論文 RC 梁のせん断補強筋とクラック幅に関する研究

菊池 健太郎*1·島崎 和司*2

要旨: せん断クラック幅への独立したパラメータごとの影響を調べるため, RC 梁の一部を切り出し純せん断 試験を行った。せん断補強筋比が一定で鉄筋径と間隔が異なる試験体,補強筋の間隔が一定で鉄筋径とせん 断補強筋比が異なる試験体を付着性能の異なるせん断補強筋を用いて実験を行った。結論として,補強筋比 が一定でも補強筋間隔や付着性能により最大クラック幅に差が生じることを示した。 キーワード: 補強筋比,補強筋間隔, せん断補強筋, 付着性能, せん断クラック, クラック幅

1. はじめに

鉄筋コンクリート建物の損傷評価として,クラック幅 は修繕の必要性・再使用の可能性を検討する重要な指標 である。なかでもせん断クラック幅は様々な因子の影響 を受けるため,その理論的な評価は難しく,評価法はい まだ確立されていない。鉄筋コンクリート規準¹⁾では, 損傷制御のための梁の許容せん断力が定められているが, せん断補強筋は耐力として,せん断補強筋比と短期許容 引張応力度が考慮されているのみである。

そこで本研究では,図-1 に示すように梁の一部を切 り出した試験体により,同一の試験条件下での独立した パラメータごとのデータ蓄積を目的として,せん断補強 筋比を一定とし鉄筋径と間隔が異なる試験体,せん断補 強筋の間隔を一定とし鉄筋径と補強筋比が異なる試験体 を用いて,それぞれのクラック幅への影響を調べ検討す る。

2. 実験概要

2.1 せん断試験

a) 試験体詳細

試験体一覧を表-1 に,使用した材料の機械的性質を 表-2 に示す。試験体は,昨年度の実施の²No.1~3 と, 本年度実施した試験体 No.10~22 で,各パラメータで 3 体 以上とした。

D10 の試験体を基準として図-1 の仮定断面より計算 したせん断補強筋比を 0.15~0.60%,補強筋径を D6, D10, D13, U7.1,補強筋間隔を 50~200 mm の間で配筋した。 No.17~19 ではコンクリートのせん断ひび割れ耐力をせ ん断補強筋の降伏耐力 *py*が上回るように D6 の代わりに 高強度鉄筋 U7.1 を使用した。せん断補強筋末端部の形状 は 180 度フックとし, 10d の余長を設けた。

b)試験方法

加力装置を図-2 に示す。試験体の3辺を加力フレームに繋ぎ反力をとり、水平方向は主筋を直接アクチュエ ータに繋ぎ引張力を加え、鉛直方向はシアキーを介して

*1 株式会社建研 修士(工学) (正会員)

*2 神奈川大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

反力を取ることでコンクリートにせん断力を加える。試験体を水平方向に 180 度回転させることで正負交互繰り返し載荷を行う。加力サイクルは、同一荷重でのクラック幅の比較をするために、No.1~16 では *pw*・σyが同程度のため、最も降伏耐力の低い試験体(No.1~3 は No.1, No.10~22 は No.12~14)にそろえて、No.17~22 では同じ荷重での比較を行うために、No12~14 の降伏耐力の 1/6, 1/3, 2/3, 3/3 で各 2 サイクルずつ行う。No12~14 の 3/3 サイクルは、U7.1@120 の降伏耐力の 1/2, D13@120 の 2/3 に相当する。



表一1 試験体一覧									
睑は			主筋						
₩µ No.	径	本数	補強筋間隔 (mm)	補強筋比 (%)	降伏耐力 (kN)	径	降伏耐力 (kN)		
1					117		154		
10 11	D6	11	50	0.36	129		153		
2					128		154		
12 13 14	D10	5	120	0.34	123	D19	153		
3					131		154		
15 16	D13	3	200	0.36	130		153		
17									
18	U7.1			0.15	278				
19		5	120			D22	265		
20		5	120			022	205		

