

論文

[2117] RC 柱梁接合部内における90°折曲げ筋の定着性能

城 攻^{*1}・北野 敦則^{*2}・後藤 康明^{*2}・柴田 拓二^{*3}

1. はじめに

鉄筋コンクリート造柱梁接合部の梁筋の定着には、外柱では90°折曲げ定着を用いるのが一般的であり、架構式プレキャスト鉄筋コンクリート造では、内柱にも90°折曲げ定着を併用することが多い。既報[1]では、90°折曲げ定着の破壊モードを、側方割裂破壊、局部圧縮破壊、掻き出し破壊の3種に分類し、このうち掻き出し破壊を対象とした定着耐力式を実験に基づいて提案した。本報告は、既報の実験資料に加えて、あらたに実験変数を拡大して行った実験結果を合わせて、亀裂発生過程および破壊要因と剪断初亀裂耐力について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験変数と試験体形状

過年度と同様に、試験体には梁コンクリートおよび圧縮側梁筋の無い外柱形試験体を用い、図-1に示すように、折り曲げ内法半径 $3d_b$ (d_b は梁筋公称径19mm)の90°フックを有する高強度ネジフシ鉄筋(D19、USD685相当)を梁筋として階高175cmの柱の接合部想定位置に埋め込んだもので、これを全試験体の共通仕様とした。実験変数のうち、梁筋芯間隔 S_0 、側方被り厚 C_0 (=外側梁筋芯から柱側面までの距離)、柱軸応力度 σ_0 、コンクリート強度 σ_B については過年度に扱ったもので、その変量の範囲を拡大している。ま

表-1 試験体名と実験変数

試験体名	変数名	採用変量
*LA1-1	基準試験体	
*LA1-2	水平投影	133mm
*LA1-3	定着長 l_{dh}	330mm
LA2-1	梁せい D_b	300mm
LA2-2	(梁筋力間	500mm
LA2-3	距離 j)	350mm
*LA3-1	柱せい	300mm
*LA3-2	D_c	500mm
*LA4-1	梁筋間隔	47.5mm
*LA4-2		66.5mm
LA4-3	S_0	102.7mm
*LA5-1	側方被り厚	89.5mm
*LA5-2		114.5mm
LA5-3	C_0	133 mm
*LA6-1	梁筋段数	2段配筋
*LA7-1	横補強筋比	0.4%
*LA7-2	p_w	0.8%
*LA8-1	柱軸力比	$\sigma_B/4.5$
*LA8-2		$\sigma_B/3$
LA8-3		$\sigma_B/12$
LA8-4	σ_0	$\sigma_B/4$
*LA9-1	加力方法	繰り返し
*LA10-1	コンクリート	500kg/cm ²
LA10-2	圧縮強度	200kg/cm ²
LA10-3	σ_B	800kg/cm ²
LA11-1	折曲げ余長 l_t	$6d_b$
LA12-1	有効定着幅	50mm
LA12-2	b_e	262mm

* 昨年度試験体

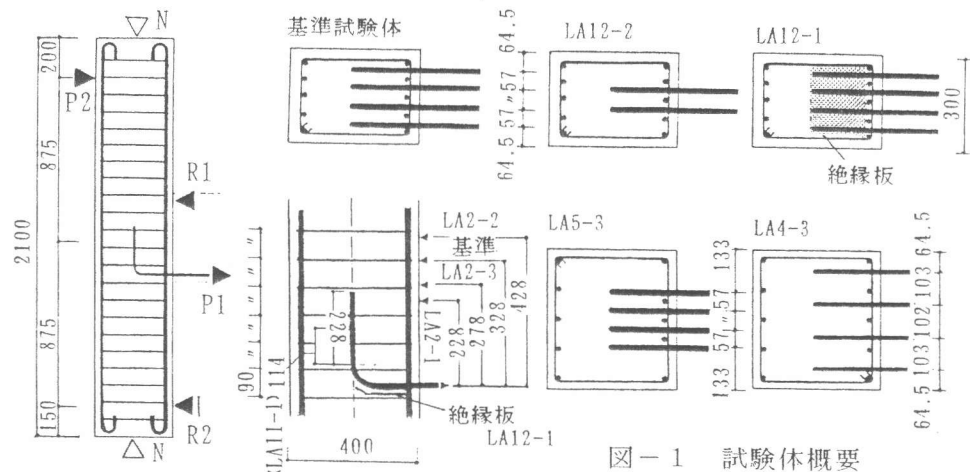


図-1 試験体概要

*1 北海道大学教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)

