

論文 2 段目カットオフ筋の抜け出しと付着割裂を考慮した定着耐力評価

榎原 裕幸*1・菱川 善就*1・河野 進*2・岡村 司*3

要旨： 梁 3 体の曲げせん断実験から，2 段目カットオフ筋が抜け出すことで，梁本来の曲げおよびせん断性能が発揮されない定着破壊の条件を明らかにした．この条件を用いて 2 段目カットオフ筋を有する RC 梁試験体 33 体の破壊モードと最大せん断力について検討した．その結果，定着破壊を考慮することで，全鉄筋を通し筋と仮定して靱性指針式を適用した場合のせん断耐力，付着耐力および曲げ耐力を用いた評価では危険側となる試験体を含め，全体の破壊モードと耐力の評価精度をあげることができた．

キーワード： 付着割裂，梁，カットオフ筋，付着劣化，定着破壊，抜け出し

1. はじめに

RC 梁におけるカットオフ筋の定着長さについては，建築学会の配筋指針¹⁾では $(L_0/4 + 15d)$ ，建築学会 RC 規準²⁾では $(A_{cut}/A_{total} \times L_0/2 + d)$ が規定されている．ただし， L_0 ：梁のクリアスパン長さ， d ：有効せい， A_{cut} ：カットオフされる引張鉄筋の断面積， A_{total} ：引張鉄筋の総断面積である．しかしながら，これらの規定値を満たしていても 2 段目カットオフ筋の“抜け出し”によって主筋の付着性状が劣化し，曲げやせん断性能が発揮されない例³⁾が報告されている．特に，2 段目カットオフ筋の割裂線長さ比(b_{sl2})が大きい場合は，付着割裂破壊に対して主筋の抜け出しによる破壊（以下，定着破壊）が先行する．この場合，2 段目主筋を通し筋と仮定し，建築学会靱性指針⁴⁾記載の付着割裂破壊の検討を行うと危険側の評価となる．

そこで，中宇根ら³⁾の梁試験体 3 体を用いて 2 段目カットオフ筋が定着破壊する場合の破壊性状やその条件を考察する．また，2 段目カットオフ筋を有する RC 梁試験体 33 体を用いて，定着破壊を含めた破壊モード判定条件の妥当性を論じる．

2. 2 段目カットオフ筋の付着劣化の検討

2.1 試験体概要

2 段目カットオフ筋の定着破壊の考察に中宇根ら³⁾の No.6, 9, 10 を用いた．図-1 に 2 段目カットオフ筋を有する実験の概要を示す．図-1(b) 中に●で示す鉄筋において付着応力度の計測を行った．梁幅 b は 350mm，梁せい D は 500mm，クリアスパン L は 3000mm で，梁の側面からコンクリートを打設している．実験変数は，2 段目主筋の本数とカットオフの長さ L_c ，せん断補強筋量 p_w である．付着割裂破壊よりも定着破壊を先行さ

せるために 2 段目カットオフ筋長さは， $(L_0/4 + 15d)$ より意図的に短くした．また，梁中央部のせん断補強筋量を多くして同位置でのせん断破壊を防止している．荷重方法は逆対称正負交番荷重で，せん断スパン比は 1.5 である．詳細は文献³⁾を参照されたい．

2.2 荷重-部材角関係

図-2 に荷重-部材角関係を示す．同図中の○は最大耐力，□は最大付着応力度に到達した点である，一点鎖線は平面保持を仮定した断面解析により算出した曲げ終局時せん断力 Q_{mu1} ，破線は靱性指針に基づくせん断耐力 V_{su} および付着割裂破壊時せん断力 V_{bu} のうち，小さい方の値を示す．

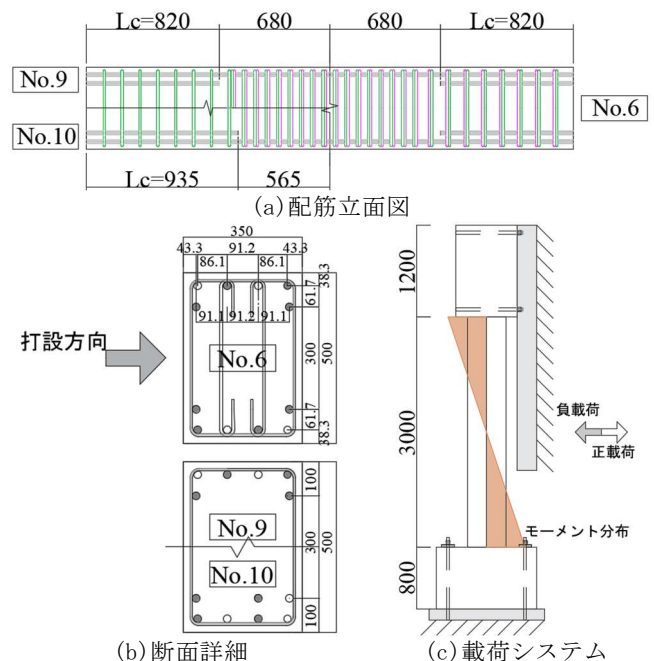


図-1 2 段目カットオフ筋を有する梁実験³⁾ (単位 mm)

