

論文 機械式定着を最上階 T 形柱梁接合部の柱主筋に使用する工法の実験的研究

石橋 一彦^{*1}・井口 良平^{*2}

要旨: 鉄筋コンクリート構造の最上階 T 形柱梁接合部を対象とした柱主筋の機械式定着について 1/2 およびほぼ実大の部材モデル 8 体の正負交番繰返し加力実験を行い, 定着破壊に対して有効な補強方法を確認した。とくに接合部における柱と梁の幅比が大きい実大試験体では, 柱の隅の主筋の定着が悪くなることと, 接合部のせん断破壊が 3 次元的に生じることが確認された。

キーワード: 機械式定着, T 形柱梁接合部, 定着破壊, 接合部せん断破壊

1. 実験目的

機械式定着工法を用いた最上階の T 形柱梁接合部について, 柱曲げ降伏先行で設計された 1/2 縮小部材モデル (以下: 縮小モデル), 実大クラスの部材モデル (以下: 実大モデル) の架構による正負交番繰返し加力実験を行い, 文献 1) で示されている終局限界状態で保証すべき部材の変形角や高層建築設計例で要求される層間変形角を目安として, 実験では 1/50 以上の層間変形角まで耐力を保持し, さらに耐力の 80% を保持する変形角 $R(0.8Q_{cmax})$ が 1/25 以上あるかを確認する。また, 実大モデル試験体では, 梁幅に対する柱幅の比を縮小モデル試験体より大きくすることにより, 接合部内での柱主筋の定着条件を厳しくして, より現実的な条件でも変形性能を保てるか確かめることとする。なお, 縮小モデルの実験結果は文献 2) において既に報告されているのでその内容を抜粋して示す。

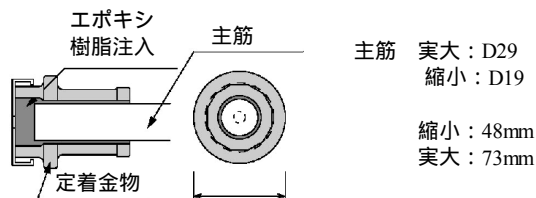


図 - 1 定着金物(または定着板)詳細

2. 試験体

全ての試験体の柱主筋には, 二条式のねじ筋鉄筋を用い, 接合部内の鉄筋末端には図 - 1 に示す定着金物を取り付けて柱主筋を定着した。表 - 1 に試験体諸元を, 図 - 2 に接合部の詳細配筋を示す。

縮小モデルの試験体はコンクリート強度, 接合部水平・横補強筋量, 柱・梁主筋強度を実験因子とする 4 体である。接合部には水平・横補強筋の他に U の字鉄筋を上下に用いた割フープ形式の鉛直・横補強筋を配置した。4S の試験体は 3N の試験体に比べ接合部水平・横補強筋量が多い試験体となっている。実大モデルの試験体は, 実験因子を鉛直・横補強筋量, 水平・横補強筋量, 定着に対する補強方法としている。2S-2 は水平・横補強筋として帯筋と中子筋を, さらに鉛直・横補強筋 (U の字鉄筋を上下に用いた割フープ形式, 縮小モデルより少ない配筋量) を配置した。2S-0 は定着板を柱主筋の端部と梁下端筋レベルの 2 段にそれぞれ配置した。2S-0 には接合部鉛直・横補強筋は配置していない。WN-ST は定着板を柱主筋の端部と梁下端筋レベルより若干上部の 2 段にそれぞれ配置した。接合部の鉛直・横補強には梁のあばら筋を配置し

*1 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科教授 工(博) (正会員)

*2 千葉工業大学 工(修) (正会員)

