

# 論文 鉄筋コンクリート造柱梁接合部鋼板の接合部曲げ補強効果に関する研究

上原 修一\*1・松本 豊\*1

**要旨：**本研究では、柱梁接合部を鋼板と多量の帯筋で補強すると、接合部の力学性状を大きく改善できることを示している。試験体は、通常配筋の基準試験体、鋼板と多量の帯筋で補強した試験体、および多量の帯筋のみで補強した試験体の3体である。基準試験体では著しい接合部降伏破壊が発生した。鋼板と多量の帯筋で補強した試験体では、履歴性状が大きく改善され、さらに梁端部が曲げ破壊し接合部破壊を免れた。多量の帯筋のみで補強した試験体では、これらの中間的な性状を示したが、履歴性状はほとんど改善されず、最終破壊も接合部降伏破壊となった。

**キーワード：**柱梁接合部、接合部曲げ降伏、履歴性状、接合部補強、柱梁曲げ強度比

## 1. はじめに

著者のひとは、鉄筋コンクリート(以下、RCとする)造柱梁接合部において、鋼板を接合部中央に配置(以下、内蔵鋼板とする)すると、効果的にせん断補強できることを示している<sup>1)</sup>。

一方、塩原は接合部曲げ破壊モードがあることを発見し<sup>2)</sup>、これが発生すると梁の曲げ強度が達成できない場合があり、接合部の履歴性状がスリップ性状を示すことを明らかにしている。また、多数の接合部に接合部降伏破壊が生ずると、層破壊が起こる可能性があることも認められている<sup>3)</sup>。

この性状を改善するため、楠原らは十分大きい柱梁曲げ強度比とし、多量の接合部帯筋を使うことを提唱している<sup>4)</sup>が、履歴性状の改善方法として十分かどうかは議論がある<sup>5)</sup>。接合部曲げ補強構法の提案は、このほかには見当たらない。

そこで、著者らは、内蔵鋼板を接合部曲げ補強にも利用することを提案し、これまでに、履歴性状改善のためには、接合部のひび割れ幅抑制が必要であることを確認している<sup>7)</sup>。そのため、ここでは内蔵鋼板を多量の帯筋と組み合わせて使用することを試みた。

## 2. 試験体及び材料の力学的性質

表-1に試験体一覧を示す。試験体 No.1 は基準試験体である。ここで、基準試験体 No.1 は、後の表-3 に示すように、接合部降伏破壊となるように、やや小さい柱梁曲げ強度比としている。

試験体 No.2 は、内蔵鋼板および多量の帯筋を組み合わせて補強したものである。試験体 No.3 は、内蔵鋼板の効果を明確にするため、試験体 No.2 の補強から、単純に内蔵鋼板を除いたものである。そのため、試験体 No.3 に

表-1 試験体一覧

試験体番号	試験体名	配筋等の特徴
No. 1	2022IJ1	基準試験体 (通常配筋:接合部帯筋比 $p_{jw}=0.51\%$ , 接合部横補強比 0.39)
No. 2	2022IJ3	組み合わせ補強試験体 (内蔵鋼板および多量帯筋補強:等価帯筋比 $p_{jw}=6.3\%$ , 接合部横補強比 6.0)
No. 3	2022IJ4	多量帯筋補強試験体 (多量帯筋補強のみ: 接合部帯筋比 $p_{jw}=1.7\%$ , 接合部横補強比 1.4)

ついては、文献 8) に示す帯筋のみによる設計法の制限を逸脱している項目がある。また、表-1 の試験体 No.2 の等価帯筋比と接合部横補強比は、帯筋に加え、加力方向の鋼板の、円孔を除いた鋼板体積を見付け面積で除した鋼板の厚さで評価している。

表-2 に使用材料の力学的性質を示している。鉄筋等は普通強度の材料を用いている。コンクリート強度は、当初の計画より小さい値となっており、文献 7) に示す梁主筋径に対する柱せいの制限を 17%程度下回っている。

