

論文 機械式定着を用いた T 形柱梁接合部の実験

市川 寛*1・李 曰兵*2・真田 靖士*3・Bah Alpha Oumar Bagou*4

要旨: 接合部の横補強筋量や梁柱曲げ強度比が柱主筋を機械式定着とした T 形柱梁接合部の構造性能に影響すると考えられる。本研究では、接合部補強量を変数とした 3 体の T 形柱梁接合部部分架構試験体に対して静的載荷実験を行った。すべての試験体は梁柱耐力比が 0.69 であり、柱主筋の定着破壊を防止するため、定着金具端部に定着補強筋を集中配筋した。その結果、すべての試験体が梁降伏機構となり、最大変形角 1/25rad. のサイクルまで耐力を維持した。本実験の範囲では接合部横補強筋量の違いによる影響は確認されなかった。
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, 定着補強筋, 横補強筋量

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造（以下 RC）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、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。この種の定着工法を用いた建物の中間層にある外柱梁の T 形接合部に対して数多くの研究がなされている。一方、最上階に位置する T 形接合部の破壊が建物の安全性に与える影響は限定的と考えられ、T 形接合部の実験で得られた知見を T 形に適用する傾向もあり、機械式定着 T 形接合部の構造性能に関する実験データは T 形接合部よりも少ない。T 形接合部は T 形接合部と構造詳細や荷重条件の点で大きく違う。また、セットバックした建物の中間層にも T 形接合部が存在するため、柱主筋を機械式定着とした T 形接合部の構造性能およびそれに影響し得る因子を把握する必要がある。

過去の研究¹⁾などより、柱梁接合部の構造性能は接合部のせん断余裕度だけではなく、接合部横補強筋量や梁柱曲げ強度比などにも影響されると考えられる。本研究では、柱主筋が機械式定着された T 形接合部の横補強筋量が接合部の構造性能へ与える影響を把握するため、同部分架構試験体を 3 体製作し、静的繰り返し実験を行った。

2. 試験体計画

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 T 形接合部試験体の実験結果を図-1 にまとめる。ただし、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る。また、接合部せん断余裕度および側面剥離定着強度²⁾の余裕度が 1 以下のものも含まれていない。同図の横軸は柱主筋（一段筋）の降伏引張力 T_{cy} に対する接合

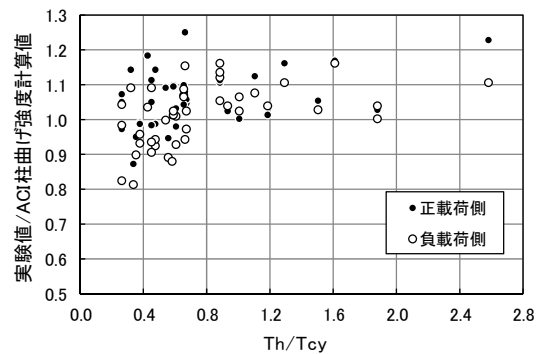


図-1 既往研究における T_h/T_{cy} の影響

表-1 文献リスト

著者	媒体	発表年	ページ数
大和田義正ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2001	257-258
成瀬忠ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2001	261-262
田畑卓ほか	コンクリート工学年次論文集	2001	373-278
沼田卓也ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2002	555-556
中澤春生ほか	コンクリート工学年次論文集	2002	847-852
沼田卓也ほか	コンクリート工学年次論文集	2003	487-492
石橋一彦ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2003	533-534
井口良平ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2003	535-536
石渡康弘ほか	コンクリート工学年次論文集	2003	919-924
石橋一彦ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2004	819-820
井口良平ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2004	821-822
清水弥一ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2005	281-282
石橋一彦ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2005	283-284
井上寿也ほか	GBRC	2005	14-23
後藤佑生ほか	AIJ 大会学術講演梗概集	2008	151-152
足立将人ほか	コンクリート工学年次論文集	2009	349-354
鈴木淳史ほか	コンクリート工学年次論文集	2009	355-360
田川浩之ほか	GBRC	2011	32-39