表 - 1 試験体緒元

試験体	コンクリート強度 F_c N/mm ²	梁長 L(mm) 柱長 H(mm)	柱配筋			梁配筋		接合部配筋				接合部せん断余裕度 V_{pu}/V_{mu}		
			主筋		かぶり mm	定着長さ mm	主筋		水平・横補強筋		鉛直・横補強筋			
			配筋 (Pg)	種別			配筋 (Pt)	種別	配筋 pwjh	種別	配筋 (pwj)		種別	
縮小	T345-30-4S	30	3400 × 1000	8-D19 (1.44%)	SD390	57	342 (18db ^{*1})	4-D19	SD295A	3-S6(5組)	KSS785	2-D10(3組) (0.37%)	SD295A	1.46
	T345-30-3N							SD295A		2-S6(6組)				
	T490-45-4S	45		SD490	4-D19			SD490	3-S6(5組)					
	T490-45-3N				SD490				2-S6(6組)					
実大	2S-2	40	5100 × 1500	8-D29 (1.43%)	SD490	87	522 (18db ^{*1})	4-D29	SD490	3-S10(5組)	RB785	2-S10(4組)	SD295A	1.10
	2S-0							SD490		0.37%		無し		
	WN-ST							40	SD490	4-D29	SD490	2-S10(5組)	RB785	2-S10(6組)
	SP-ST									SD490		0.25%		0.34%

(共通因子) 柱、梁の横補強筋: KSS785, RB785 (溶接閉鎖型) 接合部せん断余裕度は文献 3) の提案式による V_{pu} : 接合部のせん断終局耐力 V_{mu} : 柱曲げ降伏時接合部のせん断入力 (縮小モデル共通因子) 柱帯筋 (30 シリーズ): 3-S6@60 梁あばら筋 (30 シリーズ): 2-S10@90 柱帯筋 (45 シリーズ): 3-S6@40 梁あばら筋 (45 シリーズ): 2-S10@60 (実大モデル共通因子) 柱帯筋: 3-S10@90 梁あばら筋: 2-S10@90
 1 d b は主筋径, 2 梁主筋: Pt=1.19 (ただし、2S-2 梁上端のみ Pt=1.17%)

