

論文 R CおよびP R C梁のせん断ひび割れ幅

柳瀬 圭児^{*1}・大野 義照^{*2}・中川 隆夫^{*3}

要旨：前報¹⁾に引き続き、構造物の損傷評価を目的として鉄筋コンクリート(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、せん断補強筋径・比、せん断補強筋形状、プレストレスがせん断ひび割れ性状、特に加力時および減力時のせん断ひび割れ幅に与える影響を調べた。

キーワード：せん断ひび割れ幅、残留ひび割れ幅、せん断補強筋歪、プレストレス

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物におけるひび割れは、鉄筋の腐食や美観の問題等からその耐久性や使用性に及ぼす影響は大きい。

ひび割れのうち、曲げひび割れはこれまで多くの研究がなされ、ひび割れ幅算定式も提案されている。一方せん断ひび割れに関しては、その複雑な機構によりその幅の算定法は確立されていない。

そこで著者らは前報¹⁾においてRCおよびPRC梁計5体のせん断試験を行い、せん断ひび割れに関する基本的な特性を調べた。これらの特性の検証また新たな基本特性を把握するため、引き続き計14体の梁のせん断載荷試験を行った。

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、使用材料の機械的性質を表-2に示す。

せん断補強筋には、D6、D10、D13(各々SD295A)を用い、せん断補強筋比 $P_w=0.26 \sim 1.02\%$ である。せん断補強筋端部の形状は、溶接閉鎖型、135度フック型、U字+キャップ型の3種類である。

主筋は全試験体共通に、引張および圧縮鉄筋としてそれぞれ3-D19(SD495)を配置している。プレストレスを導入した試験体(以下PRC試験体と呼ぶ)計4体には、断面重心位置に径21mm・C種のPC鋼棒を配置し、載荷直前にプレストレスの導入を行った。

試験体は逆対称載荷法により、下限荷重を20kNとした正方向の繰返し載荷を行った。

ひび割れ幅の測定は、せん断補強筋位置及びせん断補強筋間位置において、精度 $1/1000\text{mm}$ のコンタクトストレーンゲージを用いて測定した。せん断補強筋の歪は、図-1に示すように50mm間隔(type1)または40mm間隔(type2)に貼付した検長1mmの箔ゲージにより測定した。