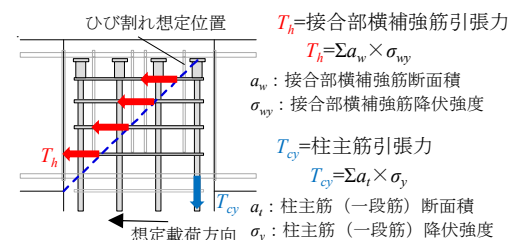


図-2 T_h/T_{cy} の定義

*1 大阪大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (学生会員)
 *2 大阪大学大学院 工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)
 *3 大阪大学大学院 工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)
 *4 大阪大学大学院 工学研究科 研究生

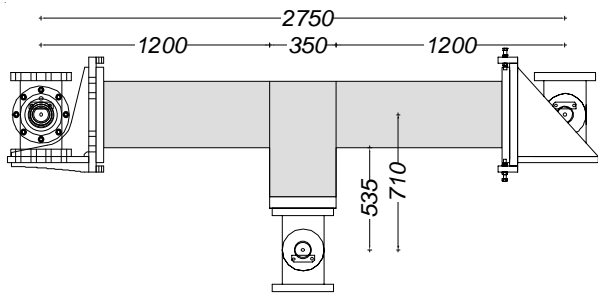


図-3 試験体形状

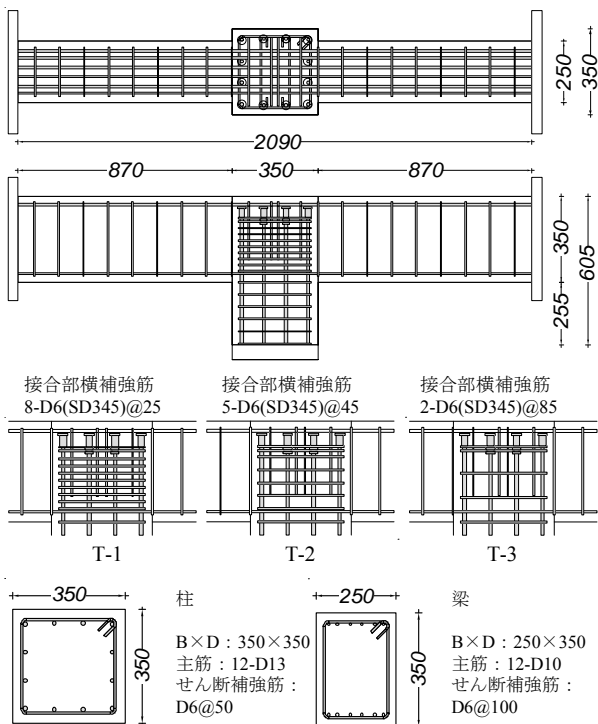


図-4 試験体配筋詳細

部横補強筋の降伏引張力 T_h の比 (以下, T_h/T_{cy}) であり, 図-2 に示すように定義される。縦軸は最大耐力の実験値/柱曲げ強度時の耐力計算値であり, 柱曲げ強度は ACI ストレスブロック法³⁾に基づいて計算された。同図に示すように, T_h/T_{cy} が 0.8 程度を超えると, すべての試験体の耐力が計算耐力を上回ったことから (全試験体の梁柱曲げ強度比が 1 以上), 標準試験体の T_h/T_{cy} を約 0.8 とし, ほかに T_h/T_{cy} が約 1.2, 0.5 の計 3 体の T 形接合部試験体を計画した。図-3 に試験体形状を, 図-4 に配筋詳細をそれぞれ示す。試験体は RC 造 5 階建ての共同住宅の最上階柱梁接合部を 1/2 スケールした模型である。同接合部の実際の横補強筋量は上記の試験体のうち一番少ない T-3 (図-4 参照) と近い。

図-4 に示すように, T 形接合部においては, 一般的に柱幅が梁幅より大きく, 柱主筋が梁主筋の外側に位置する。それに起因して, 柱主筋の定着破壊が発生しやすくなると考えられる。よって, 試験体計画にあたり, 柱主筋の定着耐力を確保できるように, 図-5 に示すよう

