

[2108] 2方向水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性

佐藤幸博*1・芳村学*2・津村浩三*3

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RC)柱の2方向復元力特性に関する既往の研究では、主に柱頭へ四葉型あるいは8字型といった強制変形を与える変形制御実験が行われた。その結果、2方向水平力を受けるRC柱の主軸方向の耐力は1方向加力のものに比べ低下する¹⁾²⁾こと、変形を一定に保つ方向の水平力がその直交方向の変形の増加に伴い低下するという、いわゆる2方向相関(相互作用)が存在する²⁾こと等が示され、‘力に関する2方向相関’の様子はある程度明らかにされた。しかしこれらの実験は、ごく僅かな例外³⁾を除きほとんどが2方向変形制御加力により行われたため、例えば、力が塑性力学でいう降伏曲面に到達した時に変形方向がどうなるか、という様な‘変形に関する2方向相関’の様子は明らかにされていない。

そこで本研究では、1方向の水平力を一定に制御した状態で、その直交方向へ変形制御により繰り返し加力を行うRC柱の実験を行い‘変形に関する2方向相関’の様子を考察した。

2. 試験体及び加力方法

試験体の断面詳細を図1に、構造諸元を表1に示す。試験体は、25cm×25cmの正方形断面及び37cm×25cmの長方形断面の二種類である。長方形断面は正方形断面のX方向せいのみ1.5倍とした形状である。曲げ性状が卓越するようにせん断スパン比(M/QD、Dは断面のせい)を大きくとり、更に配筋もせん断補強筋を十分に配してある。また、主筋の拔出しを防止するために十分な定着長さをとるようにした。

加力は片持ち柱形式で行い、1方向(Y方向)の力を一定に保ちながらもう1方向(X方向)へ変形制御により加力した。軸力は、P-Δ効果により現象が複雑なるのを避けるためゼロとした。加力方法を図2に示す。ファイバーモデル(材料の応力～歪関係、曲率分布等解析の説明は後出)による1方向解析の結果を図3に示す。ファイバーモデルによるY方向耐力約3.6tfの1/3、1/2、

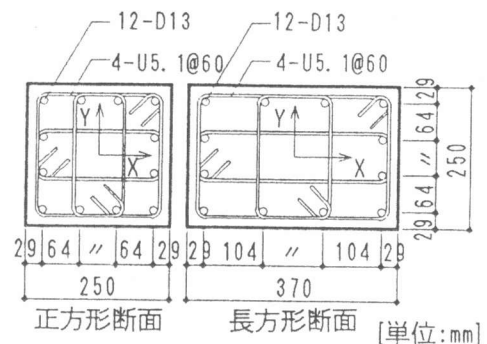


図1 断面詳細

表1 試験体一覧

試験体名	形状	Y方向一定水平力 [tf]	M/QD	主筋(12-D13)		横補強筋(4-U5.1@60)		コンクリート F _c [kgf/cm ²]
				P _g [%]	σ _y [kgf/cm ²]	P _w [%]	σ _{wy} [kgf/cm ²]	
S33	正方形	1.2 (1/3)*	6.40	2.43	3790 (E _s =1.88 × 10 ⁶)	0.52	14800	320 (E _c =2.14 × 10 ⁶)
S50		1.8 (1/2)						
R33	長方形	1.2 (1/3)	4.32 (X)	1.64	3790 (E _s =1.88 × 10 ⁶)	0.52 (X)	14800	320 (E _c =2.14 × 10 ⁶)
R50		1.8 (1/2)	6.40 (Y)			0.35 (Y)		
R67		2.4 (2/3)						

*()内は降伏耐力に対する比

*1東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2東京都立大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*3東京都立大学助手 工学部建築学科、工博 (正会員)

2/3の水平力をそれぞれY方向へ加える一定水平力とした。一定水平力に達するまではY方向への1方向加力とし、図3の○印はこの時の測定値である。表1の試験体名の最初の英文字は断面形状(正方形:S、長方形:R)、それに続く数字はY方向一定水平力の大きさ(降伏耐力の1/3、1/2、2/3)をそれぞれ表す。X方向へ与える変形履歴は、+①サイクル目で曲げ降伏が起こるように部材角1/100radまで加力し、以降は図4の変形履歴に従った。

