

# 論文 梁が曲げ降伏する内柱・梁接合部の破壊を抑制する斜補強筋の効果

石橋 一彦<sup>\*1</sup>・鈴木 武文<sup>\*2</sup>

要旨：梁曲げ降伏後に接合部破壊する内柱・梁接合部において，接合部変形の詳細な測定を行った。接合部の対角ひび割れで区切られるブロックの回転変形は正負繰り返し加力の影響を強く受けており，この回転変形を含めた接合部変形は層間変形角に対してかなりの割合を占めていた。接合部パネルのコーナー部分を斜めに補強する溶接閉鎖型の鉛直斜補強筋は，せん断変形，回転変形を共に抑制する効果があり，日本建築学会の靱性保証型指針における塑性率の予測式を拡張して補強筋による靱性の向上を評価する事が出来た。

キーワード：斜補強筋，接合部せん断変形，接合部回転変形，塑性率，靱性向上

## 1. 目的

内柱・梁接合部の破壊形式には接合部破壊先行型の他に梁曲げ降伏後の正負繰り返し履歴を受ける事によって接合部破壊が進行する場合がある。この時の破壊機構は，単なるせん断破壊とは異なり，接合部パネルの対角線ひび割れによって分割された4つの三角形部分が相互に剛体回転するものであると報告されている<sup>1)</sup>。また，内柱・梁接合部において，この剛体回転を抑制する為に，接合部パネルのコーナー位置を溶接閉鎖型の補強筋によって鉛直に斜めに補強する補強方法によって，梁曲げ降伏後の接合部破壊を抑制して架構の変形性能を向上させる事が出来ると報告されている<sup>1)</sup>。

本報では，十字形内柱・梁接合部試験体の繰り返し水平加力実験において接合部のせん断変形と回転変形を詳細に測定することによって正負繰り返しを受ける時の接合部破壊の進行の経過を明らかにして，鉛直斜補強筋の補強効果を検討し，文献2)における架構の塑性率予測式を利用して補強筋による靱性の向上を評価する事を目的とする。

## 2. 水平加力実験

柱・梁接合部を柱の帯筋で補強した一般的な配筋の基準試験体 AIJ02 と，その帯筋に加えて

パネルコーナー位置を補強する閉鎖型の菱形鉛直斜補強筋を配した JCI02 の2体の十字形試験体を作成し，正負交番の漸増繰り返し加力実験を行った。図-1 に試験体の配筋を示す。表-1 に試験体の諸元として配筋と材料試験の結果得られた鉄筋の降伏点  $\sigma_y$  とコンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$  を示し，材料実強度から計算された接合部のせん断余裕度  $\alpha$  も併せて示した。この  $\alpha$  は文献2)の実験式で求めたせん断強度  $V_{ju}$  を梁の曲げ降伏時の接合部水平せん断力  $V_u$  で除したものである。両試験体とも梁曲げ降伏先行型として設計され，1.1 程度の余裕度を有している。

加力実験装置を図-2 に示す。梁両端をローラー支持，柱下部をピン支持として，柱には 3.9MPa の一定軸力軸力を与えておき，柱上部

表-1 試験体諸元

試験体	AIJ02	JCI02
梁	引張鉄筋5-D16(0.98)、SD345[403] あばら筋2-D10@100(0.48)、SD295A[412]	
柱	全軸筋8-D19(1.87)、SD345[384] 帯筋4-D10@100(0.82)、SD295A[412]	
接合部	水平横補強筋 4-D10, 2段(0.52)、SD295A[412]	
	鉛直斜補強筋なし	鉛直斜補強筋D10,4組 SD295A[412]
$\sigma_B$	22.0 N/mm <sup>2</sup>	23.4 N/mm <sup>2</sup>
$\alpha$	1.09	1.10
( )内は補強筋比 %、[ ]内は実降伏点 N/mm <sup>2</sup>		

\*1 千葉工業大学教授 工学部建築学科 博(工) (正会員)

