

論文 柱梁接合部における90°折曲げ鉄筋の掻き出し定着破壊耐力の評価

宮本 泰志*1・城 攻*2・後藤 康明*3 北野 敦則*4

要旨：RC造柱梁接合部内に90°折り曲げ定着した梁筋の定着破壊形式のうち、掻き出し破壊を対象にして、多岐にわたる実験変数と複数の採用変数により合計43体の縮小模型試験体を作製し実験的に検討を行った。接合部の破壊性状より、掻き出し定着破壊時におけるコンクリートの破壊面を特定すると共に、掻き出し破壊定着耐力がこの破壊面を横切る横補強筋による負担力と破壊面に沿うコンクリートの滑りによる負担力の和によって表されることを示した。更に実験結果を用いて横補強筋負担力とコンクリート負担力及び軸力による耐力上昇率を導くことにより、精度の高い掻き出し定着耐力算定式を提案した。

キーワード：定着耐力、掻き出し破壊、折り曲げ定着、柱梁接合部

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の柱梁接合部において、外柱などのように梁主筋を通し配筋できない場合には90°折り曲げ定着を行うのが一般的な配筋法である。著者らはこれまでに折り曲げ定着部で起こり得る定着破壊形式には側方割裂破壊・掻き出し破壊・局部圧縮破壊の3つの破壊モードに分類できることを明らかにしてきた[1]。しかし既往の研究で対象とされた定着破壊モードは多くが側方割裂破壊であり、この破壊形式については藤井・森田らによる研究[2]により比較的精度の高い耐力算定式が導き出されている。他方、掻き出し破壊・局部圧縮破壊についてはほとんど研究対象とされず、特に掻き出し破壊は梁筋列の群効果により生ずる破壊であり、鉄筋単体の折り曲げ部の支圧力によって生ずる側方割裂破壊や局部圧縮破壊とは全く異なる破壊形式であるため未解明な点が多い。本研究は著者が行って来た掻き出し破壊を対象とした実験的研究成果をまとめて、掻き出し破壊定着耐力式を提案するものである。

2. 実験概要

試験体は、柱型の接合部想定位置に引張り側の梁主筋を90°折り曲げ定着させたものであり、圧縮側の梁主筋及び梁コンクリートは省略している。梁筋を接合部側に折り曲げた37体と柱側に折り曲げた6体の合計43体の加力実験を行った。ただし正負繰り返し加力を行った1体のみは、圧縮側梁筋及び梁コンクリートを有するト形試験体である。図-1に示す基準試験体

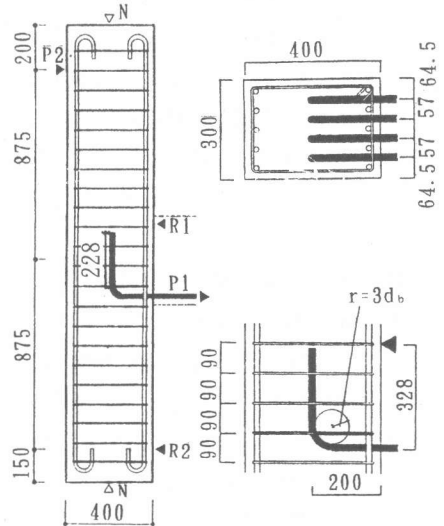


図-1 基準試験体

(階高1750mm、梁応力中心間距離328mm、柱せい400mm、

*1株式会社構造計画研究所
*2北海道大学教授
*3北海道大学助教授
*4北海道大学助手

工博(正会員)
大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工博(正会員)
大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工博(正会員)
大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工修(正会員)

