

# 論文 機械式定着を用いた L 形柱梁接合部の構造性能に対する柱主筋定着部の定着補強筋の効果を検証するパイロット実験

長谷川 蒼太\*1・新井 博登\*2・尹 ロク現\*3・真田 靖士\*4

**要旨：** 既往の研究では柱主筋が機械式定着された T 形柱梁接合部の定着破壊を防止するために定着金具端部に必要な定着補強筋（量）が提案され、その有効性が確認された。そこで、提案された定着補強筋について、本研究では L 形柱梁接合部に対する有効性を検証するため、定着補強筋量を変数とする 2 体の L 形接合部を対象に静的載荷実験を行った。実験の結果、必要な定着補強筋量を満たす試験体は梁曲げ降伏による破壊機構を形成し定着破壊は発生しなかった。一方、必要な定着補強筋量を満たさない試験体は定着破壊が発生し、L 形接合部についても定着補強筋が有効であることを確認した。

**キーワード：** 鉄筋コンクリート, 最上階柱梁接合部, 機械式定着, 定着破壊, 定着補強筋

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（以下 RC）造建物の高層化に伴い、高強度、太径の鉄筋が多用されている。そのため、鉄筋の折り曲げ作業が困難となり、柱梁接合部鉄筋の組み立て作業の簡略化にも着目して機械式定着工法が開発されてきた。しかし、最上階の柱梁接合部に機械式定着工法を使用した場合、柱幅は一般的に梁幅よりも大きいいため、柱主筋が梁主筋の外側に位置する場合もあり柱主筋の定着破壊の発生が危惧される。

この問題に対して、文献 1)では機械式定着工法を用いた T 形柱梁接合部の柱主筋の定着破壊を防止するため、定着部に必要な補強筋（以下、定着補強筋）量の評価方法が提案された。同文献では、接合部横補強筋量をパラメータとした梁曲げ降伏先行型の T 形接合部試験体 3 体に対して提案された必要定着補強筋量を満たす試験体が定着破壊しないことが確認された。しかし、L 形柱梁接合部について、その有効性は確認されていない。

そこで、本研究では、柱主筋及び梁主筋が機械式定着された L 形柱梁接合部の構造性能の把握を目的として、L 形接合部のとくに柱主筋の定着部に対する定着補強筋量を変数とした 2 体の試験体の静的繰り返し載荷実験を行い、定着補強筋量が L 形接合部の構造性能に与える影響を検討した。

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体計画

図-1 に過去の研究（表-1 に示す文献リスト参照）で行われた柱主筋が機械式定着された L 形接合部試験体（ただし、本研究が焦点を当てる定着補強筋は設けられてい

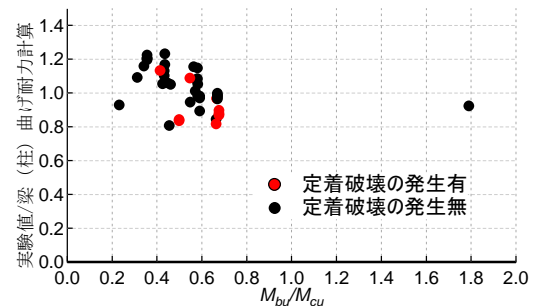


図-1 既往の研究における負側の実験値と梁（柱）曲げ耐力計算値の比—梁曲げ耐力と柱曲げ耐力の比

表-1 文献リスト

著者	媒体	発表年	ページ数
中澤春生ほか	コンクリート工学年次論文集	2002	847-852
中村彦ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2002	567-568
岸本剛ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2002	569-570
井上寿也ほか	コンクリート工学年次論文集	2003	499-504
井上寿也ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2003	523-524
田川浩之ほか	コンクリート工学年次論文集	2008	1384-1392
高橋文美ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2008	145-146
足立将人ほか	コンクリート工学年次論文集	2009	349-354
清原俊彦ほか	コンクリート工学年次論文集	2009	361-366
加藤史明ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2010	403-404
田川浩之ほか	GBRC	2011	32-39
吉村匡裕ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2011	481-482
吉村匡裕ほか	コンクリート工学年次論文集	2012	289-294

ない) の実験結果を示す。同図の横軸は柱曲げ耐力計算値  $M_{cu}$  に対する梁曲げ耐力計算値  $M_{bu}$  の比（以下、 $M_{bu}/M_{cu}$ ）であり、縦軸は最大耐力の実験値／梁または柱の曲げ強度時の耐力計算値である。なお、曲げ強度は ACI ストレスブロック法<sup>2)</sup>に基づいて計算した。また、既往の研究