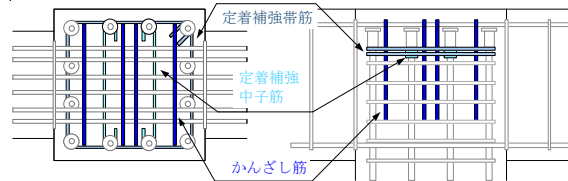
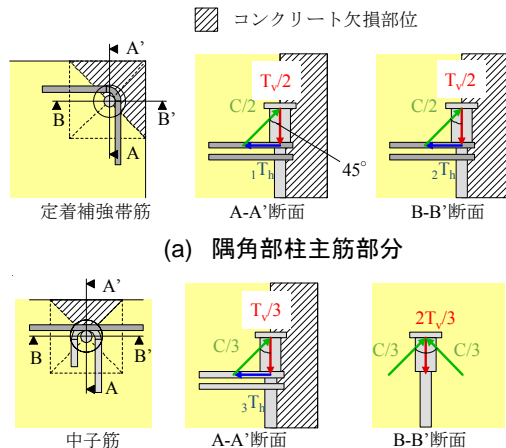


図-5 試験体共通の接合部ディテール



(a) 隅角部柱主筋部分

(b) 柱中段筋部分

図-6 柱主筋端部の力の釣合状況

な, 各試験体共通に以下の定着金具端部のディテールを設けた。これ以降, 定着補強筋とは定着金具端部に配置した同図中の 2 本の定着補強帯筋と定着補強中子筋を指し, 接合部横補強筋とはそれ以外の接合部内せん断補強筋を示すこととする。

- ・柱主筋は梁主筋の真下まで伸ばし, 定着長さは梁せい D_b の 6/7 倍とした。
- ・かんざし筋を柱頭に 4 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。

特に, 定着補強筋 (定着補強帯筋および定着補強中子筋) について, 図-6 を参照してその設計について説明する。定着金具に接続する主筋の引張力 T_h に対し周囲のコンクリートが同一条件で健全な場合, コンクリートが均等に柱主筋引張力の反力 (合力は C) を負担すると考えられる。ここで, 図-6(a)および(b)に示すように柱主筋周辺のコンクリートを 4 分割して, 各要素は均等に反力 ($C/4$) を負担すると仮定する。図-6(a)に示す隅角部柱主筋部分の A-A' および B-B' 断面において, カバーコンクリート (同図の斜線部分) は早期に剥落することが考えられる。したがって, 当該コンクリートが負担していた反力 ($C/2$) は, 応力再分配によりその他のコンクリート (以下, 残留コンクリート) により均等に負担されると考える。この場合, 残留コンクリート 1 要素あたり $C/2$ を負担する。また, 主筋の引張力 T_h は A-A' および B-B' 断面の残留コンクリートにより $T_h/2$ ずつ負担されると考え, コンクリート支圧力が柱主筋に対して 45°

表-2 試験体概要

		T-1	T-2	T-3	
接合部	接合部横補強筋	D-6			
	接合部横補強筋本数	8	5	2	
	定着補強帯筋	2-D6			
	定着補強中子筋	4-D6			
	T_h/T_{cy}	接合部横補強のみ	1.00	0.62	0.25
		定着補強帯筋考慮	1.25	0.87	0.5
p_{wj} (%)	接合部横補強のみ	0.52	0.32	0.13	
	定着補強帯筋考慮	0.65	0.45	0.26	
柱	BxD	350x350 mm			
	主筋	12-D13, $\rho=0.62(\%)$			
	せん断補強筋	D6@50, $\rho_w=0.36(\%)$			
	せん断スパン比	1.53			
梁	BxD	250x350 mm			
	主筋	12-D10, $\rho=0.49(\%)$			
	せん断補強筋	D6@100, $\rho_w=0.25(\%)$			
	せん断スパン比	3.43			

注：ここで、 p_t ：引張鉄筋比（柱では二段筋考慮）、 p_w ：せん断補強筋比である。

表-3 コンクリートの材料特性

圧縮強度	33.0 (N/mm ²)
ヤング係数	2.96 x10 ⁴ (N/mm ²)
割裂引張強度	1.7 (N/mm ²)

表-4 鉄筋の材料特性

	降伏強度	ヤング係数	引張強度
D6(SD345) せん断補強筋 接合部横補強筋 定着補強筋	380 (N/mm ²)	1.80 x10 ⁵ (N/mm ²)	564 (N/mm ²)
D10(SD345) 梁主筋	357 (N/mm ²)	1.87 x10 ⁵ (N/mm ²)	456 (N/mm ²)
D13(SD345) 柱主筋	388 (N/mm ²)	1.88 x10 ⁵ (N/mm ²)	541 (N/mm ²)