\*2 大木建設(株) 修(工) (正会員)

に水平に取り付けたジャッキで正負交番荷重を与えた。水平力  $Q$  は柱梁相対部材角  $R$  の変形振幅を 0.005, 0.01, 0.02, 0.04 と増大させる様に、それぞれ 2, 3, 3, 2C (C はサイクル) ずつ与え、最後の 11C 目の正荷重において 0.06 以上の変形角を与えるように加えた。

接合部は文献 1), 3) の実験結果より、図 - 3 に示すせん断変形と回転変形を生じていることが分かっている。本実験ではこの変形を再度詳細に分析するために、図 - 4 に示すような治具と変位計を試験体表面に取り付けた。

実験を制御した  $R$  は接合部パネルの上下の辺の midpoint を支点として静定で取り付けられたゲージホルダー I を基準点として測定した (式 (1))。

接合部せん断変形  $s$  は接合部パネルの左右の辺の midpoint に静定で取り付けられたゲージホルダー II とゲージホルダー I との相対変形角と定義した (式 (2))。

図 - 3 に示す  $0$  点は同図 (a) において柱梁相対部材角  $R_0$  のせん断変形成分を 0 にする点である。 $R_0$  は図 - 4 (a) の表面の D7 ~ D10 より求められる (式 (3))。一方試験体の表裏の変形は同一であるとする、図 - 4 (b) に示す裏面の D11 ~ D14 の測定値から求められる柱梁の材端たわみと図 - 3 (b) の回転変形とによって、 $R_0$  は生じていると考えることができる。従って接合部の回転変形角  $R$  は表面で測定された  $R_0$  から裏面の部材端たわみによる回転角を差し引いたものとなる (式 (4))。

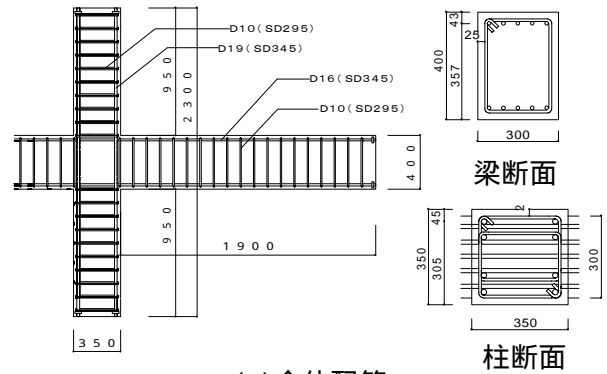
$$R = (-D3+D4)/L+(D1-D2)/H \quad (1)$$

$$s = (-D5+D6)/l \quad (2)$$

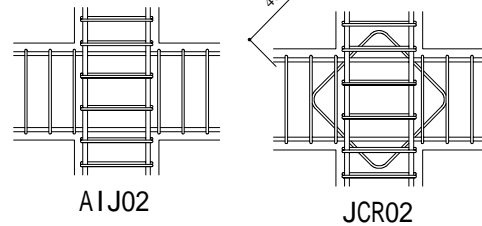
$$R_0 = (-D7+D8)/(2u)+(-D9+D10)/(2v) \quad (3)$$

$$R = R_0 - (D11+D12)/(2u) - (D13+D14)/(2v) \quad (4)$$

但し  $D_i$  は  $i=1 \sim 14$  の変位計の読み (mm) ,  $L=3750\text{mm}$  ,  $H=1860\text{mm}$  ,  $l=1000\text{mm}$  ,  $u=350\text{mm}$  ,  $v=400\text{mm}$  ,  $R = R_a = R_b$  であり、 $D11 \sim D14$  の基準点が接合部内部に 25mm ずれている領域の変形は無視する。



