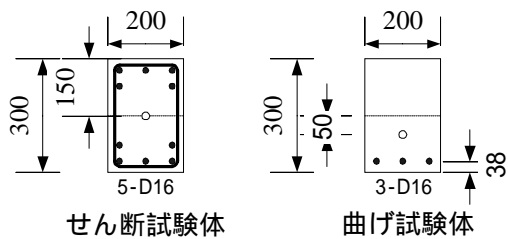
コンクリートは $w/c=50\%$ 、スランプ10cmのレディミクストコンクリートを用い、その試験時(材齢51日)の圧縮強度は 39.9N/mm^2 、割裂強度は 2.75N/mm^2 、及びヤング係数は $2.34 \times 10^4\text{N/mm}^2$ である。

せん断補強筋に用いたD6とD10(共にSD295A)の降伏点応力度は、それぞれ $302.5 \sim 352.5\text{N/mm}^2$ であり、せん断試験体の主筋に用いたD16(SD495)の降伏点応力度、及び曲げ試験体の主筋に用いたD16(SD345)の降伏点応

* 1	大阪大学大学院	工学研究科建築工学専攻	(正会員)
* 2	大阪大学大学院教授	工学研究科建築工学専攻	工博(正会員)
* 3	大末建設(株)	技術統括部	工博(正会員)
* 4	(株)奥村組	建築部	工修(正会員)

表 - 1 試験体の種類

試験体 No	せん断補強筋			平均プレストレス	試験種別
	呼名	間隔	Pw		
No.1	D 6	75 mm	0.42%		せん断
No.2	D 10	169 mm	0.42%		せん断
No.3	D 10	169 mm	0.42%	5 N/mm ²	せん断
No.4	D 10	85 mm	0.84%		せん断
No.5	D 10	85 mm	0.84%	5 N/mm ²	せん断
No.6					曲げ
No.7				5 N/mm ²	曲げ



せん断試験体 せん断補強筋歪、ひび割れ幅計測位置例
No. 4 (D10 Pw = 0.84%)

本報ではひび割れ幅は上下の標点間で測定し、ひび割れの角度に関わらず測定値をひび割れ幅とし角度による補正は行っていない。

図 - 1 試験体形状・配筋詳細図

力度は、それぞれ 550、384N/mm²である。PC 鋼棒には径 21 mm の C 種を用いた。

せん断試験体は逆対称載荷法により、曲げ試験体は 3 等分載荷により、それぞれ正方向繰返載荷を行った。ただし、せん断試験における繰返し荷重の下限荷重は 20kN である。

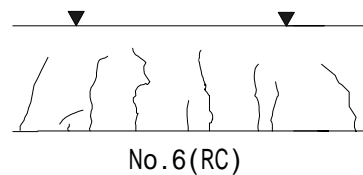
ひび割れ幅は、せん断試験体では図 - 1 中に示すように、せん断補強筋位置及びせん断補強筋間において、曲げ試験体では引張鉄筋高さ位置において、精度 1/1000 mm のコンタクトポイントゲージを用いて測定した。鉄筋歪は、せん断試験体ではあばら筋の歪を 60 mm 間隔に貼付した検長 1 mm 箔ゲージで、曲げ試験体では引張鉄筋の歪を 50 mm 間隔に貼付した検長 2 mm 箔ゲージにて測定した。

3. 実験結果と考察

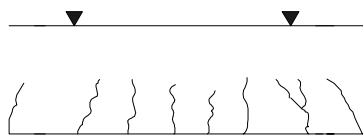
3.1 曲げ載荷試験

(1) ひび割れ状況

ひび割れの定常状態（新たなひび割れが発生しない状態）におけるひび割れ状況を図 - 2 に示す。プレストレスの効果によって、No. 6 に比べ No. 7 の中立軸深さが大きく、ひび割れ高さが低いことがわかる。



No. 6 (RC)



No. 7 (PRC)

