

論文 柱梁接合部における90°曲げ下げ梁下端鉄筋の定着破壊性状

宮本 泰志^{*1}・城 攻^{*2}・後藤 康明^{*3}・北野 敦則^{*4}

要旨：RC造柱内に90°曲げ下げ定着された梁下端筋を対象にして、コンクリート強度、横補強筋比、柱軸力比の掻き出し定着破壊性状へ及ぼす影響を実験的に検討した。これにより、曲げ下げ定着における掻き出し破壊の標準的な亀裂発生パターンを示し、初期剛性低下時耐力を特徴的な亀裂の発生に関連させることで評価した。またコンクリート強度と剪断補強筋比で表される定着破壊耐力は接合部側に曲げ上げ定着した場合の7割程度となること、耐力上昇限界軸力比は柱内曲げ下げ定着の場合は接合部内曲げ上げ定着の場合のほぼ2倍の値を持つことを示した。

キーワード：曲げ下げ定着、定着耐力、掻き出し破壊、破壊性状、初期剛性低下

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の柱梁接合部において、外柱では梁主筋を上端筋・下端筋ともに90°曲げ下げ定着するのが国内では一般的である。この時、上端筋は接合部内に定着され、その引き抜き力の梁下端圧縮域への伝達経路は著者らの研究によりほぼ解明されている。これに対して下端筋は下柱の柱頭部に定着されることになり、定着耐力が接合部内に定着した場合に比べて低下することは知られているが、耐力評価法や応力伝達経路は解明されていない。これまでの折曲げ定着の研究は主に前者の接合部内へ定着した場合を対象としており、後者の下柱に定着したものを対象にしたものは若林・南らによる一連の研究[1]に見られる程度である。著者らは既報[2]などで、接合部内に定着させた場合の掻き出し定着破壊を対象にして検討を行ってきた。本報告ではこれまでの結果を踏まえ、下柱内に90°曲げ下げ定着された場合を対象にして、コンクリート強度、横補強筋比、柱軸力比の掻き出し定着破壊性状へ及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験変数

試験体には図-1に示すように、既報[2]で用いたものと同仕様の梁コンクリートおよび圧縮側梁筋を除いた外柱形の柱梁接合部試験体を用いている。試験体の共通仕様として、実寸の1/2に縮尺して階高1750mmとした柱型試験体の中央に接合部を想定して、90°フックの余長部を折曲げた梁下端筋を定着させたものとした。LU1-1を基準試験体として設定し、各試験体はこの基準試験体に対して実験変数のみを変化させた。採用した実験変数は、表-1に示すように横補強筋比

表-1 実験変数一覧

試験体	実験変数	採用変数
LU1-1	基準試験体	本文参照
LU7-1	剪断補強筋比	$p_w=0.83\%$
LU8-1	柱軸力比	$\sigma_0/\sigma_B=1/15$
LU8-2	柱軸力比	$\sigma_0/\sigma_B=1/3$
LU10-1	コンクリート強度	$F_c=60\text{MPa}$
LU10-2	コンクリート強度 剪断補強筋比	$F_c=60\text{MPa}$ $p_w=0.83\%$

*1北海道大学大学院 工学研究科建築工学専攻、工修（正会員）
 *2北海道大学教授 工学部建築工学科、工博（正会員）
 *3北海道大学助教授 工学部建築工学科、工博（正会員）
 *4北海道大学助手 工学部建築工学科、工修（正会員）

p_w 、柱軸力比 σ_0/σ_B 、コンクリート強度 σ_B とした。なお、柱側に折曲げ定着した場合の接合部内の剪断補強筋は殆ど抵抗しないことが報告されている [1] ことから、横補強筋比は、下柱内の梁筋折曲げ余長部にかかる範囲のみ変化させた。

基準試験体(LU1-1)は、柱幅 $b_c=300\text{mm}$ ×柱せい $D_c=400\text{mm}$ の柱断面に梁筋 4 本を側方被り厚 (=外側梁筋芯から柱側面までの距離) $C_0=64.5\text{mm}$ 、梁筋間隔 $S_0=3d_b=57\text{mm}$ (d_b は梁筋公称径 19mm) 余長部位置 $L_{dh}=D_c/2=200\text{mm}$ 、余長部長さ $L_t=12d_b=228\text{mm}$ 、折曲げ内法半径 $r=3d_b=57\text{mm}$ となるように一段配筋し、梁応力中心間距離 $j_b=328\text{mm}$ 、横補強筋比 $p_w=0.21\%$ 、柱軸応力度 $\sigma_0=0$ 、コンクリート調合強度 $F_c=30\text{MPa}$ 級、単調引張加力としたものである。

