

論文 多軸複合応力を受ける鉄筋コンクリート造柱梁接合部の復元力特性と損傷特性

楠原 文雄^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：加力方法が異なる同断面・同配筋の鉄筋コンクリート造柱梁接合部の水平加力実験を行い、境界条件や外力の作用条件の差による柱梁接合部の応力状態の差異により、梁曲げ降伏が先行する鉄筋コンクリート造柱梁接合部の終局強度、破壊形式に影響を与えることを明らかにした。その上で、接合部破壊が生じる場合には梁曲げ降伏していても梁には塑性変形が生じないこと、接合部の変形は一様なせん断変形ではないことなどを示した。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱梁接合部、終局強度、破壊形式、変形分布

1. はじめに

鉄筋コンクリート造柱梁接合部は、とりつく柱、梁の数により十字型、ト型、L型、T型などに分類され、十字型接合部では梁主筋は通常接合部内は通し配筋されるのに対して、ト型接合部やL型接合部は端部が定着されなければならないなど、それぞれに固有の問題もあることから、それぞれがあたかも別の分野であるかのように実験、研究が行われてきている。しかし本来は柱梁を接続する部位として統一的に扱うことが望ましいが、形状の差が生む力学上の差を直接比較できるような既往の実験例はない。

そこで、本研究では、同形状、同配筋とした十字型接合部試験体について、加力時の境界条件と加力位置を変えることで十字型、ト型、L型接合部それぞれの応力状態を模す加力を行い、これらが柱梁接合部の復元力特性と損傷特性に与える影響を実験的に明らかにする。あわせて、ト型接合部を模した加力の際に形状（加力されない梁の有無）が与える影響と、十字型接合部について直交梁が与える影響についても試験体を用意し、検討を行う。

なお、本研究で扱う試験体は鉄筋コンクリート造柱梁接合部のベンチマークテスト¹⁾として実験を行ったもので、この実験結果はブラインド解析プロジェクト²⁾に提供したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は鉄筋コンクリート柱梁接合部の共通ブラインド解析コンペ²⁾に提供した加力方法が異なる同断面・同配筋の鉄筋コンクリート造十字型柱梁接合部試験体のAシリーズ3体、配筋・加力方法は同一で形状が異なるBシリーズ2体に、十字型加力をした試験体A1に直交梁を設けた試験体C1を加えた計6体である。試験体の断面・配筋を図-1に、加力方法と試験体の応力状態を図-2に示す。なお、一般には柱幅に対して梁幅が小さいが、この場合ひび割れの状況は特に梁端では断面の奥行き方向に一樣でないと考えられる。このため、本実験では試験体表面にあらわれるひび割れが内部のものと等しくなるように梁幅を柱幅と等しくした。

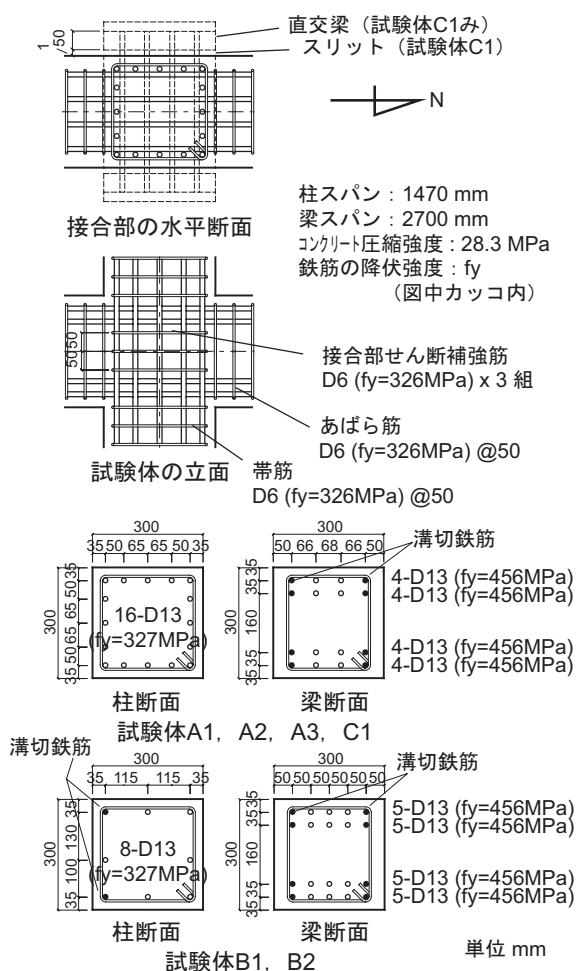
加力時材齢でのコンクリートの圧縮強度の平均は28.3[MPa]、梁および柱の主筋の降伏強度はそれぞれ456[MPa]、357[MPa]である。