0.60

217

試

21

22

D13





c)計測方法

試験体の詳細とひずみゲージの設置位置,計測範囲を 図-3 に示す。ひずみゲージはせん断補強筋の中央と中 央から 200 mm 離れた点に貼り付けた。クラック計測は 同一の面で行い,反対面には対角方向に変位計を設置し, 対角方向の総クラック幅と同じである事を確認している。 の加力サイクルで定めた各荷重時にクラックスケールカ メラを用いて撮影し,クラックが閉じたとき同じ位置に なる点同士をクラック幅とした。計測位置はシアキーの 拘束による影響を考慮して試験体周辺より 100 mm 内に 入った部分とした。各試験体の中央のひずみゲージを用 いて打設直後から実験日まで,乾燥収縮の計測を行った。

2.2 付着強度試験

試験体と加力方法の概要を図-4 に示す。鉄筋の付着 力を評価するために日本建材試験センターの付着強さ試 験方法³⁾に準じて行った。1辺100mmの立方体供試体に おいて付着長さを鉄筋径の4倍とし、残りの区間は載荷 側にデボンド加工を行った。供試体から出ている鉄筋の 先端に取り付けた変位計ですべり量を計測した。

3. 実験結果

3.1 付着強度試験

付着強度試験の結果を表-3に示す。付着が切れる前



]-4 付着強度試験概要 ≶-3 付着強度試驗結里

大学の方法である。								
径	D6	D10	D13	U7.1				
最大付着応力(N/mm ²)	11.5	19.0	15.4	4.6				
付着剛性(N/mm ³)	33.8	29.1	17.2	6.1				

の応力の最大値を最大付着応力,付着応力とすべり量の 傾きを付着剛性とする。

D10, D13 はほぼ同程度の付着剛性である。最大付着 力は D6, D10, U7.1 では鉄筋の抜け出し, D13 は付着割 裂により決まった。U7.1 はその他の鉄筋に比べて節の凹 凸が少なく,付着力が小さいことが考えられる。

3.2 せん断試験

a)乾燥収縮

No.10~22 のゼロ点公正および打設日の温度(22.8℃)相

当に温度補正されたせん断補強筋のパラメータごとの乾 燥収縮ひずみの平均値を図-5に示す。打設後18日で養 生を終了した。18日まではひずみに大きな変化は無かっ たが、18日以降補強筋の圧縮側に7日で80µ程度大き く進んだ後収縮量が少なくなり、60日でほぼ横ばいとな った。乾燥収縮ひずみは、最大で圧縮側に160µ程度に なった。乾燥収縮量が引張側に大きく変化している部分 は降雨による影響であると考えられる。試験体の収縮量 の差は最大で20µ程度であり、補強筋量と補強筋間隔の 変化による乾燥収縮ひずみの差異は見られない。このひ ずみに対応する圧縮応力がせん断補強筋に働き、対応す る引張力がコンクリートに生じていると考えられる。

b) 実験経過

せん断クラックの入り方の例として, No.12 と No.18 の、2/3 pv, 3/3 pv でのクラック状況を写真-1 に示す。最 大クラック幅とせん断力関係を図-6 にパラメータごと に示す。正側の加力では全試験体で、計算値のせん断ひ び割れ強度を上回る 2/3 pyの正側1回目でせん断クラッ クが発生した。負側では、No.1、19は2/3 py1回目でク ラックが発生せず,2回目で発生した。また,No.10,11, 17 では負側の 2/3 py ではクラックが発生せず, 3/3 py 1 回 目で発生した。その他の試験体は正側と同様に 2/3 py 1 回 目でクラックが発生した。除荷時のひび割れ幅の回復率 は、荷重が小さくなるほど上昇している。中でも U7.1@ 120 ではその挙動は顕著である。D13@120 は補強筋比が 高くクラック幅も小さいためピークから除荷時までほぼ 線形の挙動を示している。No.2, 3, 15 では補強筋のフッ クの余長部分がコンクリートよりはらみ出してしまった ため3/3サイクルの途中で計測を終了している。

c)せん断補強筋ひずみ

代表として No.13 の各サイクルピーク荷重時のせん断 補強筋のひずみを図-7 に示す。



図-5 乾燥収縮ひずみ(パラメータごとの平均値)