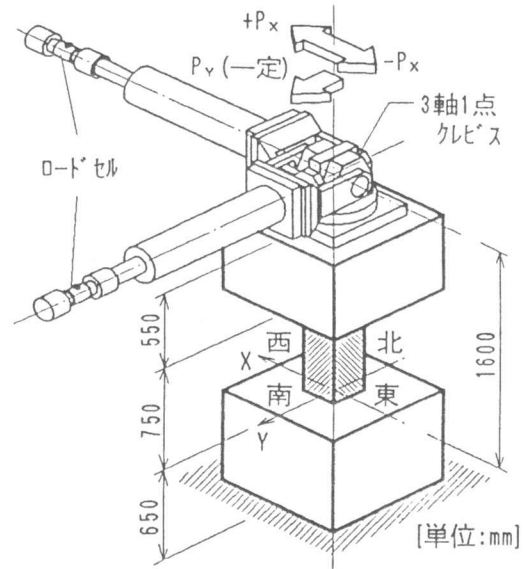


図2 加力方法

3. 実験結果及び考察

水平力と変形の関係を図5に示す(ここでは紙面の都合上R67は除く)。ここに、水平力はロードセルによる測定値(他方向水平力による影響を考慮し補正したもの)、変形は柱脚危険断面から625mm(2.5D)上部に取り付けた変位計による測定値を625mmで除したものの(部材角)である。細線で示したものがX方向、第4象限に太線で示したものがY方向の水平力と変形の関係である。なお、X方向変形-2/100rad以降で試験体により変形履歴が異なっているのは、加力装置の都合(加えることができる変形に制限がある)による。どの試験体も曲げ降伏し、その後も耐力低下のない安定した履歴性状を示している。また、Sシリーズ同士、Rシリーズ同士でX方向の水平力～変形関係を比べると、それぞれほぼ同じ履歴性状を示している。

