

論文 鉄筋コンクリート柱の3方向変形特性

黒田雄一*1・津村浩三*2・芳村学*3・吉田元*4

要旨:本研究では、軸力及び1(Y)方向水平力を一定とした状態で、その直交(X)方向へ繰り返し加力する鉄筋コンクリート柱の実験を行い、主に変形挙動に着目して考察した。その結果、①Y方向水平力を一定にしているにも拘らず、X方向への繰り返し加力によりY方向変形は増加すること、②軸方向変形は、X方向への繰り返し加力により、全体的にみて軸力比0.2の試験体は伸び挙動、軸力比0.4の試験体は縮み挙動を示すこと、③X方向-Y方向変形関係には塑性力学の塑性流れ則と同様な性質がみられること、等がわかった。

キーワード:3方向変形、降伏曲面、塑性流れ則、ファイバーモデル

1. はじめに

地震動を受ける骨組構造物中の内柱は、長期軸力とともに地震力の作用により2方向の曲げ・せん断力を受け、3軸の応力状態となる。こうした2方向水平力を受ける鉄筋コンクリート(以下RC)柱部材に関する既往の研究では、柱頭に四葉型あるいは8字型といった2方向強制変形を与える実験が行われ、①2方向水平力を受ける場合の主軸方向の耐力は1方向加力のものに比べて低下すること、②変形を一定に保つ方向の水平力はその直交方向の変形の増加に伴い低下すること、等が示され、「変形を与えたときの2方向復元力の様子」がある程度明らかにされた[1][2][3]。

しかし、ごく僅かな例外を除き[3][4]、ほとんどの実験が2方向変形制御で行われたため、降伏曲面到達後の水平変形の向きというような、「力を与えたときの2方向変形の様子」についてはほとんど判っていない。そこで、本研究では、軸力及び1(Y)方向水平力を一定に制御した状態でその直交(X)方向へ繰り返し加力するRC柱の実験を行い、軸方向変形も含めた「力に対する3方向変形の様子」について考察する。

2. 実験概要

2.1 試験体及び使用材料

試験体断面を図1に、構造諸元を表1に示す。試験体は40[cm]×40[cm]の正方形断面で、鉄筋及びコンクリートには普通強度のものを用いた。配筋は、せん断破壊を防ぐためにせん断補強筋を密に配し、主筋の拔出しを防止するために十分な定着長さを取るようにした。

実験パラメーターは、一定軸力及びY方向一定水平力の2つである。一定軸力は、軸力比 η 。(N/(bDFc))=0.2, 0.4に相当する80, 160[tf]とし、Y方向一定水平力は、試験体の一方向降伏耐力の約1/5, 2/5に相当する5, 10[tf]とした。一方向降伏耐力は、ファイバーモデルによる解析結果及び鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説に示された略算式で求めた値を参考にした。ファイバーモデルの解析で用いた材料の応力度-歪度関係は、コンクリートについては最大強度ま

*1 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻(正会員)
 *2 東京都立大学助手 工学部建築学科、工博(正会員)
 *3 東京都立大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)
 *4 東京都立大学学部生 工学部建築学科

で高次の関数、それ以降を直線で表すモデル、鉄筋についてはRamberg-Osgood関数と類似のモデルとし、曲率分布は図2のように仮定した[4]。ファイバーモデルによる解析結果を実線で、略算式により求めた降伏耐力を点線で図3に示す。ここで、変形は部材角[%]で表す。

