

論文 横補強筋を配置しないカプラー方式主筋継手を用いた RC 梁の終局耐力・変形性能

田川 浩之^{*1}・市岡 有香子^{*2}・足立 将人^{*3}・益尾 潔^{*4}

要旨: カプラー方式の機械式主筋継手を配置し、継手部以外に横補強筋を均等に配置した RC 梁の終局耐力、変形性能を明らかにするため、継手を配置した RC 梁試験体 12 体、比較のための継手なし試験体 4 体について、曲げせん断実験を行った。主な実験因子は、継手の有無と位置、コンクリート強度、横補強筋比である。実験の結果、梁端部から 1.5D(D:梁せい)以上離して継手を配置し、継手部以外に横補強筋を均等に配置した RC 梁試験体は、同じ総組数の横補強筋を配置した継手なし試験体と同等の終局耐力と変形性能を示した。
キーワード: 機械式主筋継手, カプラー方式, RC 梁, 横補強筋, 終局耐力, 変形性能

1. はじめに

従来、カプラー方式の機械式主筋継手(以下、継手)を配置した RC 梁では、継手部に横補強筋を配置する場合、かぶり厚さは継手部に配置した横補強筋の外側で決定する。この場合、設計かぶり厚さを確保するためには、主筋位置は部材の内側に寄せる必要があるため、RC 梁の曲げ終局耐力が減少するだけでなく、横補強筋で囲まれたコア部の大きさが小さくなり、RC 梁のせん断耐力および変形性能が減少する。これらの点より、継手部に横補強筋を配筋しなくてよければ、設計上、都合がよい。

松崎ら¹⁾は、モルタル充填式継手部端部に横補強筋を集約して配置した RC 梁のせん断性状を実験により明らかにしている。本実験では、カプラー方式の機械式主筋継手を対象とし、RC 梁試験体に曲げせん断加力を行い、継手部以外に横補強筋を均等に配置した RC 梁の最大耐力、変形性能を明らかにする。

2. 実験計画

2.1 試験体

本実験は、系列 I (F_c 27, 継手:無・中央), 系列 II (F_c 27, 継手:無・偏心), 系列 III (F_c 60, 継手:偏心)からなる。実験因子は、表-1 に示すように、コンクリート目標圧縮強度 F_c (27, 60N/mm²), 主筋本数, 横補強筋比, 横補強筋鋼種, 継手の有無と位置であり、試験体数は計 16 体である。試験体の形状寸法, 配筋を図-1 に示す。

主筋の鋼種・本数・位置は各系列の全試験体で共通であり、いずれも内法スパン長を梁せいの 4 倍とした。継手あり試験体の継手位置は、系列 I では試験区間の中央、系列 II と III では梁端から 1.25D もしくは 1.5D(D:梁せい)離れた位置とする。横補強筋は、継手の有無に係わらず、総本数を同じにすることを基本とし、継手あり試験体では継手位置以外に、等間隔に配置することとした。

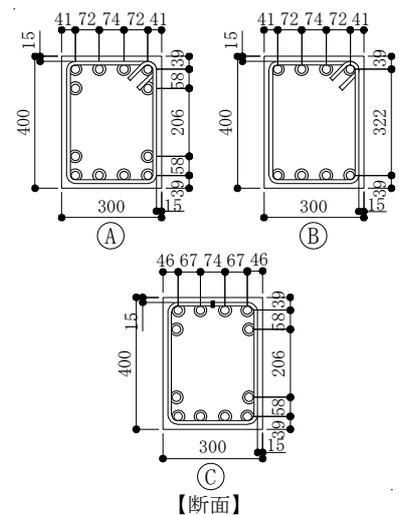
表-1 実験計画

系列	試験体	F_c (N/mm ²)	主筋		継手		横補強筋				断面	
			配筋 (p_t)	鋼種	有無	位置	鋼種	配筋	p_w	$p_w \cdot \sigma_{wy}$ (N/mm ²)		$p_w \cdot \sigma_{wy}$ F_c
I	No. 1	27	4+2-D22 (1.94%)	SD	無	—	SD	2-D10@90	0.53%	1.94	0.06	A
	No. 2				有	中央						
	No. 3				無	—						
	No. 4				有	中央						
II	No. 5	27	4-D22 (1.29%)	SD	無	—	SD	2-D10@80	0.59%	2.18	0.07	B
	No. 6				有	1.5D						
	No. 7				有	1.25D						
	No. 8				無	—						
	No. 9				有	1.5D						
	No. 10				有	1.25						
III	No. 11	60	4+2-D22 (1.94%)	SD	有	1.5D	SD	2-D10@50	0.95%	3.49	0.11	A
	No. 12				有	1.25D						
	No. 13				有	1.5D						
	No. 14				有	1.25D						
	No. 15				有	1.5D						
	No. 16				有	1.25D						

