

論文 梁主筋を定着板を用いて直線定着した L 形柱梁接合部における梁上端主筋拘束筋の合理的な設計に関する検討

竹谷 公花*1・劉 博敏*2・尹 ロク現*3・真田 靖士*4

要旨：本研究では、梁主筋を定着板を用いて直線定着した L 形柱梁接合部における梁上端主筋拘束筋の合理的な設計に関する検討を行った。接合部のせん断変形に伴う斜め圧縮力に抵抗するため梁上端主筋に拘束筋を設ける方法を提案しており、斜め圧縮力の作用角度に基づき合理的な拘束筋量を検討した。拘束筋量（拘束筋間隔）を変数とする 3 体の試験体の静的載荷実験を実施した結果、拘束筋量が構造性能および定着破壊の発生に与える影響が明らかとなり、合理的な拘束筋設計における新たな知見が得られた。

キーワード：鉄筋コンクリート、最上階外柱梁接合部、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、RC 造建物の柱梁接合部では、組立作業の効率化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 L 形接合部における適切な使用法は十分に明らかになっておらず、定着端部での破壊が懸念されている。文献1)では梁上端主筋を直線定着した場合、構造性能が大きく劣化することが確認されているため、L 形柱梁接合部では通常、折り曲げ定着が採用されている。文献2)では機械式定着による直線定着工法の実現可能性を検討するため、梁端部の定着破壊を防止する定着補強筋を設け、静的載荷実験を行った結果、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破壊が発生した。上記の知見を踏まえ、文献3)では斜め圧縮力に抵抗する拘束筋を設ける方法を提案し(図-1)、変形角 4%まで定着破壊の発生を抑制できることを確認した。これにより、L 形接合部における梁主筋の定着板を用いた直線定着の実現可能性が示された。

文献3)では上記の接合部のせん断変形に伴う圧縮力が梁上端主筋に対して垂直方向に作用すると(設計上安全側に)仮定して拘束筋量を算出した。しかし、実際には斜め方向に作用すると考えられるため、作用圧縮力(必要拘束筋量)を過大評価した可能性を指摘できる。

以上を踏まえて本研究では梁上端主筋における拘束筋の合理的な配筋量を検討することを主目的とし、拘束筋量(間隔)を変数とした試験体を作成し、拘束筋量が L 形接合部の構造性能に与える影響を実験的に検証した。

2. 実験計画

2.1 梁上端主筋に対する必要拘束筋量の算定

図-1 の黒枠に示すように、文献3)では拘束筋の引張力 T とコンクリートの圧縮力 C の釣り合いを、圧縮力が

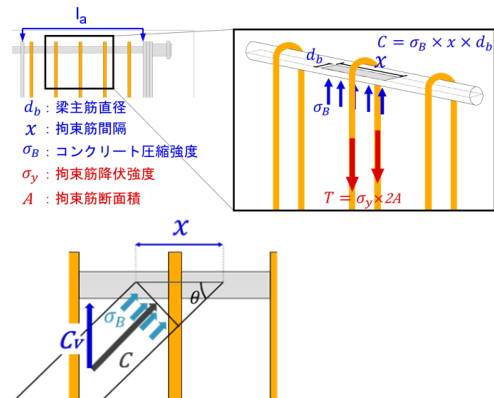


図-1 拘束筋の引張力とコンクリート圧縮力の釣り合い

主筋に対して垂直に作用すると仮定し、必要拘束筋量を算出した。より現実的に、圧縮力の作用角度を θ と仮定すると、梁上端主筋(1本あたり)に作用するコンクリート圧縮力 ΣC_v は式(1)により求められる。

$$C = \sigma_B \times x \sin \theta \times d_b$$

$$\Sigma C_v = \Sigma C \times \sin \theta = \sigma_B \times l_a \sin^2 \theta \times d_b \quad (1)$$

また、1本の梁上端主筋へ直交方向に作用する拘束筋の引張力 ΣT は式(2)で表される。

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

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、 l_a : 柱フェイスから1本目梁定着補強筋端部までの距離、 σ_y : 拘束筋降伏強度、 A : 拘束筋断面積、 n : 理論上梁主筋1本当たりに必要な拘束筋数である。