+1/100radまでのX方向の水平力～変形曲線上で鉄筋が3、4本降伏し、剛性が急激に低下し始める点を降伏点と考え、

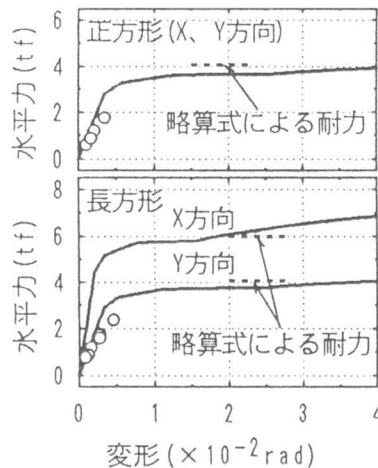


図3 1方向解析の結果

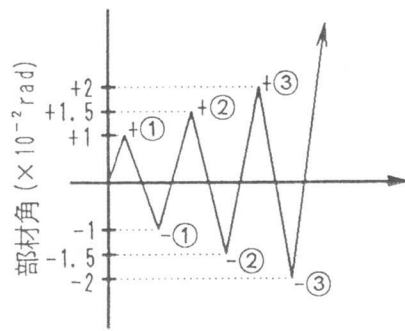


図4 X方向変形履歴

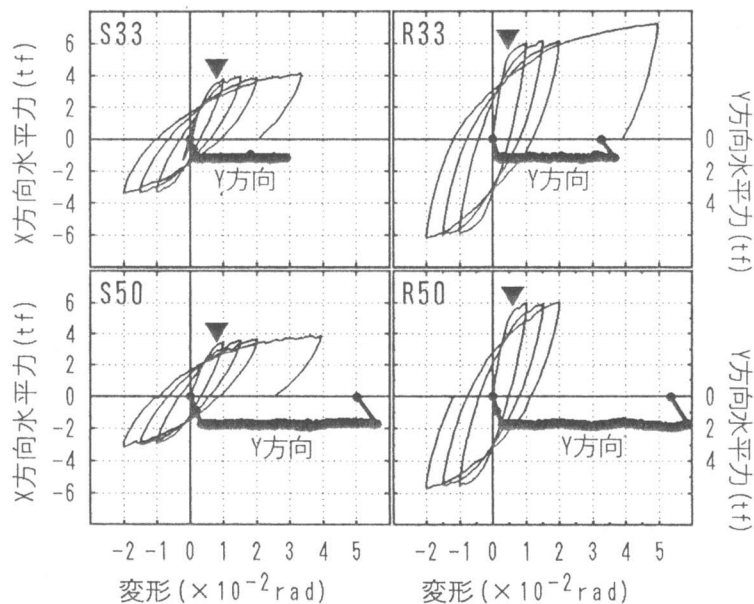


図5 水平力と変形の関係

▼で示す。各試験体の降伏水平力をY方向一定水平力に応じてプロットしたものを図6に示す。○印が正方形断面、△印が長方形断面であり、図中の円、楕円は図3で示した略算式による1方向耐力の計算値を基に描いた降伏曲面である。

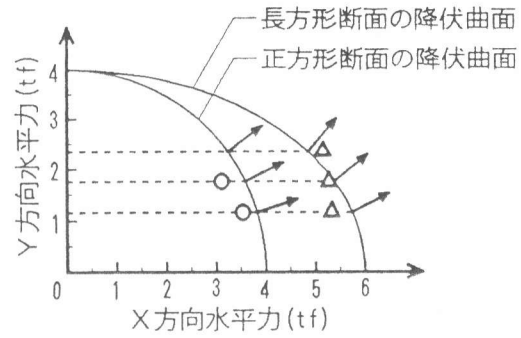


図6 水平力の2方向相関

X方向変形とY方向変形の間を関係を図7に示す。どの試験体もY方向の水平力を一定に保っているにもかかわらず、Y方向へ変形が進んでいる。同一のX方向変形時(例えば+2/100rad、●印)で、Sシリーズ同士を比べると、Y方向一定水平力の大きいS50の方がY方向変形が大きい。Rシリーズ同士の比較でも、同様の傾向が見られる。また、33シリーズ同士、50シリーズ同士を比べると、どちらも正方形(S)のものよりも長方形(R)のものの方がY方向変形が大きい。

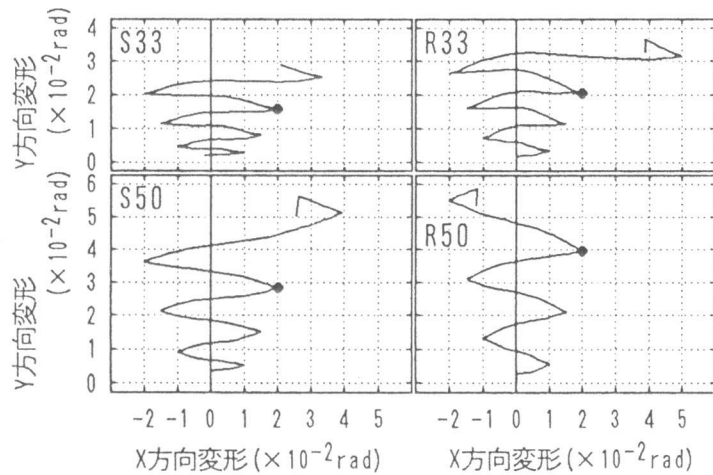


図7 X方向変形とY方向変形の関係

X方向変形+1/100radまでについての、X方向変形とY方向変形の関係、及びX方向変形とX方向変形増分に対するY方向変形増分(以下変形増分比)との関係を、図8にSシリーズ、Rシリーズ別に示す。図中の数字は危険断面での鉄筋の位置を表し、○で囲った場合は引張降伏を、囲ってない場合は圧縮降伏を表す。どの試験体も、鉄筋が1、2本引張降伏した辺りから変形がY方向へ急激に増加(変形増分比が急増)している。なお、鉄筋降伏以前の小さな変形時に変形増分比が大きい領域があるが、これについてはここでは触れない。また、同じ断面同士(S同士、R同士)ではY方向一定水平力が大きいほど、また同じY方向一定水平力同士(33同士、50同士)では正方形断面より

