

論文 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

楠原 文雄^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：柱梁接合部パネルの 4 つの辺の計 12 の自由度からなる変位を測定し、これらをもとに接合部の変形をせん断変形と接合部フェースの回転に分離する方法を提案した。また、長さ方向に溝を設けた鉄筋と歪ゲージにより、鉄筋の降伏後の応力を測定する方法を示した。これらを柱梁接合部の実験に適用し、従来の測定法では明らかにすることができなかった柱梁接合部の変形や応力を測定することが可能であることを示した。

キーワード：柱梁接合部，変形成分，接合部せん断変形，接合部回転角，溝切鉄筋

1. はじめに

地震時の鉄筋コンクリート造建物の挙動を把握するために構造物をモデル化する場合、柱梁接合部は通常剛域を有する節点とするか、弾性のせん断パネルとしてモデル化されることが多い。これは、塑性化は梁および柱に限定されるとの仮定に基づいているが、柱梁接合部を含む部分架構の水平加力実験においては、梁降伏した場合においても接合部が塑性化する場合があることも知られている。

そのため、接合部の弾塑性挙動も考慮して建物の性能をより詳細に把握するためには、接合部の剛性低下、耐力劣化等をより正確にモデル化する必要がある。近年では柱梁接合部の弾塑性挙動を扱うモデルが提案されている¹⁾など。しかし、既往の実験ではほとんどの場合に柱梁接合部の平均せん断歪と層せん断力しか報告されておらず、これらのモデルを検証するには十分なデータが得られていない。

また、性能評価型の設計を行う場合、構造物の剛性や強度だけでなく、損傷の分布を把握することが重要となるため、損傷の分布あるいは変形の分布についての実験データも重要となってくる。しかし、柱梁接合部の実験における一般的な測定項目は梁および柱のたわみ量と接合

部パネルのせん断変形のみであり、柱梁接合部の挙動を説明するには不十分である。

そこで、本論文では柱梁接合部の 4 つの辺（以下、フェース）の変位を求めることが可能な測定法を考案し、この柱梁接合部のフェースの変位から接合部周りの変形成分を定義し、これを柱梁接合部の実験に適用してその有用性を検討する。

2. 柱梁接合部部分架構の変形の定義

図-1(a)に、柱・梁の反曲点位置で切り出した柱梁接合部を含む部分架構の測定フレームを示す。この方法により測定された変位から以下に定義する各部の変形を求めるものとする。各式における記号は、変位計で測定された変位 d_i および各部の長さである。（図-1 参照）

2.1 柱・梁のたわみ

柱・梁のたわみは、それぞれの部材端に固定した測定フレーム(1a)~(1d)の先端の変位計により測定し、測定された変位をフレームの固定点と変位計の距離で除したものを部材角とする。例えば、左梁の部材角 R_{b1} は次式となる。

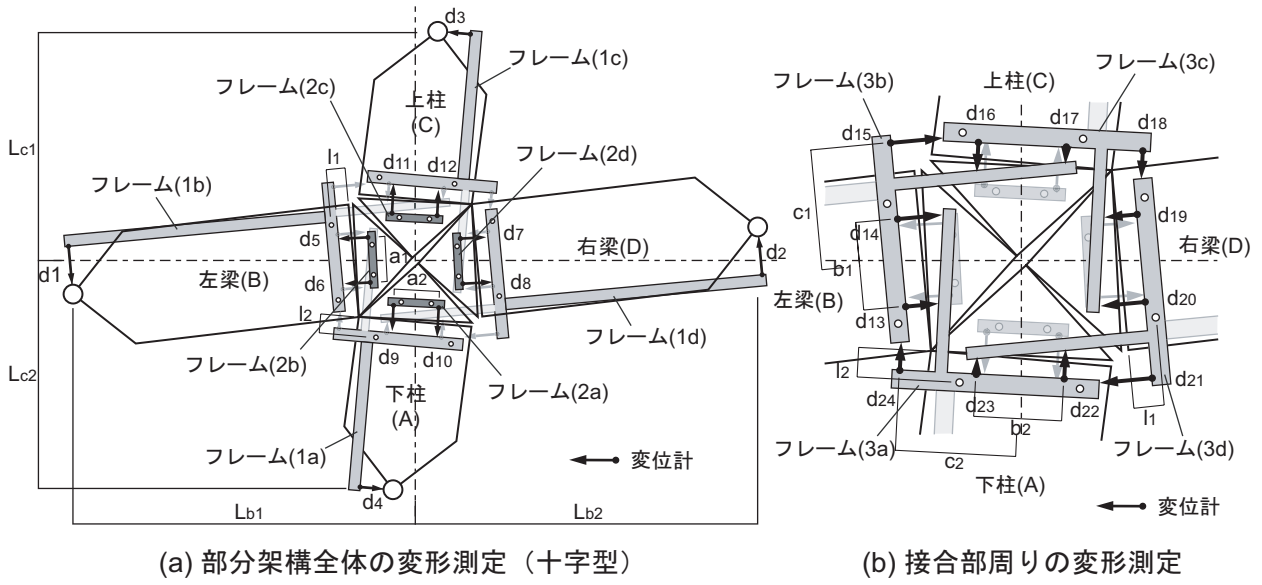
$$R_{b1} = \Delta d_1 / \{L_{b1} - (D_c/2 + l_1)\} \quad (1)$$