表 - 1 実験変数一覧

接合部側折り曲げ試験体LAシリーズ実験変数

試験体	変数名	採用変量	σ_B	σ_y	試験体	変数名	採用変量	σ_B	σ_y	
LA1-1	基準試験体 水平投影 定着長	$L_{dh}=0.50D_c$ $=0.33D_c$ $=0.825D_c$	30.9	312	LA8-1	柱軸力比	21%	$f_c=40$	37.3	327
LA1-2			32.0	312	LA8-2		33%		39.0	327
LA1-3			37.5	327	LA8-3		8%	$f_c=30$	29.9	388
LA2-1	梁応力中心 間距離	$j=228$ $=428$ $=278$	35.1	327	LA8-4		26%		28.6	388
LA2-2			35.1	327	LA8-5		3%		25.5	338
LA2-3			27.2	327	LA8-6		15%		27.4	338
LA3-1	柱せい	$D_c=300$ $=500$	32.5	312	LA8-7		20%	$f_c=60$	53.3	338
LA3-2			35.4	327	LA8-8		6%		55.6	338
LA4-1	梁筋間隔	$S_b=2.5d_b$ $=3.5d_b$ $=5.4d_b$	34.7	327	LA8-11		50%	$f_c=30$	28.1	377
LA4-2			34.8	327	LA9-1		加力方法	片振り繰り返し 正負繰り返し	30.6	312
LA4-3			32.3	388	LA9-2				37.6	353
LA5-1	コンクリート かぶり厚	$C_o=4.7d_b$ $=6.0d_b$ $=7.0d_b$ $=10.5d_b$ $=13.9d_b$	32.8	327	LA10-1	コンクリート 調合強度	$f_c=50$ $=20$ $=80$	47.7	327	
LA5-2			34.8	327	LA10-2			22.9	388	
LA5-3			31.4	388	LA10-3			76.0	388	
LA5-4			24.6	338	LA11-1	余長部長さ	$L_t=6d_b$	29.1	388	
LA5-5			23.3	338	LA12-1	梁筋直線部下にコンクリート絶縁板		27.1	388	
LA6-1	梁筋段数	2段配筋	35.2	327	LA12-2	梁筋本数2本		28.6	388	
LA7-1	接合部剪断 補強筋比	$p_w=0.42\%$ $=0.83\%$	32.1	327	LA13-1	梁筋下斜め40° コンクリート絶縁板		33.2	338	
LA7-2			31.0	327						

d_b : 梁筋公称径、 D_c : 柱せい

柱幅300mm、梁筋水平定着長200mm、梁筋余長部長228mm、側方かぶり厚64.5mm、コンクリート設計強度30MPa、横補強筋比0.21%、単調引き抜き加力、軸力比0)を設定し、各試験体は基準試験体に対してそれぞれの実験変数のみを変化させた。表-1に採用変数を示す。鉄筋は梁主筋にD19ネジダーバー、柱主筋にD16、横補強筋に6φを使用した。なお表中のfはコンクリートの設計強度、 σ_B は実験時の実強度を表す。

柱側折り曲げ試験体LUシリーズ実験変数

試験体	変数名	採用変量	σ_B	σ_y
LU1-1	基準試験体		32.3	353
LU7-1	補強筋比	$p_w=0.83\%$	32.4	353
LU8-1	柱軸力比	$\sigma_o/\sigma_B=7\%$	33.3	353
LU8-2		$\sigma_o/\sigma_B=33\%$	33.7	353
LU10-1	コンクリート強度 (補強筋比)	$f_c=600$ $=600(p_w=0.83\%)$	59.3	353
LU10-2			61.9	353

σ_B : コンクリート圧縮強度、 σ_y : 補強筋降伏強度、単位:mm, MPa

対象とした柱梁接合部は中間層を想定し、架構内における地震時の応力状態を再現するために、引張力P1で梁主筋を引き抜くと同時に上下の柱剪断力が等しくなるようにP2(=P1×梁応力中心間距離/階高)を柱頭部に導入したもので、大野式逆対称加力に相当する。接合部の反力位置R1には75mm幅の鉄板を挟んで圧縮域とした。またト形試験体では、梁先端部に取り付けたアクチュエーターにより正負繰り返し加力を行った。