(a) 全体配筋



(b) 接合部配筋

図 - 1 試験体の配筋

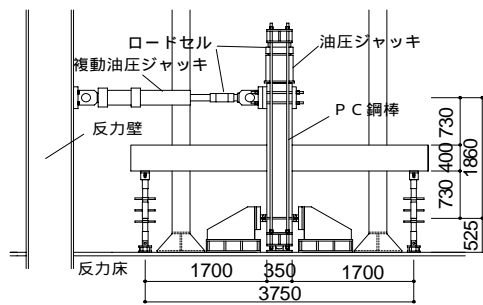
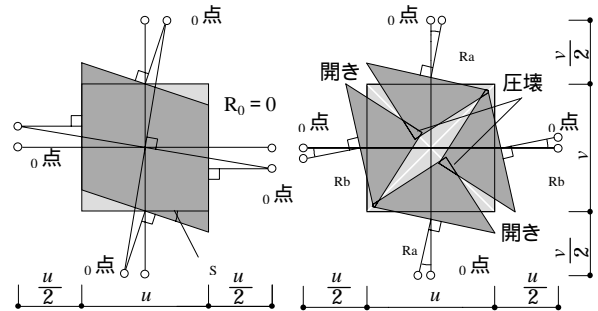


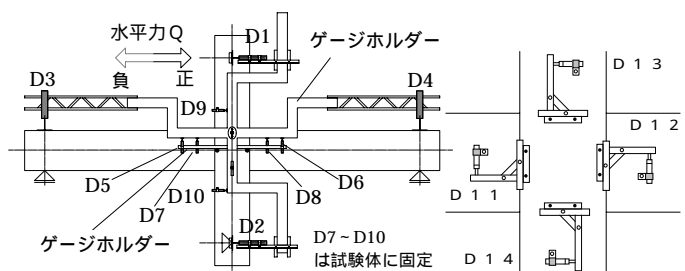
図 - 2 加力装置



(a) せん断変形

(b) 回転変形

図 - 3 接合部変形概念



(a) 表面

(b) 裏面

図 - 4 変位計取り付け位置

### 3. 実験結果

#### 3.1 Q-R 関係

図 - 5 に Q - R 関係を示す。両試験体とも、予定通り梁の曲げ降伏が先行した。梁曲げ降伏以前に顕著な剛性低下や繰り返し荷重による耐力低減が生じる事はなく、最大荷重は計算耐力値にほぼ等しかった。

AIJ02 は、梁が曲げ降伏した後に R=0.02 で最大荷重を記録し、以降の繰り返し荷重を受けて同一変形振幅における荷重は低下した。R=0.04 における荷重は最大荷重の約 90%程度に留まり、最終的には耐力の 53%まで低下した。鉛直斜補強筋を配した JCR02 は、R=0.02 で最大荷重を記録したが、R=0.04 における荷重は最大荷重に近い値まで上昇し、最大変形時においても耐力の 75%を維持した。

#### 3.2 接合部の $\tau_{jh}$ - 関係

図 - 6 に式(5)によるせん断応力度  $\tau_{jh}$  と接合部せん断変形  $\gamma_s$ 、接合部回転変形  $\gamma_R$ 、及び  $\gamma_s$  と  $\gamma_R$  の和をとった  $\gamma_p$  との関係を示す。

$$\tau_{ju} = \left( 2 \frac{H(L-u)}{Lj_B} - 1 \right) \cdot Q / (t_p j_C) \quad (5)$$

$t_p$  は梁幅と柱幅の平均値、 $j_B$ 、 $j_C$  はそれぞれ梁と柱の応力中心距離で有効せいの 7/8

斜補強筋を配した JCR02 は  $\gamma_s$  と  $\gamma_R$  とともに AIJ02 に比べて少ない変形量に留まっており、特にその差は  $\gamma_R$  において著しい。AIJ02 の  $\gamma_R$  は 6C 正 ( 図中の丸数字 ) までの少ない変形量で徐々に漸増しているが 6C 負で急激に進行し、9C 正では  $\gamma_s$  と同程度、10C 正では  $\gamma_s$  の 2 倍程度まで進行した。