\*1 大阪大学 工学部 (学生会員)

\*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (学生会員)

\*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

\*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

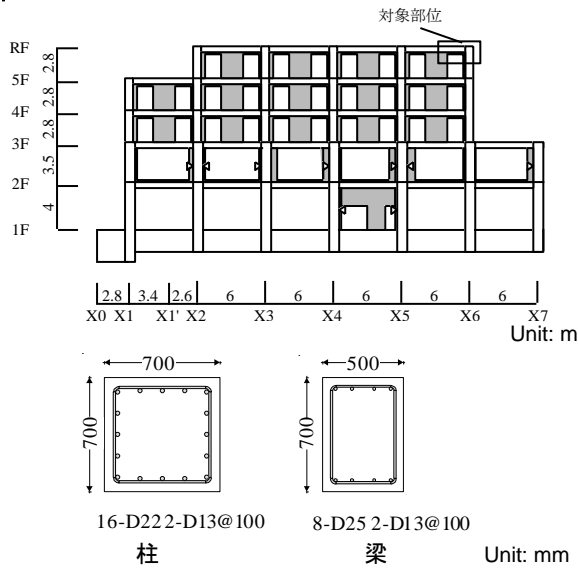


図-2 対象建物および対象部位の構造詳細

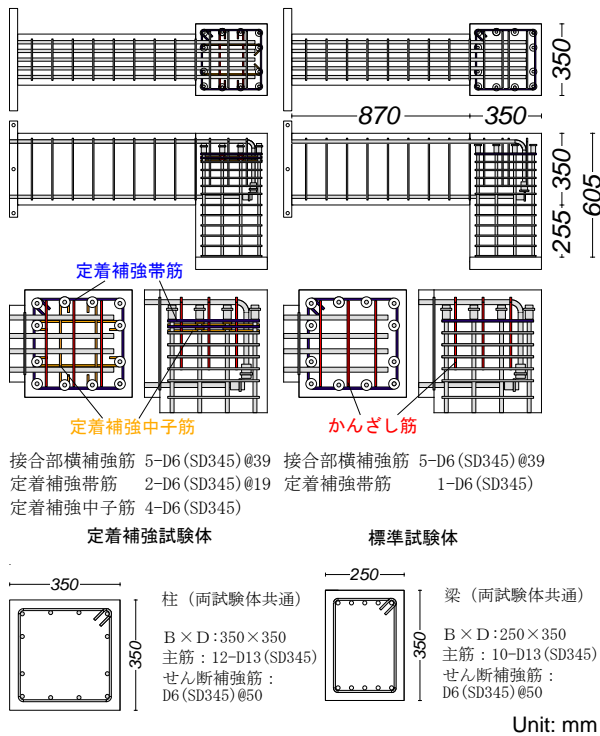


図-3 試験体形状および試験体配筋詳細

において定着破壊は負側（载荷時にL形接合部が開く場合）で多く確認されたため、負側のみの結果を示す。さらに、同図に掲載した試験体は直交梁なし、柱が梁の上面から突出していないものに限定し、接合部せん断余裕度が1以下のものも含まない。図-1より、 $M_{bu}/M_{cu}$ が1.0を下回る範囲に着目すると0.6程度を上回ると定着破壊が発生し、試験体の耐力が計算耐力を下回る事例がみられた。そこで、本研究では $M_{bu}/M_{cu}$ を約0.6とし、文献1)が提案する必要な定着補強筋量を満足する試験体と、これを満足しない試験体、計2体を計画した。

図-2に対象建物および対象部位の構造詳細を示す。

表-2 試験体概要

		定着補強試験体	標準試験体
接合部	横補強筋	D-6	
	横補強筋本数	5	
	定着補強帯筋数 (余裕度 100%)	2	1 (余裕度 50%)
	定着補強中子筋数 (载荷直交方向) (余裕度 150%)	2	0 (余裕度 0%)
	定着補強中子筋数 (载荷方向) (余裕度 150%)	2	0 (余裕度 0%)
	$T_b/T_{cv}$	0.7	0.63
柱	$\rho_{wi}$	0.47(%)	0.34(%)
	BxD	350x350 mm	
	主筋	12-D13	
	引張鉄筋比	0.47(%)	
	せん断補強筋	D6@50	
	せん断補強筋比	0.36(%)	
梁	せん断スパン比	1.73	
	BxD	250x350 mm	
	主筋	10-D13	
	引張鉄筋比	0.82(%)	
	せん断補強筋	D6@100	
	せん断補強筋比	0.25(%)	
梁柱曲げ耐力比	正	0.81	
	負	0.63	

