論文 RC 造ト形柱梁接合部部分架構の構造特性に X 形補強が及ぼす効果 に関する解析的検討

蔭山 誠太郎*1·高嶋 勇太*2·鈴木 裕介*3

要旨:本研究では,接合部内にX形補強筋を配筋したRC造ト形柱梁接合部部分架構を対象としたFEM解析 を実施し,X形補強筋が架構の構造性能に及ぼす効果について評価し,より合理的な配筋方法を検討した。 解析結果から,X形補強は接合部の変形抑制,変形性能の向上,接合部内のコンクリートの圧壊抑制に寄与 することを示した。また,本研究で検討した範囲においては,X形補強筋が効果的に機能するためには,接合 部内断面中央付近への配筋かつ柱梁強度比1.8程度以上を必要とすることが確認された。 キーワード:柱梁接合部,X形補強筋,柱梁強度比,接合部補強比,FEM

1. はじめに

柱梁強度比 2.0 未満の機械式定着工法ト形柱梁接合部 において,接合部補強比(引張側梁主筋の降伏応力に対 する接合部横補強筋の降伏応力の比^{1)など})を約 50%以上 確保する事で,架構の接合部降伏防止,設計耐力(梁曲 げ耐力)の発揮,ピーク後の耐力低下防止,高軸力下で の軸崩壊防止などに寄与することが実験的に明らかにさ れている¹⁾。しかし,高層建物における低層部の接合部 補強比は概ね 15~40%の範囲に留まっており,接合部内 の補強筋量及び強度が十分に確保されているものは少な い(図-1)。また,近年,鉄筋及びコンクリートの高強 度化により,仕口部の有効断面積は減少傾向にあり,補 強筋量の確保がますます難しくなっている。以上の改善 のため,接合部内の補強筋量を減らしながら性能を保つ ことが可能な、合理的な配筋方法が必要と考えられる。

接合部内の補強方法の提案に関する研究はこれまでに いくつか行われている。立石ら²⁾は十字形及びト形接合 部に対し,接合部入隅部からの斜めひび割れに直交する ような補強方法を提案した。実験から,十字形試験体は 斜補強筋により性能が向上したものの,ト形試験体は補 強の有無による性能の差が小さいことが分かった。一方 で,Chalioris et al.³⁾はト形接合部にX形補強を用いるこ とで,接合部内の損傷を抑制し,耐震性能が向上するこ とを実験により示している。また,Bindhu et al.⁴⁾は実験 及び解析により一定圧縮軸力が作用している架構におい ても,X形補強が耐力及び変形性能の向上に寄与するこ とを明らかにした。しかしながら,X形配筋を含む斜補 強を接合部内に適用した研究は限られており,特に,柱 梁強度比が低く接合部の変形や損傷が相対的に大きくな る架構への適用に着目した検討例は見当たらない。

そこで、本研究では、柱梁強度比が小さく梁主筋が機

*1 大阪市立大学 大学院工学研究科都市系専攻 (学生会員)

0.80 (機械式定着工法研究委員会調べ) 0.70 0.60 補強比 0.50 a 0.40 合割 0.30 掖 0.20 6階以上の柱梁接合部 0.10 ◆2~5階の柱梁接合部 0.00 4.0 0.0 1.0 2.0 3.0 5.0 6.0 7.0 柱梁強度比 図-1 既存建築物の接合部補強比 図-2 配筋概略図

械式定着されたト形柱梁接合部部分架構を対象とした FEM 解析を通して,接合部内の X 形補強がその性能に 及ぼす効果について評価し,より合理的な配筋方法を検 討する。

2. 検討する配筋の詳細

図-2 に検討する配筋を示す。詳細として,せん断補 強筋と同径の補強筋を接合部内でX形に配し,柱梁主筋 交差部付近で約45°折り曲げ,柱主筋に一定以上の長さ (梁フェイスから1.0D程度,D:柱せい)で沿わせて結 束筋で定着する。期待される補強効果として,接合部中 央に生じる斜めひび割れの拡幅とそれに伴うせん断変形 拡大の抑制,接合部内圧縮ストラット方向の圧縮力の負 担,柱主筋に並行して定着させることによる柱曲げ強度

*2 大阪市立大学 工学部建築学科 (学生会員) *3 大阪市立大学 大学院工学研究科都市系専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

