

論文 主筋を機械式定着した鉄筋コンクリート造柱梁接合部の構造性能に関する実験

中澤 春生^{*1}・坂口 昇^{*2}・浅井 政宏^{*3}

要旨:梁および柱主筋を機械式定着した柱梁接合部の構造性能を部分架構実験および既往の実験データにより検討した。実験では、梁主筋を機械式定着した場合、梁曲げ降伏型・接合部せん断破壊型のいずれにおいても定着破壊を生じなかったが、柱主筋を機械式定着した場合は、柱降伏型の架構で柱筋降伏直後に定着破壊を生じ、その耐力評価に課題が残ることを示した。また、定着長さが短い場合に懸念されるコーン状破壊を安全側に評価する耐力式を検討した。
キーワード:機械式定着, 柱梁接合部, せん断破壊, コーン破壊, 側面剥離破壊

1. はじめに

鉄筋の定着端部にナットやふくらみ部を設けて、その部分のコンクリートとの支圧作用を利用して鉄筋を定着させる、いわゆる機械式定着が注目され、各所で開発・実用化されている。鉄筋が機械式定着された柱梁接合部では、定着端部の側面剥離破壊や定着長さが短い場合に生じるコーン破壊といった定着部破壊¹⁾や接合部のせん断破壊が生じず、接続する梁や柱の曲げ破壊となることが求められる。しかし、これら定着部破壊の耐力は部分架構実験で十分に検証されているとは言い難く、さらに実験データを蓄積し整理する必要がある。また、最上階の中柱や外柱接合部に対する機械式定着についても実験データの充実が望まれている。本稿では、端部を高周波誘導加熱と加圧によって拡径加工した鉄筋を定着(以下拡径ヘッド定着)した中間階外柱・梁接合部、最上階中柱・梁接合部、最上階外柱・梁接合部を模擬した部分架構実験の結果を報告するとともに、これまでに報告された機械式定着を有する柱梁接合部実験の結果を含め、各種耐力について検討を加える。

2. 実験概要

試験体一覧を表 - 1 に、試験体形状および加

力概要を図 - 1, 定着端部形状を図 - 2, 接合部配筋を図 - 3, 試験体の部材断面を図 - 4 に示す。試験体は中間階外柱・梁接合部(OM)試験体が4体, 最上階中柱・梁接合部(IT), 最上階外柱・梁接合部(OT)試験体が各1体の総数6体である。OM試験体では、コンクリートおよび鉄筋強度, 梁主筋定着形式, 定着長さを変化させた。このうち、接合部に高強度コンクリートを使用したFc60シリーズ(以下OM60S)は梁曲げ降伏型に計画し, SD490鉄筋をU字折曲げ, 拡径ヘッド, プレート付ナットにて接合部内に定着し, 機械式定着の定着長さを360mmとした。なお, 拡径ヘッド鉄筋は図 - 2 に示す形状で, 拡径部の外径寸法は鉄筋径の2.5倍である。OM試験体で接合部コンクリートをFc36と

表 - 1 試験体一覧 試験体名は要因中記号に対応

試験体	接合部形式	接合部コンクリート	想定破壊モード	主筋定着		
				定着筋	* Type	定着長さ
1 OM60B-U	中間階外柱・梁接合部(OM)	Fc60	梁降伏型(B)	梁筋	U	20.7db (0.88Dc)
2 OM60B-T				梁筋	T	18.9db (0.80Dc)
3 OM60B-P				梁筋	P	
4 OM36J-T			接合部せん断破壊型(J)	梁筋	T	12.6db (0.60Dc)
5 IT36C-T	最上階中柱・梁接合部(IT)	Fc36	柱降伏型(C)	柱筋	T	17.1db (0.80Db)
6 OT36B-T	最上階外柱・梁接合部(OT)		梁降伏型(B)	梁下端筋	T	15.8db (0.75Dc)
				柱筋	T	19.2db (0.91Dc)

*【定着Type】U: 90°折曲げU字定着, T: 拡径ヘッド定着, P: プレート付ナット定着
注) No1 ~ 3のOM60試験体をまとめてOM60S(シリーズ)と略記する。

*1 清水建設(株) 技術研究所構造研究開発部主任研究員 工修 (正会員)
*2 清水建設(株) 建築本部技術開発部主査 工博 (正会員)
*3 清水建設(株) 設計本部構造生産設計部二部設計長 工修