*2 北海道大学助手 工学部建築工学科、工修 (正会員)

*3 北海道工業大学教授 建築工学科、工博 (正会員)

た、本年度新たに設定した実験変数は、梁応力中心距離 j_b 、梁筋折曲げ余長 L_t 、有効定着幅 b_s の3種類である。

基準試験体(LA1-1)は、柱幅30cm×柱せいDc40cmの柱断面に梁筋4本を $C_0=6.45\text{cm}$ 、梁筋間隔 $S_0=3d_b=5.7\text{cm}$ 、余長部位置 $L_{db}=Dc/2=20\text{cm}$ 、 $L_t=12d_b=22.8\text{cm}$ となるように1段に配筋し、 $j_b=32.8\text{cm}$ 、横補強筋比 $p_w=0.2\%$ 、 $\sigma_0=0$ 、コンクリート強度 $\sigma_B=300\text{kg/cm}^2$ 級、単調引張加力としたものである。側方被り厚 C_0 は、梁筋を柱筋の内側に配した場合の実用配筋としての縮尺模型における最小幅であり、側方割裂破壊が生じないことを藤井らの提案する耐力式[2]によって確かめている。その他の試験体は、表-1に示す実験変数のみを基準試験体と異にする

ものである。なお、有効定着幅を変数としたLA12-1は、図-1に示すように梁筋折曲げ部の内側接合部から梁筋直線部水平面のコンクリートを介して下柱側コンクリートに伝達される剪断力の有無を調べる目的で、梁筋の直線部から折曲げ部1/8円弧までの区間に付着絶縁板を柱コア幅で梁筋下部に取り付け、板を挟む上下のコンクリート間の水平方向伝達力を無くした試験体である。また、LA12-2はこれとは逆に梁筋位置で一体となるコンクリート面を増やすために梁筋を2本に限った試験体である。

本年度の試験用に用いた鉄筋および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以下の砕石を使用している。梁筋(D19)は降伏しないように全て高強度鉄筋を用いたが、柱筋(D16)および帯筋(6φ)のうち過年度の試験で 800kg/cm^2 級コンクリートの場合のみに高強度鉄筋を使用した[1]。

2.2 加力方法

梁筋は柱梁接合部内への定着を想定しているので、実架構の地震時応力状態を模擬するために図-2及び図-3に示すように油圧ジャッキAにより引張力 P_1 を梁筋端に加え、梁圧縮側の反力 R_1 は仮想梁の圧縮筋位置に仮想梁せいの0.2倍幅の鋼板を介して支持し、上下の柱剪断力が等しくなるように分岐弁を介して $P_2(=P_1 \cdot j_b/1750)$ を上柱の油圧ジャッキBで加力した。4本(LA12-2では2本)の梁筋は、柱面から5cmの位置での変位が同一となるように载荷しているので、鉄筋力は相互に若干異なる。柱軸力 N を与える LA8シリーズは図示していないが、試験体上下に別途の加力用鋼製梁とジャッキを設置し、試験装置の安全性の都合上加力初期では $N=6P_1$ の割合で载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、最大耐力 P_{1max} のおよそ15~47%程度であり最大耐力への影響はないが、LA8-2のみ所定の半分程度の軸力で初

表-2 使用材料の力学的性質

鉄筋	σ_y kg/cm ²	ϵ_y μ	σ_{MAX} kg/cm ²	伸び率 %
D 1 9	7290	3580	9750	13.0
D 1 6	3870	2260	5770	21.1
6 φ	3960	1870	5270	25.5

コンクリート	σ_B kg/cm ²	ϵ_u μ	$E_{1/3}$	$E_{2/3}$
基準	315	2750	2.18	1.96
LA10-2	234	2800	2.09	1.78
LA10-3	775	3280	3.36	2.99

E : 弾性係数 ($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)