試験体			T15-15	T15-40	T15-15 -4D-α	T15-15 -4D-β	
階高×(mm)スパン(mm)			2700×3700				
	幅(mm)		500×500				
母	主筋	配筋	12-D25(SD295)				
		降伏強度	412				
		(MPa)	415				
		ヤング率 (GPa)	194				
	带筋	配筋	2-D10 (SD295)	4-D10 (SD390)	2-D10 (SD295)		
		降伏強度 (MPa)	358	465	358		
		ヤング率 (GPa)	193	187	193		
	幅(mm)		450×550				
	×せい(mm)		5 D25((D.400))				
	主筋	ED 肋 除仕 益 由	5-D25(8D490)				
		(MPa)	548				
бŁ		ヤング率	188				
7428		(GPa)	100				
	あばら筋	配筋	2-D10(SD295)				
		降伏強度 (MPa)	358				
		ヤング率					
		(GPa)	193				
	有効幅(mm)		475×375				
	×有効せい(mm)		4/3/3/3				
	横補強筋	正コ 合ケ	2-D10	4-D10	2-E	D10	
		自己用力	4set	(3D390) 4set	4s	293) et	
		降伏強度	358	165	24		
接合部		(MPa)		403	330		
		ヤング率	193	187	193		
		(GPa) 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一			4 D100	SD205)	
	X形補強筋	隆伏陆庄	-	-	4-D10(3D293)	
		(MPa)	-	-	35	58	
		ヤング率 (CPa)	-	-	19	93	
コンクリート		E E 縮強度	51.1	51.6			
		(MPa)			51.1		
		ヤング率 (GPa)	33.3	33.9	33	.3	
		(0.1.4) 割裂強度 (MPa)	5.64	3.9	5.	64	

表-1 試験体諸元

(柱梁強度比)の上昇,接合部横補強筋量の緩和などが 考えられる。以降,当補強筋をX形補強筋と称す。

3. 解析概要

解析には,汎用コード Diana10.4⁵⁾ を用いて,三次元非 線形 FEM 解析を行う。

3.1 試験体概要及び解析パラメータ

表-1 に試験体諸元を示す。試験体名の数値は、順に (X 形補強筋の影響を除いた) 柱梁強度比, 接合部補強 比, X 形補強筋の本数, 及び, X 形補強筋の配筋パター ンを表す。解析対象試験体は表中の4体とし, T15-15及 び T15-40 は鈴木,前田らのによって行われた実験試験体 で,接合部降伏型のプロトタイプ試験体及びこれに対し 接合部横補強筋を増強した試験体である。なお, T15-15 は, 既報 [¬]において実験と比較し解析モデルの妥当性を 検証済みである。T15-15-4D-*i* (*i* = α,β) は T15-15 に本 研究で提案する X 形補強筋を配した試験体である。ここ

表-2 各種パラメータ

試験体			T15-15	T15-40	T15-15 -4D-α	T15-15 -4D-β	
柱梁強度比	. म	X (無)	1.77				
	II.	X (有)		-	1.84		
	占	X (無)	1.64				
	貝	X (有)		-	1.72		
接合部 補強比 (%)		横	14.7	38.2	14.7		
		Х	-	-	2.5		
		合計	14.7	38.2	17.1		
橫補強 筋比 (%)		横	0.248	0.496	0.248		
		Х	-	-	0.124		
		合計	0.248	0.496	0.372		
β_j	正	X (無)	0.909	1.024	0.909		
		X (有)	-		0.934		
	負	X (無)	0.883	0.999	0.883		
		v (右)			0.0	11	





で、T15-15-4D-βはT15-15-4D-αにおける断面中央側と外 側のX形補強筋の位置を入れ替えたものである(図-3)。

表-2 に解析パラメータとなる主要な設計値を示す。 柱梁強度比は,梁せん断力が影響し下柱に引張軸力が作 用する加力方向(負載荷)時に 1.5 程度となるよう設計 されている。X 形補強筋を適用した場合,柱危険断面の 主筋量が増えるため,これを考慮した値も算出している。

X 形補強筋を配した試験体の接合部補強比は,文献¹⁾ で定義される式に X 形補強筋の引張力を累加すること で,図-4 のように定義した。なお,X 形補強では2本 の補強筋がそれぞれ圧縮力と引張力を負担するが(後述 の図-16 参照),X 形補強の補強比として考慮するのは 引張側の補強筋のみとした。