【部材寸法】 内法スパン長L=1600mm, 梁幅B×梁せいD=300mm×400mm

【記号】 F_c : コンクリート目標圧縮強度, p_t : 引張鉄筋比, p_w : 横補強筋比, σ_{wy} : 横補強筋降伏強度

【横補強筋の加工形式】 SD295: 135° フック閉鎖型, 785級: 溶接閉鎖型



*1 日本建築総合試験所 構造部 構造物試験室 Ph.D. (正会員)
 *2 日本建築総合試験所 構造部 構造物試験室 博士(工学) (正会員)
 *3 日本建築総合試験所 構造部 構造物試験室・主査 博士(工学) (正会員)
 *4 一般社団法人 建築構造技術支援機構 工博 (正会員)

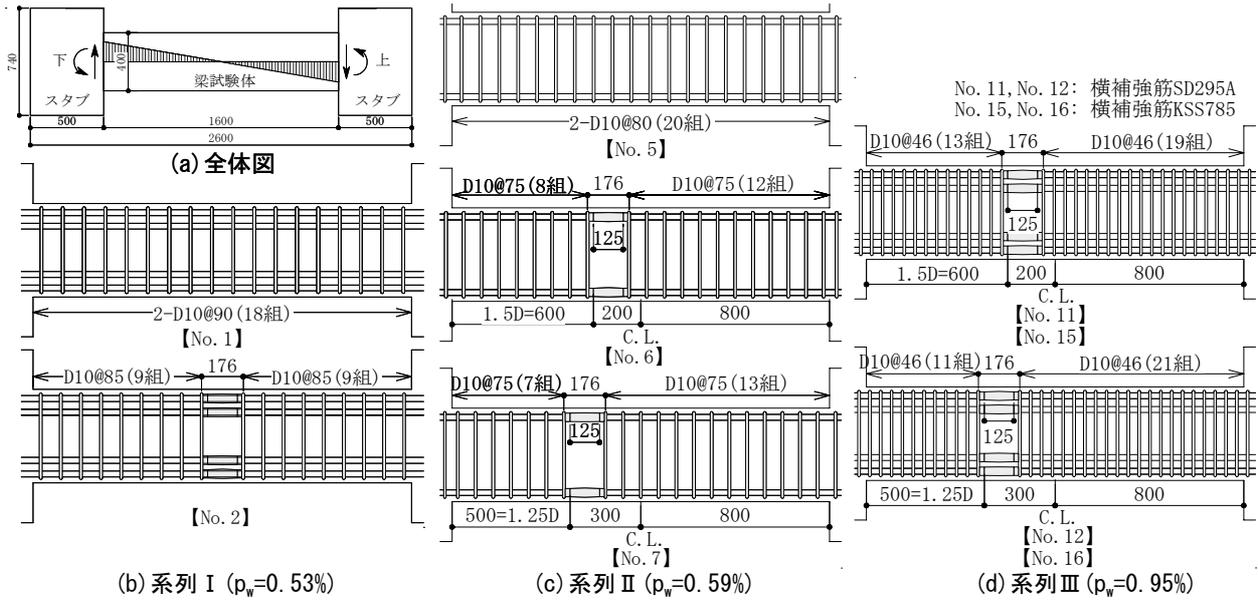


図-1 主要な試験体の形状寸法, 配筋

2.2 使用材料

材料試験結果を表-2に示す。

表-2 材料強度
(a) コンクリート

系列	試験体名	F_c (N/mm^2)	σ_B (N/mm^2)	ϵ_{co} ($\times 10^{-3}$)	σ_t (kN/mm^2)
I	No. 1~No. 4	27	33.1	1.90	3.04
II	No. 5~No. 10	27	33.0	1.92	2.89
III	No. 11~No. 16	60	65.7	2.47	4.87

F_c : 目標強度, σ_B : 圧縮強度, ϵ_{co} : σ_B 時ひずみ, σ_t : 引張強度

(b) 鉄筋

系列	使用箇所	試験体名	呼び名	鋼種	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	伸び (%)
I	主筋	No. 1~No. 4	D22	SD490	613	834	16
	横補強筋	No. 4	D10	SD295A	369	512	29
II	主筋	No. 5~No. 10	D22	SD390	436	678	20
	横補強筋	No. 10	D10	SD295A	369	518	30
III	主筋	No. 11~No. 16	D22	SD490	543	769	18
	横補強筋	No. 11~No. 12	D10	SD295A	369	518	30
		No. 13~No. 16	S10	KSS785	963	1125	11

注) σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強さ

3. 実験方法

本実験では、図-2に示すように、試験体の上下支持部を加力装置に固定し、押し引き型油圧ジャッキを用いて試験体の梁供試部に逆対称変形が生じるように水平力を加力した。載荷履歴は、目標所定部材角 R が、(5,10,15,20,30,40,(50)) $\times 10^{-3}$ rad.の2サイクルずつの正負繰返し載荷の後、正加力方向への単調載荷とした。

4. 実験結果

4.1 荷重-変形関係および破壊状況

主要な試験体の Q_g - R 関係を図-3~4に示す。 Q_g は梁せん断力, R は部材角である。主な発生現象、梁せん断力が最大耐力 Q_{max} の80%に低下した時点の限界部材角 R_{80} を併示する。主要な損傷状況を写真-1に示す。

系列Iでは、継手の有無に係わらず、破壊形式は付着割裂破壊を伴うせん断破壊型となった。系列Iの荷重-

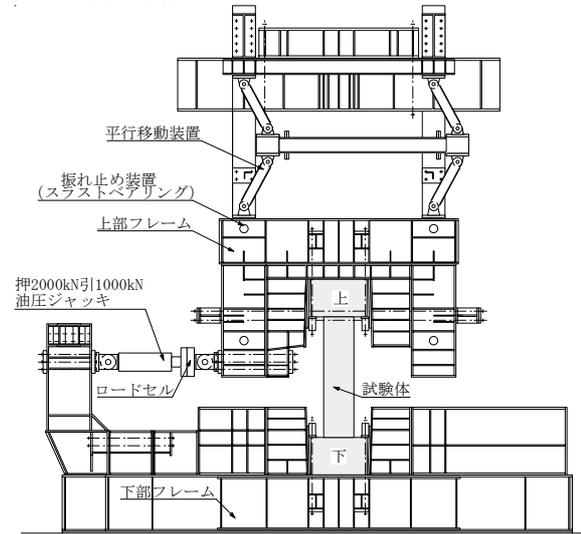


図-2 載荷装置

変形関係は、4.2節で後述する。

(1) 系列II (F_c 27, 継手:無・偏心) 試験体 No. 5~10

梁主筋が降伏し Q_{max} に到達後、付着割裂ひび割れと端部せん断ひび割れが進展し、耐力が低下した。継手を梁端部寄りに配置するほど、継手部近傍のひび割れによる損傷が梁端部に近寄った。各試験体の破壊形式は、梁降伏後の付着割裂破壊を伴う端部せん断破壊型である。

(2) 系列III (F_c 60, 継手:偏心) 試験体 No. 11~16

梁主筋が降伏し Q_{max} に到達後、試験体 No.11,13,14では、付着割裂ひび割れ、せん断ひび割れが進展するに伴い、耐力が低下した。試験体 No.12では、継手部近傍から梁端部に向かうせん断ひび割れが早期に進展し、継手部周辺でせん断破壊を起こした。試験体 No.15,16では、梁端部の曲げひび割れ幅が増加し、緩やかに耐力が低下した。No.11,13,14の破壊形式は梁曲げ降伏後の付着割裂破壊を伴うせん断破壊型, No.12は継手部周辺のせん断破壊型, No.15,16は曲げ破壊型である。