JCR02 では梁曲げ降伏後も 9C 正までは徐々に  $\gamma_R$  が漸増する傾向が継続し、9C 負で変形が大きく進行し、11C 正では  $\gamma_s$  と同程度まで進行した。

#### 3.3 変形成分比の推移

柱梁相対部材角 R を柱、梁、接合部の回転変形とせん断変形の変形成分に分離して、全体変形に対する各部の変形の割合を求めた。繰り返し漸増加力によって進行する R の絶対値に対する各変形成分比の正、負荷重時における推移を図 - 7 に示す。両試験体とも柱の変形成分は小さく初期のサイクルでは梁の変形成分が大きな割合を占めている。AIJ02 において、梁が曲げ降伏した 6C 以降の繰り返しで接合部の変形成分が大きく増加しているのに対して、JCR02 は接合部成分の増加傾向は少ない。

AIJ02 において、せん断変形は繰り返し荷重によるパネルコンクリートの劣化に伴って増加し、R=0.04 で 30%まで達した。回転変形の変

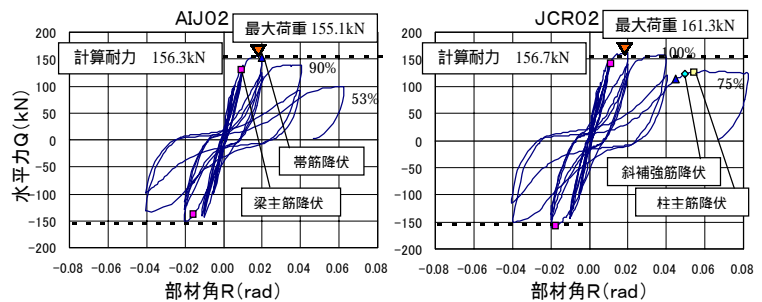


図 - 5 Q - R 関係

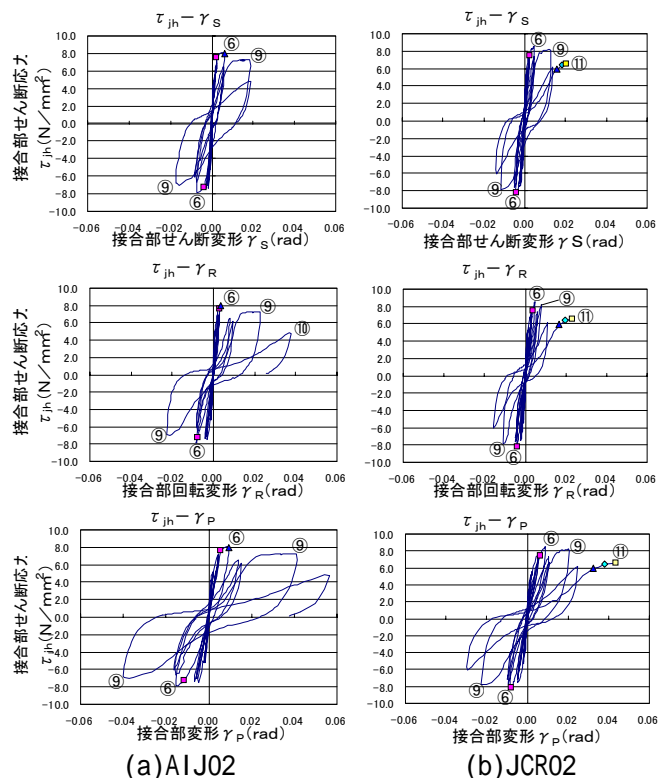


図 - 6 接合部の変形成分

形成分比は、6C 負荷重時に急激に増加し、その後の正負繰り返し荷重でも漸増している。接合部のせん断変形と回転変形を合わせた成分比は、 $R=0.04$  で 80%まで達しており、回転変形を含めた接合部の変形成分は層間変形角に対してかなりの割合を占める事が判った。

