

論文 柱主鉄筋を梁上面の鋼板にナット締め定着した柱梁接合部構造に関する実験的検討

國井 道浩*1・渡部 太郎*2・倉岡 希樹*3・築嶋 大輔*4

要旨：鉄道 RC ラーメン高架橋の柱梁接合部において、柱主鉄筋を梁天端に設置した鋼板にナット締め定着した接合部構造について、柱梁接合部内の帯鉄筋量の違い、梁・柱と直交する梁を設置した場合の耐荷性能について載荷実験により検討した。その結果、鋼板定着として柱梁接合部内の帯鉄筋量を少なくしても接合部耐力を維持し急激な耐力低下が生じないこと、梁・柱と直交する梁を設置することで接合部耐力が大きくなることを確認した。

キーワード：ラーメン高架橋，柱梁接合部，定着，せん断破壊

1. はじめに

鉄道 RC ラーメン高架橋の設計において、柱梁接合部は、柱主筋の定着長を確保できる断面高さで設計し、接合部の耐力照査は行わず剛域として扱っている。一方、駅の高架橋などでは、高架下空間の有効活用の観点から、梁の断面高さが制限されるため、接合部断面が小さい設計となる傾向にある(図-1)。このような構造計画を行った場合、柱主鉄筋の定着長が確保できず、接合部の耐力が小さくなり、接合部が柱や梁よりも先行して破壊することが懸念される。

図司ら^{1), 2)}は、接合部断面を縮小する場合の対策として、柱主筋を梁天端に設置した鋼板にナット締め定着(以下、鋼板定着と呼ぶ)する構造を提案し、従来の半円形フックにより定着した構造と比較し、接合部耐力が向上すること、接合部コンクリートの損傷が進展しても急激な耐力低下を防ぐことができることを載荷実験により確認した。本論文では、鋼板定着する構造について、柱梁接合部における帯鉄筋量の違い及び梁・柱と直交する梁(以下、直交横梁)の有無が接合部の耐荷性能に及ぼす

影響を交番載荷実験で確認したので、その結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体形状・緒元

試験体諸元を表-1に、試験体概要を図-2に示す。試験体は RC ラーメン高架橋の柱・梁接合部を模擬した T 字形状とし、上下を反転した形状とした。梁端部で試験体は支点部に鋼板を敷いて設置することで梁部を地面から浮かせるようにした。試験体は全て柱主鉄筋を接合部内に貫通して配置し、柱主鉄筋先端をネジ加工し、接合部背面側に設置した鋼板にナット締め定着する構造とした。柱・梁断面は同形状としている。

