

論文 梁主筋を定着板を用いて直線定着した L 形柱梁接合部の構造性能に対する梁上端主筋拘束筋の効果検証

宇田 啓志*1・中井 実乃里*2・尹 ロク現*3・真田 靖士*4

要旨：本論文は梁主筋を定着板を用いて直線定着した L 形柱梁接合部の構造性能に対する梁上端主筋拘束筋の効果について述べたものである。先行研究において、当該主筋の定着破壊が発生した主因と考察された接合部のせん断変形に伴う主筋に対する押し上げ力に抵抗するために、新たに梁上端主筋に拘束筋を設ける方法を提案した。また、梁上端主筋拘束筋の必要量を提案し、その有効性を検証するため梁上端主筋に設ける拘束筋量と拘束筋の形状を変数とした3体の試験体の静的載荷実験を行い、定着破壊抑制の効果を実証した。

キーワード：鉄筋コンクリート、最上階柱梁接合部、梁曲げ降伏、機械式定着、定着破壊、静的載荷実験

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物における柱梁接合部内の組立作業の合理化等を目的に、機械式定着工法が広く用いられている。しかし、最上階の柱梁接合部に機械式定着工法を適切に使用する方法は十分に明らかにされておらず、定着端部に予期せぬ定着破壊の発生も危惧される。この問題に対して、文献1)では、L 形柱梁接合部の柱主筋に機械式定着工法を用いる場合に文献2)で提案された定着補強筋が有効であることが確認された。また、文献3)では L 形柱梁接合部の損傷状態を考慮し、新たに柱主筋定着端部に必要な定着補強筋量が提案された。

一方で、文献4)では梁上端主筋を直線定着した場合には構造性能が著しく劣化することが確認されており、L 形柱梁接合部における梁上端主筋の定着には一般に折り曲げ定着が用いられている。しかし、主筋が高強度、太径化すると現場における折り曲げ作業が困難になる場合がある。従って、L 形柱梁接合部における梁上端主筋を機械式定着により直線定着する工法が実現できれば、大幅な施工性の向上が期待される。以上のような背景の下、文献5)では、機械式定着により梁主筋を直線定着した L 形接合部の構造性能の把握を目的とした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足している試験体 L-3-MMR においても定着破壊が発生した。これは図-1 に示す接合部のせん断変形に伴う斜め圧縮力が梁上端主筋に作用し、定着補強筋に設計時の想定より大きな引張力が生じたことが主因と考えられた。

以上のような背景を踏まえ、本研究は機械式定着により梁上端主筋を直線定着した L 形柱梁接合部において梁上端主筋に新たに拘束筋を設け、その有効性を検証することを目的とする。また、梁上端主筋に設ける拘束筋量

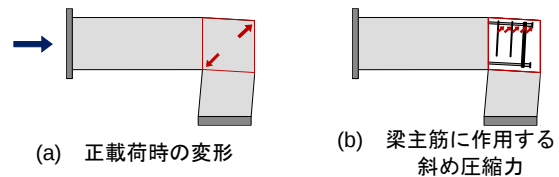


図-1 正載荷の試験体の様子⁵⁾

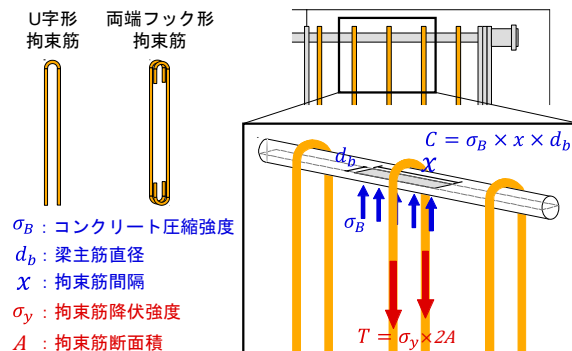


図-2 拘束筋の引張力とコンクリート圧縮力の釣り合い

および拘束筋の形状を変数とした試験体の静的載荷実験を実施し、拘束筋が L 形柱梁接合部の構造性能に与える影響を実験的に検討した。

2. 実験計画

2.1 梁上端主筋の拘束筋と必要量の提案

文献5)で定着破壊の原因として考えられた接合部のせん断変形に伴う斜め圧縮力に抵抗するために、新たに梁上端主筋拘束筋（以下、拘束筋）を設ける方法を提案する。拘束筋の形状は図-2 に示すような U 字形および両端フック形の2種類を計画した。U 字形拘束筋は文献6)の定着長さを確保し、直線部の付着により斜め圧縮力に抵抗する機構を、両端フック形拘束筋は上下梁主筋を拘束することで斜め圧縮力に抵抗する機構を期待した。