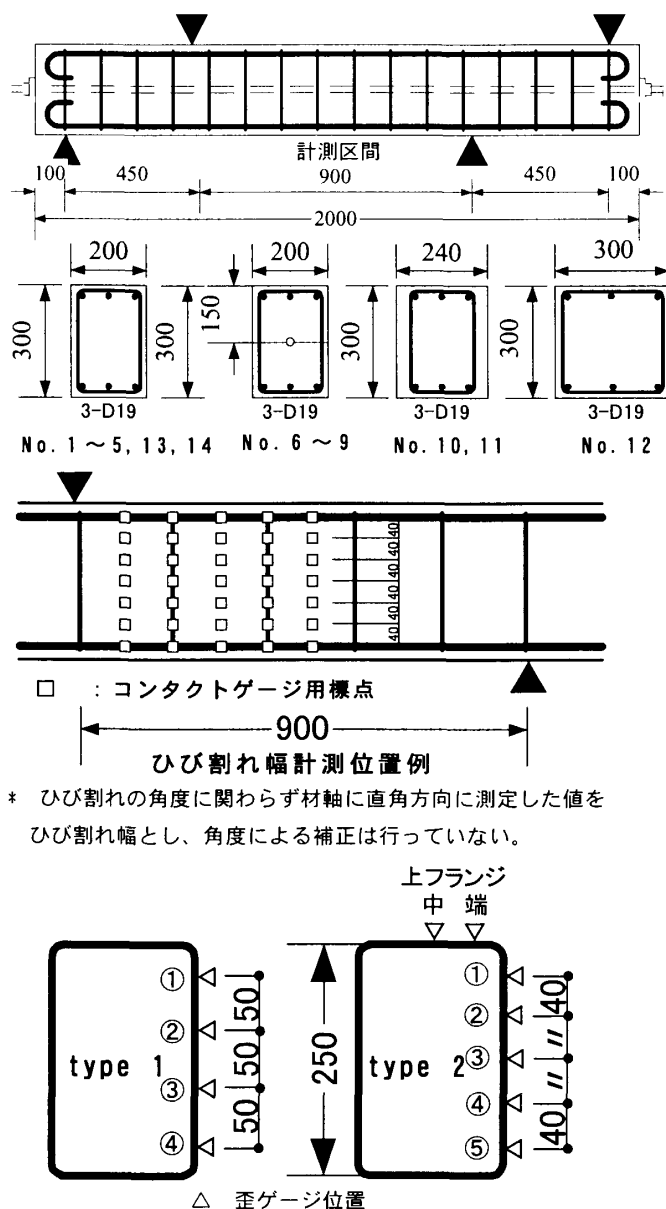
表-1 試験体種類

試験体 No	せん断補強筋				断面寸法 b(mm)×D(mm)	主筋かぶり厚さ(mm) (側面×上・下面)	平均プレストレス (N/mm ²)
	径	補強筋比 $P_w(\%)$	間隔(mm)	形状			
1	D6	0.26	125	溶接閉鎖	200×300	30×30	—
2	D6	0.58	55	溶接閉鎖	200×300	30×30	—
3	D10	0.57	125	溶接閉鎖	200×300	30×30	—
4	D10	1.01	70	溶接閉鎖	200×300	30×30	—
5	D13	1.02	125	溶接閉鎖	200×300	30×30	—
6	D10	0.57	125	溶接閉鎖	200×300	30×30	2.45
7	D10	0.57	125	溶接閉鎖	200×300	30×30	4.9
8	D10	1.01	70	溶接閉鎖	200×300	30×30	2.45
9	D10	1.01	70	溶接閉鎖	200×300	30×30	4.9
10	D10	0.47	125	溶接閉鎖	240×300	50×30	—
11	D10	0.845	70	溶接閉鎖	240×300	50×30	—
12	D10	0.378	125	溶接閉鎖	300×300	30×30	—
13	D10	0.57	125	135°フック	200×300	30×30	—
14	D10	0.57	125	U+キャップ	200×300	30×30	—

* 1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 工修 (正会員)

* 2 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 教授 工博 (正会員)

* 3 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 助手 (正会員)



図－１ 試験体形状・配筋詳細図

表－２ 使用材料の機械的性質

－ 鉄筋 －					
部位	径	種別	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
せん断補強筋	D6	SD295A	307	471	1.55×10 ⁵
	D10	SD295A	357	469	1.74×10 ⁵
	D13	SD295A	355	508	1.70×10 ⁵
主筋	D19	SD490	523	733	1.74×10 ⁵

* ヤング係数は、鉄筋公称断面積により算出した。

－ コンクリート －					
試験No	W/C (%)	試験時 材 齢	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
1～5, 12～14	50	71日	35.5	3.02	2.27×10 ⁴
6～11	50	70日	38.8	2.68	2.43×10 ⁴

* コンクリート打設はNo.1～5, 12～14とNo.6～11の2回に分けて行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 ひび割れ性状

(1) 結果一覧

表－３に試験結果一覧を示す。せん断ひび割れ荷重の計算値は実験値を精度よく捉えている。また日本建築学会靱性保証型指針³⁾による終局耐力の計算値³⁾と同PC規準式⁴⁾による計算値は、RC試験体については同程度に実験値を捉えている。PC規準式⁴⁾は特にPRC試験体についてかなり安全側の値を算出している。