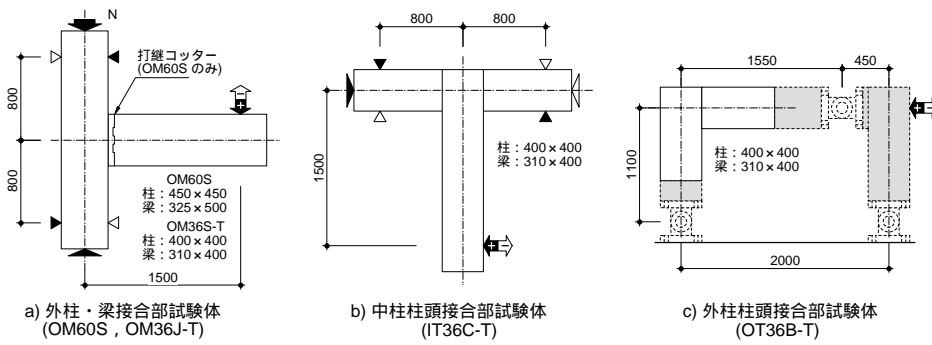


図 - 1 試験体形状および加力概要 (寸法単位: mm)

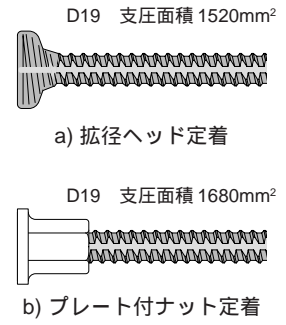


図 - 2 定着端部形状

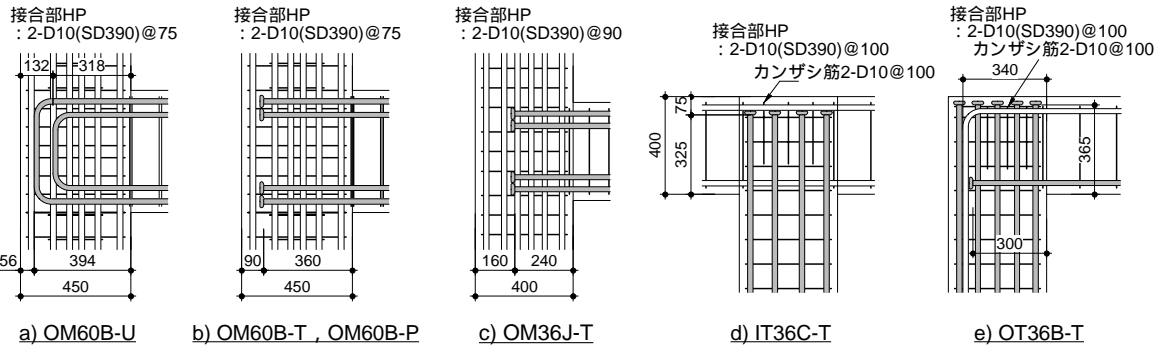


図 - 3 接合部配筋 (寸法単位: mm)

したOM36J-Tは接合部せん断破壊型に計画し、
 拡径ヘッド鉄筋 (SD390) の定着長さを240mm
 とした。一方、最上階の接合部を模擬した試験
 体では、中柱のIT36C-Tを柱曲げ降伏型 (SD390
 拡径ヘッド鉄筋, 定着325mm), 外柱のOT36B-
 Tを梁曲げ降伏型 (下端のみSD390 拡径ヘッド
 鉄筋, 定着300mm) に計画した。OT36B-Tでは、
 梁下端筋のほか柱筋も拡径ヘッド鉄筋として、
 梁下端レベルから365mmの定着長さとした。試
 験体の部材断面は、OM60Sが柱450×450mm、
 梁325×500mmで、その他の試験体では柱400
 ×400mm、梁310×400mmである。なお、OM60S
 は梁コンクリートをFc42として柱および接合部
 (Fc60)と打ち分けた。これらのコンクリートの
 打ち継ぎは、梁コンクリートを先行打設して硬
 化した後に接合部・柱コンクリートを打設する
 こととし、その打ち継ぎ面には、はり全幅にわ
 たり高さ80×深さ15mmのシアコッターを
 160mm間隔に設けた。各試験体に使用した材
 料の材料試験結果は表-2および表-3のとおり
 である。加力はいずれの試験体も変位漸増の正
 負交番繰返し加力とした。OM,IT試験体はキャン
 チレバー型加力で、OM試験体では柱を支持