Aシリーズでは、十字型加力を行う試験体A1で梁曲げ強度時接合部せん断力に対する学会「靱性指針」³⁾に示された接合部せん断強度の比が0.97、柱-梁曲げ強度比は1.32であり、Bシリーズはそれぞれ1.04と1.24である。

試験体C1の直交梁は、直交方向の加力が行わないため接合部を貫通する梁主筋の拘束効果の

*1 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 助手 修(工) (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻 助教授 工博 (正会員)



図－1 試験体概要

みを模することができれば十分と考え、長さを50[mm]とし、配筋は加力方向の梁と同様で主筋の先端は定着板に溶接した。また、直交梁の端部におけるひび割れを想定し、コンクリート打設時に幅 1[mm]のスリットを設けた。(図－1)

2.2 実験方法概要

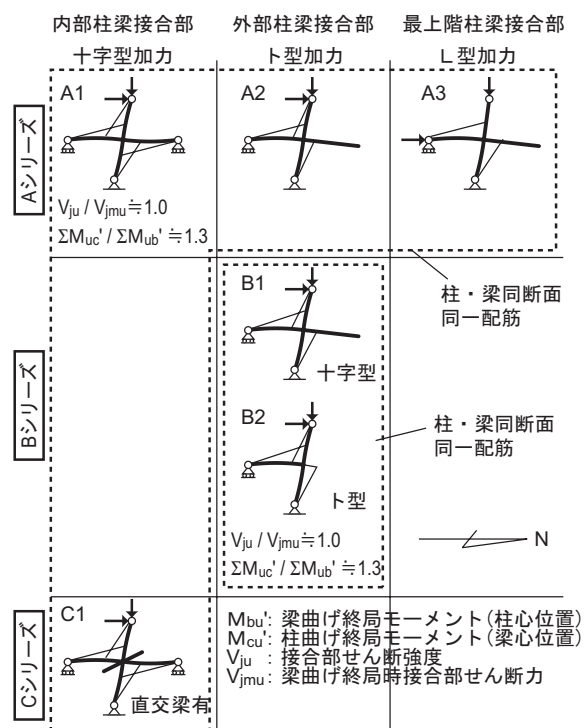
加力は図－2 に示す境界条件下で一定軸力（軸力比 0.085）を加え、柱頭（試験体 A3 は梁先端）に正負交番で振幅を漸増させながら繰り返し水平力を加えた。¹⁾

測定は水平荷重、梁せん断力、柱頭水平変位、柱・梁のたわみに加え、柱梁接合部フェース面の変位および梁端の回転角について行った。⁴⁾

3. 実験結果および検討

3.1 破壊状況

試験体の層間変形角 4%の加力サイクル終了



時のひび割れ状況を図－3 に示す。

すべての試験体で梁端の曲げひび割れが柱梁接合部の角から斜め方向に生じ、柱主筋位置で鉛直方向に伸展した。十字型加力を行った試験体 A1 を C1 比較すると、直交梁を有し最大層せん断力が大きかった試験体 C1 のほうが梁に生じたひび割れが多かった。また、試験体 A2, A3, B1 においては先端が自由端で加力されない梁にはひび割れが生じなかった。

十字型加力を行った試験体 A1 では層間変形角 2%の加力サイクルで、ト型加力で接合部への入力大きい B シリーズの試験体 B1 と B2 では層間変形角 3～4%の加力サイクルでコンクリートの剥落が接合部中央で生じた。

また、試験体 B2 では層間変形角 4%の加力サイクルでは圧縮鉄筋が押し抜かれるような挙動を示した。

試験体 A2, A3 では柱梁接合部内の損傷は小さく、層間変形角 4%の加力サイクル（試験体 A3 では正加力のみ）で梁端のコンクリートの圧壊が生じた。また試験体 A3 では梁先端に載荷しているため負加力時には梁に引張力が生じ、梁のひび割れが大きく開いた。

