

論文 梁曲げ降伏が先行する T 字形接合部の構造性能に及ぼす柱主筋定着位置の影響

平田 延明*1・田附 遼太*1

要旨: 柱主筋の定着位置が異なる T 字形接合部試験体 2 体の構造性能を比較した。一方は梁上端筋上部で、他方は梁上端筋下部で、柱主筋を定着した。両試験体とも梁曲げ降伏が先行するように計画した。実験結果から、梁曲げ降伏が先行する場合でも、柱主筋定着位置により、破壊状況、および最大耐力が大きく変化することがわかった。また、柱主筋定着位置にかかわらず、荷重—変形関係は強いスリップ性状を示した。柱梁接合部内部における梁主筋の平均付着応力度—層間変形角関係にもスリップ性状が見られ、梁上端筋の平均付着応力度も、柱主筋定着位置により差異が見られた。

キーワード: T 字形接合部, 梁曲げ降伏先行, 定着位置, 平均付着応力度

1. はじめに

建物の最上階やセットバック階に位置する上部に柱の無い柱梁接合部（以下、T 字形接合部と表す）を対象とした構造実験は、柱主筋の定着性能を確認することを目的としたものが多いため、柱曲げ降伏先行のものも多く、梁曲げ降伏先行として計画されたものはほとんど見られない。しかしながら、設計実務上は T 字形接合部が梁曲げ降伏先行として計画されることも少なくない。

梁曲げ降伏先行として計画された T 字形接合部を対象とした研究には、筆者らの既報¹⁾や市川らの研究²⁾がある。これらの研究では、荷重—変形関係が強いスリップ性状を示すことや、梁上端筋が降伏しないことが明らかになっている。こうした構造特性には、梁上端筋の付着性状が影響していると推定される。しかしながら、梁曲げ降伏先行の T 字形接合部における梁上端筋の付着性状については、これらの既往研究では十分検討されていない。

一方、T 字形接合部や L 形接合部の構造性能改善のため、益尾らは柱梁接合部上部に低い立ち上がりを設け、

柱主筋を梁上端筋上部で定着する手法を提案している³⁾。しかしながら、柱主筋を梁上端筋上部で定着した T 字形接合部についても、梁曲げ降伏先行で計画された研究例は無い。

以上を踏まえて本研究では、柱主筋を梁上端筋上部で定着し、かつ、梁曲げ降伏先行で計画した T 字形接合部の構造実験を実施し、既報¹⁾に示した梁上端筋下部で柱主筋を定着した試験体と構造性能を比較することで、柱主筋定着位置の違いによる影響を明らかにする。また、梁曲げ降伏先行の T 字形接合部の構造特性に影響を及ぼすと考えられる梁上端筋の付着性状についても検討する。

2. 実験計画

試験体は、柱梁接合部上部に低い立ち上りを設け、柱主筋を梁上端筋上部で定着した T 字形接合部(No.8)である。図-1 に試験体の配筋図を示す。表-1 には試験体の諸元を示す。表-1 には、比較対象として、既報¹⁾の試験体 No.7 も併せて示す。No.7 は柱主筋を梁上端筋下部で定着したものである。

両試験体とも、柱主筋は機械式定着とした。また、No.8 においては、実施工を考慮して柱梁接合部内部に梁主筋の機械式継手を設けた。両試験体は、柱主筋機械式定着の位置、柱主筋径及び本数、梁主筋の機械式継手有無、およびかんざし筋と称する補強筋の本数が異なる。かんざし筋は、柱梁接合部内部の梁上端筋に対する補強筋である。柱主筋の定着長さ l_d は、No.7 が $l_d=320\text{mm}(=0.8D_b)$ 、 D_b : 梁せい)、No.8 が $l_d=420\text{mm}(=1.05D_b)$ である。表-2 には、試験体に使用した鉄筋およびコンクリートの材料強度試験結果を示す。

試験体は梁曲げ降伏が先行するよう、梁曲げ強度時の応力に対して、各部の強度が十分な余裕度を有するよう計画した。表-3 に、梁曲げ強度時の各部応力に対す

表-1 試験体諸元

試験体	No.7	No.8	
柱	$B_c \times D_c$	500mm × 500mm	
	主筋	12-D22 ($\rho_g=1.9\%$ ・SD490)	16-D19 ($\rho_g=1.8\%$ ・SD390)
	帯筋	4-D10@100 ($\rho_w=0.57\%$ ・SD295A)	
	主筋定着位置	梁上端筋 上部	梁上端筋 下部
	定着長さ l_d	320mm	420mm
梁	$B_b \times D_b$	350mm × 400mm	
	主筋	4-D16($\rho_t=0.65\%$ ・SD345)	
	あばら筋	4-D6@100 ($\rho_w=0.41\%$ ・SD295A)	
	梁主筋の機械式継手	無し	有り
柱梁接合部	かんざし筋	4-D6 × 5組	4-D6 × 4組
	横補強筋	2-D10 × 5組	2-D10 × 7組