拘束筋の必要量については図-2 に示すように、拘束筋を設けることによって発生する引張力 T とコンクリー

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (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

*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)

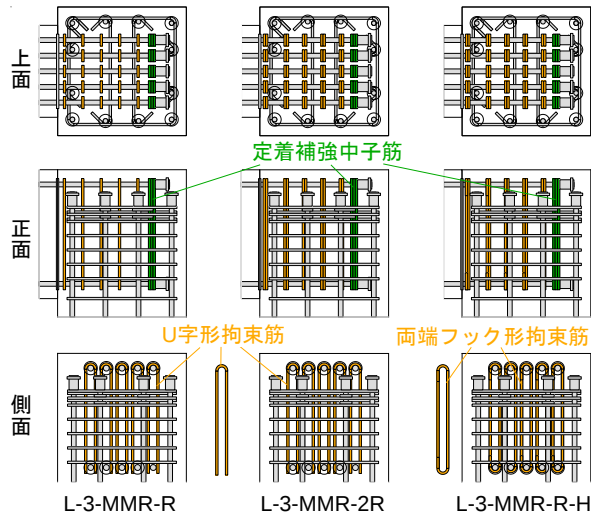
表一 拘束筋間隔の算出における諸条件

梁主筋 D13, コンクリート	拘束筋 D6
$d_b=13$ (mm)	$\sigma_y=345$ (N/mm ²)
$\sigma_B=33.61$ (N/mm ²)	$A=31.67$ (mm ²)

柱 (両試験体共通)
B×D: 350×350
主筋: 12-D13(SD345)
せん断補強筋: D6(SD345)@50

梁 (両試験体共通)
B×D: 250×350
主筋: 10-D13(SD345)
せん断補強筋: D6(SD345)@100

(a) 試験体形状 (unit: mm)



(b) 接合部配筋詳細

図一 試験体形状および接合部配筋詳細

トの圧縮力 C の釣り合いから、理論的に算出する。ここで、斜め圧縮力の作用角度は厳密には未知であるため、最も厳しい条件である梁上端主筋に対して垂直方向にコンクリートの圧縮強度相当の圧縮応力が作用すると仮定する。このとき、接合部のせん断変形に伴う圧縮力が梁主筋に伝達されコンクリートを上方に押し出す力 (=コンクリートの圧縮力 C) は、コンクリートの圧縮強度 σ_B と梁主筋の水平投影面積の積として以下の式(1)で評価できる。

$$C = \sigma_B \times x \times d_b \quad (1)$$

また、拘束筋の引張力 T は以下の式(2)で表される。

$$T = \sigma_y \times 2A \quad (2)$$

ここで、 σ_B : コンクリート圧縮強度, x : 拘束筋間隔, d_b : 梁主筋直径, σ_y : 拘束筋降伏強度, A : 拘束筋断面積である。

式(1)および式(2)の力の釣り合いより、拘束筋間隔 x は式(3)により求めることができる。

$$C = T$$

$$x = \frac{\sigma_y \times 2A}{\sigma_B \times d_b} \quad (3)$$

表二 試験体諸元

	L-3-MMR-R	L-3-MMR-2R	L-3-MMR-R-H
横補強筋	D6		
接合部補強筋本数	5		
定着補強帯筋数 (柱)	2 (余裕度 100%)		
定着補強中子筋数 (柱, 載荷直交方向)	柱中段筋それぞれに 2 組 (フックは図一3 参照) (余裕度 150%)		
定着補強中子筋数 (柱, 載荷方向)	柱中段筋それぞれに 2 組 (両端 180° フック) (余裕度 150%)		
定着補強中子筋数 (梁)	各 3 (両端 180° フック) (余裕度 225%)		
U 字形拘束筋	10-D6 (SD345)@50 (余裕度 100%)	20-D6 (SD345)@50 (余裕度 200%)	-
両端フック形拘束筋	-	-	10-D6 (SD345)@50 (余裕度 100%)
接合部補強筋比 T_h/T_{cy}	0.7		
接合部横補強筋比 p_{hw}	0.6%		
B×D	350×350 mm		
主筋	12-D13 (SD345)		
引張鉄筋比	0.47%		
せん断補強筋	D6@50		
せん断補強筋比	0.36%		
せん断スパン比	1.73		
B×D	250×350 mm		
主筋	10-D13 (SD345)		
引張鉄筋比	0.82%		
せん断補強筋	D6(SD345)@100		
せん断補強筋比	0.25%		
せん断スパン比	3.81		
梁柱曲げ耐力比	正	0.81	
	負	0.63	