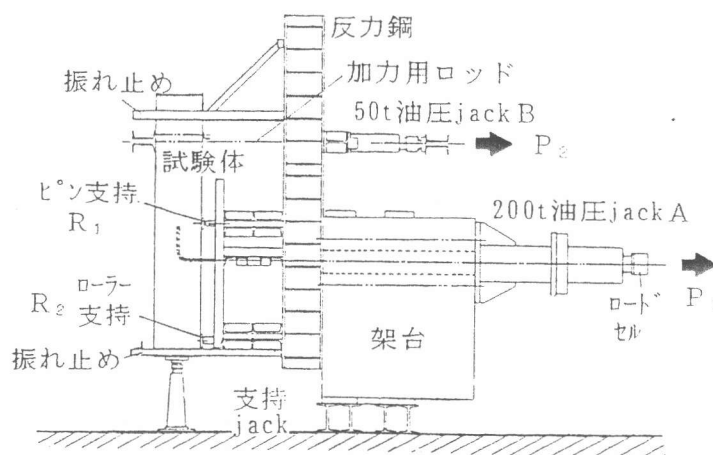
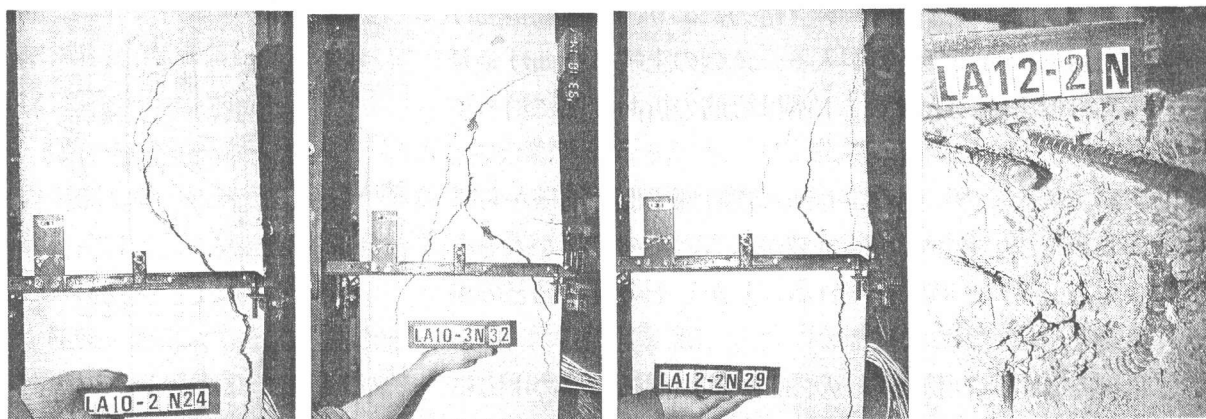


図-2 加力装置



(a) LA10-2

(b) LA10-3

(c) LA12-2

写真-(d)

写真 最大耐力時の2倍変形時の亀裂状況

試験後の解体による
内部亀裂状況

亀裂が発生したため初亀裂耐力では亀裂発生時の軸力を用いた。

2.3 計測方法

各梁筋の抜け出し変位、梁筋折曲げ開始点の滑り変位(詳細は[1]参照)の他に、主要な位置の鉄筋歪と定着部内側コンクリート歪を歪ゲージで計測し、接合部パネルの側方膨らみ、パネル4隅の鉛直・水平方向の変形、柱軸方向変形等を計測した。