*1 株式会社 長谷工コーポレーション 技術研究所第一研究開発室 修士(工学) (正会員)

る諸強度の余裕度を示す。なお、表-3 に示す諸強度の算定においては、表-2 に示す材料試験結果を用いた。

表-4 には、RC 規準による必要定着長ささと試験体の定着長さを示す。両試験体とも定着長さは、必要定着長さを上回る。なお、必要定着長さは、梁曲げ強度時の柱主筋存在応力に対して算出した。

図-2 には加力方法を示す。試験体を 90 度回転した状態で、柱と梁の反曲点位置をピン支持として、柱にせん断力を载荷した。以下では、実験時に上に位置した梁を上梁、下に位置した梁を下梁と表す。加力履歴は、層間

変形角 $R = \pm 2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 40 \times 10^{-3} \text{rad}$ を各 2 回ずつ正負繰り返した。

T 字形接合部の実験においては、柱せん断力の反力として梁に軸力が作用する。本実験においては、柱せん断力が上方向となる正加力時には、上梁の軸力が柱せん断力と等しくなるように梁軸力ジャッキを制御した。また、柱せん断力が下方向となる負加力時には、梁軸力ジャッキが荷重 0 となるように制御した。すなわち、正負いずれの加力時においても、上下いずれかの梁軸力が 0 となるように载荷した。

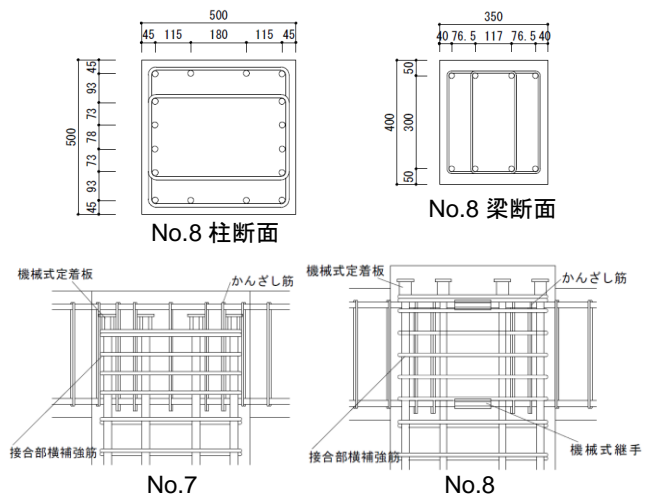
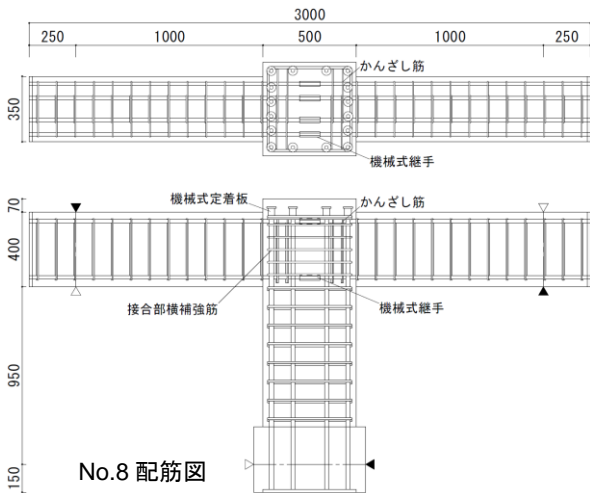


図-1 試験体の配筋図

表-2 材料試験結果

鉄筋						
試験体	径	鋼種	降伏強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	降伏歪 μ	使用部位
No.7	D22	SD490	521	181	2878	柱主筋
	D16	SD345	380	183	2077	梁主筋
	D10	SD295A	369	191	1932	柱帯筋・接合部横補強筋
	D6	SD295A	444*	195	4277	梁あばら筋・かんざし筋
No.8	D19	SD390	446	178	2504	柱主筋
	D16	SD345	390	195	1999	梁主筋
	D10	SD295A	373	183	2039	柱帯筋・接合部横補強筋
	D6	SD295A	447	190	4351	梁あばら筋・かんざし筋