3.2 復元力特性と破壊形式

実験結果の一覧を表-1に、層せん断力-層間変形角関係を図-4に示す。表-1には諸強度の計算値もあわせて示した。

すべての試験体で層間変形角 1~2%の加力サイクルで梁が曲げ降伏し、柱-梁の曲げ強度比が特に大きい試験体 A2 を除いて柱主筋も降伏した。その後、試験体 A2 および A3 では梁の曲げひび割れが拡大し、履歴形状は紡錘形となる梁曲げ破壊となった。

試験体 A1, B1, B2 は梁曲げ降伏後、層間変

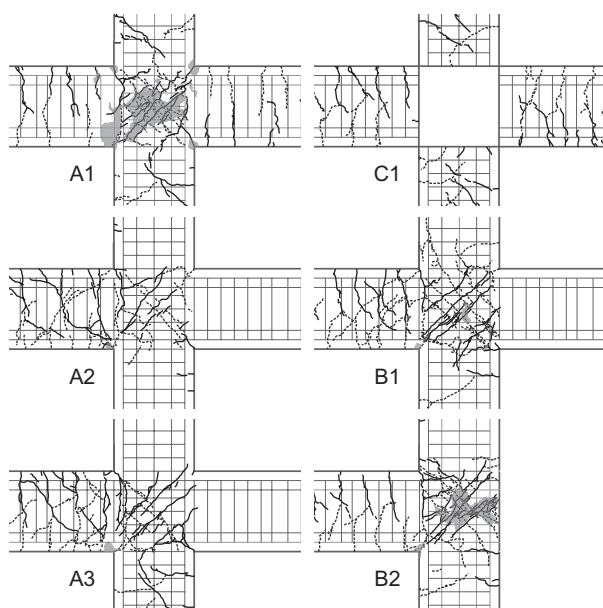


図-3 破壊状況（層間変形角 4.0%）

形の増大とともに柱梁接合部のひび割れの拡大、コンクリートの圧壊が進行し、梁曲げ降伏後に接合部に損傷が集中する破壊となった。履歴形状はスリップ型となった。ただし、試験体 B1 は試験体 A1, B2 に比べると接合部に生じた損傷は小さく、履歴形状もふくらみをもっており梁と

表-1 実験結果および計算値一覧

			A1	C1	A2	A3	B1	B2
梁主筋降伏	1 段目	計算値	121	121	60	142 -104	76	76
		実験	正 119 (1.48) 負 -114 (-1.58)	正 118 (1.37) 負 -121 (-1.48)	正 63 (0.86) 負 -61 (-0.97)	正 158 (1.34) 負 -93 (-0.85)	正 74 (1.01) 負 -69 (-1.14)	正 75 (1.15) 負 -64 (-0.98)
	2 段目	計算値	132	132	66	156 -114	84	84
		実験	正 127 (2.30) 負 -121 (-1.86)	正 128 (1.53) 負 -128 (-1.65)	正 74 (1.18) 負 -61 (-0.87)	正 176 (1.62) 負 -101 (-0.97)	正 89 (1.43) 負 -89 (-1.90)	正 83 (1.40) 負 -79 (-1.38)
	柱主筋降伏	計算値	155	155	169 -143	168 -142	110 -92	110 -92
		実験	正 127 (2.30) 負 -120 (-1.79)	正 133 (1.71) 負 -128 (-1.65)	未降伏	156 (1.83) -124 (-3.03)	89 (1.43) -85 (-1.70)	87 (2.20) -84 (-1.55)
最大耐力	計算値	梁曲げ終局時	136	136	68	159 -119	86	86
		柱曲げ終局時	180	180	194 -167	195 -166	128 -106	128 -106
		接合部強度時	131	154	92	94	92	92
	実験値	正	127 (2.30)	150 (2.96)	78 (1.99)	176 (1.62)	98 (2.99)	92 (1.96)
		負	-123 (-1.96)	-139 (-1.99)	-77 (-3.98)	-125 (-3.84)	-93 (-4.00)	-91 (-1.95)
		最大耐力	127 (2.30)	150 (2.96)	78 (1.99)	176 (1.62)	98 (2.99)	92 (1.96)

単位：kN，計算値は上段：正加力時，下段：負加力時，実験値の括弧内はそのときの層間変形角(%)