FC: 曲げひび割れ FSC: 曲げせん断ひび割れ SC: せん断ひび割れ
 BC: 付着割裂ひび割れ MTY: 主筋の引張降伏 HTY: 横補強筋の引張降伏

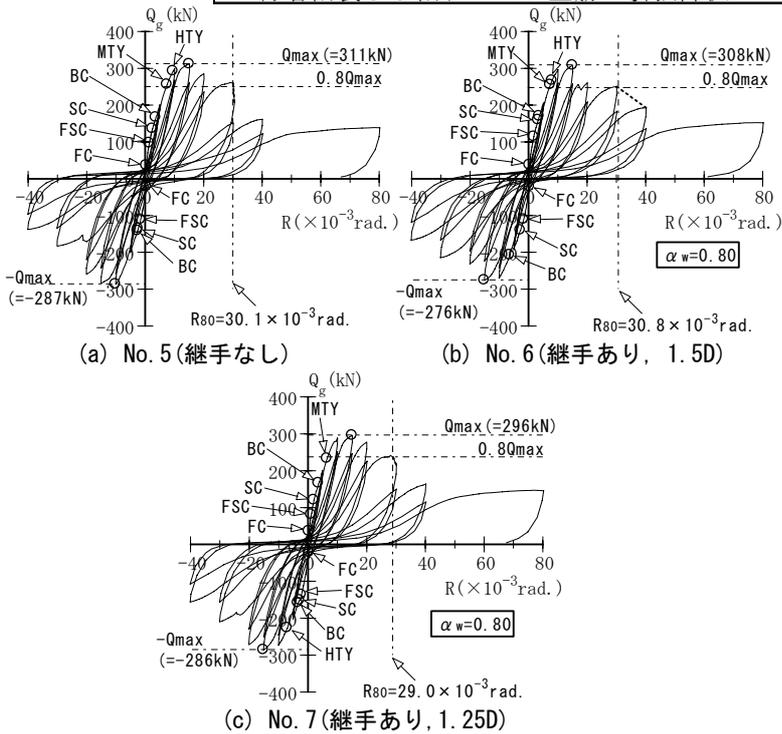


図-3 主要な試験体の荷重-変形関係(系列Ⅱ)

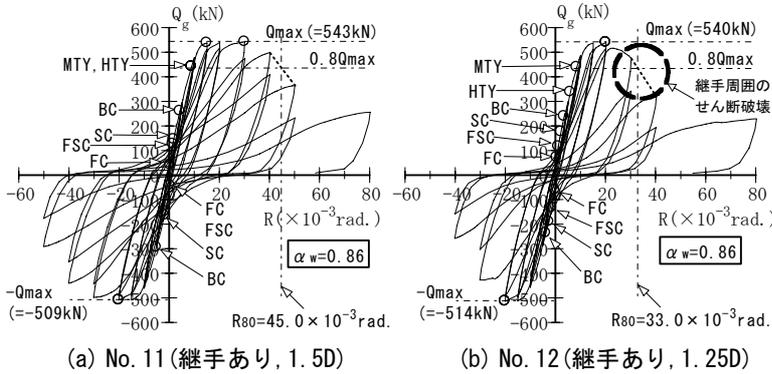


図-4 主要な試験体の荷重-変形関係(系列Ⅲ)

※ Q_{max} 時以降、継手を梁端部寄りに配置するほど、継手部近傍に生じるひび割れ損傷が梁端部に近寄った(下の赤破線箇所を参照)。



【No. 5(継手なし)】



【No. 6(継手あり, 1.5D)】



【No. 7(継手あり, 1.25D)】
(a) 試験体 No. 5~No. 7

※ Q_{max} 時以降、継手位置が 1.25D の試験体 No.12 では、継手部周辺にせん断ひび割れが進展し、継手部周辺でせん断破壊を起こした(下の赤破線箇所を参照)。



【No. 11(継手あり, 1.5D)】



【No. 12(継手あり, 1.25D)】
(b) 試験体 No. 11~No. 12

写真-1 $R=40 \times 10^{-3}$ rad. 時の損傷状況

4.2 継手の有無および位置の影響

梁主筋継手の有無および位置が $Q_g/Q_{fu}-R$ 関係の包絡線に及ぼす影響を図-5~7 に示す。同図中に、 Q_{su}/Q_{fu} を示す。 Q_{fu} は、e 関数法^{2),3)}によるコンクリートの応力-ひずみ関係を用い平面保持仮定より算定した曲げ終局耐力、 Q_{su} は荒川 mean 式⁴⁾によるせん断終局耐力である。

(1) 継手の有無の影響(系列Ⅰ: $F_c 27$, 継手: 無・中央)

系列Ⅰの各試験体は、図-5 に示すように、荒川 mean 式⁴⁾によるせん断終局耐力 Q_{su} に達し、曲げ終局耐力 Q_{fu} に達しない。継手の有無による Q_{max} , R_{80} , 荷重-変形関係の有意差は認められない。

(2) 継手位置の影響(系列Ⅱ: $F_c 27$, 継手: 無・偏心)

系列Ⅱの各試験体は、図-6 に示すように、荒川 mean⁴⁾

によるせん断終局耐力 Q_{su} , ならびに曲げ終局耐力 Q_{fu} に達した。継手の有無および位置(1.5D, 1.25D)が Q_{max} , R_{80} , 荷重-変形関係に及ぼす影響は比較的小さい。

(3) 継手位置の影響(系列Ⅱ: $F_c 60$, 継手: 偏心)

横補強筋の鋼種を SD295 とし、継手を梁端部から 1.25D の位置に配置した試験体 No.12 は、図-7(a) に示すように、1.5D に配置した試験体 No.11 と比べて、早い段階(20×10^{-3} rad. 近傍)から耐力劣化が始まった。これは、継手部周辺から発生したせん断ひび割れが進展し、せん断破壊を引き起こしたことによる。一方、横補強筋の鋼種を KSS785 にした試験体 No.13~No.16 では、横補強筋ひずみは弾性域に留まり、図-7(b), (c) に示すように、継手位置(1.5D, 1.25D)による Q_{max} , R_{80} , 荷重-変形関係の有意差は見られない。