本実験の試験体用に用いられた鉄筋および代表的な強度のコンクリートの力学的性状を表-2に示す。コンクリートの粗骨材には、試験体の縮小比に合わせて 13mm 以下の碎石を使用している。梁主筋には $D19$ 、柱主筋には $D16$ 、柱剪断補強筋には 6ϕ の鉄筋をそれぞれ使用しており、このうち梁主筋に用いた $D19$ は降伏しないように全て高強度鉄筋を用いた。

2.2 加力方法

柱梁接合部は中間層を想定しているので、実架構の地震時応力を模擬するために図-1および図-2に示すように引張力 P_1 を梁筋端に加え、上下の柱剪断力が等しくなるように $P_2(=P_1 \cdot j_b/1750)$ を上柱の油圧ジャッキ B で加力した。梁筋圧縮側の反力 R_1 は、仮想梁の圧縮位置に柱全幅にわたり仮想梁せいの 0.2 倍を覆う鋼板をあて、これを介してピン支持した。4 本の梁筋は柱面から約 150mm の位置で変位が同一となるように加力治具を介して載荷しているので、鉄筋力は相互に若干異なる。

柱軸力 N を与えた LU8 シリーズは図示していないが、試験体の上下部

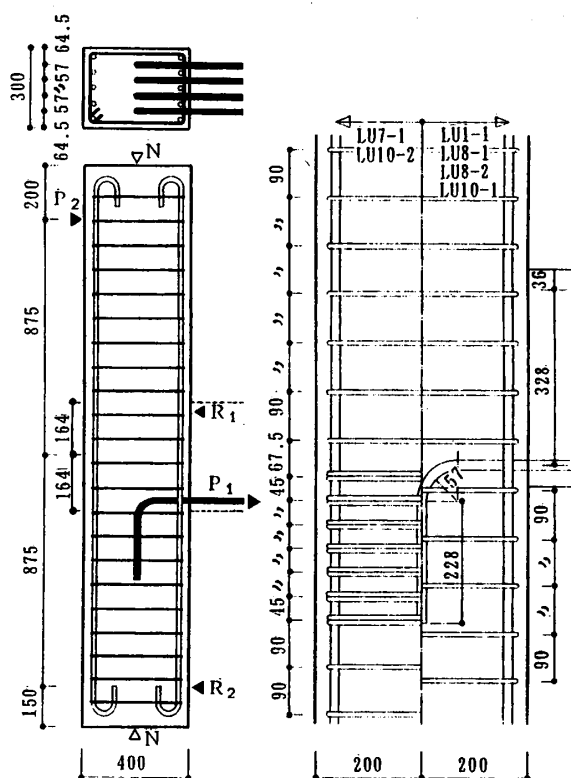


図-1 試験体概要

表-2 使用材料の力学的性状

鉄筋径	σ_y	ϵ_y	σ_{max}	伸び率
D 19	647	0.328	898	14.8
D 16	414	0.229	566	23.7
6 ϕ	353	0.176	448	19.2

コンクリート	σ_B	ϵ_{max}	$E_{1/3}$	$E_{2/3}$
$f_c=30\text{MPa}$	32.9	0.278	25.2	21.0
$f_c=60\text{MPa}$	60.6	0.282	30.8	28.1

[σ :MPa、 ϵ :伸び率%、 E :GPa]

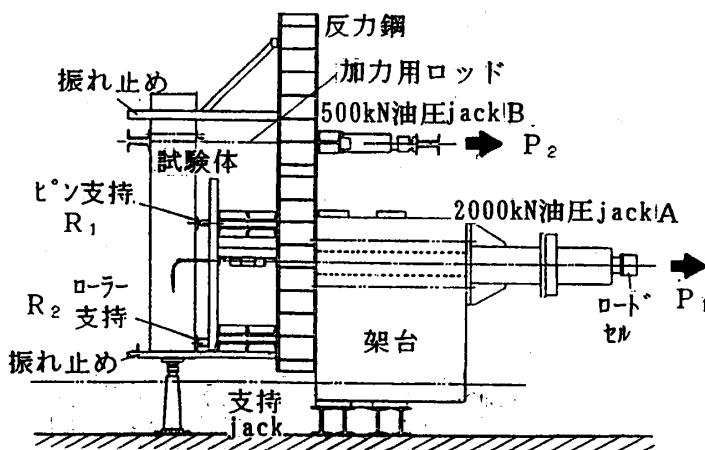


図-2 加力装置概要

に配した別途の反力用鋼製梁を4本の反力ロッドで連結し、試験体下に設置した油圧ジャッキにより軸力を導入した。試験装置の安全性の都合上加力初期では概ね $N=5 P_1$ の割合で載荷して、所定の軸力に達した後は一定に保持した。所定軸力到達時の P_1 は、LU8-1で最大耐力時 $Tu = P_{1max}$ の20%、LU8-2で50%であり、最大耐力への影響はない。