3. 掻き出し破壊定着耐力の推定

3.1 横補強筋負担力

掻き出し破壊における共通な亀裂パターンを図-2に示す。図中の数字は亀裂の発生順位を示す。終局時に支配的な亀裂となるのは⑦③④⑥の亀裂群である。これらの亀裂が幅を広げながら梁圧縮域を中心とする回転変形が起きる掻き出し破壊では、亀裂を横切る様に配筋された横補強筋が定着耐力に対して有効に働く。掻き出し破壊定着耐力は⑦③④⑥の亀裂を横切る補強筋が負担する力と、④⑥亀裂面の滑り破壊により決定されるコンクリートが負担する力との和で表現される。

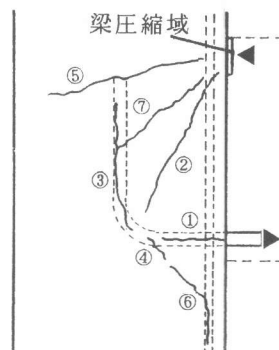


図-2 標準的亀裂パターン

定着耐力に対する横補強筋の上下方向協力範囲は、これまでは梁筋直線部から上下共に水平定

着長さ L_{dh} 等としていたが、水平投影定着長、梁応力中心間距離、柱せいを変化させた試験体の実験結果から新たに次に示す範囲と判断する。すなわち梁筋直線部から折り曲げ方向では水平定着長 L_{dh} の 1.7 倍の距離、折り曲げ方向と逆側の範囲は折り曲げ開始点から内側柱主筋までの距離 ℓ_1' (直線定着部長さ ℓ_1 - 柱筋かぶり厚 C_c) の 1.3 倍の距離に含まれる範囲である (図-3)。ただし接合部側は梁圧縮力が非常に大きくなる範囲では横補強筋の効果は期待できないため、梁圧縮端から梁せいの 2 割分の範囲は協力範囲に含めない。また協力範囲の補強筋でも梁主筋から離れて配筋されたものは協力効果が小さくなることを考慮して、横補強筋有効係数 k_w を設定し、横補強筋協力範囲に含まれる全補強筋の降伏応力の合計値に k_w を掛け合わせることで横補強筋負担力 T_w を表すこととする。実験結果より接合部側に折り曲げた場合では $k_w=0.8$ 、下柱方向に折り曲げた場合では $k_w=0.9$ とする。

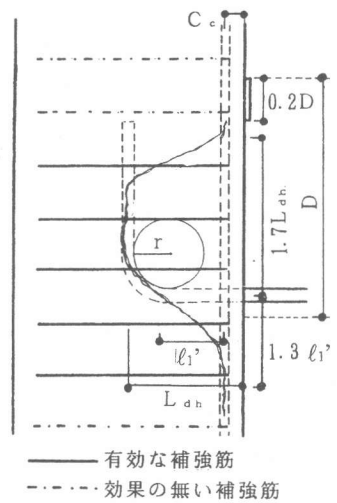


図-3 補強筋強力範囲

また、側方かぶり厚を大きくした場合、柱幅を横断する亀裂は図-4 に示す様にかぶり厚 C_o 内で水平断面上で角度をもって現れる。このため、ある一定以上にかぶり厚が大きく破壊面が内側柱面に抜け出す場合には破壊面が加力方向の横補強筋を横断しなくなり、横補強筋負担力 T_w が急激に低下する。この破壊面角度 θ ($\tan \theta = C_o / L_{dh}$) を実験結果から約 40° と仮定することで、 L_{dh} ($=200\text{mm}$) における定着耐力増大に対する有効かぶり厚 $C_{oe}=170\text{mm}$ が予測できる。 C_{oe} を超えるかぶり厚を持つ試験体で実測された T_w は LA5-4 で 48.8kN 、LA5-5 で 3.0kN であり、 C_{oe} より小さなかぶり厚の試験体の $80\sim 100\text{kN}$ (横補強筋降伏強度により変化) より小さい。LA5-4 のかぶり厚 $C_o (=200\text{mm})$ は耐力上昇に関する有効かぶり厚の限界を若干超えたために T_w が減少し始めたもので、LA5-5 の $C_o=264\text{mm}$ では T_w がほぼ 0 になったものと理解される。したがって C_{oe} までは定義した横補強筋負担力が全て働き、補強筋力がかぶり厚の超過分に対して直線的に低下すると仮定すると $C_o=241\text{mm}$ ($\theta=49^\circ$) で 0 となる。(詳細は文献[3]を参照のこと。ただし協力範囲は今回新たに導入したものであるため T_w の値は異なる。) 以上を簡略化してまとめると、式(1)のようになる。