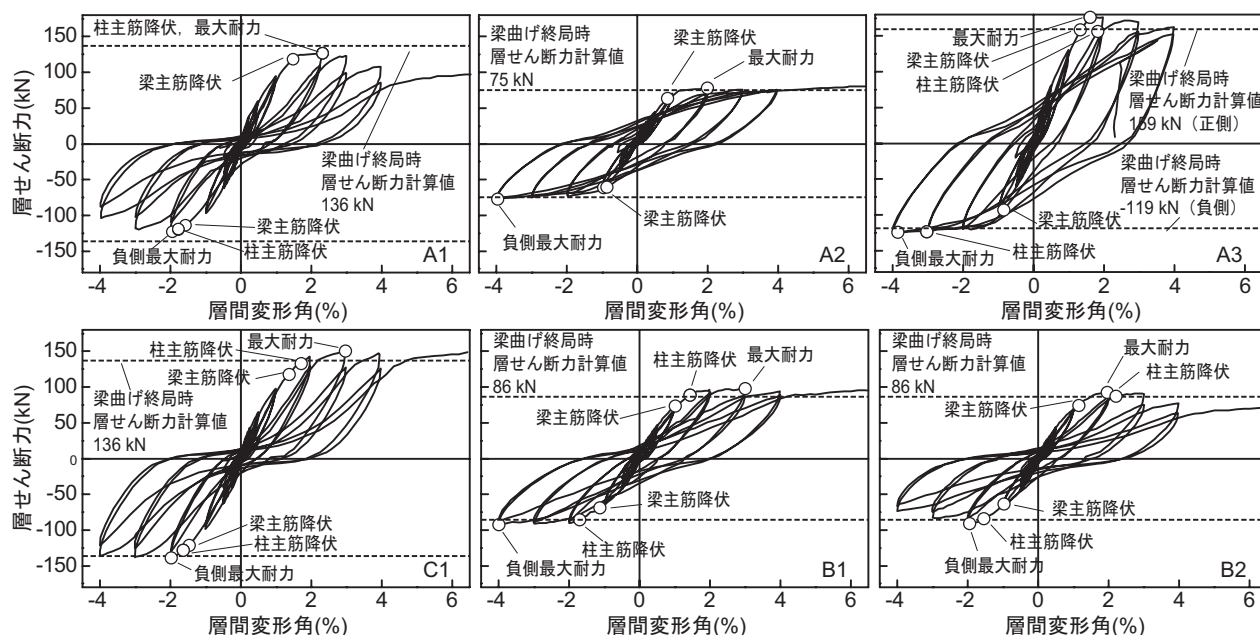


図-4 層間変形角-層せん断力関係

接合部の損傷が混在する破壊であったといえる。

試験体 C1 は直交梁を有するため接合部の損傷状態の確認はできなかったが、梁端に圧壊が生じていないこと、履歴形状がスリップ型であること、後述の変形成分において梁の変形が小さいことから梁曲げ降伏後に接合部の損傷が大きくなったと判断される。また、試験体 C1 は試験体 A1 に対して最大層せん断力は約 15% 上昇し、耐力低下も小さかった。

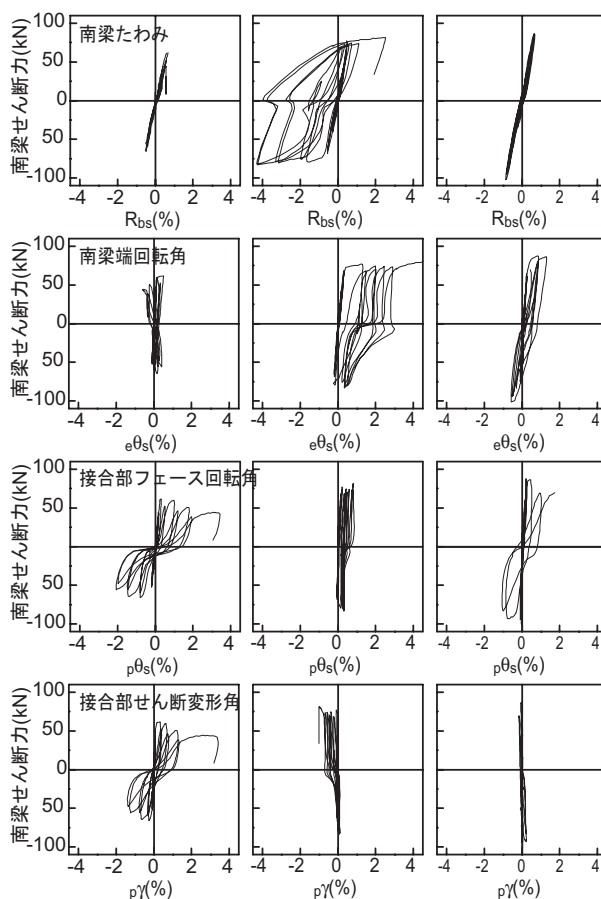
配筋、加力方法が同じで形状が異なる試験体 B1 と B2 では、最大層せん断力はほぼ等しかったが、梁主筋端部を定着板により定着した試験体 B2 の柱梁接合部の損傷が大きく、最大耐力後の耐力低下も大きかった。これは、梁主筋が引張降伏後、残留伸びがある状態で反対向きに載荷されると主筋が押し込まれ、柱の反対側の定着板を押し出したことが原因と考えられる。

