

論文 変動軸力を受ける鉄筋コンクリート造外柱梁接合部の力学的性状に関する実験的研究

山田 高史*1・中西 三和*2・安達 洋*3・青山 博之*4

要旨: 鉄筋コンクリート造建物が高層化されるに伴い、下層部外柱には転倒モーメントによって大きな軸力変動が起こり、高圧縮軸力から引張軸力まで作用する。この軸力変動は柱梁接合部とっても無視できないものと考えられる。本研究は、変動軸力下での接合部挙動を実験的に調べたものである。実験では、鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部を試験体とし、引張軸力から高圧縮軸力まで軸力を変動させた正負交番繰り返し載荷実験を行い、作用軸力が接合部挙動に及ぼす影響を調べた。

キーワード: 鉄筋コンクリート、ト形柱梁接合部、変動軸力、接合部主歪

1. はじめに

高層鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物の下層部外柱は、地震時に転倒モーメントにより大きな軸力の変動を受ける。その変動幅は、高圧縮軸力から時には引張軸力にまで至る。当然、柱梁接合部にもこの変動する軸力が作用することになるが、これまで変動軸力が作用する柱梁接合部に関する研究¹⁾は少なく、軸力の変動が接合部挙動に及ぼす影響は明確にされていない。

本研究は、作用軸力を主な実験因子としたRC造ト形柱梁接合部の正負交番繰り返し載荷実験を行い、軸力が接合部挙動に及ぼす影響を調べることを目的とする。

2. 実験概要

2-1 試験体の設計

試験体は、高層RC造建物の下層部外柱梁接合部を模擬した、縮尺約1/3のRC造ト形柱梁接合部である。想定した構造物と試験体の応力状態を図-1に示したが、各部材の中央に反曲点があると仮定している。試験体形状を図-2

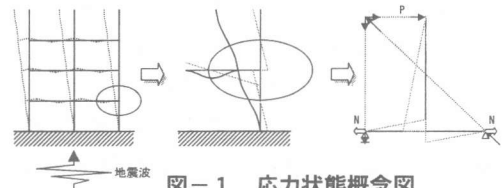


図-1 応力状態概念図

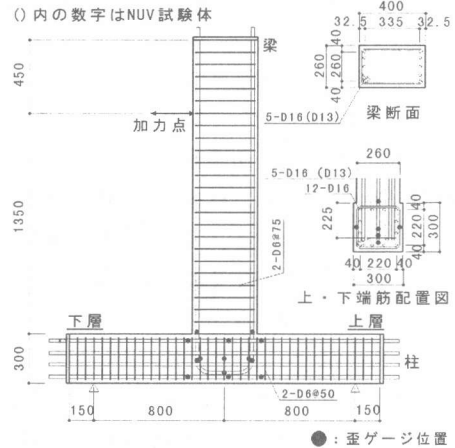


図-2 試験体形状

に、試験体一覧を表-1に、使用材料強度を表-2に示す。試験体は、軸力の影響が接合部の挙動に顕著に表れるように、接合部せん断強度と梁曲げ強度が拮抗する様に設計したBタイプ

*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 (正会員)
 *2 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科 工博 (正会員)
 *3 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 工博 (正会員)
 *4 日本大学教授 総合科学研究所 工博 (正会員)

と、梁主筋量を減らし、梁曲げ破壊が先行するように設計した N タイプから成る。B タイプの試験体に対しては、次の 4 通りの軸力下で実験を行った。

- 1) 長期圧縮軸力相当の一定軸力 (BUC)
- 2) 引張一定軸力 (BUT)
- 3) 高圧縮一定軸力 (BUH)
- 4) 引張及び高圧縮の変動軸力 (BUV)

各軸力の大きさは、高層 RC 造建物のフレーム系地震応答解析結果²⁾を参考に定めた。N タイプは、変動軸力のみの実験を行った (NUV)。なお、梁主筋は全試験体 U 字型定着とした。