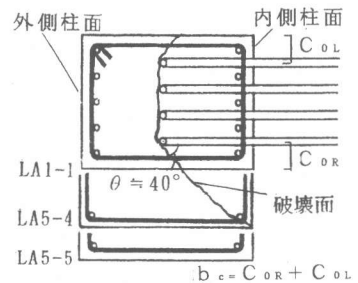


図-4 柱断面内の破壊状況

$$T_w = k_w \cdot k_b \cdot a_w \cdot \sigma_{wy} \quad (1)$$

k_w : 横補強筋有効係数 = 0.8 (接合部側折り曲げ), = 0.9 (柱側折り曲げ)

k_b : 側方かぶり厚による影響係数 = $(k_{bR} + k_{bL}) / 2$

k_{bR}, k_{bL} : 各サイドの側方かぶり厚の影響係数

$$= 1 \quad (C_o \leq 0.8 L_{dh})$$

$$= 3 - 2.5 (C_o / L_{dh}) \quad (0.8 < C_o / L_{dh} < 1.2)$$

$$= 0 \quad (1.2 L_{dh} \leq C_o)$$

a_w : 協力範囲内に含まれる横補強筋の全断面積

σ_{wy} : 横補強筋の降伏強度

3.2 コンクリート負担力

試験体の製作は6年にわたって行われたため各計測位置は作製年度ごとに異なり、初期の試験体では横補強筋の計測は範囲が狭いものであった。このため考察では式(1)より求めた T_w を用いることとし、定着耐力実験値 ${}_{exp}T_u$ から T_w を差し引いた値をコンクリート負担力の実験値 ${}_{exp}T_c$ として扱うものとする。各試験体の ${}_{exp}T_u$ 、 ${}_{exp}T_c$ 、 T_w を表-2に示す。

コンクリート圧縮強度 σ_B とコンクリート負担力 ${}_{exp}T_c$ の関係を図-5 a)に示す。これによると ${}_{exp}T_c$ は $\sqrt{\sigma_B}$ に対応している。 σ_B 以外の影響要因を実験変数とした試験体において

も σ_B は設計強度 $F_c=30\text{MPa}$ に対して実験時材令などの影響で上下した値となっている。以下ではLAシリーズの実験変数の影響を検討をする際に、式(2)により基準試験体と同等の $\sigma_B=30.9\text{MPa}$ 相当に補正したコンクリート負担率 ${}_{exp}T_c'$ を用いる。 ${}_{exp}T_c'$ を表-2に併せて示す。