方向に作用すると仮定すると、式(1)に示す力の釣り合いが満足される必要がある。

$$(C/2)^2 = (T_v/2)^2 + T_h^2 \quad (1)$$

ここで、 $C/2 : T_v/2 = \sqrt{2} : 1$ 、 T_h ：定着補強筋（ここでは帯筋）の引張力である。また、残留コンクリートは隣接主筋間の拘束や、コア部の拘束を受けるため、支圧耐力を有するものと仮定すると、定着破壊を防止するためには式(2)のように定着補強筋の引張力 T_h が主筋引張力 T_v の 1/2 を上回ればよいことになる。同式では降伏強度 T_{cy} を与えた場合の数値も示す。

$$T_h = T_{cy}/2 = 21.9(kN) \quad (2)$$

一方、図-6(b)に示す柱中段筋の A-A'断面に関しては、剥落したカバーコンクリートの負担していた反力を応力再分配したとき、残留コンクリート（4分割した内の1要素）が負担する反力は $C/3$ であり、中段筋の引張力 $T_v/3$ と式(3)の力の釣り合いが満足される必要がある。

$$(C/3)^2 = (T_v/3)^2 + T_h^2 \quad (3)$$

ここで、 $C/3 : T_v/3 = \sqrt{2} : 1$ である。よって、隅角部と同様の仮定の下、定着破壊を防止するためには、式(4)のように定着補強中子筋の引張力 T_h が主筋引張力 T_{cy} の 1/3 を上回ればよいことになる。

$$T_h = T_{cy}/3 = 14.6(kN) \quad (4)$$

また、図-6(b)に示す B-B'断面に関しては、残留コンクリートの支圧力と柱主筋の引張力の間で力の釣り合いが満足されており、定着破壊しないと考えられる。

以上より、全試験体共通して定着金具端部に 2-D6(SD345)の定着補強帯筋（降伏強度=21.9kN）および定着補強中子筋（降伏強度=21.9kN）を交互に 2本ずつ配筋した。

表-2 に試験体諸元を示す。なお、同表に示す T_h/T_{cy} および式(5)による接合部補強筋比 p_{wj} は、接合部横補強筋のみから算出した値および接合部横補強筋と定着補強帯筋を考慮した値の二通り示している。表-3 にコンクリートの材料特性を、表-4 に鉄筋の材料特性を示す。コンクリート強度は実験前と実験後の材料試験結果の平均値である。

$$p_{wj} = \frac{\sum A_{wj}}{b_c \cdot (D_b - 2a)} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 A_{wj} ：接合部横補強筋断面積、 b_c ：柱幅、 D_b ：梁せい、 a ：梁かぶり厚さである。

3. 実験装置および荷重計画

図-7 に実験装置を、図-8 に変位計測定計画および荷重概念（正荷重方向）を示す。試験体は荷重フレームに対して柱端部および北側梁端部をピン支持とし、南側梁端部をローラー支持とした。したがって、北側および南側梁端部の境界条件はピン・ローラー、柱端部の境界条件はピンである。また、梁に作用するせん断力を測定するため、ローラー支承内にロードセルを組み込んだ。実験は反力壁の上部に設置したオイルジャッキ (2,000kN) を用いて北側梁端部に、下部に設置したオイルジャッキ (500kN) を用いて南側梁端部に水平力をそれぞれ正負繰り返して作用させた。

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 δ を柱の節点距離高さ h ($=710\text{mm}$) で除した層間変形角 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 δ は南側および北側梁端水平変位（図-8 に示す制御用変位計）の平均値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。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。また、水平力は北側梁と南側梁の端部に等しい力を作用させた。つまり、正荷重においては北側梁に引張力（図-8 の $N_{北}$ ）が、南側梁に力の大きさが同じである圧縮力（図-8 の $N_{南}$ ）が作用することになる。負荷荷では、逆に北側梁に圧縮力、南側梁に引張力が作用する。したがって、試験体の水平方向における力の釣り合いより、柱せん断力 Q_c は南