図-1 に試験体 No.2 の配筋図を示す。試験体 No.2 には、図-2 に示す、内蔵鋼板を挿入している。この内蔵鋼板は、6mm の縞鋼板の縞面を表にして背中合わせにし 12 mm の厚さとする。直交方向にも配置するため、柱軸方向に半分ずつ切欠いて、はめ合わせて隅肉溶接した。また、直交鋼板を梁主筋の定着板として利用するために、梁主筋用の穴をあけて、鋼管を溶接し、梁主筋を貫通させている。さらに、この鋼管には、図-2 に示す幅 6mm、長さ 52mm のスリットを設け、そこで鉄筋と溶接することにより、定着を確実にしているが、実用する場合は、より簡単なディテールが適当であると考えられる。

\*1 久留米工業大学 工学部建築・設備工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 材料の機械的性質

材料	用途	呼び	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ ( $\mu$ )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋・鋼材	柱・梁主筋	D13	373	538	2180		$1.70 \times 10^5$
	接合部帯筋 (試験体 No. 2, No. 3)	D10	375	522	2000		$1.85 \times 10^5$
	帯筋・あばら筋, 接合部帯筋 (試験体 No. 1)	D6	389	525	2400		$1.74 \times 10^5$
	パネル部内蔵鋼板	縞鋼板 (t=6 mm)	307*	439*	-		
コンクリート	No. 1	2022IJ1				21.2	$2.08 \times 10^4$
	No. 2	2022IJ3				20.7	$2.20 \times 10^4$
	No. 3	2022IJ4				20.6	$2.27 \times 10^4$