2.2 柱・梁端の回転角

柱梁接合部パネルに固定した測定フレーム

*1 東京大学 大学院工学系研究科 助手 修(工) (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科 助教授 工博 (正会員)



(a) 部分架構全体の変形測定（十字型） (b) 接合部周りの変形測定

図-1 測定フレーム

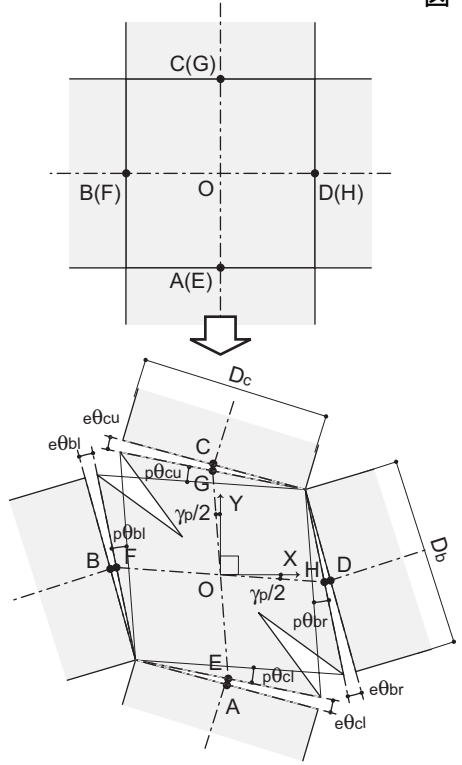


図-2 接合部変形の定義

(2a)~(2d)に取り付けた2つの変位計で測定した部材端との距離から相対回転角を求め、柱・梁端の回転角とする。例えば、左梁の部材端の回転角 $e\theta_{bl}$ 、および梁端のひびわれが開くことによる伸び量 e_{bl} は次式となる。

$$e\theta_{bl} = (\Delta d_5 - \Delta d_6) / a_1 \quad (2)$$

$$e_{bl} = (\Delta d_5 + \Delta d_6) / 2 \quad (3)$$

2.3 部材端の変位

梁、柱を線材でモデル化した平面の骨組解析では、それぞれの部材端の変位は並進2自由度および回転の3つの自由度をもっており、柱梁接合部の挙動を表わすには4つの部材端の計12自由度の変位を用いるのがよいと考えられる。しかし、実験においてこれらの変位を外部から直接測定することは困難であり、図-1(b)に示す測定フレーム(3a)~(3d)を用いて4つの部分の相対変位を測定し、それらから基準点に対する4つの部分の変位を求めることとした。以下に算定方法を示す。なお、測定フレーム(1a)~(1d)と測定フレーム(3a)~(3d)はそれぞれ同じ位置に固定されているものとする。