図 - 2 曲げひび割れ状況

(2) 荷重とひび割れ幅の関係

a) 鉄筋降伏前

図 - 3 に試験体 No. 6 と No. 7 のひび割れの定常状態における平均曲げひび割れ幅と荷重関係の包絡線を示す。図中の 印は実測値で、実線

は日本建築学会PRC指針解説の式¹⁾による計算値である。同式は平均ひび割れ幅 (w_{av}) を平均ひび割れ間隔 (l_{av}) と平均鉄筋歪 (ϵ_{av}) の積で与えているが、計算値と実測値はよく一致している。また PRC 梁は RC 梁に比べて、プレストレスングによりひび割れ幅が小さく抑えられている。

図 - 4 に鉄筋降伏位置における曲げひび割れ幅と鉄筋降伏以前の荷重との関係を示す。図中に示すディコンプレッション荷重 ($P_D = 100\text{kN}$) は、下縁応力が零の時の荷重である。PRC 梁の減力時のひび割れ幅は、プレストレスにより大きく回復しているが、ディコンプレッション荷重でひび割れが完全に閉口するフル PC 梁と異なり、減力時の鉄筋の付着により、ひび割れの閉合は P_D より小さな荷重となる。ただし、ひび割れ幅 0.13 mm 時荷重からの除荷時の P_D 時残留ひび割れ幅を比較すると、PRC 梁は

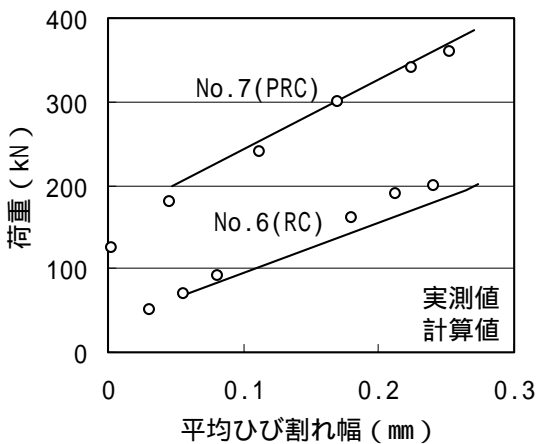


図 - 3 荷重 - 平均曲げひび割れ関係

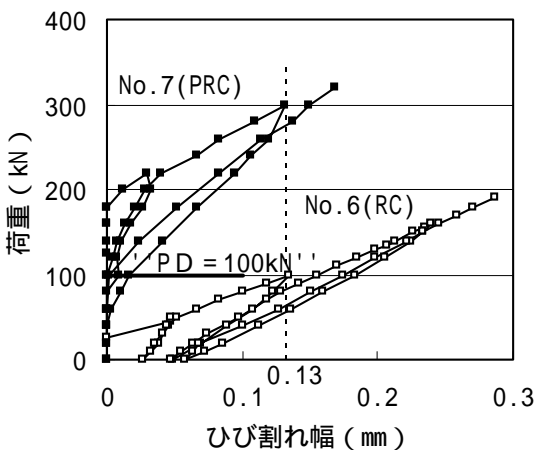


図 - 4 荷重 - ひび割れ幅履歴

0.01 mm 、RC 梁は 0.05 mm (荷重 0 kN 時) で、PRC 梁の残留ひび割れ幅は RC 梁に対して約 $1/5$ に制御されている。

b) 鉄筋降伏後

図 - 5 に、図 - 4 に示したひび割れにおける、鉄筋が降伏した後の荷重 - ひび割れ幅関係を示す。RC 梁の場合、鉄筋降伏後のひび割れ幅の増加分がそのまま残留ひび割れ幅の増加分になるのに対して、PRC 梁の場合、鉄筋降伏後であってもプレストレス力により残留ひび割れ幅は、鉄筋降伏後のひび割れ幅の増加分より小さい値に抑えられている。PRC 梁が RC 梁に比較して鉄筋降伏後もひび割れ幅の復元性に優れていることがわかる。