表-3 コンクリートの材料特性

	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
定着補強試験体	26.3	$3.24 \times 10^4$	2.31
標準試験体	29.8	$3.02 \times 10^4$	2.07

Unit: N/mm<sup>2</sup>

表-4 鉄筋の材料特性

	降伏強度	ヤング係数	引張強度
D6 (SD345)	468	$1.90 \times 10^5$	583
D13 (SD345)	415	$2.01 \times 10^5$	580

Unit: N/mm<sup>2</sup>

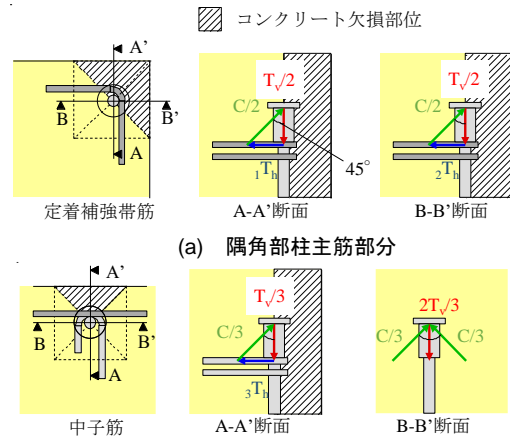


図-4 柱主筋端部の力の釣合状況

本研究ではRC造5階建ての共同住宅の最上階柱梁接合部を研究対象とし、試験体を対象建物の1/2スケール模型で製作した。図-3に試験体形状および配筋詳細を示す。同図の左が必要な定着補強筋量を満たす試験体（以下、定着補強試験体）、右が現在一般的な配筋がなされた試験体（以下、標準試験体）である。なお、これ以降、定着補強筋とは柱主筋の定着金具端部に配置した図-3中の定着補強帯筋（青色）と载荷方向および载荷直交方向の定着補強中子筋（橙色）を指し、接合部横補強筋とはそれ以外の接合部内せん断補強筋（帯筋）を示すことと

する。

また、試験体の接合部の配筋は以下の条件を満たすものとする。

- ・柱主筋および梁主筋は文献3) および文献4) の必要定着長さを確保した。
- ・かんざし筋は柱頭に3組設け、幅は定着補強帯筋と接合部横補強筋の内側までとした。
- ・定着金具と柱主筋の境界に定着補強筋を配置した。

定着補強筋量について文献1)より図-4を参照して説明する。定着破壊の発生の有無は定着金具端部に作用する力として柱主筋引張力、定着補強筋引張力およびコンクリートの支圧力を想定し力の釣合から評価された。ここで、(1)コンクリートが健全な場合、コンクリートは均等に柱主筋引張力に対する支圧力を負担すること、(2)早期に剥落すると考えられるカバーコンクリート(斜線部分)は応力を負担せずその他のコンクリートに均等に再分配される、の2点を仮定した。以上より、隅角部柱主筋の力の釣合は式(1)、柱中段筋の力の釣合は式(2)で示される。なお、図-4(b)のB-B断面はコンクリートの支圧力と柱主筋引張力で力が釣合い、定着補強筋がなくても定着破壊は発生しないと考えられる。したがって、必要な定着補強帯筋および定着補強中子筋は式(3)および式(4)を満たす補強筋量である。

$$(C/2)^2 = (T_v/2)^2 + T_{h1}^2$$

$$C/2 : T_v/2 = \sqrt{2} : 1 \quad (1)$$

$$(C/3)^2 = (T_v/3)^2 + T_{h2}^2$$

$$C/3 : T_v/3 = \sqrt{2} : 1 \quad (2)$$

$$T_{h1} \geq T_v/2 \quad (3)$$

$$T_{h2} \geq T_v/3 \quad (4)$$

ここで、 $C$ ：コンクリート支圧力、 $T_{h1}$ ：定着補強帯筋の引張力、 $T_{h2}$ ：定着補強中子筋の引張力、 $T_v$ ：柱主筋の引張力である。

さらに、定着補強帯筋および定着補強中子筋の必要量に対する余裕率(表-2中に記載)は式(3)と(4)より $2T_{h1}/T_v$ および $3T_{h2}/T_v$ により算定される。以上より、定着補強試験体では定着補強帯筋を2組、荷重方向及び荷重直交方向の定着補強中子筋をそれぞれ2組設けた。一方、標準試験体では従来の柱主筋端部の接合部せん断補強帯筋を定着補強帯筋とみなし、これを1組設け、荷重方向及び荷重直交方向の定着補強中子筋は設けていない。