個々の梁上端主筋に、式(3)から算出した必要拘束筋間隔以下で拘束筋を設けることで必要量を満たすことができる。後述する試験体に対する必要拘束筋間隔の計算には表一に示す値を用いた。なお、コンクリートの圧縮強度は文献 5)における試験体 L-3-MMR の材料試験の値を用いた。

2.2 試験体計画

本研究では RC 造 5 階建ての共同住宅の最上階 L 形柱梁接合部を研究対象とし、試験体は対象建物の 1/2 スケールで模擬し、梁上端主筋に設ける拘束筋量および拘束筋の形状を実験変数とした計 3 体である。図一3 に試験体形状および接合部配筋詳細をそれぞれ示す。試験体の柱断面は 350mm×350mm、梁断面は 250mm×350mm である。文献 5)の試験体 L-3-MMR を基に、2.1 節で算出した必要拘束筋量を満足するよう U 字形の拘束筋を個々の梁主筋に配筋した試験体を L-3-MMR-R, 拘束筋量を必要量の 2 倍にした試験体を L-3-MMR-2R, 試験体 L-3-MMR-R と同様の補強筋量で U 字形拘束筋の代わりに両端フックの拘束筋で上下梁主筋を拘束するように配筋した試験体を L-3-MMR-R-H と計画する。なお、柱主筋の定着端部には文献 2)で提案された定着補強帯筋および定着補強中子筋を必要量配筋した。表二に試験体諸元を示す。また、同表には定着補強帯筋²⁾および定着補強中子筋²⁾, 梁上端主筋拘束筋の必要量に対する余裕度を、既往の研究で提案された算定式および 2.1 節で前述した算定式を

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
L-3-MMR-R	26.9 N/mm ²	2.7×10^4 N/mm ²	1.9 N/mm ²
L-3-MMR-2R	28.2 N/mm ²	2.7×10^4 N/mm ²	2.1 N/mm ²
L-3-MMR-R-H	28.2 N/mm ²	2.5×10^4 N/mm ²	2.1 N/mm ²

表-4 鉄筋の材料特性

TYPE (SD345)	降伏強度	降伏ひずみ	ヤング係数	引張強度
D6	443 N/mm ²	4382 μ	18.6×10^4 N/mm ²	587 N/mm ²
D13	387 N/mm ²	1917 μ	20.2×10^4 N/mm ²	566 N/mm ²

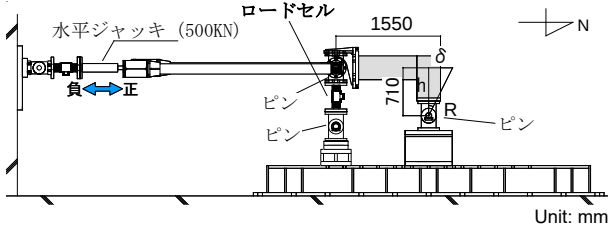


図-4 実験装置

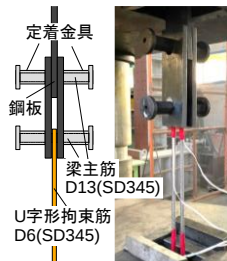


図-5
U字形拘束筋の
引張試験装置

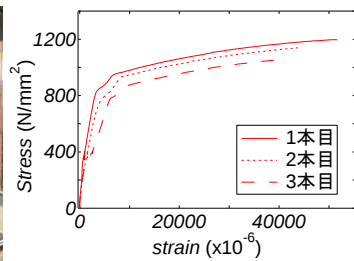


図-6 U字形拘束筋の
引張試験結果

もとに括弧内にそれぞれ併記する。なお、試験体の各主筋は文献 7)および文献 8)の必要定着長さ（梁せいの 3/4 倍かつ柱主筋直径の 12 倍の長さ）を確保した。

また、コンクリート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、D6 の鉄筋については明確な上降伏点が確認されなかったため、0.2%オフセット値を用いた。

