

論文

[2025] 折り曲げ定着性能に及ぼす鉄筋配置の影響に関する実験

正会員 ○ 川上 修司 (川上建築事務所)
 正会員 藤井 栄 (京都大学建築学科)
 正会員 窪田 敏行 (近畿大学建築学科)
 正会員 森田 司郎 (京都大学建築学科)

1. はじめに

90° 折り曲げ定着は、折り曲げ部の支圧抵抗にその性能が支配される定着方式であり、これまでの研究で支配因子について徐々に明らかになってきている。しかしながら、定着される部材の応力状態や折り曲げ方向の影響、投影定着長さ (l_{db} : 図-1 参照) の効果の上限、部材内での相対的な折り曲げ位置の影響、複数定着筋の場合の影響等については十分な資料がないのが現状である。本研究はこれらの影響について実験的に調査したものである。

2. 実験計画及び実験方法

本実験は A、B の 2 シリーズの実験からなる。各シリーズの供試体形状及び载荷条件を図-1 に示す。いずれも鉄筋コンクリート柱体に埋め込まれた 2 本もしくは 1 本の 90° 折り曲げ定着筋を引き抜く実験である。圧縮反力は試験鉄筋の左右に所定の距離 (a 、 b) 離れた位置に与えた。2 本の定着筋には同時に引張力を作用させ、载荷初期段階で均等な大きさになるように調整した。柱には軸圧縮力は加えない。

A シリーズは、主として折り曲げ定着部と圧縮反力位置との幾何学的関係の影響を調べる実験である。供試体総数は 10 体であり、実験変数は試験鉄筋径 ($d_b = 19$ 、 25 mm)、投影定着長さ ($l_{db} = 228$ 、 456 mm)、柱せい ($D = 300$ 、 600 mm)、圧縮反力位置

までの距離 (a 、 $b = 300 \sim 1200$ mm) である。試験鉄筋に対するクリアなかぶり厚さ C は 50 mm 共通である。表-1 に A シリーズの供試体特性一覧を示す。

B シリーズは、主として側面かぶり厚さ、鉄筋間隔の影響を調べる実験である。供試体総数は 10 体であり、実験変数は鉄筋心までの側面かぶり厚さ ($C_o = 60 \sim 300$ mm)、鉄筋間隔 ($S_o = 50$ mm \sim 480 mm) である。2 種類の柱幅 ($B = 300$ 、 600 mm) の供試体とすることで種々の C_o 、 S_o の組み合わせを設定した。試験鉄筋から反力位置までの距離は $a = b = 300$ mm、試験鉄筋径 19 mm、投影定着長さ $12d_b$ は共通である。表-2 に B シリーズの供試体特性一覧を示す。

両シリーズとも試験鉄筋には高強度のねじふし異形鉄筋を使用し、曲げ内法半径は鉄筋径の 3 倍、

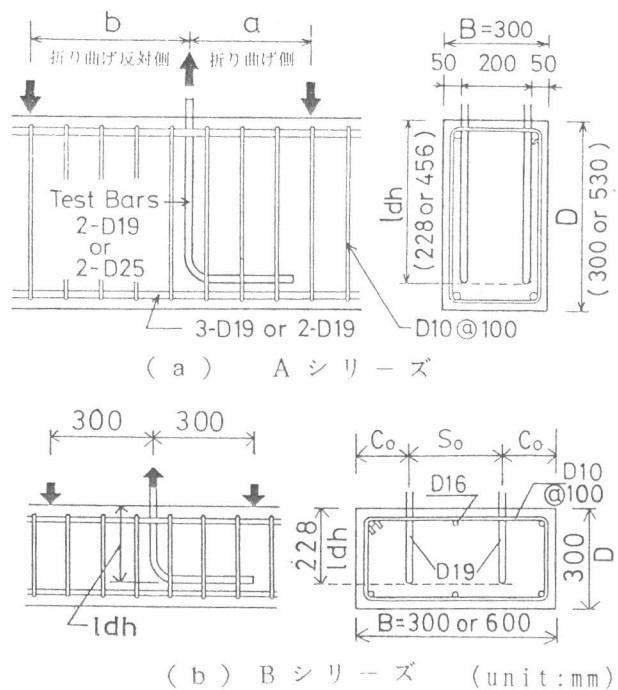


図-1 供試体形状と载荷条件

余長は12倍とした。また、柱は定着破壊に先行して曲げ降伏しないだけの配筋を施してあり、横補強筋にはD10外周フープ（但しAシリーズではSD70相当、BシリーズではSD35相当を使用）を10cm間隔で各シリーズ共通に配してある。使用鉄筋の材料特性を表-3に示す。コンクリートは試験鉄筋が垂直上向きとなる方向で打設した。