式(2)の拘束筋の引張力の合計値が式(1)で評価したコンクリート圧縮力を上回ることを条件とし、梁上端主筋1本当たりの必要拘束筋数 n' は式(3)により求められる。

$$\Sigma T \geq \Sigma C_v$$

$$n' \geq \frac{\sigma_B \times l_a \sin^2 \theta \times d_b}{2A \times \sigma_y} \quad (3)$$

*1 大阪大学 工学部 地球総合工学科 (学生会員)

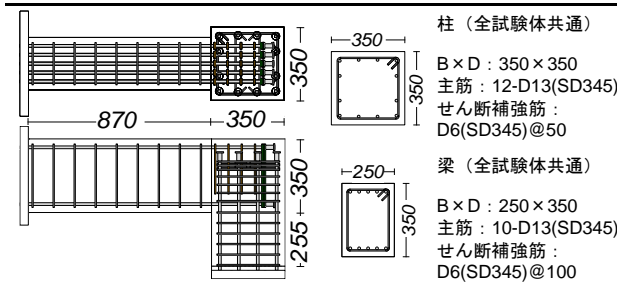
*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻

*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)

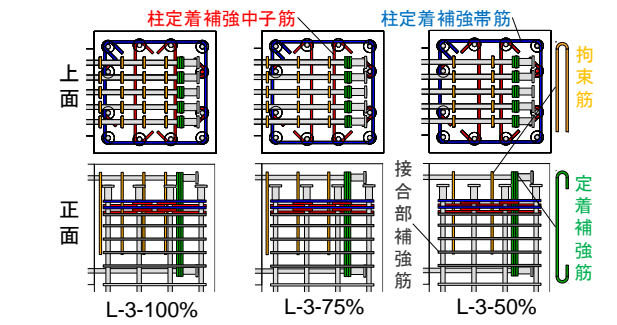
*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

表一 拘束筋間隔の算出における諸条件

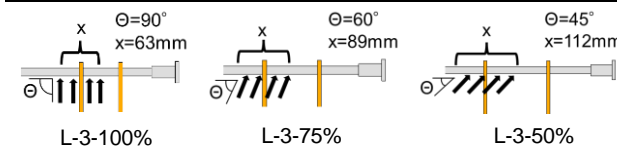
梁主筋 D13, コンクリート	拘束筋 D6
$d_b=13$ (mm)	$\sigma_y=391$ (N/mm ²)
$\sigma_B=24$ (N/mm ²)	$A=31.67$ (mm ²)



(a)試験体形状 (unit: mm)



(b)接合部配筋詳細



(c)梁上端主筋が受ける斜め圧縮力の作用角度

図一 試験体形状, 接合部配筋詳細および
梁上端主筋が受ける斜め圧縮力の作用角度

個々の梁上端主筋に、式(3)から算出した必要拘束筋数を満たす拘束筋を設けることを、定着破壊を抑制するための設計条件とみなす。後述する試験体に対する必要拘束筋数の計算には表一に示す値を用いた。

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を実験変数とした計 3 体である。図一に試験体形状および接合部配筋詳細をそれぞれ示す。柱断面は 350mm×350mm、梁断面は 250mm×350mm である。文献3)で十分な拘束筋を設け高い変形性能を示した試験体 L-3-MMR-R と同一の配筋を有する試験体 L-3-100%を標準試験体とし、変形角が 4%に達するまで強度を維持することを目標として新たに計画した。これは文献3)では規格材料強度に基づく設計より、やや過剰な余裕度が結果的に付与されたためである。試験体 L-3-100%を基準に斜め圧縮力が

表二 試験体諸元

	L-3-100%	L-3-75%	L-3-50%
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 (フックは図一参照) (余裕度 150%)		
定着補強筋数 (梁)	各 3 (両端 180° フック) (余裕度 107%)		
拘束筋 (U 字形)	4U-D6 (SD345)@63	3U-D6 (SD345)@89	2U-D6 (SD345)@112
余裕度 角度 θ (垂直方向)	127%, $\theta=90^\circ$ (127%)	121%, $\theta=60^\circ$ (85%)	130%, $\theta=45^\circ$ (65%)
接合部補強筋比 T_n/T_{cy}	0.7		
接合部横補強筋比 p_{pw}	0.6%		
BxD	350 × 350 mm		
主筋	12-D13 (SD345)		
引張鉄筋比	0.47%		
せん断補強筋	D6 (SD345)@50		
せん断補強筋比	0.36%		
BxD	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%		
梁柱曲げ 強度比	正	0.79	
	負	0.66	