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 大学院生 (学生会員)

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 教授 Ph.D. (正会員)

*3 高周波熱錬株式会社 開発技術課

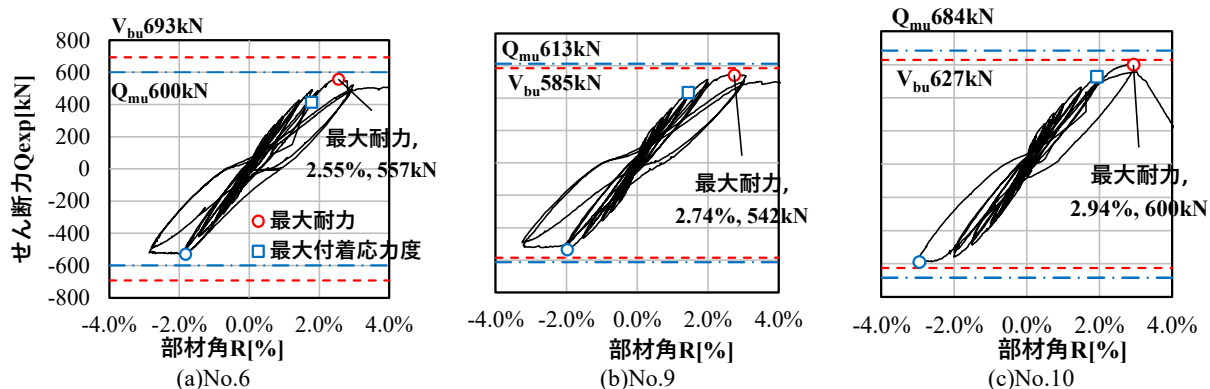


図-2 荷重-部材角関係

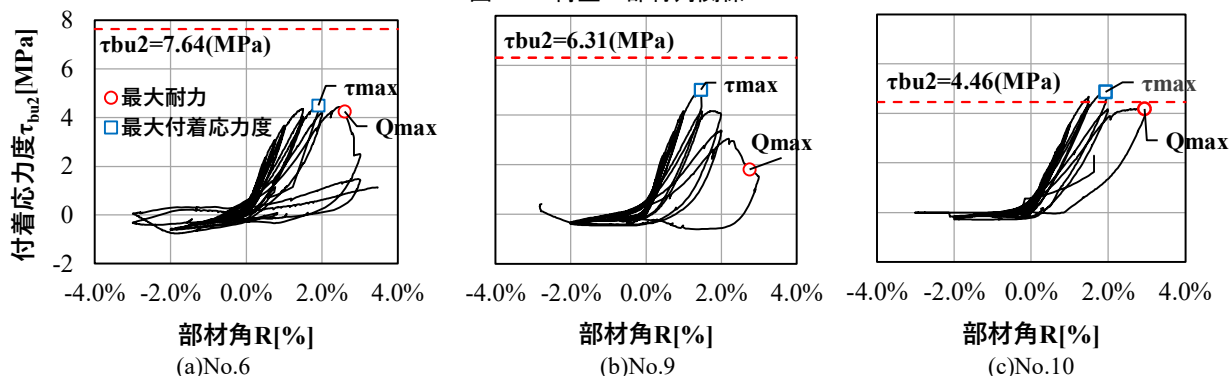


図-3 付着応力度-部材角関係

全ての試験体で曲げせん断実験における実験最大耐力が靱性指針式から得られる予想耐力を下回った。これは、最大耐力前に 2 段目カットオフ筋が付着劣化を起こし、曲げ耐力が低下したためと考えられる。すなわち、No.9, No.10 は、付着割裂破壊と予想されたが、2 段目カットオフ筋の抜け出しにより予測耐力に達しなかった。また、No.6 は 2 段目主筋の降伏後の曲げ破壊が予想されたが、実験では 2 段目カットオフ筋が降伏せずに最大耐力に達しており、付着劣化が先行したと考えられる。

