

論文 機械式定着を用いた柱梁接合部降伏が生じる可能性のある RC ト形柱梁接合部に関する実験的研究

西村 英一郎*1・清原 俊彦*2・田才 晃*3・楠 浩一*4

要旨：梁主筋を機械式定着した RC 造ト形柱梁接合部の変形性能に関する実験的研究を行ってきた¹⁾など。本報では、柱梁曲げ耐力比を 1.0~2.0 程度とし、かつ、機械式定着した梁主筋の定着破壊が生じるように設計したト形柱梁接合部の静的加力実験を行い、柱梁接合部降伏が生じる可能性がある架構の梁主筋の機械式定着性状を明らかにした。また、梁主筋を機械式定着したト形柱梁接合部では、定着端近傍を通るひび割れの進展が顕著であったため、このひび割れの進展を防止することを目的とし定着端近傍に補強筋を配した場合の補強効果の確認を静的加力実験により行った。

キーワード：ト形接合部, 鉄筋コンクリート, 機械式定着, 柱梁接合部降伏, 定着部上下補強

1. はじめに

柱と梁の曲げ終局耐力が近接した鉄筋コンクリート造架構では、計算上梁曲げ降伏形が想定される場合であっても、梁曲げ降伏以前に柱梁接合部降伏が生じ、架構の最大耐力は梁曲げ降時耐力に達しないとされている²⁾。一方、柱梁接合部内で梁主筋を機械式定着する場合の梁主筋定着耐力の推定は、梁主筋の引抜き実験結果に基づき行われており³⁾、柱梁接合部降伏が生じる可能性のある架構における機械式定着耐力の検討は行われていない。このため本研究では、柱梁接合部降伏が生じる可能性の

ある架構における機械式定着耐力を知ることを目的として、柱梁曲げ耐力比を 1.0~2.0 程度とし、機械式定着した梁主筋の定着破壊が生じるように設計したト形柱梁接合部の静的加力実験を計画した。シリーズ α は柱梁曲げ耐力比を主な変動因子とした全 6 体の計画とした。梁主筋を機械式定着したト形柱梁接合部では、定着端近傍を通るひび割れの進展が顕著であったため、このひび割れ進展を防止することを目的とし定着端近傍に補強筋を配した場合の補強効果の確認を行うことを目的とし、シリーズ β として 3 体の実験を計画した。

表-1 試験体諸元一覧

シリーズ 試験体名	α						β				
	AT-1P	AT-2P	AT-3P	AT-4P	FT-1P	FT-2L	FT-3P	FT-4L	FT-5PR		
想定破壊モード	定着破壊				梁曲げ破壊		梁曲げ破壊				
Fc(N/mm ²)	30				45		45				
梁	スパン(mm) ^{*1}		1850						1850		
	幅×せい(mm)		450×550						450×550		
	主筋		3-D25 (USD685)		3-D22 (SD980)		3-D22 (SD390)		5-D25 (SD490)		
	せん断補強筋		3-D13(SD295)@100						3-D10(SD295)@100		
柱	スパン(mm) ^{*2}		2700						2700		
	幅×せい(mm)		500×500						500×500		
	主筋		12-D22 (SD345)	12-D19 (SD345)	12-D25 (SD345)	12-D22 (SD345)	8-D19 (SD345)		12-D22 (SD345)		
	せん断補強筋		3-D13(SD295)@100						2-D10(SD295)@100		
接合部	軸力		0						0		
	横補強筋 横補強筋比(%)		2-D10(SD295) 0.25						2-D10(SD295) 0.25		
梁主筋定着部	定着方法		機械式			折り曲げ		機械式	折り曲げ	機械式	
	定着長(mm)		375			419		375			
	定着長/柱せい		0.75			0.84		0.75			
定着部上下集中補強筋		無						無		10-D10 (SD785)	
定着部上下補強量(%) ^{**3,**4}		16.4			14.8		33.3		7.4	7.4	47.6
柱梁曲げ耐力比 ^{**3,**5}	正側加力		1.78	1.38	2.24	1.61	1.84		1.46		
	負側加力		1.5	1.11	1.97	1.33	1.55		1.18		
接合部せん断余裕度 ^{**3,**6}		1.06	1.06	1.07	1.33	2.86	2.81	1.12	1.12	1.14	
定着余裕度(側方割裂) ^{**3,**7}		0.87	0.87	0.87	0.71	1.54	1.53	1.37	1.37	1.38	