(1) 隣り合う部材端の相対変位

隣り合う部材端の並進2成分および回転1成分の計3成分からなる相対変位は、図-1(b)のように設置された変位計の値から計算され、例えば、下柱端(図-2の点A)に対する左梁端(同B)の相対変位は次式となる。

$$\{ {}_B\delta \}_A = \begin{Bmatrix} {}_B\delta_x \\ {}_B\delta_y \\ {}_B\theta \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} -(\Delta d_{13} + \Delta d_{14}) / 2 \\ \Delta d_{24} \\ (\Delta d_{14} - \Delta d_{13}) / b_1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

(2) 部材端の変位

次に計算された4組の部材端の相対変位 $\{ {}_B\delta \}_A$ 、

$\{C\delta\}_B$, $\{D\delta\}_C$, $\{A\delta\}_D$ から, 各部材端 (図-2 の点 A~D) の計 12 自由度の変位を求める。

まず, 下柱端に対する左梁端の相対変位 $\{B\delta\}_A$ に加え, 上柱端 (C) および右梁端 (D) の下柱端 (A) に対する相対変位 $\{C\delta\}_A$, $\{D\delta\}_A$ を求める。

$$\{D\delta\}_A = \begin{Bmatrix} D\delta_x \\ D\delta_y \\ D\theta \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} A\delta_{y,D} + c_{1A}\theta_D \\ -A\delta_{x,D} - D'_c/2 \cdot A\theta_D \\ -A\theta_D \end{Bmatrix} \quad (5a)$$

$$\{C\delta\}_A = \begin{Bmatrix} C\delta_x \\ C\delta_y \\ C\theta \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} B\delta_{x,A} + C\delta_{y,B} - c_{1B}\theta_A \\ B\delta_{y,A} - C\delta_{x,B} + D'_c/2 \cdot B\theta_A \\ B\theta_A + C\theta_B \end{Bmatrix} \quad (5b)$$

$$= \begin{Bmatrix} B\delta_{x,A} + C\delta_{y,B} - c_{1B}\theta_A \\ B\delta_{y,A} - C\delta_{x,B} + D'_c/2 \cdot B\theta_A \\ B\theta_A + C\theta_B \end{Bmatrix}$$

ここに, $D'_c = D_c + 2l_1$, $D'_b = D_b + 2l_2$ は測定フレームの設置位置間の距離である。

次に接合部心 (O) の下柱端に対する相対変位 $\{O\delta\}_A$ を求める。ここで, 接合部心は柱端および梁端の部材心間を結んだ直線の交点とし, 回転はこの接合部心の座標系 XY における水平 (X) 方向と梁の部材心間を結んだ直線 (B-D) のなす角度と, 鉛直 (Y) 方向と柱の部材心間を結んだ直線 (A-C) のなす角度が等しくなるように定める (図-2)。

最後に下柱端 (A) を基準とする座標系から接合部心 (O) を基準とする座標系への変換によって接合部心に対する部材端の変位を求める。例えば左梁端の変位は次式となる。

$$\{B\delta\} = \begin{Bmatrix} B\delta_x \\ B\delta_y \\ B\theta \end{Bmatrix} = [T] \left(\{Bx\} + \{B\delta\}_A \right) - \{O\delta\}_A - \{Bx\} \quad (6)$$

ここに, $[T]$: 座標変換マトリックス, $\{Bx\}$: 左梁端 (B) の接合部心に対する位置で以下となる。

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_A) & \sin(\theta_A) & 0 \\ -\sin(\theta_A) & \cos(\theta_A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\{Bx\} = \begin{Bmatrix} -D'_c/2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

2.4 接合部の変形

算定された 4 つの柱・梁の部材端の変位から, 接合部の変形を次のように定義する。

まず, 接合部のせん断変形角は, 柱心同士を結んだ線 (A-C) と梁心同士を結んだ線 (B-D) のなす角度の変化量とする。

$$\gamma_p = -\frac{1}{2} \left(\frac{C\delta_x - A\delta_x}{D'_b + (C\delta_y - A\delta_y)} + \frac{D\delta_y - B\delta_y}{D'_c + (D\delta_x - B\delta_x)} \right) \quad (9)$$