また、せん断補強筋端部形状の異なるNo. 3, 13, 14の終局荷重を比較すると、U字型タイプのNo. 14の値が最も小さかった。

(2) せん断ひび割れ

図－２に試験体No. 3, 4および7の短期許容せん断応力時と終局前のひび割れ状況を示す。

表－３ 試験結果一覧

試験体 No	ひび割れ幅(mm)		せん断ひび割れ荷重(kN)		終局荷重(kN)			破壊形式
	短期 ¹⁾	長期 ²⁾	実験値	計算値 ³⁾	実験値	計算値 ³⁾	計算値 ⁴⁾	
1	0.56	0.51	215	229(0.94)	471	415(1.13)	466(1.01)	せん断引張
2	0.31	0.27	235	229(1.03)	716	672(1.07)	584(1.23)	せん断引張
3	0.46	0.41	196	229(0.86)	666	620(1.07)	581(1.15)	せん断引張
4	0.22	0.19	235	229(1.03)	862	944(0.91)	743(1.16)	せん断引張
5	0.32	0.27	254	229(1.11)	804	796(1.01)	747(1.08)	せん断引張
6	0.21	0.17	333	346(0.97)	782	—	607(1.29)	付着割裂
7	0.1	0	509	432(1.18)	771	—	634(1.27)	付着割裂
8	0.17	0.13	333	346(0.96)	939	—	770(1.22)	付着割裂
9	0.1	0.06	490	432(1.18)	988	—	796(1.24)	付着割裂
10	0.46	0.40	255	275(0.93)	744	648(1.15)	653(1.14)	せん断引張
11	0.42	0.36	255	275(0.93)	921	1007(0.91)	819(1.23)	せん断引張
12	0.36	0.31	333	344(0.97)	901	692(1.30)	765(1.18)	せん断引張
13	0.57	0.51	96	229(0.86)	718	620(1.16)	581(1.24)	せん断引張
14	0.24	0.20	196	229(0.86)	584	620(0.94)	581(1.01)	せん断引張

注 1) 日本建築学会 RC 構造計算規準・同解説²⁾による短期許容せん断力荷重時ひび割れ幅

2) 短期が許容せん断力時荷重から長期許容せん断力時荷重まで除荷した時のひび割れ幅

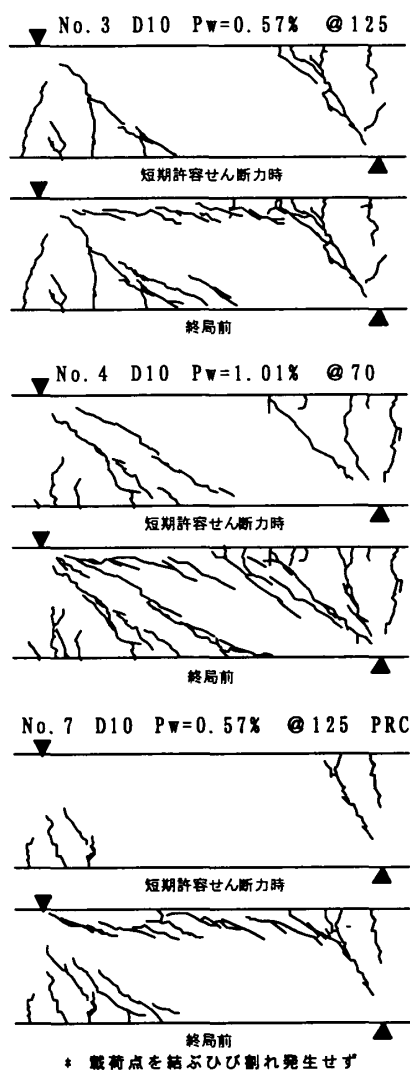
3) 日本建築学会 RC 造建物靱性保証型耐震設計指針・同解説³⁾による4) 日本建築学会プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説⁴⁾による

() の数値は実験値/計算値を示す

* ひび割れ幅は計測値のうち最大のものを用了。

せん断補強筋比 P_w の異なる、No. 3とNo. 4を比較すると短期許容せん断応力時にはひび割れ状況に大きな差は見られないが、終局前では P_w が大きくなるとひび割れが分散した。

プレストレスはせん断ひび割れ耐力を高め、主引張方向の材軸となす角度を緩やかにする¹⁾。しかしプレストレスを導入したNo. 7の試験体において、前報¹⁾に見られた荷重点を結ぶような顕著なひび割れは生じなかった。これはNo. 7の試験体では、上端筋の付着割裂により終局に至ったためである。