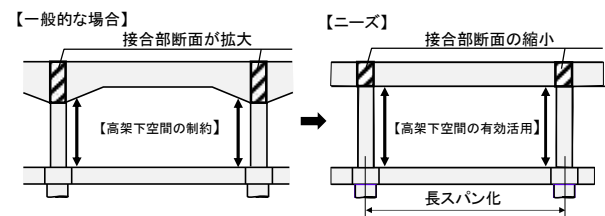


図-1 高架下空間の概要

表-1 試験体諸元

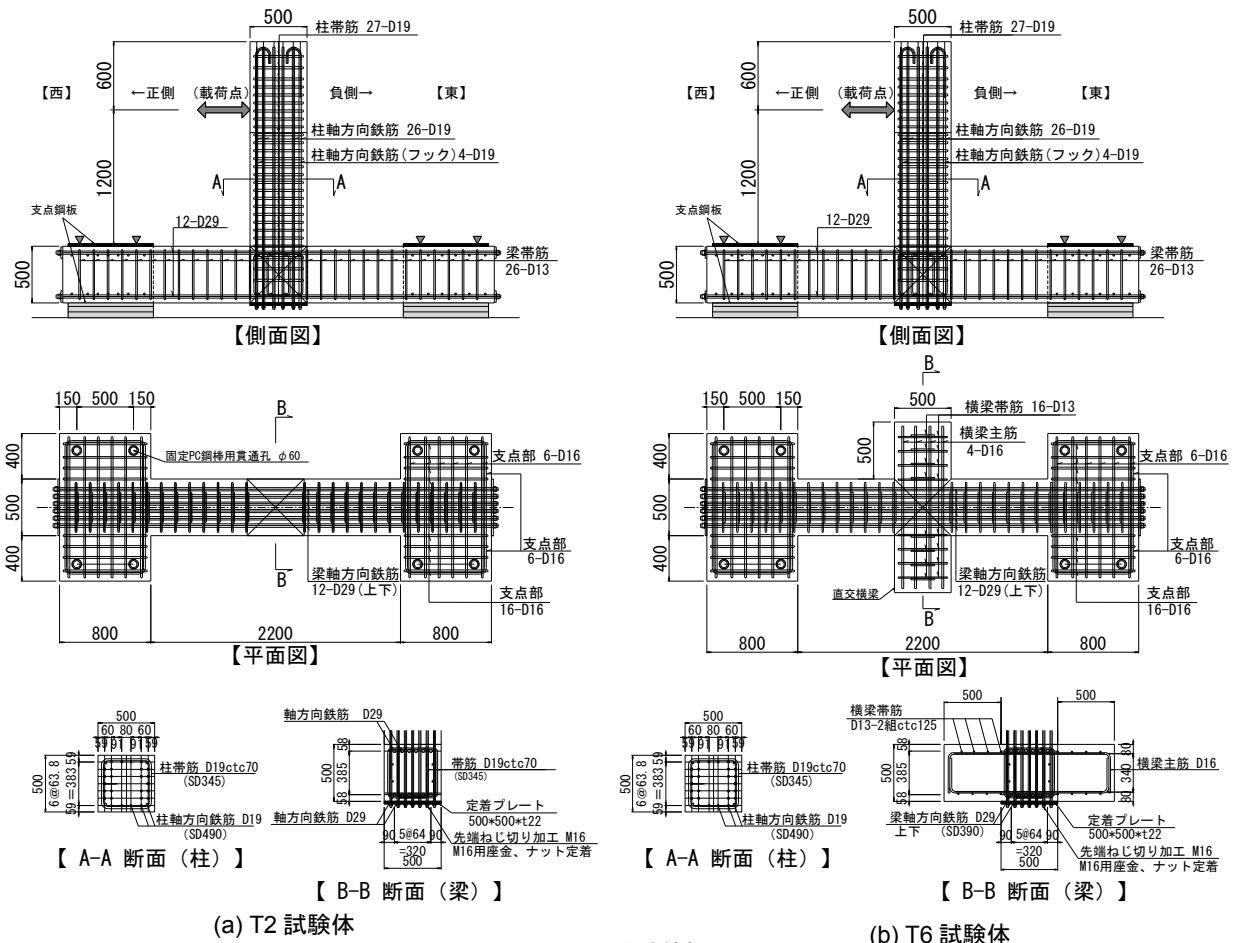
No	柱				接合部	梁		直交する梁	
	断面寸法 b×h (mm)	軸方向鉄筋 帯鉄筋	せん断 スパン(mm)	主鉄筋の 定着方法		断面寸法 b×h (mm)	主筋 帯鉄筋		
T2 ¹⁾²⁾	500×500	30-D19(SD490) D19@70(SD345)	1200	鋼板定着 SS400 (500×500×t22)	3-D19 (SD345) 0.89%	500×500	12-D29(SD390) 2組-D13@125 (SD345)	-	
T4					-				
T5					3-D13 (SD345) 0.39%				12-D29(SD685) 2組-D13@125 (SD345)
T6					3-D19 (SD345) 0.89%				12-D29(SD390) 2組-D13@125 (SD345)

*1 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室 工修 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室 副課長 工博 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 工修 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 課長 (正会員)



図一 試験体概要

表一 材料試験結果

T2			T4		
鉄筋径 (材質)	降伏強度(N/mm ²) ／降伏ひずみ μ	コンクリート強度 (N/mm ²)	鉄筋径 (材質)	降伏強度(N/mm ²) ／降伏ひずみ μ	コンクリート強度 (N/mm ²)
柱主筋 D19(SD490)	532 / 2880	柱 24.8	柱主筋 D19(SD490)	536 / 2622	柱 28.9
柱帯鉄筋 D19(SD345)	381 / 2091		柱帯鉄筋 D19(SD345)	383 / 1962	
梁主筋 D29(SD390)	402 / 2146	梁(接合部) 19.1	梁主筋 D29(SD390)	410 / 2104	梁(接合部) 24.1
梁帯鉄筋 D13(SD345)	374 / 2135		梁帯鉄筋 D13(SD345)	371 / 1956	
T5			T6		
鉄筋径(材質)	降伏強度(N/mm ²) ／降伏ひずみ μ	コンクリート強度 (N/mm ²)	鉄筋径 (材質)	降伏強度(N/mm ²) ／降伏ひずみ μ	コンクリート強度 (N/mm ²)
柱主筋 D19(SD490)	530 / 2596	柱 24.3	柱主筋 D19(SD490)	536 / 2622	柱 30.4
柱帯鉄筋 D19(SD345)	378 / 1990		柱帯鉄筋 D19(SD345)	383 / 1962	
梁主筋 D29(SD685)	708 / 3696	梁(接合部) 25.7	梁主筋 D29(SD390)	410 / 2104	梁(接合部) 24.8
梁帯鉄筋 D13(SD345)	387 / 2018		梁帯鉄筋 D13(SD345)	371 / 1956	