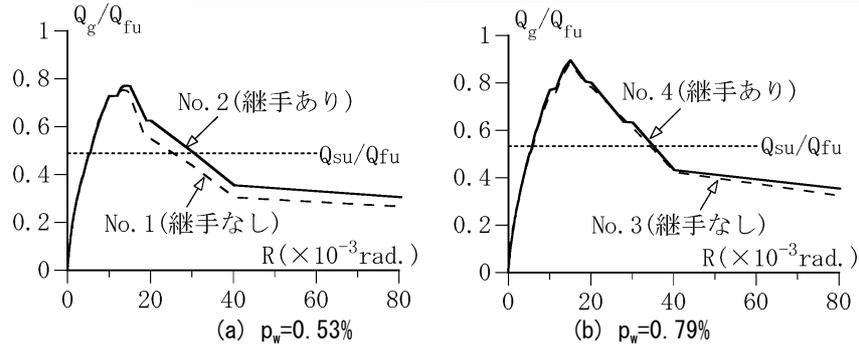


図-5 継手の有無の影響 (系列 I : F_c27, 継手:無・中央)

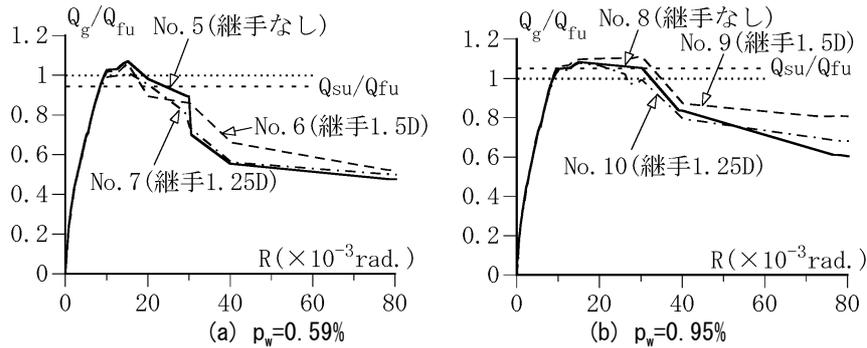


図-6 継手の有無, 位置の影響 (系列 II : F_c27, 継手:無・偏心)

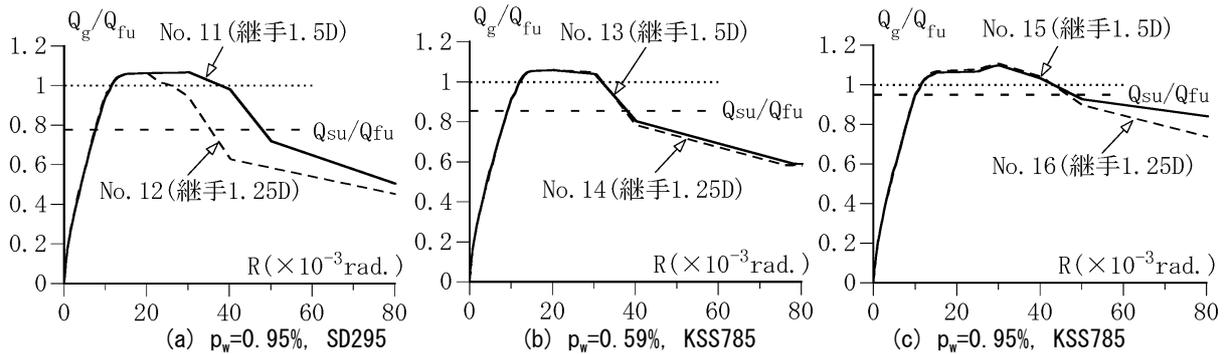


図-7 継手位置の影響 (系列 II : F_c60, 継手:偏心)

5. 最大耐力および変形性能の検討

5.1 最大耐力の検討

荒川 mean 式によるせん断余裕度 Q_{su}/Q_{fu} と Q_{max}/Q_{fu} の関係を図-8 に示す。同図中には、継手を配置した場合、配置しない場合の本実験値、ならびに、継手を配置しない梁試験体 45 体の既往実験値⁵⁾を○で示し、荒川 mean 式によるせん断余裕度 $Q_{su}/Q_{fu} \leq 1.0$ のせん断破壊型試験体について、安全率 Q_{max}/Q_{su} の平均値を示した。