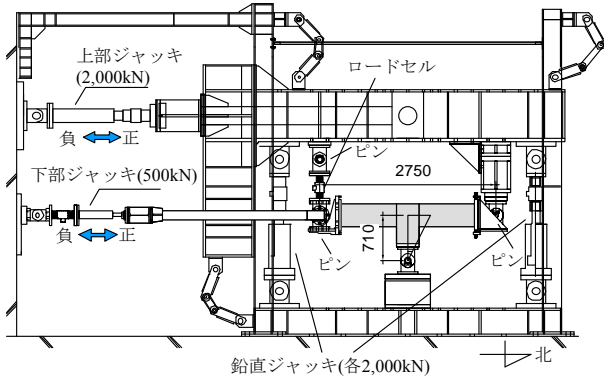


図-7 実験装置

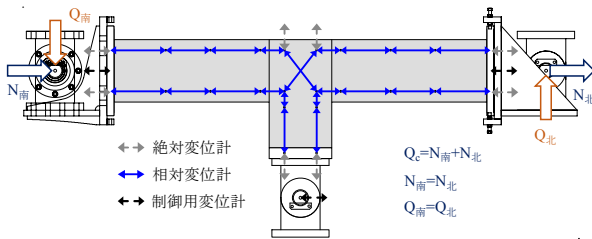


図-8 変位計測定範囲および荷概念

北の梁端に作用する水平力の和 (図-8 の $N_{北} + N_{南}$) である。また、柱軸力は荷重フレームに設置した2台の鉛直方向のオイルジャッキ (各 2,000kN) を用いて荷重梁の水平を維持しながら軸力 0kN (図-8 の $Q_{北} + Q_{南}$) を維持した。

ただし、試験体 T-3 のみは荷重制御時の技術的問題により、結果的に南北の梁におよそ 5:4 の割合で水平力を作用させたことを補足する。

4. 実験結果

4.1 履歴性状

図-9に各試験体の柱せん断力 Q_c -変形角 R の関係を示す。また、同図中に実験で計測された正荷重、負荷側の最大耐力および柱、梁の計算曲げ耐力 (計算方法は後述の5章で示す) も示す。接合部補強筋量が最も多い試験体 T-1 に着目すると、正荷重において変形角 1/100rad. のサイクルで北側梁の下端主筋が、負荷荷において変形角 -1/100rad. のサイクルで南側梁の下端主筋の降伏が先行した。また、同サイクル負荷荷時に、南側梁の主筋降伏直後に柱の引張側一段目主筋の降伏を確認した。正荷重、負荷荷ともに変形角 1/67rad. のサイクルで正方向および負方向の最大耐力を記録し、それ以降も荷重終了まで安定した履歴性状を示した。

また、接合部補強筋量が試験体 T-1 よりも少ない試験体 T-2 および T-3 においても T-1 と同様の破壊経過を示し、梁主筋の降伏以降はおよそ一定の耐力を維持した。なお、試験体 T-2 は変形角 1/67rad. のサイクルで正方向、負方向の最大耐力を迎え、試験体 T-3 は変形角 -1/67rad.