2.3 荷重計画

図-4 に実験装置を示す。試験体は荷重フレームに対して柱端部をピン支持とし、南側梁端部を水平方向の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それぞれ正負交番繰り返しで作用させた。

水平力荷重は変位制御とし、梁中心高さの相対水平変位 δ を柱の反曲点一節点間の高さ h ($=710\text{mm}$) で除した層間変形角 R ($=\delta/h$) に基づき、 $R=0.125$ および 0.25% rad を 1 サイクル、0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 および 4.0% rad を 2 サイクルずつ与えた。ここで、相対水平変位 δ は南側梁端水平変位から柱端部のピン中心の水平変位を差し引いた値として定義した。ただし、実験結果より後者の水平変位は微小であったことを補足する。

3. U字形拘束筋の引張試験

図-5 に U 字形拘束筋の引張試験装置、図-6 に U 字形拘束筋の引張試験結果をそれぞれ示す。図-5 に示すように梁主筋を介して鋼板と U 字形拘束筋に引張力を作用させることで、梁上端主筋に作用する圧縮力の反力を U 字形拘束筋が負担する様子を模擬した試験装置を製作した。なお、鋼板の強度は U 字形拘束筋 D6 (SD345) に対し 2 倍以上の強度を確保した上、引張試験を行った。図-6 の縦軸は鋼板および U 字形拘束筋の下端に作用させた引張力を拘束筋の公称断面積 (1 本分) で除した値である。また、鉄筋のひずみは図-5 の写真に示すように 4 カ所 (赤色) で測定し、その 4 カ所で測定したひずみの平均値を図-6 の横軸に用いた。同図より、U 字形拘束筋が D6 (SD345) の一本分以上の応力を負担していることが確認でき、U 字形拘束筋が D6 (SD345) 2 本分の規格強度相当の拘束効果があることを実験的に確認した。

4. 実験結果

図-7 に各試験体の柱せん断力 Q_c -変形角 R の関係を、写真-1 に $R=4.0\%$ rad における各試験体の破壊状況、図-8 に各試験体の観測面および柱外端面における最終破壊状況をそれぞれ示す。さらに、図-7 の図中には比較検討のため、文献 5) の試験体 L-3-MMR の実験結果を青色線で併せて示す。

4.1 荷重-変形角関係と破壊経過

(1) L-3-MMR-R (U 字形拘束筋・必要量)

正荷重 (柱梁が閉じる側) では、 $R=0.25\%$ rad のサイクルにおいて柱および梁の危険断面に曲げひび割れ、 $R=1.0\%$ 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。続く、 $R=1.5\%$ rad のサイクルにおいて梁上端主筋および柱主筋の降伏を確認し、さらに、 $R=2.0\%$ rad のサイクルにおいて梁危険断面のひび割れおよび柱上面のひび割れの拡幅を確認した。また、柱上面に梁主筋の反り上げによるコンクリートの盛り上がりが見られた。その後、 $R=4.0\%$ rad の 1 サイクル目において最大耐力 157.5kN を記録し、2 サイクル目において接合部入隅部の梁側コンクリートが剥落し、梁主筋の座屈を確認した。負荷荷重 (柱梁が開く側) では、 $R=1.0\%$ rad のサイクルにおいて接合部せん断ひび割れが発生し、梁下端主筋の降伏を確認した。その後、 $R=4.0\%$ rad のサイクルにおいて柱主筋の降伏を確認し、最大耐力 98.0kN を記録した。

梁上端主筋に拘束筋を設けていない試験体 L-3-MMR と比較して拘束筋の有無に着目して考察すると、試験体 L-3-MMR-R は拘束筋を設けることで正負荷重ともに最終変形角まで梁主筋の定着破壊は発生せず安定した履歴

性状を示した。これは 2.1 節で提案した梁上端主筋の拘束筋量が妥当であったことを実証している。

(2) L-3-MMR-2R (U 字形拘束筋・必要量の 2 倍)

正載荷 (柱梁が閉じる側) では, $R=1.0\%$ rad のサイクルまで試験体 L-3-MMR-R と概ね同様な荷重-変形履歴および破壊経過を示した。続く, $R=1.5\%$ rad のサイクルにおいて梁危険断面のひび割れが拡幅し, $R=3.0\%$ rad のサイクルにおいて梁主筋に沿ったひび割れを確認した。また, 同載荷サイクルにおいて柱主筋の降伏を確認し, 最大耐力 161.3kN を記録した。その後, $R=4.0\%$ rad のサイクルにおいて接合部入隅部の梁側コンクリートが剥落し, 梁主筋の座屈を確認した。負載荷 (柱梁が開く側) では, $R=1.0\%$ rad のサイクルにおいて梁下端主筋の降伏を確認し, 続く $R=1.5\%$ 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, $R=3.0\%$ rad のサイクルにおいて柱主筋の降伏を確認し, 最大耐力-98.3kN を記録した。