※0.2%オフセット値

コンクリート

試験体	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	割裂引張強度 N/mm ²
No.7	33.5	32.3	2.3
No.8	37.2	30.8	2.3

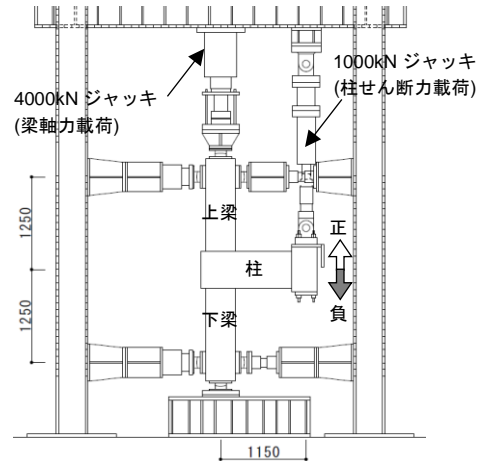


図-2 加力方法

表-4 定着長さ

	①試験体の定着長 ld(mm)	②必要定着長 lab(mm)	①/② ld/lab
No.7	320	238	1.3
No.8	420	239	1.8

表-3 試験体各部の強度

	各部強度					梁曲げ強度時応力				各部強度の余裕度			
	梁曲げ bQmu kN	柱曲げ cQmu kN	接合部せん断 jVu kN	柱主筋定着 cTau kN	梁通し主筋付着 tu N/mm ²	接合部せん断力 jVd kN	柱主筋引張力 cTmu kN	梁通し主筋付着応力度 td N/mm ²	柱梁曲げ強度比 -	接合部せん断余裕度 -	柱主筋定着余裕度 -	梁通し主筋付着余裕度 -	
No.7	207	422	1162	203	7.3	650	104	6.1	2.0	1.8	2.0	1.2	
No.8	212	344	1272	172	7.8	665	94	6.2	1.6	1.9	1.8	1.3	

梁曲げ強度: RC規準による。柱せん断力として表記。柱曲げ強度: 文献5)の多段配筋柱の曲げ強度略算式による。接合部せん断強度: 文献6)による。柱主筋定着強度: 文献7)の益尾・窪田式による。梁通し主筋付着強度: 文献6)による。柱主筋引張力: 平面保持仮定に基づく断面解析による。

なお、図-2の加力装置においては、両側の梁せん断力が等しいと見なせるため、試験体の耐力は、軸力が0となる側の梁の曲げ強度により決まると考えられる。このため、表-3に示す梁曲げ強度の評価においては、梁軸力を考慮していない。

3. 実験結果

試験体 No.8 のひび割れ状況を図-3に示す。また、No.7, No.8 両試験体の荷重—変形関係を図-4に示す。図-4には梁曲げ強度計算値を破線で示す。なお、2章に述べた理由により、梁曲げ強度の算出においては、梁軸力を考慮していない。

また、各部の破壊状況を写真-1に示す。なお、試験体 No.7 の破壊経過の詳細は、既報¹⁾を参照されたい。

3.1 破壊経過

試験体 No.8 は、 $R=1/400\text{rad}$ のサイクルで、梁、柱の順に曲げひび割れ(①、○囲み数字は図-3中の数字に

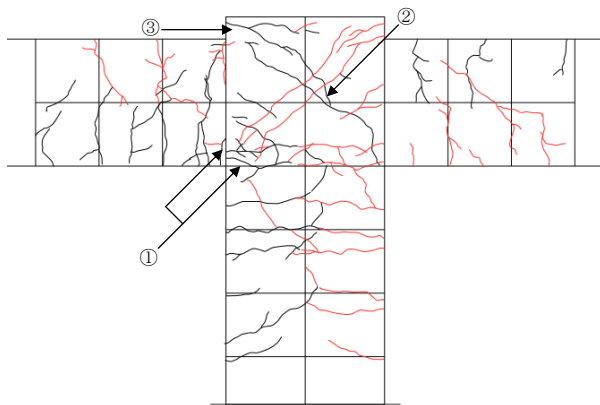


図-3 ひび割れ状況(No.8 $R=1/50\text{rad}$)