試験体設計時の柱断面に対する曲げ強度と軸力の相関曲線と、梁曲げ強度、接合部せん断強度の関係を図-3 に示し比較した。高圧縮軸力及び長期圧縮軸力下では、B タイプは、梁曲げ強度と接合部せん断強度がほぼ一致しており、それらの破壊形式に対して軸力の影響が現れることを期待している。引張軸力下では、さらに柱の曲げ強度も拮抗し、柱が曲げ破壊する可能性も有している。N タイプは、いずれの軸力下でも梁曲げ破壊が先行するように設計した。

2-2 加力方法

加力装置を図-4 に示す。柱端をピン支持した試験体にテコ (テコ比 1:3.5) を介して軸力を加え、梁に水平力を与えた。柱軸力は荷重制御、水平力は変位制御により加力した。一定軸力の実験では、所定の軸力を導入したのち水平力を加え、加力中は軸力を一定に保った。変動軸力の荷重ルールは、荷重スケジュールにおける制御水平変位量に従属するとし、表-3 及び図-5 に示す仮定に基づいて設定した。作成した軸力の荷重スケジュールを荷重変位スケジュールと対比させて図-6 に示す。変動軸力の荷重は、長期軸力に相当する軸力を導入したのち、水平

表-1 試験体一覧

試験体名	B タイプ				N タイプ
	BUC	BUT	BUH	BUV	NUV
梁	10-D16				10-D13
柱	主筋	2-D6@75 pw=0.33 [%]			
	横補強筋	12-D16			
接合部	主筋	2-D6@50 pw=0.43 [%]			
	横補強筋	2-D6@50 pw=0.43 [%]			
想定軸力	長期軸力 (一定軸力)	地震時最大引張軸力 (一定軸力)	地震時最大圧縮軸力 (一定軸力)	地震時変動軸力	
軸力 [kN] (軸力比)	圧縮 +	324 (0.18)	-370 (-0.20)	1019 (0.55)	-370 ~ 1019 (-0.20 ~ 0.55)
	引張 -				

軸力比 = N/BDFc (Fcには設計基準強度20.58 [MPa]を用いた。)

表-2 使用材料強度

(a) 鉄筋

呼び径	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]
D16	388	600	192
D13	374	527	197
D6	402	560	202

(b) コンクリート

圧縮強度 [MPa]	割裂強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]
19.0	2.1	25.4

* コンクリート強度は実験装置の能力に準じて決定した。

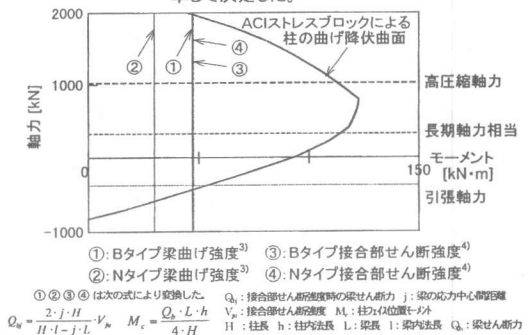


図-3 設計時の試験体各強度の関係

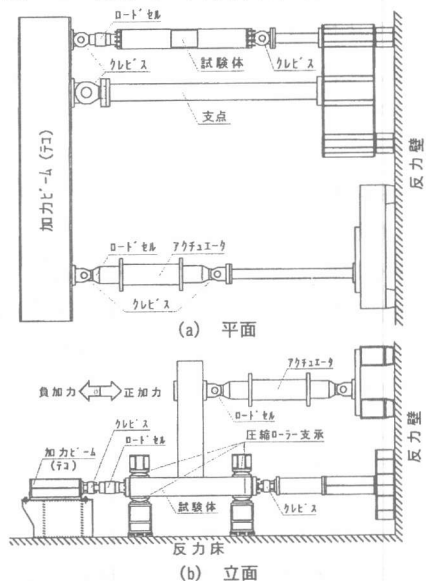


図-4 加力装置

力を与えると同時に軸力を変動させた。なお、変動軸力を载荷した実験では、正加力時に引張軸力を、負加力時に圧縮軸力を負荷している。

2-3 測定方法

梁の水平荷重及び柱軸力をロードセルで測定した。測定変位の概念図を図-7に示したが測定した変位は、梁変位(X1), 接合部回転量(X2, X3), 接合部パネルゾーン(以後, PZ)の鉛直(X4, X5), 水平(X6, X7), 対角(X8, X9)方向各相対変位である。同図には変形成分の分解方法も併せて示した。また、試験体各部の鉄筋の歪を歪ゲージ(図-2)により測定した。

