

論文 超高強度材料を用いた外柱梁接合部に関する実験的研究

真田 暁子^{*1}・丸田 誠^{*2}

要旨：超高強度材料を用いた外柱梁接合部の接合部せん断性状及び履歴性状を把握するため、圧縮強度 $f_c=170\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた外柱梁接合部の水平加力実験を行った。実験因子は軸力、梁主筋量とした。接合部のせん断ひび割れ強度、せん断強度は既往の耐力評価式を用いて下限値を評価できた。軸力の違いにより最大強度後の変形能は全く異なり、変動軸力を与えた試験体では接合部で軸耐力を保持することが出来なくなり、急激に耐力が低下した。これは高変動軸力による接合部損傷の累加と、引張軸力下の圧縮側梁主筋定着プレートによる押抜きに起因すると推測される。

キーワード：柱梁接合部、超高強度材料、変動軸力、定着プレート

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート建物の更なる高層化に伴い、下層階 RC 柱及び柱梁接合部には設計基準強度が 120N/mm^2 を越えるコンクリートが使われ始めている。接合部のせん断強度に関しては、総プロ「NewRC」¹⁾で高強度材料に適用できる式も提案されている。

高強度鉄筋コンクリート柱梁接合部に関する既往の研究は、一定軸力下の内柱梁接合部の履歴特性を把握するためのものが多く、変動軸力を受ける外柱梁接合部（以後、ト形接合部）の履歴特性及び接合部のせん断性状についてはほとんど検討されていない。そこで、柱に高強度コンクリート ($f_c=150\text{N/mm}^2$, f_c : コンクリート設計基準強度) を用い、高圧縮軸力、高引張軸力及び高変動軸力を受けるト形接合部の接合部せん断実験を実施したので報告する。

2. 試験体及び実験概要

試験体は実物の約 1/3 縮尺のト形接合部 6 体とした。試験体一覧を表 - 1 に示す。代表的な試験体の配筋図を図 - 1 に示す。表 - 1 中に、各試験体の実験時の破壊形式を併せて示す。

試験体の柱断面は $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、M/QD は 1.5、梁断面は $220\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、M/QD は 3.0 とした。梁主筋は全て機械式定着板²⁾を用いて接合部内に定着させた。定着長さは $3/4 D_c$ (D_c : 柱せい) とした。

実験因子は、軸力（一定軸力：TC 試験体、変動軸力：TV 試験体）及び 梁主筋量とした。試験体の予想破壊形式は、TC、TV-1 試験体で接合部破壊（J 破壊）、TV-2 試験体で梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊（BJ 破壊）、TV-3 試験体で

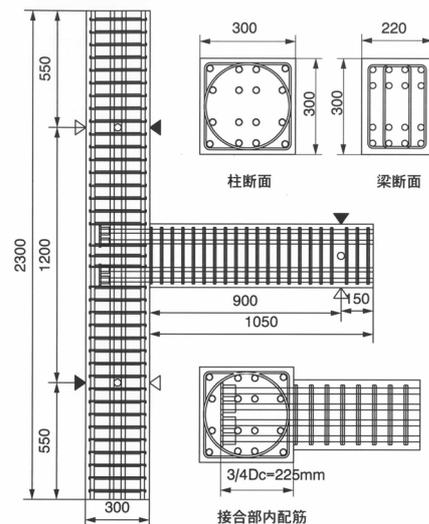


図 - 1 試験体配筋図

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築構造グループ 研究員 修士(工学)(正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築構造グループ 上席研究員 博士(工学)(正会員)

表 - 1 試験体一覧

試験体名	軸力 (kN)		柱			梁		接合部	破壊形式			
			主筋	芯筋	補強筋	主筋	補強筋	補強筋	想定	実験		
TC-1	0.23cNu	3734	12-D19 SD685	-	4- 6.4@60 SBPR1275	8-D19 SD685	4- 6.4@50 SBPR1275	4- 6.4 SBPR1275 Pwh=0.52%	J	B		
TC-2	0	0								BJ		
TC-3	0.7tNu	-2202								J		
TV-1	0.75tNu	-2654	14-D19 SD685	4-D19 SD685		8-D19 SD490			BJ	BJ		
TV-2	~	~									6-D19 SD490	B
TV-3	0.7cNu	9904										