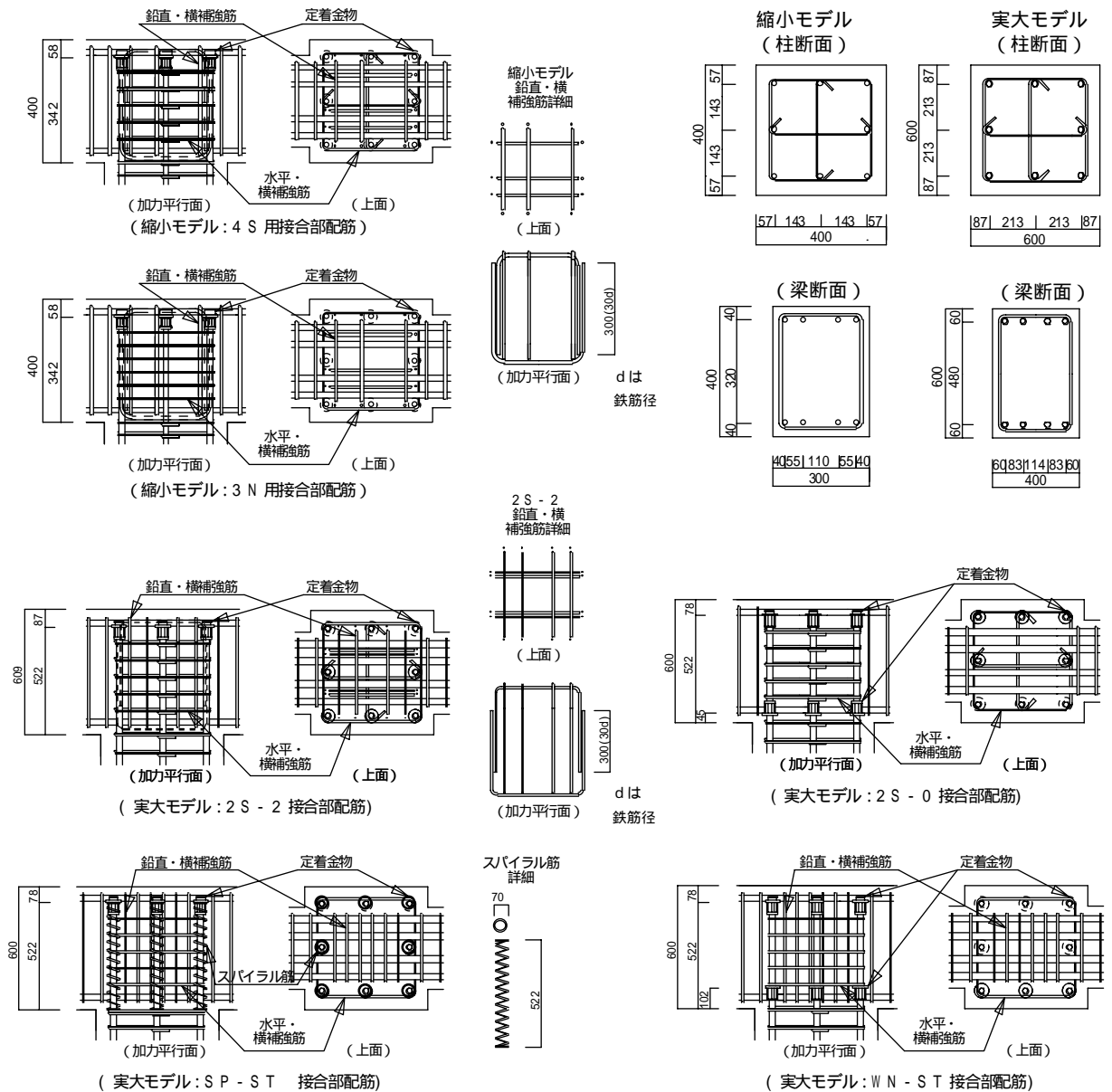


図 - 2 接合部詳細配筋

た。SP-ST には、定着補強としてスパイラル状に加工した鉄筋を定着板の支圧面より柱危険断面まで、水平・横補強筋を巻き込むかたちで巻き付けている。また、接合部の鉛直・横補強筋として WN-ST と同様に梁のあばら筋を配置した。

各試験体の接合部せん断余裕度は、縮小モデルでは 1.4 程度、実大モデルでは 1.1 程度となっている。

使用した材料の試験結果を表 2 に示す

3. 実験方法

本実験は図 - 3 に示すように、実際の施工に合わせてコンクリートを打ち込んで作製した試験体の上下を逆に柱を上、梁を下にセットして行う。梁両端の支点の位置に平鋼ブレースをピン接合して柱の加力点で交差する方向に配置して、その交差点でさらにピン接合によって加力のための治具鉄骨とともに接合する。2 台のジャッキによる荷重はこの水平な鉄骨治具の両端に反力を取って交互に与えられる。この実験方法では試験体に対して静定な条件で外力が与えられるので、柱への水平荷重と部材応力は一義的な関係を保てる。一方の梁は引張軸力を受けるが曲げ降伏しないで、柱が曲げ破壊する。

載荷履歴は層間変形角 R が(0.5, 1, 2, 3, 4, 6) / 100rad の正負 2 サイクルずつの繰り返し載荷およびその後の正加力方向への単調載荷とした。

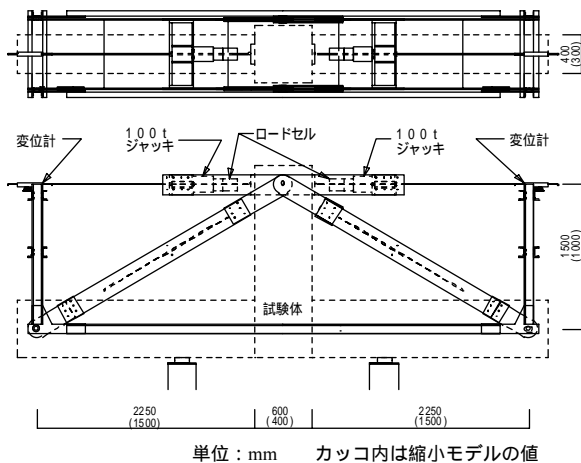


図 - 3 加力測定方法

表 - 2 使用材料強度

(鉄筋) 単位: N/mm²

使用部位	呼び名(種別)	降伏点 σ_y	ヤング係数 $E_s(\times 10^5)$	引張強度 σ_u								
縮小	主筋	D19	SD295A	336	1.94	507						
			SD345	386	1.85	577						
			SD390	427	1.90	640						
			SD490	563	2.06	765						
	横補強筋	S6	KSS785		1123	1.97	1196					
					1069	2.14	1163					
		D10	SD295A	396	1.93	531						
実大	主筋	D29	SD490	532	1.97	731						
							横補強筋	S10	RB785	961	1.95	1146

1: 高張力鋼(KSS785, RB785)は 0.2% オフセット法にて算出

(コンクリート) 単位: N/mm²

強度種別	圧縮強度 σ_B	ヤング係数 $E_c(\times 10^4)$	割裂強度 σ_t	
縮小	Fc30	33.3	2.54	2.9
	Fc45	49.7	2.91	3.3
実大	Fc40 ^{※1}	35.7	2.86	4.2
	Fc40 ^{※2}	37.4	3.4	4.6