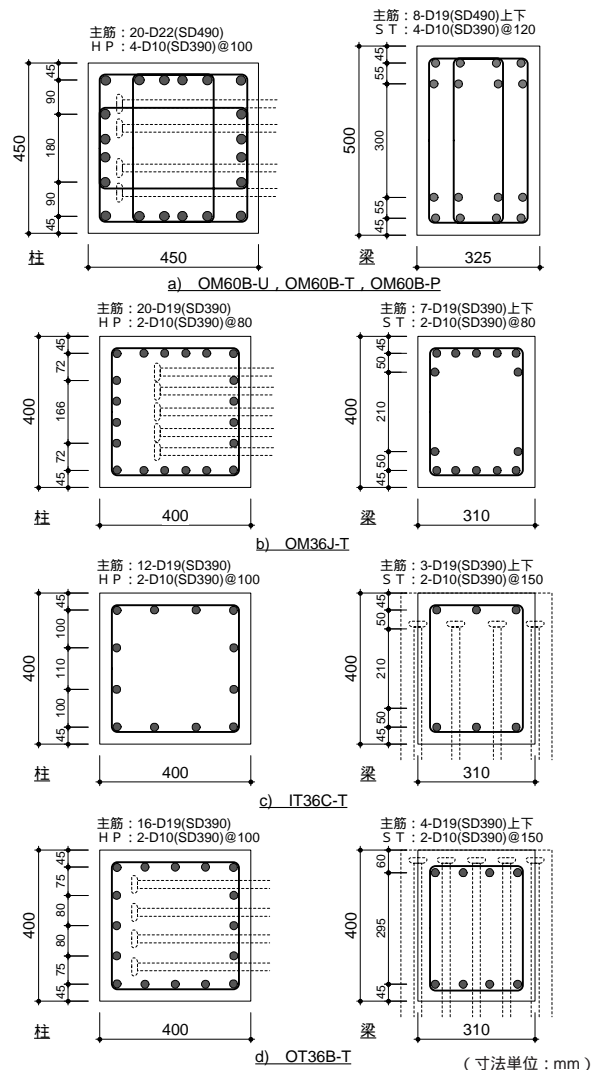


図 - 4 試験体部材 (柱・梁) 断面 (寸法単位: mm)

した梁加力, IT試験体では梁を縦にして支持した柱加力とした。これらの試験体では, 支持する柱・梁が浮き上がらない範囲で低い軸力を作用させることとし, OM60Sでは600kNの柱軸力, OM36J-Tでは240kNの柱軸力, IT36C-Tでは180kNの梁軸力を作用させ, 加力中は試験体上部で検出した軸力が一定となるように制御した。一方, 最上階外柱・梁接合部を模擬したOT36B-Tは, 試験体から突き出した主筋に治具を連結し, 鉄骨柱およびクレビスを組み合わせて構成した3ヒンジラーメンの梁芯のレベルに両動ジャッキによる横力を作用させた。

3. 実験結果

3.1 破壊性状および荷重変形関係

実験結果一覧を表-4, 各試験体の最終破壊状況を写真-1, 荷重-全体変形角(R)関係を図-5に示す。ここで荷重は, 柱降伏型に計画

したIT36C-Tでは柱せん断力(cQ), その他の試験体では梁せん断力(bQ)にて整理している。

載荷に伴う各試験体の破壊経過は, 梁(IT36C-Tでは柱)端部の曲げひび割れの発生の後, 柱曲げひび割れ・梁せん断ひび割れがほぼ同時期に発生し, その後接合部せん断ひび割れが発生するという経過を辿った。接合部せん断破壊型としたOM36J-T以外では機械式定着した梁(IT36C-Tでは柱)主筋が降伏したが, 最上階中柱・梁接合部を模擬したIT36C-Tは, 最も引張側の主筋のみが降伏するに留まり, 耐力も曲げ解析による耐力に達しなかった。なお, 曲げ解析による耐力は終局時コンクリート圧縮縁ひずみを0.35%とした断面解析の最大値で, 柱加力のIT36C-Tでは耐力時に柱の中段筋も降伏していた。したがって, この試験体は解析での耐力時の状態に達する前に破壊したものであり, 最大耐力以後の耐力低下や接合部の損傷も顕著

表-2 鉄筋材料試験結果 (JIS Z 2241)