\*ミルシートに基づく値である。

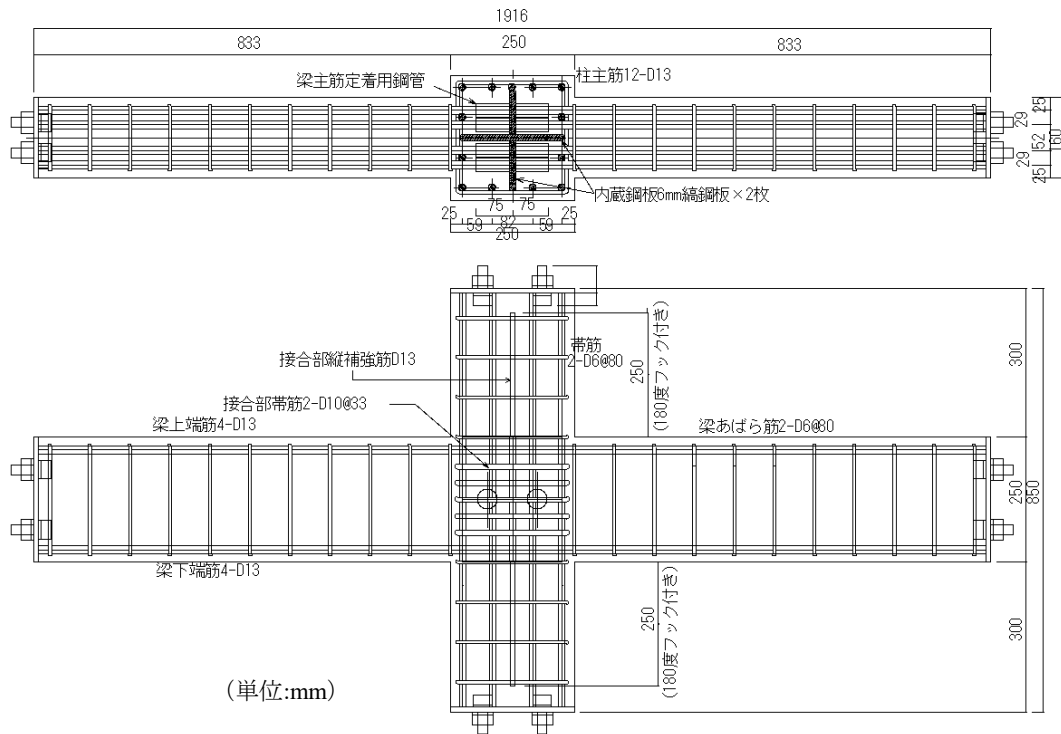


図-1 試験体 No. 2 の配筋図

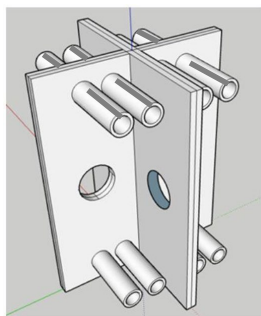
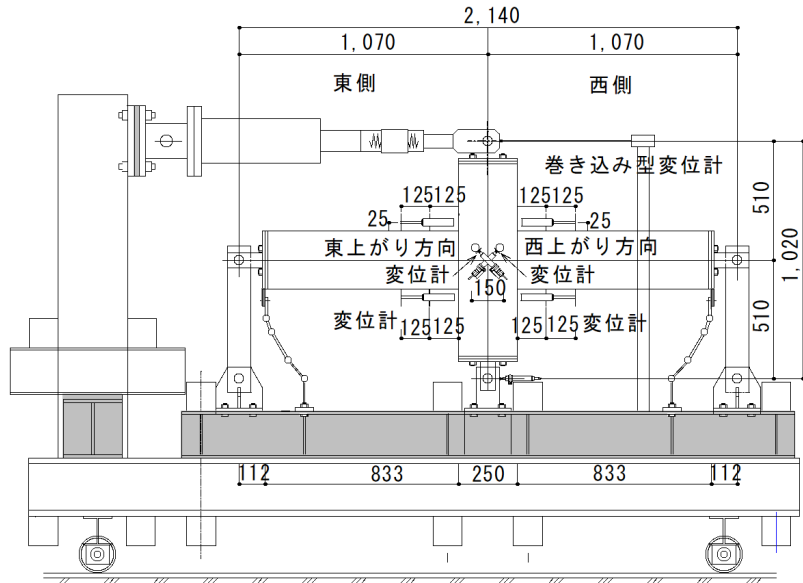


図-2 試験体 No. 2 接合部パネル補強鋼板

そのほか、鋼板の高さ中央位置に径 40mm の穴をあけて、コンクリートの充填性を向上させている。接合部の帯筋は、2-D10@33 となっており、表-1 に示すようにかなり大きい帯筋比となっている。

### 3. 実験概要

図-3 に加力装置と変位計の位置を示す。試験体は、図-3 に示すように、梁外端をローラ支持、柱頭部、柱脚部をピン支持とし、水平方向に正負交番载荷した。本研究では柱軸力は加えていない。加力は変位制御とし、



(単位:mm)

図-3 加力装置および変位計配置図

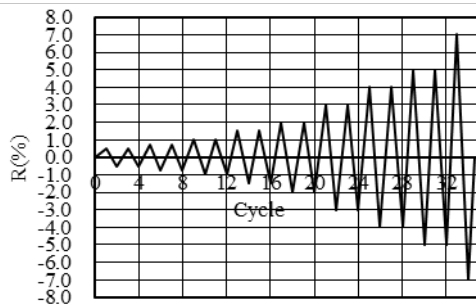


図-4 実験における変位制御サイクル

図-4 に示すように層間変形角  $R$  に関し、約  $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.75\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$ 、 $\pm 4.0\%$ 、 $\pm 5.0\%$ 、 $\pm 7.0\%$  とし、 $\pm 0.5\%$  から  $\pm 5.0\%$  までは各 2 回ずつ、 $\pm 7.0\%$  は 1 回とした。この加力方法は 3 試験体とも共通である。

柱頭の変位を柱ピン距離で除して  $R$  とした。梁端の回転量を測定するため、梁端から梁せい 250mm の区間を 2 区間 (125mm 区間) に分けて、梁面から 25mm の高さの位置で、相対水平変位を測定した。さらに接合部パネルのせん断変形については、変位計を図-3 に示す接合部パネルの裏面に、対角方向 (西上がり方向および東上がり方向) に設置し求めた。

ひずみゲージは、梁端部梁主筋 (柱面位置)、柱端部 (梁面位置) 柱主筋、接合部帯筋 (柱中央) のほか、試験体 No. 2 の鋼板については、最小水平断面となる鋼板開口横に貼付した。