2.3 2 段目主筋の最大付着応力度

2 段目カットオフ筋の最大付着応力度の実験値 τ_{max} 、最大耐力時の付着応力度の実験値 τ_{exp} および、靱性指針式に基づいた付着強度の計算値 τ_{bu2} を表-1 に示す。付着強度の計算値は中宇根ら³⁾の計算結果を用いた。付着応力度の実験値 τ_{max} 、 τ_{exp} は、式 (1) で区間長さ L を端部より有効せい d 離れた位置に最も近いひずみゲージからカットオフ先端までの距離として、両端の引張側 4 本より求めた平均値。なお、 d_b は主筋の呼び径、 $\Delta\epsilon$ は区間の歪差である。図-3 に No.6, No.9, No.10 の平均付着応力度-部材角関係を示す。図中の□は最大平均付着応力度 τ_{max} 時、○は最大耐力 Q_{max} 時の付着

$$\tau_{exp} = \frac{d_b \cdot E \Delta\epsilon}{4L} \quad (1)$$

表-1 2 段目カットオフ筋の付着応力度の検討

試験体	実験値			計算値	τ_{max}/τ_{bu2}
	τ_{max} 時		Q_{max} 時		
	τ_{max}	部材角	τ_{exp}	τ_{bu2}	
	MPa	R[%]	MPa	MPa	
No.6	4.50	1.90	4.25	7.64	0.58
No.9	5.02	1.45	2.56	6.31	0.80
No.10	4.87	1.93	1.81	4.19	1.16

応力度を示し、破線は表-1 に示す靱性指針に基づいた付着強度の計算値 τ_{bu2} を示す。

表-1 および図-3 より No.10 は、付着強度の実験値が計算値 τ_{bu2} を上回ったが、No.6, No.10 では下回った。これは、 b_{si2} が大きいと 2 段目カットオフ筋が付着割裂破壊を生じる前に抜け出すためと考えられる。また、全ての試験体で Q_{max} 前に付着強度が最大値に達しており Q_{max} 時の平均付着応力は、 τ_{max} 時に比べて No.6 では 0.94 倍、No.9 で 0.51 倍、No.10 で 0.86 倍となり No.9 では、最大付着応力後に大きな付着劣化が生じ、No.6, No.10 では比較的緩やかに付着劣化が生じた。これは No.9 では b_{si2} が大きく No.6 に比べてせん断補強筋が少ないためと考えられる。いずれの試験体でも Q_{max} 時には付着強度計算値 τ_{bu2} を下回っており付着・抜け出し強度の検討が必要と考えられる。

2.4 破壊状況

図-4 に各試験体の付着劣化が生じた時点でのひび割れ状況の写真を示す。全ての試験体で、付着劣化を生じた時点から最大耐力時まで付着割裂ひび割れを生じることはなかった。これは、2 段目カットオフ筋が付着割裂ひび割れ発生前に抜け出したためと考えられる。全ての試験体において梁端部のせん断ひび割れ発生後、せん断ひび割れの拡幅および梁端部に若干の圧壊が生じて最大耐力を迎え、複合的な破壊となった。

2.5 定着破壊

付着割裂ひび割れを生じることなく 2 段目カットオフ筋が抜け出す場合、または 2 段目カットオフ筋に沿って付着割裂ひび割れが生じる場合を定着破壊とする。現行の靱性指針における耐力評価では、2 段目主筋が通し筋であれば、付着破壊時の最大せん断力を求めることができる。しかし、2 段目カットオフ筋の定着破壊に基づく耐力は定められておらず、耐力や破壊モードが実験結果と一致しない場合がある。2 段目カットオフ筋の定着破壊に対応する耐力を設計時に検討する必要がある。

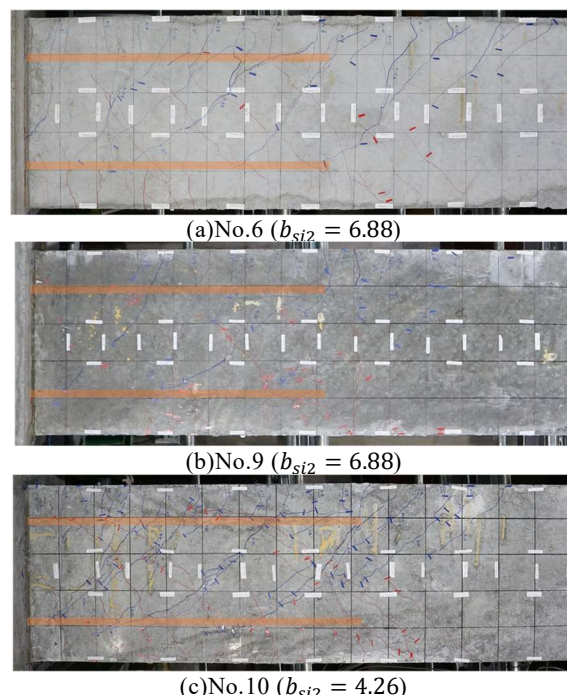


図-4 付着劣化が生じた時のひび割れ状況
(R=1.5%時の梁固定端側)