※1 接合部芯から梁端部ピン位置までの距離, ※2 柱反曲点間距離, ※3 値は材料試験値を用いて計算したもの, ※4 後述の(2)式による, ※5 後述の(1)式による
 ※6 梁曲げ終局強度精算値に対するAIJ靱性指針による接合部せん断耐力算定値³⁾の比, ※7 梁曲げ終局強度精算値に対するNewRC式による定着耐力算定値⁵⁾の比

- *1 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション学府 建築都市文化専攻 (正会員)
- *2 堀江建築工学研究所 (正会員)
- *3 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション研究院 建築都市文化専攻 教授 博士 (正会員)
- *4 横浜国立大学 大学院 都市イノベーション研究院 建築都市文化専攻 准教授 博士 (正会員)

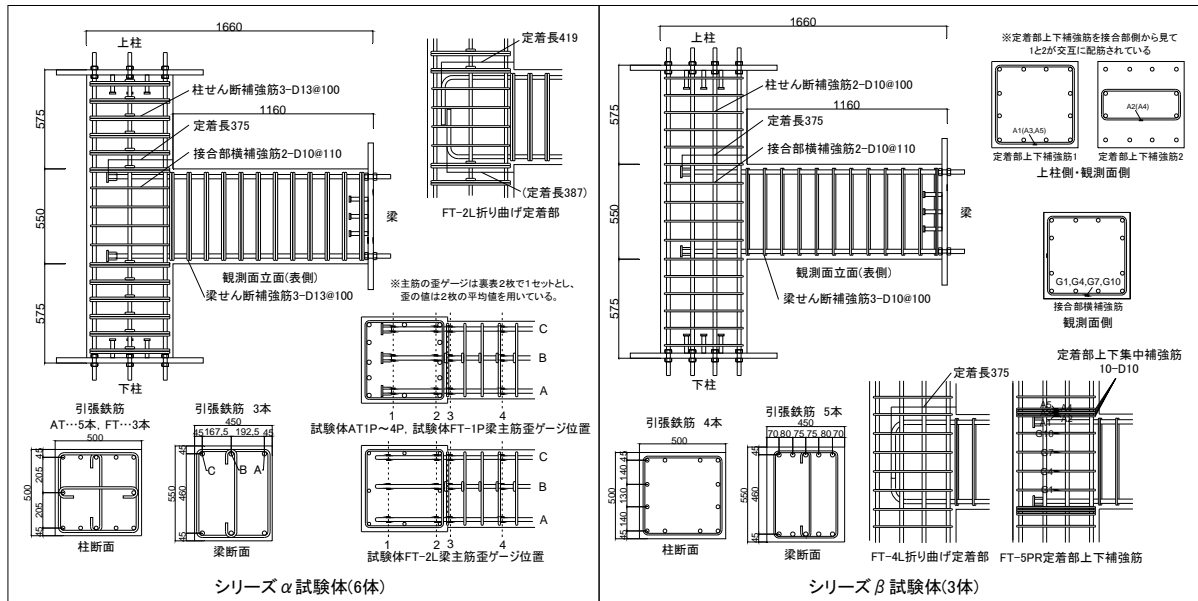


図-1 試験体配筋図と歪ゲージ位置

2. 実験計画

2.1 試験体概要

試験体諸元を表-1に、試験体配筋図と歪ゲージ位置を図-1に示す。試験体は柱梁の寸法、反曲点距離を全試験体共通とした。試験体 AT-1P~AT-4P, FT-1P, FT-3P, FT-5PR は梁主筋端部に機械式定着具を用い、試験体 FT-2L, FT-4L は梁主筋端部を90°折り曲げ定着とした。コンクリート強度は、試験体 AT-1P~AT-3P では $F_c=30\text{N/mm}^2$ 、試験体 AT-4P, FT-1P, FT-2L, 及び FT-3P~FT-5PR では $F_c=45\text{N/mm}^2$ を用いた。

シリーズ α については、AT-1P, AT-2P, AT-3P はいずれも定着余裕度が0.87で梁主筋の定着破壊を想定している試験体で、柱主筋径を変えることで柱曲げ耐力を変化させ、柱梁曲げ耐力を変動させている。AT-4P は AT-1P と同程度の柱梁曲げ耐力比としてコンクリート強度を変動させた定着破壊型試験体である。FT-1P は AT-1P と同程度の柱梁曲げ耐力比とし、定着余裕度を大きくして梁曲げ降伏先行型とした試験体である。FT-2L は FT-1P の梁主筋定着を90°折曲げ定着としたものである。