Pwh: 接合部横補強筋比 Pwh=接合部内横補強筋総断面積/(柱幅bc・梁最外主筋間距離d_b)

梁曲げ降伏破壊 (B 破壊) である。TC, TV-1 試験体は, 梁主筋に高強度鉄筋 D19 (SD685) を用いた。TV-2, TV-3 試験体は, 梁コンクリートに Fc60, 梁主筋に D19 (SD490) を用いた。

表 - 2 に鉄筋, コンクリートの材料強度一覧を示す。コンクリートは, Fc150N/mm² となるように調合を計画したが, 実験時に $f_{cB}=175 \sim 179N/mm^2$ となった。

TC 試験体は一定軸力下 (0.23cNu, 0, 0.7tNu) の実験を行った。TC-1 試験体には, 接合部せん断ひび割れ強度計算値と接合部せん断強度計算値が同等となるように 0.23cNu (cNu: 柱の圧縮軸耐力 $cNu=0.85Ac \cdot F_c + A_g \cdot f_y$, A_g : 全主筋断面積, f_y : 主筋降伏強度=685N/mm², Ac : コンクリート断面積) の圧縮軸力を与えた。TC-3 試験体には, 梁曲げ耐力計算値と柱曲げ耐力計算値が同等となるように 0.7tNu (tNu: 柱の引張軸耐力 $tNu=A_g \cdot f_y$) の引張軸力を与えた。

TV 試験体の代表的な柱軸力と梁端荷重の載荷ルールを図 - 2 に示す。図中には柱の曲げ強度を梁端荷重に変換したものを併せて示す。TV 試験体は柱に長期軸力 (0.2cNu) を作用させた後, 梁端荷重に比例した変動軸力を与えた。軸力は図 - 2 中の太実線のルールで, 圧縮側では 0.7cNu まで, 引張側では 0.75tNu まで変動させ, それ以降は一定軸力を維持させた。

加力は, 上下端をピン支持した柱に変動軸力を与え, 変形制御で梁端に正負交番繰返し载荷を行った。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

図 - 3 に各試験体の梁端荷重 - 梁端変形関係を示す。TC-3 試験体を除く全ての試験体で梁曲げ降伏が先行したが, その後の変形能及び破壊形式は, 軸力と接合部へのせん断入力量によって異なった。一定軸力を受ける TC 試験体では, 層間変形角 R=12% まで顕著な強度低下は見られなかった。圧縮軸力が大きな試験体ほど剛性が高く, 履歴面積, 残留変形が大きくなる傾向が見られた。高引張軸力を受ける TC-3 試験体では,

表 - 2 (1) 鉄筋強度一覧

径	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
U6.4	SBPR1275	1463	1483	207	10.8
D19	SD685	784	951	196	11.3
D19	SD490	539	679	198	18.4

*: 0.1% オフセット値

表 - 2 (2) コンクリート強度一覧

試験体名	部位	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
TC-1 TC-2	柱 梁	179		45.4	0.227
TC-3 TV-1	柱 梁	175	6.11	46.9	0.228
TV-2 TV-3	柱 梁	176	7.55	45.9	0.227
TV-2 TV-3	梁	56.3	4.17	30.8	0.177