3. 実験結果

3-1 破壊状況

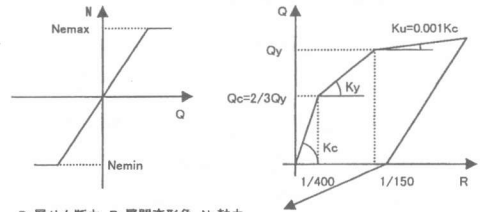
図-8に、部材角 $R=1/25$ の载荷終了時のひび割れ状況を示す。Bタイプの破壊状況は、作用軸力により次のような違いが見られた。PZのせん断ひび割れ角度は、引張軸力時には柱材軸から約50度の角度を持って、高圧縮軸力時には柱材軸に沿うように発生した。BUC及びBUVの引張軸力側は、 $R=1/50$ でこのせん断ひび割れ(せん断引張破壊)が大きく開き耐力低下に至り、BUTの正加力側では柱主筋の降伏後、同部材角の繰り返しで接合部がせん断引張破壊が生じた。BUHの正加力側は、 $R=1/50$ でPZせん断ひび割れ間のコンクリート圧壊し耐力低下(せん断圧縮破壊)に至った。BUHの負加力側、BUVの圧縮軸力側は、梁端主筋の降伏とほぼ同時に、接合部のせん断圧縮破壊が起こった。一方、NUVは梁主筋の降伏により最大耐力に達し、その後、引張軸力側では接合部せん断引張破壊により、圧縮軸力側では、せん断圧縮破壊により耐力低下に至った。

3-2 荷重-変形関係

図-9に部材角 $R=1/25$ 载荷終了時の梁荷重-変形関係を示す。Bタイプは作用軸力によらずいずれも類似した逆S字型の履歴形状を示したが、細部に次の違いが見られた。BUTは、剛性が低く初期の段階からスリップ形状が顕著に

表-3 変動軸力を決定するために用いた仮定

1	想定建物は、左右対称のRC造建物とする。
2	想定建物は、1次モードで振動しているとする。このとき左右外柱の軸力変動量の絶対値は等しくなる。(図5(a))
3	想定建物は、頂部での変形角1/150で全体崩壊形を形成し、そのときの各層の変形角は全層1/150とする ²⁾ 。よって層間変形角1/150の時1層の軸力変動量が最大となる。
4	1層の層間変形角と層せん断力は武田モデルで表せるものとする。(図5(b))
5	柱に作用する最大圧縮軸力比は0.5とし、最大引張軸力比は0.2とする ²⁾ 。



Q: 層せん断力 R: 層間変形角 N: 軸力
 Q_c: ひび割れ耐力 Q_y: 降伏耐力 K_c: 第1剛性 K_y: 第2剛性 K_u: 第3剛性
 N_{max}: 地震時最大変動圧縮軸力 N_{min}: 地震時最大変動引張軸力