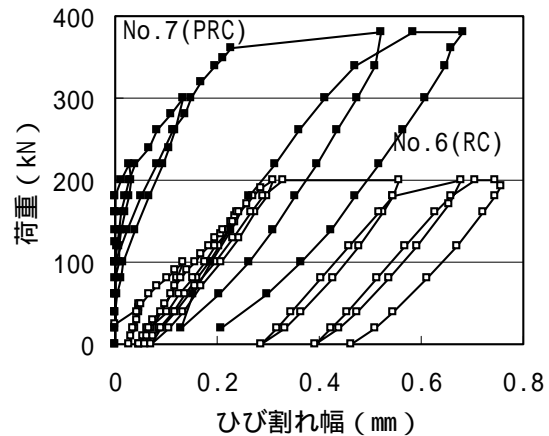


図 - 5 荷重 - 曲げひび割れ幅履歴

3.2 せん断載荷試験

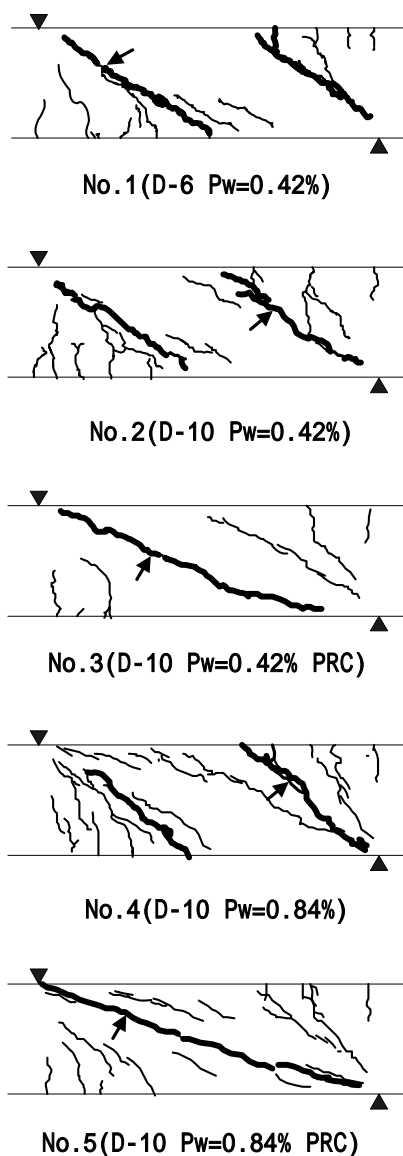
(1) 試験結果一覧

表 - 2 に試験結果一覧を示す。せん断ひび割れ荷重は RC 3 体ともほぼ同じで、PRC 2 体はプレストレスの効果により RC の約 2 倍に増大している。同荷重の計算値は実測値とほぼ一致している。最大耐力はせん断ひび割れの拡大、付着割裂破壊、または載荷点近傍のコンクリートの圧壊により決まった。靱性保証型指針⁶⁾の式はかなり控え目な値を示している。PC 規準⁷⁾の式による計算値は PRC については実験値とほぼ一致しているが、RC の No.2 と No.4 については実験値よりかなり大きい。

表 - 2 試験結果一覧 (単位 kN)

	せん断ひび割れ荷重		終局荷重			許容せん断力 ⁴⁾ 時荷重	
	実測値	計算値 ¹⁾	実測値	計算値 ²⁾	計算値 ³⁾	長期	短期
No.1	220	237	658	432	582	210	315
No.2	220	237	510	402	615	210	315
No.3	480	445	620	-	670	313	429
No.4	200	237	740	635	803	268	400
No.5	440	445	850	-	858	370	530

- 注 1) 主応力度仮説に基づいた式による計算値 参考文献⁶⁾参照
 2) 日本建築学会 RC 造建物靱性保証型耐震設計指針・同解説⁶⁾による
 3) 日本建築学会プレレストコンクリート設計施工規準・同解説⁷⁾による
 4) 日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁸⁾による