2.3 計測方法

図-3に示すように、各梁筋の梁付け根位置の抜け出し、梁筋折曲げ開始点の滑りを柱せいの中心(図中の0点)から相対変位として計測した。またこの他に、主要な位置の鉄筋歪と定着部付近のコンクリートの歪を歪度ゲージで計測し、梁筋折曲げ中心位置でのコンクリートの側方膨らみ、パネル4隅の鉛直・水平方向変形、柱軸方向変形などを計測した。

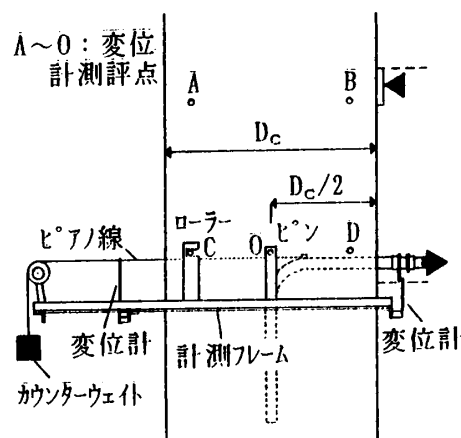


図-3 計測装置概要

3. 実験結果および考察

梁筋を接合部内に向けて定着した場合の掻き出し破壊の特徴は、接合部圧縮隅角部を中心として折曲げ部前方のコンクリート塊が回転変形をしながら掻き出されるものである。本報告の試験体は下柱に向けて定着しているため、このような明確な回転変形を示さないが、梁定着筋列の外周沿いに柱幅を横断して発生する亀裂面により、折曲げ部前方のコンクリートが塊のまま掻き出されていることから、全試験体とも掻き出し破壊により最大耐力に至ったとみなすことができる。

3.1 破壊性状

梁筋を下柱に定着した場合の掻き出し破壊における一般的な亀裂を図-4に示す。これらの亀裂の発生過程は概ね次の通りといえる。

- ①：梁付け根位置より梁筋水平定着部沿いに曲げ亀裂が発生する。但しこの曲げ亀裂はこの後ほとんど拡幅しない。
- ②：梁筋折曲げ部から接合部圧縮位置側に向け、約45°方向の亀裂が発生する。この段階で最初の剛性低下が見られる。
- ③：梁筋折曲げ余長部沿いに鉛直方向の亀裂が発生する。
- ④：梁筋折曲げ余長部下端を通り、柱せいを横断するほぼ水平の亀裂が発生する。この亀裂の発生により著しく剛性が低下する。
- ⑤：②で発生した亀裂が柱主筋位置まで達した後に角度を変えて、柱主筋沿いに梁上端圧縮位置に達する。