表三 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-3-100%	24.9 N/mm ²	2.58×10 ⁴ N/mm ²	1.73 N/mm ²
L-3-75%	25.3 N/mm ²	2.71×10 ⁴ N/mm ²	2.64 N/mm ²
L-3-50%	26.4 N/mm ²	2.73×10 ⁴ N/mm ²	2.69 N/mm ²

表四 鉄筋の材料特性

TYPE (SD345)	降伏強度	降伏強度時 ひずみ	ヤング係数	引張強度
D6	391 N/mm ² **	4,073 μ **	18.9×10 ⁴ N/mm ²	557 N/mm ²
D13	397 N/mm ²	2,074 μ	19.2×10 ⁴ N/mm ²	538 N/mm ²

*0.2%オフセット値 (材料試験による応力-ひずみ関係に基づく)

梁主筋に 60° の角度で作用することを仮定し梁主筋あたりの拘束筋本数を 3 本 (拘束筋の間隔 89mm) に減じた試験体 L-3-75%, 斜め圧縮力の作用角度を 45° と仮定し梁主筋あたりの拘束筋本数を 2 本 (拘束筋の間隔 112mm) に減じた試験体 L-3-50%を計画した。表二に試験体諸元を示す。同表の定着補強帯筋および定着補強中子筋 (図一(b)) の必要量に対する余裕度は文献 4)で提案された算定式に基づく。全ての試験体において、文献 5)を参考に拘束筋の定着長さは鉄筋直径の 35 倍以上を確保している。梁上端主筋拘束筋の必要量に対する余裕度は、2.1 節で説明したコンクリートの圧縮力 C が梁上端主筋に対して角度 θ で作用すると仮定した場合における理論必要量 (n) に対する数値を示すが、垂直方向に作用すると仮定した場合の参考値を括弧内に併記した。

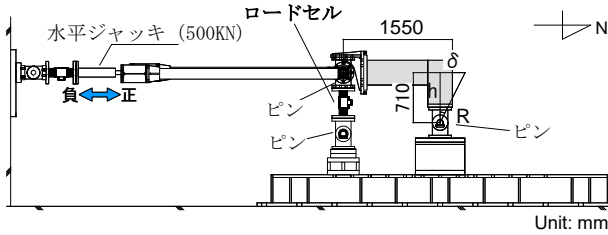


図-3 実験装置

なお、梁および柱の曲げ強度の計算において、正載荷時は梁および柱に圧縮力、負載荷時は引張力が作用するためそれぞれ当該軸力を考慮した。

また、コンクリートの材料特性は表-3に、鉄筋の材料特性は表-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 載荷計画

図-3に実験装置を示す。試験体は載荷フレームに対して柱端部をピン支持とし、南側梁端部には両端にピン配置した剛強な鉛直材で支持することで、水平方向のローラ支持と同等の機構を再現した。さらに、梁に作用するせん断力を測定するため、上記の鉛直材にはロードセルを内蔵した。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替繰り返しで作用させた。

水平力載荷は変位制御とし、梁中心高さの相対水平変位 δ を柱の反曲点-梁中心間の高さ h (=710mm)で除した層間変形角 R (= δ/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. 実験結果

図-4に各試験体の柱せん断力 Q_c -変形角 R の関係、図-5に $R=4.0\%$ radにおける各試験体の観測面(正面)、上面および柱外端面の最終破壊状況を示す。また、写真-1に各試験体の最終破壊状況を示す。なお、図-4(a)には文献3)の試験体L-3-MMR-Rの柱せん断力 Q_c -変形角 R の関係を青線で併記する。また、同図には柱および梁曲げ強度も併記する。

3.1 荷重-変形角関係と破壊経過

(1) L-3-100% (拘束筋量 4-D6/本: 想定圧縮力角度 90°)

正載荷では、 $R=0.25\%$ radのサイクルで梁の危険断面に曲げひび割れが発生し、 $R=0.5\%$ radのサイクルで柱の危険断面に曲げひび割れを確認した。 $R=1.0\%$ radのサイクルでは、接合部上面で梁主筋の押し上げによる定着金具付近のひび割れと接合部正面のせん断ひび割れが発生