シリーズ β は柱梁曲げ耐力比1.5程度で梁主筋を機械式定着した梁曲げ降伏型の FT-3P を基準試験体とし、梁主筋を折曲げ定着とした FT-4L、梁主筋定着部近傍に補強筋を配した FT-5PR の3体である。

柱梁曲げ耐力比は、e 関数法を用いて精算した、危険断面位置における柱及び梁の曲げ終局モーメントを延長して求めた節点位置における M_u の比とし、以下の式(1)によって定義している。下柱には梁せん断力に相当する変動軸力が生じている。

$$(\text{柱梁曲げ耐力比}) = \frac{\text{上柱 } M_u + \text{下柱 } M_u}{\text{梁 } M_u} \quad (1)$$

2.2 定着部上下集中補強概要

定着部上下補強量とは、梁主筋定着部上下のせん断補強筋降伏力の和を梁主筋降伏力の和で除した値であり、以下の式(2)によって定義している。

$$(\text{定着部上下補強筋}) = \frac{\sum(\sigma_{wy} \cdot a_w)}{\sum(\sigma_y \cdot a_t)} \quad (2)$$

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏応力(N/mm²)

a_w : 1組のせん断補強筋断面積(mm²)

σ_y : 梁主筋の降伏応力(N/mm²)

a_t : 梁主筋断面積(mm²)

本研究では、図-2の斜線部に示す通り、梁主筋定着部の直上と直下に位置するせん断補強筋を定着部上下補強筋として扱っている。写真-1(c)に示されたひび割れの抑制を目的に、試験体 FT-5PR に対し定着部上下補強筋量が約50%となるよう、接合部外側(柱側)の定着筋近傍にフープ状の補強筋(10-D10・SD785)を集中的に配した。

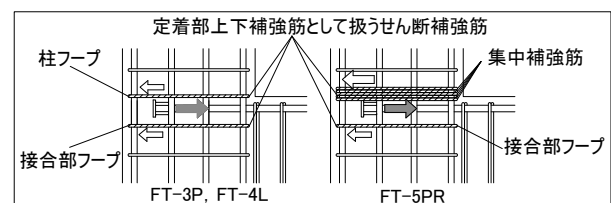


図-2 定着部上下補強筋位置

2.3 材料特性

表-2にコンクリート、表-3に鉄筋の材料試験結果を示す。なお、コンクリートは粗骨材最大径13mmを用いた。 σ_B は実験時材齢での試験結果である。

表-2 材料試験結果一覧(コンクリート)

試験体	f_c N/mm ²	σ_B N/mm ²	ヤング係数 $\times 10^4$ N/mm ²	割裂引張応力度 N/mm ²	
α	30	AT-1P	32.5	2.25	2.61
		AT-2P	32.4	2.47	2.44
		AT-3P	32.7	2.25	2.67
	45	AT-4P	52.5	2.69	3.33
		FT-1P	52.2	2.89	-**
		FT-2L	51.0	2.95	3.59
β	45	FT-3P	55.6	3.30	3.35
		FT-4L	55.7	3.14	3.52
		FT-5PR	56.9	3.30	3.70

*8 FT1のコンクリート割裂引張強度は測定ミスにより記載なし

表-3 材料試験結果一覧(鉄筋)

鉄筋種	使用部位	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	降伏歪 %	ヤング係数 $\times 10^5$ N/mm ²		
α	D25	USD685 梁主筋 (AT-1P,AT-2P,AT-3P)	718	929	0.484	1.95	
		SD345 柱主筋 (AT-3P)	397	583	0.213	1.95	
	D22	SD980 梁主筋 (AT-4P)	1039	1145	0.542	1.91	
		SD390 梁主筋 (FT-1P,FT-2L)	462	644	0.249	1.94	
		SD345 柱主筋 (AT-1P,AT-4P)	392	580	0.214	1.90	
	D19	SD345 柱主筋 (AT-2P,FT-1P,FT-2L)	406	586	0.222	1.93	
	D13	SD295 フープ・スタラップ (シリーズα)	339	483	0.196	1.82	
	D10	SD295 接合部フープ (シリーズα)	351	491	0.186	1.89	
	β	D25	SD490 梁主筋 (シリーズβ)	537	724	0.30	1.93
		D22	SD345 柱主筋 (シリーズβ)	386	565	0.22	1.90
D10		SD785 定着部上下集中補強 筋(FT-5PR)	841	1001	0.41	2.08	
		SD295 各種せん断補強筋 (シリーズβ)	352	481	0.21	1.88	