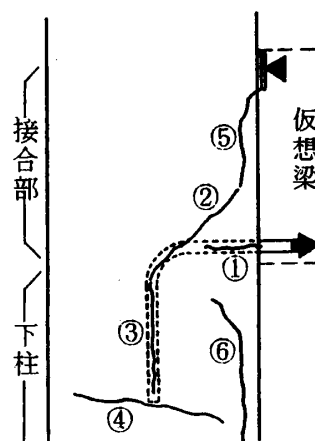
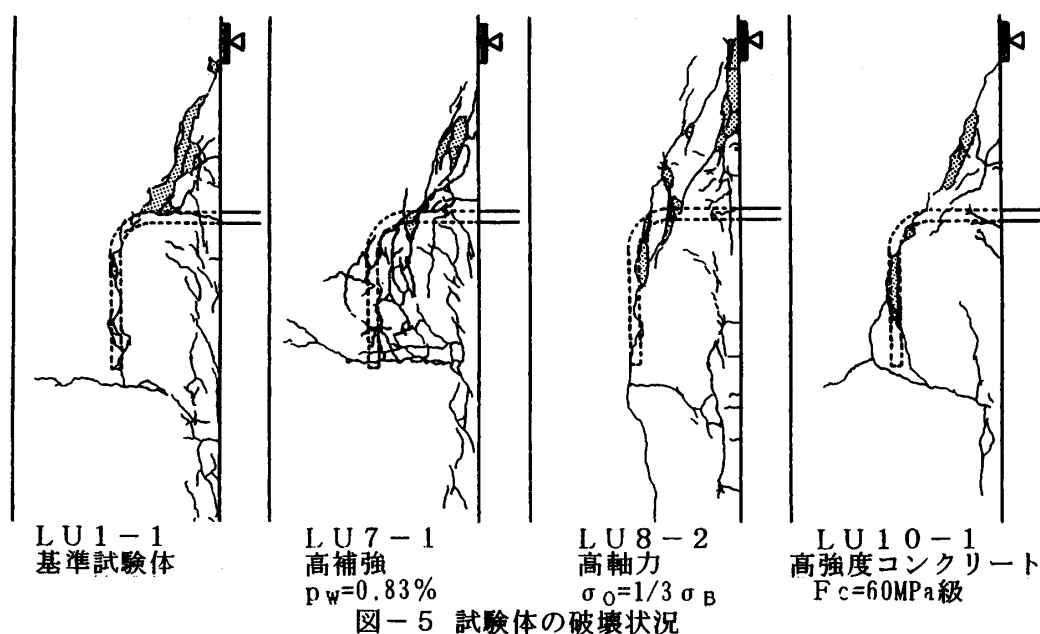


図-4 標準的亀裂パターン

- ⑥：変形が進み折曲げ部前方のコンクリートの掻き出し変形が進むと、下柱の柱主筋沿いに亀裂が発生する。この亀裂は接合部に近い位置では梁筋折曲げ部に向かう傾向が見られる。

基準試験体のLU1-1を含め、各試験体は概ね上記の順序で亀裂が発生する。最大耐力を迎えるのは多くの場合④から⑤の段階である。但し、剪断補強筋を多く配筋したLU7-1及びLU10-2は④の剛性低下以後においても耐力上昇が大きく、④や⑤の亀裂が発生した後もしばらく耐力低下はみられなかった。各実験変数ごとにも亀裂の発生過程にいくつかの特徴がみられる。コンクリート強度が高いものでは、上記の主要な亀裂の他には亀裂の発生はほとんどなく、折曲げ定着筋で囲まれる



下柱頭部のコンクリートは損傷の少ない塊状態で掻き出される。これに対して剪断補強筋が多く配筋されたものは、最大耐力後に余長部沿いの③亀裂の内側に多数の亀裂が発生する。また柱軸力を導入したものでは、各亀裂が鉛直方向に立ってくる。このため他の試験体とは各亀裂位置に若干の違いがみられる。

3.2 初期剛性低下時耐力

基準試験体LU1-1を例にして各梁筋の引き抜き力 T と梁付けね位置の梁筋抜け出し量の関係を図-6に示す。前節で述べたように、梁筋折曲げ部から接合部側に向かって 45° の角度で亀裂が入ると初期剛性の低下がみられる。

この亀裂は接合部パネル全体の剪断変形によるものではないが、梁主筋折曲げ開始点付近から約 45° 方向に亀裂が発生することから初期加力時では折曲げ部から 45° 方向に主圧縮歪力が生じ、これに直交する主引張歪力によって②の剪断亀裂が発生し剛性が低下する。従って、剪断亀裂発生耐力により初期剛性低下時の耐力が評価できる。

平均柱軸力と接合部に働く平均剪断力との組み合わせによる主引張応力度が、コンクリートの引張強度を超えると接合部内に剪断亀裂が発生すると考え、主応力度式から次式が与えられる。

$$\sigma_{\text{cal}} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_t \cdot \sigma_0} \quad (1)$$

σ_t : コンクリートの引張強度 ($=0.44\sqrt{\sigma_B}$)

σ_B : コンクリートの圧縮強度 σ_0 : 柱軸方向応力度 (単位は全て[MPa])

σ_B から σ_t への変換係数は当研究室のRCの実験では0.31~0.47の範囲で分散するが、本式において実験値の対応が良い値として0.44を採用した。重力単位系では1.4にあたる。