実験パラメータは、接合部内の帯鉄筋量と直交横梁の有無とした。T2 試験体は、接合部内の帯鉄筋量を 0.89% として、T4 試験体は帯鉄筋を配置せず、T5 試験体は帯鉄筋量を T2 試験体の半分程度の 0.39%とした。T6 試験体は T2 試験体に対して、直交横梁を設置した。試験体は全て接合部の耐力を柱、梁より小さく設定して、接合部が柱、梁より先に損傷する試験体とした。載荷試験時の鉄筋及びコンクリートの材料試験結果を表一に示す。

2.2 荷重載荷方法および測定項目

水平荷重は柱頭部に載荷し、柱主筋が降伏ひずみに達した時の変位を $1\delta y$ とし、 $4\delta y$ までは $1\delta y$ の整数倍、

$4\delta y$ 以降は偶数倍の変位を正負 1 回交替載荷した。柱に軸力は載荷していない。

主な計測項目は、載荷点の水平荷重、水平変位及び鉄筋ひずみである。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊進展状況

各試験体の柱・梁接合部での破壊性状について、以下に述べる。直交横梁のある T6 試験体以外は、接合部に対角線上のひび割れが貫通して耐力が低下し、最終的には接合部のコンクリートが損傷した。(写真一)

各試験体の損傷状況を写真-2に示す。

(1) T2 試験体

1δy 載荷時において、接合部の対角線上にひび割れが多数発生した。2δy 載荷時に最大荷重 (P=667kN) となり、接合部の対角線上にひび割れが貫通し、接合部中央付近のかぶりコンクリートが浮いている状態となった。その後、3δy 載荷時に接合部中央付近のかぶりコンクリートが剥落し、6δy~8δy 載荷時に、接合部全体及び接合部に近い縦梁側面のかぶりコンクリートが剥落して荷重が徐々に低下した。

(2) T4 試験体

1δy 載荷時において、接合部の対角線上にひび割れが多数発生した。2δy 載荷時に、最大荷重 (P=665kN) となり、接合部の対角線上にひび割れが貫通した。3δy 載荷時に、T2、T5 試験体と同様に、接合部中央付近でかぶりコンクリートが剥落したものの、その損傷範囲は小さく、T2、T5 試験体よりひび割れ幅が大きくなった。4δy 載荷時において、柱基部から鋼板定着部に向かう対角線上のひび割れ幅が大きくなり、そのひび割れに沿ってコンクリートが剥落することで荷重が徐々に低下した。

(3) T5 試験体

1δy 載荷時において、接合部の対角線上にひび割れが発生した。3δy 載荷時に最大荷重 (P=721kN) となり、接合部の対角線上にひび割れが貫通し、接合部中央付近のかぶりコンクリートが浮いた状態となった。4δy 載荷時に、接合部中央付近でコンクリートが剥落し、6δy~8δy 載荷時に接合部全体のコンクリートが剥落することで荷重が徐々に低下した。T5 試験体は、T2 試験体と同じ荷重ステップで荷重低下が生じ、損傷過程もほぼ同じ傾向を示した。

(4) T6 試験体

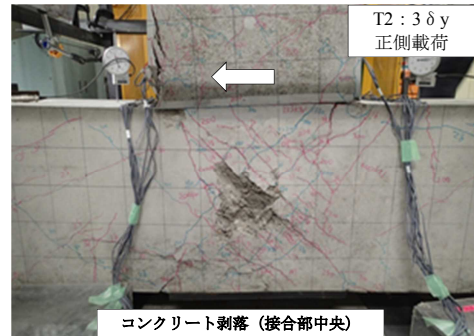
1δy 載荷時において、縦梁は上面から側面にかけて、直交横梁は接合部側から側面の水平方向にひび割れが発生し、柱は水平方向に曲げひび割れが発生した。T2、4、5 試験体に比べて荷重ステップ毎の荷重が増加し、6δy 載荷時 (P=812kN) に最大荷重となった。ひび割れは、縦梁においては側面の対角線上に、直交横梁は側面において、接合部側から斜め方向に進展した。12δy~14δy 載荷時に縦梁側面の対角線上のひび割れが鋼板定着部まで達し、柱基部の損傷が大きくなり、荷重が低下した。