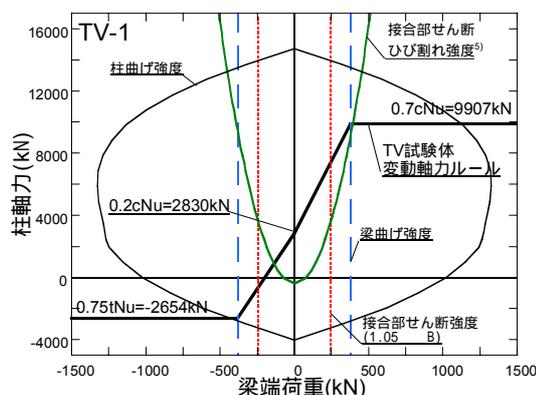


図 - 2 柱軸力-梁端荷重関係

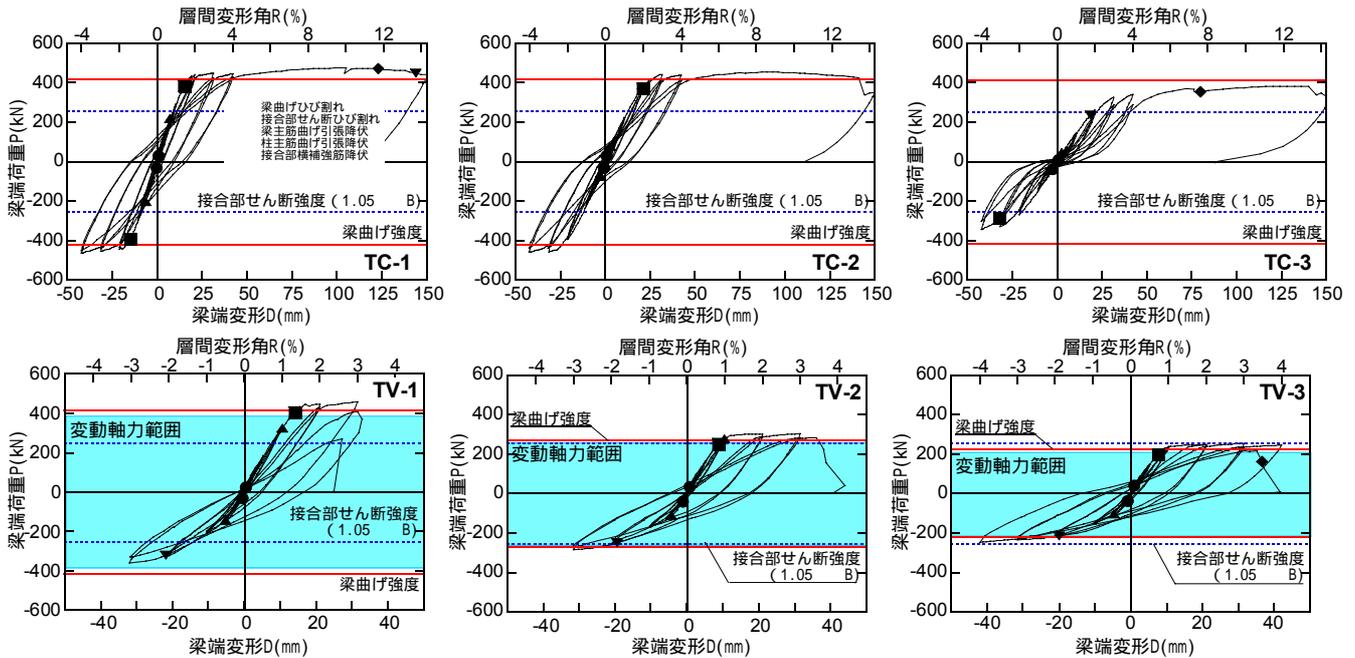


図 - 3 梁端荷重 - 層間変形角関係

梁曲げ耐力に達しなかった。

変動軸力を受ける TV 試験体では、変動軸力により接合部の損傷が進行するため、一定軸力の TC 試験体より変形能が著しく低下した。接合部への入力せん断力が小さいほど、変形能は向上した。最終的な破壊は、接合部付近の柱主筋の座屈、接合部内の横補強筋の破断を伴う接合部付近の軸耐力の低下に起因したため、強度低下時の変形が最大経験変形を下回る場合もあった。

3.2 最終破壊状況

写真 - 1 に代表的な試験体の最終破壊状況を示す。一定軸力下の TC-1 試験体では R=14% の大変形まで载荷を行ったにもかかわらず、接合部の損傷は R=3% 以降の大変形でカバーコンクリート

が剥落しただけであった。写真 - 1 中に、TV-1 試験体の R=3% の接合部ひび割れ状況写真を示す。TV-1 試験体では最終的に梁の取り付けられない接合部外端のカバーコンクリートが剥落し、接合部内の横補強筋が破断し、梁主筋直下の主筋が座屈して変形角 R=3% に向かう途中で接合部の軸耐力が低下して脆性的な破壊が起こった。