また, このせん断変形に加え柱梁接合部では加わるモーメントとせん断力により柱・梁フェース (柱梁接合部パネルの辺: 図-2 の点 E~H) の回転が生じる。ここでは接合部の回転変形は, 基準とした接合部心に対する各フェースの回転角から接合部せん断変形によるものと部材端の回転角を減じたものとし, 次のように計算する。

$$\begin{aligned} {}_p\theta_{bl} &= {}_B\theta - \gamma_p/2 - e\theta_{bl} && \text{(左梁)} \\ {}_p\theta_{br} &= {}_D\theta - \gamma_p/2 - e\theta_{br} && \text{(右梁)} \\ {}_p\theta_{cl} &= {}_A\theta + \gamma_p/2 - e\theta_{cl} && \text{(下柱)} \\ {}_p\theta_{cu} &= {}_C\theta + \gamma_p/2 - e\theta_{cu} && \text{(上柱)} \end{aligned} \quad (10)$$

なお, 本論文の 4 章の適用例では, 柱に軸力を加えた試験体であるため柱端の回転角 $e\theta_{cl}$, $e\theta_{cu}$ はゼロと仮定し, フレーム(2a)と(2c)による測定は省略した。

3. 応力の測定

鉄筋の降伏後の応力は, 繰り返し載荷時を含めて基本的に困難であり, 歪ゲージにより得られた歪から, 鉄筋の応力度-歪度関係をなんらかの形で仮定して変換するのが一般的である。しかし, 本論文では鉄筋のリブ面に長さ方向に溝上の切り欠きを設け, 歪ゲージを貼付した位置を除いて断面積を減じた鉄筋を用いる。このようにすることで, 溝を設け断面積を減じた部分で鉄筋の降伏が生じた場合においても歪ゲージを貼付した位置では鉄筋は弾性に保たれ, 試験により得た鉄筋のヤング率を乗じることで鉄筋の応力を容易に得ることが可能となる。溝はリブ面に設け節を削らないことで, 鉄筋とコンクリートとの付着特性に与える影響は極めて小

さいようにした。図-3に4章の適用例とした試験体に用いた鉄筋の断面を示す。歪ゲージ貼付位置の非切削部の長さは鉄筋径の2倍とした。

切削部の断面積は、図-4に示す非切削部を有する試験片の引張試験から得られる切削部と非切削部の弾性歪の比を、公称断面積に乘じることで算定することができる。図-4に引張試験結果の例を示す。

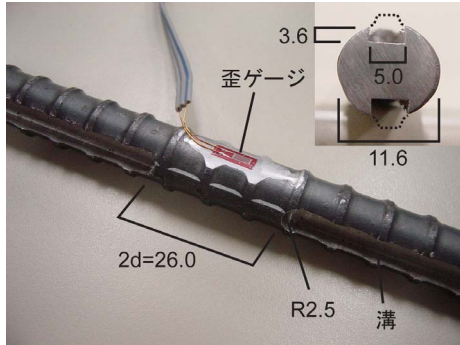
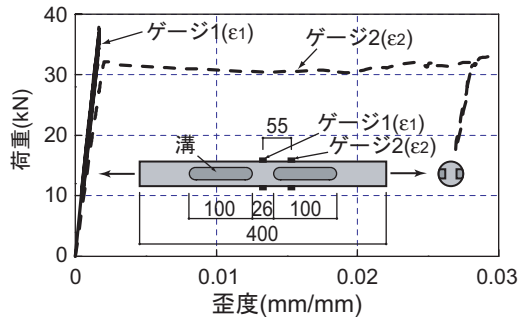


図-3 溝切鉄筋



$a_e = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 \cdot a_s$: 溝切鉄筋の断面積
 a_s : 鉄筋の公称断面積

図-4 溝切鉄筋の引張試験

4. 実験への適用例

本測定法を、柱梁接合部を含む部分架構の水平加力実験に適用した例を示す。対象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²⁾に用いた試験体である。ただし、この実験結果はブラインド解析プロジェクト³⁾に提供中であるため、試験体名等は伏せてある。

4.1 試験体概要

以下の試験体の形状はいずれも十字型で、内部柱梁接合部もしくは外部柱梁接合部の応力状態となるように加力を行った(図-5)。梁主筋量は、梁曲げ強度時接合部せん断力が学会「靱性指針」⁴⁾のせん断強度の0.9~1.0倍となるよう