JCR02 ではせん断変形成分の増加は小さく、 $R=0.04$  で 20%程度であり、回転変形も小さな割合に留まっている。梁が曲げ降伏した 6C 負荷重では回転変形成分がやや減少しており、9C 負荷重及び同一振幅での正負繰り返し荷重でやや増加している。

JCR02 のせん断変形と回転変形を合わせた成分比は、 $R=0.04$  で 50%まで増加したが、AIJ02 の補強に追加して斜補強筋を配した事によって接合部破壊を少なくすることができたと判断できる。両試験体とも回転変形成分比は層間変形角が 0.01 から 0.02 に進行する正荷重では減少し、そのサイクルの正荷重除荷後の負荷重時及び同一振幅での繰り返し時には増加する傾向にある。これより、梁曲げ降伏が先行する架構では正負繰り返し履歴を受ける事が柱・梁接合部の破壊性状に大きな影響を与えていると考えられる。

### 3.4 接合部補強筋の歪度

柱せん断力  $Q$  と接合部帯筋及び斜補強筋の歪度 の関係を図 - 8 に示す。同図(a)より接合部帯筋の歪度は梁曲げ降伏以降、接合部せん断変形の進行に伴って歪度が増大し、荷重除荷時には残留ひずみが生じている。AIJ02 が 6C で降伏ひずみ  $\epsilon_y$  に到ったのに対して、JCR02 では 11C まで弾性範囲で漸増している。残留ひずみは鉄筋の弾性範囲でも生じており、接合部せん断変形の進行に概ね対応して増大している事から、残留ひずみは入力せん断力よりも接合部破壊及びひび割れ幅の残留に伴うパネル

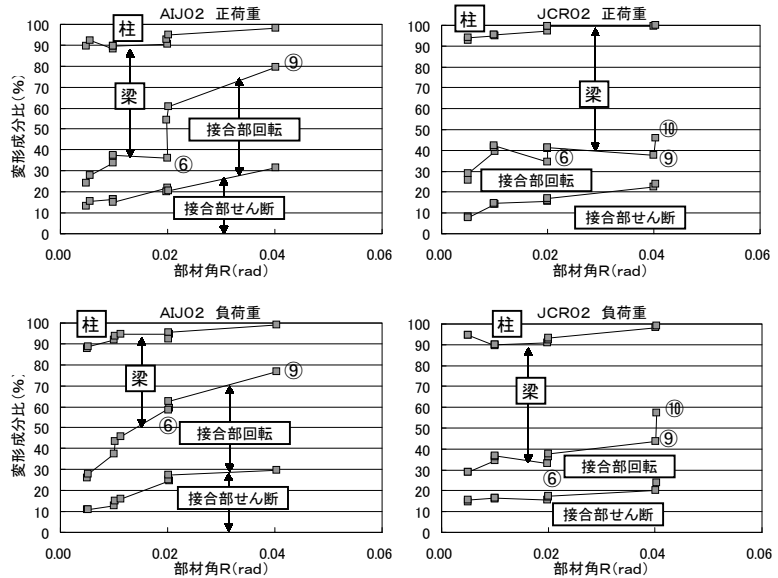
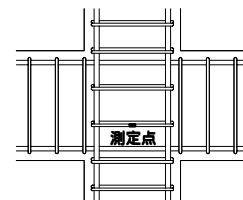
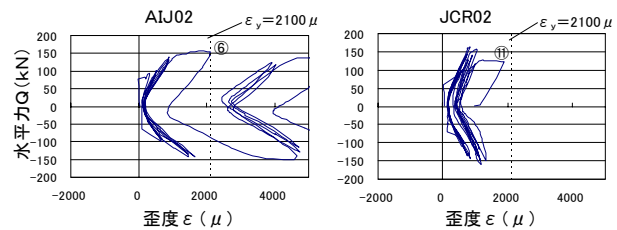
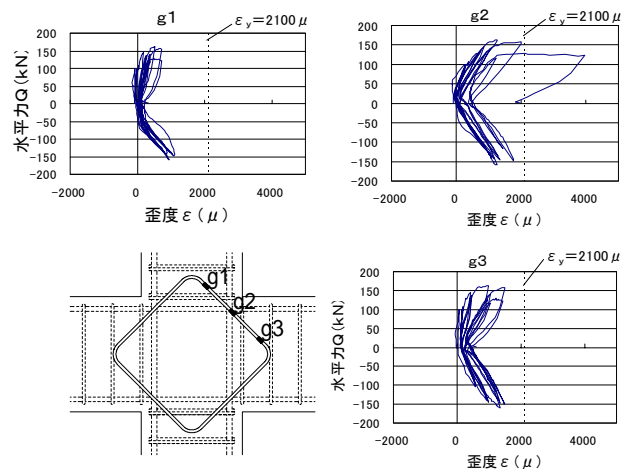