3.3 変形分離

試験体への導入軸力の違いにより、全体変形に占める柱、梁、接合部の変形割合がどう変化するかを調べるため、変形分離を行った。ここで、全体変形とは接合部変形、柱変形、梁変形を足し合わせたものとし、個々の変形は接合部四隅に埋め込んだ計測ボルトの移動量から得られる接合部及び柱の回転角に基づき算出した。接合部せん断変形計測用の変形図 - 4 に TC 試験体と、早期に強度低下を起こした TV-1 試験体の変形割合推移を、図 - 5 に TV-1 試験体の変形割合と軸力との関係を示す。

一定軸力下の TC 試験体では、層間変形角が R=1% を越えると各変形の割合は一定となった。TC-1 から TC-3 試験体に向かうにつれて、接合部及び柱の変形割合は増加した。TC-3 試験体は接合部変形割合が大きく、破壊状況も鑑みて J



写真 - 1 最終破壊状況

破壊と判断した。変動軸力下の TV-1 試験体の変形割合は、圧縮軸力下では梁変形が大部分を占めるが、引張軸力下では変形増大に伴い接合部及び柱の変形割合が増大した。

図 - 5 のピーク時の変形割合と軸力との関係から、接合部及び柱の変形割合は軸力が $0.2cNu$ より大きくなると一定となり、軸力が $0.2cNu$ より小さくなると増加し始めることが分かる。TC-1 試験体と圧縮軸力下の TV-1 試験体の変形割合は同程度となるにもかかわらず、変形能に差が出た理由の一つに、TV-1 試験体では引張軸力を経験した事が挙げられる。引張軸力下では柱及び接合部全域に引張ひび割れが入り剛性低下し、柱及び接合部で変形が進行しやすくなる。引張軸力下で大きな接合部変形が生じた場合、接合部の損傷が進み、次の繰返し圧縮軸力下での接合部耐力低下に繋がる事が分かった。

3.4 等価粘性減衰定数

実験因子がエネルギー吸収能力に及ぼす影響を検討するため、等価粘性減衰定数を算出した。図 - 6 に $0.2cNu$ の軸力を受ける TC-1 試験体と、TV-1 試験体、通常の曲げ降伏型のト形骨組を想定した TV-3 試験体の定常ループから求めた等価粘性減衰定数（以降、 heq ）を示す。

梁主筋量が等しい TC-1 と TV-1 では、導入軸力の違いによる heq の差はなかった。TV-3 試験体では、圧縮軸力下の heq と引張軸力下の heq との間に顕著な差は見られなかった。同一ルールの変動軸力を与えた TV-1 と TV-3 試験体を比較すると、梁曲げ降伏後の $R=1\%$ 以降は梁主筋量が少ない TV-3 試験体が TV-1 試験体の heq を上回った。

4. 実験結果の検討

4.1 接合部せん断強度

実験値と計算値との比較一覧を表 - 3 に、ト形接合部の接合部せん断応力度-コンクリート圧縮強度関係を図 - 7 に示す。接合部せん断ひび割れ強度実験値と主応力度式による接合部せん断ひび割れ強度計算値、最大強度と曲げ解析に

よる梁曲げ強度、AIJ-靱性保証指針式及び 1.05 B 式による接合部せん断強度計算値との比較を行った。ここで 1.05 B 式は十字形接合部せん断強度 $5 B^3 [kg/cm^2]$ に SRC 規準⁴⁾ によるト形接合部強度低減係数 $2/3$ を乗じて求めた。接合部せん断応力度算出の際に、梁の応力中心間距離 d_B を、AIJ-靱性指針式⁵⁾ では $7/8d$ (d : 有効せい、圧縮縁から引張鉄筋の重心位置までの距離)、1.05 B 式では最外縁鉄筋間距離 (d_B)