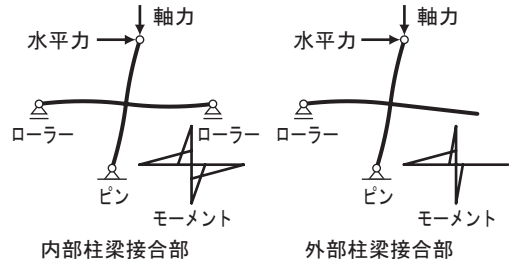
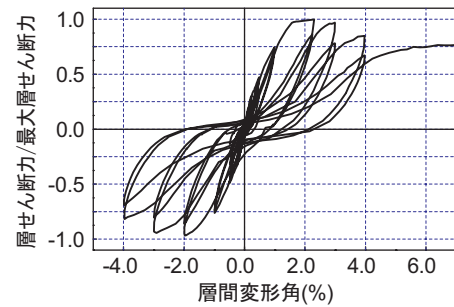
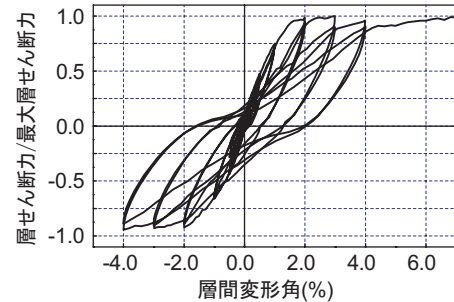


図-5 加力方法



(a) 耐力劣化が生じた試験体の例



(b) 耐力劣化が生じなかった試験体の例

図-6 層せん断力-層間変形角関係

に定め、柱-梁曲げ強度比は1.2~1.3である。

層せん断力-層間変形角関係を図-6に示す。層せん断力は最大層せん断力に対する比で示し、最大耐力後に耐力劣化が生じた試験体と、耐力劣化は生じなかった試験体の例を示した。

4.2 接合部心に対する変位

図-7に接合部心に対する梁側のフェース(図-7点F)の変位の例を示す。この例では層間変形の増大に伴い、X方向の変位が増大している。

4.3 接合部の膨張

柱梁接合部の左右のフェース面のX方向変位の差を水平方向の伸び(図-2の点F-H間の伸び)、上柱側と下柱側のフェース面のY方向変位の差(点E-G間の伸び)を鉛直方向の伸びとして、それぞれ柱せいおよび梁せいで除したひずみ量の例を図-8に示す。水平、鉛直両方向とも最大耐力後接合部が膨張している。実構造物に

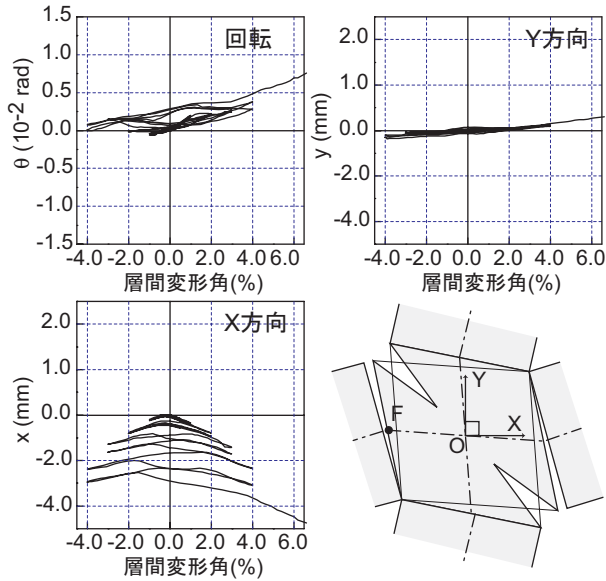


図-7 接合部フェースの変位

においてはこれらの伸びは拘束されるため、接合部には変形を拘束する圧縮軸力が生じることになると考えられる。

4.5 梁の変形

梁の変形角は、梁のたわみ R_b 、梁端の回転角 $e\theta$ 、梁が接続する面の柱梁接合部回転角 $p\theta$ 、接合部のせん断変形角 γ_p によって生じ、これらと梁端モーメントとの関係の例を図-9に示す。また、各変形角の加力サイクルピーク時の値を図-10に示す。