(a) 軸力-層せん断力関係 (b) 層せん断力-層間変形関係

図-5 変動軸力を決定するために用いた仮定

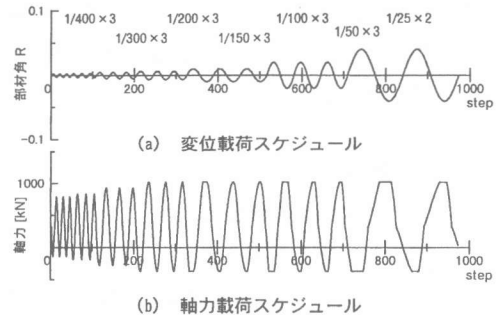


図-6 载荷スケジュール

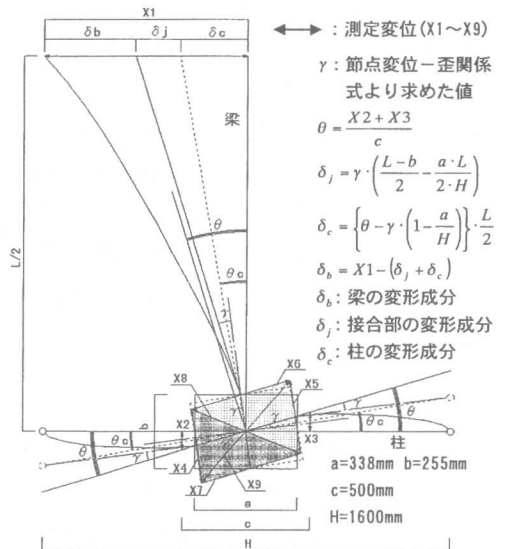


図-7 測定変位の概念図

見られ、最大耐力後の耐力低下は緩やかである。BUHは、剛性が高く履歴に若干の膨らみが見られるが、最大耐力後の耐力低下は激しい。BUVは、BUT、BUHの組み合わせに類似した履歴形状を示した。NUVは、BUVと同様の軸力の影響が見られ、Bタイプに比べへちま型の履歴形状を示した。

3-3 実験値最大耐力と計算値の比較

表-4に各試験体の実験値最大耐力と計算値を比較して示す。Bタイプは、圧縮軸力の大きいものほど実験値が高くなる傾向が見られるのに対し、NUVは、梁主筋の降伏により最大耐力が決定されたため、引張軸力側、圧縮軸力側で実験値に差は見られなかった。全ての試験体の最大耐力は、その破壊形式に対応する計算値と良い対応を示した。しかし、BUHが梁端主筋の降伏後、接合部せん断破壊したことは、軸力の増加が接合部せん断強度を上昇させたことを意味している。

4. 実験結果の検討

4-1 PZ内の歪の算出法

PZの変形状態を詳細に把握するため、本研究では、平面応力問題を有限要素法で解く際に用いられる節点変位-歪関係式を利用してPZ内の歪($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$)を算出した⁵⁾。すなわち、図-7に示したPZの変位計測図からもわかるように、PZの変形状態は水平、鉛直、斜め方向の3つの変位計測結果から4個の三角形要素として抽出できる。これら三角形要素内の歪が一定であるとすれば、三角形要素の各節点変位を確定でき式(1)を用いてPZの歪量が算出できる。ここでは、PZ内4つの三角形要素の歪を平均してPZの歪とした。