拘束筋の必要量を 1 倍設けた試験体 L-3-MMR-R と比較して拘束筋量に着目して考察すると, 当然の結果ながら試験体 L-3-MMR-2R は必要量の 2 倍設けているため, L-3-MMR-R と同様に最終変形角まで定着破壊は発生せず安定した履歴性状を示した。

(3) L-3-MMR-R-H (両端フック形拘束筋・必要量)

正載荷 (柱梁が閉じる側) では, $R=1.0\%$ rad のサイクルまで試験体 L-3-MMR-R と概ね同様な荷重-変形履歴および破壊経過を示した。 $R=2.0\%$ rad のサイクルにおいて柱主筋の降伏を確認し, 梁主筋に沿ったひび割れが発生した。続く, $R=3.0\%$ rad のサイクルにおいて最大耐力 161.0kN を記録した。 $R=4.0\%$ rad の 1 サイクル目において梁端部コンクリートの顕著な圧壊および耐力低下を確認した。負載荷 (柱梁が開く側) では $R=3.0\%$ rad のサイクルまで試験体 L-3-MMR-2R と概ね同様な荷重-変形履歴および破壊経過を示した。その後, $R=4.0\%$ rad のサイクルにおいて最大耐力-101.8kN を記録した。

U 字形拘束筋を有する試験体 L-3-MMR-R と比較して拘束筋の形状に着目して考察すると, 試験体 L-3-MMR-R-H は $R=3.0\%$ rad のサイクルまでは試験体 L-3-MMR-R と同等な履歴性状を示したものの, 正載荷の $R=4.0\%$ rad のサイクルにおいて梁端部コンクリートの圧壊による耐力低下が見られた。ただし, 他の試験体と同様に実験終了まで定着破壊は確認されなかった。

4.2 梁主筋端部に設けた定着補強中子筋のひずみ推移

図-9 に梁主筋定着端部における定着補強中子筋のひずみ測定位置および正載荷サイクルピーク時における同ひずみ-変形角の関係を示す。なお, 同図は $R=1.0\%$ rad から $R=4.0\%$ rad のサイクルまでの 1 回目のピーク時のひずみを示す。また, 同図には定着破壊した試験体 L-3-