表-2 各試験体材料特性、曲げ強度および式(2)～(4)によるせん断・付着・定着耐力の計算結果と実験結果^{3, 5～11)}

文献	試験体	b	D	L	Lc	b _{si2}	σ _B	σ _y	σ _{wy}	p _w	Q _{mu1}	Q _{mu2}	V _{su}	V _{bu}	V _{anc1}	V _{anc2}	Q _{exp}	破壊モード
		mm	mm	mm	mm	-	MPa	MPa	MPa	%	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	Cal. Exp.
3	No.1	350	500	3000	730	6.88	24.0	1023	1402	0.21	520	458	418	417	250	99	451	B A ^{※2}
	No.2	350	500	3000	820	4.26	23.1	1076	1402	0.21	547	490	404	410	248	116	501	S A ^{※2}
	No.3	350	500	3000	800	6.88	23.1	1076	1402	0.42	519	484	633	547	283	127	517	B A ^{※2}
	No.4	350	500	3000	930	4.26	24.9	1023	1402	0.65	554	504	781	703	417	222	619	B A ^{※2}
	No.5	350	500	3000	870	4.26	42.0	1023	1402	0.21	655	503	709	559	344	172	558	B A ^{※2}
	No.6	350	500	3000	820	6.88	40.0	1023	1402	0.42	600	493	970	691	409	189	557	F A ^{※2}
	No.7	350	500	3000	880	5.89	39.8	1016	1402	0.51	728	631	1035	746	513	256	660	B A ^{※2}
	No.8	350	500	2550	870	4.26	37.7	1023	1402	0.65	752	620	1087	818	602	301	799	B A ^{※2}
	No.9	350	500	3000	820	6.88	45.7	1023	1402	0.21	613	498	765	583	421	195	542	B A ^{※2}
	No.10	350	500	3000	930	4.26	52.2	1023	1402	0.21	684	523	863	625	410	218	600	B A ^{※2}
	No.11	350	500	2550	785	6.88	48.7	1023	1402	0.42	724	589	1101	761	534	234	659	F A ^{※2}
	No.12	350	500	2550	845	4.26	51.3	1023	1402	0.65	802	637	1324	917	666	322	802	F A ^{※2}
5	C-0.3-M	350	500	2550	1070	2.94	38.3	1011	1456	0.29	760	616	792	577	448	268	472	B B
6	C-0.6-M	350	500	2550	1070	2.44	44.7	983	1391	0.61	942	789	975	759	657	393	798	B B
7	S0.3+US0.29-S	350	500	2550	1070	2.94	38.5	974	1454	0.57	806	644	1036	772	603	360	785	B F
8	SH4C	180	300	1400	560	2.54	28.1	806	1392	1.11	221	179	238	238	188	104	223	B F
	LH4C	180	300	1800	650	2.54	28.1	806	1392	1.11	172	147	238	238	170	104	164	F F
	LH2C	180	300	1800	540	6.09	28.1	806	1392	0.56	148	125	202	180	122	64	142	F F
	LN4C	180	300	1800	650	2.54	28.1	356	1392	1.11	90	90	238	238	94	94	102	F F
	LN2C	180	300	1800	540	6.09	28.1	356	1392	0.56	72	70	202	180	73	64	84	F F
9	2S-0.3	180	300	1800	650	2.54	22.9	787	421	0.29	157	127	115	127	94	58	108	S S
	2S-0.6	180	300	1800	650	2.54	22.9	787	421	0.59	157	135	158	174	133	82	160	S B
	2L-0.3	180	300	1800	880	2.54	22.9	787	421	0.29	157	138	115	127	128	92	121	S B
	2L-0.6	180	300	1800	880	2.54	22.9	787	421	0.59	157	151	158	174	180	129	170	S S
10	UF2	350	400	2000	950	4.26	45.9	424	1414	0.23	341	325	538	430	352	297	299	F A ^{※2}
	UF4	350	400	2000	950	4.26	48.5	424	1414	0.46	343	343	717	529	352	352	346	F F
11	F2C-0.3	250	400	1600	715	3.92	20.1	357	869	0.29	144	129	206	225	145	109	142	F F
	F2C-0.6	250	400	1600	715	3.92	20.1	357	869	0.57	144	142	289	307	145	140	145	F F
	F2C-1.2	250	400	1600	715	3.92	20.1	357	869	1.14	144	144	337	337	145	145	149	F F
	F2C-0.3P	250	400	1600	715	3.92	20.1	357	869	0.29	144	129	206	225	145	109	145	F F
	3C-0.3	250	400	1600	700	2.14	38.2	801	869	0.29	569	382	337	303	265	136	385	B S
	3CS-0.3	250	400	1600	500	2.14	38.2	801	869	0.29	569	353	337	303	189	60	315	B S
	3CS-1.2	250	400	1600	500	2.14	38.2	801	869	1.14	569	367	544	544	304	97	571	B FB