試験体	部位	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏歪 (μ)	引張強さ (N/mm ²)
Fc60 シリーズ	柱主筋	D22(SD490)	530	1.97 × 10 ⁵	2740	701
	梁主筋	D19(SD490)	540	1.90 × 10 ⁵	2840	740
	HP・ST	D10(SD390)	481	1.92 × 10 ⁵	2500	715
Fc36 シリーズ	主筋	D19(SD390)	481	1.90 × 10 ⁵	3020	668
	HP・ST	D10(SD390)	428	1.84 × 10 ⁵	2760	613

表-3 コンクリート材料試験結果 (JIS A 1108) (JIS A 1113*)

試験体	部位	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
Fc60 シリーズ	柱・接合部	75.2	4.18 × 10 ⁴	3.45
	梁	60.1	3.79 × 10 ⁴	3.45
Fc36 シリーズ	全部位	39.5	2.84 × 10 ⁴	3.46

コンクリートのヤング係数は圧縮強度の1/3の強度時点における割断剛性
* 割裂強度は 100 × H200mmの供試体の強度

表-4 実験結果一覧

試験体	正負	梁曲げひび割れ		柱曲げひび割れ		接合部せん断ひび割れ		梁(柱)主筋降伏*2		接合部フープ降伏		最大荷重		破壊モード
		荷重*1 (kN)	R(%)	荷重*1 (kN)	R(%)	荷重*1 (kN)	R(%)	荷重*1 (kN)	R(%)	荷重*1 (kN)	R(%)	荷重*1 (kN)	R(%)	
1 OM60B-U	+	49.2	0.033	178.1	0.256	232.5	0.396	387.1	0.904	-	-	425.5	3.001	梁曲げ破壊
	-	-67.7	-0.043	-185.3	-0.254	-247.8	-0.403	-389.4	-0.902	-	-	-429.8	-2.975	
2 OM60B-T	+	49.2	0.031	183.6	0.249	245.5	0.406	391.3	0.929	-	-	420.0	2.975	梁曲げ破壊
	-	-96.0	-0.083	-159.2	-0.198	-280.7	-0.495	-384.8	-0.876	-	-	-442.1	-2.984	
3 OM60B-P	+	72.3	0.057	180.4	0.257	240.3	0.408	376.4	0.868	-	-	422.0	3.011	梁曲げ破壊
	-	-102.6	-0.074	-184.9	-0.212	-259.2	-0.394	-362.7	-0.730	-	-	-435.3	-3.000	
4 OM36J-T	+	47.7	0.097	82.0	0.267	82.0	0.267	-	-	-163.4	-0.809	215.0	1.456	接合部せん断破壊
	-	-43.8	-0.064	-91.5	-0.252	-89.9	-0.275	-	-	-	-	-214.0	-1.497	
5 IT36C-T	+	110.1	0.503	34.0	0.063	111.1	0.462	170.3	1.135	-	-	180.4	1.408	定着破壊
	-	-120.6	-0.502	-35.3	-0.038	-107.2	-0.400	-160.4	-1.200	-	-	-167.6	-1.500	
6 OT36B-T	+	37.9	0.192	46.4	0.279	108.0	0.857	150.4	1.421	-123.8	-2.640	176.1	3.212	梁曲げ破壊
	-	-27.9	-0.142	-27.9	-0.142	-69.6	-0.758	-111.6	-1.605	-	-	-132.1	-4.893	