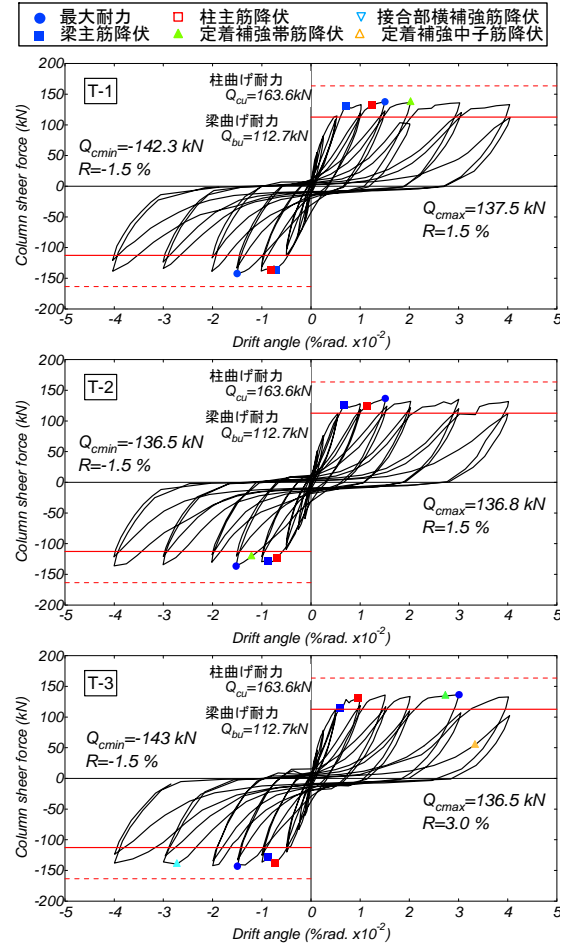


図-9 柱せん断力-変形角の関係

のサイクルで負方向の最大耐力を、変形角 1/33rad. のサイクルで正方向の最大耐力を記録した。

接合部補強筋量の違いにより履歴性状に有意な違いは確認されなかった。

4.2 破壊性状

図-10(a)に各試験体の変形角 1/50rad. のサイクルにおける損傷状況を、図-10(b)に最終破壊状況を、写真-1に試験体 T-3 の接合部の最終破壊状況を示す。全試験体共通して、正荷重、負荷荷ともに変形角 1/800rad. のサイクルで梁および柱の曲げひび割れが確認され、以降は主に梁の損傷が進展した。また、変形角 1/100rad. のサイクルで接合部に斜めのせん断ひび割れが確認され、その後、梁主筋に沿って梁端部まで伸びた。図-10(a)をみると、変形角 1/50rad. においてすべての試験体で接合部にひび割れが数多く生じているものの、カバーコンクリートの剥落には至らなかった。変形角 1/33rad. のサイクルで接合部上部の柱主筋定着金具上カバーコンクリートの剥落に伴う、定着金具の露出が確認された。また、試験体 T-1, T-3 は柱南側主筋のカバーコンクリートが剥落し、主筋が露出した。一方、試験体 T-2 においては、試験体 T-1, T-3 と同様な位置で主筋沿いの縦のひび割れが生じたものの、カバーコンクリートの剥落は観測されなかった。

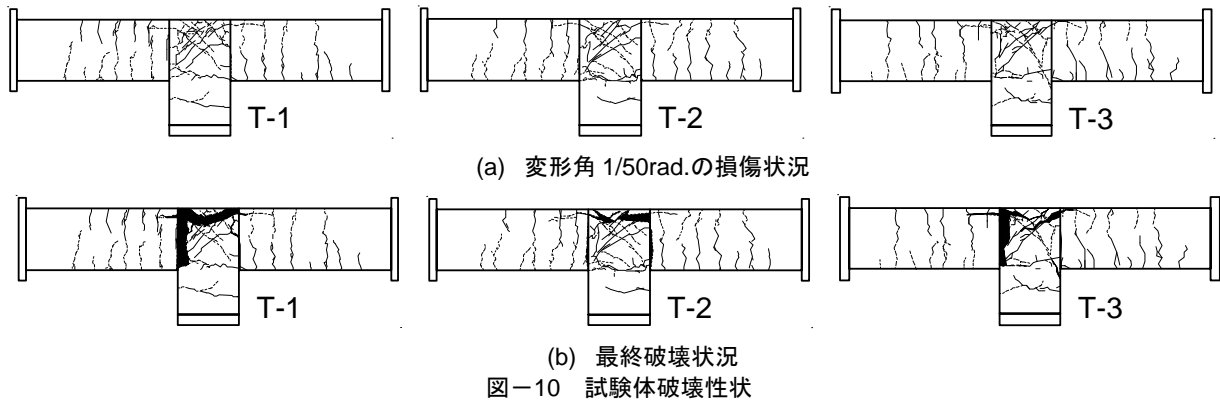


図-10 試験体破壊性状

横補強筋量の違いによる試験体の損傷状況に有意な違いは確認されなかった。

4.3 接合部横補強筋および定着補強帯筋（載荷水平方向）ひずみ量

図-11 に接合部横補強筋および定着補強帯筋のひずみ測定位置およびひずみ-変形角の関係を示す。ひずみ測定位置は、接合部に発生すると想定した、接合部の入隅と定着金具頂部を結ぶせん断ひび割れ線とした。ひずみ量は変形角 1/800rad.から 1/25rad.の正載荷ピーク時の値を示す。

