

高強度せん断補強筋を有する RC 梁のせん断耐力と付着性状

—その1 実験概要とせん断耐力—

鉄筋コンクリート梁 カットオフ筋 せん断補強筋比
 高強度せん断補強筋 高強度コンクリート せん断耐力

正会員 ○ 阪上太誠*1 同 河合 諒*1
 同 久保恒治*1 同 貝谷淳一*1

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下、RC) 造建物の高層化や耐震性能の向上に伴う配筋の過密化の解決策として、高強度せん断補強筋の採用が考えられる。しかし、補強筋量を減らすことによる付着割裂強度の減少が懸念される。また、高強度せん断補強筋の採用に合わせて、2 段目主筋を通し筋としないカットオフ筋が用いられることも多い。

そこで、本研究では降伏強度 685 N/mm^2 の高強度せん断補強筋を用いた RC 梁の実験を行い、2 段目主筋のカットオフの有無やカットオフ長さ、コンクリートの圧縮強度、せん断補強筋量、カットオフ先端に追加した付着補強筋が構造性能に与える影響の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

縮尺比 1/2 程度の梁試験体で、曲げ破壊先行型 4 体とせん断破壊先行型 4 体の計 8 体とした。表 1 に試験体パラメータ一覧を示し、図 1 に No.1, No.4 の配筋図及び No.1, No.5 の梁断面図を示す。試験体の形状は梁幅 300mm、梁せい 400mm、内法スパン 1800mm で共通とした。No.1~No.7 はコンクリートの目標圧縮強度を 24 N/mm^2 とし、No.8 は 60 N/mm^2 とした。表 1 中のコンクリートの圧縮強度 σ_B 及び表脚注の鉄筋の降伏強度 σ_y は材料試験の結果である。また、同表中の付着補強筋とはカットオフ先端に追加したせん断補強筋を指す。

表 1 中の必要カットオフ長さ算定時の鉄筋引張応力度は、曲げ破壊型試験体については表脚注の降伏強度とし、せん断破壊型試験体については荒川 mean 式によるせん断耐力時の主筋端部の応力度とする。

また、表 1 中の Q_{bu} は RC 規準りの略算式による曲げ耐力発揮時の作用せん断力、 Q_{mean} は荒川 mean 式、 Q_{Vst} 、 Q_{Vbu} はそれぞれ準則型保証型設計指針²⁾によるせん断信頼強度及び付着割裂の影響を考慮したせん断信頼強度である。また、表 1 中の Q_{su} は終局強度型耐震設計指針³⁾のせん断信頼強度 ($R_p=1/50$ rad)、 Q_{bu} はトラス機構におけるせん断補強筋の負担力と主筋の付着割裂強度との釣合より算出した式(1)とする。

$$Q_{bu} = \{j_t \cdot \tau_b \cdot \sum \psi + \tan \theta \cdot (1 - k) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot F_c / 2\} \cdot \sqrt{F_c} \quad (1)$$

$$k = 2\tau_b \cdot \sum \psi / (b \cdot v \cdot F_c) \leq 1.0$$

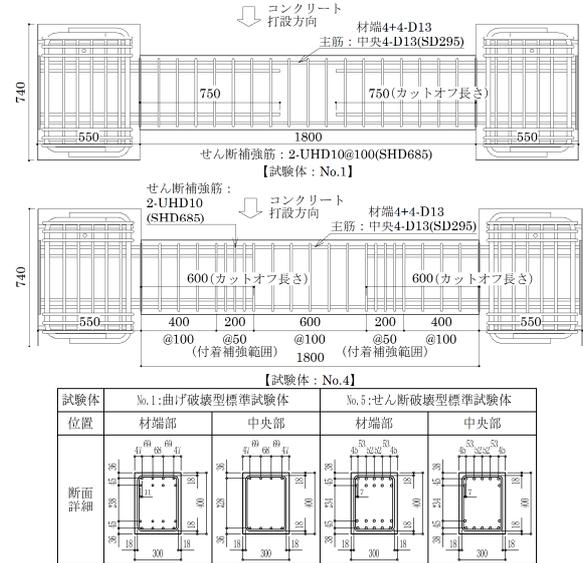


図 1 配筋図 (No. 1, No. 4) 及び梁断面図 (No. 1, No. 5) (単位:mm)

ここで、 $\sum \psi$ は引張主筋の周長和、 τ_b は文献 4)5) の藤井・森田式を基にした付着割裂強度、他の記号は終局強度型耐震設計指針³⁾による。

2.2 載荷方法

実験は、試験体の上下支持部を建研式加力装置に固定し、押し引き型油圧ジャッキを用いて試験体に逆対称変形が生ずるよう水平力を加力して行った。載荷履歴は、目標所定部材角 $R=(5, 10, 15, 20, 30, 40) \times 10^{-3} \text{ rad}$ で、2 サイクルずつの正負繰り返し載荷の後、正加力方向 $R=60 \times 10^{-3} \text{ rad}$ までの単調載荷を行うものとした。