図 - 7 R に対する変形成分比



(a)接合部帯筋



(b)JCR02 斜補強筋

図 - 8 接合部補強の Q - 関係

コンクリートの膨張に起因していると考えられる。

同図(b)より斜補強筋の歪度はパネルコーナーに開きが生じる位置で最も大きくなっており、11Cで降伏ひずみ度に到った。降伏以前は梁曲げ降伏以降のサイクルで若干残留ひずみが生じている。

菱形斜補強筋を文献1)のリング形斜補強筋と比較すると、歪度から求めた初期の弾性範囲における鉄筋応力度は同程度であったが、接合部破壊が進行する時の残留ひずみの増大は菱形筋の方が少なかった。これは、リング形ではパネルコンクリートの膨張拘束効果が得られたが、菱形形状ではリング形よりも膨張拘束効果が少なかった為と考えられる。

#### 4. 斜補強筋の靱性評価

鉛直斜補強による靱性の向上を評価する為に、文献2)における塑性率 $\mu$ の予測式(5)を用いた塑性率の計算値 $\mu_{cal}$ と実験のQ-R関係から求めた $\mu_{exp}$ を比較した。表-2に既報を含む試験体を検討するためその内容を示す。表-1に示したものと同様の方法で算出したものである。

$$\mu_{cal} = f(\quad) \cdot f(p_{jw}) \quad (5)$$

$$f(\quad) = (5.36 - 2.82)$$

$$f(p_{jw}) = (0.473 p_{jw}(\%) + 0.873)$$

式(5)は直交梁が無く、梁主筋に普通強度鉄筋を用い、接合部横補強筋比 $p_{jw}$ が0.2~0.4%の範囲にある十字形試験体の実験資料から回帰された式である。回帰に用いられた実験値 $\mu_{exp}$ は耐力が95%まで低下した時の層間変形角R95を梁主筋の降伏時層間変形角R2で除して求めた。本報では、R2点はQ-R関係の正荷重包絡線を最大荷重までの消費エネルギーが等価になるようにトリリニアにモデル化した時の第2折れ点とし、R95点はRが進行する包絡線の荷重が最大荷重の95%まで低下した時の

点として $\mu_{exp}$ を求めた。

基準試験体を含めた特殊補強を施していない標準配筋の試験体6体は、全て $\mu_{exp}$ が $\mu_{cal}$ を下回った。表-2より、基準試験体4体は接合部区間の梁主筋の付着余裕度 $b_u/b_j$ が不足している。基準試験体に比べて付着余裕度が大きいNo.14とNo.15の $\mu_{exp}/\mu_{cal}$ が1.0に近い事から、これを付着の影響と判断し、本報の実験結果を評価する為に、式(5)の $\mu_{cal}$ に $b_u/b_j$ の影響を乗じて式(6)の様に拡張する。付着の影響にはべき乗の効果を仮定し、検討試験体の範囲で $=0.8$ と回帰された。