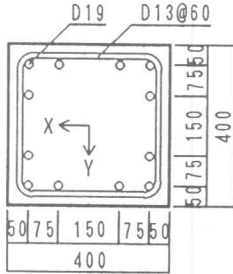


図1 断面図

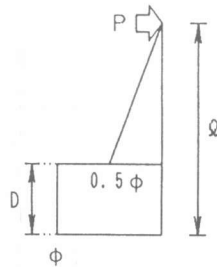


図2 曲率分布の仮定

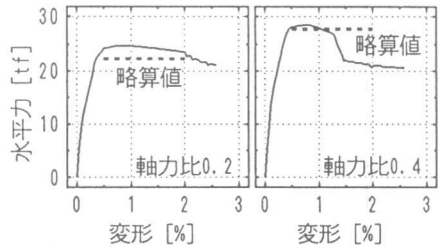


図3 1方向解析結果

表1 試験体一覧

試験体名	軸力 [tf]	Y方向一定水平力 [tf]	M/QD	主筋(12-D19)		横補強筋(2-D13@60)		コンクリート F _c [kgf/cm ²]
				P _r [%]	σ _y [kgf/cm ²]	P _w [%]	σ _y [kgf/cm ²]	
S 2 0 5	80.0(0.2)*1	5.0(1/5)*2	3.0	2.15	3820 E _s =1.91×10 ⁶	1.06	3540 E _s =1.83×10 ⁶	257 E _c *3=2.43×10 ⁵
S 4 0 5	160.0(0.4)	5.0(1/5)						
S 2 1 0	80.0(0.2)	10.0(2/5)						
S 4 1 0	160.0(0.4)	10.0(2/5)						

試験体名：Sは正方形断面、Sの後の数字は軸力比（2:0.2、4:0.4）、さらに続く数字はY方向一定水平力（0.5:5(tf)、1.0:10(tf)）を示す。
*1：()内は軸力比 ($\eta_o = N/bDf_c$) *2：()内は1方向降伏耐力に対する比 *3：E_cは1/3割線剛性

2. 2 加力方法

加力方法を図4に示す。加力は片持ち柱形式とし、軸力及びY方向水平力を一定に保ちながらX方向へ変形制御により繰り返し加力した。加力の順序は、一定軸力に達するまで軸力を加えた後、Y方向一定水平力に達するまで一方向荷重し、その後図5のパスに従いX方向へ繰り返し加力した。

2. 3 測定方法

軸力及び水平力はロードセルにより計測し、軸力及びY方向水平力は、これらの測定値により制御した。一定に制御する軸力及びY方向水平力の許容範囲は±0.5[tf]とした。水平変形は、西面及び南面の危険断面より700[mm]上方に取り付けた変位計により測定し、X方向変形はこの測定値を700[mm]で除した部材角により制御した。危険断面、その上約D(断面せい)の高さ、さらにその上0.75Dの高さで、西面及び南面では中心から左右125[mm]の位置に、北面では北東隅角部から内側75[mm]の位置にボルトを埋め込み、その間の鉛直変形を測定した。軸方向変形は、危険断面から1.75Dの区間について、計5箇所での鉛直変形データから最小自乗法により回帰的に求めた。