※1：破壊モードの計算予想は定着耐力を考慮していない。 ※2：筆者らの判断により定めた破壊モード。

Q_{mu1}：断面解析による曲げ耐力、Q_{mu2}：付着割裂を考慮した断面解析による曲げ耐力、V_{su}：靱性指針に基づくせん断耐力、V_{bu}：靱性指針に基づく付着耐力 (α₂ = 0.6)。V_{anc1}：定着耐力、V_{anc2}：テンションシフト後の定着耐力

3. データベースを用いた検討

ここでは、2 段目カットオフ筋を有する逆対称載荷型の RC 梁試験体 33 体を用いて、カットオフ筋の定着破壊条件の妥当性を検証する。文献の収集にはコンクリート強度が 60MPa 以下の試験体に限り、過去 10 年間に報告された AIJ 学術講演梗概集、AIJ 構造系論文集および JCI 工学年次論文集を参照した。各々の材料特性の範囲としては、コンクリート強度が 20.1～52.2MPa、主筋の降伏強度は 356～1076MPa、せん断補強筋の降伏強度は 421～1456MPa となっている。表-2 に本稿で取り上げる試験体ごとの材料特性、実験最大耐力 Q_{exp} (実験で観測された最大せん断力)、平面保持を仮定した断面解析から求まる曲げ終局時せん断力 Q_{mu1} 、 Q_{mu2} 、式(2)～(4)より求まるせん断耐力 V_{su} 、付着耐力 V_{bu} 、定着耐力 V_{anc} を示す。表-3 に次節以降で検討する 4Case の予測耐力 $Q_{u1} \sim Q_{u4}$ を示す。なお、断面解析においてコンクリートの応力歪関係は Popovics モデル (圧縮強度時歪 0.2%)、鉄筋の応力歪関係は完全弾塑性モデルとした。各種耐力式(2)～(4)に関しては 3.1 節に詳述する。

3.1 定着耐力式

以下に本稿で用いる各種耐力式を示す。式(2)は靱性指針記載のトラス・アーチ機構に基づくせん断耐力、式(3)は同指針の付着割裂破壊時せん断力を示す。式(4)は本稿で提案する“主筋の抜け出し”および“付着割裂ひび割れ”による 2 段目カットオフ筋の付着劣化発生時のせん断力 (以下、定着耐力) を示す。式の詳細について以下に記載する。式(5)は RC 規準の短期許容付着応力度にせん断補強筋の拘束効果を加えた評価式であり、カットオフ筋の抜け出し時における付着強度である。式(6)は靱性指針による 2 段目主筋の付着強度式であり、 α_2 を篠原らの実験結果⁵⁾に基づき 0.85 としたものである。主筋軸方向の力の釣合いから、付着強度時の梁危険断面における 2 段目カットオフ主筋応力度 σ_s を得る。式(7)は主筋のテンションシフト前の場合であり、式(8)はテンションシフト後の場合で、二段目主筋の定着長さから有効せい d を差引いたものである。ただし、式(7)、式(8)において、 σ_s は降伏応力度 σ_y を上限とする。なお、式(4)は梁危険断面における全ての引張主筋の平均応力度を式(7)、式(8)より求まる 2 段目カットオフ主筋応力度 σ_s の 1.05 倍と仮定して曲げ耐力 M を求め、それをせん断力に変換したものである。

3.2 靱性指針式による検討 (Case1)

Case1 による検証結果を図-5(a)に示す、縦軸は曲げ終局時せん断耐力 Q_{mu1} に対する実験最大耐力 Q_{exp} の

比、横軸は曲げ終局時せん断耐力 Q_{mu1} に対する $\min\{V_{su}, V_{bu}\}$ の比である。黒実線は $Q_{u1} \sim Q_{u4}$ を表しており、線より上側のプロットは、安全側の評価を表している。凡例は引用論文で報告された各試験体の破壊モードを示しており、S：降伏前のせん断破壊、B：降伏前の付着破壊、F：曲げ降伏後の曲げ破壊、FS：曲げ降伏後のせん断破壊、FB：曲げ降伏後の付着破壊、A：定着破壊を示す。