→は最大ひび割れ幅測定位置を示す
 * 太線は幅が最大のひび割れを示す。

図 - 6 せん断ひび割れ性状

(2) せん断ひび割れ性状

図 - 6 に最大耐力前のひび割れ状況を示す。せん断補強筋比が大きくなるとひび割れの数が増加することや PRC 梁では載荷点を結ぶように顕著なひび割れが生じ、ひび割れの本数が減少する傾向が見られる。

幅の最も大きいひび割れの角度は、RC 試験体は約 37° であるのに対して、PRC 試験体は 18° ~ 20° と小さくなっている。また No.1 (D6 Pw=0.42%) と No.2 (D10 Pw=0.42%) の比較による、せん断補強筋径の違いによるせん断ひび割れ性状に差異は見られなかった。

(3) 荷重 - せん断ひび割れ幅

図 - 7 ~ 11 に荷重と最大せん断ひび割れ幅の関係を示す。これらの図から以下のようなことがいえる。せん断補強筋を密に配するとせん断ひび割れ幅の抑制に有効である(図 - 9、11)。同じ補強筋比 Pw でも径の小さい鉄筋を多く配筋の方がせん断ひび割れ幅は小さい(図 - 7)。PRC 梁は、RC 梁よりせん断ひび割れ耐力が増加するとともにせん断ひび割れ幅は小さくなる。ただし Pw が小さい場合は RC 梁に比較して急激にひび割れ幅が増加する(図 - 8)。

次にひび割れ幅の除荷時の回復性について検討する。日本建築学会 PC 規準⁷⁾による長期許容せん断力 $Q_{A長時}$ 、及び短期許容せん断力 $Q_{A短時}$ の最大せん断ひび割れ幅を表 - 3 に示す。