2.4 加力方法

図-3に加力装置を示す。上柱反曲点位置と梁端反曲点位置をピンローラー支持、下柱反曲点位置をピン支持とした。2本の鉛直ジャッキにより上柱に作用する軸力が0kN、加力ビームの回転が0になるよう制御し、1000kNの水平ジャッキにより正負交番繰り返し載加を行った。上柱と梁が開く方向を正加力、閉じる方向を負加力とした。加力履歴は層間変形角 $R = \pm 1/800, 1/400$ rad. を1サイクル、 $R = \pm 1/200, 1/100, 1/50, 1/33$ rad. を各2サイクル、シリーズαでは $R = \pm 1/25$ rad. を各2サイクル、シリーズβでは $R = \pm 1/25$ rad. を1サイクル加力し、最後に $R = +1/15$ rad. まで載加した。測定項目は、全体層間変形角、上下柱及び梁の部分変形角、接合部のせん断変形角、柱及び梁主筋の歪、柱及び梁せん断補強筋の歪、接合部横補強筋の歪、定着部上下集中補強筋の歪である。

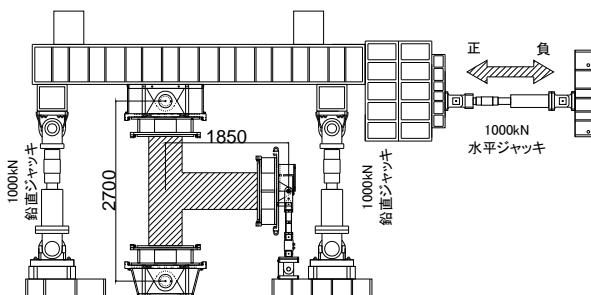


図-3 加力装置図

3. 実験結果

3.1 破壊経過

写真-1に各試験体の+1/25rad.1回目加力時破壊状況写真を、図-4に正側変形成分を示す。

試験体 AT-1P~AT-4P は+1/100rad.1回目ピーク時に写真-1(a)の接合部ななめひび割れが入り、+1/33rad.1回目ピーク付近で写真-1(b)の柱梁入隅部から入ったひび割れが広がると同時に接合部変形の割合が増加し、顕著な耐力低下を起こした。試験体 FT-1P も AT シリーズの試験体と同様に+1/100rad.1回目ピーク時に写真-1(a)の接合部ななめひび割れが入り、+1/33rad.1回目ピーク付近で写真-1(b)の柱梁入隅部から入ったひび割れが開くが柱梁入隅部からのひび割れの進展は小さく、+1/33rad.1回目ピーク時に顕著な耐力低下を生じなかった。試験体 FT-2L は梁端部の曲げひび割れが大きく開き、接合部のななめひび割れがほとんど進展せず、+1/33rad.1回目ピーク時に顕著な耐力低下を生じなかった。