また、図-4 中には平面保持を仮定して求めた梁曲げ終局時の層せん断力を示してあるが、いずれの試験体も梁曲げ降伏先行の破壊性状を示したため、その最大層せん断力は試験体 A1 を除き計算値に近いものであった。しかし、十字型加力を行った試験体 A1 では梁主筋の降伏が先行し引張側の主筋は 2 段とも降伏しているにもかかわらず、実験時の最大層せん断力は曲げ終局強度時層せん断力の計算値より小さく、計算値の 90% 程度であった。

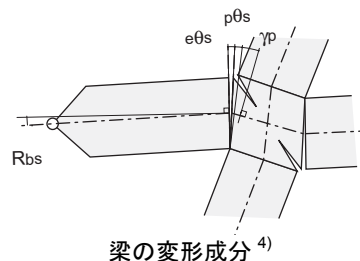
なお、梁主筋に生じる応力を溝切鉄筋⁴⁾により測定しており、これから求めた接合部内における梁主筋の平均付着応力度の最大値は、直交梁を有する試験体 C1 を除き 1 段目主筋で学会「靱性指針」による付着強度の 50~60% であった。

3.3 変形の分布

図-6 に接合部の損傷が大きかった試験体 A1、B2 および接合部の損傷が最も小さかった試験体 A2 について、各変形成分⁴⁾（梁のたわみ R_{bs} 、梁端の回転角 $e\theta_s$ 、梁側の接合部フェースの回転角 $p\theta_s$ 、接合部せん断変形角 $p\gamma$ ）を南梁（ト型加力では先端がローラー支持された梁）について南



(a) 試験体A1 (b) 試験体A2 (c) 試験体B2



梁の変形成分⁴⁾

図-6 各部変形

梁のせん断力との関係を示す。ここでいう接合部のせん断変形角は上下の柱間での軸心のずれ、接合部フェースの回転角とは接合部内の斜めひび割れの拡大による回転を意味する。

梁降伏後に接合部破壊が生じた試験体 A1、B2 では、梁主筋は降伏しているにもかかわらず梁のたわみ変形に塑性化はみられず、ほぼ弾性を保っていた。十字型加力を行った試験体 A1 では接合部のフェースの回転角および接合部せん断変形角が塑性化しており、梁端の回転角は最大耐力後、接合部フェースの回転の増加に伴いむしろ減少している。一方、ト型加力を行った試験体 B2 では、接合部せん断変形角はほとんど増

加せず、接合部のフェースおよび梁端部での回転角が増大していた。

接合部の損傷が小さく梁曲げ破壊した試験体 A2 では、接合部フェースの回転角と接合部せん断変形角は小さく、正加力時は梁端の回転角が、負加力時には梁のたわみ角が塑性化した。

3.4 柱端部の回転角

図-7 に柱の一方しか加力されていない試験体 A3 を除いた各試験体について、層せん断力-柱端回転角関係を示す。いずれの試験体も接合部に斜めひび割れが生じると回転角が増大（層せん断力-回転角関係では剛性が低下）する。

十字型加力である試験体 A1 と C1 では上柱側と下柱側の回転角はほぼ等しく柱梁接合部パネルの上下面は平行を保っているといえるが、一方、ト型加力である試験体 A2, B1, B2 では、上下面の回転角には差があり、いいかえると柱梁接合部の上下面は並行ではなくなっている。接合部の損傷は試験体 A2, B1, B2 の順に大きくなっており、接合部の損傷が顕著であるほど上下の回転角の差は大きい。正加力時には上柱側の、負加力時には下柱側の回転角が大きいこ