(i) D10@120(No. 12) (ii) U7. 1@120(No. 18) (a) 2/3 サイクル



写真-1 クラック発生状況



同図中には、ゲージ番号とクラック性状を示す。右肩下 がりのクラックが正側、左肩下がりのクラックが負側の 載荷で発生したものである。ゼロ点は乾燥収縮分、圧縮 側のひずみが生じた点としている。サイクルが進むにつ れてせん断補強筋のひずみが増大している。3/3 p_yサイク ルでは、せん断クラック付近のゲージは降伏寸前である が弾性範囲内である。試験体によっては、降伏ひずみを 超えたものもある。

4 実験結果の検討

4.1 せん断ひび割れ強度

パラメータごとのせん断ひび割れ強度の実験値に,乾燥収縮によるコンクリートへの引張力を足したものと, 靱性指針⁴⁾より求めたせん断ひび割れ強度との比較を図 -8 に示す。実験値はパラメータごとの最も強度の低い 試験体とした。

計算値は実験値とおおむね対応しているが,乾燥収縮 を考慮しない場合 D6@50 以外すべて危険側の評価とな る。乾燥収縮による引張力は最大で 15kN にもなり,せ ん断ひび割れ強度に大きな影響を与える。

4.2 最大クラック幅の比較

3/3 py, 2回目のピーク時から除荷時までの計測点ごと の最大クラック幅の平均値と標準誤差をパラメータごと に図-9 に示す。補強筋間隔一定の試験体はせん断力よ り計算した補強筋のひずみレベルが同一となる点で比較 する。補強筋比一定の試験体で最大クラック幅は、D10@ 120 に対して D6@50 では 0.7 倍, D13 では 1.2 倍程度と なった。補強筋間隔一定の試験体では、D10@120 に対し てU7.1@120で1.3倍, D13@120で0.7倍程度となった。 このことより、同じ補強筋比で同一の荷重時において、 補強筋間隔を広げ鉄筋径を大きくすると最大クラック幅 は増大する。同じ補強筋間隔で同一の荷重時において, 鉄筋径を大きくすると最大クラック幅は減少することが 言える。補強筋間隔一定の試験体については、最大付着 力の大きい試験体ほどクラック幅は小さくなっている。 対して補強筋比一定の試験体では最大付着力は D10> D6>D13となっており、クラック幅に対して最大付着力 と補強筋間隔が影響していると考えられる。

せん断クラック幅に対して鉄筋の断面積と補強筋間隔 は比例関係では無く,補強筋間隔の影響が大きいことが 考えられる。

4.3 最大クラック幅の残留率

ピークと除荷時のクラック幅関係を図-10に、ピーク と除荷時の長期荷重にあたる 2/3 py での最大クラック幅 関係を図-11に示す。同図中には両者を線形回帰した結 果とその傾き、切片、相関係数 R²を示す。ピーク時に対 して除荷時の最大クラック幅は 0.37~0.46 倍となった。



ピーク時に対して長期荷重時の最大クラック幅は 0.72~0.92 倍となった。計測結果の少ない試験体では、傾 きに多少ばらつきはあるものの図-10,図-11 共に線形 関係が確認できた。