#### 4. 実験結果

##### 4. 1 水平荷重と層間変形角関係及び履歴性状について

図-5~図-7 は、 $R=7\%$  までの 3 試験体の水平荷重と層間変形角の関係を示す。基準試験体 No.1 では、 $R=0.5\%$  で梁に曲げひび割れ、および接合部パネルにせん断ひび割れが発生した。その後も、梁曲げひび割れと接合部パネルせん断ひび割れが増加した。 $R=2.0\%$  では、接合部パネルコンクリートの浮きが見られた。また、梁端部が曲げ降伏し、 $R=3.0\%$  で最大強度に達すると同時に接合部の損傷が著しくなり、その後は接合部パネルが大きく損傷し、水平強度が漸減した。

多量の帯筋と鋼板を組み合わせる補強した試験体 No. 2 では、 $R=0.5\%$  で梁に曲げひび割れが発生した。 $R=0.75\%$  で、接合部パネルに微小なせん断ひび割れが発生した。 $R=2.0\%$  でも接合部パネルコンクリートのひび割れは軽微であった。また、梁端部が曲げ降伏、梁端部のひび割れが大きく開き、梁圧縮側のコンクリートの圧縮破壊が始まった。 $R=4.0\%$  で最大強度に達した後、梁圧縮側のコンクリートの圧縮破壊が顕著になり、水平強度が漸減した。 $R=7.0\%$  まで接合部損傷は軽微であった。

多量の帯筋のみで補強した試験体 No. 3 では、 $R=0.5\%$  で梁に曲げひび割れが発生した。 $R=0.75\%$  で接合部パネルに微小なせん断ひび割れが発生した。 $R=2.0\%$  でも、接合部パネルコンクリートのひび割れは軽微であった。また、梁端部が曲げ降伏し、梁端部のひび割れが大きく開口し、梁圧縮側のコンクリートの圧縮破壊が始ま