試験体 T-1 および T-2 では、すべての横補強筋および定着補強帯筋は終始降伏ひずみに達しなかった。一方、接合部補強筋量の少ない試験体 T-3 では、最大耐力以降の変形角 1/33rad.で、上段の定着補強帯筋 H2 が降伏した。

4.4 試験体 T-1 の定着補強筋（載荷直角方向）、かんざし筋および柱主筋ひずみ量

図-12 に最も横補強筋量の多い試験体 T-1 の定着補強帯筋（載荷直角方向）、定着補強中子筋、かんざし筋および柱主筋のひずみ測定位置およびひずみ-変形角の関係を示す。

図-12(a)に示す H1 が上段、H5 が下段の定着補強帯筋の値、T1 が上段、T3 が下段の定着補強中子筋の値である。同図(b)に示す T-5~T-8 がかんざし筋の値である。同図(c)に示す C5~C8 は北側（正載荷時引張側）柱一段目主筋、C9~C11 は同二段目主筋の値である。ひずみ量は変形角 1/800rad.から 1/25rad.の正載荷ピーク時の値を示す。

図-12(a)をみると、上段の定着補強帯筋が降伏ひずみに達し、下段の定着補強帯筋および上段の定着補強中子筋ひずみ量も降伏点近くまで上昇したことから、高い応力を負担していることが確認できる。

図-12(b)をみると、T5, T6, T7 は変形角 1/50rad.までひずみ量が増加し、以降の変形角で減少した。一方、最大耐力（変形角 1/67rad.）以降、T8 のひずみ量が増加した。これは、T8 上の接合部せん断ひび割れ幅が定着部の損傷に伴い拡幅し始めたためである。



写真-1 試験体 T-3 接合部の最終破壊様子

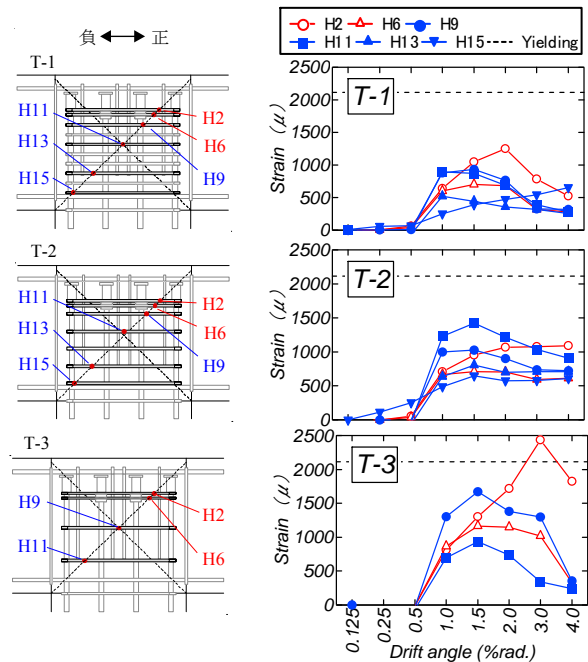


図-11 接合部補強筋および定着補強帯筋のひずみ測定位置およびひずみ量

図-12(c)をみると、1 段目主筋は梁主筋位置で変形角 1/67rad.のときに降伏後、定着金具端部も降伏ひずみに達したことが確認できる。また、中段筋は接合部の上部コンクリートが剥落した変形角 1/25rad.で、定着金具端部のひずみが降伏点に達した。

ここで、定着金具上のカバーコンクリートが剥落した変形角 1/25rad.に着目すると、定着補強筋および定着金具付近の柱主筋がともに降伏した。載荷直角方向については、2 章で仮定した応力状態（図-6(a)の B-B'断面、