図－2 ひび割れ状況

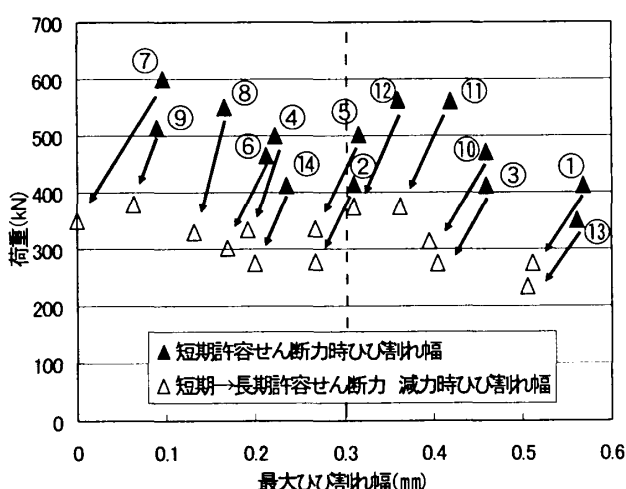
(3) せん断ひび割れ間隔

日本建築学会 PRC 指針解説⁵⁾における平均曲げひび割れ間隔 l_{av} 算定式のせん断ひび割れ間隔算定(せん断ひび割れ本数予測)への適用を検討した。計算の結果 l_{av} は全試験体で180～340 mmの値が得られ、ウェブでのせん断補強筋長さは250 mmであることから、一本のせん断補強筋をひび割

れが1～2本横切るという計算結果が得られた。一方、実際に発生したひび割れは1～3本であった。ひび割れ間隔の検討にウェブでのせん断補強筋長さは十分でなく、今回の検討結果からは曲げひび割れ間隔算定式のせん断ひび割れへの適用性は判定できない。

(4) 現行規準によるひび割れ幅制限

現行規準のせん断ひび割れ幅制御に関する有効性を検討するため、日本建築学会 RC 規準及び PC 規準式を用いて、短期許容せん断力時荷重から長期許容せん断力時荷重まで除荷した際のせん断ひび割れ幅を測定し表－3中に示した。また各試験体のこれらの荷重と最大ひび割れ幅の関係を図－4に示す。PRC 試験体では短期許容荷重でも許容ひび割れ幅0.3 mmより下回っているが、RC 試験体の半数以上の6体の試験体は長期許容荷重時においても許容値を超えている。このことから、短期許容荷重まで載荷された場合、長期許容荷重まで減力しても残留ひび割れ幅は0.3 mmを超える場合が多いといえる。

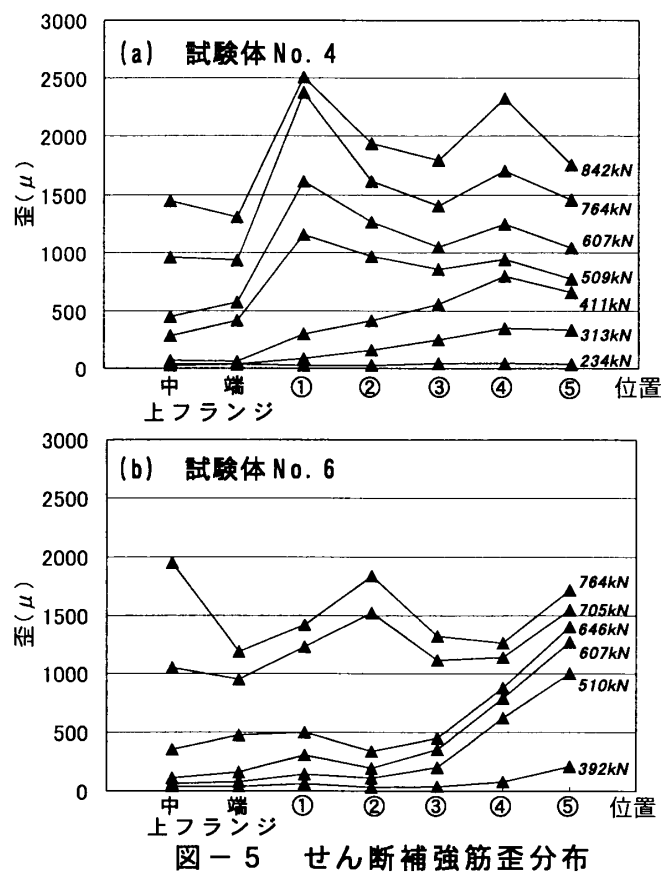


図－4 許容力荷重時最大せん断ひび割れ幅

3. 2 せん断補強筋歪

(1) せん断補強筋歪分布

図－5に試験体No. 4、6の繰返し載荷における各荷重階の初載荷時のせん断補強筋歪分布変化を示す。せん断補強筋のフランジ部分がウェブ部分に対して90°に折り曲げられていても、荷重の増加と共に相当の歪を生じているのがわかる。既往の研究⁶⁾でもこの現象は指摘されている。鉄筋コンクリート梁にせん断ひび割れが生じた場合、せん断補強筋のフランジ部分からウェブ部分への抜け出しが生じているといえる。