3.2 荷重-変位関係

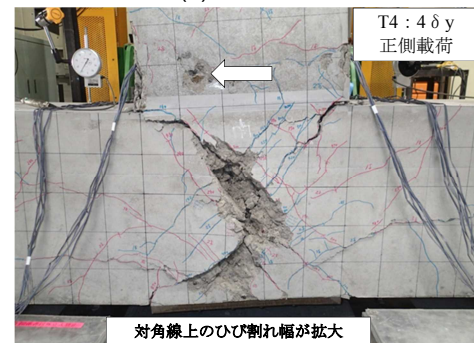
水平荷重と柱の載荷点水平変位の関係を図-3に示す。図中の計算値は、鉄道構造物等設計標準 耐震設計³⁾により、下端固定のRC柱として算定した。また、破線で示す柱の載荷点水平変位の計測結果から接合部の回転に伴う変位を減じて補正した値を実線で示した。接合部の回転に伴う柱の水平変位は、柱近傍の梁上面鉛直変位の計



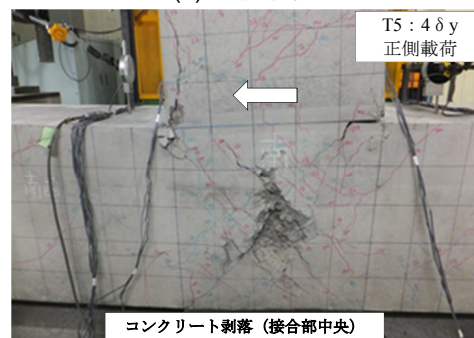
写真-1 接合部の損傷状況 (T5 実験終了)



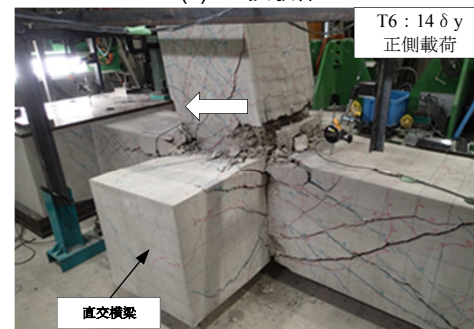
(a) T2 試験体



(b) T4 試験体



(c) T5 試験体



(d) T6 試験体

写真-2 試験体の損傷状況

測結果より接合部の回転角を求め、柱のせん断スパンを乗じて算定した²⁾。荷重に伴う鉛直変位測定箇所の損傷、接合部のせん断変形等により水平変位の割合が増加することから補正値は $1\delta y \sim 3\delta y$ までとした。

(1) 履歴性状

T2 試験体は、正側・負側荷重とも降伏荷重の実験値は、計算値とほぼ同じ値を示した。最大荷重についても、正側・負側荷重とも柱の曲げ耐力の計算値とほぼ同等の値を示した。荷重履歴は、 $2\delta y$ 載荷時に最大荷重を示した後、正側は緩やかに荷重が低下し、 $8\delta y$ まで降伏荷重を維持した。負側では、正側と比較し荷重低下が大きく、降伏荷重を維持したのは $4\delta y$ までであった。

T4 試験体は、正側荷重の降伏荷重の実験値は、計算値とほぼ同じ値を示したが、負側荷重は計算値を下回った。最大荷重の実験値は、正側荷重においては、柱の曲げ耐力の計算値とほぼ同等の値を示したが、負側荷重は計算値を下回った。荷重履歴は、 $2\delta y$ 載荷時に最大荷重を示した後、荷重低下は T2 試験体より大きくなり、正側荷重において、降伏荷重を維持したのは $4\delta y$ までであった。負側においても T2 試験体に比べて荷重の低下が大きくなり、降伏荷重を維持したのは $3\delta y$ までであった。