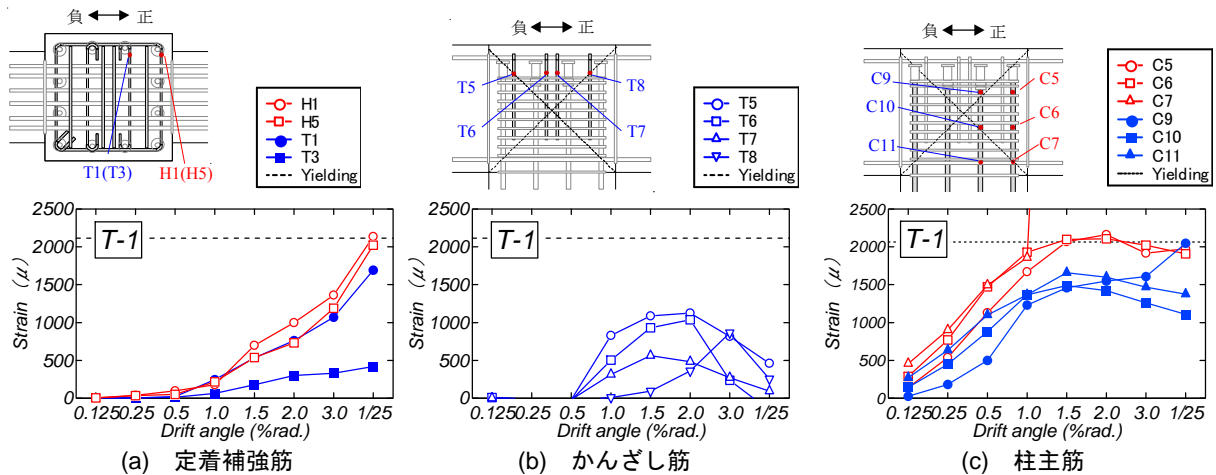


図-12 試験体 T-1 におけるひずみ測定位置およびひずみ量

表-5 試験体耐力

	最大耐力の実験値 (kN)	曲げ耐力計算値 (kN)		
		梁		柱
		引張	引張+圧縮	
T-1	137.5	112.6	150.7	163.6
	-142.3			
T-2	136.8			
	-136.5			
T-3	136.5			
	-143			

式(1)および式(2) とおおよそ整合することが確認できる。

なお、本稿では代表して試験体 T-1 を示したが、定着補強帯筋（載荷直交方向）について試験体 T-1 および T-3 は同様の傾向を示し、試験体 T-2 では降伏ひずみに達しなかったことを補足する。

5. 耐力評価

表-5 に実験から得られた全試験体の最大耐力と計算値を示す。なお、同表の耐力は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平面保持を仮定し ACI ストレスブロック法³⁾を用いて算出した。ただし、柱曲げ耐力の計算では、軸力は 0 とした。また、図-8 に示したように、梁端には柱せん断力の半分の力がそれぞれ圧縮軸力、引張軸力として作用する。よって、梁曲げ耐力の計算は当該軸力をそれぞれ考慮した。本実験においては、両側の梁（梁危険断面）に常に等しいせん断力（曲げモーメント）が作用することから、引張軸力を受ける梁危険断面の曲げ耐力が、圧縮軸力を受ける梁危険断面に作用する曲げモーメントの上限となる。そこで、耐力の計算値は引張軸力を受ける梁の曲げ耐力に基づく値（表中の 112.6kN）と、引張・圧縮軸力を受ける曲げ耐力に基づく値（表中の 150.7kN）を併記した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性は材料試験（表-2 および表-3）の結果を用い、特に鉄筋の材料強度は降伏強度を用いた。

計算結果から梁柱曲げ耐力比は引張軸力のみ考慮した場合 0.69、引張・圧縮軸力を考慮した場合 0.92 である。実験結果は正載荷、負載荷ともに引張軸力のみを考慮し

た計算耐力をおおよそ 2 割上回る結果であった。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 接合部補強筋量（本研究では T_h/T_{cy} と表す）に関わらず、全試験体に共通して正載荷、負載荷ともに梁降伏により曲げ降伏機構を形成し、変形角 $\pm 1/25\text{rad}$ まで耐力を安定して維持した。
- (2) 損傷状況では、変形角 $1/50\text{rad}$ においてカバーコンクリートの剥落などは確認されず、最終破壊では全試験体ともに接合部の定着金具上部のカバーコンクリートが剥落し、定着金具が露出した。
- (3) 定着破壊を防止するために定着金具端部に配筋した定着補強筋（定着補強帯筋と定着補強中子筋）は一部が降伏し、高い応力を負担したことから、定着破壊の抑制に有効であると考えられる。

〔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

- 1) 塩原等：鉄筋コンクリート柱梁接合部における接合部降伏の終局強度の実用的算定法，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.389-390，2014年9月
- 2) 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
- 3) ACI (American Concrete Institute)：Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)，American Concrete Institute: U.S. 2014.