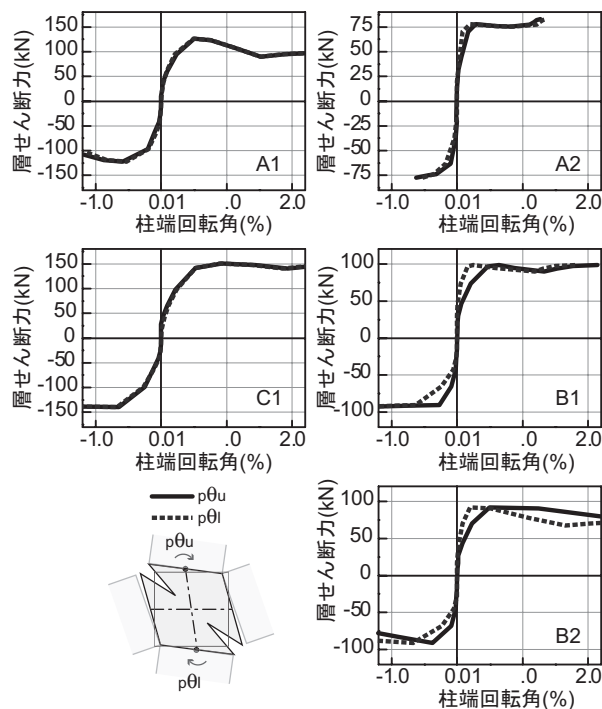


図-7 柱端の回転角

とから、梁との組み合わせで考えると隣り合う梁との角度が開く方向に加力される側で変形が増大することがわかる。

一般に、柱梁接合部はせん断力によって一様にせん断変形し、破壊もせん断変形が増大して生じるとされているが、特にト型接合部では前節に述べたようにせん断変形自体は小さいこともあわせて考えると、接合部破壊時にはむしろ柱梁接合部内の各部の回転が大きくなって破壊にいたっているといえる。

3.5 層間変形角に占める各変形成分

図-8 に層間変形角と各部の変形による層間変形の成分の関係を示す。各変形成分による層間変形は式(1)~(6)により求めた。

$$R_{sc} = R_c \left(1 - \frac{D_b}{L_c} \right) \quad (1) \quad R_{sb} = R_b \left(1 - \frac{D_c}{L_b} \right) \quad (2)$$

$$R_{se} = e \theta_b \left(1 - \frac{D_c}{L_b} \right) \quad (3)$$

$$R_{sps} = \gamma_p \left(1 - \frac{D_b}{L_c} - \frac{D_c}{L_b} \right) \quad (4)$$

$$R_{spc} = p \theta_c \left(1 - \frac{D_b}{L_c} \right) \quad (5) \quad R_{spb} = p \theta_b \left(1 - \frac{D_c}{L_b} \right) \quad (6)$$

R_{sc} : 柱のたわみによる層間変形, R_{sb} : 梁のたわみによる層間変形, R_{se} : 梁端回転角による層間変形, R_{sps} : 接合部せん断変形角による層間変形, R_{spc} : 上下の接合部フェースの回転による層間変形, R_{spb} : 左右の接合部フェースの回転による層間変形, R_c : 柱のたわみ (十字型加力, ト型加力では上下の柱の平均, L字型加力では下柱のたわみ), R_b : 梁のたわみ (十字型加力では左右の梁の平均, ト型加力, L字型加力では加力される梁のたわみ), $e \theta_b$: 梁端の回転角 (十字型加力では左右の梁の平均, ト型加力, L字型加力では加力される梁端の回転角), $e \theta_{pb}$: 左右の接合部フェースの回転角 (十字型加力では左右の平均, ト型加力, L字型加力では加力される梁側の回転角), $e \theta_{pc}$: 上下の接合部フェースの回転角 (十字型加力, ト型加力では上下の平均, L字型加力では下側の回転角), γ_p : 接合部せん断変形角, D_c : 柱せい, D_b : 梁せい, L_c : 柱スパン, L_b : 梁スパン

接合部の損傷が大きかった試験体 A1, B2 では、層間変形角 2%程度から接合部フェースの回転による変形と接合部せん断変形による、つまり接合部の変形による層間変形が増大し、最大層せん断力時には全体に占める割合は 30~40%程度であったものが、層間変形角 4%時にはおよそ全体の 80%となった。ただし、接合部の変形のうち、接合部せん断変形角はト型接合部である試験体 B2 では小さかった。