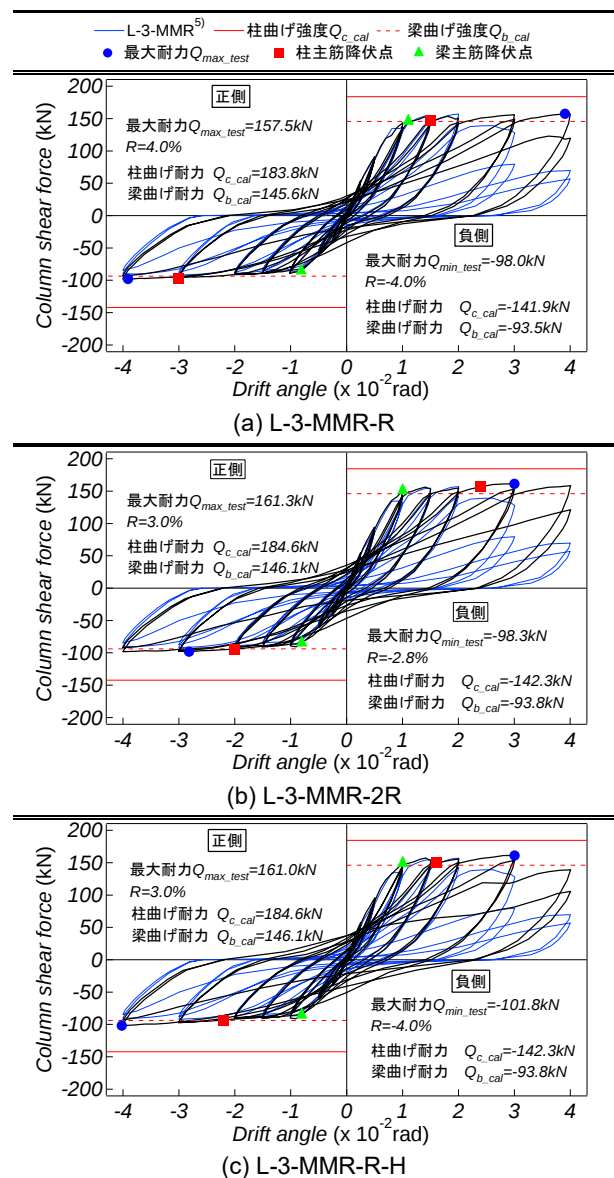


図-7 柱せん断力 Q_c -変形角 R の関係

MMR⁵⁾の対応するデータを灰色線で併せて示す。

試験体 L-3-MMR⁵⁾の定着補強中子筋のひずみが早期に降伏ひずみに達したのに対し, 本稿の全ての試験体ともに最終変形角まで降伏ひずみ (4382 μ) 未満に抑制された。これは, 梁上端主筋に拘束筋を設けた場合, 文献 3) で算定した定着補強筋量が梁上端主筋を直線定着した L 形柱梁接合部の同主筋に対して, 十分であることを示唆する。

4.3 梁上端主筋拘束筋のひずみ量の分析

図-10 に梁上端主筋に設けた拘束筋のひずみ測定位置および同ひずみ-変形角の関係を示す。全試験体ともに接合部せん断ひび割れが発生していない $R=0.5\%$ rad のサイクルまではほとんどひずみ値を示さない結果であったため, 同図ではそれ以降の載荷サイクルのピーク時のひずみについてのデータを示す。全ての試験体において拘束筋のひずみは降伏ひずみ内に抑制された。正載荷では梁主筋の定着端部側に設けた拘束筋のひずみ (R_1, R_2),