$$\mu_{cal}^* = (b_u/b_j) \cdot \mu_{cal} \quad (6)$$

$$= 0.8$$

図-9に示すように、式(6)による標準配筋試験体の $\mu_{cal}^*$ は $\mu_{exp}$ に近づいた。

続いて斜補強筋による靱性の向上を評価する為に、斜補強筋の効果は帯筋と同様、パネルコンクリートの拘束効果であるとして、 $f(p_{jw})$ を式(7)のように変形した。 $p_d$ は斜補強筋比で、溶接閉鎖型斜補強筋の周長に鉄筋の断面積を乗じた鉄筋の体積を文献2)の接合部有効断面積に梁主筋重心間距離を乗じた接合部パネルの体積で除した体積比(%)と定義した。

$$f(p_{jw}, p_d) = 0.473 p_{jw}(\%) + k_d \cdot p_d(\%) + 0.873 \quad (7)$$

図-10に斜補強筋を施した試験体について、式(6)の $\mu_{cal}^*$ と、 $f(p_{jw})$ の代わりに式(7)の $f(p_{jw}, p_d)$ を用いた時の $\mu_{cal}^*$ の $\mu_{exp}$ との比較を示す。式(7)の係数 $k_d$ は0.10とするとD13以下の斜補強筋の場合に $\mu_{exp}$ が $\mu_{cal}^*$ に近づく。D16のリング筋を配したNo.12は依然 $\mu_{exp}$ の方が大きい。これはNo.10のD13リング筋が早期に降伏したのに対して、No.12では降伏せずにパネルコンクリートの膨張を拘束した為に、変形性能を維持出来たと考えられる。No.5~8の菱形筋は耐力低下が進んでから降伏に到ったが、こ

表 - 2 検討試験体

検討試験体の番号・記号・内容		$\alpha$	$p_{jw}$	$\tau_u/\tau_j$	$p_d$	$\mu_{cal}^*$	$\mu_{exp}$	$\mu_{exp}/\mu_{cal}^*$	
No.1	AIJ02	基準試験体	1.09	0.52	0.71	0.00	2.49	2.52	1.01
No.2	AIJ2 <sup>1)</sup>	基準試験体	1.10	0.52	0.72	0.00	2.56	2.85	1.11
No.3	AIJ98 <sup>2)</sup>	基準試験体	1.10	1.38	0.82	0.00	3.71	3.62	0.98
No.4	AIJ96 <sup>2)</sup>	基準試験体	1.12	1.38	0.82	0.00	3.83	3.32	0.87
No.5	JCR02	4-D10菱形筋+帯筋	1.10	0.52	0.73	1.29	2.97	3.50	1.18
No.6	JCR <sup>2)</sup>	4-D10菱形筋+帯筋	1.10	1.38	0.81	1.29	4.07	4.05	0.99
No.7	JCR2 <sup>1)</sup>	4-D13菱形筋+帯筋	1.04	1.38	0.82	2.30	4.03	4.02	1.00
No.8	JCR1 <sup>1)</sup>	2-D10菱形筋+帯筋	1.13	1.38	0.82	0.65	4.10	3.98	0.97
No.9	JCR3 <sup>1)</sup>	4-D10菱形筋(開放型)+帯筋	1.06	1.38	0.82	1.29	3.87	3.12	0.81
No.10	JCRR1 <sup>1)</sup>	4-D13リング筋+帯筋	1.42	0.52	0.81	1.78	5.39	5.43	1.01
No.11	JCRR2 <sup>1)</sup>	4-D13 2方向リング	1.29	0.00	0.75	(1.78/1.34)	3.74	4.01	1.07
No.12	JCRR3 <sup>1)</sup>	4-D16リング筋+帯筋	1.06	0.52	0.70	2.79	3.04	5.06	1.66
No.13	JCRR4 <sup>1)</sup>	4-D16 2方向リング	0.98	0.00	0.64	(2.79/2.10)	2.09	3.87	1.85
No.14	HBS <sup>2)</sup>	梁主筋付着改善	1.16	1.38	0.98	0.00	4.88	4.68	0.96
No.15	CSP <sup>2)</sup>	コンクリート強度大( $F_c=36$ )	1.40	1.38	0.93	0.00	6.37	6.86	1.08