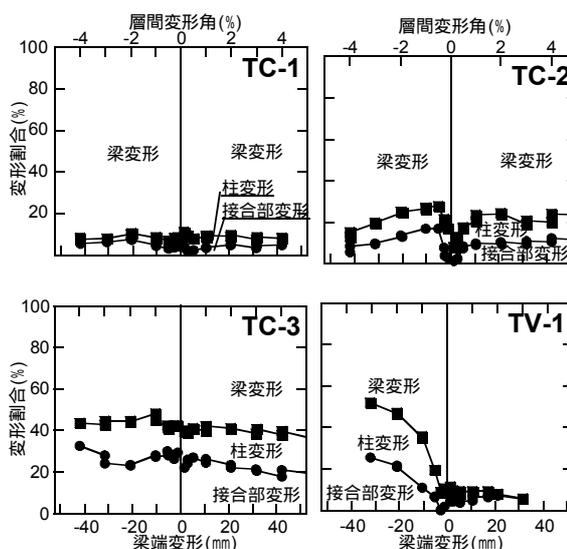


図 - 4 変形割合-梁端変形関係

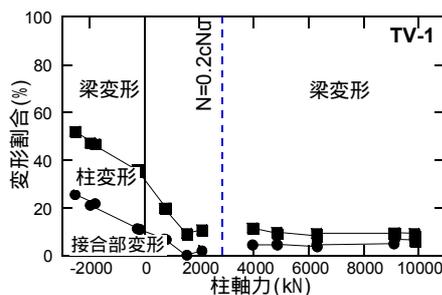


図 - 5 変形割合-軸力関係

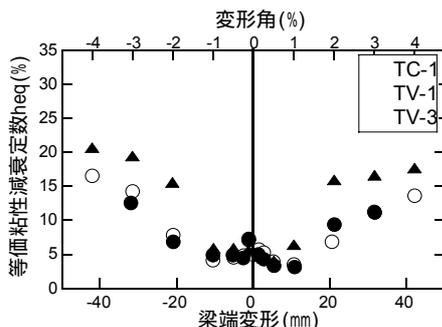


図 - 6 等価粘性減衰定数

と呼ぶ)を応力中心間距離とした。また、接合部面積 A_j は定着筋の水平長さ $D_j=3/4D_c$ に接合部有効幅 $t_p^{5)}$ を乗じたものとし、接合部せん断応力を算出した。図-7中には既往の文献^{5),7),8)}から得た最大強度時の接合部せん断応力-コンクリート圧縮強度関係も併せて示す。

梁の応力中心間距離 d_B を d_B' として、主応力度式⁵⁾により算定した接合部せん断ひび割れ強度計算値 $c_{Q_{JC}}$ は、TC-2試験体を除き全ての試験体で計算値が実験値を上回った。実験では、TC-3を除くいずれの試験体でも梁曲げ強度で最大強度が決まり、最大強度は曲げ解析⁶⁾による梁曲げ強度計算値 Q_{BFIB} で精度良く評価できた。破壊形式が接合部せん断破壊型となったTC-3試験体では、接合部せん断応力の実験値は 1.05_B による計算値を用いて安全側に評価できた。破壊形式がB,BJとなったTC-1,TC-2,TV-1,TV-2試験体でも接合部せん断応力の実験値は 1.05_B 式による接合部せん断強度計算値を大きく上回り、安全側の評価となった。

4.2 梁主筋応力分布

図-8に $R=\pm 2\%$ 時のTV試験体の梁主筋応力分布を示す。主筋応力は、完全弾塑性を仮定し、梁主筋ひずみ s から推定した。導入軸力の違いにより、梁主筋の応力分布は大きく異なった。引張側梁主筋の応力分布を比較すると、圧縮軸力下では接合部内の梁主筋の付着性状が健全であるのに対し、引張軸力下では全域で梁主筋応力に差が少ないことから、梁主筋の引張反力の大部分は定着プレートの支圧力で負担されたと考えられる。引張軸力下の圧縮側梁主筋応力分布によると、定着プレート直前位置(図-8中、位置b)の主筋応力は圧縮の値を示し、定着プレートに押抜き力が入力していることがわかる。

図-9にTV試験体の定着プレート直前位置(位置a,b)の主筋応力 T の推移を示す。図-9中に各種合成構造設計指針式⁹⁾から算出した梁一段筋の定着プレートの押抜き力によるコンクリートコーン破壊強度計算値を併せて示す。