4.4 総クラック幅

ここでは試験体中央のせん断補強筋を横切るクラック 幅の合計を総クラック幅と定義する。

せん断補強筋を横切るクラック幅と補強筋のひずみの 関係性を確認するため、クラックの角度を 45 度と仮定 し、ひずみゲージより得られた補強筋のひずみの平均と 主筋間距離 500 mm より $\Sigma_W = 500\epsilon_{av}/\sqrt{2}$ を求めた。 図-12 に各計測点での総クラック幅とせん断補強筋の 平均ひずみ関係の実験値と計算値を示す。同図中には両 者を線形回帰した結果を,表-4 にそれぞれの傾き,切 片,相関係数 R²を示す。計算値に対して実験値は 2~10 倍となった。せん断補強筋のひずみの積分だけではひび 割れ幅を示せないとの研究 ⁵もあり,補強筋の定着部の 抜け出しの影響が大きい可能性がある。クラックの生じ る位置とひずみゲージの位置が異なることから鉄筋の平 均ひずみが正確に得られていないことが考えられる。

せん断力の鉛直成分はせん断補強筋のみで負担するものとして、せん断補強筋に生じるひずみを仮定する。各計測点での総クラック幅とせん断力より仮定したひずみ関係と計算値を図-13に、各計測点での最大クラック幅とせん断力より仮定したひずみ関係と計算値を図-14に示す。同図中には両者を線形回帰した結果を、表-5、表-6にそれぞれの傾き、切片、相関係数 R²を示す。図-13では傾きは計算値の 2~3 倍程度となった。おおむね計算値と対応している。計算値と切片の差分が定着部の抜け出し量であると考えられる。図-14の最大クラック幅についてもひずみとの相関性が確認できる。

4.5 総クラック幅と最大クラック幅の比較

最大クラック幅と総クラック幅の関係を図-15 に示 す。同図中には両者を線形回帰した結果とその傾き,切 片,相関係数 R²を示す。全てのパラメータで高い相関性 を示している。

最大クラック幅は総クラック幅の 0.55~0.63 倍のとな る。最大クラック幅が大きかった D13@ 200, U7.1@120 では傾きが大きくなる傾向にある。

4.6 重回帰分析によるクラック幅の比較

長期荷重にあたる 2/3 py と短期荷重にあたる 3/3 py そ れぞれの2回目の総クラック幅に対して本実験により得 られたパラメータを用いて重回帰分析を行う。独立して いるパラメータとして以下のものを用いる。



せん断力より仮定した補強筋のひずみ関係



	D6@50	D10@120	D13@200	U7.1@120	D13@120	計算値
傾き×10-4	8	9	11	6	9	3.53
切片	0.56	0.46	0.4	0.75	0.18	
相関係数R ²	0.39	0.39	0.39	0.33	0.37	/



/	D6@50	D10@120	D13@200	U7.1@120	D13@120	計算値
傾き×10-4	17	18	25	9	36	3.53
切片	0.17	0.22	0.11	0.54	-0.15	
相関係数R ²	0.88	0.72	0.72	0.62	0.54	



せん断力より仮定した補強筋のひずみ関係

表-6 各パラメータでの線形回帰結果

/	D6@50	D10@120	D13@200	U7.1@120	D13@120
傾き×10-4	5	6	9	5	9
切片	0.45	0.41	0.42	0.68	0.23
相関係数R ²	0.45	0.40	0.48	0.37	0.50

補強比 p_w が 0.15~0.6 %, 補強筋間隔/主筋間距離 x/d が 0.1~0.4, 付着剛性/(コンクリートのヤング係数・付着区 間(鉄筋径の4倍)) $k_f/(E_c\cdot 4D) \times 10^4$ が 0.07~0.43 である。 せん断補強筋のひずみは全試験体で同一のため用いてい ない。結果を表-7,表-8 に示す。本実験の範囲内での 推定式として次式を得た。

$${}_{L}cr_{max} = 1.5p_{w} + 1.9x/d + 0.1k_{f}/(E_{c} \cdot 4D) \times 10^{4} - 0.22 \quad (1)$$

$${}_{S}cr_{max} = 13.1p_{w} - 7.9x/d - 9.1k_{f}/(E_{c} \cdot 4D) \times 10^{4} + 1.31 \quad (2)$$

t値とp値を見ると長期ではpwとx/dが,短期ではpw が主要因となっている。上記の式を用いて推定した結果 を図-16に示す。長期荷重時では、クラック幅に対して ばらつきが大きくうまく評価できていないものもある。 短期荷重時ではおおむね実験値と対応している。