・靱性指針に基づくせん断耐力

$$V_{su} = \min \left\{ \begin{aligned} &\mu p_{we} \sigma_{wy} b_e j_e + \left(v \sigma_B - \frac{5 p_{we} \sigma_{wy}}{\lambda} \right) \frac{bD}{2} \tan \theta \\ &\frac{\lambda v \sigma_B + p_{we} \sigma_{wy}}{3} b_e j_e \\ &\frac{\lambda v \sigma_B}{2} b_e j_e \end{aligned} \right. \quad (2)$$

・靱性指針に基づく付着割裂破壊時せん断力

$$V_{bu} = \min \left\{ \begin{aligned} &\frac{\lambda v \sigma_B}{2} b_e j_e \\ &T_x j_e + \left\{ v \sigma_B - \frac{2.5 T_x}{\lambda b_e} \right\} \frac{bD}{2} \tan \theta \end{aligned} \right. \quad (3)$$

・2 段目カットオフ筋の定着破壊時せん断力(定着耐力)

$$V_{anc} = \frac{M}{\frac{L}{2}} = \frac{0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_s \cdot d}{\frac{L}{2}} \cdot 1.05 \quad (4)$$

$$\tau_{min} = \min \left\{ \begin{aligned} &1.5 \cdot \beta_t \cdot \{1.35 + \sigma_B \cdot (2.5 \cdot p_w + 0.04)\} \\ &\alpha_2 \cdot \beta_t \cdot \{(0.085 \cdot b_{i2} + 0.1) \cdot \sqrt{\sigma_B} + k_{st2}\} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\sigma_s = \begin{cases} \frac{L_c \cdot \tau_{min} \cdot \phi}{A_t} \leq \sigma_y & : \text{before tension shift} \\ \frac{(L_c - d) \cdot \tau_{min} \cdot \phi}{A_t} \leq \sigma_y & : \text{after tension shift} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 L ：クリアスパン長さ、 b ：断面の梁幅、 D ：断面の梁せ、 b_e ：トラス機構に関する有効幅、 j_e ：トラス機構に関する有効せい、 σ_{wy} ：横補強筋の信頼強、 p_{we} ：有効横補強筋比、 μ ：トラス機構の角度を表す係数 (=2-20 R_p)、 R_p ：終局限界状態でのヒンジ領域の回転角 (=0)、 v ：コンクリートの圧縮強度の有効係数、 λ ：トラス機構の有効係数、 θ ：アーチ機構の圧縮束の角度、 σ_B ：コンクリート圧縮強度、 T_x ：部材単位長さあたりに負担できる付着力、 p_w ：横補強筋比、 α_2 ：2 段目主筋に対する強度低減係数、 β_t ：上端筋に対する付着強度低減係数、 b_{i2} ：二段目主筋の割裂線長さ比、 k_{st2} ：2 段目主筋の横補強筋効果、 L_c ：2 段目カットオフ主筋の定着長さ、 ϕ ：主筋径、 A_t ：主筋一本の断面積、 a_t ：引張鉄筋の断面積、 σ_s ：主筋の応力度、 d ：はりの有効せい。

表-3 各 Case の詳細まとめ

Case1
$Q_{u1} = \min\{Q_{mu1}, V_{su}, V_{bu}\}$ ただし、 Q_{mu1} は主筋が 2 段とも通し筋と考慮して通常の断面解析より求めた。Case4 のように、式(8)で 2 段目カットオフ筋軸応力を決めない。
Case2
$Q_{u2} = \min\{Q_{u1}, V_{anc} \text{ with Eq.7}\}$
Case3
$Q_{u3} = \min\{Q_{u1}, V_{anc} \text{ with Eq.8}\}$
Case4
$Q_{u4} = \min\{Q_{mu2}, V_{su}, V_{bu}\}$ ただし、 Q_{mu} は断面解析において、2 段目カットオフ筋の軸応力上限を式(8)で考慮し、鉄筋の応力精算値を求める。

図-5(a)から Case1 ではせん断・付着・曲げの破壊モードをおおよそ区別できていることが分かる。

Case1 では Q_{exp}/Q_{u1} の平均値 1.02, 標準偏差 0.09 となったが, 13 体で実験最大耐力 Q_{exp} が予測耐力 Q_{u1} を下回った。13 体のうち 8 体の試験体で 2 段目カットオフ筋の付着劣化が確認された。残りの 5 体のうち C-0.3-M と 2S-0.3 ではカットオフ筋が存在しない梁中央区間において斜めひび割れや一段目通し筋に沿った付着割裂ひび割れの拡幅が確認された。その他の 3 試験体は Q_{exp}/Q_{u1} が 1 を下回るものの, おおよそ曲げ耐力 Q_{mu1} に達しており, 曲げ破壊が確認された。以上のように, 靱性指針式では 2 段目カットオフ筋の抜け出しや, 2 段筋がカットオフされた梁中央区間におけるせん断および同位置での 1 段筋の付着の低下が生じる試験体には, 危険側の判定となる場合がある。