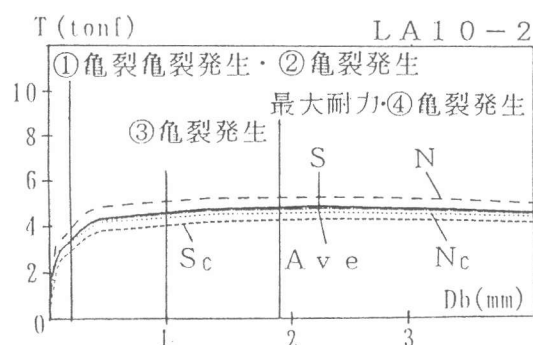


図-3 梁筋力-梁筋変位関係

3. 実験結果および考察

3.1 亀裂及び破壊性状

合計28体の試験体はいずれも梁筋が降伏する事なく、概ね掻き出し破壊によって定着耐力に達したものと判断される。図-3に典型的な掻き出し破壊試験体LA10-2の梁筋引張力 T -梁筋変位 Db 関係を例示する。掻き出し破壊は、亀裂面が柱幅を貫通して、梁筋の折曲げ部を頂点として梁側に広がる台形または三角形状の亀裂として柱側面に現れ、この亀裂面に囲まれるコンクリートが損傷の少ないまま塊状に引き出される破壊状況を呈するもので、写真(a)に典型的な掻き出し破壊試験体LA10-2を例示する。しかし、定着長の長いLA1-3や剪断補強筋比の高いLA7-2のように折曲げ筋の内側のコンクリートに多数の剪断亀裂を発生するもの(文献[1]の写真参照)、写真(b)に示す高強度コンクリートを用いたLA10-3のように主要な亀裂面が接合部対角線を貫通するもの、写真(c) LA12-2のように側方被り厚が大きいために亀裂面がこの被り厚の中で水平に折れ曲がって3次元的なコーン状破壊が生じるものなど、他の破壊要因がある程度混在する場合は観察された。

全試験体の亀裂性状から、破壊に至るまでの代表的な亀裂発生過程はおおよそ次の5段階に集約できる。以下の○内数字は、亀裂の発生順位を示すと共に、図-4の亀裂パターンに示される位置に発生する亀裂に対応している。

①亀裂：梁筋折曲げ部の内側すなわち柱梁接合部内に生ずる剪断力により、梁主筋折曲げ終点付近から梁圧縮反力位置に向かう剪断(初)亀裂が発生する。しかし、多くの場合にこの亀裂の幅は広がらず、定着破壊を支配する主要な亀裂とはならない。

②亀裂：折曲げ終点部の割裂き応力により、梁主筋折曲げ余長部に沿って鉛直な亀裂が入る。亀裂の上端は折曲げ余長部の中央付近までの範囲で、下端は梁筋の折曲げ部に沿って曲がり下柱の内側に傾斜する。

③亀裂：最大耐力に至る少し前に接合部梁側圧縮域から外側に向かって浅い角度で剪断亀裂が入る。この亀裂が入ると明瞭な耐力低下が一時的に現れる。しかしその後、殆どの場合に亀裂幅が広がることは無い。

④亀裂：②亀裂の下端が柱の内側主筋位置まで斜め下方に伸展し、更に主筋沿いに伸びる。一部の試験体を除いてこの亀裂面での滑り破壊と柱筋の局部的曲げ変形によるダボ効果の低下によって最大耐力に達し、その後耐力低下と共に②—

④亀裂面に囲まれるコンクリート塊が梁圧縮反力点を中心とした回転変形を始める。

⑤亀裂：④の回転変形に伴って、②亀裂の上端が梁圧縮反力位置に向かって伸展する。

基準試験体LA1-1を含めて、多くの試験体は上述の亀裂パターンに沿って推移し、最大耐力は折曲げ部と梁に挟まれるコンクリート塊が、梁圧縮反力点を中心とする回転を伴って、下柱頭部の斜め亀裂面が滑り破壊することによって耐力にいたる場合が多く、梁筋直線部の付着耐力と折曲げ部の支圧耐力の累加で表される破壊形式とは異なっている。しかし、実験条件によっていくつかの試験体は、亀裂発生順序が替わったり、①から⑤に相当する亀裂の一部が生じない場合が見られるため、本研究で用いた実験変数と亀裂及び破壊性状への影響を図-5を用いて以下に述べる。

(1) 梁筋余長部位置 L_{dh} ($=$ 水平投影定着長 $l_{jh} - d_b/2$) :

定着長が大きくなりスラット角度が 45° に近づくとき②亀裂は発生せず、入力剪断力が高いために複数のくの字形の剪断亀裂が支配的となり、接合部剪断耐力に近づく(図-5、LA1-3)。

(2) 梁の応力中心間距離 j_b :