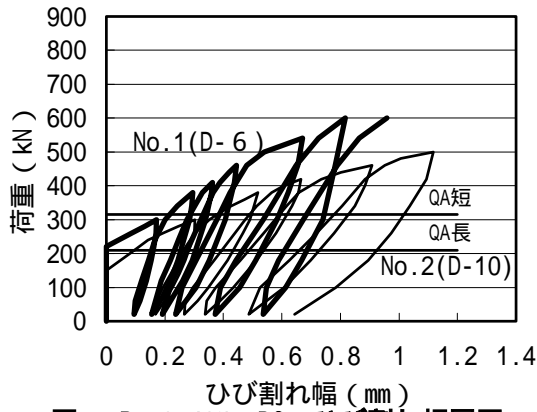


図-7 Pw=0.42% RC ひび割れ幅履歴

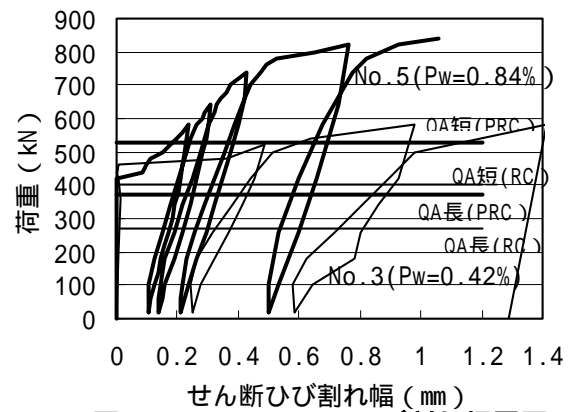


図-11 D-10 PRC ひび割れ幅履歴

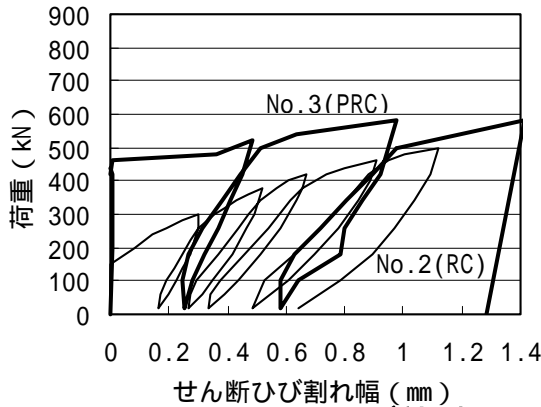


図-8 D 10 Pw=0.42% ひび割れ幅履歴

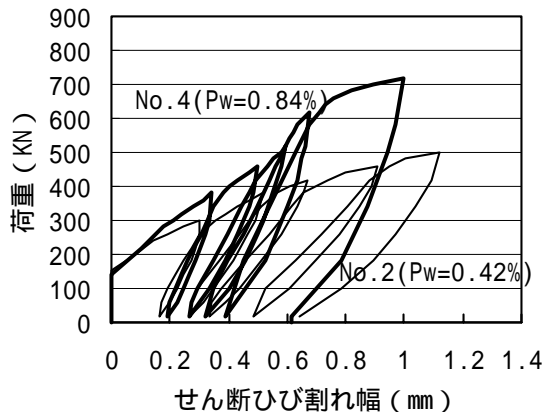


図-9 D-10 RC ひび割れ幅履歴

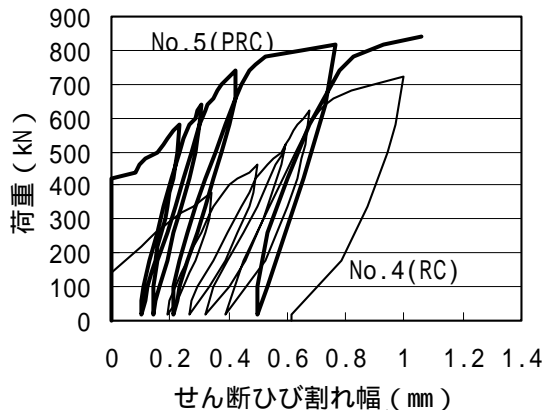


図-10 D 10 Pw=0.84% ひび割れ幅履歴

表 - 3

試験体	ひび割れ幅 (mm)		残留ひび割れ幅 (mm)		
	QA 長	QA 短	QA 短	QA 長	QA 短 20kN
No.1	0	0.2	0.15(25%)		0.1(50%)
No.2	0.1	0.37	0.32(16%)		0.17(54%)
No.3	0	0	0(-)		0(-)
No.4	0.15	0.4	0.35(13%)		0.2(50%)
No.5	0	0.19	0.15(21%)		0.08(60%)

() 内の数値は、回復率 = (QA 短時ひび割れ幅 - 除荷時ひび割れ幅) / QA 短時ひび割れ幅 × 100 (%)

また QA 短時から除荷した場合の QA 長時と荷重 20 kN 時の残留ひび割れ幅も合わせて示す。この表から QA 長に除荷してもあまりひび割れ幅が回復しないことがわかる。また短期許容せん断力荷重から 20 kN まで除荷した時のせん断ひび割れ幅の回復率は 50 ~ 60% であるのに対して、試験体 No. 6 と No. 7 の曲げひび割れ幅はそれぞれ短期許容曲げ荷重時の 0.23 と 0.17 mm から除荷時には 0.06 と 0 mm と回復し、No. 6 の RC 梁の回復率は 74% であり (図 - 4 参照) 曲げひび割れ幅に比べてせん断ひび割れ幅の回復率が小さいといえる。

許容ひび割れ幅を 0.3 mm とすると、QA 長時ひび割れ幅はどの試験体も許容値以内に収まっているのに対して、QA 短時および QA 長時の残留ひび割れ幅は No. 2 と No. 4 の試験体において許容値を超えている。後述のようにせん断ひび割れ幅はせん断補強筋の伸びに直接関係しており、