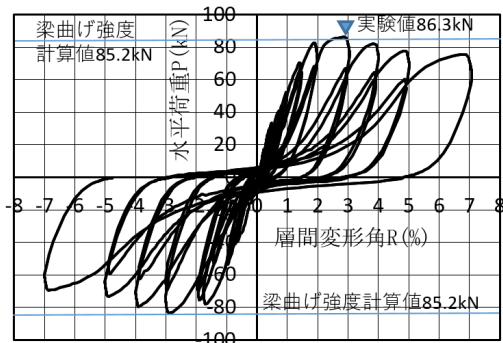


図-5 試験体 No. 1 の水平荷重と層間変形角の関係

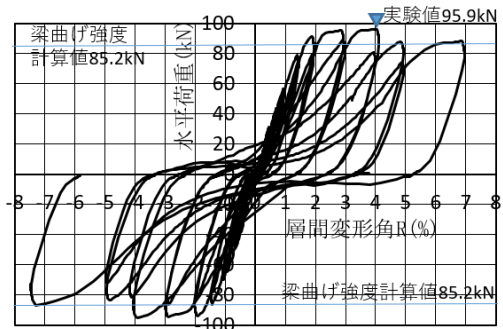


図-6 試験体 No. 2 の水平荷重と層間変形角の関係

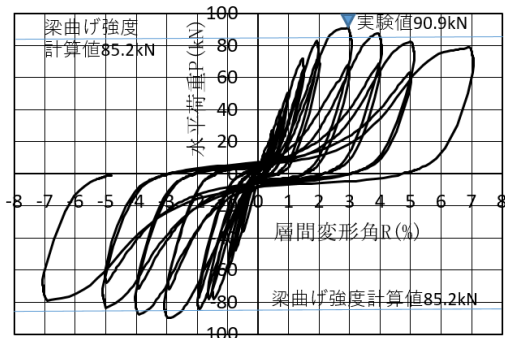


図-7 試験体 No. 3 の水平荷重と層間変形角の関係

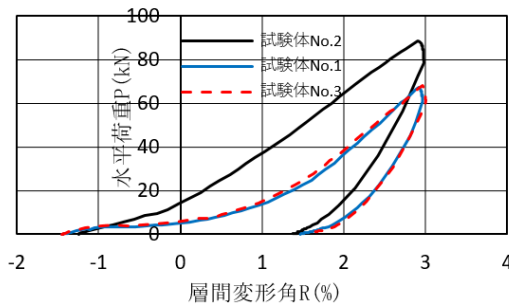


図-8 3試験体の R=3%2 回目の履歴の比較

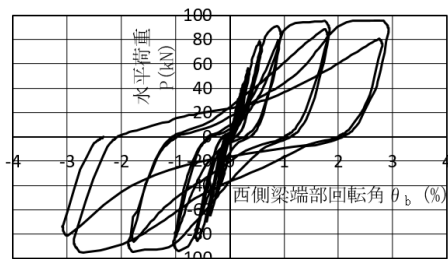


図-9 試験体 No. 2 の西側梁端部回転角の挙動

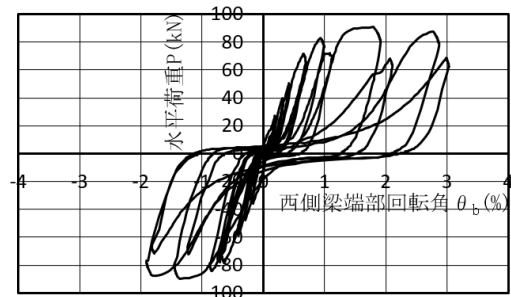


図-10 試験体 No. 3 の西側梁端部回転角の挙動

った。R=3.0%で最大強度に達した後に、梁圧縮側のコンクリートの圧縮破壊を伴い、接合部パネルが大きく損傷し水平強度が漸減した。

水平耐力は、3試験体すべてで梁曲げ強度計算値を上回ったが、試験体 No.2 が最大で、梁曲げ強度計算値の 1.13 倍となった。

図-8 は、3試験体の R=3%の 2 回目加力時の履歴ループを示す。ここでは、接合部やその近傍が十分に塑性化し、履歴に差が出ている R=3%で比較した。試験体 No.2 が最大の履歴ループとなり、試験体 No.1 と試験体 No.3 はほとんど変わらない結果となった。この結果に基づき等価減衰定数を評価すると、試験体 No.1 : 0.096, 試験体 No.2 : 0.141, 試験体 No.3 : 0.103 となり、試験体 No.2 は試験体 No.1 の 1.47 倍であり、50%近くの改善が認められる。

図-9 と図-10 はそれぞれ、梁端部（柱面から 125mm の区間）の梁回転量の、R=4.0%までの推移を示す。この図で、試験体 No. 3 ではスリップ性状が認められる。試験体 No. 2 において、履歴性状が改善された理由は、接合部コンクリートの損傷が軽微であったことおよび直交鋼板が定着版として機能し、梁主筋の抜け出しを抑制できたことが考えられる。

#### 4.2 接合部帯筋ひずみおよびパネルひずみなど

図-11 は、R=7%までの、3試験体の水平荷重と帯筋ひずみの関係を示している。この図から、試験体 No.1 と試験体 No.3 の帯筋は最大耐力時前後に降伏していることがわかる。一方、試験体 No.2 は弾性範囲に留まっていることがわかる。

さらに、図-12 は R=7%までの、3試験体の接合部パネルのせん断ひずみの推移を示している。このせん断ひずみは、接合部パネルに設置した変位計の計測結果から得たものである。この図から、試験体 No.2 は最後まで、1%程度のせん断ひずみに留まっているのに対し、試験体 No.1 と試験体 No.3 のせん断ひずみは、最大耐力以降に大きく増大していることがわかる。このことは接合部損傷の状況と整合している。