横補強筋比 p_{jw} は下式(1)によって求めた⁸⁾。

$$p_{jw} = \sum A_{jw} / (b_c \cdot j) \tag{1}$$

ここで、 b_c は柱幅、jは梁の上下の主筋の重心間距離、 $\sum A_{jw}$ はこの区間の補強筋の断面積の総和である。なお、 X 形補強筋の鉛直面の投影面積は楕円となるが、公称断



面積を用いて横補強筋比を算出した。接合部降伏による 架構の強度低下率 β_f⁹⁾は、柱梁強度比及び接合部補強比 と同様に、X 形補強筋の影響を考慮した値も併記する。

3.2 要素分割及び境界条件

要素分割及び境界条件を図-5 に示す。コンクリート は、六面体ソリッド要素とし、接合部周辺の要素分割を 50mm×55mmとした。面外方向において、梁では一様に 50mmで分割,柱では柱幅と梁幅の差の25mmで分割, 残りを50mmで分割する。境界条件は、柱脚部の中央節 点をピン支持,柱頭部の中央節点を鉛直方向に可動なピ ンローラー支持,梁端の中央節点を水辺方向に可動なピ ンローラー支持とした。載荷方法として、柱頭部に片側 単調載荷として層間変形角 R=±5.0%に至るまで強制変位 を与え、収束判定条件は、内部エネルギーノルム比が 0.01%以下、あるいは最大反復回数50回とした。

3.3 材料モデル

コンクリートには回転ひび割れモデルを用いた。図-6 に圧縮側及び引張側それぞれの構成則を示す。圧縮側 は Eurocode (EN1992-1-2)¹⁰⁾を用い,引張側は上昇域を 線形弾性,下降域を大岡らの提案式¹¹⁾により評価した。 拘束コンクリートの特性については Hsieh-Ting-Chen 破 壊曲面モデル¹²⁾に従い,多軸応力の影響を考慮した。ま た鉄筋の材料構成則は bi-linear とし,降伏後の剛性は初 期剛性の 1/100 とした。柱,梁主筋は付着滑り埋め込み 鉄筋要素でコンクリートとの付着を CEB-FIP モデル¹³⁾

(図-7参照)でモデル化し、せん断補強筋及び X 形補 強筋は完全付着の埋め込み鉄筋要素とした。なお、各種 強度には実験^のの材料強度試験結果を用いた。

4. 解析結果

4.1 破壊性状

図-8にT15-15及びT15-15-4D-βのR=+3.0%における 最大主ひずみ図を示す。図-8では橙・赤色で表記され ている要素において最大主ひずみが2.0%を上回り,ひび 割れ幅が1.0~1.5mmに達したことを表す。また,図中の 破線は各図の切断位置を示す。各試験体において接合部



内及び接合部の引張側の入隅に損傷が生じたが、T15-40 及び T15-15-4D-β においては接合部内の損傷が比較的小 さかった。これは、接合部中央付近に配筋された補強筋 によって軸組構面近傍における接合部内の斜めひび割れ

4.2 荷重変形関係

の拡大が抑制されたためと考えられる。

図-9 に各試験体の荷重変形関係を示す。最大耐力は 正載荷側で、T15-15 及びT15-15-4D-α が梁曲げ耐力計算 値の96%程度、T15-40 及びT15-15-4D-β が梁曲げ耐力に 達した。また、負載荷側では、柱梁強度比が小さいこと が影響しすべての試験体が梁曲げ耐力に至らなかった。 正載荷側において、T15-15-4D-α はT15-15 と同程度の推 移を示し、補強の明確な効果が見られない。一方、引張



側の X 形補強筋が面外方向の中央側に配筋されている T15-15-4D-β は, R=+3%程度まで T15-40 と同程度の推移 を示し, R=+3.7%で最大耐力に達した。負載荷側において, T15-15-4D-α は R=-3%時に各試験体の中で最も高い値を 示すが, その後耐力低下を生じT15-40よりも低く推移し た。T15-15-4D-β は, T15-15よりも少し高い値で推移す るが, 顕著な差は確認されなかった。