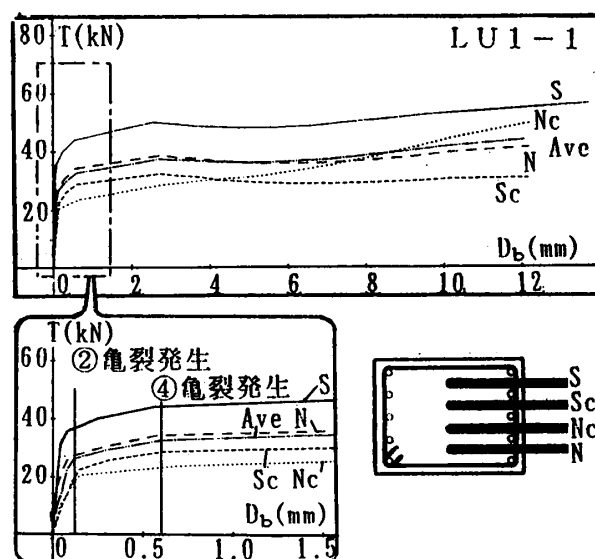


図-6 梁筋引き抜き力と抜け出し量の関係

本実験では②亀裂は梁主筋折曲げ開始点付近より発生したものが多くことから、剪断力は梁筋折曲げ開始点から接合部内に入力されるものと考え、梁筋側のパネルゾーンに水平方向に剪断力が均等に作用しているものと仮

定し、接合部剪断力 $cal Q_{cr}$ を算定した(式2)。また、実験値 $exp Q_{jcr}$ は梁筋総引張力 $exp T_{cr} (=P_1)$ と柱剪断力 $exp Q_{c cr} (=P_2)$ の差により算出した(式3)。

$$cal Q_{cr} = cal \tau_{cr} \cdot b_c \cdot l_1 \quad [N] \quad (2)$$

b_c : 柱幅 [mm]

l_1 : 梁筋付け根位置より

折曲げ開始点までの距離

$(=L_{dh} - d_b/2 - r) \quad [mm]$

$$exp Q_{jcr} = exp T_{cr} - exp Q_{c cr} \quad [N] \quad (3)$$

実験値および式2による計算値を表-3に示す。全ての試験体で exp/cal が $\pm 20\%$ 以内に納まることから、この方法で初期剛性低下時の耐力をほぼ算定できると思われる。実際の接合部内の応力分布は複雑なものと推定され、対象とする接合部内の位置によっても大きく異なるが、上記の仮定による初期剛性低下時耐力の評価は実用的には有効といえよう。

3.3 実験変数の掻き出し破壊耐力に及ぼす影響

各試験体の最大耐力を表-4に示す。梁主筋余長部を接合部内に定着した場合の掻き出し破壊定着耐力 T_u (梁付け根位置での梁主筋総引き抜き力)は、①コンクリート

圧縮強度 σ_B の平方根の増加に従い直線的に増加する、②剪断補強筋比 p_w の増加と共に直線的に増加する、③軸応力度 σ_0 の増加により直線的に増加するが、 σ_0 がある軸力比 σ_0/σ_B を超える値で増加はなくなり一定値となる、等の性質が分かっている[2]。これらの性質が、梁主筋を下柱頭部に定着した場合にも当てはまると仮定して、定着耐力 T_u と各実験変数の関係を回帰計算により求めたものを図-7に示す。これらの関係を統合して式4を得た。また掻き出し破壊定着耐力の実験値と式4による計算値を比較したものを表-4に示す。

表-3 初期剛性低下時耐力の実験値と計算値の比較

試験体	$exp T_{cr}$	$exp Q_{c cr}$	$exp Q_{j cr}$	$cal \tau_{cr}$	$cal Q_{cr}$	exp/cal
LU1-1	121	19.3	102	2.49	100	1.02
LU7-1	119	18.5	100	2.50	100	1.00
LU8-1	158	26.1	132	3.45	139	0.95
LU8-2	257	43.8	213	5.92	237	0.90
LU10-1	158	27.6	130	3.38	135	0.96
LU10-2	195	33.7	161	3.45	138	1.17

[T, Q : kN、 τ : MPa]