$$\{\epsilon\} = [B][C^{-1}]\{\delta_g\} \quad (1)$$

$\{\epsilon\}$: PZ歪 $\{\delta_g\}$: 節点変位

$[B]$: 歪-未定係数マトリックス

$[C^{-1}]$: 節点変位-未定係数マトリックス

なお、各三角形要素の節点変位は、柱材軸方向

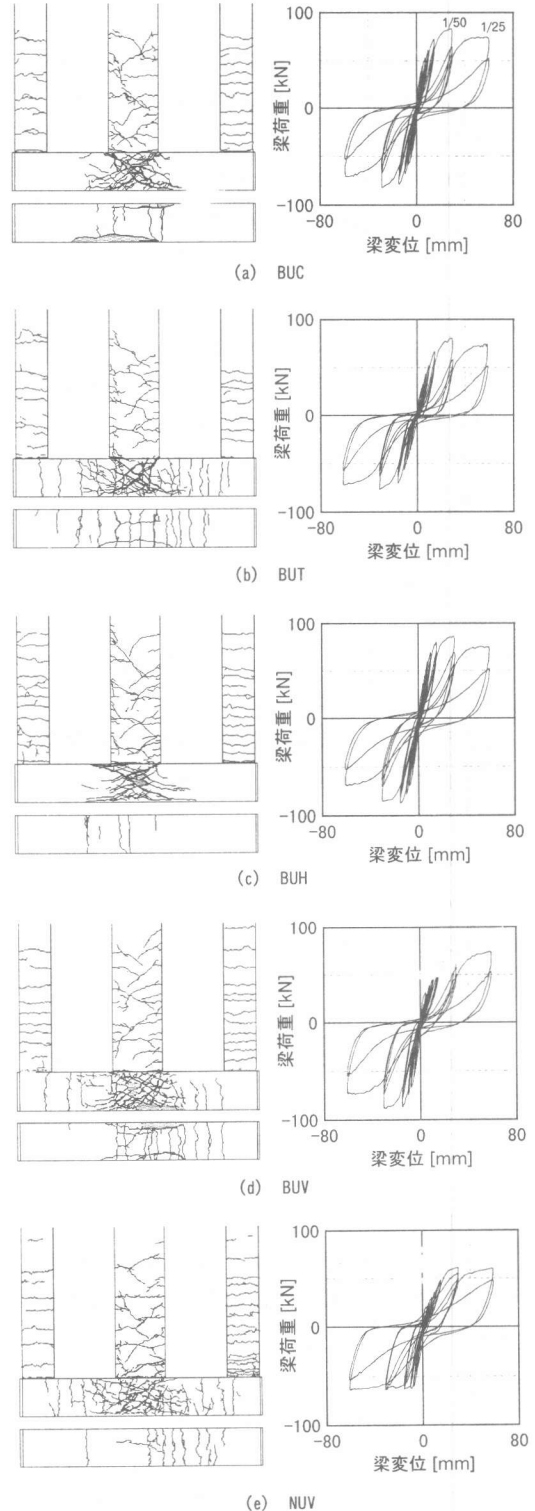


図-8 ひび割れ状況 図-9 荷重-変形関係

表-4 実験値最大耐力と計算値の比較

試験体名	Bタイプ				Nタイプ		
	BUJ	BUT	BUH	BUV	NUV		
実験値 最大耐力	正加力 [kN]	82.81	80.56	86.53	74.28	60.86	
	負加力 [kN]	82.03	76.44	87.51	88.10	63.50	
実験時破壊モード ^{※1}	正	JT	CJT	JC	JT	BJT	
	負	JT	JT	BJC	BJC	BJC	
計算値	梁曲げ ^{※2} [kN]	94.63				58.14	
	実験値/ 梁曲げ	正	0.88	0.85	0.91	0.78	1.05
		負	0.87	0.81	0.92	0.93	1.09
	柱曲げ ^{※2} [kN]	209.77	84.10	189.03	84.10~240.86	84.10~240.86	
	接合部せん断 [kN] ^{※2}	78.74				77.76	
	実験値/ 接合部せん断	正	1.05	1.02	1.10	0.94	0.78
負		1.04	0.97	1.11	1.12	0.82	

※1 破壊モード JT:接合部せん断引張破壊 BUT:梁曲げ破壊後の接合部せん断引張破壊 CJT:柱曲げ破壊後の接合部せん断引張破壊
 JC:接合部せん断圧縮破壊 BJC:梁曲げ破壊後の接合部せん断圧縮破壊
 ※2 各強度は参考文献に示された原式に基づいて算定し、得られた結果をSI単位系とした。強度の変換は、図-3に準じた。なお、応力中心間距離を0.9d(d:梁有効せい)とした。

[梁] $M_m = 0.9 \cdot a_y \cdot \sigma_y \cdot d$ $N_m \geq N > N_k$ の時 $M_m = \{0.5 \cdot a_y \cdot \sigma_y \cdot g_1 \cdot D + 0.024 \cdot (1 + g_1) \cdot (3.6 - g_1) \cdot B \cdot D^2 \cdot F_c\} \cdot \left(\frac{N_m - N}{N_m - N_k} \right)$
 [接合部] $V_k = \kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j$ $N_k \geq N \geq 0$ の時 $M_m = 0.5 \cdot a_y \cdot \sigma_y \cdot g_1 \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D \cdot \left(1 - \frac{N}{B \cdot D \cdot F_c} \right)$
 $0 > N \geq N_m$ の時 $M_m = 0.5 \cdot a_y \cdot \sigma_y \cdot g_1 \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot g_1 \cdot D$