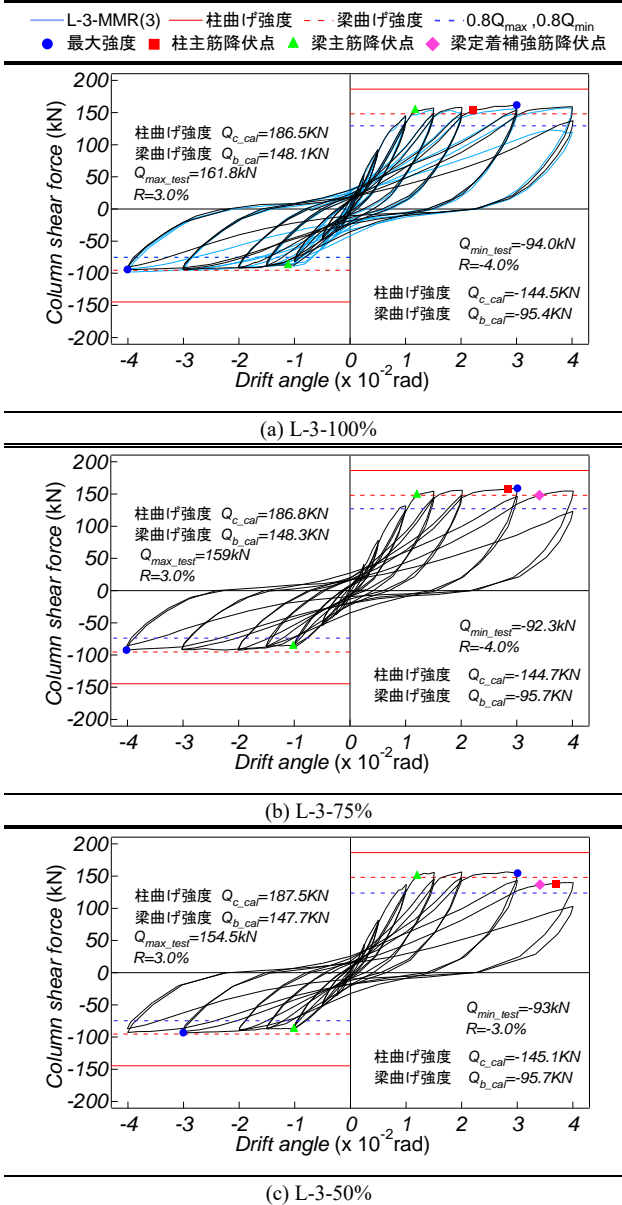


図-4 柱せん断力 Q_c -変形角 R の関係

した。 $R=1.5\%$ radのサイクルで梁主筋の降伏を確認した。 $R=3.0\%$ radのサイクルで柱主筋の降伏、柱北側面(載荷直交方向)でコンクリートの盛り上がりを確認し、最大強度161.8kNを記録した。その後、 $R=4.0\%$ radのサイクルで接合部入隅部の圧壊を確認した。

負載荷では、 $R=0.25\%$ radのサイクルで柱および梁の危険断面に曲げひび割れが発生し、 $R=1.5\%$ radのサイクルで梁主筋の降伏を確認した。 $R=4.0\%$ radのサイクルで最大強度-94kNを記録した。ここで、梁曲げ強度計算に用いたACIストレスブロック法⁶⁾では、①断面力の釣合に基づく一定の中立軸位置、②鉄筋とコンクリートの完全付着、③コンクリートの引張強度の無視、④ストレスブロックの均一な応力分布を仮定しているが、負載荷時にはこれらの仮定、特に②と④が満たされなかったため、実験強度が計算値よりも低くなったと考えられる。梁接合部上端梁主筋入隅位置でコンクリートの剥落が見られ