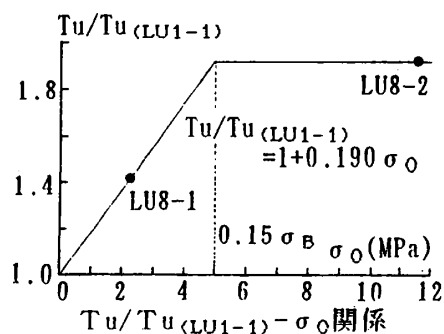
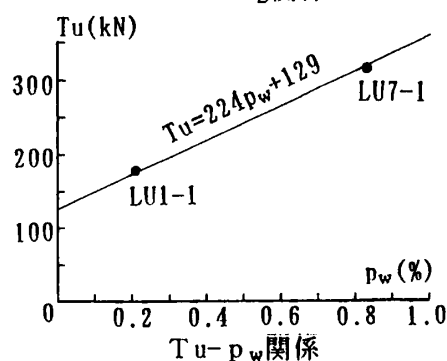
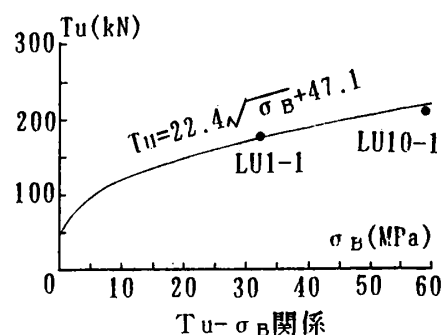


図-7 定着耐力と実験変数の関係

$$\begin{aligned}
 \text{cal } T_u &= (22.4\sqrt{\sigma_B} + 224 p_w)(1 + 0.190 \sigma_{OA}) \\
 \sigma_{OA} &= [\sigma_0, 0.15 \sigma_B]_{\min} \\
 [\text{cal } T_u: \text{kN}, \sigma_B \cdot \sigma_0 \cdot \sigma_{OA}: \text{MPa}, p_w: \text{\%}]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

実験値と式4による計算値の比exp/calは0.99から1.04の範囲である。各係数を求める際に回帰計算のデータとして含まなかった試験体も含めよい対応を見せることから、概ね良く評価できるといえる。

ここで既報[2]による結果から式4と同様の表現形式で接合部側折曲げ定着について求めると

表-4 定着耐力の実験値と計算値

試験体	σ_B	exp T_u	cal T_u	exp/cal
LU1-1	32.3	177	174	1.02
LU7-1	32.4	314	313	1.00
LU8-1	33.3	249	249	1.00
LU8-2	33.7	340	344	0.99
LU10-1	59.3	218	219	0.96
LU10-2	61.9	375	362	1.04

[σ_B : MPa, T_u : kN]

$$\begin{aligned}
 \text{cal } T_{uj} &= (34.6\sqrt{\sigma_B} + 300 p_w)(1 + 0.203 \sigma_{OA}) \\
 \sigma_{OA} &= [\sigma_0, 0.08 \sigma_B]_{\min} \\
 [\text{cal } T_{uj}: \text{kN}, \sigma_B \cdot \sigma_0 \cdot \sigma_{OA}: \text{MPa}, p_w: \text{\%}]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

となる。式4と式5の比較から以下のことが分かる。①コンクリート強度、剪断補強筋比の耐力上昇に関する影響係数は接合部側に折曲げ定着した場合の7割程度となる。②軸応力度による耐力上昇の影響係数はほぼ同じであるが、耐力上昇限界軸力比は柱側曲げ下げ定着の場合は接合部側定着の場合のほぼ2倍の値を持つ。従って③総合的な耐力としては、軸応力度が $0.08 \sigma_B$ 以下では接合部側定着に対して7割程度減少するが、 $0.15 \sigma_B$ 以上の高軸力下では同程度の耐力を有すると考えられる。

4. 結 語

RC造柱内に 90° 曲げ下げ定着された場合を対象にして、コンクリート強度、横補強筋比、柱軸力比の掻き出し定着破壊性状へ及ぼす影響を実験的に検討した。これにより、標準的な亀裂発生パターンを明らかにし、この亀裂に関係した初期剛性低下時耐力の評価式を提案した。またコンクリート強度、剪断補強筋比の耐力上昇に関する影響係数は接合部側に折曲げ定着した場合の7割程度となること、軸応力度による耐力上昇の影響係数はほぼ同じであるが、耐力上昇限界軸力比は柱内曲げ下げ定着の場合は接合部側定着の場合のほぼ2倍の値を持つことを示した。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金による一般研究（B）（課題番号07455214、研究代表者：城 攻）の助成を得て行われたものである。

[参考文献]

- [1] 若林 實・南 宏一・西村泰志・今仲伸郎：鉄筋コンクリート造柱・梁接合部における梁主筋の定着機構に関する実験的研究(その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1889-1890、1984.10など
- [2] 城 攻・後藤康明・柴田拓二：RC柱梁接合部内に定着される 90° 折曲げ筋の破壊モードと定着性能、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.159-164、1993.6