本研究の結果では、せん断補強筋が短期荷重に相当する 2000 μ を経験すると長期荷重時の残留最大クラック幅 $_{L}cr_{max}$ は 0.3mm を大きく上回る結果となった。図-11 よ り、 $_{L}cr_{max}$ はピーク時クラック幅 $_{s}cr_{max}$ の9割程度であり、 $_{L}cr_{max}$ を 0.3mm 以下にするためには、 $_{s}cr_{max}$ は 0.33mm 以 下にする必要がある。図-14 において、 $_{s}cr_{max}$ が 0.33mm 以下となるひずみレベルは 600~1000 μ 以下である。今 回の試験体の範囲内では、ピーク時に経験するひずみレ ベルを 600~1000 μ 以下にすることで、 $_{L}cr_{max}$ を 0.3mm に納めることが可能である。

5. まとめ

RC 梁の純せん断試験により以下の知見を得た。

- 1)せん断ひび割れ強度の算定には、乾燥収縮ひずみによるコンクリートの引張力を考慮する必要がある
- 2)補強筋比が一定でもせん断クラック幅に差異がある ことを確認できた。
- 3)補強筋間隔が一定の場合、同一のひずみレベルでも鉄筋径によりせん断クラック幅に差異があることが確認できた。
- 4)鉄筋の短期許容応力度相当の荷重から長期荷重相当 へ除荷するとせん断クラックは9割程度残留する。
- 5)クラック幅とせん断補強筋のひずみの積分値には線 形関係が確認できた。
- 6)実験の範囲内では、補強筋比と補強筋間隔と付着剛性 によりクラック幅を(1),(2)式で推定できる。
- 7)残留最大クラック幅を 0.3mm 以下とするには, 短期荷 重時に補強筋のひずみレベルを 600~1000 μ 以下とす る必要がある。

謝辞:本論作成にあたり,神奈川大学工学部建築学科, 島崎和司教授,教務技術職員佐藤宏貴氏,卒論生の板橋 氏,中林氏,並木氏に大きな協力を得ました。



図-15 総クラック幅-最大クラック幅関係

表-7 長期荷重時における

最大クラック幅の線形重解析結果

	係数	標準誤差	t	P-値	回帰統書	ł
切片	-2.24E-01	3.66E-01	-0.61	0.55	重相関 R	0.79
p_w	1.45E+00	3.32E-01	4.36	0.00	重決定 R ²	0.63
x/d	1.89E+00	8.04E-01	2.35	0.03	補正 R ²	0.57
$k_f/(E_c \cdot 4D) \times 10^4$	8.69E-02	6.25E-01	0.14	0.89	標準誤差	0.21
					公勤公拆 F	0.00

表-8 短期荷重時における

最大クラック幅の線形重解析結果



参考文献

- 1) AIJ: RC 構造計算規準・同計算, 2010
- 2) 菊池健太郎, 島崎和司: RC 梁のせん断補強筋とクラッ ク幅に関する研究 せん断補強筋量とせん断補強筋 間隔をパラメータとした検討, AIJ 大会学術講演会梗 概集(関東), 2015
- 3)(財)建材試験センター:引き抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法,1999
- 4) AIJ: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, 1997
- 5) 柳瀬圭児,大野義照,中川隆夫: RC および PRC 梁の せん断ひび割れ幅, JCI 年次論文集 Vol.25, No2, 2003