$${}_{exp}T_c' = (\sqrt{315}/\sqrt{\sigma_B}) {}_{exp}T_c \quad (2)$$

掻き出し破壊定着耐力時の破壊性状から、折り曲げ方向とは逆向きに発生する破壊面(図-2の④⑥亀裂)でのコンクリートの滑り破壊(破壊面のコンクリート同士の摩擦や柱主筋によるダボ破壊等による)によって定着耐力が決定することが推測される。この亀裂は梁筋折り曲げ開始点から概ね斜め 45° 方向に柱筋位置まで発生する亀裂であることから、定着長さによる影響を考える上で、破壊面の水平成分長さに相当する、折り曲げ開始点から柱筋位置までの距離 l_1' を用いて検討する。 l_1' と ${}_{exp}T_c'$ の関係を図-5 b)に示す。この図から ${}_{exp}T_c'$ は l_1' に比例することが分かる。また、破壊面の幅に相当する柱幅とコンクリート負担力の関係を図-5 c)に示す。前記のように側方かぶり厚を大きくした場合、柱幅を横断する亀裂は図-4に示す様にかぶり厚内で水平断面上で角度をもって現れる。このためある一定以上にかぶり厚を大きくしても、梁が接合する内側柱面を破壊面が貫通するために耐力増大の要因にならない。実験結果から予測できる有効かぶり厚は $C_{0e}=176\text{mm}$ であり、これ以上のかぶり厚の試験体は図-5 c)では省いてある。この図から明らかにかぶり厚を変化させたLA5-シリーズよりも梁筋間距離を変化させたLA4-シリーズの ${}_{exp}T_c'$ の方が耐力上昇割合が大きいことから、側方かぶり厚と梁主筋間幅(最外縁の梁主筋間隔)の耐力増大効果が異なっていることが分かる。柱幅 b を梁主筋間幅 b_s と両サイドの側方かぶり厚の合計値 $b_c(=C_{0R}+C_{0L}=b-b_s)$ とに分離して回帰計算を行うと、 b_c の定着