応力中心間距離が短くなるとスラット角が小さくなり、③の剪断亀裂が浅い角度で発生し②の亀裂につながる。このため⑤の亀裂は発生せず、代わりに③の亀裂が拡幅し、主要な亀裂となる(図-5、LA2-1)。

(3) コンクリート被り厚 C_0 :

接合部内における梁主筋側方のコンクリート被りが厚くなると、②の亀裂が梁主筋余長部位置よりも内側に発生し、亀裂は上下に長く伸展する。これは②の亀裂面が平面上でも被り厚の中で最外縁の梁筋位置から前方に折れ曲がるためであり、全体として3次元

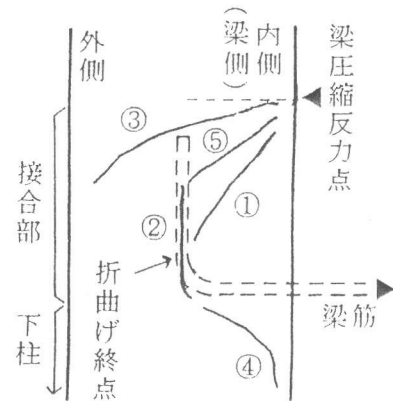
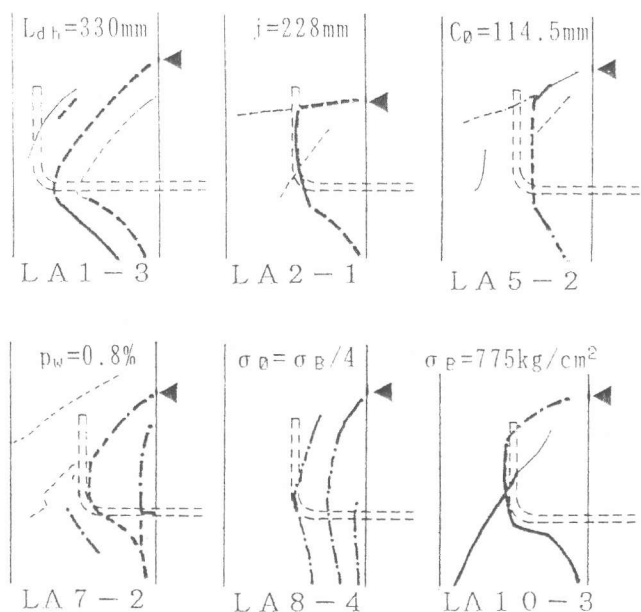


図-4 亀裂パターン



—最大耐力付近 ———最大耐力前 ———最大耐力後
※太線は変形とともに拡幅して破壊を支配する亀裂

図-5 亀裂発生過程

的なコーン状破壊面が形成される(図-5、LA5-2)。このことは実験終了後の試験体を解体して確認された(写真(d)、LA12-2)。

(4) 接合部横補強筋量 p_u :

接合部の横補強筋比が高くなると④の亀裂が入った時点でも耐力は増大上昇するが、入力剪断力が高くなるため剪断亀裂が多数生じ、それぞれの亀裂幅が拡幅して最大耐力に至る。また、柱の外側に達して接合部の対角線を貫通する剪断亀裂が生ずる(図-5、LA7-2)。

(5) 柱軸力 σ_B :

柱軸力が高くなるほど①と④の斜め亀裂の角度が急になり、接合部に比べて剪断力の小さい下柱内の④亀裂は②亀裂と区別できない程に鉛直に近くなってくる。高軸力になるほど、中立軸が梁側に移動するため折曲げ定着部に伝わる軸力が大きくなり、①亀裂に沿うストラット圧縮力が増大し、 $\sigma_B = \sigma_B/3$ ではストラットの圧壊が生じる(図-5、LA8-4)。

(6) コンクリート強度 σ_B :

亀裂パターンに変化はないが σ_B が高くなると破壊が主要な亀裂に集中し、④亀裂の発角度が緩くなり、この亀裂を挟むコンクリートの滑り破壊が耐力を決める(図-5、LA10-3)。

(7) 梁主筋折曲げ余長部長さ L_t :

L_t を基準試験体の半分 ($6d_b$) とした試験体では、②の鉛直方向余長部沿いの亀裂が発生せず④亀裂へ伸展するため、①と④のくの字形亀裂が主要な亀裂になった。余長部が短いため接合部上部への引き抜き応力の伝達が小さくなり③の剪断亀裂が生じない。