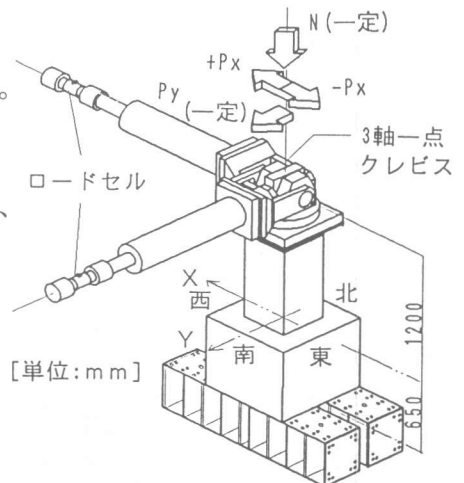


図4 加力方法

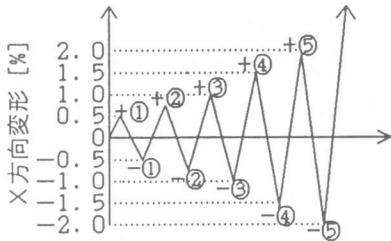


図5 X方向変形履歴

3. 実験結果及び考察

以下、X方向及びY方向変形を D_x 、 D_y 、X方向及びY方向水平力を P_x 、 P_y と表記する。

3. 1 水平力-変形関係

水平力と変形の間係を図6に示す。

水平力は軸力及び他方向水平力の影

響($P-\Delta$ 効果)を考慮し補正した値で、変形は部材角[%]である。ループを描いているものがX方向、第4象限に示したものがY方向の水平力と変形の間係である。 $P-\Delta$ 効果によりY方向水平力は徐々に増加するが、その量は所定の量に対して3サイクル終了時で最大6[%]程度、最終サイクル終了時で最大30[%]程度であった。主に降伏領域でみられる荷重の凹凸は軸力を許容範囲に制御する際に生じたものである。X方向の水平力-変形曲線上で鉄筋が4本以上降伏した点を降伏点と考え、▼で表す。▼は、S210では+2サイクル、それ以外の試験体では+3サイクルの加力時にみられる。

X方向降伏耐力(▼での P_x)は、軸力が同じ場合、Y方向一定水平力が大きいほど小さい。 P_x の耐力低下は、S205では5サイクル以降、その他の試験体では4サイクル以降で生じ始め、軸力及びY方向一定水平力が大きいほど、早い段階で始まり、その割合が大きい。略算式で求めた一方向降伏耐力を基に、正方形対称配筋断面の降伏曲面を円と仮定して描いた降伏曲面を図7に示す。図中にプロットした点は各試験体の降伏点であり、S410を除いてほぼ降伏曲面にのっている。

3. 2 Y方向変形

X方向変形とY方向変形の間係を図8に示す。図中の○は+3サイクルピーク時を示す。どの試験体も P_y を一定にしているにも拘らず、X方向の繰り返し加力に伴い D_y が増加している。また、 D_y は、X方向加力時に進み、S210の負側を除いて除荷時に進まない傾向を示している。+3サイクルピーク時の D_y の値を比較すると、降伏曲面が同じとなる軸力が同じ試験体では、Y方向一定水平力が大きいほど大きい(S210>S205, S410>S405)。

X方向水平力とY方向変形の間係を図9に示す。図中の点線は、降伏点の P_x を示す。 D_y は、 P_x が降伏耐力に達する以前ではほとんど増加しないが、降伏耐力近傍で(すなわち降伏曲面に

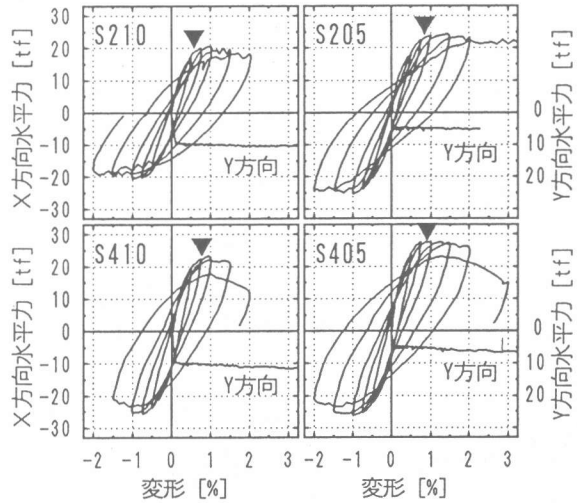


図6 水平力-変形関係

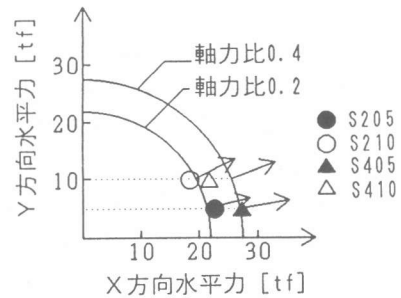


図7 X方向水平力-Y方向水平力降伏曲面

到達したときに)著しく増加している。なお、軸力の大きいS410とS405の最終サイクルで降伏耐力よりかなり低い荷重でDyが急増しているが、これは破壊にともなう耐力低下のためである。