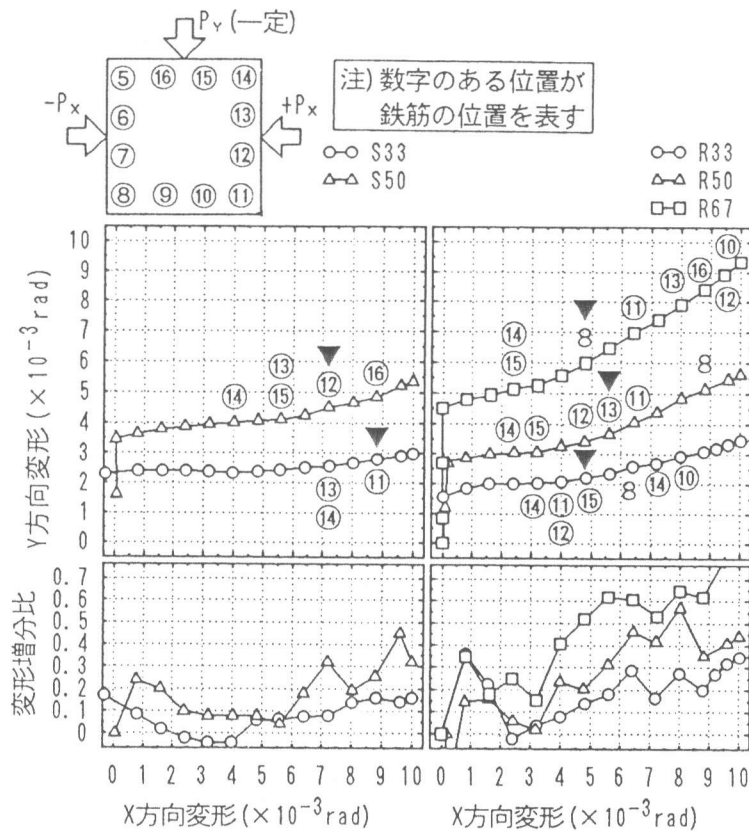


図8 X方向変形とY方向変形及び変形増分比の関係

長方形断面の方が、変形増分比が大きくなっている。

ここで、塑性力学に基づいた考察を行う。塑性力学によると、降伏曲面到達時の変形(正確には塑性変形)の増分方向は降伏曲面に対し垂直な方向となる(塑性流れ則)⁴⁾。図6に、降伏曲面を正方形断面の場合は円、長方形断面の場合は楕円とした時の変形の進み方を矢印で示す。同図より、同じ断面のもの同士ではY方向一定水平力が大きいほど変形方向がY方向へ傾く。またY方向耐力が同じ(円の直径と楕円の短辺が同じ)場合は、同じY方向一定水平力同士で比較すると長方形断面の方が正方形断面よりも変形方向はY方向へ傾くことになる。こういった現象が、本実験においても+①サイクル目で生じていたことが図8から明らかである。しかし一方、図7によると、各サイクルのX方向最大変形までの加力時ばかりでなく、最大変形からの除荷時にもY方向への変形が増加する傾向、及び繰返しを行った後の後半のサイクル時には、試験体によっては加力時に(最大変形直前でも)Y方向変形がほとんど増加しない傾向(33シリーズ)等、塑性力学では説明できない現象も生じている。このことも含め、次章でファイバーモデルを用いた解析により考察を行う。

4. ファイバーモデルによる変形方向の変化の考察

解析方法 ファイバーモデルは、平面保持の仮定により材料の応力～歪関係に基づいて断面でのモーメント～曲率関係を求める方法である。材料の応力～歪関係には図13に示すようなモデルを用いた。ファイバーモデルの一般的な手法⁵⁾を以下に簡単に述べる。図9に示すように、断面を多数の要素に分割し、その要素の断面中心からの距離をx、y、断面中心の歪増分を $\Delta \varepsilon_0$ 、各方向の曲率増分を $\Delta \phi_x$ 、 $\Delta \phi_y$ とすると、