図-13 は 3試験体の接合部パネルの対角方向のうち、

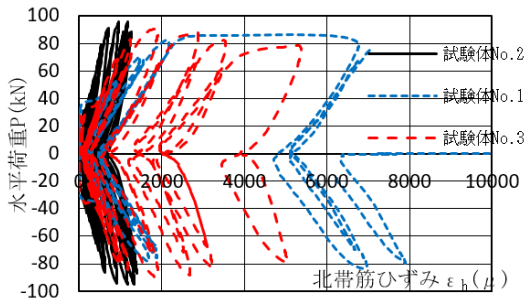


図-11 3試験体の接合部帯筋ひずみの比較

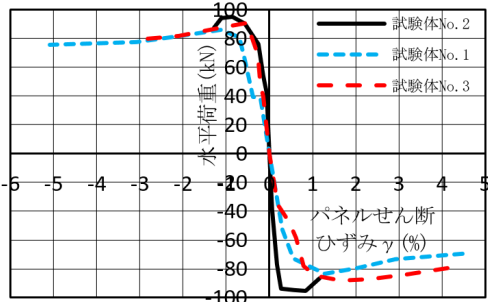


図-12 3試験体の接合部せん断ひずみの比較

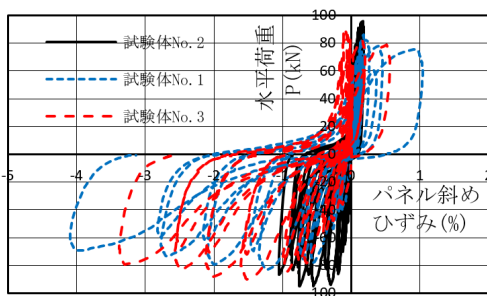


図-13 3試験体の接合部パネル斜めひずみの比較

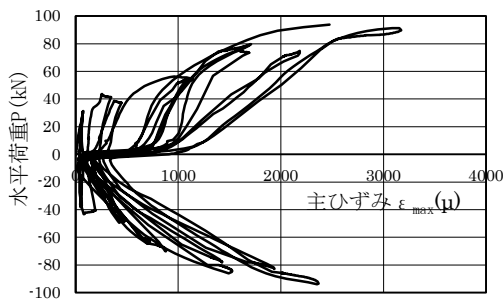


図-14 試験体 No. 2 接合部鋼板主ひずみ

西上がり方向変位計測定値(図-3 参照)に基づくひずみを示している。ここでは圧縮ひずみを正としている。試験体 No.2 は圧縮、引張の両方向について、相対的に小さく推移しているのに対し、試験体 No.1 と試験体 No.3 は、最大耐力以降に、両方向に対し、増大していることが分かる。また、3 試験体とも圧縮ひずみより引張ひずみが多い。これは引張ひび割れ幅の増大によるものと考えられる。

図-14 は試験体 No.2 接合部内蔵鋼板の主ひずみを示している。最小断面となる鋼板中央の穴近傍に貼付した3軸ひずみゲージにより計測した。主ひずみが降伏ひずみを超えていることから、降伏している部分があると考えられ、鋼板は補強効果を発揮していると考えられる。

#### 4.3 実験後の試験体状況

写真-1 に、実験後の3試験体の接合部部分の損傷を示す。試験体 No.1 では、接合部に顕著な損傷が確認できるが、試験体 No.2 では、接合部のひび割れが少なく、梁端部コンクリートの圧縮破壊が確認できる。さらに、試験体 No.3 では、試験体 No.1 と試験体 No.3 の中間的な損傷となっており、梁端部コンクリートの損傷と同時にかなりの接合部の損傷が確認できる。

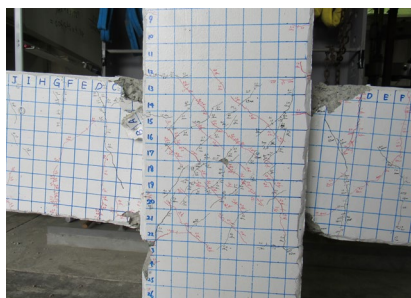
#### 5. 水平耐力実験結果の評価

表-3 に水平耐力に関する計算結果一覧を示す。この表より、3試験体とも梁曲げ強度に至っていることがわかる。試験体 No.2 では、梁曲げ強度の1.13倍になっており、接合部降伏破壊が回避できているものと考えられる。