試験時材令でのコンクリート強度は、Aシリーズでは圧縮強度 $f_c = 500 \text{ kgf/cm}^2$ 、割裂引張強度 $f_t = 41.9 \text{ kgf/cm}^2$ 、Bシリーズでは $f_c = 287 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $f_t = 25.7 \text{ kgf/cm}^2$ である。

計測項目は、試験鉄筋の載荷端引張力、載荷端滑り量のほか、Aシリーズでは折り曲げ起点での鉄筋歪及び滑り量、試験鉄筋の近傍に配筋されたせん断補強筋の歪を計測した。なお、滑りは鉄筋表面に取り付けた $\phi 1 \text{ mm}$ ピアノ線をコンクリートと絶縁して柱型背面に取り出して計測したものであり、柱型背面コンクリートに対する相対滑り量として計測した。

3. 実験結果の検討

3.1 実験結果概要

表-4にAシリーズの実験結果一覧、表-5にBシリーズの実験結果一覧を示す。Aシリーズ供試体A-7を除いて全て試験鉄筋の降伏以前に定着破壊した。Aシリーズの全供試体及びBシリーズで側面かぶり厚さが10cm程度までの供試体では、終局時に試験鉄筋折り曲げ部近傍に多くの放射状ひび割れが入り、側面が膨らんでかぶりコンクリートを割り裂き、破壊に至っている。また、Bシリーズの側面かぶり厚さの大きい供試体では側面に入るひび割れは少なく、試験鉄筋が突出している前面のコンクリートを割り裂き、持ち上げるような状態で破壊している。

3.2 Aシリーズの実験結果の検討

(1) 投影定着長さ と 圧縮反力位置の関係

表-1 Aシリーズ供試体の特性一覧

試験体名称	試験鉄筋 d_b	投影長さ l_{ab} (mm)	部材せい D (mm)	鉄筋と圧縮反力位置までの距離*	
				折り曲げ方向 a (mm)	反対側方向 b (mm)
A-1	2-D19	228	300	300	300
A-2	2-D25				
A-3	2-D19				
A-4	2-D19				
A-5	2-D19				
A-6	2-D19	456	530	600	600
A-7	2-D19				
A-8	2-D19	228	530	300	300
A-9	2-D25	456			
A-10	2-D25	228			

Note:側面かぶり厚さ=5cm 横補強筋 2-D10@100 共通
*:図-1参照

表-2 Bシリーズ供試体の特性一覧

試験体名称	試験体幅 B (mm)	試験鉄筋 d_b	側面かぶり厚さ C_o (mm)	鉄筋間のあき S_o (mm)
B-L-2-5	600	2-D19	60	480
B-L-2-10			110	380
B-L-2-15			160	280
B-L-2-20			210	180
B-L-2-26.5			275	50
B-L-1-29		1-D19	300	-----
B-S-2-5	300	2-D19	60	180
B-S-2-10			110	80
B-S-2-11.5			125	50
B-S-1-14			1-D19	150

表-3 使用鉄筋の力学的性質一覧

	鉄筋	ヤング係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)	降伏強度 (kgf/cm^2)
Aシリーズ	D19 (試験鉄筋、柱筋)	1.94	8030
	D25 (試験鉄筋)	2.02	8120
	D10 (せん断補強筋)	2.04	7530
Bシリーズ	D19 (試験鉄筋、柱筋)	2.02	9820
	D16 (柱筋)	2.12	7370
	D10 (せん断補強筋)	1.94	3810

図-2に投影定着長さと折り曲げ方向側の圧縮反力位置までの距離aの異なる供試体A-1、A-6、A-7の荷重-載荷端滑り曲線を示す。この図より投影定着長さが大きいほど最大耐力、滑り剛性が大きくなるのがわかるが、その効果は圧縮反力位置によって異なる。圧縮反力位置までの距離aの等しい供試体間では、投影定着長さが $12d_b$ から $24d_b$ に増すことで、定着耐力は約1.6倍程度に増大するが、反力位置も同じ倍率で増加させた場合には15%程度しか増大しない。すなわち、定着耐力と投影定着長さの関係は、ACIコードに規定されるような正比例の関係にはなく、圧縮反力位置の影響を大きくうけることがわかる。