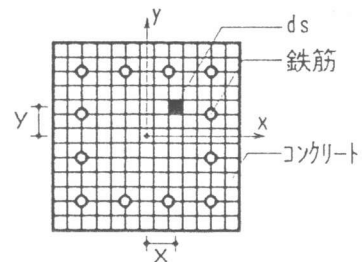


図9 断面分割

点(x, y)での歪増分 $\Delta \varepsilon$ は

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_0 + \Delta \phi_x \cdot x + \Delta \phi_y \cdot y \quad \dots \dots \dots (1)$$

両辺に要素の剛性 E_M をかけると、応力増分 $\Delta \sigma$ は

$$\Delta \sigma = E_M \cdot \Delta \varepsilon_0 + E_M \cdot \Delta \phi_x \cdot x + E_M \cdot \Delta \phi_y \cdot y \quad \dots \dots (2)$$

ここで ds を各要素の面積とし、

$$E = \int E_M \cdot ds, \quad E X = \int E_M \cdot x \cdot ds, \quad E Y = \int E_M \cdot y \cdot ds$$

$$E X^2 = \int E_M \cdot x^2 \cdot ds, \quad E Y^2 = \int E_M \cdot y^2 \cdot ds, \quad E X Y = \int E_M \cdot x \cdot y \cdot ds$$

とおくと、軸力増分 ΔN とモーメント増分 ΔM_x 、 ΔM_y は

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M_x \\ \Delta M_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E & E X & E Y \\ E X & E X^2 & E X Y \\ E Y & E X Y & E Y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_0 \\ \Delta \phi_x \\ \Delta \phi_y \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3)$$

で表せる。

このようにして求めた危険断面でのモーメント～曲率関係を、図10のような曲率分布を仮定して水平力と水平変形の関係に変換した。図10において、 l_d は曲率集中域の長さを表し、本解析では25cm(Y方向せいに等しい、約 $l/6$)、また係数 k は0.5とした。図3の1方向解析も全く同様の方法により行った。

解析結果及び考察 解析結果と実験結果の比較を図11に示す(ここではS50の+①サイクル目の加力時及び除荷時のみを示す)。この図は、X方向変形とX方向水平力、Y方向変形、変形増分比との関係をそれぞれ示したものである。図中の破線が実験値、○印が解析値である。この図より、解析は実験のおおよその傾向を捉えていると言える。すなわち、X方向変形～変形増分比関係において、①鉄筋が降伏する近辺で変形増分比が急増する領域(A)がある、②除荷時に変形増分比(の絶対値)が徐々に増加する領域(B)がある、こと等、変形増分比の変化の様子をかなり再現している。そこでこの解析により変形増分比の変化を考察する。

式(3)より $\Delta N = 0$ を用いて $\Delta \varepsilon_0$ を消去すると、

$$\begin{Bmatrix} \Delta M_x \\ \Delta M_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EX^2 - (EX)^2/E \\ EXY - EX \cdot EY/E \\ EXY - EX \cdot EY/E \\ EY^2 - (EY)^2/E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \phi_x \\ \Delta \phi_y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

更に $\Delta M_y = 0$ を用いて、 $\Delta \phi_y / \Delta \phi_x$ を求めると、曲率分布の仮定により柱頭での水平変形は危険断面での曲率の係数倍となっていることから、変形増分比は $\Delta \phi_y / \Delta \phi_x$ と等しくなり、

$$\text{変形増分比} = \frac{\Delta \phi_y}{\Delta \phi_x} = - \frac{EXY - EX \cdot EY/E}{EY^2 - (EY)^2/E} \quad (5)$$

(以降 $EXY - EX \cdot EY/E$ を $K12$ 、 $EY^2 - (EY)^2/E$ を $K22$ と呼ぶ)