1: 2S-2, 2S-0 試験体

2: SP-ST, WN-ST 試験体

4. 縮小モデル試験体の実験結果

写真 - 1 に実験終了後(T390-45-3N)の状態、図 - 4 に柱のせん断力 Q (kN) と層間変形角 R (rad) の関係を示す。

実験終了後の試験体を観察すると、各試験体で接合部パネル中央の破壊よりも柱断面 4 隅に位置する定着筋のかぶりコンクリートの破壊が大きく、特に顕著であったのは梁上端筋に沿う付着ひび割れの拡大と柱上面の定着板の外側のコンクリートの破壊であった。T490-45-3N では実験終了以後接合部パネルのかぶりコンクリートを取り除くと定着板近傍に配置した帯筋のコーナーで鉄筋の破断が見られた。

接合部のせん断破壊および柱主筋の定着破壊について実験結果のまとめを文献 2) より以下に抜粋する。

- 1) 各試験体において、 $R = \pm 0.01$ の変形振幅で柱は曲げ降伏し、 $R = \pm 0.02$ にかけて試験体の剛性は急激に低下するが $R = \pm 0.03$ まで荷重は徐々に上昇し最大荷重に至った。
- 2) 各試験体において、 $R = \pm 0.04$ および $R = \pm 0.06$ および $R = +0.08$ と変形振幅を増加して加力を

続けると耐力は低下した。接合部の水平補強筋量が小さい程（4Sシリーズに対して3Nシリーズ）耐力の低下が各サイクルで比較して大きかった。また、接合部せん断余裕度が小さい（30シリーズに対する45シリーズ）と耐力低下が大きく生じた。