4.3 接合部せん断変形角の推移

図-10に接合部せん断変形角一層間変形角関係を,図 -11に接合部せん断変形角概念図を示す。正載荷側にお いて、T15-15-4D-αはT15-15との違いがほとんど見られ ない。一方でT15-15-4D-βは最も低く推移しており,横 補強筋比が大きいT15-40と同等以上に接合部の変形が 抑制されている。柱梁強度比が低い負載荷側においては, 補強を施したいずれの試験体もT15-15より接合部の変 形が抑制されているものの,正載荷側に比べてその差は 小さい。

4.4 強度低下率 β_jに対する構造性能の比較

図-12に接合部降伏による強度低下率β⁹に対する耐 力低下率及び各変形性能の比較,表-3にその相関係数 を示す。耐力低下率は,FEM解析による最大耐力/梁曲 げ終局時計算耐力として算出した。塑性率は,荷重変形 関係において,耐力が最大時の95%に低下したときの変 形角R₉₅を塑性率1の時の変形角で除した値としている。 なお,いずれかの補強筋が初期降伏した点と原点を結ぶ 直線と最大耐力点を通る横軸との平行線の交点の層間変 形角を塑性率1として算出している。X形補強筋の効果 を評価するにあたり,図-12(b),(c),(d)において視覚的 に相関から外れている正載荷側のT15-15-4D-βを外れ値



図-10 接合部せん断変形角-層間変形角関係



とした相関係数も各図で算出した。

外れ値を除外した相関係数を見ると,同表(a),(b),(c) に正の相関があることが分かる。また,同表(d)はT15-40 が低い値をとるために負の相関がみられるが,これは接 合部補強比を増すことで鉄筋降伏(塑性率 1)時の変形 角が上昇するためである。一方で,正載荷側のT15-15-4D-β は各変形性能で相関から外れて大きな値をとるた め,T15-15-4D-β を含んだ相関係数は小さくなる。したが って,T15-15-4D-β は他の配筋方法よりも補強効率が高 いと認められる。また,横補強筋比が大きいT15-40 と同 等以上の変形性能を持つことが確認された。

5.X 形補強筋の影響分析

各試験体とも負載荷側において,荷重変形関係及び接 合部のせん断変形角推移に顕著な違いは見られなかった ため,本章では正載荷側を中心に考察する。

5.1 接合部内コンクリートの応力状態

図-13 に層間変形角 R=+1.5, 2.0, 3.0%時の接合部対角 断面におけるコンクリート応力度分布を示す。応力は下 向きを圧縮として表記し,図中の数値は分布内の最大値 を表している。また,断面に対して垂直方向の応力は図 -14 の式を用いて算出した。

図中の応力度分布は文献¹⁴⁾で図-15 のように仮定さ れる応力とよく対応している。T15-15 及びT15-15-4D-α は R=+1.5%, T15-40 は R=+2.0%で圧縮強度に近い値を示 し,その後は応力が低下する。一方でT15-15-4D-β は, R=+3.0%まで応力は漸増し高い値を維持している。圧縮 強度に近い値を示した後の応力低下はコンクリートの圧 壊によって生じており,T15-15-4D-β の X 形補強筋はそ の圧壊抑制に効果的に寄与していると考えられる。これ は,接合部中央付近に配筋された X 形補強筋によって軸 組構面近傍における接合部内の斜めひび割れの拡大が抑 制されたことに起因すると考えられる。

5.2 X 形補強筋の応力状態

図-16 に正載荷時の X 形補強筋の応力状態及び軸方 向応力度分布を示す。接合部内に対角線上に配筋された X 形補強筋はそれぞれ圧縮,引張力を負担する。圧縮側 は R=+1.0%程度から,引張側は R=+1.5%程度から応力を 負担しており,柱の中央付近でその応力は大きい傾向に ある。一方で T15-15-4D-β の圧縮側は中央付近の応力が R=+1.5%以降で低下しているが,これは圧縮ストラット 上のコンクリートの負担応力が漸増するためである。

5.3 X 形補強筋の効果的機能条件

これまでの結果において、T15-15-4D-β が正載荷側に おいて高い性能を示していたことから、X 形補強筋は引



張側となる鉄筋が接合部内の断面中央に近い方が効果的 に働くと思われる。これは、軸組構面近傍における接合 部内の斜めひび割れの拡大を抑制し、コンクリートの圧 縮応力の保持に寄与するためと考えられる。しかし、T15-15-4D-αの負載荷側においては、引張側が内側にあるに も関わらず顕著な効果は確認されなかった。これは、柱 梁強度比が小さい場合、架構の性能に対するそれの影響 度が比較的大きくなり、X 形補強筋の効果が表れにくい ためと考えられる。ゆえに本解析の範囲においては、X 形補強筋が効果的に働くためには面外方向における断面