対応、以下同様)が発生し、 $R=1/200\sim 1/100\text{rad}$ にかけて、梁、柱の曲げひび割れが増加、伸展した。 $R=1/100\text{rad}$ のサイクルでは、接合部せん断ひび割れ(②)が発生し、 $R=1/67\text{rad}$ のサイクルでは柱主筋の機械式定着板から水平方向にひび割れ(③)が伸展した。 $R=1/33\text{rad}$ のサイクルでは、機械式定着板近傍のひび割れが増加して、接合部上面にも伸展した。 $R=1/25\text{rad}$ のサイクルでは、梁下端の曲げおよび曲げせん断ひび割れが顕著に拡幅するとともに、梁端部上端のかぶりコンクリートが圧壊した。

No.8 は、機械式定着板周囲のひび割れを除き、柱梁接合部のひび割れは顕著には拡幅せず、梁下端の曲げひび割れの拡幅および梁端部のかぶりコンクリート圧壊が顕著であった。これより、No.8 は梁曲げ破壊したと判断した。

No.7 は、梁下端筋が降伏した後、引張側となる柱主筋定着位置に生じた水平方向のひび割れが、上端圧縮となる側の梁端部に伸展した。その後、このひび割れが拡がり、梁端部および接合部内で、梁上端筋のかぶりコンクリートが剥落して破壊した。

3.2 荷重—変形関係

No.8 の荷重—変形関係は、梁下端筋が降伏した $R=1/200\text{rad}$ 付近で明確に剛性低下したが、これ以降も柱せん断力は上昇し、 $R=1/25\text{rad}$ のサイクルまで、耐力低下は見られなかった。なお、梁上端筋は $R=1/67\text{rad}$ から $1/33\text{rad}$ にかけて降伏した。また、柱主筋は降伏しなかった。荷重—変形関係は強いスリップ性状を示した。

$R=1/25\text{rad}$ のサイクルの耐力は、正加力時 $Q=312\text{kN}$ 、負加力時 $Q=280\text{kN}$ であった。No.8 の最大耐力実験値を

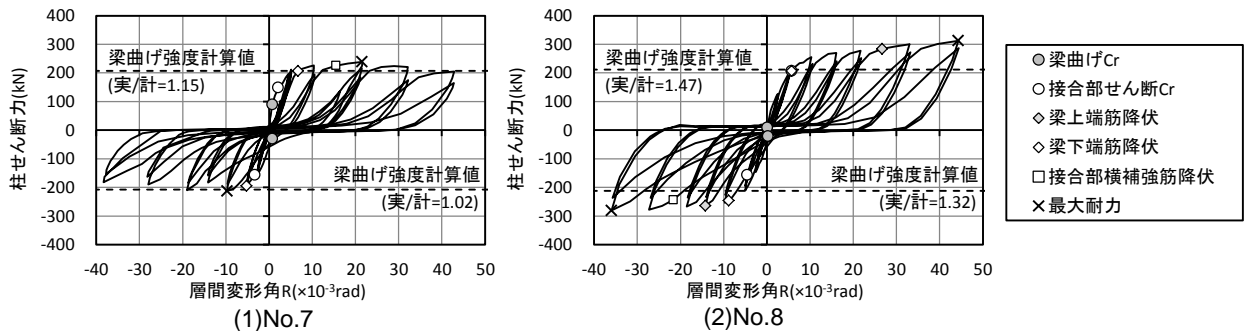
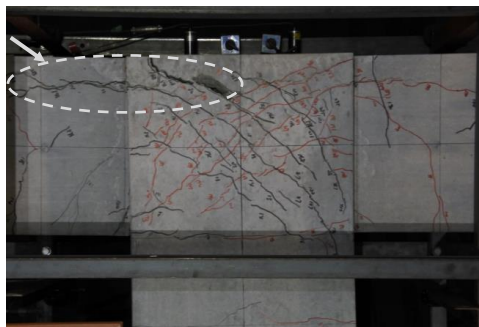


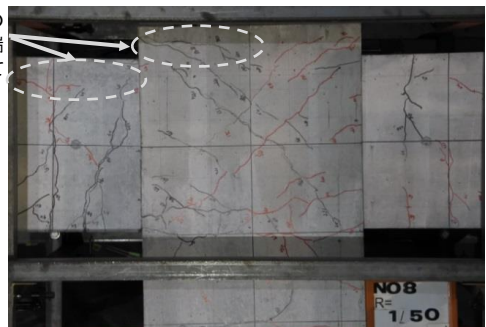
図-4 荷重—変形関係

柱主筋定着端からのひび割れが上端筋に沿って梁端部に伸展し、上端のかぶり部が剥離



(1)No.7

柱主筋定着端のひび割れは梁端部には伸展していない



(2)No.8

写真-1 $R=1/50\text{rad}$ 時 破壊状況

表-3 に示す梁曲げ強度計算値と比較すると、実験値/計算値=1.47(正), 1.32(負)であった。

No.7 についても、梁下端筋が降伏した R=1/200rad 付近で顕著に剛性低下した。R=1/50rad 時に最大耐力となったが、R=1/25rad 時まで耐力低下は緩やかであった。最大耐力実験値と梁曲げ強度計算値の比は、1.15(正), 1.02(負)であった。また、No.8 同様、柱主筋は降伏しなかった。

