# 論文 RCおよびPRC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<sup>1)</sup>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<sup>1)</sup>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 Pw=0.26~1.02%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1/1000mm のコンタクトストレイ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。

試験体 **主筋かぶり厚さ(mm) | 平均プレストレス** せん断補強筋 断面寸法 補強筋比 Pw(%) 間隔(mm) 形状 (側面×上・下面) No 径  $b(mm) \times D(mm)$ (N/mm<sup>2</sup>) 1 D6 0.26 125 溶接閉鎖 200 × 300 30 × 30 2 溶接閉鎖 30 <u>× 30</u> D6 0.58 55 200 × 300 D10 125 30 × 30 3 0.57 溶接閉鎖  $200 \times 300$ D10 4 1.01 70 溶接閉鎖 200 × 300 30 × 30 5 D13 1.02 125 溶接閉鎖  $200 \times 300$ 30 × 30 6 D10 0.57 125 <u>溶接閉鎖</u> 200 × 300 30 × 30 2.45 <u>溶接閉鎖</u> 溶接閉鎖 D10 0.57 125 200 × 300 4.9  $30 \times 30$ 8 D10 70  $30 \times 30$ 2 4 5 1 0 1  $200 \times 300$ 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 溶接閉鎖  $240 \times 300$ 11 D10 0.845 70 50 × 30 D10 125 溶接閉鎖 <u>300 x 300</u> 12 0.378 30 × 30 13 125 200 × 300 30 × 30 D10 0.57 135 フック D10 U+ キャップ 14 0.57 125 30 × 30  $200 \times 300$ \* 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)

表 - 1 試験体種類



50 40 歪ゲージ位置 試験体形状・配筋詳細図 図 - 1

#### 表 - 2 使用材料の機械的性質

- 鉃筋 -							
			降伏応力	引張強度	ヤング係数		
部位	径	種別	$(N / mm^2)$	(N / mm²)	$(N / mm^2)$		
	D6	SD295A	307	471	1.55 × 10 <sup>5</sup>		
せん断補強筋	D10	SD295A	357	469	1.74 × 10 <sup>5</sup>		
	D13	SD295A	355	508	1.70 × 10 <sup>5</sup>		
主筋	D19	SD490	523	733	1.74 × 10 <sup>5</sup>		

\* 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 -							
	W/C	試験時	圧縮強度	割裂強度	ヤング係数		
試験No	(%)	材齢	$(N / mm^2)$	(N / mm²)	$(N / mm^2)$		
1~5, 12~14	50	71日	35.5	3.02	2.27 × 10 <sup>4</sup>		
6~11	50	70日	38.8	2.68	2.43 × 10 <sup>4</sup>		
* コンクリート打設けNo1~5 12~14とNo6~11の2回に分けて行った							

~5、12~14とN0.6~11の2回に分けて行

#### 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。 また日本建築学会靭性保証型指針
③による終局耐 力の計算値<sup>3)</sup>と同PC規準式<sup>4)</sup>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<sup>4)</sup>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 N0.3,13,14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	—	떹
বহ	-	3	111、秋天	而日	禾		Л

			- P C	- H-A -31/ 1				
試験体	ひび割れ	<b>ぃ</b> 幅(mm)	せん断ひび	割れ荷重(kN)		終局荷重(	kN)	
No	短期 <sup>1)</sup>	長期 <sup>2)</sup>	実験値	計算值 <sup>3)</sup>	実験値	計算値 <sup>3)</sup>	計算值4)	破壊形式
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・同解説式<sup>2)</sup>による短期許容せん断力荷重時ひび割れ幅

2)短期か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 造建物靭性保証型耐震設計指針・同解説<sup>3)</sup>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いた。 (

<sup>4)</sup>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

せん断補強筋比Pw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 Pw 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<sup>1)</sup>。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)に見られた載荷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。



# (3) せん断ひび割れ間隔

日本建築学会 PRC 指針解説<sup>5)</sup>における平均曲げ ひび割れ間隔Iav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 lav 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0.3mm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0.3mmを超 える場合が多いといえる。



#### 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<sup>6)</sup>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 wと荷重との関係を図

- 6(a),(c)に示す。

これらの図から wをウェブ歪のみで評価した 場合、 w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 - w関係との比 較を行った。 w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(= w - 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<sup>7)</sup>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。

Q / b · jd = 
$$3.0 \cdot (Pw \cdot wfs)^{5/8}$$
 式(1)

ここに Q: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
 Pw: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 wEs:平均せん断補強筋ウェブ歪

図から式(1)'は、w s実測値とPwの積であ るw s×Pw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 s×Pw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(= Q/ bjd)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。



# 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 ひび割れの荷重と幅の関係を示す。同図 からせん断ひび割れはの順で発生してい るが、最初に入ったひび割れのひび割れ幅が、 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。





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50 mm)、図-8(b)にNo.3(プレストレスσ<sub>0</sub>=0)、 No.6(σ<sub>0</sub>=2.45N/mm<sup>2</sup>)、No.7(σ<sub>0</sub>=2.45N/mm<sup>2</sup>)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





で、曲げひび割れ幅の場合<sup>1)</sup>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

- 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靭性 保証型耐震設計指針・同解説,1999
- 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( 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