表-2に試験体諸元を示す。なお、 $T_h/T_{cy}$ は柱主筋(一段筋)の降伏引張力 $T_{cy}$ に対する接合部横補強筋の降伏引張力 $T_h$ の比であり、接合部横補強筋比 $p_{jw}$ の算出方法は以下の式(5)による。

$$p_{jw} = \frac{\sum A_{jw}}{b_c \cdot j} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 $A_{jw}$ ：接合部内の横補強筋断面積、 $b_c$ ：柱幅、 $j$ ：

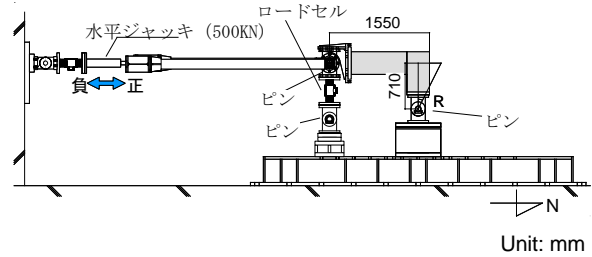


図-5 実験装置

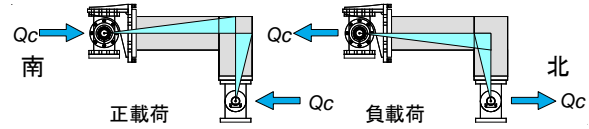


図-6 荷重方法

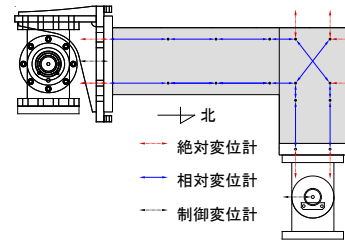


図-7 変位計測定方法

梁の上下の主筋の重心間距離である。

また、コンクリート(粗骨材の最大寸法：20mm)および鉄筋の材料特性は表-3および表-4にそれぞれ示す。なお、粗骨材寸法は実大相当であるが後述する本試験体の破壊モードへの影響は小さいと考える。

## 2.2 実験装置および荷重計画

図-5に荷重実験装置を示す。試験体は荷重フレームに対して柱端部をピン支持とし、南側梁端部をローラー支持とした。また、梁に作用するせん断力を測定するため、ローラー支持内にロードセルを組み込んだ。実験は反力壁に設置したオイルジャッキ(500kN)を用いて梁端部に水平力を正負交番繰り返して作用させた。図-6に示すように水平力荷重の際には、正荷重において柱には梁せん断力により、梁には水平力により圧縮軸力が作用し、負荷重においてはそれぞれ引張軸力が作用する。

水平力荷重は変位制御とし、接合部中央位置の相対水平変位 $\delta$ を柱の節点距離高さ $h$ ( $h=710\text{mm}$ )で除した層間変形角 $R$ ( $R=\delta/h$ )に基づき、 $R=1/800$ および $1/400\text{rad}$ を1サイクル、 $1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/67$ 、 $1/50$ 、 $1/33$ および $1/25\text{rad}$ を2サイクルずつ与えた。ここで、相対水平変位 $\delta$ は南側梁端水平変位(図-7に示す制御変位計)から柱端部のピン中央の水平変位を差し引いた値として定義した。ただし、実験結果より柱端部のピン中央の水平変位は微小であったことを補足する。