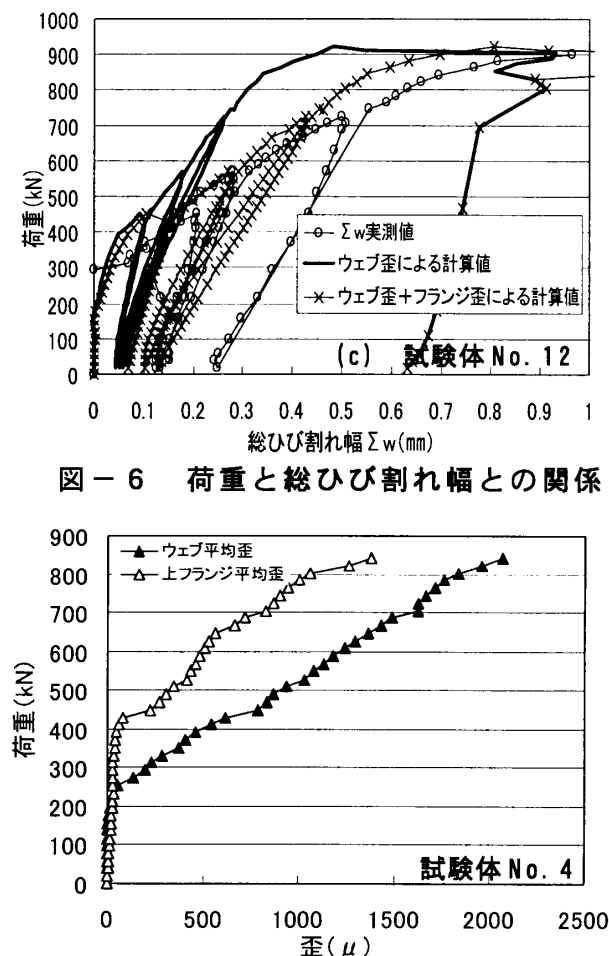
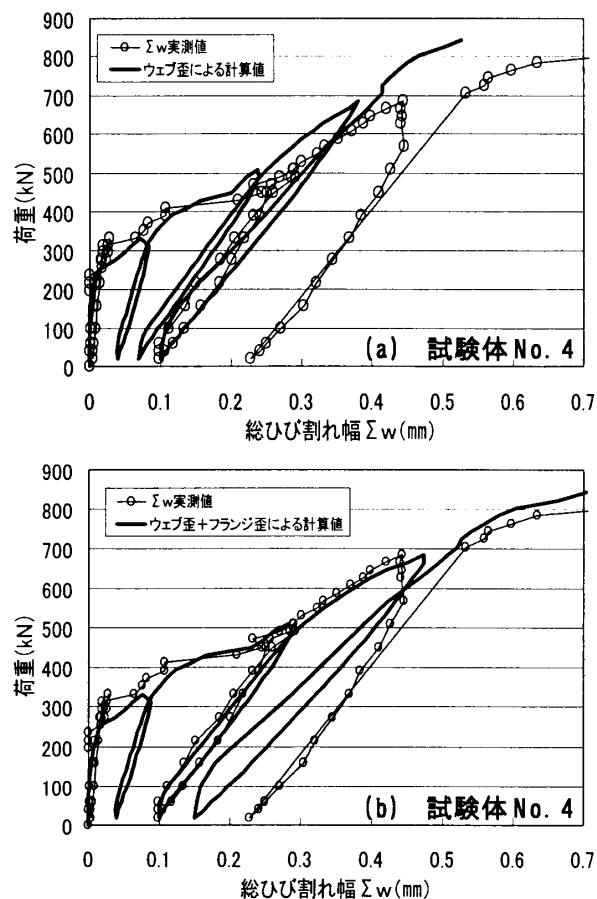
(2) せん断補強筋歪とせん断ひび割れ幅との関係