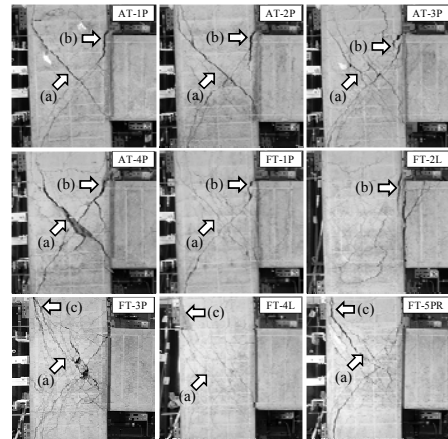


写真-1 +1/25rad.1回目加力時破壊状況

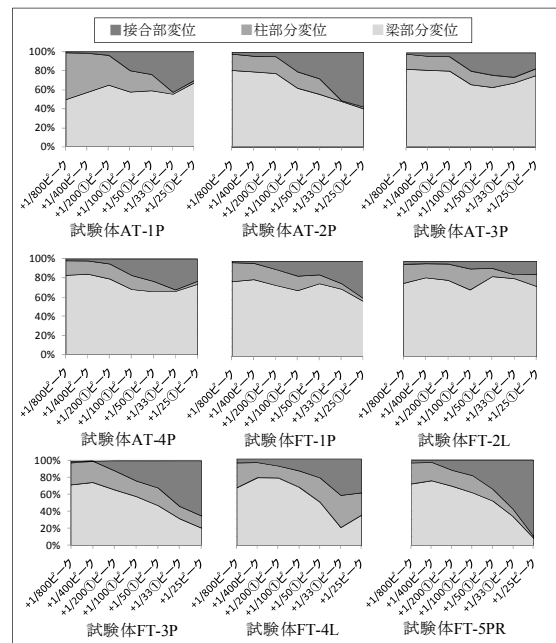


図-4 正側変形成分

表-4 正負の最大耐力及び最大耐力時変形一覧

試験体	破壊形式	正加力				負加力			
		最大耐力 ^{※5} Qmax(kN)	計算値 ^{※6} Qu(kN)	最大耐力/計算値 Qmax/Qu	最大耐力時変形角 ($\times 10^3$ rad)	最大耐力 ^{※5} Qmax(kN)	計算値 ^{※7} Qu(kN)	最大耐力/計算値 Qmax/Qu	最大耐力時変形角 ($\times 10^3$ rad)
α	AT-1P	204.7	191.7	1.07	20.7	-185.2	-191.7	0.97	-19.8
	AT-2P	180.1	191.5	0.94	19.8	-154.7	-158.8	0.97	-20.5
	AT-3P	218.2	192.2	1.14	20.2	-196.4	-192.2	1.02	-20.3
	AT-4P	209.1	176.8	1.18	20.1	-192.5	-176.8	1.09	-20.1
	FT-1P	120.3	114.4	1.05	20.2	-110.5	-114.4	0.97	-20.1
	FT-2L	124.4	114.3	1.09	30.3	-116.1	-114.3	1.02	-19.2
β	FT-3P	226.7	278.2	0.81	18.6	-199.6	-278.2	0.72	-18.3
	FT-4L	211.8	278.2	0.76	20.4	-185.4	-278.2	0.67	-19.8
	FT-5PR	240.6	278.4	0.86	20.1	-212.0	-278.4	0.76	-20.2

※5：層せん断力で表示
 ※6：試験体AT-1P~4Pは側面剥離破壊時層せん断力、試験体FT-1P~5PRは梁曲げ降伏時層せん断力で表示
 ※7：試験体AT-1P,3P,4Pは側面剥離破壊時層せん断力、試験体AT-2Pは下柱曲げ降伏時層せん断力、試験体FT-1~5PRは梁曲げ降伏時層せん断力で表示

試験体 FT-1P~FT-5PR は、+1/100rad.1 回目ピーク時に写真-1(a)の接合部ななめひび割れが入り、+1/33rad.1 回目ピーク時に接合部ななめひび割れから柱引張主筋に沿って伸びて行く写真-1(c)のひび割れが特に大きく開くと共に、耐力が低下していった。定着部上下集中補強の有無によるひび割れ進展の差異は見られなかった。

3.2 復元力特性

各試験体の層せん断力 Q-層間変形角 R 関係を図-5 に、最大耐力及び最大耐力時変形の一覧を表-4 に示す。

(1) 正側加力時

正側加力時、試験体 AT-1P~AT-4P では+1/50rad.1 回目ピーク時に最大耐力を発揮すると、+1/33rad.1 回目ピーク手前で顕著な耐力低下を生じた。試験体 FT-1P は+1/50rad.1 回目ピーク時に最大耐力を発揮した後、+1/25rad.1 回目ピーク手前で耐力低下が見られた。試験体 FT-2L は+1/33rad.1 回目ピーク時に最大耐力を発揮した後、+1/25rad.1 回目ピーク手前で若干の耐力低下が見

られた。シリーズ α では、試験体 AT-2P 以外の試験体において最大耐力は計算値を上回った。試験体 AT-2P のみ、最大耐力は計算値耐力の 94%程度に留まった。

試験体 FT-3P~FT-5PR では、+1/50rad.1 回目ピーク時に最大耐力を発揮した以降は緩やかに耐力低下していき、+1/25rad.1 回目ピーク時には最大耐力の約 80%まで耐力が低下した。シリーズ β では、全ての試験体において最大耐力が計算値耐力の約 78~88%に留まった。