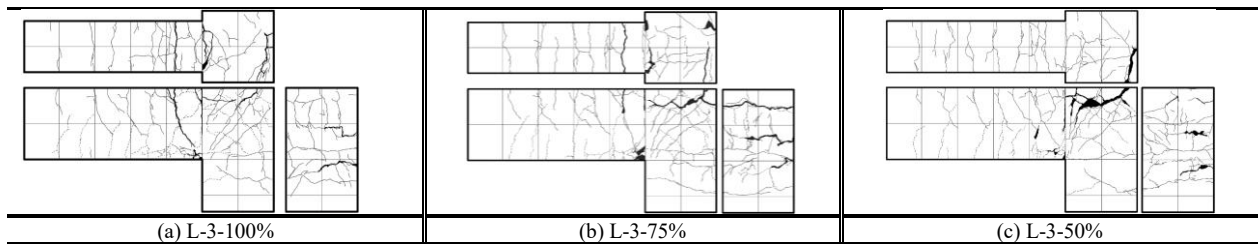


図-5 R=4.0%radにおける各試験体の観測面、上面および柱外端面の最終破壊状況

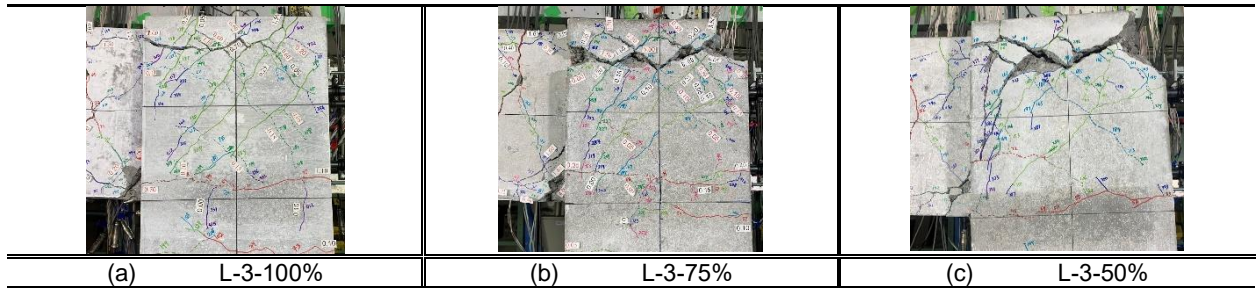


写真-1 各試験体の最終破壊状況

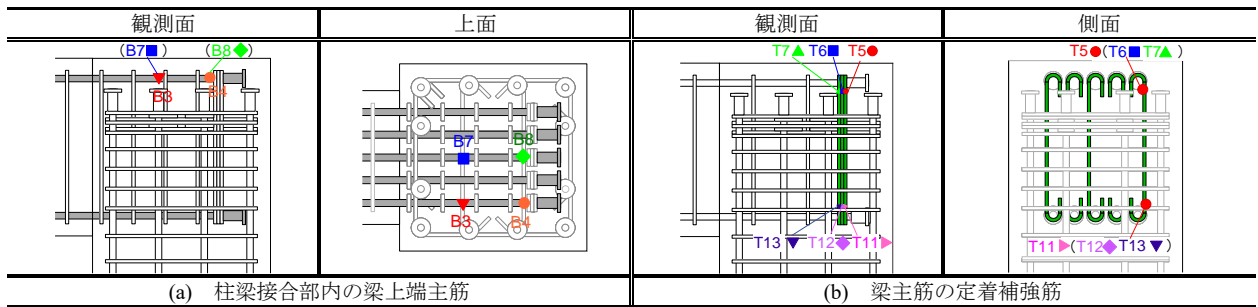


図-6 ひずみ測定位置

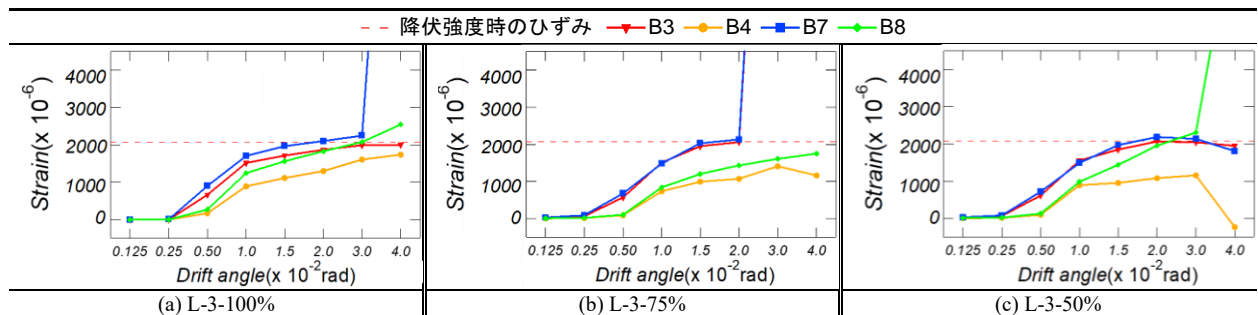


図-7 正載荷ピーク時の柱梁接合部内の梁上端主筋ひずみ-変形角関係

たが、最終変形角まで安定した履歴性状を示した。試験体 L-3-MMR と同様に正負載荷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。

(2) L-3-75% (拘束筋量 3-D6/本: 想定圧縮力角度 60°)

正載荷では、 $R=1.5\text{rad}$ のサイクルまで試験体 L-3-100% と概ね同様な破壊経過を示した。 $R=3.0\text{rad}$ のサイクルにおいて柱主筋の降伏、接合部側面(柱北側面)でコンクリートの盛り上がりを確認し、最大強度 159.0kN を記録した。 $R=4.0\text{rad}$ のサイクルで接合部入隅部の圧壊が見られた。

