

# 論文 RC造柱梁十字形接合部の破壊機構に関する基礎的研究

上原修一<sup>\*1</sup>・西田 朋美<sup>\*2</sup> 江崎 文也<sup>\*3</sup>

要旨: これまでに, 柱梁接合部の破壊を梁のめり込みと捉える解析法を提案した。ここでは, その妥当性を検証するため, 小型試験体2体の破壊実験を行った。その結果, 接合部の破壊時に梁のめり込みが認められた。さらにそのめり込み量は, 現行の配筋程度( $p_w=0.32\%$ )であれば, 引張り側のひび割れ幅と同程度になる場合があることがわかった。さらに, 面外方向に中子筋を配筋すれば, そのめり込みをある程度抑制でき, 接合部の靱性能を向上させ得ることがわかった。

キーワード: めり込み, ストラット, 破壊機構, 有効係数, せん断

## 1. はじめに

近年 RC造柱梁接合部の破壊機構や補強方法に関する研究が活発に行われている。破壊機構については, 従来から接合部の破壊は, 図-1(a)に示すようにせん断破壊として考えられてきた<sup>1)</sup>が, 最近, 塩原らの「接合部の曲げ破壊」と捉える方法<sup>2)</sup>が評価されつつある。

一方, 著者らは, 図-1(b)に示すように接合部の破壊を「梁のめり込み」として捉えることを提案した<sup>3)</sup>。それは, 既往の試験体の破壊状況<sup>4)</sup>および既往の研究におけるFEM解析において接合部内部の破壊が著しいこと<sup>5)</sup>, および現行の接合部強度評価において接合部内部の有効幅を考えている<sup>1)</sup>ことなどから, 塩原らのように接合部全厚の破壊として捉えるより, 接合部内部の破壊として捉える方が適切であると考えためである。また, そうすることにより, 梁端部危険断面をはさみ, せん断ひび割れにより相対的に接合部コンクリートの強度が低下している場合は接合部の破壊, 低下していない場合は梁端部の破壊と, 接合部コンクリートのみの性状に基づき破壊性状を明快に説明することができる。

文献3)では, 提案式に基づき既往の試験体を用いてその強度について検討し, めり込みと評価しても良好な結果が得られることを示した。しかしながら, 実際にめり込みが生じていることを明らかにするためには, 破壊実験が必要であると考えられた。

そこで本研究では, 「接合部が破壊する時に梁のめり込みが生ずることの確認」および「めり込みを防ぐための基礎的な検討」を目的として, 2体の小型試験体(実物の1/3程度)の破壊実験を行った。その実験結果と解析結果に基づき, めり込み破壊機構の妥当性を論ずる。