(2) 折り曲げ方向の影響

部材せい、投影定着長さが等しく、反力位置までの距離aのみ異なる供試体A-1、A-3、A-4、A-5の荷重-載荷端滑り曲線を図-3に示す。

最大耐力には顕著な差がみられないが、折り曲げた側の反力位置までの距離aが最も大きいA-4

表-4 Aシリーズ実験結果一覧表

試験体名称	合計最大耐力 (tonf)	平均最大応力度 (kgf/cm ²)	個々の鉄筋における最大耐力時			
			載荷端		折曲げ起点	
			最大荷重 (tonf)	滑り量 (mm)	最大荷重 (tonf)	滑り量 (mm)
A-1	32.84	5720	18.13 14.71	3.311 3.056	>16.74 (14.97)	2.818 2.720
A-2	40.28	3790	20.49 19.79	4.379 4.116	(21.90) 17.89	4.164 3.818
A-3	30.91	5390	14.64 16.27	3.108 4.985	(>15.10) 15.99	2.653 4.072
A-4	31.15	5430	14.91 16.24	>4.036 5.795	***** (16.68)	4.036 5.525
A-5	31.20	5440	15.79 15.41	1.710 2.333	16.01 (21.31)	1.330 1.898
A-6	37.68	6560	16.99 20.69	2.294 3.258	15.20 >13.29	1.104 1.838
A-7	44.00	7670	22.00 22.00	2.761 2.588	***** *****	1.222 1.092
A-8	28.20	4910	14.49 13.71	2.830 2.575	(20.36) *****	2.488 2.276
A-9	57.97	5720	28.53 29.44	2.881 2.335	22.77 >20.14	1.948 1.561
A-10	35.43	3490	18.20 17.23	6.295 5.111	(23.62) (17.74)	6.126 4.978

Note: *印・・・実験開始時から歪ゲージ不良のため計測不可能
 >・・・以後の計測値は不良
 ()・・・載荷端の荷重より大きい計測値

表-5 Bシリーズ実験結果一覧表

試験体名称	合計最大耐力 (tonf)	平均最大応力度 (kgf/cm ²)	個々の鉄筋における最大耐力時			
			西側鉄筋		東側鉄筋	
			最大耐力 (tonf)	滑り量 (mm)	最大耐力 (tonf)	滑り量 (mm)
B-L-2-5	26.11	4550	13.83	2.378	12.28	1.570
B-L-2-10	34.36	5990	17.02	7.182	17.34	5.812
B-L-2-15	35.55	6190	16.88	5.608	18.67	13.140
B-L-2-20	30.79	5360	16.53	16.336	14.26	4.386
B-L-2-26.5	29.86	5200	15.01	4.006	14.85	13.316
B-L-1-29	20.07	6990	20.07	2.318	-----	-----
B-S-2-5	23.15	4030	12.35	2.448	10.80	4.536
B-S-2-10	29.70	5170	14.40	9.338	15.30	4.758
B-S-2-11.5	28.38	4940	13.22	3.872	15.16	4.326
B-S-1-14	20.78	7240	20.78	9.010	-----	-----

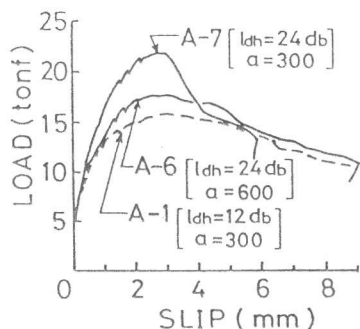


図-2 荷重-すべり曲線

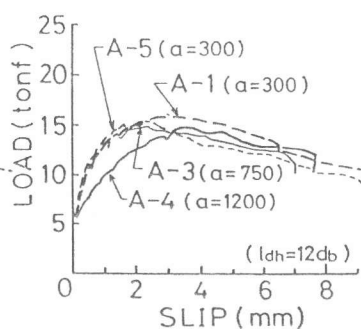


図-3 荷重-すべり曲線

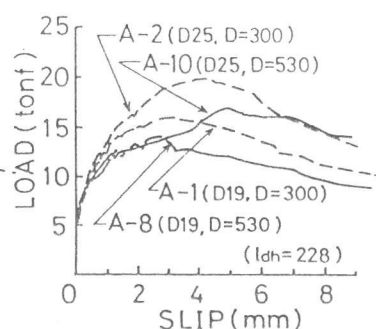


図-4 荷重-すべり曲線

(投影定着長さの影響) (圧縮反力位置の影響) (柱せいの影響)