負載荷では $R=1.5\text{rad}$ のサイクルまで試験体L-3-100%と概ね同様な破壊経過を示した。 $R=4.0\text{rad}$ のサイクル

で最大強度-92.3kN を記録し、コンクリートが剥落し、梁主筋が露出した。

試験体 L-3-100%と比較して拘束筋量に着目して考察すると、拘束筋本数を1本減じたが正負載荷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。

(3) L-3-50% (拘束筋量 2-D6/本: 想定圧縮力角度 45°)

正載荷では、 $R=3.0\text{rad}$ のサイクルまで試験体 L-3-75% と概ね同様な破壊経過を示した。 $R=3.0\text{rad}$ のサイクルで最大強度 154.5kN を記録した。 $R=4.0\text{rad}$ のサイクルでは強度低下と接合部入隅部の圧壊を確認した。

負載荷では $R=1.5\text{rad}$ のサイクルまで試験体L-3-100%

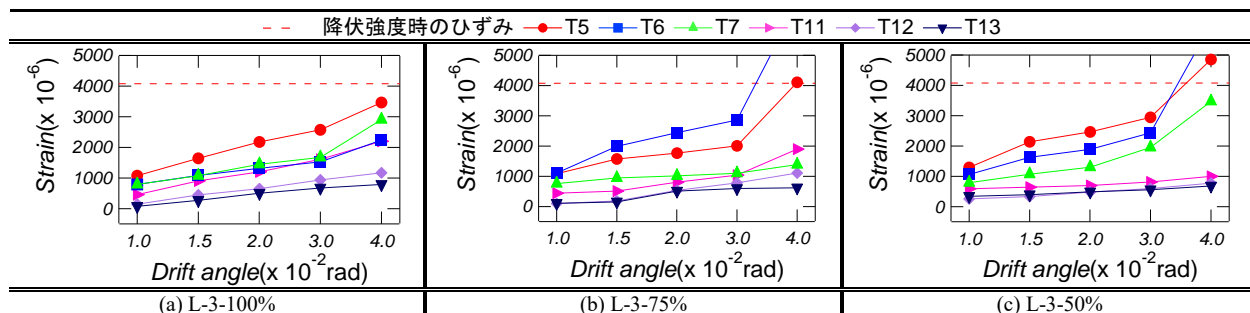
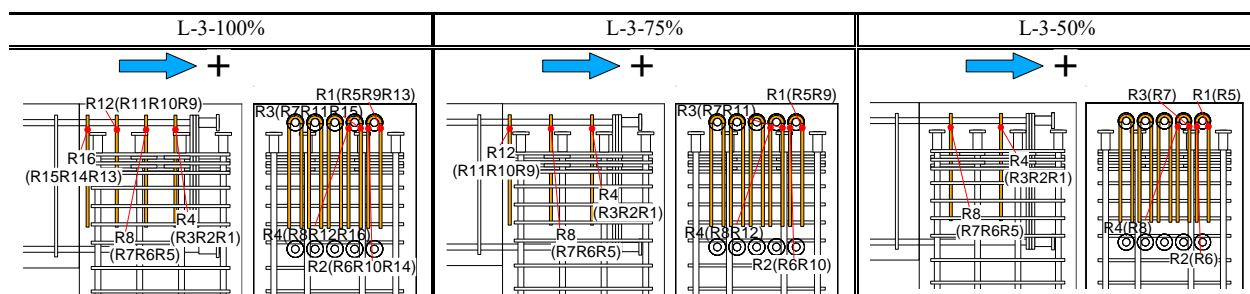
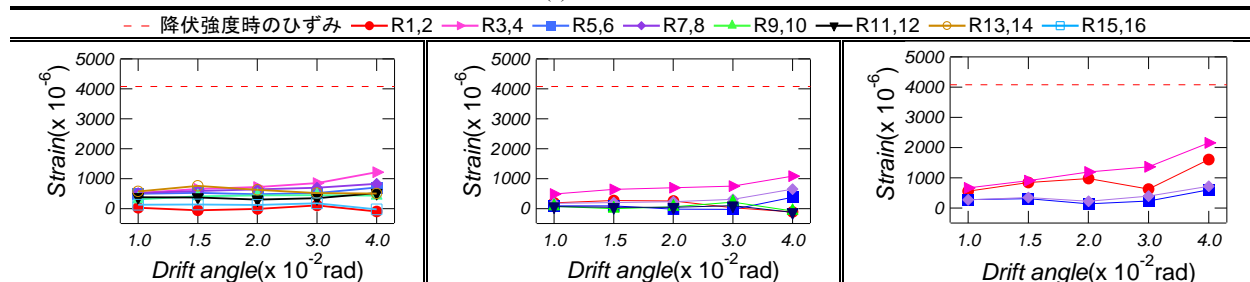