と表せる。X方向変形と剛性マトリックスの主要な要素との関係を図12に示す。左側が加力時、右側が除荷時である。また材料剛性の変化とその位置関係について模式的に表したものを図13に示す。図12で、変形増分比が変化している(A)及び(B)では、 $K22$ には急激な変化はなく、 $K12$ のみが大きく変化している(上図)。このことから、変形増分比の変化を引き起こしているのは、 $K12$ の変化であると言える。また、変形増分比が急変している(A)で $K12$ が急変しているのは EXY の急変により(中図)、更にそれは鉄筋の EXY の急変による(下図)。つまり、(A)で変形増分比が急激に変化するのは、鉄筋の降伏により EXY が急減するためである(図13の⑬⑭⑮の鉄筋が引張降伏する)。また、(B)で $K12$ が増加しているのは(上図)、 EXY の増加により(中図)、これはコンクリートの EXY の増加による(下図)。つまり、(B)での変形増分比(の絶対値)の漸増は、図13の断面左上部分の(X方向加力により閉じていた)コンクリートのひび割れが徐々に開いていくことに起因している。

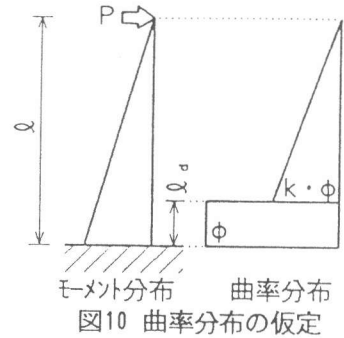


図10 曲率分布の仮定

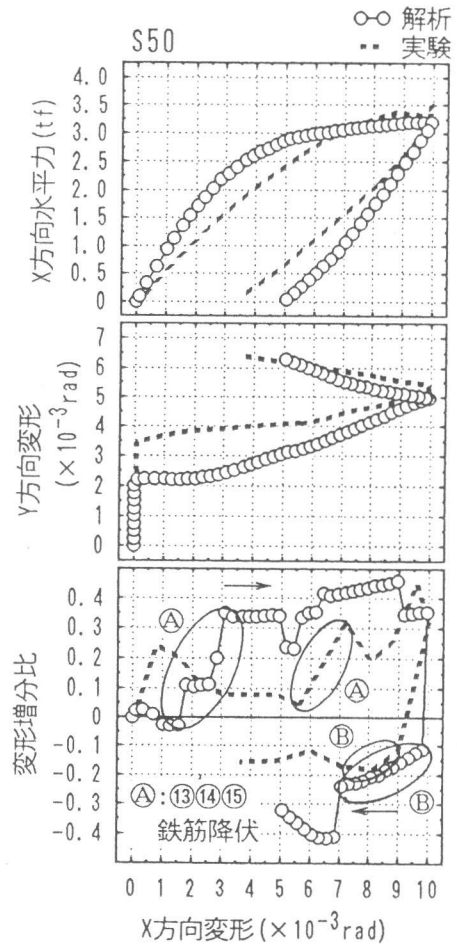


図11 解析と実験の比較

なお、ここでは紙面の都合により示さなかったが、33シリーズで加力時にY方向変形がほとんど増加しない現象は、開いていたひび割れが閉じることにより生じたものである。また、他の試験体についても同様の現象が生じ理由も同じである。

以上のように、変形増分比の変化は材料剛性の変化により説明でき、実験においても同様のことが生じていたものと考えられる。

5. まとめ

1 方向を一定水平力に保つ荷重制御、他方向を変形制御により加力するRC柱の実験及び関連する解析を行った結果、‘変形に関する2方向相関’について以下のようなことがわかった。

- ① 一定水平力方向の変形は、他方向への加力に伴い増加する。
- ② ①の増加量は、同じ断面同士の場合は一定水平力が大きいほど、また、同じ一定水平力同士の場合は正方形断面よりも長方形断面の方(変形を加える方向のせいが大きい方)が大きい。
- ③ 加力時に起こる一定水平力方向の変形の増加は、鉄筋の降伏に起因し、このことはファイバーモデル及び塑性力学における塑性流れ則により説明することができる。
- ④ 除荷時に起こる一定水平力方向の変形の増加は、コンクリートのひび割れが開くことに起因し、このことはファイバーモデルにより説明できる。