($a=1200\text{mm}$)では、滑り剛性は大幅に低下しており、A-5 ($a=300\text{mm}$)の最大耐力時に相当する滑り量ではA-5の8割程度になっている。これは、既往の接合部に関する定着実験[1]で、梁下端筋の曲げ下げ定着の性能が良くないことと同じ性状である。折り曲げた側の反力位置が離れると折り曲げ反対側に生じたせん断ひび割れが余長部に沿って進展するため拘束程度の低下、滑り剛性の低下を引き起こすものと思われる。

(3) 柱せいと折り曲げ位置の関係

投影定着長さが等しく柱せい(D)のみ異なる供試体の組A-1とA-8、A-2とA-10の荷重-載荷端滑り曲線を図-4に示す。投影定着長さ、反力位置が等しい場合でも柱中央で折り曲げた供試体の方が約15%程度最大耐力が小さく、最大耐力時の滑り量も大きくなっている。柱せいの中央で折り曲げた供試体では、曲げひび割れが折り曲げ部を越えて大きく進展し、鉄筋表面の付着による応力伝達を損なうことや、折り曲げ部から余長部に沿うひび割れが生じることが原因と思われる。

(4) 定着耐力に及ぼす反力位置、投影定着長さの相関効果の評価

本実験で与えた影響因子が及ぼす影響について、強度の上昇率、低下率を評価する形式で以下に検討する。

投影定着長さ及び柱せいが等しく圧縮反力位置のみ異なる供試体の組に対して、折り曲げた側の反力位置までの距離 a を投影定着長さ l_{dh} で除した値 (a/l_{dh}) と定着耐力の関係を表したものが図-5である。耐力は、 a/l_{dh} が1.32となるA-1、A-6供試体の耐力 P_0 を基準とした場合の耐力比 (P_u/P_0) で示し、さらに既往の著者等が行った接合部に関する実験[2]についても書き加えてある。(接合部供試体では反力位置は曲げモーメントゼロの位置と読み変える。) 接合部内での折り曲げ定着のような条件となる a/l_{dh} が1.0程度以下の範囲では a/l_{dh} が小さいほど定着耐力が上昇する。投影定着長さ及び柱せいが等しい場合、反力位置の効果は次式で大略評価できる。

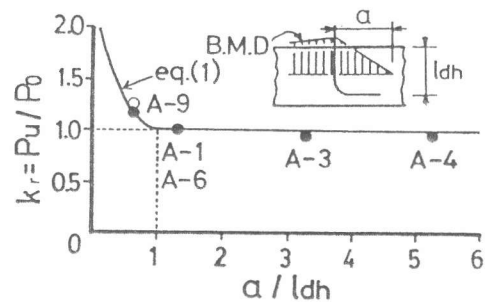


図-5 定着耐力に及ぼす圧縮反力位置の影響

$$k_r = P_u/P_0 = 1.2 \left\{ \left(\frac{a}{l_{dh}} - 1 \right)^2 + 1 \right\} \quad \left(\frac{a}{l_{dh}} < 1.0 \right)$$

$$= 1.0 \quad \left(\frac{a}{l_{dh}} \geq 1.0 \right) \quad (1)$$

次に、 a/l_{dh} が等しいという条件下での投影定着長さ l_{dh} と定着耐力の関係を図-6に示す。耐力は $l_{dh} = 12d_b$ の場合の耐力 P_{12} を基準とした耐力比 (P_u/P_{12}) で示す。 a/l_{dh} の異なる供試体については式(1)が l_{dh} の大きさにかかわらず独立に成立するとして、式(1)を用いて $a/l_{dh} = 1.32$ の場合の推定耐力に換算してある。また既往の投影定着長さを実験変数とした実験結果[1][2][3][4]も同様の処理を行って書き加えてある。この図より、 a/l_{dh} が等し