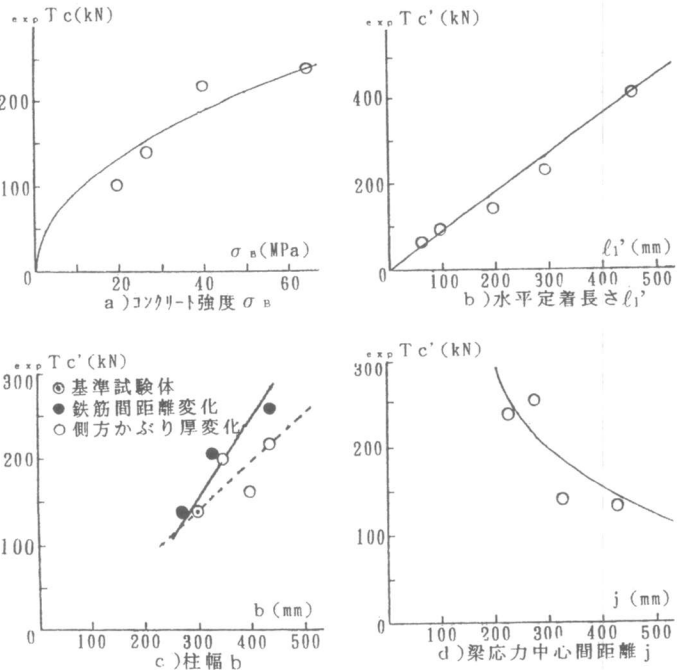


図-5 実験変数とコンクリート負担力の関係

表-2 定着耐力実験値及び計算値

試験体	exp Tu	exp Tc	exp Tc'	Tw	cal Tc	cal Tu	exp/cal	試験体	exp Tu	exp Tc	exp Tc'	Tw	cal Tc	cal Tu	exp/cal
LA1-1	233	164	164	69.9	186	256	0.91	LA8-1	453			73.2	205	447	1.01
LA1-2	129	73.5	72.2	55.9	60.7	117	1.11	LA8-2	463			73.2	210	464	1.00
LA1-3	622	533	484	87.8	475	564	1.10	LA8-3	375			87.0	183	403	0.93
LA2-1	355	296	277	58.6	285	344	1.03	LA8-4	375			87.0	179	394	0.95
LA2-2	254	166	156	87.6	152	240	1.06	LA8-5	305			75.7	170	286	1.06
LA2-3	363	275	294	87.0	206	293	1.24	LA8-6	358			75.7	175	364	0.98
LA3-1	165	109	106	55.9	94.0	150	1.10	LA8-7	608			75.7	245	599	1.01
LA3-2	366	292	274	73.2	301	374	0.98	LA8-8	515			75.7	250	537	0.96
LA4-1	245	172	162	73.2	180	254	0.97	LA8-11	366			84.5	177	383	0.96
LA4-2	328	255	240	73.2	222	294	1.12	LA9-1	219	149	149	69.9	185	255	0.86
LA4-3	395	308	302	87.0	299	386	1.02	LA9-2	278	199	180	79.0	206	284	0.98
LA5-1	315	241	234	73.2	214	286	1.10	LA9-2	310	215	195	94.9	206	300	1.03
LA5-2	274	200	188	73.2	241	315	0.87	LA10-1	329	256	206	73.2	231	305	1.08
LA5-3	343	256	254	87.0	245	331	1.03	LA10-2	205	118	137	87.0	161	247	0.83
LA5-4	310	272	305	37.8	248	286	1.08	LA10-3	368	280	179	87.0	292	379	0.97
LA5-5	260	260	299	0	241	241	1.08	LA11-1	224	136	141	87.0	180	268	0.83
LA6-1	246	173	162	73.2	199	272	0.90	LA12-1	294	207	222	87.0	175	261	1.13
LA7-1	271	142	136	132	190	322	0.84	LA12-2	265	171	184	87.0	139	226	1.17
LA7-2	415	180	180	234	186	421	0.99	LA13-1	209	133	128	75.7	193	269	0.78

試験体	exp Tu	exp Tc	exp Tc'	Tw	cal Tc	cal Tu	exp/cal	試験体	exp Tu	exp Tc	exp Tc'	Tw	cal Tc	cal Tu	exp/cal
LU1-1	177			107	61.9	169	1.05	LU7-1	315	30.4	29.4	284	620	347	0.91
LU8-1	249			107	62.9	347	1.10	LU10-1	218	111	79.9	107	839	190	1.14
LU8-2	340			107	63.2	227	1.09	LU10-2	375	91.2	64.7	284	857	371	1.01

(単位: kN)

耐力に対する影響係数は b_s に対して 0.53 倍である。これらを考慮して、定着耐力を支配する破壊面の耐力 T_{ao} は式 (3) で表わされる。

$$T_{ao} = k_c \cdot b_{ce} \cdot \ell_{i'} \cdot \sigma_e \quad (\text{単位: N, mm, MPa}) \quad (3)$$

k_c : b_{ce} , $\ell_{i'}$, σ_e の破壊耐力に関する比例定数

b_{ce} : 柱有効幅 = $b_s + 0.53 b_c$

b_s : 最外縁の梁主筋間距離

b_c : 両サイドの側方かぶり厚の合計 ($b_c \leq 1.6 L_{dh}$)

$\ell_{i'}$: 破壊面加力方向長さ = $L_{dh} - r - d_b / 2 - C_c$

C_c : 柱筋かぶり厚さ

σ_e : コンクリート滑り強度 = $\sqrt{\sigma_B}$ (MPa)

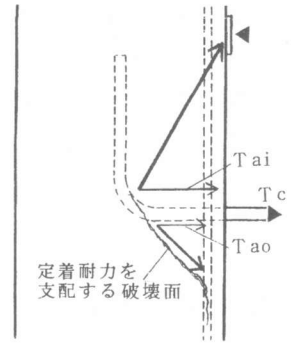


図-6 コンクリート負担力の伝達

コンクリート負担力 T_c は、折り曲げ方向に向かう力の水平成分 T_{ai} と折り曲げ方向の逆に向かう力の水平成分 T_{ao} にある一定割合で分割されていると考えられる (図-6)。この分割率は、接合部側に折り曲げた場合の T_c が梁応力中心間距離 j に反比例することから (図-5d)、柱剪断力と接合部剪断力の比率に等しいと推測できる。柱支点間距離を H とすると、折り曲げ方向が接合部側に向いていたときは式 (4) の様になり、コンクリート負担力 T_c は式 (5) で表すことができる。同様に考えると折り曲げ方向が柱側に向いていたときは式 (6) の様になる。