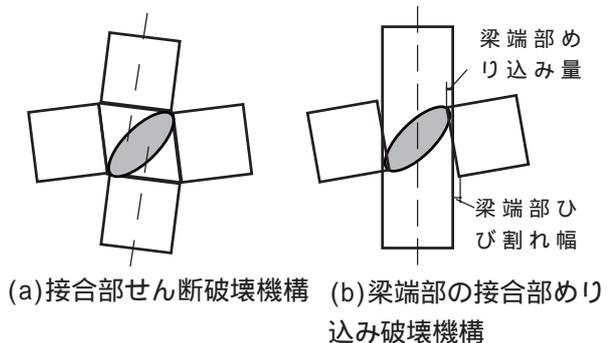


図-1 十字形接合部せん断破壊機構と梁端部の接合部めり込み破壊機構

表-1 試験体一覧

試験体番号	試験体名	梁主筋定着板	面外中子筋
No.1	2003-IJ1	なし	なし
No.2	2003-IJ2	あり	あり

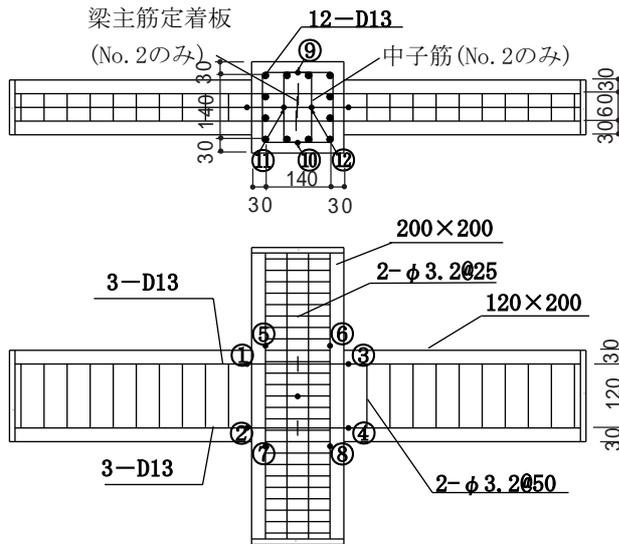
表-2 使用材料の力学的性質

(a) 鉄筋					(b) コンクリート	
種別	呼び名	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び率 (%)	試験体	圧縮強度 (MPa)
なまし鉄線	Φ3.2	204	306	31.1	全試験体	19.6
SD345	D13	355	562	22.4		

\*1有明工業高等専門学校 建築学科 教授 博士(工学)(正会員)

\*2有明工業高等専門学校 元専攻科生 学士(工学)(正会員)

\*3九州共立大学工学部 建築学科 教授 工学博士(正会員)



- ① 北側梁上端筋
- ② 北側梁下端筋
- ③ 南側梁上端筋
- ④ 南側梁下端筋
- ⑤ 上柱北側主筋
- ⑥ 上柱南側主筋
- ⑦ 下柱北側主筋
- ⑧ 下柱南側主筋
- ⑨ 接合部東面帯筋
- ⑩ 接合部西面帯筋
- ⑪ 接合部中子筋北 (No.2のみ)
- ⑫ 接合部中子筋南 (No.2のみ)

図-2 試験体形状・配筋およびゲージ貼付位置図

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1に、本実験の試験体一覧、表-2に使用した材料の力学的性質を示す。図-2に試験体の形状、配筋およびひずみゲージの貼付位置を示す。接合部を破壊させるために、コンクリートをやや弱く設計したことを除けば一般的な材料と言える。試験体は、実物のほぼ1/3程度であり、コンクリートは接合部面外方向から横打ちとした。配筋は、著者らが提案した解析法<sup>3)</sup>を用いて、No.1については梁端部が曲げ降伏する前に接合部が破壊するように設計した。ただし、No.2試験体については、図-2に示すように梁主筋を定着させるために、穴のあいた厚さ4mmの38mm角の鋼板を接合部内で、個々の梁主筋すべてに溶接した。さらに、接合部の面外方向へのはらみ出しを防ぐために、中子筋を配筋した。接合部の帯筋比 $p_w$ は、中子筋を除き、両試験体とも0.32%である。

ひずみゲージは、図-2に示すように、梁柱端部主筋のほか、接合部の帯筋および中子筋に貼付した。

### 2.2 加力方法と変形測定装置

図-3に示す加力装置により、柱端部をローラー支

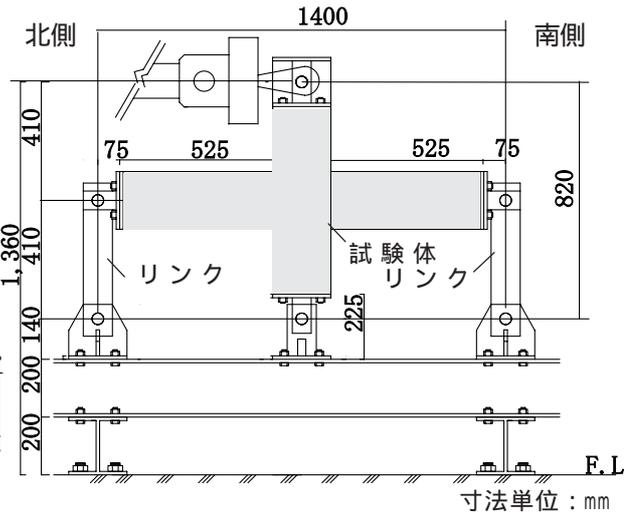


図-3 加力装置(西面)