図-8 梁定着補強筋の正載荷ピーク時におけるひずみ-変形角関係



(a) ひずみ測定位置



(b) ひずみ-変形角関係

図-9 梁主筋における拘束筋のひずみ測定位置および正載荷ピーク時における平均ひずみ-変形角関係

と概ね同様な破壊経過を示した。R=3.0%rad のサイクルで最大強度-95.7kN を記録した。その後、R=4.0%rad のサイクルでコンクリートが剥落し、梁主筋が露出した。

試験体 L-3-100%と比較して拘束筋量に着目して考察すると、拘束筋本数を2本減らしたことにより正載荷のR=4.0%radのサイクルにおいて強度低下が見られた。

3.2 定着破壊の検討

本節では柱梁接合部内の梁上端主筋のひずみを用いて定着破壊の発生を検討する。図-6(a)に柱梁接合部内の梁上端主筋のひずみ測定位置を、図-7に正載荷のサイクルピーク時の柱梁接合部内の梁上端主筋ひずみ-変形角の関係を示す。なお、ひずみゲージ B3, B7 は危険断面から梁主筋端部までの中央のひずみを、B4, B8 は梁主筋端部（定着金具直下）のひずみを計測した。

(1) L-3-100% (拘束筋量 4-D6/本: 想定圧縮力角度 90°)

図-4(a)で正載荷および負載荷ともに強度低下が生じていないことや、図-7(a)より全ての梁主筋の定着金具端部のひずみが漸増したため、定着破壊は発生しなかったと判断した。

(2) L-3-75% (拘束筋量 3-D6/本: 想定圧縮力角度 60°)

図-4(b)で正載荷および負載荷ともに強度低下が生じ

ていないことや、図-7(b)より B4 以外の梁主筋の定着金具端部ひずみが漸増したため、定着部全体としての定着破壊は発生しなかったと判断した。ただし、R=4.0%rad のサイクルにおいて B4 のひずみの低下や梁主筋定着金具付近のコンクリートの剥離が観察された(図-5(b))。

(3) L-3-50% (拘束筋量 2-D6/本: 想定圧縮力角度 45°)

図-4(c)において、正載荷では強度低下を確認したことや、図-7(c)より大半の梁上端主筋の定着金具端部においてR=4.0%radのサイクルでひずみが低下したことから定着金具の支圧作用が劣化し、定着破壊が発生したと判断した。また、カバーコンクリートの剥落も確認された(図-5(c))。