T5 試験体は、正側荷重の降伏荷重の実験値は、計算値とほぼ同じ値を示したが、負側荷重は計算値を下回った。最大荷重の実験値は、正側は計算値を上回り、負側はほぼ同等の値を示した。荷重履歴は、 $3\delta y$ 載荷時に最大荷重を示した後、正側は緩やかに荷重が低下し、 $10\delta y$ まで降伏荷重を維持した。負側では、正側と比較し荷重低下が大きくなり、降伏荷重を維持したのは $6\delta y$ までであった。T5 試験体は、接合部の帯鉄筋量が多い T2 試験体と比較すると、最大耐力が 1 割程度大きくなった。また、荷重低下ステップは同じ $6\delta y \sim 8\delta y$ 載荷時となるものの、降伏荷重の維持は、正側で $10\delta y$ 、負側で $6\delta y$ までと T5 試験体の方が大きくなった。これは、T5 試験体の方が接合部のコンクリート強度が大きかったことが影響したと考えられる。

T6 試験体は、正側・負側荷重とも降伏荷重の実験値は、計算値を下回った。最大荷重の実験値は、正側荷重は、柱の曲げ耐力の計算値を上回り、負側荷重は計算値とほぼ同等の値を示した。荷重履歴は、 $6\delta y$ 載荷時に最大荷重を示した後、正側は荷重を維持しており、降伏荷重を載荷終了時の $18\delta y$ まで維持している。負側のサイクルでは、正側と比較し荷重低下が大きいものの、 $12\delta y$ まで降伏荷重を維持している。また、直交横梁があることで T2, 4, 5 試験体より δy (降伏変位) は小さくなった。

(2) 各パラメータによる影響

各試験体における水平荷重-水平変位関係の包絡線を比較したものを図-4 に示す。図中の T1 試験体^{1), 2)} は

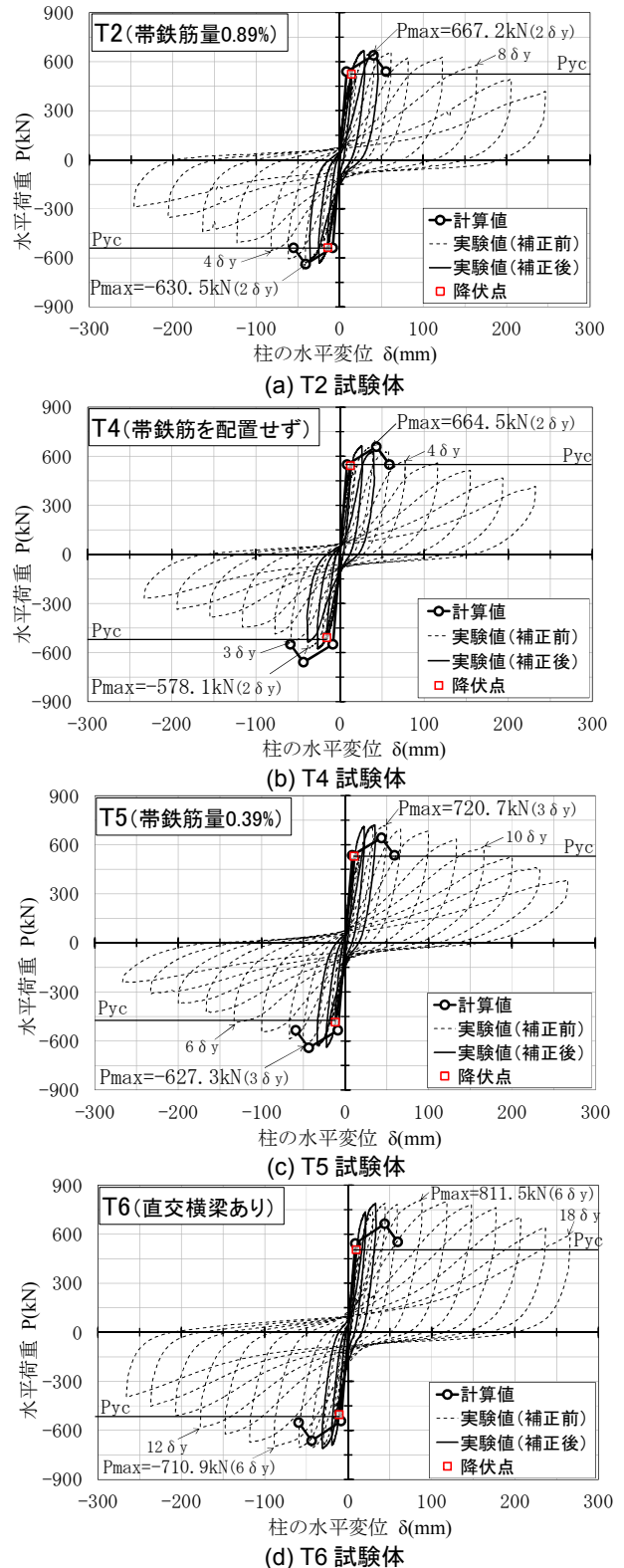


図-3 水平荷重-水平変位関係

現行の設計基準に基づき柱主鉄筋を梁内部で半円形フックにより定着している。定着方法以外の諸元は他の試験体と同一である。横軸は水平変位、縦軸は水平荷重を柱主筋の降伏荷重の計算値 P_{yc} で除して無次元化した。