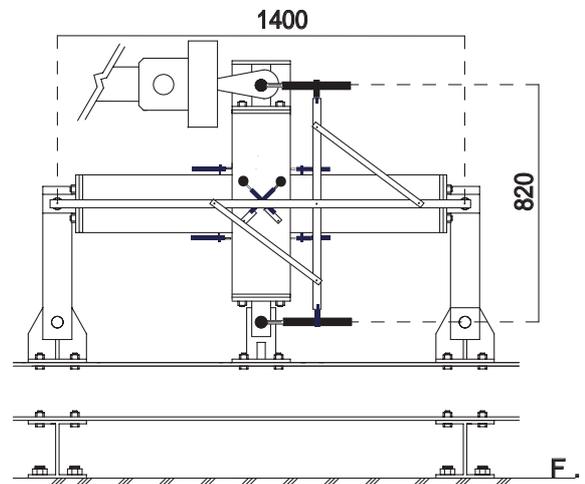


図-4 変形量測定装置(西面)

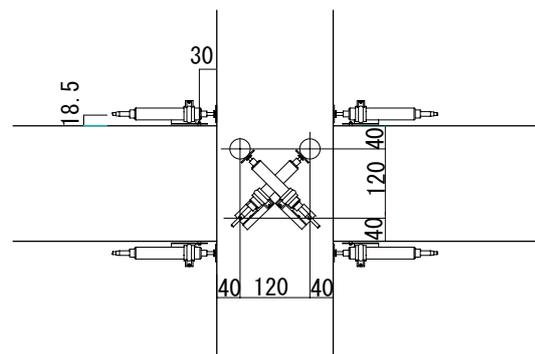
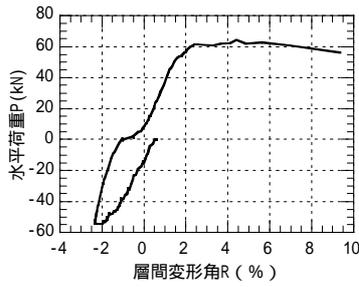
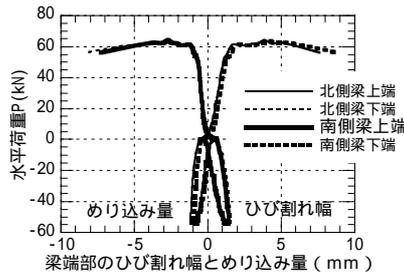


図-5 接合部回りの変位測定装置(西面)

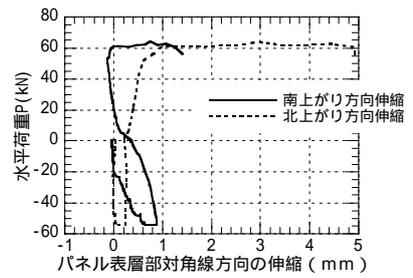
持、柱脚部をピン支持として、柱頭に水平力を載荷した。本実験では、軸力が接合部強度に影響しないといわれていることから、軸力は加えていない。また、予備実験の意味もあることから単純に、まず、南方向に接合部にせん断ひび割れが出る程度まで押し、



(a) 水平荷重と層間変形角の関係



(b) 水平荷重とめり込み量の関係



(c) 水平荷重とパネル部分の変形の関係



(d) 全体の破壊状態(東面)



(e) パネル部分のひび割れ(東面)



(f) 梁のめり込みによるひび割れ

図-6 試験体 No.1 の実験結果

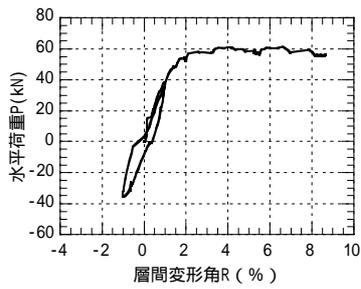
反転させて逆方法にせん断ひび割れを発生させたのち、単調に南側方向に試験体が破壊するまで荷重した。梁に加わるせん断力は釣り合いから求められるが、梁外端のリンクにもひずみゲージを貼り、力を確認することとした。