継手の有無, 位置に係わらず, せん断余裕度 $Q_{su}/Q_{fu} \leq 1$ (せん断破壊型) の場合, 荒川 mean 式によるせん断終局耐力は, 実験値に対して安全側に評価された。また, 継手を配置した, せん断破壊型試験体の安全率の平均値は 1.23 となり, 継手を配置しない試験体と同程度となった。

5.2 変形性能の検討

5.2.1 限界部材角とせん断余裕度の関係

本実験値, 継手を配置しない梁試験体(42 体)⁵⁾の既往実験値について, せん断余裕度 Q_{su}/Q_{fu} (荒川 mean 式) と限

界部材角 $(R_u)_{test}$ の関係を図-9 に示す。既往実験値は, 図-8 の試験体のうち, 横補強筋に 135° フック付き外周筋のみを用いた試験体 3 体を除いている。同図中に, $\alpha_f = 1.1$ として求めた式(1)の計算値を示した。この計算値は, 既往実験⁵⁾による $(R_u)_{test}$ の下限に概ね相当する。

$$R_u = 0.04(Q_{su}/Q_{fu}) / \alpha_f \quad (1)$$

継手位置を 1.5D から 1.25D に減少させると, F_c が $60(N/mm^2)$ で, かつ横補強筋比 p_w が 0.95% である試験体 (No.11~12, No.15~16) では, 限界部材角 $(R_u)_{test}$ が減少した。一方, 上記以外の試験体 No.1~10, No.13~14 では, 継手の有無, 位置に係わらず, 限界部材角 $(R_u)_{test}$ は, 殆ど変化しなかった。これは, 限界部材角の主要因となる斜めひび割れが, 継手近傍でなく, 主に梁端部で進展したことに起因する。

以上より, 主筋継手の有無に係わらず, $\alpha_f = 1.1$ とすれば, 継手を配置した RC 梁の限界部材角 $(R_u)_{test}$ は, $40 \times 10^3 rad.$ 以上になると判断できる。

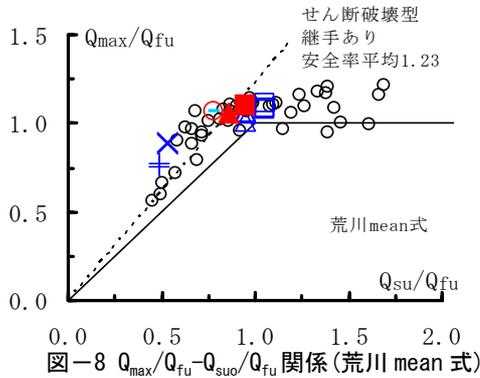


図-8 Q_{max}/Q_{fu} - Q_{su}/Q_{fu} 関係 (荒川 mean 式)

記号	試験体	F _c (N/mm ²)	横補強筋	
			p _w (%)	鋼種
+	No. 1, 2	27	0.53%	SD295A
×	No. 3, 4		0.79%	
△	No. 5~7		0.59%	
□	No. 8~10		0.95%	
○	No. 11, 12	60	0.95%	KSS785
▲	No. 13, 14		0.59%	
■	No. 15, 16		0.95%	

○: 既往実験

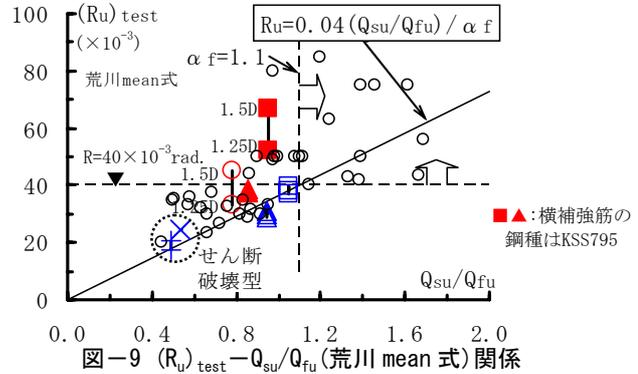


図-9 $(R_u)_{test}$ - Q_{su}/Q_{fu} (荒川 mean 式) 関係

5.2.2 継手の有無, 位置, 横補強筋比と鋼種の影響

継手の有無, 位置, 横補強筋比 p_w , 横補強筋鋼種が, 限界変形角 R_{80} に及ぼす影響を図-10 に示す。図-10(a) によると, 継手位置を 1.5D, もしくは梁スパン中央とした試験体の R_{80} は, 継手なし試験体と同程度になった。図-10(b) によると, 継手位置を 1.5D から 1.25D にすると, F_c60 を使い, p_w が 0.95% の試験体 (No.11~12, No.15~16) で R_{80} が著しく減少した。これは, 1.25D の場合, 継手近傍から梁端部にかけて斜めひび割れが発生し, 耐力が低下したことによる。図-10(c), (d) によると, p_w を増加させるか, 横補強筋の鋼種を普通強度 (SD295) から高強度 (KSS785) に代えると, R_{80} は著しく増加した。