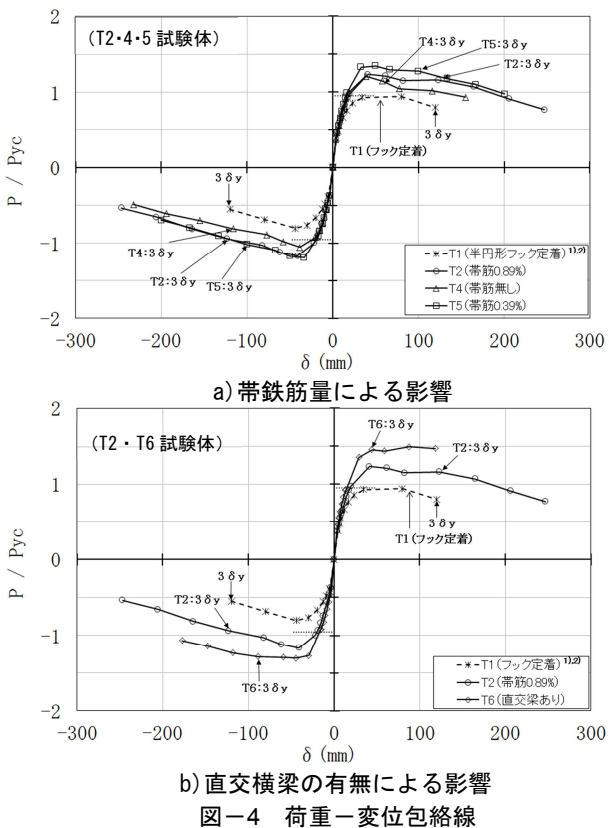
a) 帯鉄筋量による影響

帯鉄筋量を変化させた T2, 4, 5 試験体は、柱主筋を

鋼板定着しており、フック定着した T1 試験体と比べて、大きな耐力と変形性能を有していることが分かる。接合部の帯鉄筋が配置されていない T4 試験体は、帯鉄筋が配置されている T2、5 試験体と比較して $2\delta y$ 以降の耐力低下が大きい。接合部の帯鉄筋量が異なる T2、5 試験体においては、正側の $3\delta y$ 載荷時までは、T2 試験体の耐力が小さいものの、その後の荷重履歴は同じ傾向を示している。

b) 直交横梁の有無による影響

T6 試験体は、フック定着した T1 試験体に比べて約 1.5 倍の耐力を有しており、変形が小さく急激な荷重の低下は見られない。直交横梁を設置することで、接合部の変形が拘束されることから、T1、T2 試験体より変位が小さくなっていると考えられる。T2 試験体は、T1、T6 試験体のほぼ中間の耐力を示した。また、T1 試験体と δy がほぼ同じとなり、変形に大きな違いは見られなかった。



3.3 鉄筋ひずみ

(1) 柱主鉄筋

T2、T4、T5 試験体における柱主鉄筋のひずみ計測位置を図-5 に、ひずみ分布を図-6 に示す。計測位置は東面柱主鉄筋の中央と両端の 3 本の鉄筋において、柱基部と接合部内の定着部とした。東面柱主鉄筋に引張応力が作用する正側載荷時の結果を示した。

主鉄筋のひずみは、定着部において、全ての試験体で降伏以下となり、ひずみが低下することなく定着機能を維持している。柱基部において、 $1\delta y$ 載荷時は全ての試

験体でほぼ同等の値で降伏ひずみに達した。 $2\delta y$ 載荷時以降、T4 試験体は T2、T5 試験体と比べて両端のひずみ増加量が小さかった。これは、接合部での対角線上のひび割れ幅拡大に伴う損傷により変形が接合部に集中したため、柱基部のひずみが小さくなったと考えられる。