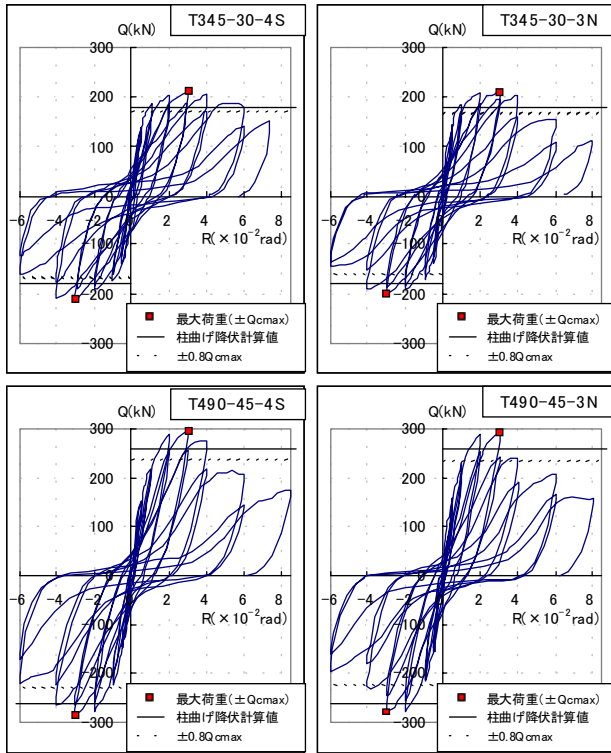


図 - 4 Q-R 関係^{文献2)}

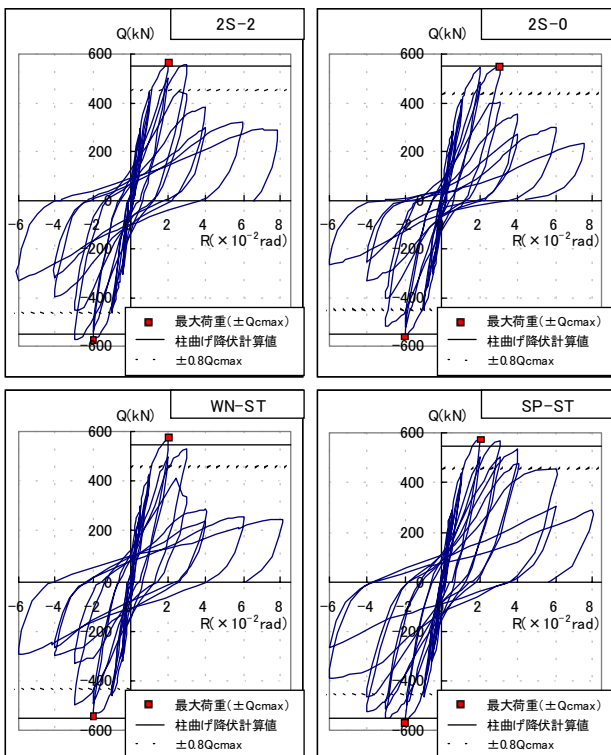


図 - 5 Q-R 関係

3) 試験体が加力によって最大荷重に至るまでは、定着板の定着耐力は保持された。最大荷重以降の大きな変形振幅での加力において定着板のコンクリートに対する滑動が非常に大きくなって定着破壊が生じ、耐力が低下した。

T390-45-3N

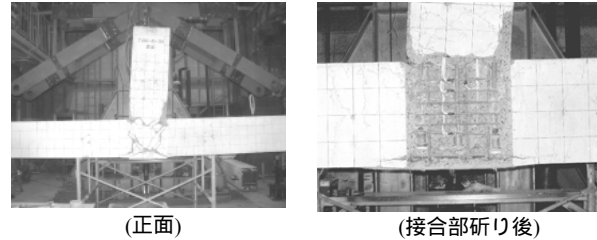


写真 - 1 最終破壊状態

5. 実大モデル試験体の実験結果

5.1 荷重 - 変形角関係

SP-ST 試験体については予定どおり 13 サイクルでの押し切りで終了しているが、それ以外の 3 試験体は最大荷重経験後に大きな荷重低下が見られたため、本来予定していた 11-12 サイクル (0.06rad) の繰返し載荷は 1 サイクルのみ行い、12 サイクル $R=+0.08$ までの加力で実験を終了した。図-5 に各試験体の柱のせん断力 Q (kN) と層間変形角 R (rad) の関係を示す。

各試験体に共通して、 $R=\pm 0.005$ の変形振幅では曲げひび割れなどによって若干の剛性低下はあるが、低荷重時のスリップ性状などは見られなかった。 $R=\pm 0.01$ の変形振幅では $R=\pm 0.005$ までは弾性的ではあるが新しい変形領域で再び剛性低下する。 $R=\pm 0.02$ の変形振幅では、 $R=\pm 0.01$ を超えるあたりの変形より剛性が低下するが、材料試験値を用いた柱曲げ降伏の計算荷重の耐力を保持していた。このときの正負の荷重が各試験体の耐力で、2S-0 の正加力に限り $R=+0.03$ の 7 サイクルのときに最大荷重となった。WN-ST の負加力では $R=-0.02$ の 5 サイクルで計算荷重を若干下回る最大荷重となった。各試験体で $R=\pm 0.02$ の 6 サイクル以降の変形では低荷重時に履歴ループのスリップ性状が比較的顕著になった。 $R=\pm 0.03 \times 2$ サイクルの繰返し加力において、SP-ST のみ耐力の 80% ($0.8Q_{cmax}$)

を超える荷重を示し，WN-ST は載荷中に荷重が大きく低下した。2S-2 では， $0.8Q_{cmax}$ を迎えるあたりで，2S-0 では下回る荷重で，荷重を維持したまま変形が進行した。 $R=\pm 0.04 \times 2$ サイクルにおいて，SP-ST ではスリップ性状は大きくなるが， $0.8Q_{cmax}$ の耐力を維持し，2S-2 では70%弱，2S-0 では60%程度，WN-ST では50%程度に耐力が減少しスリップ性状が強くなっていた。 $R=+0.06$ の11 サイクルの正加力まで SP-ST では $0.8Q_{cmax}$ を維持する耐力が見られ，耐力が低下するとともにスリップ性状の確認できた。