図-4に変形量測定装置を示す。梁外端のピンからボルトを出して、そこに測定フレームを設置し、柱底部および頂部のピン位置の変位を測定し、その変位の差を柱のピン距離で除して層間変形角とした。また、図-5に示すように梁端部の上下面から柱に向けて変位計を設置し、変位計が元の位置から押し込まれる時の読みをめり込み量とし、出る時の読みをひび割れ幅と定義した。さらに、接合部パネルのせん断変形を測定するために、図-5に示すように接合部パネル対角線方向の変位を測定した。なお、せん断変形測定用の変位計およびターゲット用のボルトは深さ約20mmまで埋め込んでいることから、かぶりコンクリート部分のせん断変形量を測定することになる。

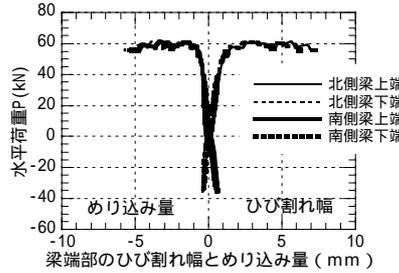
### 3. 実験結果

図-6にNo.1, 図-7にNo.2の実験結果を示す。図-6(a)に水平荷重と層間変形角の関係を示すが、初め

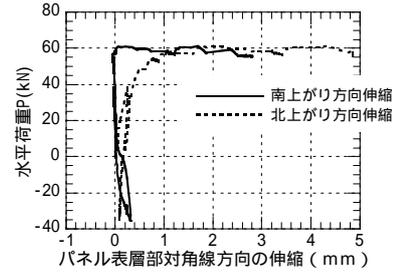
の正方向への荷重では面外支持が不十分でねじれたことから、実験結果を削除している。設計では、梁主筋降伏前に接合部破壊するようにした(表-3参照)が、実際には終局時以前に梁主筋は降伏した。層間変形角が5%程度の際に、接合部の変形が急増し水平荷重が低下した。その時、図-6(b)に示すように、梁のめり込み量も急増していることがわかる。また、その大きさは梁危険断面に生じた1本の引張りひび割れ幅と同程度になっている。なお、ここでのめり込み量計測値には、変位計の梁面から18.5mmのずれの影響、接合部のせん断変形角の影響や梁端部コンクリートの圧縮ひずみなども含まれるが、梁危険断面の極めて近傍であることから、これらの影響を無視している。変位計の梁面からのずれの影響は、中立軸深さ比  $x_{n1}$  (= 中立軸深さ  $x_n$  / 有効せい  $d$ ) が0.5の場合(図-9参照)は、めり込み量計測値が梁面の値の1.22倍(= (18.5mm + 0.5 × 170mm) / (0.5 × 170mm))になる。めり込み量計測値に及ぼすせん断変形角の影響の評価は難しいが、測定した表層部のせん断変形角を用いれば、後の図-8に示すように最大  $\approx 2\%$  であり、よってその影響によるめり込み量測定値に及ぼす過大評価量は最大で0.37mm(= 0.02 × 変位計の梁面からの距離18.5mm)で、終局時にはめり込み



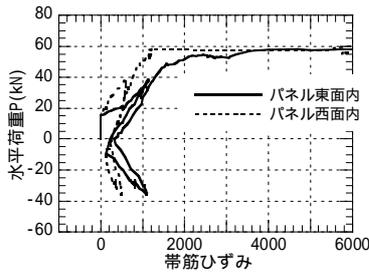
(a) 水平荷重と層間変形角の関係



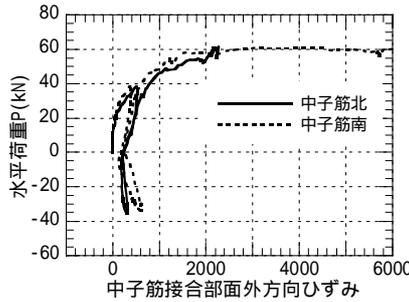
(b) 水平荷重とめり込み量の関係



(c) 水平荷重とパネル部分の変形の関係



(d) 水平荷重と接合部帯筋ひずみの関係



(e) 水平荷重と中子筋パネル面外方向ひずみ



(f) 全体の破壊状態(東面)