計算にあたり、コンクリートの有効水平投影面積 A_c は群効果を考慮した面積とした。圧縮軸力下では、変形が進むにつれて位置aの主筋応力 T は引張側に推移した。引張軸力下でも $R=\pm 1\%$ 以下では、位置bの鉄筋応力 T は変形が進むにつれて引張側に推移したが、 $R=-1\%$ を超えると応力が引張から圧縮に転じ、定着プレートに押抜き力が発生した。また、 $R=3\%$ では鉄筋応力 T がコンクリートコーン破壊強度を上回り、定着プレートによる押抜き力がカバーコンクリート剥落の要因となりうることを確認した。

表-3 計算値比較一覧

試験体	実験値 (kN)		計算値 (kN) (実験値/計算値)			
	EQ_{JC} [1]	Q_{BMAX} [2]	$c_{Q_{JC}}$ [3]	Q_{BFIB} [4]	$Q_{1.05_B}$ [5]	Q_{J-AIJ} [6]
TC-1	220	474	253 (0.87)	420 (1.13)	256 (1.85)	294 (1.61)
TC-2	77.1	454	76.6 (1.01)	420 (1.08)	256 (1.77)	294 (1.54)
TC-3	-	383	-	415 (0.92)	250 (1.52)	285 (1.34)
TV-1	325	458	396 (0.82)	415 (1.10)	250 (1.82)	285 (1.61)
TV-2	279	303	399 (0.70)	271 (1.12)	254 (1.19)	290 (1.04)
TV-3	201	253	399 (0.50)	222 (1.14)	254 (0.99)	303 (0.83)

[1]接合部せん断ひび割れ強度、[2]最大強度、[3]主応力度式⁵⁾による接合部せん断ひび割れ強度($t=0.31_B$ とした)、[4]曲げ解析³⁾による梁曲げ強度、[5]接合部せん断応力を 1.05_B とした接合部せん断強度、[6]AIJ-靱性指針⁵⁾による接合部せん断強度

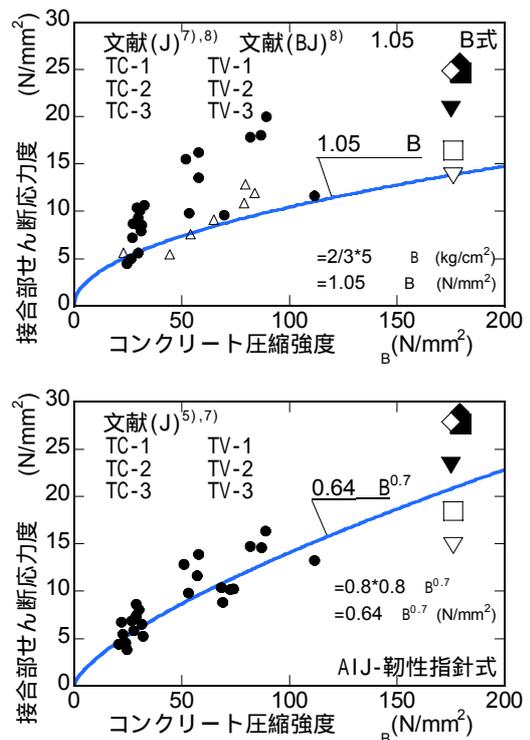


図-7 接合部せん断強度

4.3 破壊要因の推察

導入軸力の違いによって、TC 試験体と TV 試験体との破壊形式は大きく異なった。この破壊形式の違いは、高変動軸力を受けることに起因すると考えられる。高変動軸力を受けるト形接合部は、引張軸力下でせん断ひび割れによりコンクリートが劣化し、高圧縮軸力下でカバーコンクリートが剥落して損傷が増大した。また、引張軸力下では定着プレートに押抜き力が発生し、カバーコンクリートのコーン破壊を誘発したことも接合部の損傷が増大した一因だと考え