3.3 梁主筋のひずみ及び引張力

図-5 には、両試験体の梁端部における梁主筋ひずみ—層間変形角関係を示す。下端筋については、両試験体とも R=1/200~1/100rad にかけて降伏ひずみを上回った。上端筋は、No.7 は降伏しなかったが、No.8 は R=1/50rad 時に降伏ひずみの 95%程度に達した。

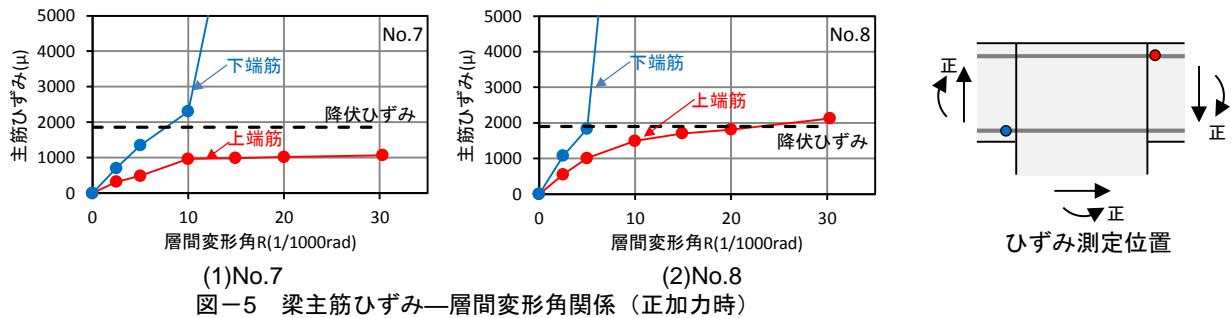
次に、図-6 には両試験体について、柱梁接合部内部における梁主筋の引張力分布を示す。ここで梁主筋の引張力は、鉄筋の応力—ひずみ関係を完全弾塑性と仮定し、ひずみ測定値にヤング係数と主筋の公称断面積を乗じることで評価した。

下端筋については、両試験体とも、概ね同様の分布傾向を示しており、R=1/200~1/100rad にかけて、概ね降伏耐力に達した。上端筋については、両試験体とも引張力の勾配は下端筋より小さく、また、No.7 の方が No.8 より R=1/100rad 時の引張力の上昇が小さかった。なお、両試験体とも R=1/100rad 時には圧縮側梁端部においても、引張に変化した。