(2) 負側加力時

負側加力時、試験体 AT-1P~AT-4P では正側加力時と同様に、-1/33rad.1 回目ピーク手前で接合部ひび割れの進展とともに耐力低下を生じる履歴特性を示した。試験体 FT-1P では-1/50rad.1 回目ピーク時に最大耐力を発揮し、その後の加力でも顕著な耐力低下は起きなかった。試験体 FT-2L も-1/50rad.1 回目ピーク時に最大耐力を発揮するが、-1/33rad.1 回目加力時に耐力低下を生じた。シリーズ α では、試験体 AT-3P, AT-4P, FT-1P において、最大



図-5 層せん断力 Q-層間変形角 R 関係

耐力は計算値耐力を上回った。試験体 AT-1P, AT-2P, FT-2L の最大耐力は計算値を 3%ほど下回った。

試験体 FT-3P~FT-5PR では正側同様、-1/50rad.1 回目ピーク時に最大耐力を發揮した以降は緩やかに耐力低下していき、-1/25rad.ピーク時には最大耐力の約 80%まで耐力が低下した。シリーズβでは、全ての試験体において最大耐力が計算値耐力の約 68~78%に留まった。

正負共に、柱梁曲げ耐力比が 1.8 以上と大きな梁曲げ降伏型試験体の最大耐力は梁曲げ降伏耐力計算値に達し、機械式定着よりも折り曲げ定着の方が耐力を發揮したが、柱梁曲げ耐力比が 1.5 未満の梁曲げ降伏型試験体の最大耐力は梁曲げ降伏耐力計算値に届かず、折り曲げ定着よりも機械式定着の方が耐力を發揮した。

3.3 柱梁耐力比が定着性状に与える影響

図-6 に試験体シリーズαの正側梁上端主筋抜き出し量を示す。梁主筋の抜き出し量は既往の研究¹⁾より、機械式定着具を用いた試験体 AT-1P~AT-4P, FT-1P の定着板に取り付けた M8 の全ねじの移動量から、正側接合部斜めひび割れの梁主筋方向の幅を差し引いた値から求めた。

図-7 に試験体シリーズαの+1/50rad.1 回目ピーク時から+1/33rad.1 回目ピーク時までの正側梁上端主筋の歪を示す。図中 A~C は、図-1 に示す位置の鉄筋のデータであることを表し、1~4 は図-1 に示す位置の歪ゲージに対応する。図-8 に定着破壊先行型試験体 AT-1P~AT-4P の柱梁曲げ耐力比-最大耐力/計算値耐力関係を示す。

図-7 より、試験体 AT-1P~4P は最大耐力を發揮する+1/50rad.1 回目ピーク時には一部の梁主筋が降伏歪に達するものの、全主筋が降伏歪に達することは無い。一方、試験体 FT-1P, FT-2L は最大耐力時に梁危険断面近傍で全ての主筋歪が降伏歪を大きく超えており、試験体 FT-1P, FT-2L は梁曲げ降伏したと考えられる。また、図-7 に関して試験体 AT-1P~4P の梁危険断面近傍の歪に着目すると、中央の鉄筋(B)は全体変形が大きくなるにつれて歪が増大しているが、外側の主筋(A,C)は逆に、+1/50rad.加力以降、歪が減少している。また、図-6 より試験体 AT-1P~4P は、+1/50rad.までは A~C の定着板移動量がほぼ等

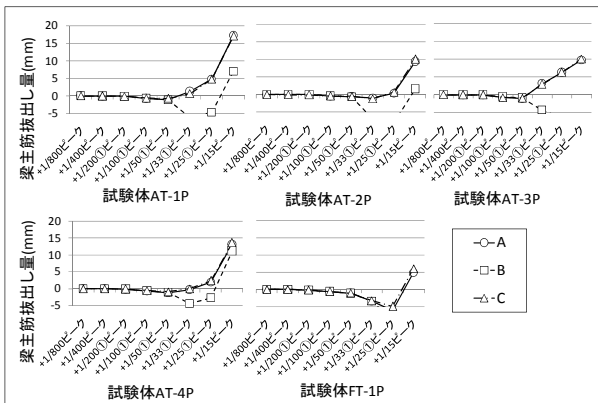


図-6 シリーズα 正側梁上端主筋抜き出し量

しいが、+1/33rad.1 回目ピーク時では、明らかに中央鉄筋よりも外側鉄筋の移動量が大きくなる。梁曲げ降伏型の試験体 FT-1P は+1/25rad.1 回目加力時まで A~C の定着板移動量がほぼ等しい。以上のことから、試験体 AT-1P~4P は外側主筋が+1/50rad.を超えたあたりで定着破壊を生じ、そのため耐力低下を生じたものと考えられる。