3. 実験結果

3.1 破壊性状と荷重変形関係

図 2 に $R=40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 時の曲げ破壊型試験体及び $R=30 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 時のせん断破壊型試験体のひび割れ状況を示す。

曲げ破壊型試験体は、付着割裂ひび割れを伴う曲げ破壊となった。各試験体共に、1 段筋及び 2 段筋の引張降伏後に剛性が低下し、最大荷重となった。試験体 No.1~3 は実験終了時においても最大荷重の 8 割まで荷重が低下しなかった。付着補強筋を配筋した試験体 No.4 は

表 1 試験体パラメータ一覧

試験体名	σ_B (N/mm^2)	主筋			カットオフ		付着補強筋	せん断補強筋						破壊形式			
		材端配筋	中央配筋	鋼種	有無	カットオフ長さ (mm)		必要カットオフ長さ (mm)	P_w (%)	鋼種	せん断補強筋				せん断		
											Q_{Fu} (kN)	Q_{Su} (kN)	Q_{Vu} (kN)		Q_{mean} (kN)	Q_{Vst} (kN)	Q_{Vbu} (kN)
No. 1 曲げ標準試験体	26.9	4+4-D13	4-D13	SD295*1	有	750	765	—	0.47 (#100)	SHD685*3	124	300	390	252	277	275	曲げ破壊
No. 2 標準+カット無し	26.9	4+4-D13	4+4-D13		無	—	—	—	0.47 (#100)		124	300	390	252	277	275	
No. 3 標準+カット短	27.1	4+4-D13	4-D13		有	600	764	—	0.47 (#100)		124	302	392	252	278	276	
No. 4 標準+カット短+付着補強筋	27.1	4+4-D13	4-D13		有	600	764	有	0.47 (#100)		124	302	392	252	278	276	
No. 5 せん断標準試験体	27.1	5+5-D16	5+2-D16	SHD685*2	有	750	1298	—	0.47 (#100)	SHD685*3	446	298	399	267	278	278	せん断破壊
No. 6 標準+ p_u 大	27.1	5+5-D16	5+2-D16		有	750	1328	—	0.95 (#50)		446	448	491	327	307	390	
No. 7 標準+カット無し	26.9	5+5-D16	5+2-D16		無	—	—	—	0.47 (#100)		446	296	398	266	277	277	
No. 8 標準+ F_c60	60.1	5+5-D16	5+2-D16		有	750	1171	—	0.47 (#100)		446	340	600	351	424	397	

*1 $\sigma_y=326 \text{ (N/mm}^2)$, *2 $\sigma_y=663 \text{ (N/mm}^2)$, *3 $\sigma_y=791 \text{ (N/mm}^2)$

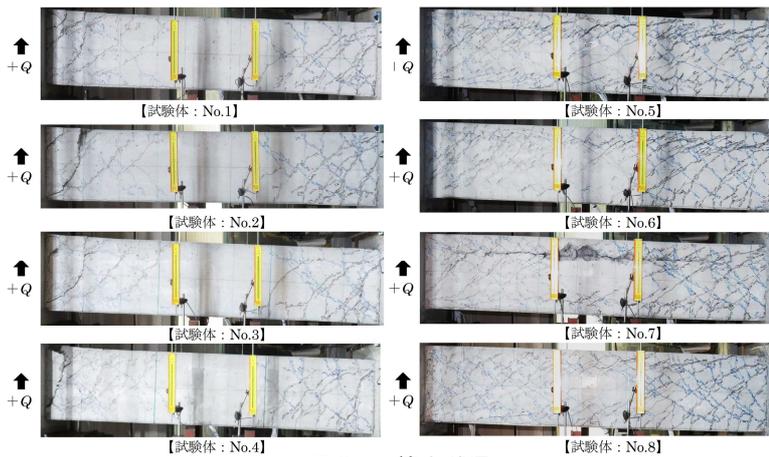


図2 ひび割れ状況

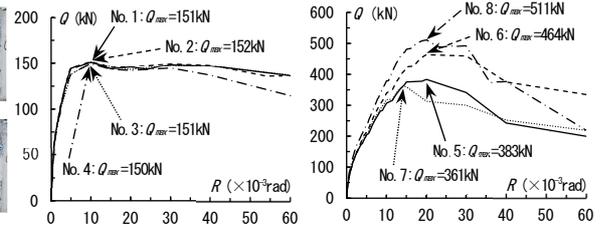


図3 Q-R関係正加力時包絡線

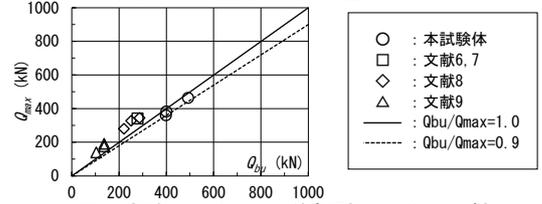


図4 実験耐力 Q_{max} と付着割裂耐力 Q_{bu} の比較

最大荷重の8割まで荷重が低下したものの、その限界部材角 R_{80} は $55.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ であり、十分な変形性能を有していたと言える。

せん断破壊型試験体は、いずれの試験体も付着割裂ひび割れを伴うせん断破壊となった。No.6及びNo.8については1段目及び2段目の主筋の引張降伏後に最大荷重となった。