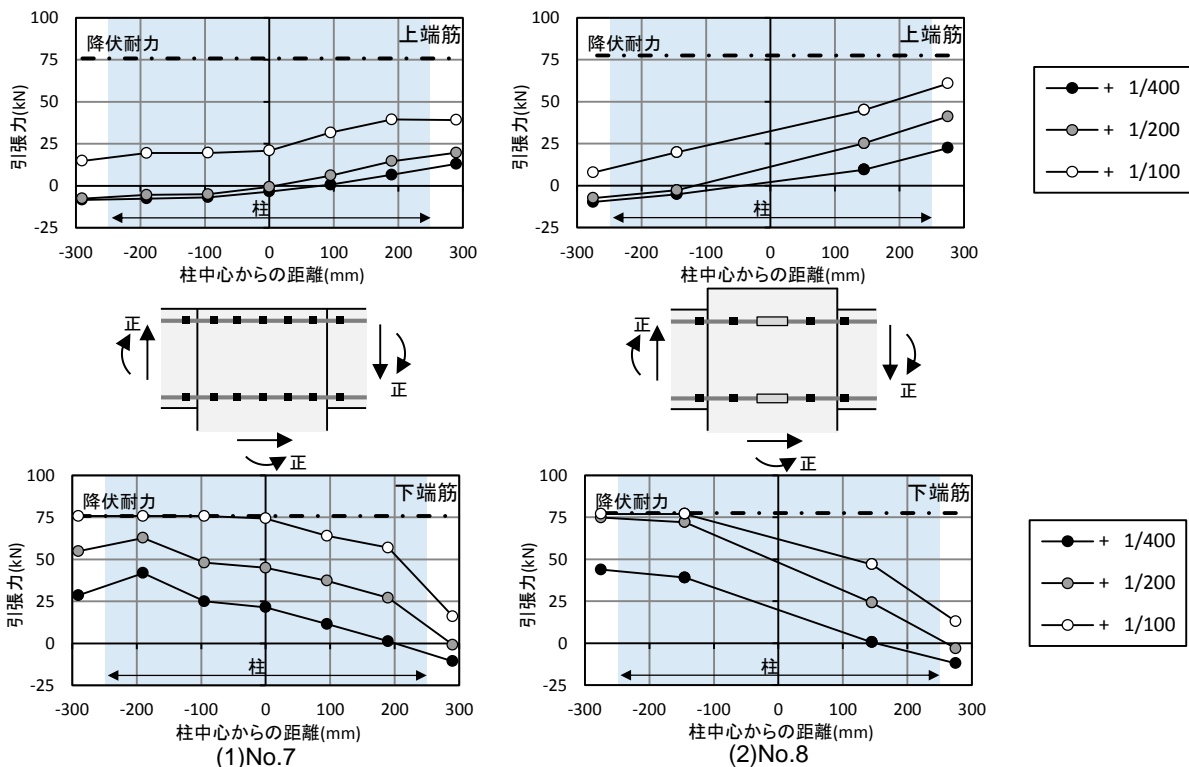
3.4 梁主筋の付着応力度

図-7 には、両試験体の柱梁接合部内における梁主筋平均付着応力度 τ_{ave} と層間変形角の関係を示す。上端筋は R=1/100rad まで、下端筋は梁端部のひずみ測定値が降伏ひずみに達するまでを示す。梁主筋の平均付着応力度 τ_{ave} は、梁主筋のひずみ測定値から求めた柱梁接合部両端における梁主筋応力の差を、梁主筋周長および接合部内の梁主筋付着長さで除すことで評価した。

両試験体とも、付着応力度は、上端筋よりも下端筋の方が大きい値を示した。上端筋については、No.7 では R=1/200rad 付近から、平均付着応力度が低下し始めたのに対して、No.8 では R=1/100rad までは平均付着応力度



(1)No.7 (2)No.8
図-5 梁主筋ひずみ—層間変形角関係 (正加力時)



(1)No.7 (2)No.8
図-6 梁主筋引張力分布 (正加力時)

の低下は見られなかった。下端筋については、No.8の方がやや大きい値ではあるが、両試験体は概ね同様の傾向を示した。いずれもループ形状は逆S字形となり、スリップ性状を示した。

3.5 試験体各部の挙動

図-8には、層間変形に対する梁、柱、接合部の変形割合を示す。両試験体とも、層間変形の60%前後が梁の変形によることがわかる。層間変形角の増加に伴い、梁の変形割合が大きくなる傾向が見られた。ただし、梁の変形には、梁主筋の抜け出しの影響も含まれる。また、接合部の変形割合は、 $R=1/100\sim 1/67\text{rad}$ 時には、No.7が20%程度、No.8は10%程度となった。

4. 実験結果の検討

写真-1に示すNo.7とNo.8における破壊状況の比較により、梁曲げ降伏が先行するT字形接合部において、梁端部から接合部にかけてのひび割れ状況が大きく異なることがわかった。

両試験体は、柱主筋定着位置のほか、柱主筋径及び本数、コンクリート強度及び接合部横補強筋等、定着性能に影響を及ぼしうる諸因子が異なる。一方、表-3に示した両試験体の柱主筋定着強度の余裕度は、梁曲げ強度時の存在応力に対して1.8~2.0倍であり、両試験体とも計算上は十分な余裕度を有すると言える。

以上を踏まえ、本章では、定着強度の評価において考慮されない要因として、柱主筋の定着位置に着目する。本実験においては、柱主筋定着位置の差異によりひび割れ状況が変化することで、主に(1)最大耐力(梁の曲げ強度)、(2)試験体の変形状態、(3)接合部内における梁主筋の付着性状に影響を及ぼしたと考えられる。

4.1 最大耐力(梁の曲げ強度)への影響

梁主筋下部で柱主筋を定着したNo.7においては、機械式定着板からのひび割れが、梁上端筋に沿って梁端部に伸展し、梁上端筋のかぶりコンクリートが剥離した。これにより梁端部で梁せいが縮小され、応力中心間距離も小さくなったと見なされる。