*1 荷重は, IT36C-Tを柱せん断力(cQ)で表記し, その他の試験体を梁せん断力(bQ)で表記。

*2 IT36C-Tは柱主筋降伏時, その他は梁主筋降伏時を表記。

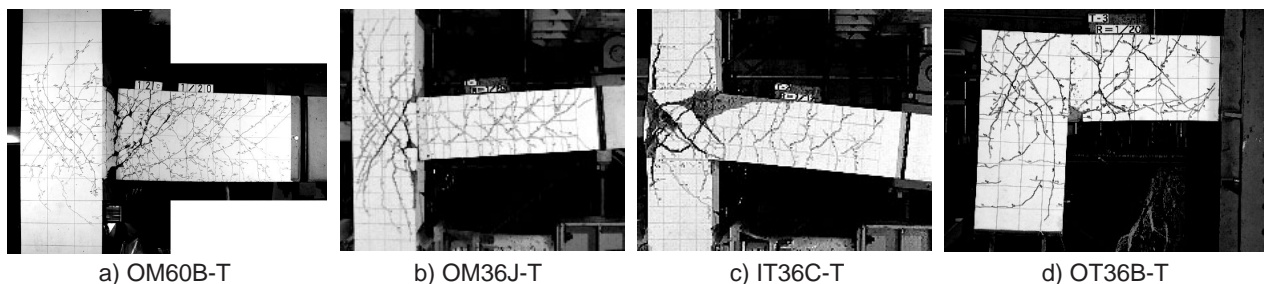


写真-1 最終破壊状況

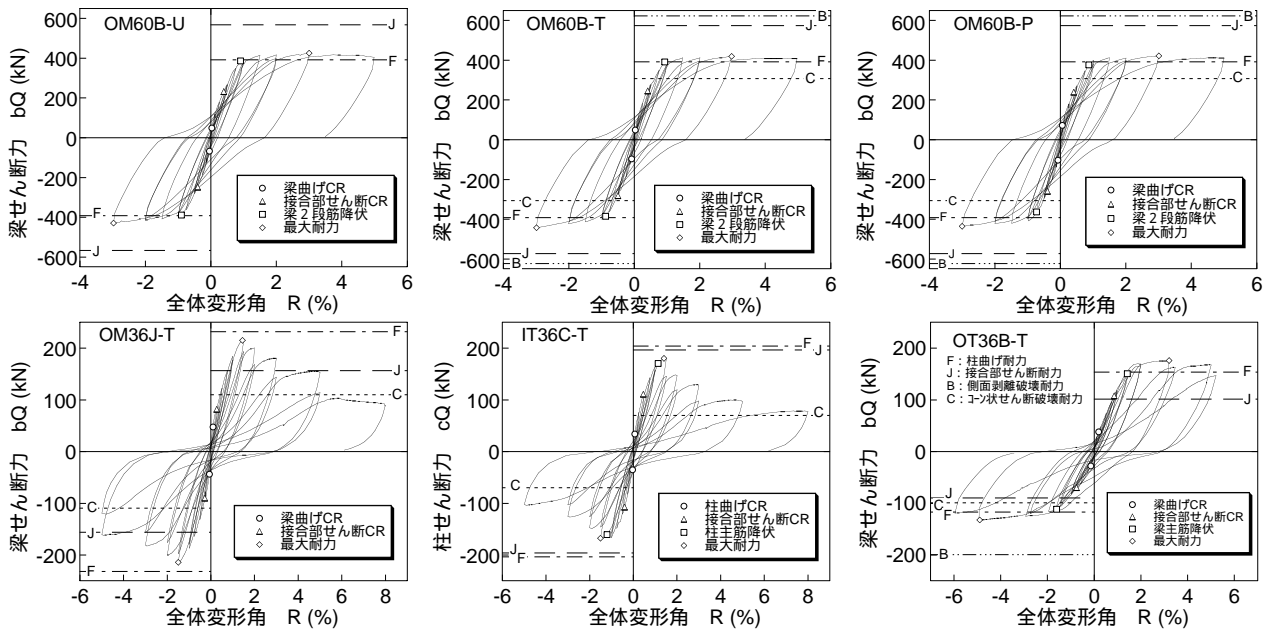


図 - 5 荷重 - 全体変形角 (R) 関係

図中、梁曲げ耐力はコンクリート圧縮終局歪0.35%とした断面解析、接合部せん断破壊耐力は靱性指針式、側面剥離破壊耐力は村上式⁹⁾、コーン状せん断破壊耐力は本論(1)式による。

であった。さらに、この試験体は靱性保証型設計指針²⁾による接合部せん断耐力にも達していないことから、破壊モードを定着破壊と判断した。一方、接合部せん断破壊型としたOM36J-Tは、最大耐力以後、接合部が損傷するとともに耐力低下し、履歴性状もスリップ型に変化した。その最大耐力は靱性指針による接合部せん断耐力を上回る値を示した。その他の曲げ破壊型の試験体では、解析による曲げ耐力を若干上回る耐力に達し、その後も耐力低下のない安定した性状を示した。このうち、最上階外柱を模擬したOT36B-Tの梁には、加力形式の影響により、正載荷（柱梁が閉じる方向）時に圧縮軸力、負載荷（柱梁が開く方向）時に引張軸力が作用するため、正負で曲げ耐力が異なるが、両方向とも梁主筋が降伏し、解析による曲げ耐力を上回る耐力を示した。なお、この試験体を含め、柱降伏型としたIT36C-T以外では、最終まで柱主筋の降伏には至らなかった。