せん断ひび割れ幅とせん断補強筋歪との関係を調べるため、試験体 No. 4 と No. 12 におけるせん断補強筋の歪から計算されるウェブ部伸びと荷重との関係、およびせん断補強筋を横切るひび割れ幅 (1~3 本) の合計幅 Σw と荷重との関係を図-6 (a), (c) に示す。

これらの図から Σw をウェブ歪のみで評価した場合、 Σw を過小評価し、両者の差は荷重の増大とともに大きくなることがわかる。特にフランジ幅を長くした試験体 No. 12 ではこの傾向が顕著に表れている。

そこで、せん断補強筋のフランジ部伸びがウェブ部に抜け出てくると仮定して、荷重-〔せん断補強筋ウェブ部伸び+フランジ部伸び〕の関係を図-6 (b), (c) に示し、荷重- Σw 関係との比較を行った。 Σw の実測値と〔せん断補強筋ウェブ部伸び+フランジ部伸び〕はよく一致した。

また図-7 に試験体 No. 4 における荷重-ウェブ平均歪の関係および荷重-フランジ平均歪の関係を示す。フランジ歪がウェブ歪に遅れながらもほぼ単調に増加しており、フランジ部からの鉄筋の抜け出し量も単調に増加すると推測される。こ



の傾向は図-6 (a), (c) においてフランジ部からの抜け出し量 (= Σw - ウェブ部伸び) が荷重の増大と共に大きくなる現象と一致している。

3. 4 荷重とせん断補強筋歪の関係

せん断補強筋歪の挙動を知るため、せん断ひび割れ発生後のせん断応力増分とせん断補強筋歪とせん断補強筋比との積との関係について調べた。渡辺ら⁷⁾の提案した式 (1) の右辺を歪の式に変形させた式 (1)' と本実験より得られた各試験体のウェブ部の平均歪との関係を図-7 に示す。

$$\Delta Q / b \cdot j \cdot d = 3.0 \cdot (P_w \cdot wfs)^{5/8} \quad \text{式 (1)}$$

$$\Delta Q / b \cdot j \cdot d = 3.0 \cdot (P_w \cdot E \cdot w\epsilon s)^{5/8} \quad \text{式 (1)'}$$

ここに ΔQ : せん断ひび割れ発生後のせん断力増分
 b : 梁幅 j : 7/8 d : 有効せい
 P_w : せん断補強筋比 wfs : 平均せん断補強筋ウェブ応力
 E : ヤング係数 $w\epsilon s$: 平均せん断補強筋ウェブ歪

図から式 (1)' は、 $w\epsilon s$ 実測値と P_w の積である $w\epsilon s \times P_w$ の上限値を示している。これは、式 (1) の誘導過程においてせん断補強筋ウェブ部の平均歪を、せん断補強筋を横切るひび割れの合計幅をウェブ長さで除して算出しているためと考えられる。また式 (1)' の右辺を2倍した関係式は $w\epsilon s \times P_w$ の下限値を示している。

図-7 のように同じせん断応力増分 (= $\Delta Q / b \cdot j \cdot d$) 時において、せん断補強筋歪に差があるのは、フランジの長さ、せん断補強筋端部形状などの影響によるものと考えられる。