## 3 実験結果

### 3.1 履歴性状および破壊性状

各試験体の柱せん断力 $Q_c$ -変形角 $R$ の関係を図-8に、

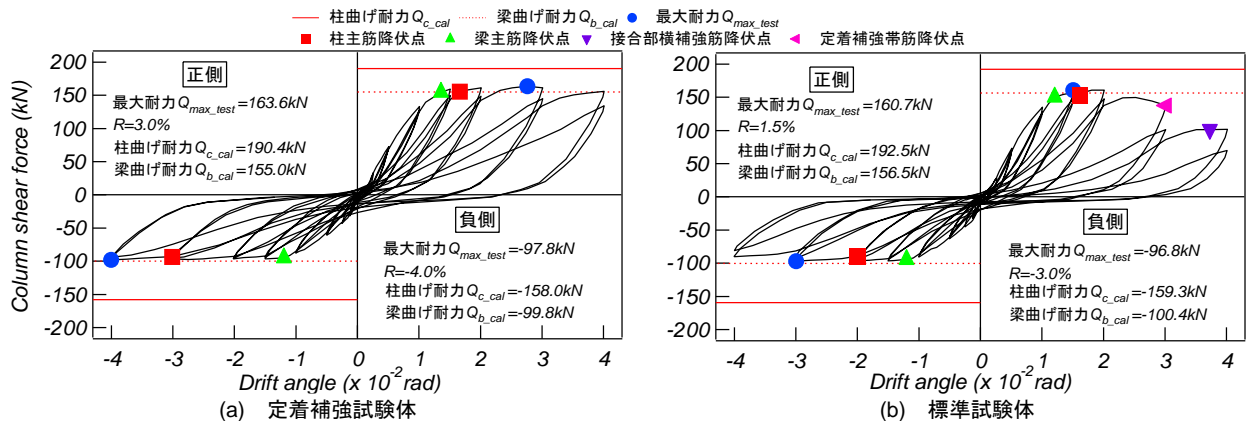


図-8 柱せん断力  $Q_c$ -変形角  $R$  の関係

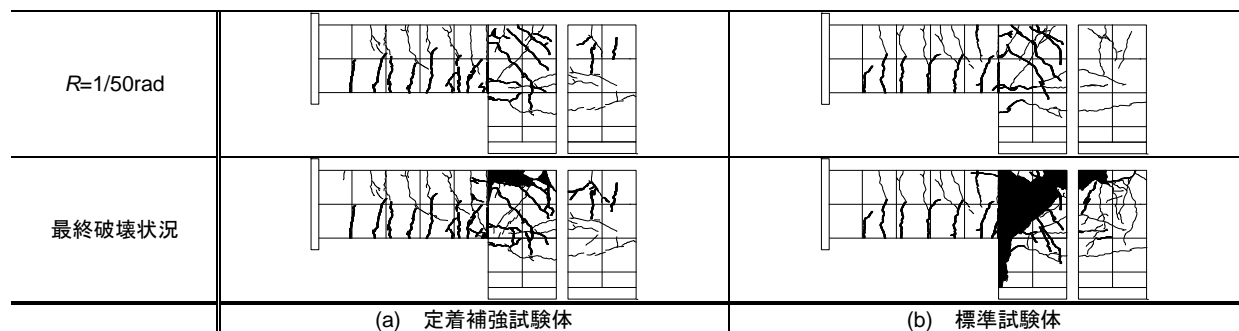


図-9 破壊経過

破壊経過を図-9にそれぞれ示す。

(1) 定着補強試験体

正載荷では、 $R=1/800\text{rad}$  のサイクルにおいて梁の危険断面に曲げひび割れが、 $R=1/200\text{rad}$  のサイクルにおいて柱の危険断面に曲げひび割れが発生した。また、 $R=1/100\text{rad}$  のサイクルにおいて接合部せん断ひび割れが発生した。その後、 $R=1/67\text{rad}$  のサイクルにおいて梁主筋の降伏が確認され、 $R=1/50\text{rad}$  の時に柱主筋の降伏が確認された。 $R=1/33\text{rad}$  のサイクルにおいて最大耐力  $163.6\text{kN}$  に達し、その後、安定した履歴性状を示した。さらに、同サイクルにおいて梁の危険断面におけるカバーコンクリートの圧壊を確認した。変形角  $1/25\text{rad}$  の载荷サイクルにおいてカバーコンクリートの剥落を確認した。また、定着金具および柱主筋端部の露出が確認できたものの、定着破壊は確認されなかった。なお、定着破壊の発生の判断理由については3.2に後述する。

負載荷では、正載荷と同様の破壊性状を示した。 $R=1/67\text{rad}$  のサイクルにおいて梁主筋の降伏を確認した。 $R=1/25\text{rad}$  のサイクルにおいて柱主筋の降伏を確認し、最大耐力  $97.8\text{kN}$  に達した。また正載荷と同様に定着破壊は確認されなかった。

(2) 標準試験体

正載荷、負載荷ともに  $R=1/100\text{rad}$  のサイクルまで定着補強試験体と同様の履歴性状と破壊状況を示した。

正載荷では  $R=1/67\text{rad}$  のサイクルにおいて梁主筋の降伏が確認され、同サイクルのピーク時に最大耐力  $160.7\text{kN}$

が記録された。変形角  $1/50\text{rad}$  の载荷サイクルにおいて柱主筋の降伏を確認した。その後、 $R=1/33\text{rad}$  のサイクルにおいて载荷方向の柱外端の中段筋の定着破壊による耐力低下を確認した。また、同サイクルにおいて定着補強帯筋の降伏が確認された。 $R=1/25\text{rad}$  のサイクルにおいて接合部横補強筋の降伏を確認した。