3.2 定着筋応力

各試験体の引張側1段目の定着筋のひずみからRamberg-Osgoodモデル³⁾により換算した鉄筋応力の分布を図-6に示す。応力分布は、最上階外柱を模擬したOT36B-Tでは拡径ヘッド定着とした梁下端筋が引張となる負載荷において梁筋が接合部フェース断面で降伏した後のR=-2%、その他の

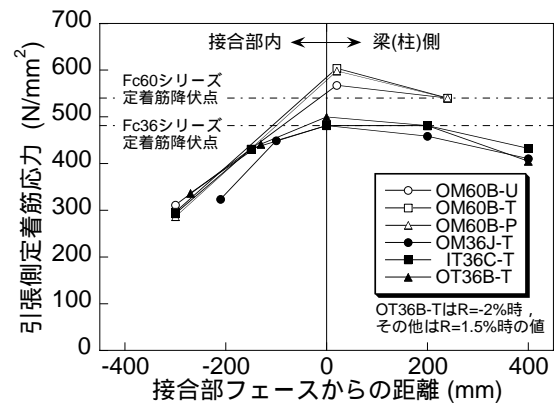


図 - 6 定着筋引張応力分布

試験体では正載荷時のR=+1.5%について示している。このR=+1.5%はOM60Sでは降伏時変形の約2倍、OM36J-TおよびIT36C-Tでは最大耐力時に相当し、R=-2%のOT36B-Tを含め、全試験体ともほぼ最大耐力に近い耐力時である。図より、定着端部における主筋応力は約300N/mm²で、全試験体でほぼ同等の値を示していることがわかる。この応力を拡径部の支圧応力度に換算すると約57N/mm²で、Fc60コンクリートの圧縮強度に対しては0.76倍、Fc36に対しては1.44倍となる。

図-7に、フェース断面における鉄筋応力の定着筋降伏応力に対する比と定着部内の鉄筋軸部の平均付着応力度の関係を示す。図には、拡径ヘッド定着した4体について示しているが、その他の2体はOM60B-Tと同様の推移であった。鉄筋応力に対する付着応力度の関係の初期の勾配は全試

験体ともほぼ同様であるが、Fc36の3体は τ_b 2N/mm²で勾配を減じ、3.0～3.5N/mm²が最大となっているのに対し、Fc60のOM60B-Tは τ_b 4N/mm²までほぼ直線的に上昇し、その後ほぼ横ばいの状態を経て最大4.7N/mm²に達している。

4. 主筋を機械式定着した接合部耐力の検討

ここでは、主筋を機械式定着した柱梁接合部の耐力について、本実験結果に、これまでに各所で行われ報告された47体の実験結果(表-5参照)を加えたデータをもとに検討を行う。

まず、靱性保証型指針の接合部せん断耐力設計式と実験結果の対応を図-8に示す。図より、この設計式は、接合部せん断破壊した試験体()の耐力の下限値を良好に推定できることが伺える。また、曲げ破壊した試験体()は、横軸 1.0に位置し、破壊モードの区別も良好である。しかし、一部、コーン破壊と報告された試験体()や定着破壊()した試験体に対しては、やや危険側の評価となっており、機械式定着に関しては、これらの破壊に対する検討が必要であることが認められる。

次に、定着破壊の一形態である側面剥離破壊耐力として提案されている村上らによる耐力式¹⁾の原式と実験結果の対応を図-9に示す。図より、同式は、梁主筋を機械式定着した試験体で定着破壊したもの()を平均的に精度良く推定していることが伺える。しかし、柱主筋を機械式定着した試験体の定着破壊()についてはきわめて危険側の評価となっている。一般に、柱主筋は梁筋の外側に配置され、梁主筋に比べ厳しい状況にあると思われるが、現時点でそれを評価するには至っておらず今後の課題である。また、同図においてコーン破壊したと報告されている試験体の耐力も本耐力式上に位置しているが、最も外側に定着された定着筋の耐力のみに基づいて算定する同式はコーン破壊と異なる力学モデルに基づくものであり、コーン破壊を同式で評価することは妥当でない。