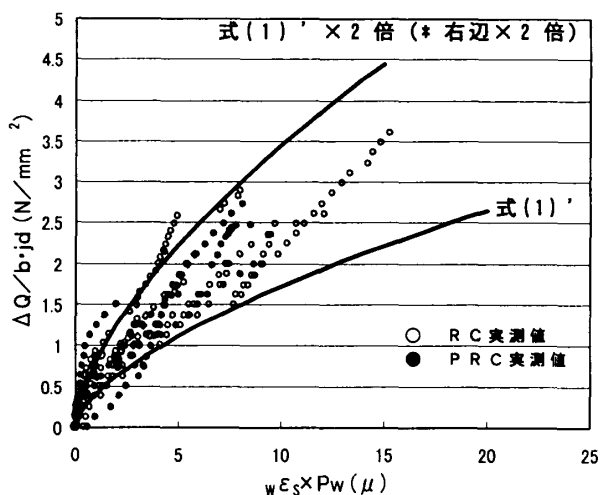


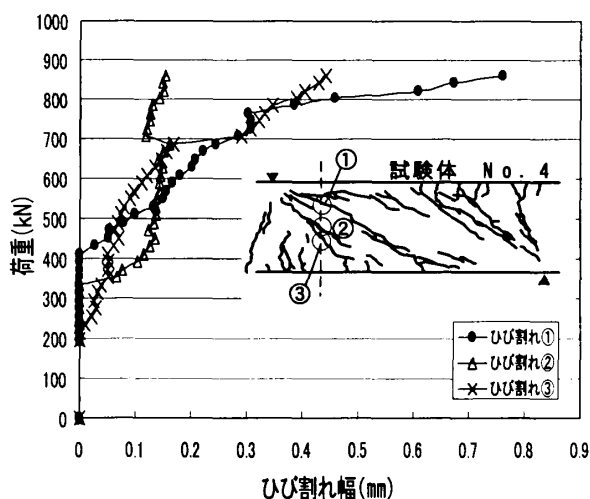
図-7

3. 5 ひび割れ幅の推移

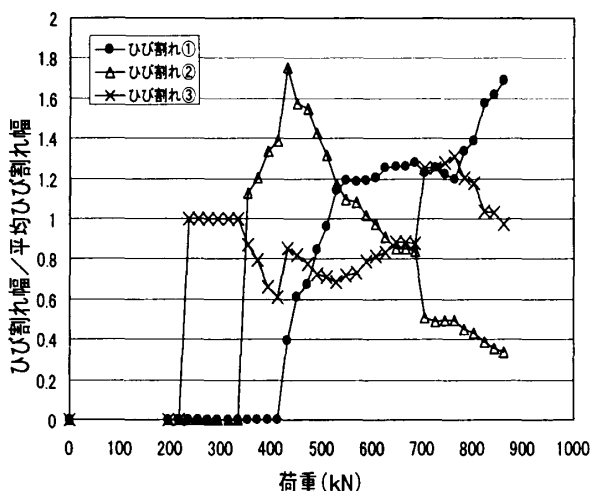
(1) 最大ひび割れ幅

せん断ひび割れ幅の荷重増加に伴う変化を検討するために、一本のせん断補強筋を横切る複数のひび割れについて、各々のひび割れ幅の挙動を調べた。図-8 (a) 中に示す3本のせん断ひび割れ①②③の荷重と幅の関係を示す。同図からせん断ひび割れは③②①の順で発生しているが、最初に入ったひび割れ③のひび割れ幅が、終始最大であることはなく、荷重の増大と共に幅が最大のひび割れが変化しているのがわかる。

ひび割れ幅のうち問題となるのは最大ひび割れ幅である。そこで図-8 (b) に最大ひび割れ幅の平均ひび割れ幅に対する比を示した。最大ひび割れ幅比は荷重の大きさにより変動するものの、その値は2.0以下に収まっている。この傾向は他の試験体にも同様であった。



(a) 荷重-ひび割れ幅関係



(b) 荷重-ひび割れ幅比関係

図-8 荷重増加に伴うひび割れ幅変化

(2) 残留ひび割れ幅

ひび割れ幅により損傷評価をする時、対象となるのは外乱作用後のひび割れ幅である。そこで各荷重履歴の除荷過程におけるひび割れ幅を対象として、せん断ひび割れ幅の閉合性について調べた。

図-8に短期許容せん断力時荷重以上の2～3の荷重階から除荷した時のひび割れ幅関係を示す。なお同図において荷重およびひび割れ幅を除荷開始点における値で無次元化している。図-8(a)にNo. 3(かぶり厚さ30mm)とNo. 11(同50mm)、図-8(b)にNo. 3(プレストレス $\sigma_0=0$)、No. 6($\sigma_0=2.45\text{N/mm}^2$)、No. 7($\sigma_0=2.45\text{N/mm}^2$)の除荷時の荷重比-ひび割れ幅比関係を示す。