負載荷では  $R=1/67\text{rad}$  のサイクルにおいて梁主筋の降伏が確認された。 $R=1/50\text{rad}$  のサイクルにおいて柱主筋の降伏が確認され、続く  $R=1/33\text{rad}$  のサイクルにおいて最大耐力  $96.8\text{kN}$  が記録された。また、同サイクルにおいて柱中段筋の定着破壊が確認された。

3.2 各柱主筋における定着破壊の検討

図-10に定着金具端部における柱主筋のひずみ測定位置および载荷サイクルピーク時の定着金具端部における柱主筋ひずみ-変形角の関係を示す。定着破壊の発生有無を検討するために、図-10(b)に示すように接合部内の柱主筋ひずみを確認した。なお、同図は  $R=1/100\text{rad}$  から  $1/25\text{rad}$  のサイクルまでの1回目のピーク時のひずみを示す。

定着補強試験体は図-10より正載荷および負載荷ともに全ての柱主筋の定着金具端部のひずみは  $2000\mu$  付近を維持した。また、図-8(a)に示すように急激な耐力低下も生じなかったため定着破壊は発生しなかったと判断した。一方、標準試験体の正載荷では、図-10(b)に示すように柱外端の中段筋の定着金具端部 (C1) において  $R=1/33\text{rad}$  のサイクルでひずみが低下したことから定着

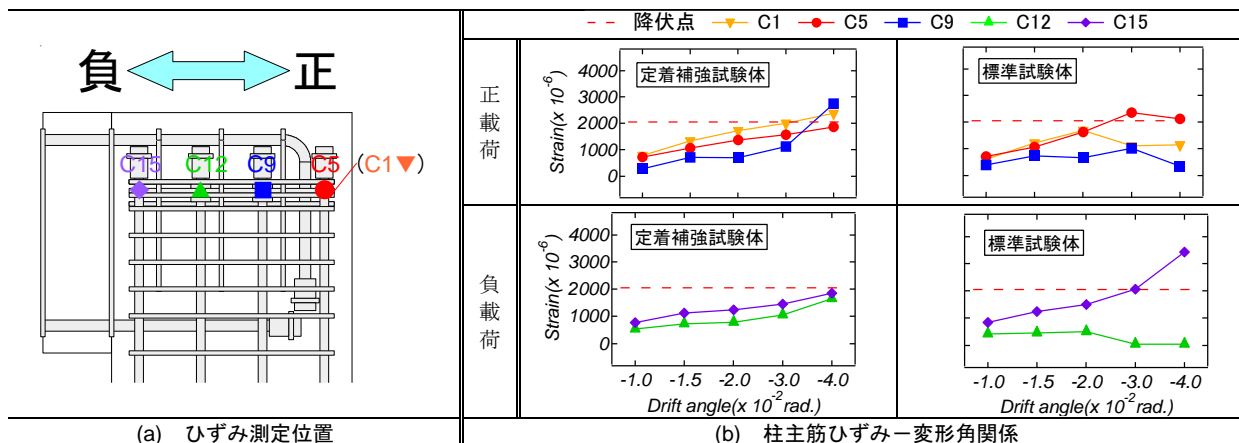


図-10 定着金具端部における柱主筋のひずみ測定位置および  
 載荷サイクルピーク時の定着金具端部における柱主筋ひずみ-変形角の関係

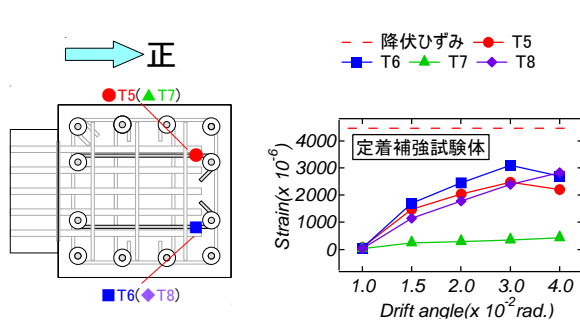


図-11 正載荷における載荷方向の定着補強中子筋  
 のひずみ測定位置および載荷サイクルピーク時の定  
 着補強中子筋ひずみ-変形角の関係



写真-1 標準試験体の変形角 4.0%時における上面の  
 様子

金具の支圧作用が劣化し、定着破壊したと判断した。図-8(b)で水平耐力の劣化が生じたサイクルとも整合している。また、柱主筋隅角部の定着金具端部 (C5) および柱中段筋 (C9) においても  $R=1/25\text{rad}$  のサイクルで同様にひずみが低下したことより定着破壊が発生したと判断した。負載荷では柱中段筋 (C12) において  $R=1/33\text{rad}$  のサイクルでひずみが低下したことより定着破壊が発生したと判断した。また、柱主筋隅角部の定着金具端部 (C15) についてはひずみが増加していたため、定着金具の支圧作用は健全であり定着破壊は発生しなかったと考えられる。