主筋の機械式定着に関しては、本報告で対象と

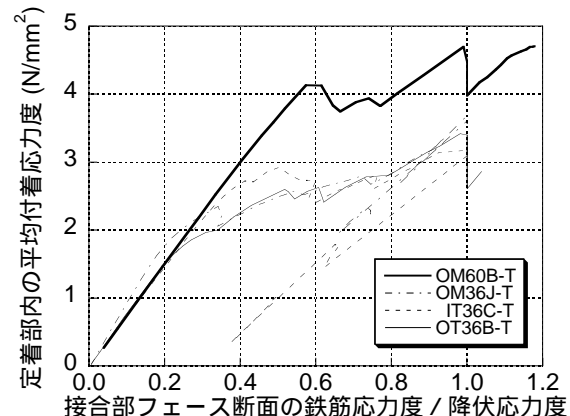


図-7 定着部内軸部の平均付着応力度の推移

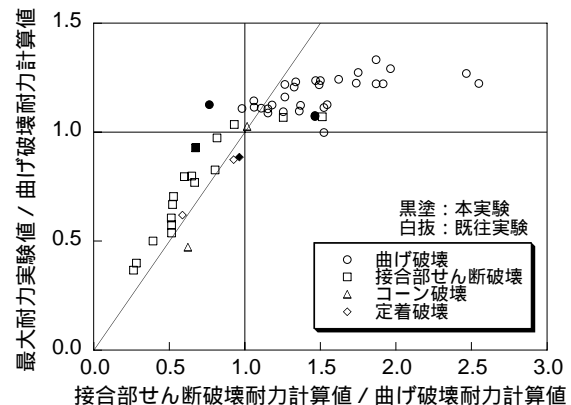


図-8 接合部せん断耐力と実験結果の対応

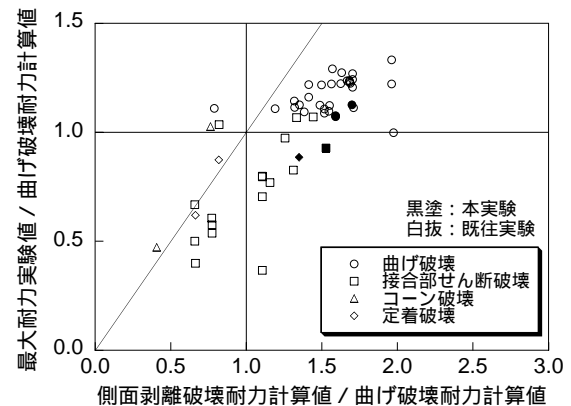


図-9 側面剥離破壊耐力と実験結果の対応

した部分架構実験のほかRC部材中に機械式定着された鉄筋を直接引き抜く実験結果がある。筆者らはこれらの実験結果を検討し、鉄筋の引抜力のうち接合部側に作用するせん断力に着目することとし、接合部側がコーン破壊もしくはせん断破壊する時の接合部せん断力を、図-10に示すような力の釣り合いにおいて、折り曲げ定着の掻き出し破壊耐力式²⁾と同様の考え方でコンクリートの引張抵抗とせん断補強筋の抵抗の累加と仮定した(1)式で表し、その耐力をコーン状せん断破壊耐力と考えることとした。

$$jQ_{cu} = Bc \cdot ld(0.313\sqrt{\sigma_B}) + A_w \cdot \sigma_{wy} \quad (1)$$

jQ_{cu} : コーン状せん断破壊時接合部せん断力
 Bc : 接合部の幅, ld : 定着長さ, σ_B : コンクリート強度
 A_w : 定着端部から 45° 方向の割裂線を横断する接合部補強筋断面積, σ_{wy} : 接合部補強筋強度