その伸びはせん断補強筋の長さ、すなわち部材断面せいの影響を受け、せいが大きくなるとそのひび割れ幅も大きくなると考えられる。したがって、短期許容せん断力を損傷限界とした場合、残留ひび割れ幅が 0.3 mm を超える場合が多くなるものと考えられる。

(4) せん断補強筋歪 - せん断ひび割れ幅関係

コンクリートの伸び変形を 0 とすると鉄筋の伸び変形量がひび割れ幅に相当する。そこで、せん断補強筋を横切るひび割れ幅 (1~3 本) 合計 W を、せん断補強筋 3ヶ所で測定した歪の平均 ϵ_{av} で除した $L = W / \epsilon_{av}$ を求めた。ただし、ひび割れ幅は荷重 - 総ひび割れ幅関係の包絡線の値を用いた。試験体 No.4 の L は 340 mm で、**図 - 12** に $L \times \epsilon_{av}$ を総ひび割れ幅の計算値として、実測値とあわせて示す。包絡線部分では計算値と実測値はよく一致している。他の試験体についても同様の検討を行ったところ、平均値として $L = 370$ mm が得られた。これは、せん断補強筋のウェブの長さ 250 mm を上回る値であることから、せん断ひび割れ幅にはせん断補強筋のウェブ部の伸びだけでなくフランジ部分からの拔出しも関与するものと考えられる。

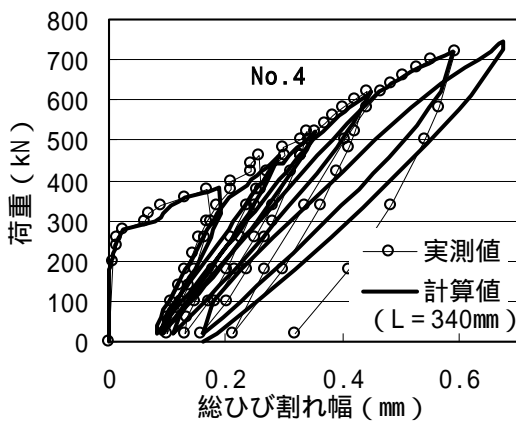


図 - 12

4. まとめ

本実験の結果をまとめると次のようになる。

(1) 鉄筋降伏前の曲げひび割れ幅は、鉄筋歪とひび割れ間隔の積で求める建築学会 PRC 指針式によって算定できた。

(2) 鉄筋降伏後は RC 梁の場合、鉄筋降伏後のひび割れ幅の増加分がそのまま残留ひび割れ幅の増加分になる。PRC 梁の場合はプレストレス力により残留ひび割れ幅は鉄筋降伏後のひび割れ幅の増加分より小さい値に抑えられる。

(3) プレストレス力により、PRC 梁のせん断ひび割れ荷重は大きくなり、せん断ひび割れの材軸となす角度は RC 梁より小さくなる。

(4) せん断ひび割れ幅の除荷時の回復率は、曲げひび割れ幅の回復率より小さい。

(5) せん断ひび割れ幅には、せん断補強筋のウェブ部分の伸びだけでなく、フランジ部分の拔出しも関与している。

謝辞

本実験は本学助手中川隆夫氏の協力を得て行ったものであり、記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレレスト鉄筋コンクリート(種 PC)構造設計・施工指針・同解説, 1986
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編, 1996
- 3) 松石長之, 川西泰一郎ほか：鉄筋コンクリート造梁のせん断ひび割れ幅制御に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.909-912, 1999.9
- 4) 福山洋ほか：RC 部材のせん断ひび割れに関わる損傷限界の評価(その 1 柱, 梁部材の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.13-14, 2000.9
- 5) 鈴木計夫, 大野義照, 宮丸孝史：PRC 梁の繰返し荷重下における曲げ性状について, セメント技術年報 No.38, pp.464-467, 1984
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 7) 日本建築学会：プレレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1993
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999