### 3.3 定着補強筋のひずみ

図-11 に載荷平行方向に配した定着補強中子筋のひずみ測定位置および正側載荷サイクルピーク時における同中子筋のひずみ-変形角の関係、図-12 に載荷平行および直交方向の定着補強帯筋および載荷直交方向の定着補強中子筋のひずみ-変形角関係をそれぞれ示す。なお、図-11 中の T5 および T6 は一段目の定着補強中子筋を示しており、T7 および T8 は二段目の定着補強中子筋を示している。また、図-12 中の標準試験体において二段目定着補強帯筋および中子筋は設けられていないため一段目定着補強帯筋およびこれに隣接する接合部横補強筋のひずみのみグラフに記載する。

図-11 より定着補強試験体の載荷平行方向の定着補強中子筋ひずみ (T5, T6, T8) では  $3000\mu$  付近までひずみが達しており同補強筋が有効に機能していることがわかる。なお、二段目の (T7) のひずみが増加しなかったのは、当該位置にひび割れが生じなかったためと考えられる。また、図-12 より載荷直交方向の定着補強中子筋のひずみ (T1, T2, T3, T4) は正載荷において  $2000\mu$  付近、負載荷において  $1000\mu$  付近のひずみに達した。一方、定着補強中子筋を設けていない標準試験体は 3.2 で前述したように載荷方向および載荷直交方向の柱中段筋の定着金具端部において定着破壊が発生した。これらのことから、定着補強中子筋は定着破壊の抑制に有効であることを確認した。図-12 より定着補強試験体の載荷平行方向のひずみ (H2, H3) は正載荷において  $3000\mu$  付近、負載荷において  $1000\mu$  付近のひずみに達した。一方、標準試験体は正載荷において降伏ひずみを大幅に超過し、負載荷では降伏ひずみ付近のひずみに達した。また、定着補強試験体の載荷直交方向のひずみ (H1, H5, H4, H8) は正載荷において一段目 (H1) は  $2000\mu$  付近、二段目 (H5) は  $1000\mu$  付近のひずみに達した。負載荷において一段目 (H4) は  $1500\mu$  付近のひずみであり、二段目 (H8) のひずみは小さかった。一方、標準試験体の正載荷では定着補強試験体と同程度のひずみを確認し、負載荷では降伏ひずみに達した。以上より十分な定着補強帯筋を設けることで載荷方向および載荷直交方向の同ひずみを降伏ひずみ内に抑制できたことから、定着補強帯筋は柱主筋隅角部の定着破壊の抑制に有効であることを確認した。