一方、梁主筋上部で柱主筋を定着したNo.8においては、接合部上部に低い立ち上がり有するため、機械式定着板からのひび割れが梁端部には達しなかった。このため梁上端筋のかぶり部は剥離せず、梁端部における応力中心間距離はNo.7よりも大きかったと考えられる。この点が両試験体の最大耐力に差異が生じた一要因と考えられる。

4.2 変形状態への影響

柱主筋定着位置からのひび割れ伸展状況の差異により、接合部の損傷にも差異が生じた。写真-1より、No.8の接合部の斜めひび割れは、No.7と比較して本数も少なく、損傷の程度は小さいと言える。このため、No.8の接合部

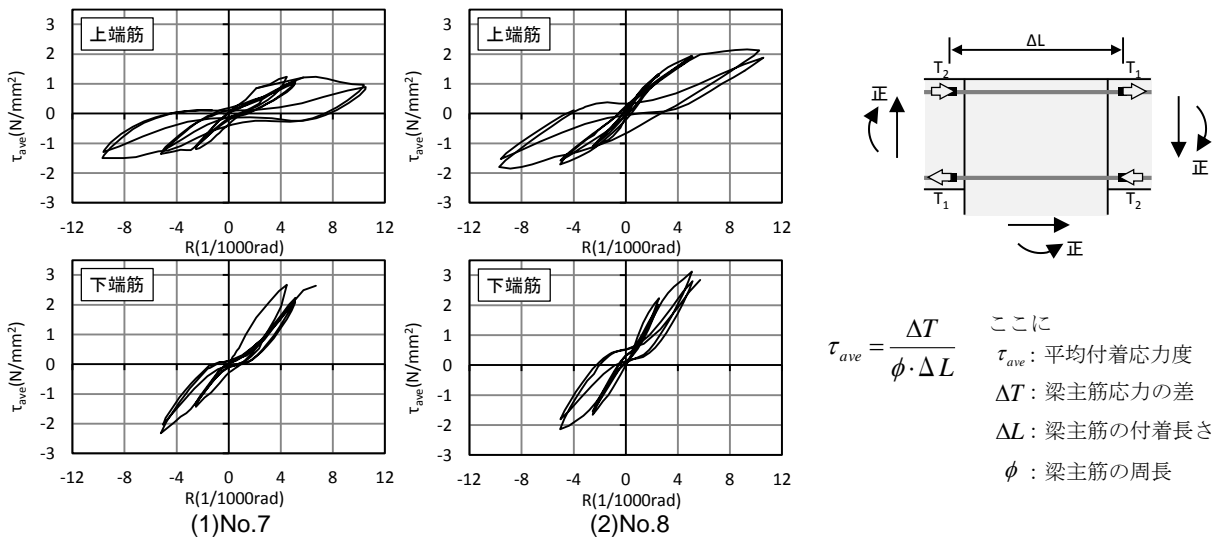


図-7 平均付着応力度—層間変形角関係

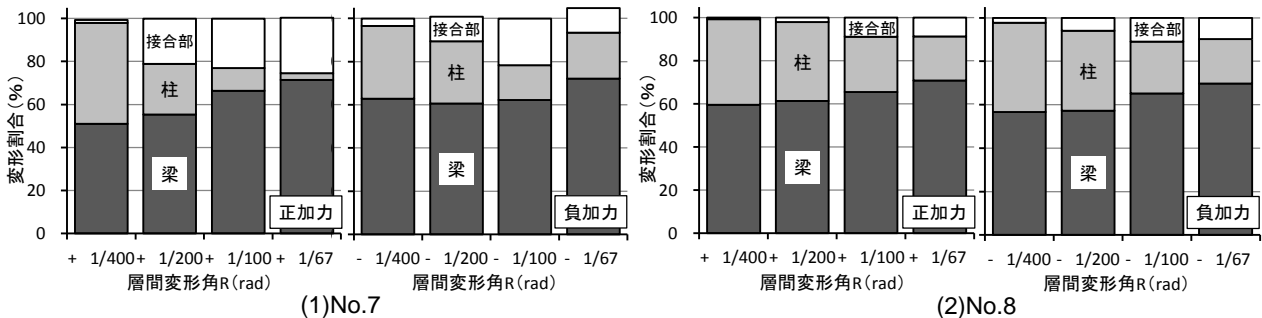


図-8 試験体各部の変形割合

せん断変形成分は No.7 よりも小さく、その分、梁変形成分が増加したと考えられる。

4.3 接合部内における梁主筋の付着性状への影響

図-7 において、梁上端筋の平均付着応力度一層間変形角関係では、柱主筋定着位置により、差異が見られた。柱主筋を梁主筋下部で定着した No.7 では、機械式定着板からのひび割れが梁上端筋に沿って伸展したため、梁上端筋の付着応力度が No.8 よりも早期に低下し始めたと考えられる。ただし、両試験体の梁主筋の付着応力度の差異には、継手小口の支圧抵抗など、機械式継手の影響も含まれる。