5.2.3 継手周囲横補強筋の配置率の影響

継手を配置する場合, 図-11 に示すように, 継手周囲区間の中心に対し, 45° の角度をもつトラス機構を仮定すると, 継手周囲区間両端の横補強筋の降伏耐力 T_{wy} は, 式(2)で求められる。ここに, n_{w1} , n_{w2} は継手周囲区間および同区間に隣接する横補強筋の組数, a_w は横補強筋 1 組の断面積, σ_{wy} は横補強筋の降伏強度である。

$$T_{wy} = (n_{w1} + n_{w2}) \cdot a_w \cdot \sigma_{wy} \quad (2)$$

一方, 継手を配置しない場合, 図-12 に示すように, 継手周囲区間と同じ長さ (J_{lgo} : 上下最外縁主筋の中心間距離) 内に配置される横補強筋の降伏耐力 T_{wyo} は, 式(3)で求められる。ここに, n_{wo} は主筋継手を配置しないとして算定した横補強筋の組数である。

$$T_{wyo} = n_{wo} \cdot a_w \cdot \sigma_{wy} \quad (3)$$

T_{wyo} に対する T_{wy} の比率より, 継手周囲横補強筋の配置率 α_w を式(4)で定義する。

$$\alpha_w = T_{wy} / T_{wyo} = (n_{w1} + n_{w2}) / n_{wo} \quad (4)$$

継手周囲横補強筋の配置率 α_w と限界部材角実験値 R_{80} の関係を表-3 に示す。同表中では, 試験体 No.2 と No.4 はスパン中央に継手を配置した試験体, それ以外は, 梁端部フェイスから継手カプラー端面までの距離 L_{so} を 1.5D とした試験体である。継手無し (配置率 $\alpha_w = 1.0$) と, 継手有りの試験体の R_{80} の比較を図-13 に示す。これらによると, 継手位置を梁端部フェイスから 1.5D 以上離れた試験体は, いずれも継手なし試験体と同等の限界部材角実験値 R_{80} を有する。

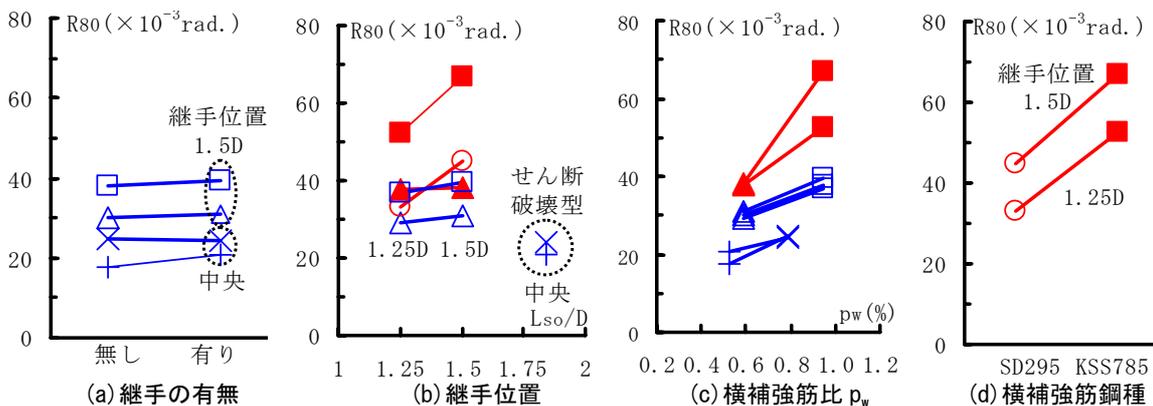


図-10 限界変形角 R_{80} に及ぼす各種要因の影響 (凡例は図-8、図-9 と同一)