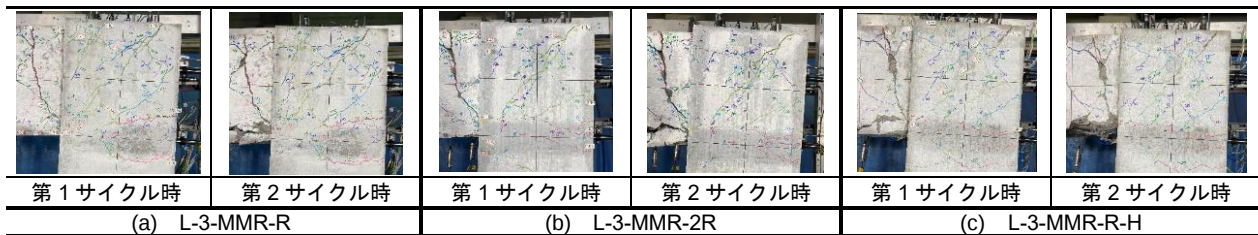


写真-1 R=4.0%radにおける各試験体の破壊状況

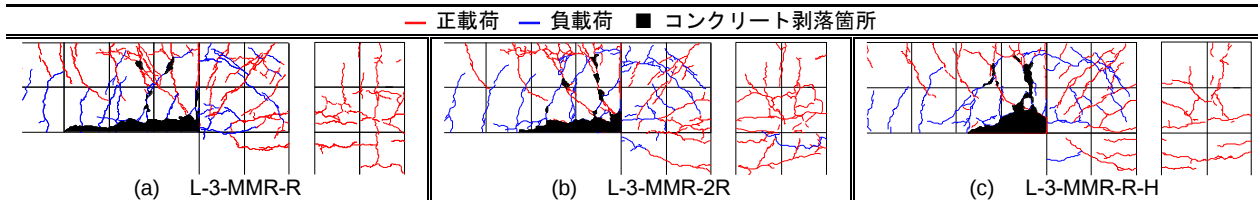


図-8 各試験体の観測面および柱外端面における最終破壊状況

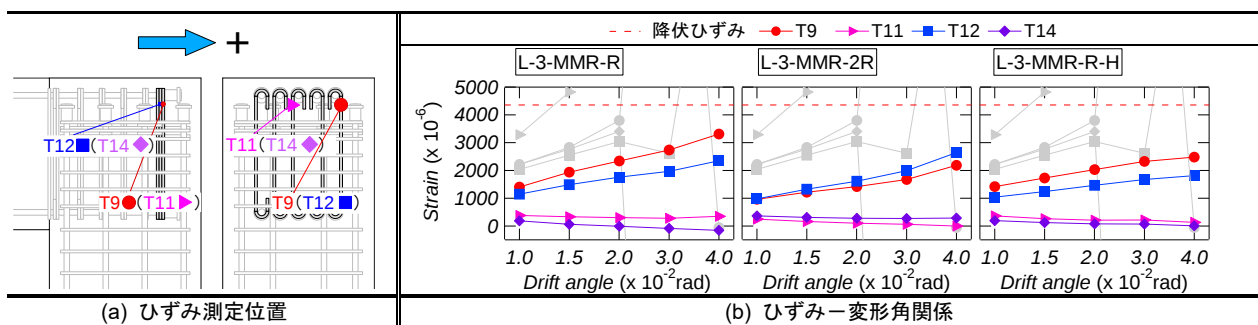


図-9 梁主筋の定着補強中子筋のひずみ測定位置および正載荷ピーク時のひずみ-変形角関係

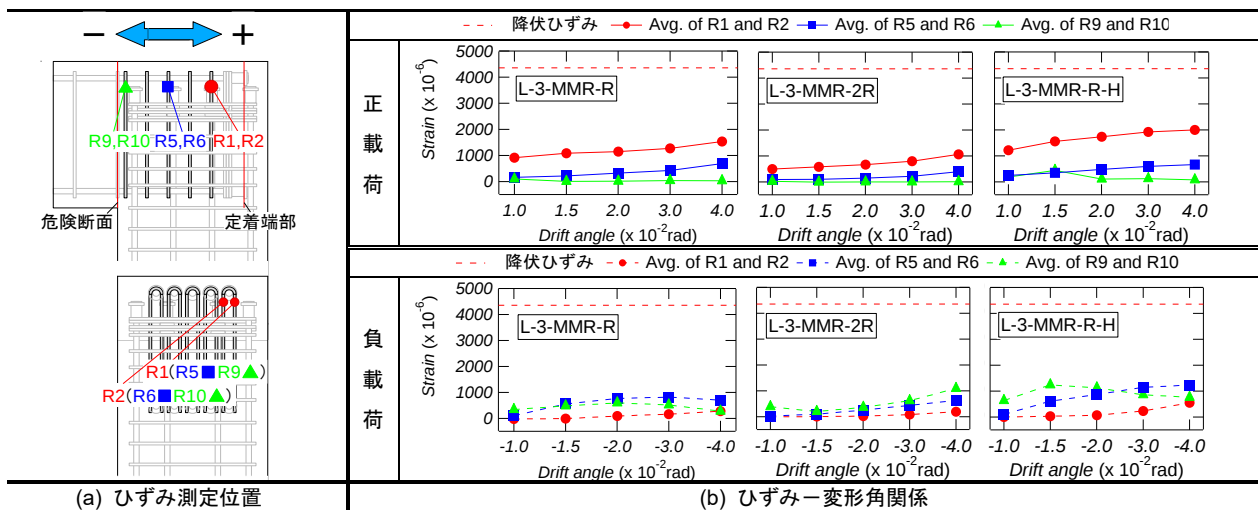


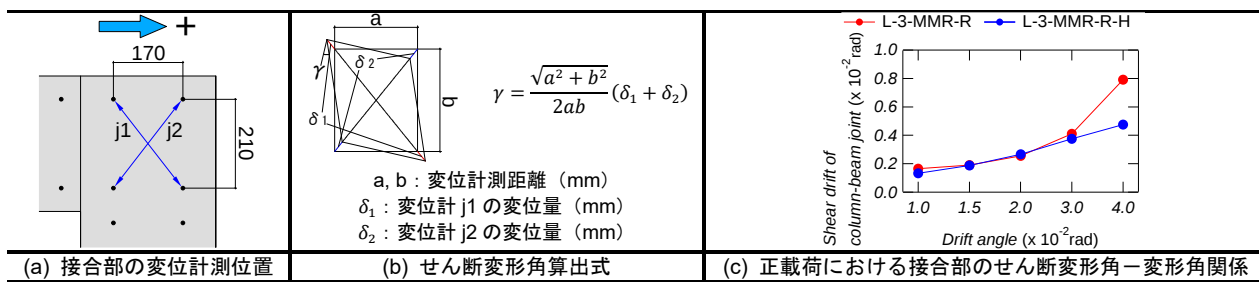
図-10 梁上端主筋拘束筋のひずみ測定位置および正負載荷ピーク時のひずみ-変形角関係