これは梁主筋に降伏が生じた試験体の例であるが、梁のたわみ R_b 、梁端の回転角 $e\theta$ には主筋の降伏による変形の増大が生じていない。層間変形角 2.0% から接合部回転角 $p\theta$ と接合部のせん断変形角 γ_p が急激に増大し、梁端の回転角 $e\theta$ は逆に減少している。

4.5 柱端部の回転角

図-11 に外部柱梁接合部を模した試験体について柱側のフェースの回転角の例を示す。接合部に斜めひび割れが発生すると回転角が増大し始めるが、上柱側と下柱側では回転角の大きさは等しくない。いいかえると、この試験体の場合には柱梁接合部の上下のフェースは平行を保っていないといえる。

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すると仮定して、実験においても対

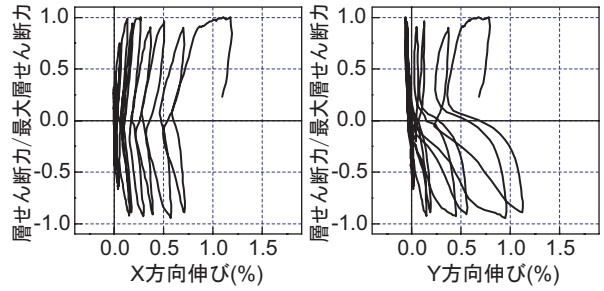


図-8 接合部の膨張

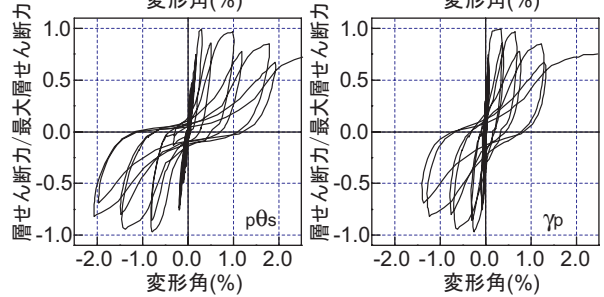
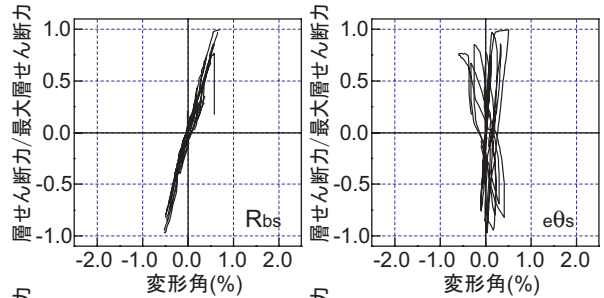


図-9 梁の変形角

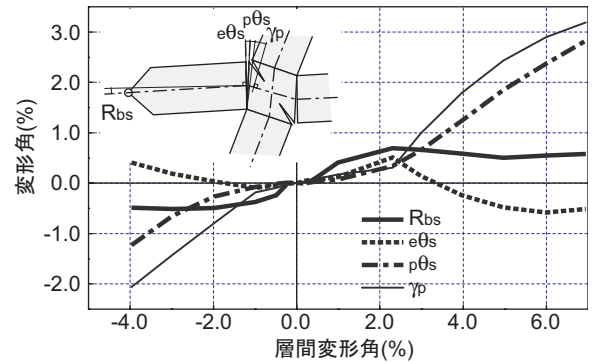


図-10 梁の変形角-層間変形角

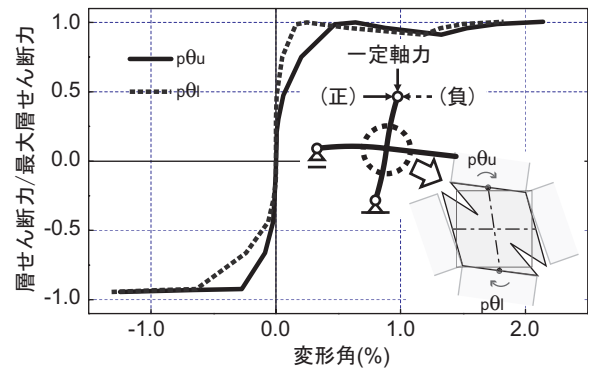


図-11 接合部上下面の回転角

角線方向の伸縮からせん断変形角を求めることが多いが、この例の試験体のように一様にせん断変形するという仮定が成り立たない場合もあることがわかる。

また、加力は上柱を左から右へ加力する場合が正方向で、**図-11**では正方向加力の場合に上柱側の回転角が大きく、負方向加力の場合には下柱側の回転角が大きくなっている。つまり、隣り合う梁との角度が開く場合のほうが閉じる場合に比べるとひび割れ後の剛性が小さいといえる。このようになる一因として、本例の試験体のような加力方法の場合、梁のせん断力の分だけ上下の柱で軸力が異なることが考えられる。