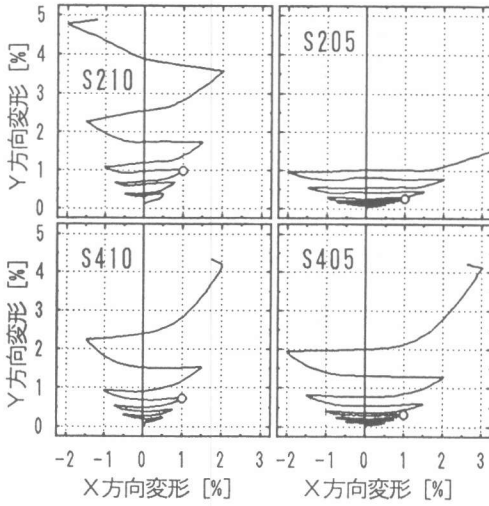


図8 X方向変形-Y方向変形関係

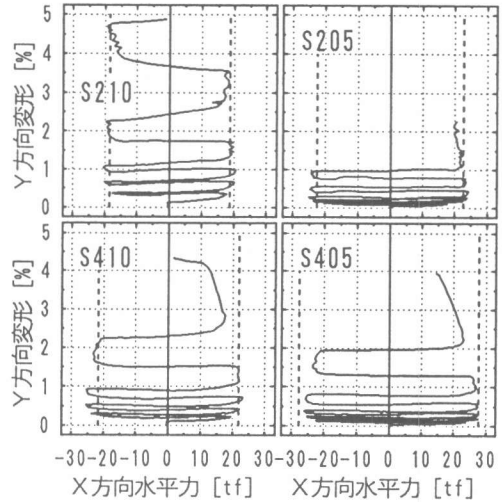


図9 X方向水平力-Y方向変形関係

各試験体とも最大耐力に達している+3サイクル加力時について、X方向変形とY方向変形の関係、及びX方向変形と各加力ステップでの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、Y方向一定水平力の大きさ別に図10に示す。ここで、変形増分比とはDx-Dy関係の傾きを表す。図中の▽は降伏点におけるDxである(以下降伏点Dx)。どの試験体も降伏点Dxあたりから変形増分比が大きくなっている。降伏点Dx以降の変形増分比を比較すると、軸力が同じ場合、Y方向一定水平力が大きいほど大きく(S210>S205, S410>S405)、Y方向一定水平力が同じ場合、ほぼ同じ値を示している(S210≒S410, S205≒S405)。

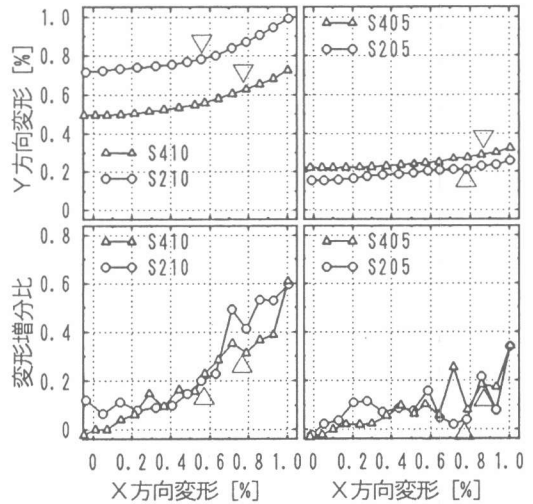


図10 X方向変形-Y方向変形及びX方向変形-変形増分比関係

塑性力学においては、降伏曲面到達後の塑性変形増分は降伏曲面に対して垂直方向を向くという塑性流れ則が仮定されている。図7に各試験体の曲面に対する法線方向を矢印で示した。軸力が同じ場合、Y方向一定水平力が大きいほど矢印の傾きが大きく、Y方向一定水平力が同じ場合、矢印の傾きの差は小さくなっている。このような矢印(塑性変形増分)の傾きに関する傾向は先にみた変形増分比の傾向と一致している。以上より、X方向-Y方向変形関係には塑性力学の塑性流れ則と同様の性質がみられる、といえる。