負載荷では梁危険断面側に設けた拘束筋のひずみ (R9, R10) が大きい傾向があり、接合部のせん断変形に伴う斜め圧縮力の影響が確認された。また、正載荷では接合部のせん断変形が進むにつれ、定着端に近い拘束筋のひずみ量が漸増したことから、拘束筋が先行研究⁹⁾において考慮されていなかった梁上端主筋に作用する接合部のせん断変形に伴う圧縮応力 (図-1(b)) の反力を負担していると考えられ、2.1 節に示した必要拘束筋間隔 (式(3)) の式の妥当性を確認した。さらに、拘束筋量を2倍にした試験体 L-3-MMR-2R では、他の試験体と比較して拘束筋のひずみをより抑制する効果が確認された。

以上の結果より、拘束筋が接合部のせん断変形に伴う斜め圧縮力を負担し、梁主筋の定着補強中子筋のひずみを抑制したことで、定着破壊の発生を防止できたと考えられる。

4.4 拘束筋形状が構造性能に与えた影響

図-11 に接合部の変位計測定位置およびせん断変形角算出式、正載荷サイクルピーク時の接合部のせん断変形角-変形角関係を示す。同じ拘束筋量を有する試験体 L-3-MMR と L-3-MMR-R-H を比較すると、図-7 に示すように L-3-MMR-R-H が早期に耐力低下した。両試験体の違いは拘束筋形状であり、早期に耐力低下したのは拘



図－11 接合部の変位計測定位置およびせん断変形角算出式、
正載荷サイクルピーク時の接合部のせん断変形角－変形角関係

束筋形状による影響の可能性が挙げられる。図－11 に示すように $R=4.0\%$ のサイクルピーク時に両端フック形拘束筋の試験体 L-3-MMR-R-H が U 字形拘束筋の試験体 L-3-MMR-R より接合部のせん断変形が抑制されている。したがって、前者において接合部のせん断変形が抑制され、梁の曲げ変形が卓越した結果、写真－1 に示すように接合部入隅部において局所的な曲げ圧壊がより早期に発生し、その結果、耐力低下がより早期に生じたと考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 2.1 節で提案した必要量を満足するよう梁上端主筋に拘束筋を設けた全ての試験体で、正負載荷ともに大変形域まで安定した復元力特性を示し、最終変形角 $R=4.0\%$ まで定着破壊は確認されなかった。
- 全ての試験体において梁主筋端部に設けた定着補強中子筋のひずみは最終変形角まで降伏ひずみ未満に抑制され、梁上端主筋に拘束筋を設けた場合、文献 3) で算定した定着補強筋量が梁上端主筋を直線定着した L 形柱梁接合部の同主筋に対して十分であることを確認した。
- 全ての試験体において梁上端主筋拘束筋のひずみは変形角とともに漸増したが、降伏ひずみ未満に抑制され、2.1 節で提案した必要拘束筋量の妥当性を確認した。また、特に拘束筋量を 2 倍にした試験体 L-3-MMR-2R では、他の試験体と比較して拘束筋のひずみをより抑制する効果が確認できた。
- 両端フック形拘束筋を有する試験体 L-3-MMR-R-H が早期に耐力低下したのは、U 字形拘束筋を有する試験体 L-3-MMR-R と比較して接合部のせん断変形が抑制され、梁端部でのコンクリートの圧壊が早期に発生したことが主因と考えられる。

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る。

参考文献

- 長谷川蒼太，新井博登，尹ロク現，真田靖士：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，pp.619-624，2020.7
- 市川寛，李曰兵，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
- 長谷川蒼太，中井実乃里，尹ロク現，真田靖士：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定着補強筋の効果検証 その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.427-428，2021.9
- 吉村匡裕，清原俊彦，田才晃，楠浩一：機械式定着工法を用いた最上階外部柱梁接合部の構造性能向上に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.289-294，2012.7
- 中井実乃里，長谷川蒼太，尹ロク現，真田靖士：機械式定着により梁主筋を直線定着した L 形柱梁接合部への定着補強筋の効果を検証するパイロット実験と有限要素法解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.799-804，2022.7
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説，p12，2021.3
- 東京鉄鋼株式会社：プレートナット工法（BCJ 評定-RC0152-07）設計施工指針，2010.11
- 朝日工業株式会社：スクリュープレート工法（BCJ 評定-RC0287-06）設計指針，2013.9