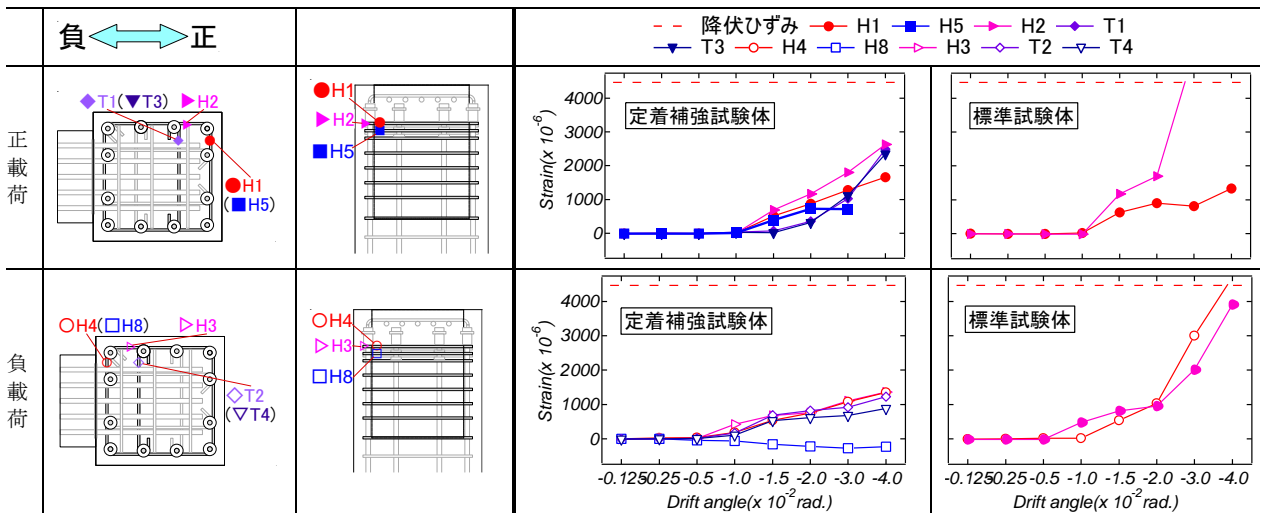


図-12 正載荷および負載荷における定着補強筋および載荷直交方向の定着補強中子筋のひずみ—変形角関係

また、標準試験体の正載荷における柱主筋隅角部の定着破壊方向は載荷方向に生じていると考えられた。これは定着補強帯筋のひずみが載荷直交方向（H1）より載荷平行方向（H2）が大きいこと、さらに写真-1より試験体を上面からみると側面（外端面）に沿ってひび割れが発生していることによる。

#### 4. 耐力評価

表-5 に実験より得られた全試験体の最大耐力と計算値を比較して示す。なお、同表の曲げ耐力計算値は柱および梁の曲げ耐力を柱せん断力に換算した値である。柱および梁の曲げ耐力は ACI ストレスブロック法<sup>2)</sup>を用いて算出した。柱および梁断面の応力は、断面は平面を保持すること、引張側鉄筋は完全弾塑性の応力ひずみ曲線を持つこと、コンクリートの縁ひずみは 0.003 であること、コンクリートの弾性係数は一定であることを仮定して算出した。また、正載荷時には梁端および柱端に柱せん断力および梁せん断力が圧縮軸力として作用し、負載荷時には引張軸力として作用する(図-6)。したがって、梁および柱曲げ耐力の計算は当該軸力をそれぞれ考慮した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性は材料試験の結果(表-3 および表-4)を用いた。

表-5 試験体耐力

		最大耐力の実験値(kN)		曲げ耐力計算値(kN)		実験値/計算値
		梁	柱	梁	柱	
定着補強試験体	正載荷	163.6	155.0	190.4	1.05	
	負載荷	-97.8	99.8	-158.0	0.98	
標準試験体	正載荷	160.7	156.5	192.5	1.03	
	負載荷	-96.8	-100.4	-159.3	0.96	

表-5 より定着補強試験体および標準試験体の正載荷では曲げ耐力計算値に対する実験値の比が 1.00 以上となり実験値が計算値を上回った。一方、負載荷では 1.00 以下となり実験値が計算値を下回る結果であった。実験の負載荷時において梁の危険断面が柱一段筋の位置であったため、最大耐力を過大評価したと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では L 形柱梁接合部の柱主筋定着部の定着補強筋量を変数とする構造実験を実施し、定着補強筋量が L 形接合部の構造性能に与える影響を検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 既往の研究<sup>1)</sup>により必要とされた定着補強筋量を満たす定着補強試験体は梁曲げ降伏先行の破壊機構を示し、 $R=1/25\text{rad}$  まで定着破壊は発生しなかった。
- (2) 既往の研究により必要とされた定着補強筋量を満足しない標準試験体は定着破壊が発生し、 $R=1/67\text{rad}$  時の最大耐力以降耐力低下が確認された。また、正載荷における柱主筋隅角部の定着破壊は載荷方向に発生した。
- (3) L 形柱梁接合部に対して柱主筋端部の定着補強筋がその定着破壊に対し有効に抑制効果を発揮した。
- (4) 両試験体ともに正載荷側では安全側に、負載荷側では 3% 程度最大耐力を過大評価した。

#### 謝辞

本研究は、(一社)ニューテック研究会に設置された「機械式定着工法研究委員会(委員長:前田匡樹東北大学教授)」の研究の一部として行われたものである。実験の計画、実施にあたって委員の方々や、朝日工業(株)、東京鉄鋼(株)の方々より貴重な助言と支援を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 市川寛, 李日兵, 真田靖士, Bah Alpha Oumar Bagou : 機械式定着を用いた T 形柱梁接合部の実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.619-624, 2016.7.
- 2) ACI (American Concrete Institute) : Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14), American Concrete Institute: U.S. 2014.
- 3) 東京鉄鋼: プレートナット工法 (BCJ 評定-RC0152-07) 設計施工指針, p.22, 2010 年 11 月
- 4) 朝日工業株式会社: スクリュープレート工法 (BCJ 評定-RC0287-03) 設計指針