【参考文献】

- 1) 上原広、南宏一：繰返し2方向の曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱の復元力特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12, No. 2, pp. 375-380, 1990. 6
- 2) 辰巳佳裕、小谷俊介、青山博之：2方向水平力と大きな変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 3 6B, pp. 211-218, 1990. 3
- 3) 滝口克己、黒正清治、岡田謙二：鉄筋コンクリート柱の二軸曲げ実験、日本建築学会論文報告集、第229号、pp. 25-33, 1975. 3
- 4) 式部誠、河角誠、安達洋：コンクリート構造物の塑性解析、丸善、1985
- 5) 芳村学、青山博之、川村満：2方向外力を受ける鉄筋コンクリート構造物の解析 その1 2軸曲げを受けるRC柱の解析、日本建築学会論文報告集、第298号、pp. 31-41, 1980. 12

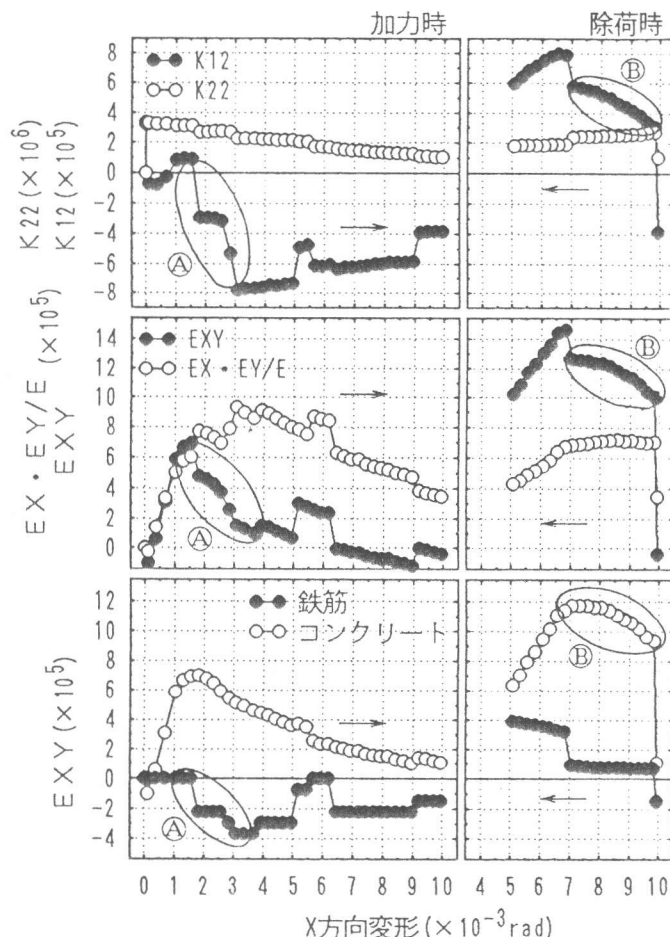


図12 剛性マトリックスの要素の変化

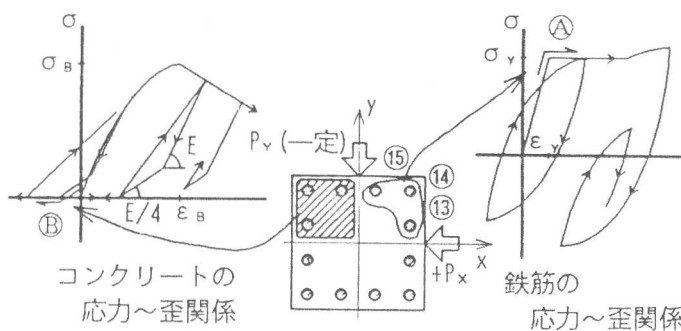


図13 材料剛性の変化とその位置関係