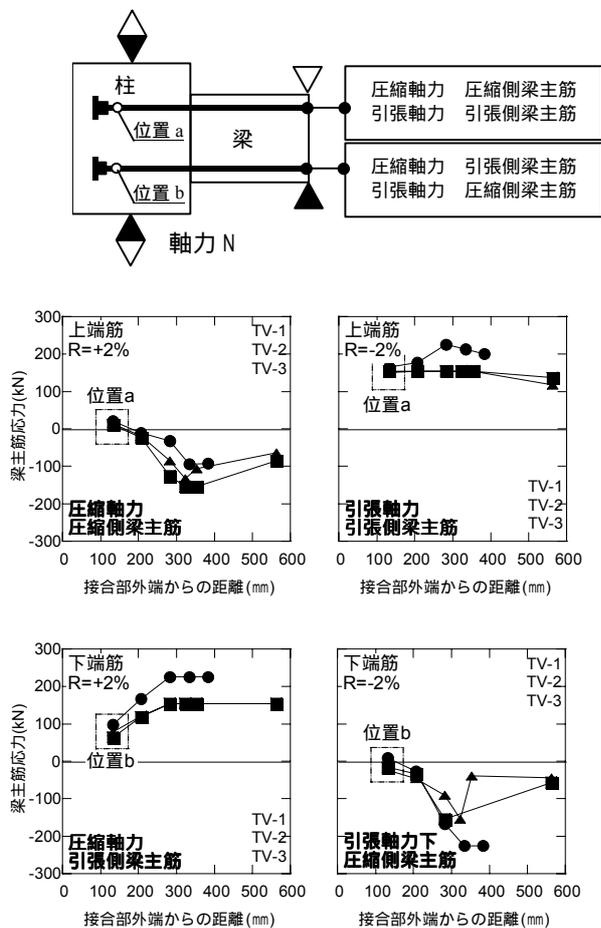


図 - 8 TV 試験体梁主筋ひずみ分布

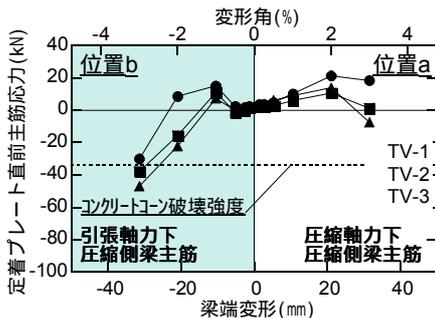


図 - 9 定着プレート直前鉄筋応力

られる。TV 試験体で破壊後に座屈が観察された柱主筋は、引張軸力下で圧縮側となる梁主筋の直下の鉄筋であり、定着プレートによる押抜き力が発生した位置と一致する（写真-1 参照）。柱主筋の座屈は定着プレートの押抜き力によって引き起こされた可能性もある。

5.まとめ

高強度材料を用いた外柱梁接合部のせん断実験を行い、下記の知見を得た。

- (1) 一定軸力を受ける TC 試験体と変動軸力を受ける TV 試験体では、破壊形式、変形能、変形成分等の実験結果が全く異なる結果となった。変動軸力を受ける TV 試験体では、接合部がより厳しい応力下に置かれることが分かった。
- (2) 接合部せん断強度計算式 1.05_B 式による計算値は、B, BJ 破壊型試験体を含めた実験値を安全側に評価できた。
- (3) 高変動軸力を受けるト形骨組では、高引張軸力下での引張ひび割れの影響で接合部の損傷が大きくなり、高圧縮軸力との繰り返しで更に劣化が進んだ。梁主筋端部の機械式定着プレートを外に押し抜き、その後の圧縮軸力作用時に脆性的に破壊することが分かった。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：New RC 研究開発概要報告書，1993.5.
- 2) 加藤友康他：新考案定着金物を用いた高層 RC 柱梁接合部内の梁主筋定着法に関する実験的研究，鹿島技術研究所年報第 45 号，1997.12，pp.75-pp.80
- 3) 加藤友康他：高強度材料を用いた超高層鉄筋コンクリート造柱・梁接合部の構造特性評価，鹿島技術研究所年報第 42 号，1994.10，pp.157-pp.162
- 4) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1987.
- 5) 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.
- 6) 鈴木紀雄他：ファイバーモデルによる RC 短柱十字形部分骨組の解析，コンクリート工学年次論文報告集 15-2，1993，pp.577-582.
- 7) 岩岡信一他：超高強度コンクリート構造の柱梁接合部実験，日本建築学会学術講演梗概集，pp.489-490，2003.9
- 8) 寺岡勝他：RC 造外柱・柱梁接合部の終局強度に関する調査及び検討，日本建築学会学術講演梗概集，構造，pp.489-490，2003.9
- 9) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，1985