3. 3軸方向変形

X方向変形と軸方向変形の関係を伸び変形を正として図11に示す。図中の○は+3サイクルピー

ク時を示す。全体的にみると、X方向への繰り返し加力に伴い、軸力比0.2の試験体は伸び挙動を、軸力比0.4の試験体は縮み挙動を示している。軸力比が0.2の試験体では加力時に伸び、除荷時に縮む傾向があり、軸力比0.4の試験体では加力時に伸びる(X方向負側)が進まず(X方向正側)、除荷時に縮む傾向がある。軸力が同じ試験体について、軸方向変形の値を耐力低下が起こる前の+3サイクルピーク時と比較すると、ほぼ同じ値を示している(S210≒S205, S410≒S405)。しかし、耐力低下が起こる4サイクル以降では、X方向変形がゼロの時の軸方向変形の値をみると明らかのように、Y方向一定水平力が大きいほど軸方向変形の値(軸力比0.2では伸び、軸力比0.4では縮み)が大きくなっている(S210>S205, S410>S405)。

X方向水平力と軸方向変形の関係を図12に示す。図中の点線は降伏点の P_x を示す。加力時の降伏耐力近傍(降伏曲面到達時)での軸方向変形についてみると、軸力比0.2の試験体では伸び変形が増加し、軸力比0.4の試験体では4サイクル以降のX方向負側を除いて軸方向変形の変化量は小さい。

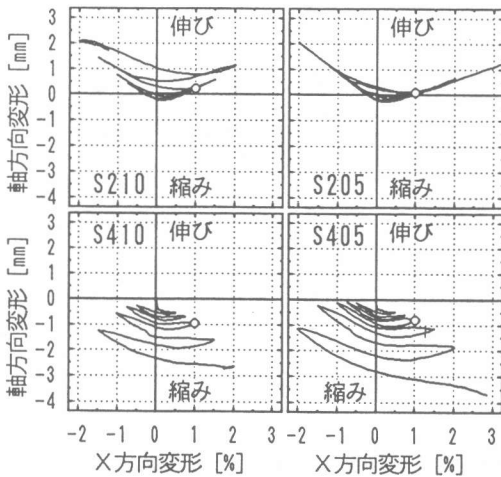


図11 X方向変形-軸方向変形関係

耐力低下の進展と共に現象が複雑となるため、ここでは、耐力低下が生じる前のサイクルに限定して考察を進めていく。+3サイクル加力時のX方向変形と軸方向変形の関係、及びX方向変形と各加力ステップでのX方向変形増分に対する軸方向変形増分(以下軸変形増分比)との関係を軸力比の大きさ別に図13に示す。ここで、軸変形増分比とは D_x -軸方向変形関係の傾きを表す。図中の▽は降伏点における D_x である(降伏点 D_x)。軸力が同じ試験体ではほぼ同じ挙動を示している。降伏