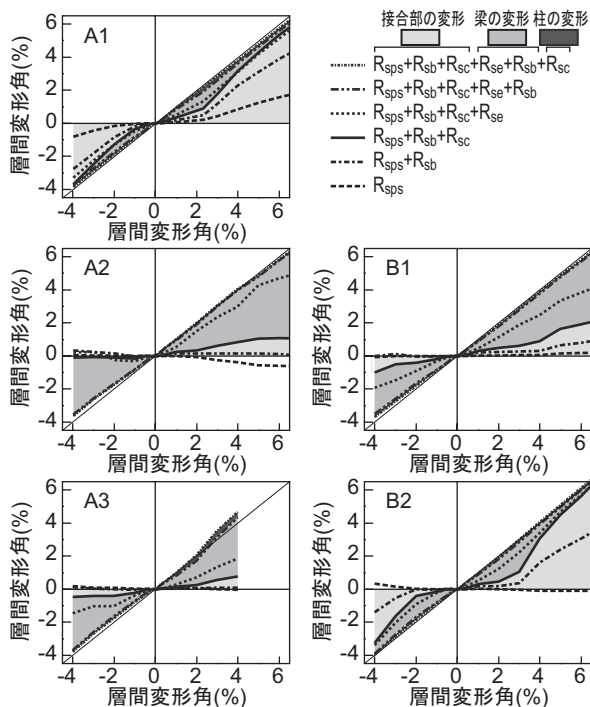


図-8 層間変形角に占める各変形成分

梁曲げ破壊となった試験体 A2, A3 では、梁のたわみおよび梁端の回転角による層間変形がほとんどを占め、接合部の変形による層間変形は最大層せん断力時に 15~20%, 層間変形角 4% 時に 20~25%であった。

5. まとめ

本実験により得られた知見を以下に記す。

- (1) 十字型加力を行った場合に梁曲げ降伏の直後に接合部破壊が生じるように設計した試験体 3 体の十字型加力、ト型加力、L 字型加力では、いずれも梁曲げ降伏後に顕著な接合部破壊が生じた。
- (2) 同断面・同配筋のト型の形状および十字型の形状の試験体のト型加力では、最大層せん断力はほぼ等しかったが、加力される梁の反対側での主筋の定着方法とコンクリートの拘束状態の違いにより接合部の損傷に差が生じ、柱側面に定着板を設けたト型形状の試験体では定着板の押しぬきが生じ、接合部破壊が顕著であった。
- (3) 直交梁付の試験体の接合部の変形と損傷は抑制され、最大層せん断力は約 15%上昇した。
- (4) 接合部破壊が顕著となった試験体では、加力方法の違いによらず梁主筋の降伏後において

も梁のたわみに塑性変形は生じず、層間変形は大部分が接合部の変形によるものであった。接合部の損傷が小さく梁曲げ破壊となった試験体では、梁のたわみと梁端部の回転による変形が層間変形のほとんどを占めていた。

- (5) 接合部の損傷が大きい試験体においても接合部には一様なせん断変形が生じるのではなく、せん断変形と斜めひび割れの拡大による接合部フェースの回転の増大が複合的に生じていた。

このように接合部破壊は従来考えられていたような接合部せん断力によるせん断変形の増大だけでは説明できない。本実験で得られた変形モードを説明できるような耐荷機構のモデル化により、形状係数を導入せざるを得ないような実験式から脱却できると考えられる。

そのために、今後は損傷分布だけではなく本実験で得られた応力分布についても形状や境界条件が与える影響について検討を進めていく予定である。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)(2) (課題番号 15360291, 研究代表者: 塩原等) により行われたものである。また、実験の実施にあつては岡田浩一氏 (現清水建設設計部) に主に担当していただいた。

参考文献

- 1) 岡田浩一, 塩原等, 楠原文雄: 多軸複合応力を受ける鉄筋コンクリート造柱梁接合部のベンチマークテスト, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 27, No.2, pp.421-426, 2005.7.
- 2) 鉄筋コンクリート柱梁接合部の共通ブラインド解析コンペ, コンクリート工学, Vol.44, No.2, pp.69, 2006.2.
- 3) 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, 1999.8.
- 4) 楠原文雄, 塩原等: 接合部回転角を含む RC 造柱梁接合部部分架構の変形成分と応力およびその測定法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 28, No.2, pp. 355-360, 2006.7.