4.6 鉄筋の応力

図-12(a)(b)に歪ゲージにより測定した溝切鉄筋の歪度の例を示す。**図-12(d)**に示すように、試験体の加力方向に対して右側の鉄筋では歪ゲージ位置は溝を設けず全断面とすることで梁主筋降伏後もゲージ位置は弾性に保つようにし、鉄筋のヤング係数を乗じることで応力が測定できるようにした。一方、加力方向に対して左側の鉄筋では全長にわたって溝を設けて歪そのものを測定した。歪ゲージを貼付した位置は対称の位置であり、試験体にねじれがなければ同じ位置の歪と応力を測定していることになる。**図-12(c)**にこのようにして測定した応力度-歪度関係を示す。ここで得られた応力度-歪度関係は、一般的にいわれている鉄筋のそれと比較しても近いものであり、本方法は十分な精度を有しているといえる。

5. まとめ

計12の自由度からなる柱梁接合部の4つのフェースの変位を測定する方法を示し、この変位をもとに接合部の変形をせん断変形と回転変形に分離し、さらに架構の変形としては柱・梁のたわみおよび部材端の回転に分離する方法を示した。また、長さ方向に溝を設けた鉄筋により鉄筋の降伏後も応力度-歪度関係を仮定することなく応力を求める方法を示した。

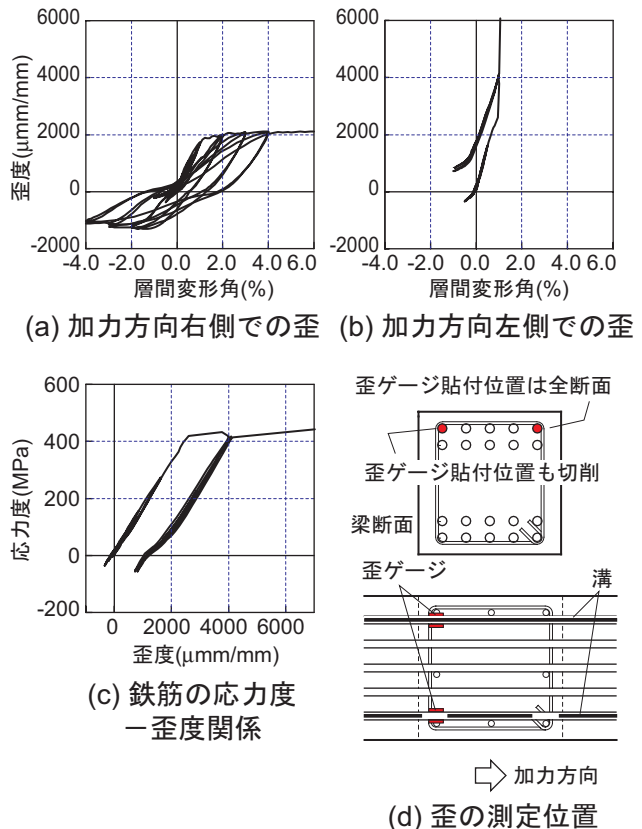


図-12 層間変形角-梁の変形角

これらの方法を実験に適用することで、柱梁接合部の膨張することや接合部パネル上下面は平行が保たれない場合があることなど、従来の測定法では無視されていた事象を明らかにすることができることを示した。

参考文献

- 1) Lowes, L. N. and A. Altoontash, Modeling the response of RC Building Beam-Column Joint Subjected to Earthquake Loading, Proceedings of 7NCEE, 2002.
- 2) 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, Vol.27, No.2, pp.421-426, 2005.7
- 3) 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
- 4) 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