(鉛直リング筋比/直交リング筋比)

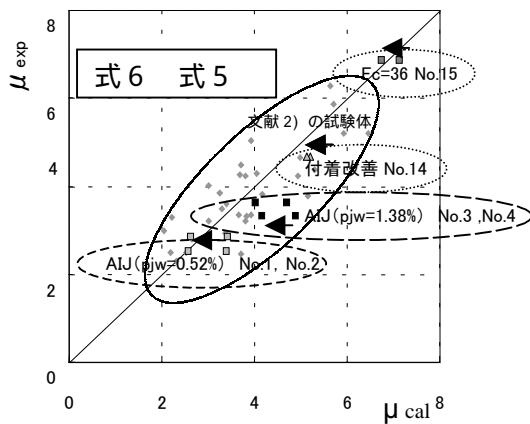


図 - 9  $\mu_{cal}$  と  $\mu_{exp}$  の比較

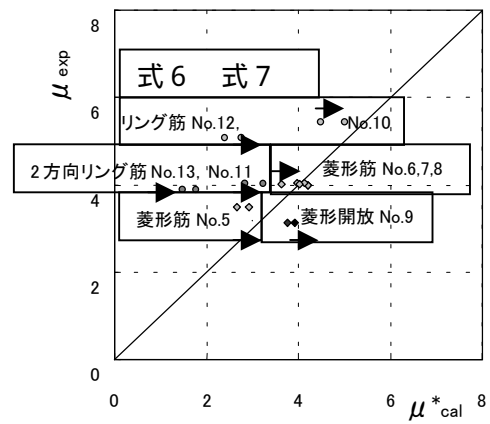


図 - 10  $\mu_{cal}^*$  と  $\mu_{exp}$  の比較

れは菱形筋では大きな膨張拘束効果が得られなかった為である。また斜補強筋量が不足している No.8 ,および配筋が開放型で膨張拘束が小さい No.9 では補強効果が得られていない。よって、式(7)に含まれる斜補強筋の量的評価は配筋が閉鎖型で1.29% (No.5)以上の  $p_d$  を有している事を必要条件とし、斜補強筋がその形状や早期の降伏によって大きな膨張拘束効果を得られない場合(No.8,9)を除いて成立し、その下限を表している。リング形斜補強筋が大きな膨張拘束効果を発揮した場合や、リング形斜補強筋を直交2方向に配した場合にはさらに補強効果を期待出来る(No.10~13)。

## 5. まとめ

AIJ02 において接合部変形の占める割合は層間変形角の80%まで増加しており、斜補強筋を配した JCR02 ではせん断変形、回転変形を共に

抑制する事が出来た。接合部回転変形は正負繰り返し荷重の影響を強く受けていた。文献2)の塑性率の予測式に鉛直斜補強筋による効果を考慮する式を加えて靱性の向上を評価する事が出来た。

## 参考文献

- 1) 鈴木武文, 石橋一彦ほか: 十字形内柱・梁接合部の補強方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.24, No.2, pp403-408, 2002.
- 2) 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, 1997
- 3) 堀部明久, 石橋一彦ほか: 十字形内柱・梁接合部の内部ひび割れ観察に基づく破壊メカニズム, コンクリート工学年次論文報告集, vol.24, No.2, pp409-414, 2002.
- 4) 立石真夫, 石橋一彦: R C 柱内部で梁鉄骨を接合したハイブリッド接合部の実験的研究(純 R C 接合部との関係), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.1013-1014, 1997.
- 5) 立石真夫, 石橋一彦: 柱梁接合部における梁、曲げ降伏後の破壊形式に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.20, No.3, pp517-522, 1998.
- 6) 立石真夫, 石橋一彦: R C 柱・梁接合部破壊形式に対する補強効果についての実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.587-588, 1998.
- 7) 立石真夫, 石橋一彦: R C 柱・梁接合部の補強方法とその定量化に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.961-964, 1999.