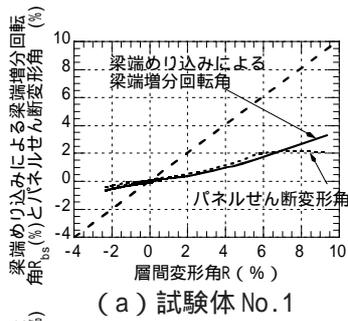
図-7 試験体 No.2 の実験結果

量測定値の 4.6% (=0.37mm/No.1 の終局時の測定値 8mm)程度を占めていると見積られる。このように、めり込み計測値は実際のめり込み量を過大に評価することになるが、中立軸がほぼ断面中心(図-9参照)にあることから、相対的には、めり込み量はひび割れ幅と同程度といえる。コンクリートの圧縮ひずみは最大で 0.09mm (=0.003 × 柱面からの距離 30mm)、1.1% (=0.09mm/8mm)程度を占める可能性がある。

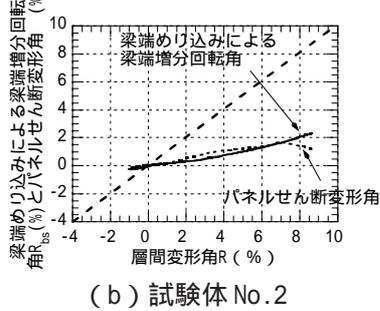
図-6(c)からパネル表面は終局時ほぼ2方向に引張りの状態にあることがわかる。終局時、柱主筋は降伏していない。また、図-6(d)、(e)から接合部パネル部分の斜めひび割れが顕著であることがわかる。しかし、この大きいひび割れはかぶりコンクリートにとどまっており、接合部内部はより細かいひび割れが見られた。これらのことから、終局時には接合部のかぶり部分は圧縮ストラットとしては抵抗せず、主に接合部内部のコンクリートが不十分ながらも拘束された状態で圧縮ストラットとして抵抗している状況がうかがえる。図-6(f)は梁のめり込みによって生じたと考えられる柱のひび割れを示す。外側に膨らんでいる様子がわかる。パネル表面でも、コ

ア内部のコンクリートが膨張して面外にはらみ出していることが観察された。なお、接合部帯筋のひずみはひずみゲージの損傷のため測定できなかった。

図-7(a)に No.2について水平荷重と層間変形角の関係を示す。接合部を定着板と中子筋で補強していることから、層間変形角が8%に至るまで安定した挙動を示した。図-7(b)にはめり込み量を示すが、梁のめり込みも75%程度(=No.2の終局時めり込み量 6mm程度/No.1の終局時めり込み量 8mm程度)に抑制されていることがわかる。つまり、接合部の圧縮ストラットが破壊して面外に膨らむことが中子筋により抑制され、その結果、梁端部の圧縮部のめり込みが抑制されたものと考えている。ただし、ある程度接合部が壊れないと中子筋が力を発揮しないことから、No.2でもめり込みが観察された。以上のように、これまでも面外方向拘束の効果が報告されている<sup>6)</sup>ように、接合部の靱性に及ぼす中子筋の面外方向の拘束の効果があらわれているものと考えられる。梁主筋は終局時まで降伏していた。また、図-7(c)はNo.1と大差ない。図-7(d)から、終局時まで接合部帯筋は降伏している。