しかしながら図-8 より、柱梁曲げ耐力比が 1.5 程度と小さく、梁主筋の定着破壊により最大耐力が決まる場合であっても、その時の最大耐力は既往の算定式で求めた定着耐力と概ね同等の耐力を發揮している。

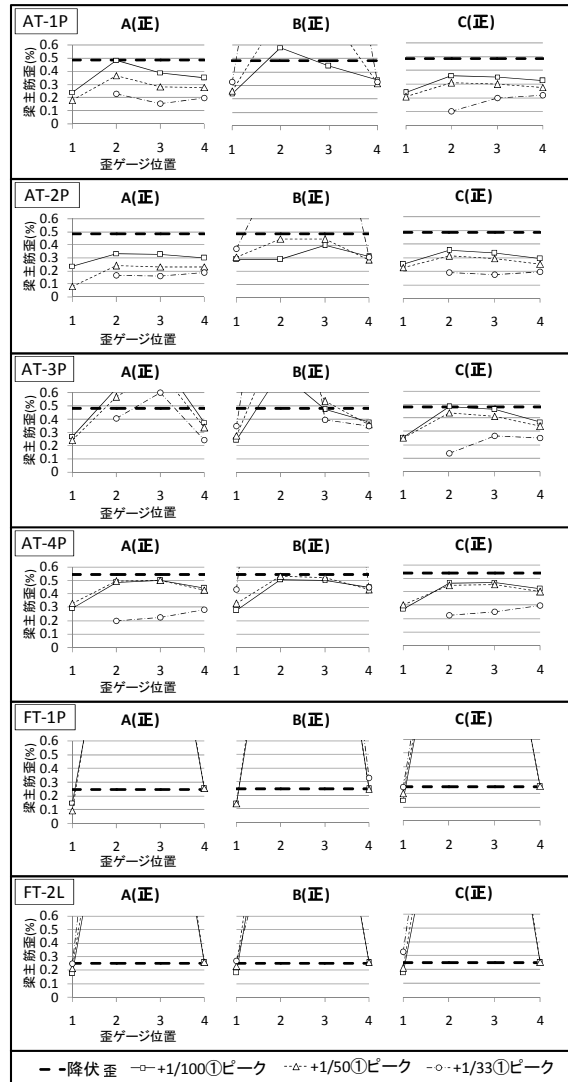


図-7 シリーズα 正側梁上端主筋歪

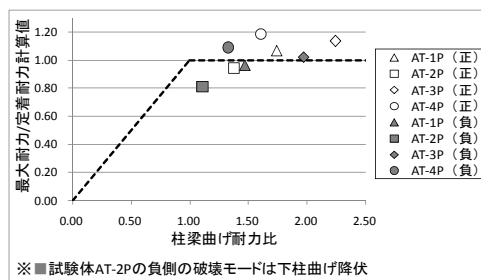


図-8 柱梁曲げ耐力比-最大耐力/計算値耐力関係

3.4 定着部上下集中補強筋の効果

図-9 に試験体 FT-3P と FT-5PR の接合部横補強筋の正側各ピーク時での歪、試験体 FT-5PR の定着部上下集中補強筋の正側各ピーク時での歪を示す。歪ゲージの位置と名称は図-1 による。図-10 にシリーズβ試験体の定着部上下補強筋量—最大耐力/計算値耐力関係を示す。

図-9 より、試験体 FT-3P, FT-5PR 共に、接合部横補強筋の歪は+1/200rad.1 回目ピーク時と変形が小さな段階から歪の値が急激に増加すると、接合部ななめひび割れが生じる+1/100rad.1 回目ピーク時には一部の接合部横補強筋が降伏し、接合部ななめひび割れ(写真-1(a))も大きく進展した。+1/25rad.ピーク時には全ての接合部横補強筋が降伏している。それに対し定着部上下集中補強筋は、+1/100rad.1 回目ピーク時より歪の値が上昇し始めるが、+1/25rad.ピーク時であっても降伏した鉄筋が存在せず、また、2 体の試験体の柱背面に抜けるひび割れ(写真-1(c))を比較しても共に大きく進展している。また、図-10 より、定着部上下補強量にして約 50%の補強筋を配しても試験体の最大耐力は想定された梁曲げ終局強度に及ばず、最大耐力の改善も正負共に 5%程度であり、今回の実験では顕著な補強効果は得られなかった。定着部上下補強筋よりも先行して接合部横補強筋が降伏すると、接合部ななめひび割れの進展の抑制は難しいと考えられる。