試験体 No.1 と試験体 No.3 では、水平耐力実験値が試験体 No.2 より5%から10%程度小さいが、これは接合部降伏破壊の影響があると考えられる。



(a) 試験体 No. 1



(b) 試験体 No. 2



(c) 試験体 No. 3

写真-1 3試験体の接合部部分の最終破壊状況

表-3 水平耐力に関する実験値と各計算値

試験体	(1) 接合部せん断強度 (kN)*1	(2) 梁端部曲げ強度 (kN)*2	接合部せん断余裕度 (1)/(2)	(3) 水平耐力実験値 (kN)	梁端部曲げ強度と実験値の比 (3)/(2)	柱梁曲げ強度比	$\beta_j$ *3	(4) 文献 8) による予測	実験結果
No. 1	97.2	85.2	1.14	86.3	1.01	1.16	1.03	接合部降伏型 (梁曲げ強度に達する)	(4) と同じ
No. 2	167	85.2	1.96	95.9	1.13	1.16	2.45	梁端部降伏型	(4) と同じ
No. 3	95.3	85.2	1.12	90.9	1.07	1.16	1.30	接合部降伏型 (梁曲げ強度に達する)	(4) と同じ

\*1 文献 6) の基づく接合部せん断強度。安全率 1/0.85 は除いている。試験体 No. 2 については、鋼板も考慮した。

\*2 曲げ強度略算式による ( $=0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot d$ 。ここで、 $a_t$ : 引張鉄筋断面積、 $\sigma_y$ : 引張鉄筋降伏点、 $d$ : 梁有効せいである)。

\*3 文献 8) に基づく値である。

文献 8) に基づき、柱梁接合部降伏による強度低下率  $\beta_j$  の値を算定し、実験現象と比較したところ、文献 8) に示す予測と一致する結果となった。

以上のことから、内蔵鋼板と多量の帯筋により接合部が補強され、接合部降伏破壊を回避できたと考えている。

## 6. 結論

柱梁接合部を、内蔵鋼板と多量の帯筋を組み合わせで補強することを提案し、3体の試験体によりその効果を実験的に検討した。その結果、以下の結論を得た。

1) 本構法により、接合部降伏破壊を回避することができ、破壊形式を梁端部破壊に移行できた。

2) 本構法において、直交する内蔵鋼板を梁主筋の定着版として利用し、同時に多量の帯筋でパネルの斜めひび割れ開口を抑制したところ、履歴性状が改善され、等価減衰定数が 50% 程度向上した。

3) 柱梁接合部を多量の帯筋のみで補強した場合、履歴性状はほとんど改善されず、破壊形式も接合部降伏破壊を免れなかった。

4) 3 試験体の  $\beta_j$  (柱梁接合部降伏による強度低下率) による接合部力学性状の予測は実験現象と一致した。

## 謝辞

本研究の実験については、久留米工業大学建築・設備工学科上原研究室 2022 年度卒業研究生内野政宗、大坪優樹、堀田陽久、三坂悠登の各氏の卒業研究として取り組まれたものである。また、本学 AI 応用研究所呉濟元専任講師および文部科学省「デジタルと専門分野

の掛け合わせによる産業 DX をけん引する高度専門人材育成事業」の支援を得ている。ここに記して、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 竹内卓也, 上原修一, 山川哲雄: 鋼板によりせん断補強した RC 造柱梁接合部の性能に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No.2, pp. 313-318 2012 年
- 2) 塩原等: 鉄筋コンクリート柱梁接合部見逃された破壊機構, 日本建築学会構造系論文集第 73 巻, 第 631 号, pp. 1641-1648, 2008.9
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート部材の構造性能評価の現状と将来, 2019.9
- 4) 楠原文雄, 朴星勇, 塩原等: 鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部部分架構の履歴エネルギー吸収能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No.2, pp. 271-276, 2012.7
- 5) 大西直毅, 塩原等: 柱梁強度比と接合部横補強筋量の異なる鉄筋コンクリート造十字形接合部の破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp. 93-94, 2019.9
- 6) 上原修一, 松本豊: RC 造柱梁接合部補強鋼板の接合部曲げ補強効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp. 73-74, 2022.9
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 2001.9
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 第 2 版第 1 刷, 2021.2