図3に $Q-R$ 関係正加力時包絡線を示す。図3中の Q_{max} は実験の最大耐力を示す。同図より、曲げ破壊型試験体について確認すると、 $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ から $R=5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 程度まで、カットオフ長さを短くしたNo.3及びNo.4では、No.1及びカットオフ無しとしたNo.2よりも剛性がやや低くなった。また、 $R=30 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降、No.4は他の試験体と比べ、荷重低下が顕著であった。せん断破壊型試験体について確認すると、 $R=5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 程度まで、No.5~No.7は同様な剛性であった。カットオフを設けたNo.5に対し、カットオフ無しとしたNo.7の方が、 $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 程度から荷重低下が顕著となった。せん断補強筋比 p_w を0.47%としたNo.5及びNo.7に対し、 p_w を0.95%としたNo.6では、 $R=5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 程度から剛性は高く推移した。コンクリートの目標圧縮強度を 24 N/mm^2 としたNo.5~No.7に対し、 60 N/mm^2 としたNo.8では、加力初期から剛性が高く推移した。

3.2 最大耐力

曲げ破壊型試験体は、各試験体共に、 Q_{max} が Q_{bu} を上回った。せん断破壊型試験体は、各試験体共に、 Q_{max} が Q_{sub} 、 Q_{max} 、 Q_{sub} 、 Q_{bu} を上回ったものの、 Q_{bu} を下回った。

ここで、図4に本実験及び降伏強度 685 N/mm^2 の高強度せん断補強筋を用いた既往の実験^{6)~9)}で付着割裂ひび割れを伴うせん断破壊あるいは付着割裂破壊となった試験体の Q_{max} と Q_{bu} の比較を示す。本実験の試験体は1段筋と2段筋の本数が同数であり、既往の実験^{6)~9)}の試験体は1段筋と2段筋の本数が異なる。なお、文献6)7)8)は梁の試験体であり、文献9)は柱の試験体である。

図4より、2段筋の本数が1段筋の本数と同数程度配筋される場合、 Q_{bu} は0.9倍相当のせん断耐力しか発揮されていないのに対し、1段筋のみあるいは2段筋の本数が1段筋の本数未満の場合には Q_{max} は Q_{bu} 以上となった。これは文献4)5)で提案された付着割裂耐力式に2段筋の影響が考慮されていないためと考えられる。

2段目主筋のカットオフの有無を因子とした試験体No.5とNo.7の最大耐力を比較すると、カットオフ無し試験体No.7の方がカットオフ有り試験体No.5に比べて、若干最大耐力が低下したものの、その値に大きな違いは見られなかった。

4. まとめ

高強度せん断補強筋 685 N/mm^2 級を用いたRC梁に対して、2段目主筋のカットオフの有無やカットオフ長さ、コンクリートの圧縮強度、せん断補強筋量、カットオフ先端に追加した付着補強筋の有無を因子とした実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 曲げ破壊型試験体は、全試験体で、実験の最大耐力がRC規準¹⁾の略算式による曲げ耐力発揮時の作用せん断力を上回り、その後も十分な変形性能を有していた。また、カットオフの有無による差異はほとんど見られなかった。
- (2) せん断破壊型試験体は、全試験体で、付着割裂ひび割れが顕著に発生した。全ての試験体で荒川mean式、靱性保証型設計指針²⁾によるせん断信頼強度及び付着割裂の影響を考慮したせん断信頼強度、終局強度型耐震設計指針³⁾のせん断信頼強度を上回った。しかし、本実験ではトラス機構におけるせん断補強筋の負担力と主筋の付着割裂強度との釣合いより算出した終局せん断耐力を下回った。また、カットオフの有無を比較すると、カットオフ無し試験体の方がカットオフ有り試験体に比べて、若干最大耐力が低下したものの、その値に大きな違いは見られなかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2018
- 2) 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
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990
- 4) 藤井栄、森田可郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究（第1報、付着割裂破壊を支配する要因についての実験結果）、日本建築学会論文報告集、第319号、pp.47-55、19829
- 5) 藤井栄、森田可郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究（第2報、付着割裂強度算定式の提議）、日本建築学会論文報告集、第324号、pp.45-53、19832
- 6) 渡辺ら：高強度鉄筋の開裂に関する研究（その11—梁のせん断強度実験—II—）—aD-15の場合の実験概要及び結果—、日本建築学会大会学術講演要録集、pp.945-946、1990.10
- 7) 渡辺ら：高強度鉄筋の開裂に関する研究（その12—梁のせん断強度実験—II—）—aD-15の場合の実験結果の検討—、日本建築学会大会学術講演要録集、pp.947-948、1990.10
- 8) 金子ら：高強度材料（コンクリート及びせん断補強筋）を用いたRC梁部材の構造性能に関する実験研究（その1 実験概要及び実験結果）、日本建築学会大会学術講演要録集、pp.493-494、20009
- 9) 熊澤ら：高強度材料を用いたRC柱部材の構造性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演要録集、pp.433-434、20019