除荷時の荷重やひび割れ幅の大きさは異なっているが、残留ひび割れ幅の比は0.3～0.5程度である。かぶり50mmの試験体を除けば0.4～0.5

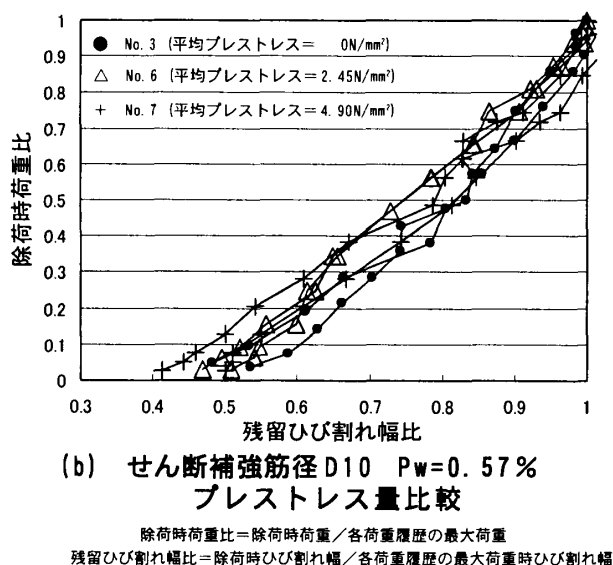
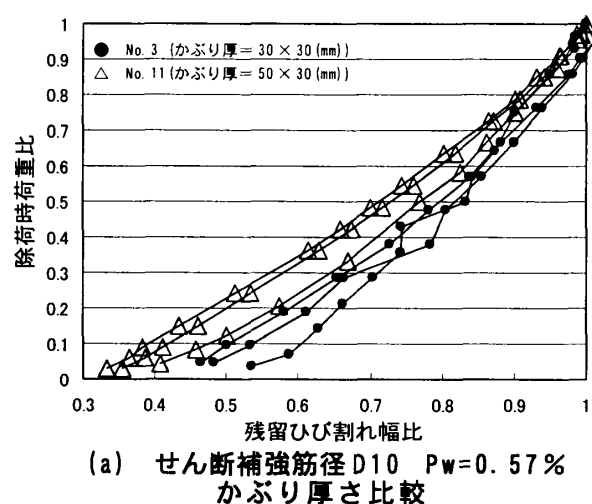


図-8 除荷時ひび割れ幅推移

で、曲げひび割れ幅の場合よりも残留幅比は大きい。またプレストレスのひび割れの閉合性への効果は曲げひび割れの場合と異なって現れていない。

4. まとめ

本実験をまとめると次のようになる。

- (1) フランジ部のせん断補強筋にも相当の歪が生じ、せん断ひび割れ幅にはフランジ部のせん断補強筋からの抜け出しが寄与している。
- (2) 一本のせん断補強筋を横切るひび割れにおいて、各々のひび割れは異なる挙動を示し、最大幅のひび割れは荷重の増加により変化する。
- (3) 一本のせん断補強筋を横切るひび割れにおいて、最大ひび割れ幅は平均ひび割れ幅の2倍以下である。
- (4) せん断ひび割れの閉合性は、せん断補強筋径・比・形状やプレストレス量による影響を受けない。ただし、かぶり厚さが大きくなると残留ひび割れ幅は小さくなった。

謝辞

本研究は本学院生桶田伸祐、卒論生西原安耶両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) 柳瀬圭児、大野義照ほか：鉄筋コンクリート梁のせん断ひび割れ、コンクリート工学年次論文集, pp. 343 - 348, 2002
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 3) 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
- 4) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998
- 5) 日本建築学会：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
- 6) 黒正清治、瀧口克巳：歪測定に重点をおいた鉄筋コンクリートばりの曲げせん断実験, 日本建築学会論文報告集, No. 194, pp. 1 - 7, 1972
- 7) 六車熙、渡辺史夫：鉄筋コンクリート柱のせん断抵抗機構に関する研究-その1：せん断ひび割れの発生とせん断補強筋の補強効果, 日本建築学会論文報告集, 第332号, pp. 57 - 65, 1983