5.2 試験体観察と考察

実験終了後，各試験体の接合部パネルかぶりコンクリートを取り除き接合部の破壊状況を確認した。写真-2 に示すように，SP-ST では定着筋のかぶりコンクリートはスパイラル筋で拘束されているので，定着筋と一体となって移動している。他の試験体では鉄筋とコンクリートの間での滑動が確認できた。また，SP-ST では接合部断面梁幅外のコンクリートが激しく破壊されスターラップで囲まれた領域の接合部コアと完全に分離している。WN-ST では定着筋の滑動による鉄筋節間でのコンクリートのせん断破壊とフープに囲まれたコアコンクリートの破壊が確認できるが，接合部梁幅内のコアコンクリートとは完全に分離していなかった。2S-2 では定着筋の滑動によるコンクリートのせん断破壊が見られ，フープと鉛直補強筋で囲まれた接合部コアコンクリートの破壊は激しく生じていない。2S-0 では定着筋の滑動によるコンクリートのせん断破壊とフープ筋に囲まれた接合部コアコンクリートの破壊が見られ，とくに定着板近傍のコンクリートの破壊が激しい。また，この試験体では梁上端筋の膨み出しが他の試験体と比べると顕著であった。SP-ST ではスパイラル筋によって定着強度は上昇したが，接合部の厚さ（幅）方向においてせん断破壊と思われる破壊が見られた。これは，接合部梁幅内のコアが梁あばら筋によって拘束されていたが，比較的拘束が弱い

接合部梁幅外とコアとの間で擦れせん断破壊が生じたと考えられる。柱主筋端部と梁下端筋レベルに定着板を取り付けた WN-ST，2S-0 の各試験体では梁下端筋レベルに取り付けた定着板による定着強度の上昇効果は鮮明には見られなかった。また，WN-ST においては定着筋の滑動が梁曲げ降伏後の早期の変形で生じたため SP-ST のような破壊は見られなかった。2S-0 では柱上面の梁幅内のかぶりコンクリートも梁主筋の膨み出しを拘束する補強筋が無いため上方に大きく浮き上がったが，他の3体の試験体では鉛直補強筋及びスターラップによってこの盛り上がり拘束された。

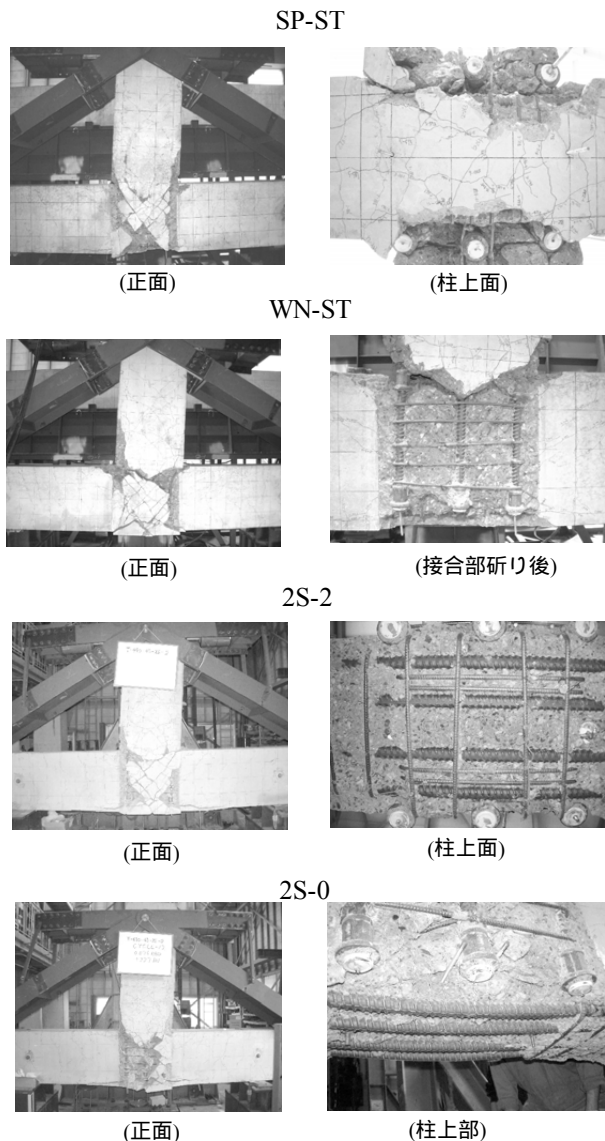


写真 - 2 最終破壊状態

6. 変形性能に与える主要因子

耐力の 80% を維持する層間変形角 R ($0.8Q_{cmax}$) とせん断余裕度の関係を図 - 6 に示す。試験体は縮小モデル 4 体, 実大モデル 4 体, 文献 4) で報告されている 9 体, 文献 5) で報告されている 4 体である。文献 4) で報告されている 9 体にはすべて逆 U の字型の柱頭補強筋を配置した試験体であり, 文献 5) で報告されている 4 体は, 本研究の縮小モデル・実大モデル (2S-2) と同様に U の字鉄筋を上下に用いた割フープ形式の鉛直・横補強筋を配置した試験体である。梁幅に対する柱幅の比は実大モデルを除きすべての試験体で同じ 1.33 であり, 実大モデルの梁幅に対する柱幅の比は 1.50 であった。