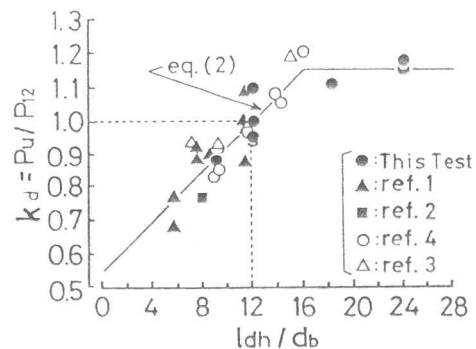


図-6 定着耐力に及ぼす投影定着長さの影響

い条件では投影定着長さの増大による定着耐力の増大は、 $l_{db} = 15 d_b$ 程度で頭打ちになることがわかる。 a / l_{db} が等しい場合、次式のごとく投影定着長さの影響を評価することが出来る。

$$k_d = P_u / P_{12} = 0.038 \cdot l_{db} / d_b + 0.544 \quad (\text{ただし } k_d \leq 1.15) \quad (2)$$

3.3 Bシリーズ実験結果の検討

図-7はBシリーズ各試験鉄筋の最大耐力 P_u と側面かぶり厚さの関係を示したものである。かぶり厚さの増加に伴って定着耐力は上昇するが、ある程度以上かぶり厚さが大きくなると、逆に鉄筋間のあきが小さくなる影響で定着耐力は低下していく。また、同じかぶり厚さでも鉄筋間のあきが小さい方（供試体幅の小さい方）が定着耐力が低い。広幅の供試体中央に1本定着された供試体B-L-1-29は本実験範囲でかぶり厚さ、鉄筋間のあきの十分な場合の定着耐力の上限を表していると思われ、この供試体の定着耐力を上限耐力 P_p として検討することにする。

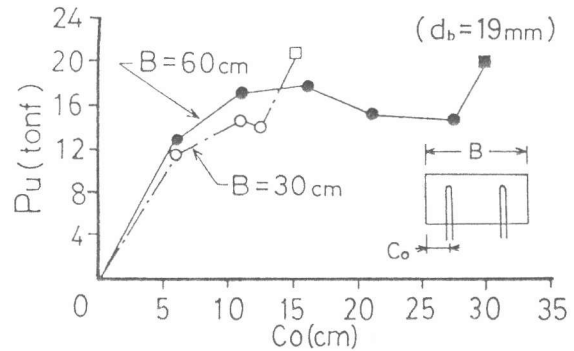


図-7 Bシリーズ実験の定着耐力と側面かぶり厚さの関係

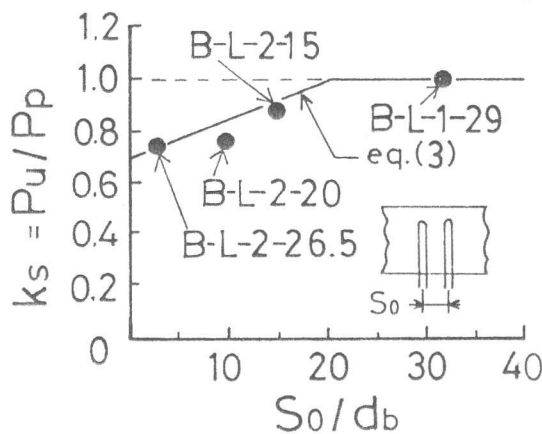


図-8 定着耐力に及ぼす鉄筋間隔の影響

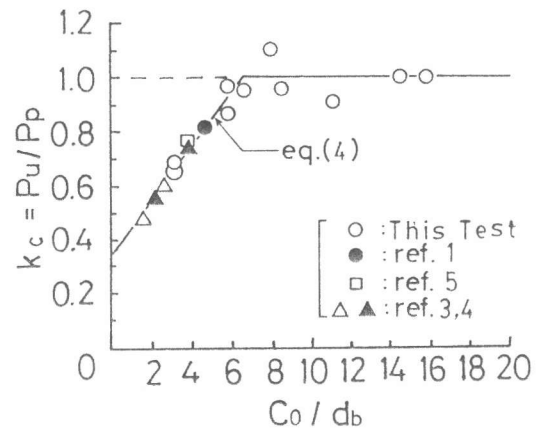


図-9 定着耐力に及ぼす側面かぶり厚さの影響

図-8は側面かぶり厚さが十分大きくその効果が頭打ちになっていると思われる供試体（B-L-2-26.5、B-L-2-20、B-L-2-15）の定着耐力 P_u の上限耐力 P_p に対する耐力比（ P_u / P_p ）と、心々鉄筋間隔（ S_o ）の関係を表したものである。鉄筋間隔の影響は大略、次式のごとく評価できる。

$$k_s = P_u / P_p = 0.7 + 0.015 \cdot S_o / d_b \quad (\text{ただし } k_s \leq 1) \quad (3)$$