(8) 梁筋の上下のコンクリートの分離効果 :

亀裂パターンはほぼ基準試験体と同様であり、絶縁板を挟む上下のコンクリート相互の水平剪断力に対する応力伝達の絶縁性能が予定通りに発揮していたかが疑問となる。しかし、②亀裂の梁側コンクリート塊が梁圧縮反力点を中心として回転する際絶縁板を下方に押し出して変形するため、絶縁板に沿う水平方向の滑り抵抗よりも柱による上下方向の拘束力が支配的となり、絶縁板の分離効果の影響は小さいと言える。

3.2 剪断初亀裂耐力の検討

表-3 に剪断初亀裂発生時の接合部剪断力実験値 $exp Q_j$ および計算値 $cal Q_j$ を掲げた。実験値 $exp Q_j$ は、接合部に観察される剪断初亀裂(前項の①または⑤亀裂)発生時の梁筋合力 P_1 から柱剪断力 P_2 を差し引いた値である。多くの場合に①亀裂が初亀裂となるが、⑤亀裂の場合や①と⑤が判別し難い場合も生じている。計算値

表-3 剪断初亀裂耐力一覧

試験体	$exp Q_j$	σ_B	$cal \tau_j$	$cal Q_j$	exp/cal	亀裂位置
LA1-1	12.9	315	19.5	12.3	1.05	①or⑤
LA1-2	8.2	327	19.9	8.5	0.96	①
LA1-3	11.6	382	21.5	21.9	0.53	①or⑤
LA2-1	15.8	358	20.8	13.1	1.21	①
LA2-2	13.7	358	20.8	13.1	1.05	①or⑤
LA2-3	13.7	277	18.3	11.5	1.19	①
LA3-1	8.2	331	20.0	9.0	0.91	①or⑤
LA3-2	11.4	361	20.9	16.3	0.70	①
LA4-1	14.6	354	20.7	11.8	1.24	①or⑤
LA4-2	13.1	355	20.7	14.2	0.92	①or⑤
LA4-3	18.4	329	20.0	18.3	1.01	①or⑤
LA5-1	14.8	335	20.1	14.7	1.00	①
LA5-2	17.4	355	20.7	17.3	1.00	①
LA5-3	18.3	320	19.7	18.0	1.01	①or⑤
LA6-1	16.3	359	20.8	13.1	1.25	①
LA7-1	12.8	327	19.9	12.5	1.02	①
LA7-2	16.1	316	19.6	12.3	1.31	⑤
LA8-1	22.8	380	47.7	30.0	0.76	①or⑤
LA8-2	11.5	398	41.9	26.3	0.44	①
LA8-3	19.9	305	28.8	18.1	1.10	①
LA8-4	24.7	292	41.9	26.4	0.94	①or⑤
LA9-1	12.4	312	19.4	12.2	1.02	①or⑤
LA10-1	16.8	487	24.3	15.3	1.10	①
LA10-2	11.7	234	16.8	10.6	1.11	①
LA10-3	6.7	775	30.6	19.2	0.35	⑤
LA11-1	13.3	297	19.0	11.9	1.11	⑤
LA12-1	15.0	276	18.3	11.5	1.30	①
LA12-2	13.3	292	18.8	11.8	1.13	①

$exp Q_j, cal Q_j$ (tonf), $\sigma_B, cal \tau_j$ (kg/cm²)

$$cal \tau_j = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_B \cdot \sigma_t} \quad \text{----- (1)}$$

$$cal Q_j = cal \tau_j \cdot b_c \cdot l_{dh} \quad \text{----- (2)}$$

$$cal Q_j = cal \tau_j \cdot b_c \cdot D_c / 1.5 \quad \text{----- (3)}$$

b_c : 柱幅 D_c : 柱せい l_{dh} : 水平投影定着長

$$\sigma_t = \beta \sqrt{\sigma_B}, \beta = 1.1$$

cal Q_j は、同表に示す(1)式により剪断強度を定め、(2)式により接合部剪断力に換算しているが、これは①亀裂の発生位置を考慮したもので接合部有効せいに水平投影定着長 l_{dh} を用いている。引張強度換算係数 β は、著者らの外柱梁接合部実験結果 [3] によれば、同様の計算法を用いた場合に実験結果に適合する範囲は 1.0 から 1.5 に分散しているが、本報では表-3、図-6 に示す様に $\beta = 1.1$ として求めた値は平均的によく対応する。