3.3 定着耐力を考慮した検討 (Case2, Case3)

Case2, Case3 による検証結果を図-5(b), (c)に示す。図中の横軸は曲げ終局時せん断力 Q_{mu1} に対する $\min\{V_{su}, V_{bu}, V_{anc}\}$ の比であり, V_{anc} が含まれる点で Case1 と異なる。Case2 ではテンションシフト前, Case3 ではテンションシフト後を想定しており, 有効せい d だけ二段目カットオフ主筋の有効付着長さが異なり, Case3ではCase2より定着耐力が小さくなる。

Case2 では Q_{exp}/Q_{u2} の平均値 1.29, 標準偏差 0.29 となり, 3 体の試験体 (LH4C, UF2, F2C-0.3) で実験最大耐力 Q_{exp} が予測耐力 Q_{u2} を下回った。 Q_{exp}/Q_{u2} は LH4C : 0.97, F2C-0.3 : 0.98, UF2 : 0.85 となり, UF2 で特に小さくなった。これは, LH4C, F2C-0.3 に比べ, UF2 では二段目カットオフ主筋端部でのテンションシフトが顕著であり, テンションシフトを考慮していない Case2 では計算値 Q_{u2} が実験耐力 Q_{exp} に比べ大きくなってしまったのが原因である。

Case3 では Q_{exp}/Q_{u3} の平均値 2.41, 標準偏差 1.23 となったが, 全ての試験体で実験耐力 Q_{exp} が計算値 Q_{u3} を上回った。つまり, テンションシフト後の定着耐力を考慮すれば, 試験体耐力を安全側に評価できた。しかし, 定着破壊や降伏後の付着破壊型試験体では余裕度が過度に大きくなる傾向が確認された。

3.4 付着劣化を考慮した断面解析による検討 (Case4)

Case4 による検証結果を図-5(d)に示す。図-5(d)中に示す Q_{mu2} は断面解析において, 2 段目カットオフ筋の軸応力上限を式(8)で考慮し, 鉄筋の応力精算値を求めたもので, 図-5(a)～(c)中に示す全鉄筋が通し筋である場合の断面解析より求めた Q_{mu1} とは異なる。図-5(d)から Case4 では定着耐力式 V_{anc} を用いた Case2 や Case3 に比べて, 破壊モードをおおよそ判別でき, かつ安全側の評価となることが分かる。

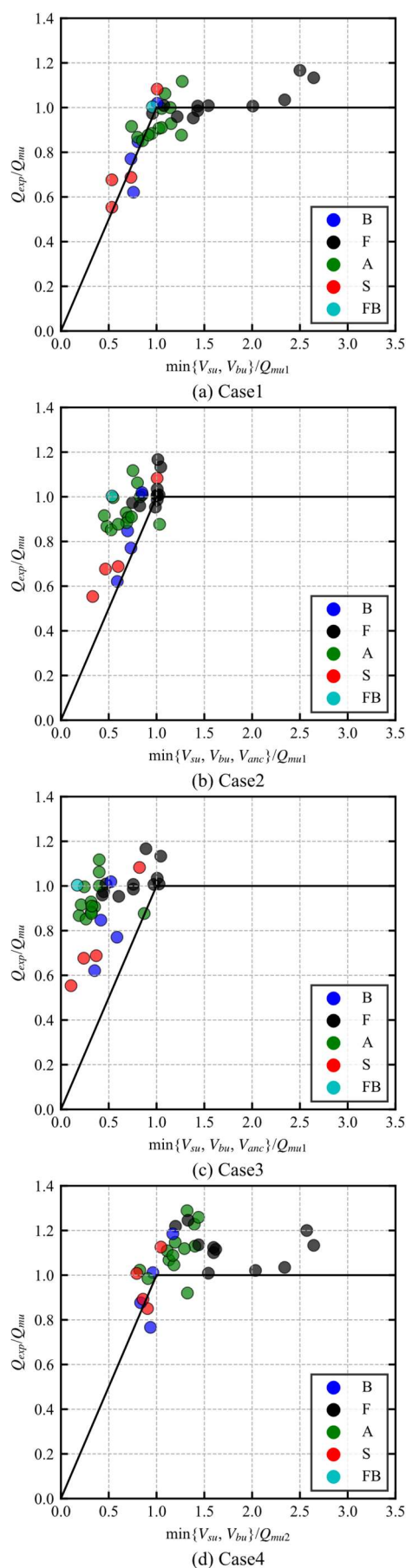


図-5 計算値と実験値との比較

Case4 では Q_{exp}/Q_{u4} の平均値 1.12, 標準偏差 0.13 となり, 3 体の試験体 (C-0.3-M, 2S-0.3, UF2) で実験最大耐力 Q_{exp} が予測耐力 Q_{u4} を下回った. 理由は Case1 と同様である. UF2 に関しては付着劣化を生じた原因が不明であり, 今後の検討課題とする.