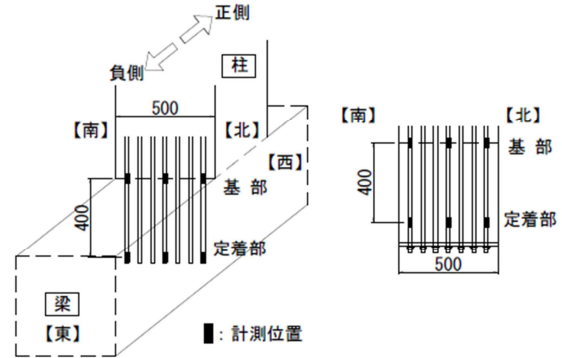


図-5 ひずみ計測位置

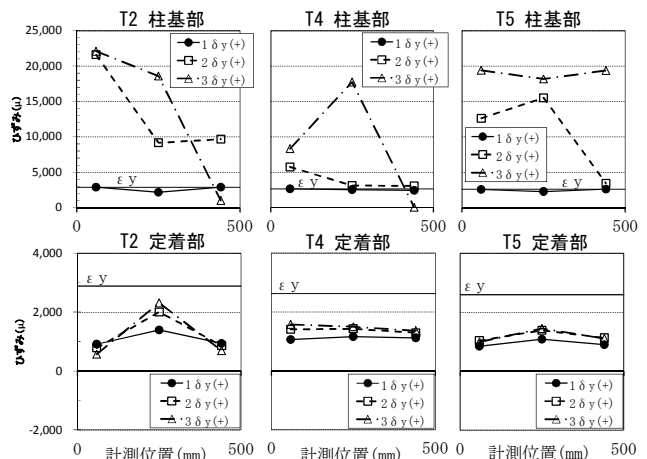


図-6 柱主鉄筋のひずみ分布

(2) 接合部内の帯鉄筋

T2、T5、T6 試験体における接合部内の帯鉄筋のひずみ計測位置を図-7 に、ひずみ-水平変位関係 ($6\delta y$ 載荷時まで) を図-8 に示す。

T6 試験体は、T2・T5 試験体と比較して、 $2\delta y$ 載荷時以降のひずみの伸びが小さく、最大荷重時の $6\delta y$ 載荷時においても降伏以下である。直交横梁があることで接合部でのひび割れが抑えられていることが影響していると考えられる。

T2 試験体は T5 試験体と比べて同一変位に対するひずみの値が大きくなった。帯鉄筋量を多くした T2 試験体の方がひび割れの程度が大きくなったことは、T2 試験体のコンクリート強度が T5 試験体より小さいことが影響したものと考えられる。

(3) 直交横梁の主鉄筋

直交横梁の主鉄筋のひずみ計測位置を図-9 に、ひずみ分布を図-10 に示す。載荷に伴う接合部の変形により、直交横梁の主鉄筋にひずみが発生している。ひずみの値

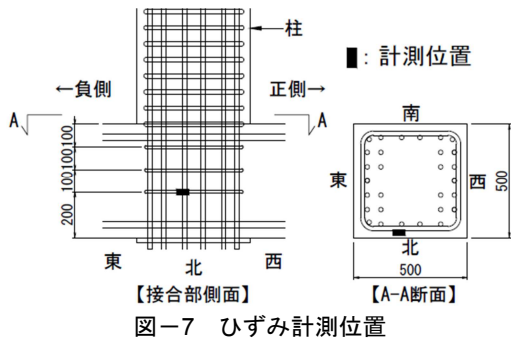


図-7 ひずみ計測位置

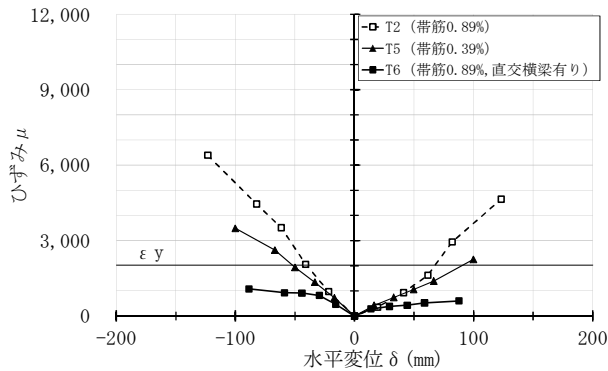


図-8 水平荷重-ひずみ関係

は、主鉄筋の上側、下側とも接合部内（計測位置の接合部中央、接合部端部）で大きくなり、直交横梁の端部に行くほど小さくなる傾向を示した。T6 試験体の最大荷重となる $6\delta y$ 載荷時に接合部において主鉄筋が降伏ひずみに達している。直交横梁のひび割れ幅は、直交横梁の接合部側が大きくなっていることから、直交横梁のない T2, T4, T5 試験体の損傷形態にみられた接合部の対角線上に貫通したひび割れによる変形を直交横梁が抑えていることが考えられる。