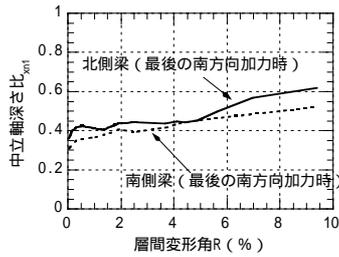


(a) 試験体 No.1

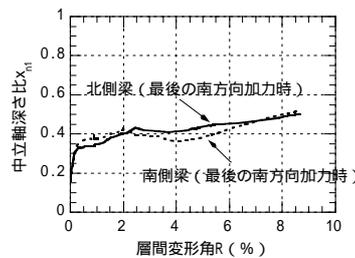


(b) 試験体 No.2

図-8 層間変形角と梁端めり込みによる梁端増分回転角およびパネルせん断変形角の関係

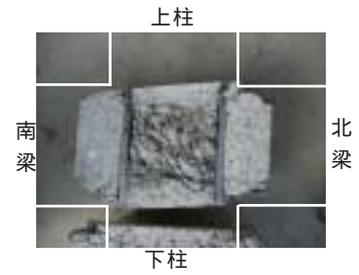


(a) 試験体 No.1

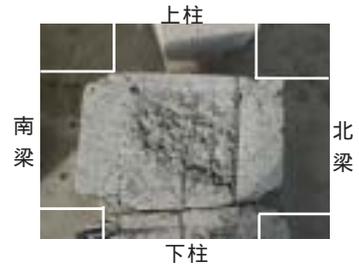


(b) 試験体 No.2

図-9 層間変形角と梁危険断面の中立軸深さ比 $x_{n1}$ の関係



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2

図-10 接合部中央部の破壊状況(切断写真)

図-7(e)は中子筋のひずみの変化を示すが、梁主筋の降伏以前から、中子筋に引張力が生じ、最終的には降伏することがわかった。図-7(f)に示す終局時の破壊状況をみると、かぶりコンクリートに大きなひび割れはみられるが、全体的にNo.1より接合部の損傷が少ないことがわかる。また、パネル表面でもコア内部コンクリートのはらみ出しは見られなかった。

なお、定着板は梁主筋の定着破壊を防止するものとして設けたが、No.1試験体の梁主筋が降伏したため、強度上昇効果の評価はできなかった。定着板の効果については、今後の検討課題としたい。

#### 5. 層間変形角に及ぼすめり込み量の影響について

図-8に梁端めり込みによって増える梁端回転角 $R_{bs}$ および接合部パネル表層部のせん断変形角と層間変形角 $R$ の関係を示す。ここで、 $R_{bs} = (\text{めり込み量の計測値}) / (\text{梁せい} 200\text{mm} + 18.5\text{mm} \times 2)$ で算定した。一方、 $R$ は接合部パネル表層部の対角線方向のひずみ度の差である<sup>7)</sup>。

図-8(a)からわかるように、 $R_{bs}$ は層間変形角に対し漸増していることがわかる。特に、 $R=5\%$ 以降傾きが大きくなっている。その間に接合部の破壊が大きく進展していることから、梁危険断面におけるめり

込みが接合部の破壊に大きく影響していると考えられる。

その時、 $R=6\%$ 以降ほとんど変化がないことから、接合部パネル表層部のせん断変形は接合部内部の破壊進行とは独立な状態にあると考えられる。

図-8(b)のNo.2試験体については、中子筋でめり込みがある程度抑制されていることから、図-8(a)より $R_{bs}$ が小さくなっている。接合部パネルせん断変形角は、No.1の結果と同様に、 $R=6\%$ 以降ほぼ一定に推移していることがわかる。

図-9に、層間変形角 $R$ と梁危険断面の回転量から求めた中立軸深さ比 $x_{n1}$ の関係を示す。両試験体とも0.4から0.6程度を推移している。

図-10に、接合部中央部の切断写真を示す。No.1の方がNo.2より破壊範囲が広く、破砕粒も大きいことがわかる。

#### 6. 実験値と解析値の比較

表-3に、接合部パネルのせん断ひびわれ発生時と接合部破壊時の水平荷重について、計算値と実験値を示す。接合部パネルのせん断ひびわれ強度については、両試験体ともほぼ良く予測できていることがわかる。接合部破壊時の水平荷重については、No.1

表-3 水平強度に関する解析結果一覧

試験体番号	試験体名	接合部せん断ひび割れ時水平力 ( $q_{cc}^{*1}$ )		接合部破壊時水平力 ( $q_{cu}^{*1}$ )			
		計算値 <sup>*2</sup>	実験値	計算値 <sup>*3</sup>	計算値 <sup>*4</sup>	計算値 <sup>*5</sup>	実験値
No.1	20003-IJ1	0.0226	0.0281	0.0568	(0.0805)	0.0523	0.0818
No.2	20003-IJ2	0.0226	0.0200	-	0.0805	0.0523	0.0778