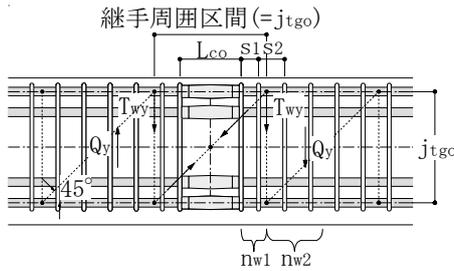


図-11 継手周囲区間の横補強筋の組数

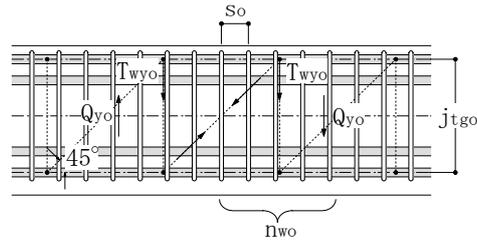


図-12 継手を配置しない場合の組数

表-3 継手周囲横補強筋の配置率 α_w と限界部材角実験値 R_{80}

試験体	s_o (mm)	s_1 (mm)	s_2 (mm)	n_{wo} (本)	n_{w1} (本)	n_{w2} (本)	α_w	R_{80} ($\times 10^{-3}$)
No. 2	90	85	85	4	1	2	0.75	20.7
No. 4	60	55	55	6	2	3	0.83	24.2
No. 6	80	75	75	5	1	3	0.80	30.8
No. 13								38.4
No. 9	50	46	46	7	2	4	0.86	39.5
No. 11								45.0
No. 15								66.9

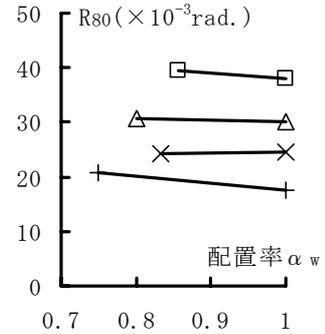


図-13 継手周囲横補強筋の配置率 α_w が R_{80} に及ぼす影響

6. 結論

カプラー方式の機械式主筋継手を配置し、継手部以外に横補強筋を均等に配置した RC 梁の終局耐力、変形性能を明らかにするため、継手あり試験体 12 体、継手なし試験体 4 体について、曲げせん断実験を行った。

(系列 I の実験)

- 1) 継手を梁中央部に配置し、継手位置以外に横補強筋を均等に配置した試験体は、同一横補強筋比 p_w を有する継手なし試験体と同等の最大耐力 Q_{max} 、限界部材角 $(R_u)_{test}$ を有した。各試験体の破壊形式は、付着割裂破壊を伴うせん断破壊型となった。

(系列 II, III の実験)

- 2) 梁端部から $1.5D$ の位置に継手を配置した試験体は、同一 p_w を有する継手なし試験体と比較して、同程度の Q_{max} と $(R_u)_{test}$ を有した。各試験体の破壊形式は、梁曲げ降伏後の付着割裂破壊を伴う端部せん断破壊型、もしくは曲げ破壊型となった。
- 3) 梁端部から $1.25D$ の位置に継手を配置した試験体 No.12 では、 Q_{max} 到達後、継手部周辺にせん断ひび割れが進展し、継手部でせん断破壊を起こした。これらに起因し、 $1.5D$ の位置に継手を配置した試験体 No.11 と比較して、小さな $(R_u)_{test}$ を示した。

(終局耐力および変形性能)

- 4) 梁端部から $1.5D$ の位置に継手を配置した RC 梁では、継手を配置しない RC 梁として求めた p_w を用い、荒川 mean 式⁴⁾により算定したせん断終局耐力は、安全側に評価された。
- 5) 継手位置以外に横補強筋を均等に配置した RC 梁は、

継手なしの RC 梁と同様に、荒川 mean 式⁴⁾によるせん断終局耐力 Q_{su} に対し、割増し係数 $\alpha_f=1.1$ とした場合、 $(R_u)_{test} \geq 4/100$ の変形性能を有する。

謝辞

本実験は、ダイワスチール(株)による開発の一環として行なったものである。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 青山将也, 山元雄亮, 杉崎一哉, 阿瀬正明, 杉山智昭, 松崎育弘: せん断補強筋を集約配筋したモルタル充填式継手を有する RC 梁部材のせん断性状に関する実験的研究 (その 1)~(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.69-72, 2005.
- 2) 梅村魁: 鋼筋コンクリート梁の塑性変形および終局強度, 日本建築学会論文集, 第 42 号, pp.59-70, 1951.2
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1.コンクリートの 1 軸応力状態における力学的性状, pp.1-4, 1987
- 4) 日本建築防災協会, 日本建築センター編集: 2007 年度版 建築物の構造関係技術基準解説書, 6.4.4 鉄筋コンクリート造のルート 3 の計算(平成 19 年 国交告第 594 号第 4 号), pp.355-361, 2007
- 5) 益尾潔, 市岡有香子, 田川浩之, 足立将人: SD490 および 785N/mm^2 級横補強筋を用いた RC 梁の構造性能(その 1)~(その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 2010