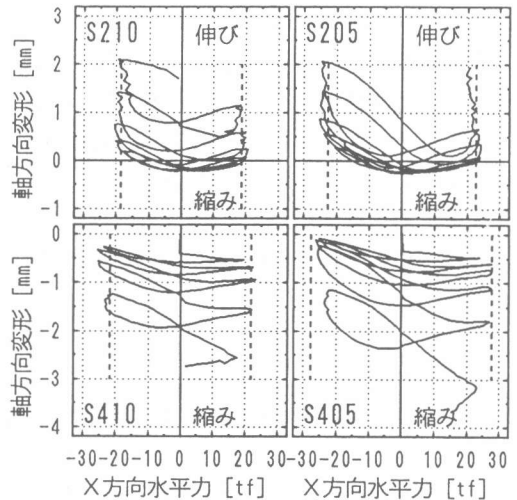


図12 X方向水平力-軸方向変形関係

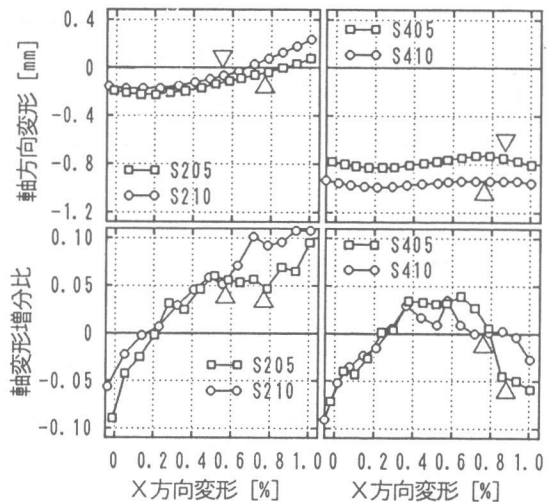


図13 X方向変形-軸方向変形及びX方向変形-軸変形増分比関係

点Dx前後からの変化を軸力比別にみると、軸力比0.2の試験体では軸方向変形が伸び、軸変形増分比は+0.05から+0.10へと大きくなっている(Dx-軸方向変形関係は正の傾きで値が大きい)。一方、軸力比0.4の試験体では軸方向変形の変化量が小さく、軸変形増分比はS410では+0.01から-0.03、S405では+0.03から-0.05へと変化している(Dx-軸方向変形関係は負の傾きで値は小さい)。

前述のファイバーモデルを用いて、各軸力レベルでY方向一定水平力を5[tf]あるいは10[tf]にした状態でX方向へ単調載荷する解析を行い、X方向水平力の最大値と軸力の関係を求め、図14に示す。横軸をX方向水平力、縦軸を圧縮軸力を正とする軸力比で表し、Y方向一定水平力の大きさ別に示す。このX方向水平力-軸力降伏曲面上で、塑性流れ則に従って描いた各試験体の曲面に対する法線方向を矢印で示す。図中にプロットした点は各試験体の降伏点である。降伏曲面到達後の矢印の向きは、軸力比0.2では軸方向変形が伸びる方向に、軸力比0.4では軸方向変形がほとんど進まない方向を示しており、この傾向は、降伏点Dx前後からの軸変形増分比の傾向とおおよそ対応している。以上より、耐力低下が起こる前のX方向-軸方向変形関係には塑性流れ則に対応する傾向がみられる、といえる。

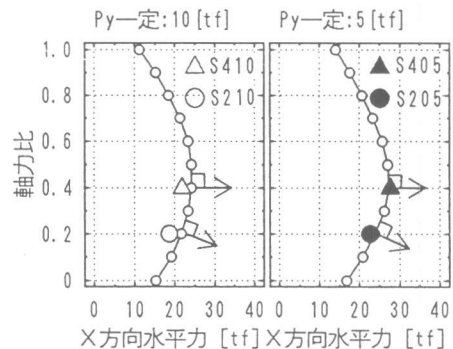


図14 X方向水平力-軸力降伏曲面

4. まとめ

軸力及び1(Y)方向水平力を一定に制御した状態でその直交(X)方向へ繰り返し加力するRC柱の実験を行った結果、以下のことがわかった。

- ① Y方向変形は、Y方向水平力を一定に制御しているにも拘らず、X方向への繰り返し加力にともない増加する。
- ② X方向-Y方向変形関係には、X方向水平力が降伏曲面に到達した時にY方向変形が増加する等、塑性力学の塑性流れ則と同様な性質がみられる。
- ③ 軸方向変形は、X方向への繰り返し加力にともない、軸力比0.2の試験体は伸び挙動を、軸力比0.4の試験体は縮み挙動を示す。
- ④ 耐力低下が起こる前のX方向-軸方向変形関係には、X方向水平力が降伏曲面に到達した時に軸方向変形が、軸力比0.2の試験体では伸び、軸力比0.4の試験体では進まない等、塑性流れ則に対応する傾向がみられる。

(参考文献)

- 1) 上原広、南宏一：繰り返し2方向曲げ・せん断を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 11、NO. 2、pp. 223-228、1989. 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. 36B、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) 佐藤幸博、芳村学、津村浩三：2方向水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 16、NO. 2、pp. 653-658、1994. 6