の相対変位測定値と柱材軸方向 (X 軸方向) 変位が一致するという仮定に基づいて算出した。式(1)より求めた PZ の歪に、モールの歪円を適用し⁶⁾、主歪の角度及び大きさを求めた。

4-2 変形成分の分解

軸力が梁、接合部、柱に及ぼす影響を調べるため、各部の変形成分を梁加力点の変形量に変換して表し比較検討した。図-10にR=1/50 載荷終了時までの各変形成分に対する梁荷重-変形関係を示す。同図中には、最大耐力時の全体変形に対する各変形成分比を併せて示した。

変形成分比の比較 Bタイプ一定軸力下では、正加力時の接合部変形が負加力側に比べ若干小さい。これは、梁からの付加軸力による影響と思われる。最大耐力時の変形成分比は、圧縮軸力が高いものほど柱の剛性が高く変形成分は小さくなり、その分梁の変形成分比が大きくなる。一方、BUTの正加力側において、最大耐力時に接合部の変形ではなく柱の変形が急激に増加しており、このことから柱の曲げ降伏により最大耐力に至ったことが分かる。BUVの変形成分は、引張、圧縮軸力で大きな違いは見られない。

接合部履歴形状の比較 Bタイプの接合部履歴形状は、いずれも逆S字型であるが、その形状は異なっている。BUTはスリップ形状が顕著であり、正負で履歴形状は異なるが、負加力側では、小変形時から接合部の変形が進んでいる。BUHは履歴に若干膨らみがあり、接合部の破壊

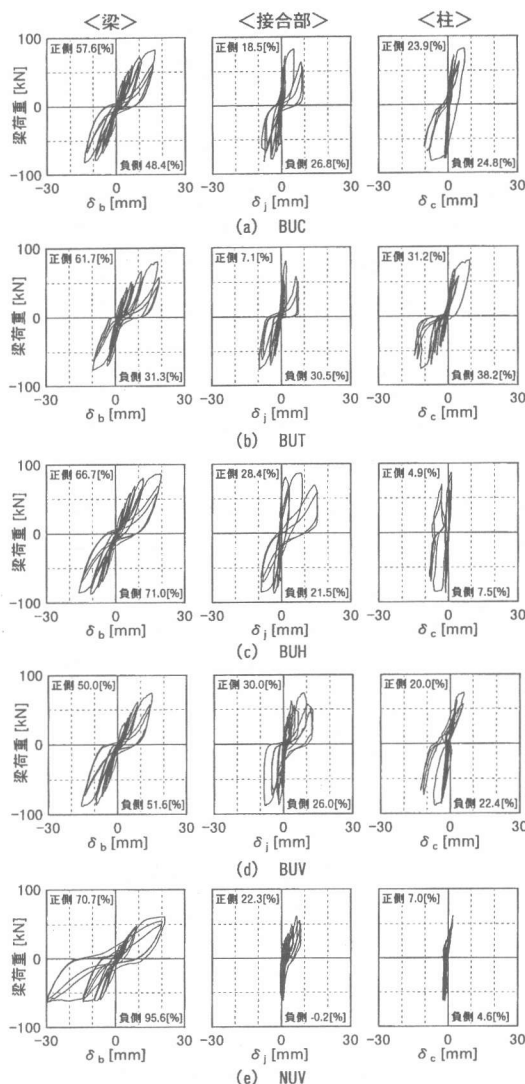


図-10 荷重-変形曲線の分解

と共に変形が急増した。BUV の履歴形状は引張軸力側で変形が進み圧縮軸力側では進まないという BUT, BUH と同じ傾向を示している。B タイプは、いずれも接合部の破壊に伴い、接合部の変形が急増しており接合部破壊後の変形成分に大きな違いは見られない。NUV は、引張軸力側で接合部の変形が進んでいるが、梁の履歴形状が全体の履歴形状とほぼ一致しており、接合部の影響は少ない。