負載荷では他の試験体と同様に、図-4(c)に示すように強度低下は生じなかったため、定着破壊は生じなかったと判断した。

3.3 梁主筋端部に設けた定着補強筋ひずみの推移

図-6(b)に梁定着補強筋のひずみ測定位置、図-8に正載荷サイクルピーク時におけるひずみ-変形角の関係を示す。なお、同図はR=1.0%radからR=4.0%radのサイクルにおけるピーク時のひずみを示す。

試験体 L-3-100%では、最終変形角まで梁定着補強筋のひずみは鉄筋の降伏後に見られる急激なひずみの増大が確認されなかった。このことから、梁主筋定着部に対する補強筋量は十分であり、定着破壊を防止できたと考えられる。試験体 L-3-75%および試験体 L-3-50%では、試験体 L-3-100%と比較して一部の定着補強筋の急激なひずみの増大が見られた。 $R=4.0\%$ のサイクルにおいて試験体 L-3-75%では外端主筋に配した3本の定着補強筋のうち2本が0.2%オフセット降伏強度時ひずみに相当する $4,073\mu$ を超過し、試験体 L-3-50%では全ての定着補強筋が上記相当のひずみを記録した(1本は0.2%オフセット降伏強度時のひずみの95%)。接合部内梁主筋に沿う拘束筋の数を減少させたことにより、主筋に沿って作用するコンクリートの斜め圧縮力(図-2)に対する梁主筋定着部(端部)の定着補強筋の負担が増大したためと考えられる。

3.4 拘束筋ひずみの推移

図-9に梁主筋における拘束筋のひずみ測定位置およびひずみ-変形角関係を示す。なお、同図は $R=1.0\%$ から $R=4.0\%$ のサイクルピーク時のひずみでグラフ中の凡例に表記している2点の平均値としている。

全試験体で拘束筋のひずみは最終変形角までおよそ $2,000\mu$ 未満のひずみを記録した。定着破壊が発生しなかった試験体 L-3-100%では各拘束筋のひずみは最大で $1,200\mu$ 程度で、拘束筋量は十分であると判断された。試験体 L-3-75%についても各拘束筋のひずみは試験体 L-3-100%とほぼ同じく最大で $1,200\mu$ 程度であり、強度低下が発生していないことから、拘束筋量は定着破壊を抑制するための必要量を満たしていたと判断した。ただし、 $R=3.0\%$ までは拘束筋をまたぐひび割れの拡幅は見られなかったが、 $R=4.0\%$ ではひび割れが拡幅し始めた。一方、試験体 L-3-50%ではひび割れの損傷状況は試験体 L-3-75%と近似した。一方、全ての定着補強筋が $4,073\mu$ に達した $R=4.0\%$ では定着補強筋付近の拘束筋のひずみ($R1, R2, R3, R4$)が試験体 L-3-100%および試験体 L-3-75%よりも増大した。これらのひずみは0.2%オフセット降伏強度時のひずみには達していなかったが、0.2%オフセット降伏強度をヤング係数で除したひずみ程度に達した。以上を総合して、試験体 L-3-50%の拘束筋量は $R=4.0\%$ の変形性能を確保するためには不十分であったと判断した。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

接合部変形に伴うコンクリートから梁主筋への圧縮力が垂直に作用すると仮定して必要拘束筋量を配した試験

体 L-3-100%および作用角度を 60° と仮定して配した試験体 L-3-75%では、正負荷ともに4%の大変形角まで安定した復元力特性を示し、同変形角まで定着破壊は確認されなかった。一方、圧縮力の作用角度を 45° と仮定した試験体 L-3-50%は両試験体と比べて構造性能が低下し、定着破壊が発生したことにより目標変形角である4%に達する前に強度の低下が見られた。

以上より、試験体 L-3-100%と L-3-75%の接合部内梁主筋に対する拘束筋量(および定着補強筋量)は十分であったと考えられる。一方、試験体 L-3-50%においては特に拘束筋量が高い変形性能を得るには不十分であることを明らかにし、合理的な拘束筋設計における知見を実験的に得た。

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) 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
- 2) 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
- 3) 宇田啓志, 中井実乃里, 尹ロク現, 真田靖士: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2 pp.451-456, 2023.7
- 4) 市川覚, 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
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説, p12, 2021
- 6) ACI (American Concrete Institute): Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary, 2019.