なお、既報¹⁾では、かんざし筋量を No.7 の約 2.3 倍とした試験体と No.7 の構造性能を比較し、かんざし筋量は荷重一変形関係、ひび割れ状況及び梁主筋のひずみ性状には顕著な影響を及ぼさないことを示した。このことから、No.7 と No.8 のかんざし筋量の差異による梁上端筋の付着応力度への影響は大きくないと推察される。

一方、柱主筋の定着位置に関わらず、両試験体とも接合部内での梁主筋平均付着応力度の実験値は、靱性指針に示される通し主筋の付着強度(式(1))計算値を下回った。表-5 に、梁主筋の平均付着応力度実験値と計算値の比較を示す。式(1)は、十字形接合部の応力状態を模擬した要素実験⁸⁾に基づく実験式である。よって、T 字形接合部における付着強度の評価には適合していない可能性がある。T 字形接合部における適切な付着強度評価式が求められる。

$$\tau_u = 0.7 \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_B} \right) \sigma_B^{2/3} \quad (1)$$

ここに、 σ_0 : 柱の軸応力度、 σ_B : コンクリート圧縮強度

また、両試験体とも、平均付着応力度一層間変形角関係はスリップ性状を示した。これより、接合部内での梁主筋の付着劣化が、荷重一変形関係のスリップ性状の一要因と考えられる。ただし、接合部内での梁主筋の付着性状には、梁軸力の載荷方法が影響を及ぼした可能性も考えられる。本実験では、上下の梁いづれかの軸力が柱せん断力と釣り合うように載荷したが、実際の架構内では柱の両側の梁がそれぞれ軸力を負担すると推定される。実架構内の T 字形接合部における梁軸力の分布を解析的に評価し、これに対応した載荷条件で、梁主筋の平均付

表-5 梁主筋平均付着応力度 実験値と計算値の比較

		実験値 平均付着応力度 τ_{ave}^* N/mm ²	計算値 式(1) 付着強度 τ_u N/mm ²
No.7	上端筋	1.2	7.3
	下端筋	2.6	
No.8	上端筋	2.1	7.8
	下端筋	3.1	

*R=1/100rad以下の範囲での最大値

着応力度を確認する必要がある。

5. まとめ

本研究では、柱主筋の定着位置が異なる梁曲げ降伏先行で計画した T 字形接合部試験体の構造性能を比較し、その特性を確認した。本研究から得られた結論は以下にまとめられる。

- (1) 柱主筋の定着位置により、接合部から梁端部におけるひび割れ状況が大きく変化した。
- (2) 柱主筋を梁上端筋上部で定着した試験体は、梁主筋下部で定着したものと比較して、梁曲げ強度が増加した。
- (3) 柱主筋の定着位置に関わらず、荷重一変形関係は強いスリップ性状を示した。
- (4) 柱主筋を梁上端筋上部で定着した試験体の方が、接合部内での梁上端筋の平均付着応力度が大きい値を示した。
- (5) 柱主筋の定着位置の差異によるひび割れ状況の変化が、試験体の最大耐力、変形性状、及び梁主筋の付着性状に影響を及ぼした。

参考文献

- 1) 平田延明, 田附遼太, 入江貴弘: 梁降伏先行で計画された RC 造 T 字形柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.497-500, 2017.8
- 2) 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
- 3) 田川浩之, 堂下航, 足立将人, 益尾潔: 機械式柱主筋・外定着による RC 造最上階 T 形, L 形柱梁接合部の実験, GBRC, Vol.36, No.1, pp.32-39, 2011.1
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2010), 2010
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所監修: 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 7) 日本建築総合試験所: 機械式定着工法設計指針(2010 年改定), 2010
- 8) 藤井栄, 村上秀夫, 山田稔明, 森田司郎: 高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部における梁通し筋の付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.2, pp.483-488, 1991.6