\*1 水平力を柱面積 ( $b_c D_c$ ) とコンクリート強度  $f_c$  で除したものを。

\*2 文献8)の2.5式による。

\*3 梁主筋定着破壊時の強度。文献3)の(4)式,(6)式による。-は定着板使用のため,対象外であることを示す。

\*4 梁主筋塑性降伏時の強度。文献3)の(3)式,(6)式による。( )は定着破壊時の強度と塑性降伏時の強度のうち,大きい方を示す。小さい方の破壊形式に支配されると予測する。

\*5 靱性保障型計算値による強度。文献1)の8.3.1式による。ただし,安全率1/0.85は除く。

では,著者らの提案解析法によれば梁主筋は降伏しないと想定されたが実験では降伏した。また,靱性保障型指針の式よりも実験値はかなり大きい。これは,各算定式の精度の問題のほか,本実験では荷重の繰り返し回数が少ないことなどが原因と考えられる。

なお,靱性保障型計算値による接合部せん断強度  $Q_{ju}$  から柱せん断力  $Q_{cu}$  への換算は,RC規準書<sup>9)</sup>に従い式(1)によった。

$$Q_{cu} = \frac{\xi}{(1-\xi)} Q_{ju} \quad (1)$$

ここで,  $\xi$ : RC規準書に示す定義と同じである。

## 7. 結論

これまでに提案した,梁のめり込み機構に基づく接合部強度評価法について,その妥当性を実験的に検討したところ,以下のことがわかった。

- (1) 接合部が破壊する時,梁のめり込み現象が認められた。そのめり込み量は現行の配筋( $p_w=0.32\%$ 程度)であれば,引張り側のひび割れ幅と同程度になる場合がある。
- (2) 面外方向に中子筋を配筋すれば,そのめり込みをある程度抑制でき,接合部の靱性能を向上させることができる。つまり,接合部の靱性能向上のためには,接合部の面外補強が有効である。

今後は,接合部挙動に及ぼす定着板の効果を明確にする。また,梁が偏心した接合部の破壊が,現状ではねじれの影響と説明されている。しかし,立体的な実構造物ではねじれの影響は少ないとも考えられる。提案しているめり込み破壊機構に基づけば,梁が外方向に偏心した接合部の破壊は面外拘束の減少のためとも説明できる。このような問題に取り組みたい。

## 謝辞

本実験は,有明高専上田康介,楠田飛鳥,林勇樹,福島達人の各氏の卒業研究の一環として行ったものである。また,実験にあたっては,有明高専技官松原征男氏,田中三雄氏の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 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,第8章,pp241-277. 1999.8月30日第2版
- 2) SHIOHARA, H: "A New Model for Shear Failure of R/C Interior Beam-Column Connections," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No.2, pp.152-160, Feb. 2001
- 3) 西田朋美,上原修一:めり込み機構に基づくRC造柱梁十字形接合部の強度評価法に関する研究,コンクリート工学年次大会論文集,Vol.25, No.2, 2003, pp505-510
- 4) 市之瀬敏勝:「はり柱接合部選定試験体」選定理由および実験データの概要,日本コンクリート工学協会,RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム,解析モデル検証用試験体の実験データ集,pp.21-40, 1983.10
- 5) 村上公洋,後藤康明,城攻:RC造内部柱梁接合部のせん断機構に関する3次元有限要素解析,コンクリート工学年次大会論文集,Vol.25, No.2, 2003, pp523-528
- 6) 河口俊郎ほか:高強度鉄筋と高強度コンクリートを用いた柱・はり接合部の実験,コンクリート工学年次大会論文集,Vol.12, No.2, 1990, pp.627-632
- 7) ティモシェンコ,グーディア,金田潔監訳:弾性論,コロナ社,1979, p.24
- 8) 日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料,はり・柱接合部(1),pp116-120, 1991.9
- 9) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,第15条,pp15-18. 2002.4月20日第7版