接合部対角線上の柱中心近傍に明瞭に⑤亀裂が発生した3個の試験体について、柱全せいを有効せいと見なして(3)式で計算値を求めた結果を同図に○で示した。高剪断補強の LA7-2 では実験値によく対応し、剪断補強筋を介して梁筋力が柱の背面に有効に伝達されるためと理解される。また、計算値に対する比が 0.6 を下回る試験体 LA1-3、LA8-2、LA10-3 は、同一変数の試験結果から判断して変量の変化に伴う本質的な影響ではなく、乾燥収縮応力などの特異な条件によるものと考えるが、これらを含めて ± 0.2 を越える誤差を有するものについては、更に検討を要しよう。

4. 結 語

昨年度に引続き RC 柱梁接合部に定着された 90° 折曲げ梁筋の掻き出し定着破壊性状に及ぼす各種の影響要因について 28 体の試験体を用いて実験的検討を行った。実験結果のうち、亀裂発生過程と破壊性状について検討し、定着耐力は主として梁筋折曲げ部から発生する柱側への斜め亀裂の耐力に依存していることを明らかにし、影響因子との関係についても論じた。また、接合部剪断初亀裂耐力については、一般に主応力度式と水平投影定着長を用いて推定できることを示したが、いくつかの試験体については検討の余地を残している。今後は、上記の破壊性状に基づく耐力式を再提案し、荷重変形関係の推定法の提案を行う予定である。

【謝辞】本研究の遂行に当たり、北海道大学工学研究科大学院修士課程 宮本泰志、五十嵐雅彦両君、北海学園大学工学部 4 年 佐藤 武君らの協力を得た。記して謝意とする。

【参考文献】 [1] 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、15-2、1993 [2] 藤井栄・森田司郎・川上修司・山田稔明「 90° 折曲げ鉄筋の定着耐力の再評価」日本建築学会構造系論文報告集、No.429、1991 [3] (例えば) 城 攻・後藤康明・柴田拓二「高強度材料を用いた RC 外部柱梁接合部の剪断抵抗性能」コンクリート工学年次論文報告集、14-2、1992

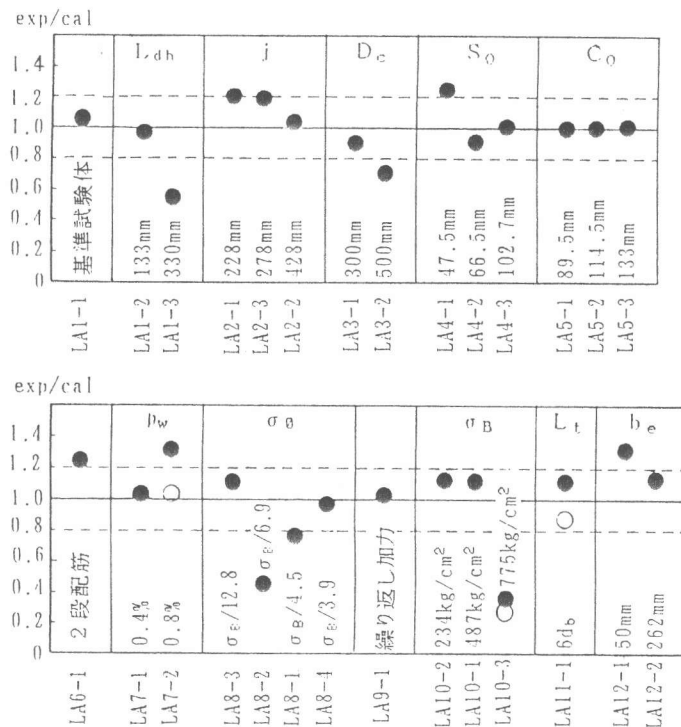


図-6 剪断亀裂発生耐力の

計算値に対する実験値の比