図-12 β_iに対する各構造性能の比較

表-3 各構造性能とβ_jの相関係数

	相関係数		
	全てのデータ	外れ値の除外	
(a) 耐力低下率- β_j 関係	0.66	0.77	
(b) 最大荷重時変形角-β _j 関係	0.30	0.69	
(c) <i>R</i> ₉₅ -β _j 関係	0.23	0.64	
(d) 塑性率-β _j 関係	-0.46	-0.65	





コンクリートの応力 14)



中心付近への配筋かつ柱梁強度比 1.8 程度以上とする必要があると考えられる。

6. まとめ

本研究では,FEM 解析を通し,RC 造ト形柱梁接合部 に対する X 形補強筋の効果について以下の知見を得た。

- (1) 接合部中央付近に配筋された X 形補強筋によって 軸組構面近傍における接合部内の斜めひび割れの 拡大が抑制されることが確認された。
- (2) 各変形性能は β_iとの相関が確認されたが,正載荷側の T15-15-4D-β は相関から外れて大きな値をとり, X 形補強が効果的に働いていることが確認された。
- (3) 正載荷側のT15-15-4D-βは、接合部の変形抑制及び 各変形性能において、横補強筋比が大きいT15-40 に比べて同等以上の性能を持つことが確認された。
- (4) X 形補強はコンクリートの圧壊を抑制し, 圧縮応力 の保持に寄与することが確認された。
- (5)本解析の範囲においては、X形補強筋が効果的に機能するために、柱中心付近への配筋かつ柱梁強度比 1.8程度以上を必要とすることが確認された。

謝辞

本研究は,(一社)ニューテック研究会の「機械式定着工 法研究委員会」の研究の一部として実施したものである。 ここに記して,関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 村上久志,晋沂雄,鈴木裕介,前田匡樹:接合部横 補強筋及び軸力がRC造ト形柱梁接合部の構造性能 に及ぼす影響に関する実験的研究,コンクリート工 学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.205-210, 2017
- 2) 立石眞男,石橋一彦:柱梁接合部の破壊形式と補強 方法の有効性に関する実験的研究,コンクリート工 学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.673-678, 1999
- C. E. Chalioris, M. J. Favvata, C. G. Karayannis: Reinforced concrete beam-column joints with crossed

inclined bars under cyclic deformations, Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.37, No.6, pp.881-897, 2008

- K. R. Bindhu, K. P. Jaya: Strength and behavior of exterior beam column joints with diagonal cross bracing bars, Asian journal of civil engineering, Vol.11, No.3, pp.397-410, 2010
- DIANA BV.: DIANA Finite Element Analysis User's Manual Release 10.4, 2020
- 6) 鈴木裕介,太田哲朗,伊藤衛,足立智弘,迫田丈志, 前田匡樹: RC 造ト形柱梁接合部の構造性能に及ぼ す横補強筋及び軸力の影響,日本建築学会大会学術 講演梗概集, pp.361-366, 2014.9
- 7) 高野恭幸,鈴木裕介,谷口与史也:接合部補強比が 異なるRC造ト形柱梁接合部の構造性能比較に関す るFEM 解析,日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV,pp.95-96,2019
- 8) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証
 型耐震設計指針・同解説, 1999
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造保有水平耐力 計算基準(案)・同解説,2016
- Eurocode2: Design of concrete Structures, Part 1-2, General rules-structural fire design, The European Standard EN1992-1-2, 2004
- 大岡督尚,橘高義典,渡部憲:コンクリートの破壊 パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.65, No.529, pp.1-6, 2000
- S. S. Hsieh, E. C. Ting, W. F. Chen: A plastic-fracture model for concrete, International Journal of Solids and Structures, Vol.18, No.3, pp.181-197, 1982
- CEB: CEB-FIP MODEL CODE 2010 DESIGN CODE, Tomas Telford Service Ltd.
- 14) 楠原文雄,塩原等:鉄筋コンクリート造ト形柱梁接
 合部の終局モーメント算定法,日本建築学会構造系
 論文集, Vol.78, No.693, pp.1949-1958, 2013