2 段目カットオフ筋の付着劣化を考慮した断面解析を用いた評価手法では平均値, ばらつきともに小さく, 破壊モードも比較的良く再現できた.

4. まとめ

2 段目主筋がカットオフされた既往の試験体を用いて, カットオフ筋の付着劣化を考慮した耐力評価手法を提案し, その妥当性を検証した. 本研究で得られた知見を以下に示す.

- (1) 2 段目カットオフ主筋が抜け出すことによって, 梁本来の曲げ性能やせん断性能が発揮されない定着破壊の条件を明らかにした.
- (2) 靱性指針式の V_{su} , V_{bu} および付着劣化を考慮しない曲げ耐力 Q_{mu1} から試験体耐力を定める場合 (Case1), 13 体の試験体で実験最大耐力が予測耐力を下回った.
- (3) Case1 に加えて本稿で提案する定着耐力を考慮すると (Case2, Case3), Case1 において危険側の判定となった試験体を安全側に評価できた. しかし, 定着破壊や降伏後の付着破壊型試験体では余裕度が過度に大きくなる傾向が確認された.
- (4) 定着破壊を考慮した曲げ耐力を用いる場合 (Case4), 実験最大耐力/予測耐力の平均値 1.12, 標準偏差 0.13 となり, 3 体の試験体で実験値が計算値を下回った. また, Case2 や Case3 に比べて, 平均値, ばらつきともに小さく, 破壊モードも比較的良く再現できた.

2 段目カットオフ筋の抜け出しおよび付着割裂を考慮した定着耐力 V_{anc} や曲げ終局時せん断力を破壊モードの判定に含めることで, 全鉄筋を通し筋と仮定して靱性指針式を適用した場合の V_{su} , V_{bu} および曲げ耐力 Q_{mu1} だけでは実験耐力が危険側の評価となる試験体を安全側に評価できた. しかし, 2 段筋がカットオフされた梁中央区間におけるせん断および同位置での 1 段筋の付着で破壊する場合については, 今後の検討課題としたい.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 村田義行氏 (構造物 LT 開発) および高周波熱錬, 小原拓氏 (国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部) に貴重な助言をいただきました. 厚くお礼申し上げます.

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説, 2018
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物構造計算規準・同解説, 2018
- 3) 中宇根雄太 他: RC 梁部材における 2 段目カットオフ筋の抜け出し破壊, AIJ 学術講演梗概集, pp.95~98, 2018
- 4) 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
- 5) 田丸修也 他: カットオフ 2 段目主筋を有する RC 梁部材の付着割裂補強方法, AIJ 学術講演梗概集, pp.433~436, 2013
- 6) 覚張雄一郎 他: カットオフ筋を有する RC 梁部材の閉鎖型補強筋による付着割裂補強効果, AIJ 学術講演梗概集, pp.11~14, 2014
- 7) 大村哲矢 他: カットオフ筋を有する 2 段目主筋の付着割裂性状に及ぼす横補強筋強度の影響, AIJ 学術講演梗概集, pp.25~28, 2015
- 8) 伊藤彩夏 他: 2 段目主筋をカットオフした RC 梁主筋の付着割裂強度, AIJ 構造系論文集, 第 78 巻, 第 690 号, 27 pp.1477~1484, 2013
- 9) 宇野芳奈美 他: 2 段目主筋をカットオフした RC 梁のせん断耐力と付着応力度, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.475~480, 2015
- 10) 川野姫佳 他: 高強度せん断補強筋を用いた RC 梁の付着挙動, AIJ 学術講演梗概集, pp.49~50, 2021 年 9 月
- 11) 大信田竜翔 他: 高強度せん断補強筋を用いた RC 梁の構造性能に及ぼすせん断補強筋量およびカットオフ長さの影響, AIJ 学術講演梗概集, pp.175~180, 2020
- 12) 高周波熱錬 (株): ウルボン 1275 を用いた梁の 2 段目主筋のカットオフ必要付着長さの算定式, 評定 CBL RC003-16 号, 2018