$$T_{ai} = (H - j) / j \cdot T_{ao} \quad (4)$$

$$T_c = T_{ai} + T_{ao} = (H - j) / j \cdot T_{ao} + T_{ao} = H / j \cdot T_{ao} \quad (5)$$

$$T_c = H / (H - j) \cdot T_{ao} \quad (6)$$

比例定数 k_c は接合部側に折り曲げた場合で0.27、柱側に折り曲げた場合で0.38とすると実験値に平均的に良く対応する。

3.3 軸応力度の影響

柱に軸応力が加えられると、 σ_o の増大によって亀裂が急傾斜となり破壊面が長くなるためにコンクリート負担力 T_c のみならず破壊面を横断する横補強筋量が增大して T_w の有効範囲が広がるため定着耐力は上昇する。著者は、軸力による定着耐力上昇率 k_N は、コンクリート強度の8%までは軸応力度に比例し、それ以降は一定値となることを示した[3]。すなわち k_N は式(7)で表される。その後の追加試験体LA8-11により式(7)は軸力比50%までの範囲で適応できることを確認している。

$$k_N = 1 + 0.203 \sigma_{oA} \quad (\text{単位 } \sigma : \text{MPa}) \quad (7)$$

$$\sigma_{oA} = \{ \sigma_o, 0.08 \sigma_B \} \min$$

$$\sigma_o : \text{柱軸応力度} = N / (b \cdot D_c)$$

3.4 掻き出し破壊定着耐力算定式の提案

以上全体をまとめると掻き出し破壊定着耐力は式(8)によって算定できる。梁が2段配筋の場合は1段目筋により各値を定める。繰り返し加力、梁筋余長部長さは本研究の範囲では耐力に対する影響はない。

$$c_{ai} T_u = k_N \cdot (T_c + T_w) \quad (8)$$

実験値 ${}^{exp} T_u$ と式(8)による計算値 $c_{ai} T_u$ を比較して図-7に示す。表-1に示す試験体のうち、破壊機構の解明の為の特殊試験体であるLA12・LA13-シリーズを除く40体について、実験値の計算値に対する比は平均1.01、標準偏差0.091であり、定着耐力を精度良く算出できている。ただし、この式の適応範囲は $20 \text{MPa} \leq \sigma_B \leq 80 \text{MPa}$, $0.33 D_c \leq L_{ah} \leq 0.83 D_c$, $0.2\% \leq p_w \leq 0.8\%$, $4.09 \leq H/j \leq 7.68$, $6 d_b \leq L_t \leq 12 d_b$, $0 \leq \sigma_o / \sigma_B \leq 0.5$ である。

4. 結語

RC造柱梁接合部内に90°折り曲げ定着した梁筋の定着破壊形式のうち、掻き出し破壊を対象にして、43体の縮小模型試験体を作製し実験的に検討を行った。これにより、掻き出し定着破壊耐力を横補強筋負担力と破壊面のコンクリート負担力の和によって表わした。これにより精度の高い掻き出し定着耐力算定式(8)を提案した。

参考文献

- [1] 五十嵐雅彦, 宮本泰志, 牧部一成, 後藤康明, 城攻, 柴田拓二: RC造柱梁接合部における90°折り曲げ鉄筋の定着耐力(その1)、日本建築学会学術講演梗概集、C構造II、pp245-246、1993
- [2] 藤井栄, 森田司朗, 川上修司, 山田稔明: 90°折り曲げ鉄筋の定着耐力の再評価、日本建築学会構造系論文集、第429号、pp65-75、1991.11
- [3] 城攻, 後藤康明, 北野敦則, 宮本泰志: 柱梁接合部内90°折り曲げ鉄筋の定着耐力に及ぼす柱軸力・側方被り厚等の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.321-326、1995.6