図-9は鉄筋間隔が十分に大きい場合の耐力 P_u の上限耐力 P_p に対する比（ P_u / P_p ）と、 C_o / d_b （ C_o ：鉄筋心までのかぶり厚さ）の関係を表したものである。ただし、鉄筋間隔が十分に大

きい供試体は数が少ないので上記の式(3)の関係が、かぶり厚さと独立に成立すると仮定し、これを用いて本実験の他の供試体及び既往のかぶり厚さを実験変数とした実験資料[1], [2], [3], [4], [5]を換算して書き加えてある。この図より定着耐力増大に寄与する上限かぶり厚さは $6.5 d_b$ (= 12cm) 程度であることがわかる。かぶり厚さの影響は、次式のごとく評価できる。

$$k_c = P_u / P_F = 0.35 + 0.1 \cdot (C_o / d_b) \quad (\text{ただし } k_c \leq 1) \quad (4)$$

(3)、(4)式で与えられる耐力比 k_{se} 、 k_c を乗ずることで、Bシリーズ供試体の相対的な耐力関係が評価できる。この方法でBシリーズ供試体のB-L-1-29の耐力をもとに他の9体の耐力を推定したところ、実験値の推定値に対する比の平均は0.99、標準偏差0.056で実験結果を良く表現できる。

本研究で調査した影響因子はいずれも既往の耐力算定式[1][4]で未解明の因子であり、上記の式(1)~(4)で、それらの効果の上限を含めて評価することができた。ただし各式は、各影響因子の効果を基本となる供試体に対する耐力比との関係で評価したものであり、相対的な耐力評価は行えるが、それだけでは定着耐力自体を算定することはできない。今後、既往の耐力算定式と組み合わせて、より合理的な定着耐力評価法を検討してゆく予定である。

4. まとめ

- (1) 投影定着長さが大なるほど定着耐力は増大するが正比例の関係になく、反力位置と投影定着長さの幾何学的な関係が等しい場合には、投影定着長さの影響は式(2)のごとく評価でき、その効果は鉄筋径の約15倍で頭打ちとなる。
- (2) 折り曲げた側の圧縮反力位置までの距離と投影定着長さの比(a / l_{ah})が小さいほど定着性能が良好で、定着耐力に及ぼす影響は、式(1)のごとく評価することができる。
- (3) a / l_{ah} が1.0程度以上の場合は定着耐力には差がみられないが滑り剛性は大幅に低下する。
- (4) 投影定着長さが同じでも、定着される部材のせいの中央で折り曲げ定着された場合の耐力は部材せいの90%程度の位置で折り曲げた場合より15%程度低下し、滑り剛性も低下する。
- (5) 定着鉄筋の間隔が小さいほど定着耐力は低下する。この関係は式(3)で大略評価できる。
- (6) 側面かぶり厚さが大きいほど耐力、滑り剛性が増大するが、その効果は鉄筋径の6倍程度のかぶり厚さで頭打ちになる。側面かぶり厚さの定着耐力に及ぼす影響は式(4)で評価できる。

参考文献

- 1) 藤井栄ほか：折り曲げ定着部の挙動と定着耐力に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 45-52、1983年6月
- 2) 山田稔明ほか：高強度材料を用いたRC外部接合部の梁主筋折り曲げ定着の基本特性、コンクリート工学年次論文報告集、12-2、pp. 503-508、1990
- 3) Marques, Jose L.G. and Jirsa, J. O.: A Study of Hooked Bar Anchorages in Beam-Column Joints, J. of ACI Proc. V. 72, No. 5, pp. 198-209, May 1975
- 4) Pinc R. L., Watkins, M.D. and Jirsa J.O. : Strength of Hooked Bar Anchorage in Beam-Column Joints, CESRL REPORT, No. 77-3, Nov. 1977
- 5) 川上修司ほか：高強度材料を用いたRC外柱・梁接合部の折り曲げ定着耐力に及ぼす諸要因の影響、コンクリート工学年次論文報告集、12-2、pp. 497-502、1990