4-3 PZ の主歪

一定軸力を載荷した BUC, BUT, BUH の正加力側の PZ 内における主歪の状態変化を図-11 に示す。破壊状況と対応させて歪状況の変化を以下に考察した。BUC は、圧縮軸力導入時に、軸力に相当する圧縮歪が生じ、 $R=1/300$ では、接合部に作用するせん断力により主軸が材軸に対し約 45 度の方向に傾斜する。この角度はひび割れ角度に概ね対応する。 $R=1/150$ では、せん断ひび割れの増加に伴い引張主歪が徐々に増え、接合部がせん断引張破壊した $R=1/50$ では、両主軸方向とも引張歪となっている。梁材軸方向の歪が大きいのは、接合部背面のコンクリートが剥離した為である。BUT は、引張軸力導入時に PZ に発生したひび割れに対応する引張主歪が見られ、 $R=1/300$, $R=1/150$ とせん断ひび割れの増加に伴い、徐々に引張主歪が増加した。 $R=1/50$ で柱主筋の降伏により最大耐力に達したため、引張主歪が BUC に比べ小さい。BUH も高圧縮軸力導入時に軸力相当の圧縮主歪が見られるが、せん断力の増加による主軸の傾きは $R=1/150$ までは顕著ではない。 $R=1/50$ で圧縮ストラットが圧壊し耐力低 f を起こし、この時の圧縮主歪が大きいことと符合している。以上、PZ の変形状態から推定したひずみ分布は、破壊状況と一致しており PZ の挙動を良好に再現している。

5. まとめ

1) 接合部せん断強度が不足する同一試験体であっても作用軸力により、接合部せん断引張破

壊、接合部せん断圧縮破壊と破壊形式が異なり、履歴形状及び最大耐力にも違いが見られた。

2) 変動軸力を載荷した試験体は、一定圧縮軸力及び引張軸力の組み合わせに類似した破壊性状、履歴形状、最大耐力を示した。

3) 接合部がせん断破壊した壊試験体の接合部履歴形状は作用軸力により異なるが、接合部がせん断破壊すると変形成分はあまり変わらない。

4) 梁曲げ強度に対する各部材の余裕度が適切であるならば、ト形接合部の挙動に軸力が及ぼす影響はそれほど顕著ではない。

5) PZ の主歪を調べた結果、主歪の変化と接合部の状況は一致した。ここで行った PZ の評価方法は接合部の挙動を知る上で有効である。

【謝辞】

本研究は、平成 10 年度文部省科学研究費補助金（基盤研究 B2）「鉄筋コンクリート部材の強度と変形性能の把握に関する研究」（研究代表者：安達洋）の一環として行ったものである。試験体製作には東京鉄鋼㈱のご援助を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 角徹三ほか：「変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱梁接合部の応力-変形性状」 AI 大会 C 構造Ⅱ pp659-660 1991.9
- 2) 安達洋ほか：「変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状に関する研究（その3-5）」 AI 大会 C 構造Ⅱ pp855-860 1990.10
- 3) 日本建築センター：「構造計算指針・同解説」 日本建築センター出版部 pp229-232 1991.7
- 4) 日本建築学会：「鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型鋼筋部材指針（案）・同解説」 日本建築学会 pp241-277 1997.7
- 5) 三本木茂夫・吉村謙敏：「有限要素法による構造解析プログラム」 培風館 pp90-95 1970.9
- 6) 倉西正嗣：「応用弾塑性学」 共立全書 pp146-150 1953.12

※ 図中、数字は歪[μ]を矢印は次の意味を表す。

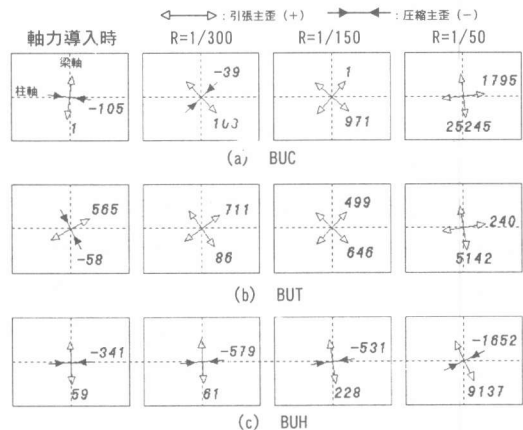


図-11 PZ の主歪