4. まとめ

今回の実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 破壊進展状況については、接合部内の帯鉄筋量を変化させた T2, T4, T5 試験体は、接合部を対角線上にひび割れが貫通することで荷重低下が生じ始めた。その後、T2, T5 試験体は接合部中央付近から接合部全体にコンクリートの剥落範囲が広がり大きく荷重が低下した。一方、接合部内に帯鉄筋を配置していない T4 試験体は、対角線上のひび割れ幅の拡大が顕微となり荷重が低下する損傷形態を示した。
- (2) 接合部内に帯鉄筋を配置していない T4 試験体は帯鉄筋を配置した T2, T5 試験体と比較して、荷重-変位関係において、荷重が低下する変位が早くなった。また、接合部内の帯鉄筋量を T2 試験体より少なくした T5 試験体は、荷重が低下する変位は T2 試験体とほぼ同じとなり、急激な耐力低下は生じなかった。

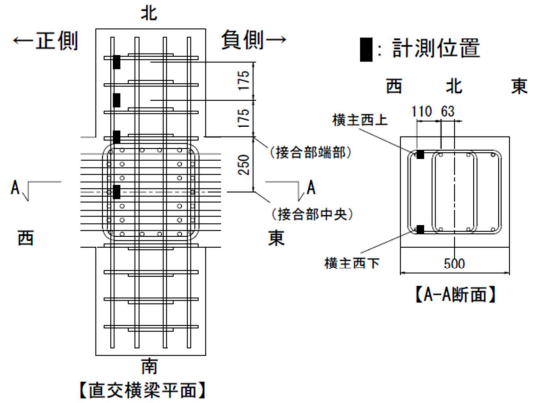


図-9 ひずみ計測位置

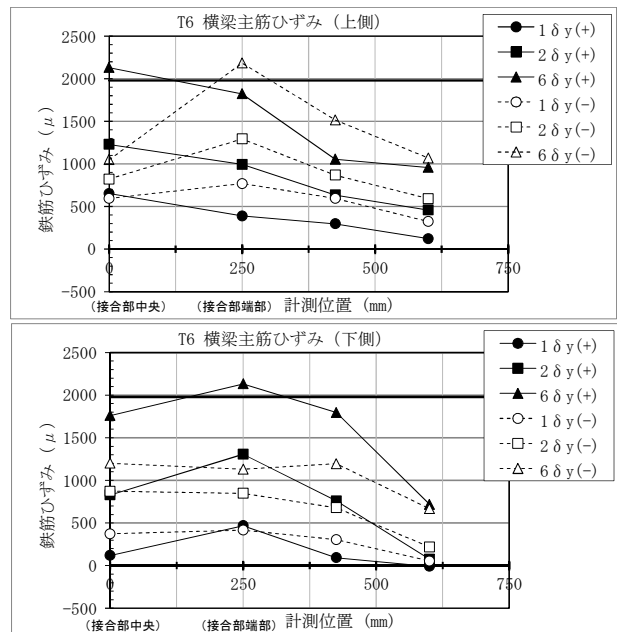


図-10 直交横梁の主鉄筋ひずみ分布

- (3) 柱主筋を梁天端に鋼板定着している T2, T4, T5, T6 試験体は、柱主鉄筋を従来の半円形フックで定着した試験体と比べて耐力が向上した。
- (4) 直交横梁を設置した T6 試験体は、T2, T4, T5 試験体より最大荷重が大きく、急激な荷重低下はなく、 δy (降伏変位) は小さくなった。直交横梁が T2, T4, T5 試験体で生じた対角線上のひび割れに伴う接合部の変形を抑えていることが考えられる。

参考文献

- 1) 図司英明, 渡部太一郎: 梁高を縮小した高架橋の梁柱接合部における構造性能確認実験, 第 71 回土木学会年次学術講演会, V-607, pp.1213-1214, 2016.9
- 2) 図司英明, 渡部太一郎, 井口重信, 築嶋大輔: 柱主筋を鋼板にナット締め定着した柱梁接合部構造に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.343-348, 2016.7
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.10