(1) 式による耐力と実験結果の対応をみたものが図 - 11 であるが, 同式はコーン破壊と報告された 2 体の試験体のうち, 曲げ耐力比が低い方の試験体を精度良く推定している。しかし, 同式は総じて安全側の評価となり, 曲げ破壊した試験体の破壊モードの区別も不十分である。また, 図の横軸 < 1.0 の範囲にプロットされながら実験では曲げ破壊した試験体は, すべて定着長さが柱せいの 0.7 倍以上と比較的長い試験体であり, そのような定着長さをとった部分架構実験においてはコーン破壊の報告がほとんどないことも考慮すると, コーン状せん断破壊に対する軸力や梁せん断力の影響等をさらに検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本実験および既往実験結果の検討を通じて得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 梁主筋を機械式定着した試験体で梁曲げ破壊型としたものは, 良好な履歴性状を示した。
- (2) 柱主筋を機械式定着した, 最上階接合部模擬部分架構実験によれば, 柱降伏型試験体は定着破壊と思われる破壊を呈し耐力を推定することに課題が残されたのに対し, 柱降伏に先立って梁降伏型に計画したものは良好な性状が得られた。
- (3) 定着部の応力を左右する, 接合部内の鉄筋軸部の平均付着応力度は, $Fc60$ の場合 $\tau_b = 4.7\text{N/mm}^2$, $Fc36$ の場合 $\tau_b = 3.5\text{N/mm}^2$ に達していた。
- (4) 52 体の部分架構実験における接合部せん断破壊に対して, 靱性保証型指針の接合部せん断耐力は良い適合がみられ, 曲げ破壊との破壊モードの区別も良好である。
- (5) 梁主筋を機械式定着した試験体の定着破壊耐力は, 側面剥離破壊に対する耐力を与える村上式でほぼ評価できる。
- (6) コーン状せん断破壊耐力として接合部の梁主

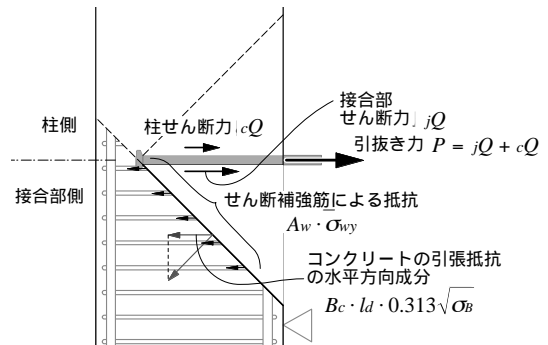


図 - 10 コーン状せん断破壊耐力式における力の釣り合い

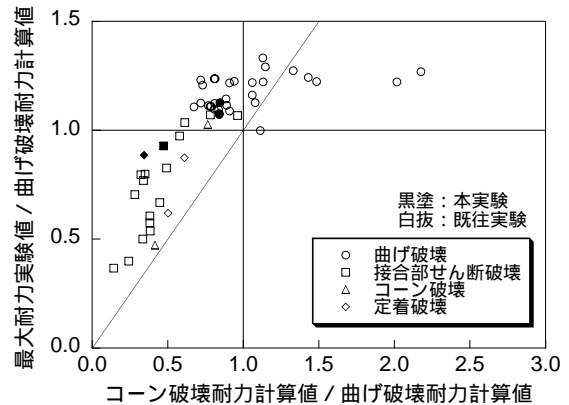


図 - 11 コーン状せん断破壊耐力と実験結果

表 - 5 検討に用いた既往実験データの概要

研究者	出典	試験体数
村上ほか	JCI論文集vol9, No1, pp1-8, 1998.1	11 体
藪内ほか	AIJ梗概集 (関東), pp257-258, 1993.9	1 体
村井ほか	AIJ梗概集 (東海), pp683-684, 1994.9	3 体
宮下ほか	AIJ梗概集 (東海), pp685-686, 1994.9	1 体
小森ほか	AIJ梗概集 (近畿), pp679-682, 1996.9	4 体
木村	JCI年次論文報告集vol21, No3, pp691-696, 1999	5 体
川崎ほか	AIJ梗概集 (北海道), pp67-70, 1995.8	3 体
奥田ほか	JCI年次論文報告集vol18, No2, pp971-976, 1996	2 体
今枝ほか	AIJ梗概集 (九州), pp541-544, 1998.9	4 体
林ほか	AIJ梗概集 (関東), pp385-386, 1997.9	1 体
永井ほか	AIJ梗概集 (関東), pp371-374, 1997.9	3 体
柴田ほか	JCI年次論文報告集vol22, No3, pp1231-1236, 2000	4 体
川勝ほか	JCI年次論文報告集vol23, No3, pp817-822, 2001	5 体

筋方向の力のつり合いに基づく耐力式を提案したが, 定着長さが長い場合の実験結果は同式による耐力を超えて別の破壊モードとなり, 対応が良好とは言えず, 今後さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 村上雅英, 藤達也, 窪田敏之: 引抜き試験によるはり主筋の機械式定着耐力の評価, コンクリート工学論文集, 第8巻第2号, pp.1-10, 1997.7
- 2) 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, 1999
- 3) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990