せん断余裕度が 1.2 以下の試験体では, 1/25 まで耐力の 80% を維持する性能を発揮したのは実大モデルの SP-ST のみであり, 実大モデルは他の試験体より梁幅に対する柱幅の比が大きい厳しい定着条件であったことも考慮すると, スパイラル状に加工した鉄筋を定着板の支圧面より柱危険断面まで, 水平・横補強筋を巻き込むかたちで巻き付けた補強は変形性能の向上に有効であると考えられる。

せん断余裕度が 1.3~2 の試験体では, ほとんどの場合で, 1/25 まで耐力の 80% を維持する性能を発揮している。したがって, 接合部の補強が十分なせん断余裕度が 1.3 以上の場合, 架構の変形能力は 1/50 まで保証され, さらに 1/25 までの変形性能を保持していることが期待できると考えられる。文献 5) の 2 試験体は 1/25 までに耐力が低下している。これらの 2 試験体は文献 5) の 1/25 まで耐力の 80% を維持する性能を発揮した他の 2 試験体に比べ水平・横補強筋量が少ない試験体であった。

鉛直・横補強筋を配置した実大モデル 2S-2 と配置していない 2S-0 では, 変形性能の大きな違いは見られなかった。よって, 縮小モデルに比べ少ない鉛直・横補強筋の配筋量であった 2S-2 では鉛直・横補強筋による接合部の変形拘束は十分ではなかったと考えられる。

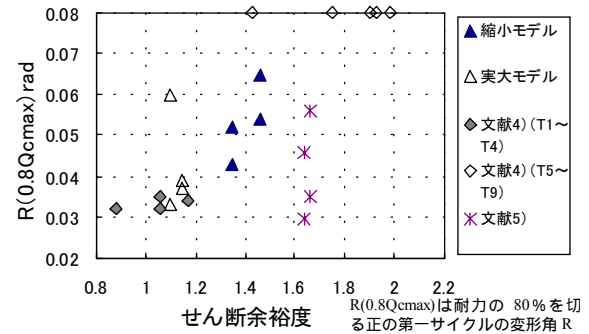


図 - 6 各試験体の変形性能

7. まとめ

- 1) 縮小モデル, 実大モデル共に 1/50 以上の層間変形角を保持し, さらに, 1/25 までの最初の正加力で耐力の 80% を保つ変形性能を発揮するのは, 縮小モデル全試験体と, 実大モデルでは, スパイラル筋と梁あばら筋を配置した SP-ST のみであった。
- 2) 特に, 実大モデル試験体では柱断面四隅に位置する定着筋の定着破壊が顕著であった。柱断面四隅に位置する定着筋に対して定着強度を保証すれば変形性能を確保できると考えられる。
- 3) 梁幅に対する柱幅の比が大きくなる場合には, 接合部の平面方向ばかりでなく, 厚さ(幅)方向でもせん断破壊が生じることが実大モデル (SP-ST) で明らかになった。

謝辞

本研究は (株) 伊藤製鐵所の機械式定着工法開発の一環として行われたものである。ここに関係各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, pp.80-84, pp.245-249, 1999
- 2) 石橋一彦ほか: 柱主筋定着板工法における最上階 T 形柱梁接合部の実験的研究 (その 1 耐力と変形性能), (その 2 接合部の変形と定着性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.533-536, 2003
- 3) 益尾 潔, 岡村信也, 井上寿也: 機械式定着工法による L 形および T 形 RC 造柱梁接合部の終局入力時せん断力とせん断終局耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.493-498, 2003
- 4) 石渡康弘ほか: 円形定着板により機械式定着された T 形柱梁接合部に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.919-924, 2003
- 5) 井上寿也, 益尾 潔, 岡村信也: 機械式定着工法による曲げ降伏先行型・L 形および T 形 RC 造部分架構の終局耐力と変形性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.499-504, 2003