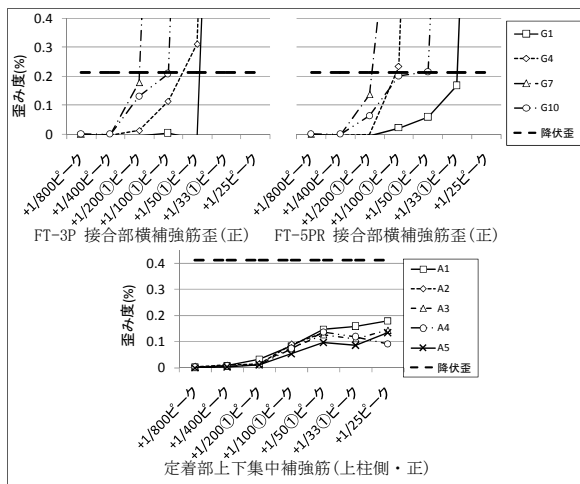


図-9 補強筋の歪

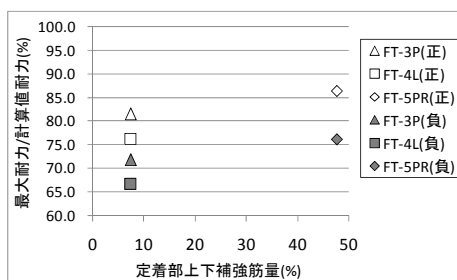


図-10 定着部上下補強筋量—最大耐力/計算値耐力関係

4. まとめ

柱梁接合部降伏の可能性があるト形部分架構試験体

における、梁主筋の機械式定着性状を知るための試験体 6 体と、定着部上下補強の補強効果を検証するための試験体 3 体の静的載荷実験及び検討の結果、以下の知見を得た。

- (1) 柱梁曲げ耐力比が 1.5 程度と小さく、架構最大耐力が梁曲げ降伏耐力に達しないと考えられる梁主筋を機械式定着したト形接合部試験体は、梁主筋の定着破壊により最大耐力が決まったが、その時の最大耐力は既往の算定式で概ね評価できる。
- (2) 柱梁曲げ耐力比が 1.8 以上と大きな梁曲げ降伏型試験体の最大耐力は梁曲げ降伏耐力計算値に達し、機械式定着よりも折り曲げ定着の方が耐力を発揮したが、柱梁曲げ耐力比が 1.5 未満の梁曲げ降伏型試験体の最大耐力は梁曲げ降伏耐力計算値に届かず、折り曲げ定着よりも機械式定着の方が耐力を発揮した。
- (3) 機械式定着端近傍を通り柱背面側に抜けるひび割れを抑制することを目的とし、定着筋近傍にフープ状の補強筋を集中的に配したが、今回の実験では顕著な補強効果は得られなかった。

謝辞

本研究は(財)日本建築防災協会に設置された機械式定着工法研究委員会の研究プロジェクトの一環として行われたものである。また、鉄筋などの材料を東京鐵鋼(株)より提供いただいた。ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 渡部杏子・清原俊彦・田才晃・長谷川勇樹：梁主筋を機械式定着した高強度コンクリート造外柱接合部の変形性能、コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, 2004
- 2) 塩原等・楠原文雄 他：鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の耐震性能におよぼす設計因子の影響に関する実験、その 1, その 2, その 3, その 4, その 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 分冊, pp391-400, 2010.9
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針・同解説, pp241-273, 2011.9
- 4) 西村英一郎・田才晃・楠浩一・清原俊彦・足立智弘：柱梁接合部降伏が生じる懸念のあるRCト形柱梁接合部における機械式定着性状に関する実験的研究、その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, ROMBUNNO.23365, 2013.7
- 5) 日本建築センター一般評定：プレートナット工法設計施工指針, pp34-35, 2009.6