

論文

[2061] 3軸変動力を受ける高強度 RC 柱の靱性に及ぼす  
軸方向変形の影響

正会員○倉本 洋 (横浜国立大学建設学科)

正会員 申 範 昊 (横浜国立大学大学院)

正会員 壁谷澤寿海 (横浜国立大学建設学科)

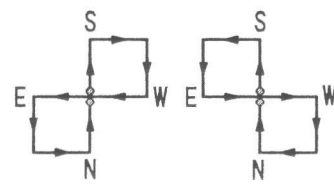
1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下、RC と略記) 柱において軸圧縮変形の進行が部材の耐震性能劣化の一因であることはよく知られており、最近では、部材靱性と軸方向変形に関連性を解析的に評価し、耐震設計法へ反映させようとする研究も行われてきている [1, 2]。現在までの研究成果のほとんどは一定軸力と 1 方向の曲げモーメントとせん断力を受ける RC 柱を対象として得られたものである。しかし、一般的には骨組構造物の柱部材は地震時において 2 方向の曲げモーメントとせん断力を受け、さらに隅柱、外柱では大きな変動軸力も併せて受ける。したがって、柱部材の設計において 2 軸あるいは 3 軸応力の相互作用の考慮は極めて重要な事項である。筆者らはこの点に着目し、高層 RC 造建物の下層階中柱、隅柱、外柱を対象とした 3 軸変動力載荷実験を行い、履歴性状、軸方向変形挙動等を明らかにした [3, 4]。本論では、それらの実験結果を参考にして行った曲げ解析結果より、部材靱性、軸方向変形に及ぼす 3 軸変動力 (特に、変動軸力) の影響を考察し、3 軸変動力を受ける RC 柱の設計に対する基本事項を検討する。

2. 実験結果の概要

文献 [3, 4] に示した 4 体の試験体の配筋、材料特性および作用軸力を表 1 に示す。試験体は全て同一形状であり、断面が 25cm × 25cm、柱長さが 100cm (せん断スパン比: 2.0) である。主筋は間隔を 6.4cm とし、4 面均等に 12 本配筋した。また、載荷履歴は図 1 に示すような四葉型履歴を採用し、作用軸力  $N$  は 初期軸力を  $N_0$  とし、 $NS$  および  $EW$  方向載荷時の作用せん断力  $Q_x$  および  $Q_y$  に比例して変動するものとした (表 1 の \* 参照)。

図 2 に各試験体の  $NS$  方向の荷重-変形曲線、および軸方向変形-水平変形 ( $NS$  および  $EW$  方向の水平変位の二乗和平方根で表示) 関係を示す。一定軸力を受ける試験体  $N-1$  では多量の横補強筋が配筋されているため、相対部材角  $R_x=0.03rad.$  の第一サイクルまでは耐力低下の認められない安定した履歴性状を示した。しかし、軸圧縮変形は水平変位の累積に比例して進行し、 $R_x=0.03rad.$  の第 1



(a) Path A (b) Path B  
図 1 載荷履歴

表 1 試験体特性

試験体	主筋配筋 $\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断補強筋配筋 $\sigma_{wv}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	コンクリート $\sigma_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	初期軸力 $N_0$ (tonf)	軸力係数* $F_x$ $F_y$
N-1	12-D13 ( $p_a=2.44%$ ) 7170	4-5 $\phi$ @40 ( $p_w=0.79%$ ) 13800	654	150	0 0
N-2				50	4 4
N-3		4-5 $\phi$ @60 ( $p_w=0.52%$ ) 13800	603	50	4 4
N-4				100	4 0

\*  $N = N_0 + F_x \cdot Q_x + F_y \cdot Q_y$  (N: 作用軸力、 $Q_x, Q_y$ : 作用せん断力)

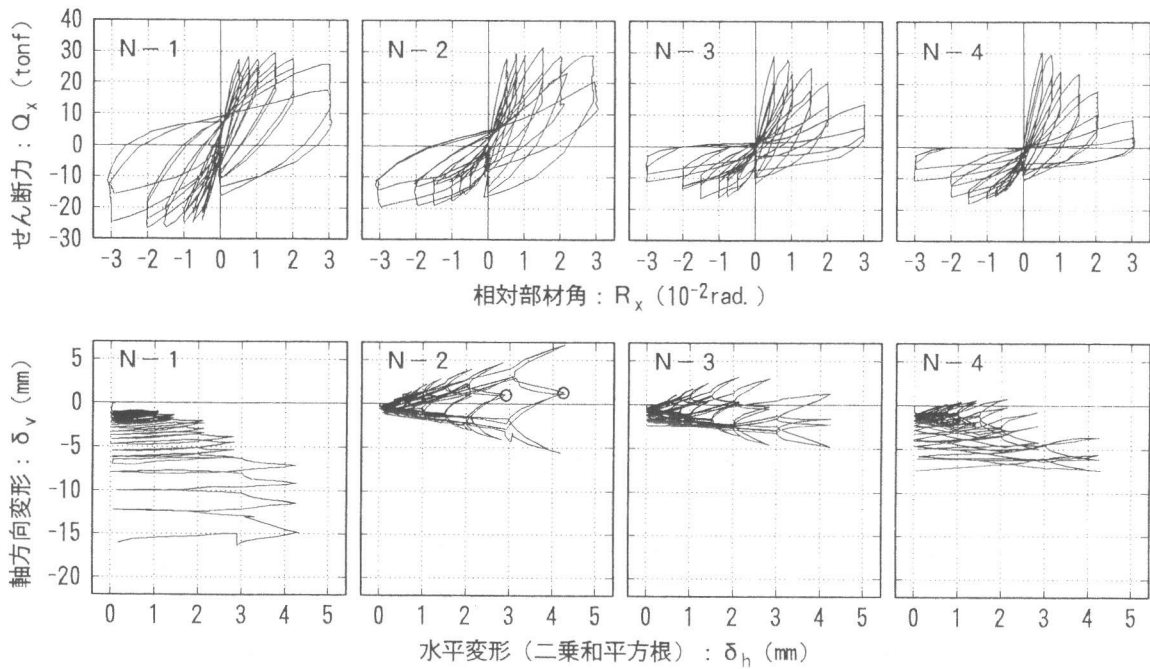


図2 実験結果

サイクル以降では急増しており、部材が耐力低下を生じた時点 ( $R_x=0.03\text{rad}$  の第2サイクル) とほぼ一致している。一方、変動軸力を受ける試験体N-2では最大圧縮軸力が250tonfを超えるにも拘らず、最終サイクルまで軸圧縮変形の急増は認められず、逆に初期軸力相当の軸力下 (図中の○印) では変位振幅の増加に伴い軸引張変形が増加している。また、軸方向変形に対応して履歴性状も最終サイクルまで安定したものとなっている。試験体N-3では、 $R_x=0.015\text{rad}$  以降において軸方向変形が引張側から圧縮側に変移する傾向が認められるが、試験体N-1に比べて横補強筋量が少なく、最大軸力レベルが大きいにも拘らず、軸圧縮変形はかなり小さい。また、試験体諸量が試験体N-3と同じで、NS方向載荷時のみ変動軸力を受ける試験体N-4では、軸圧縮変形の進行度合いが試験体N-3に比べて大きいものの、試験体N-1よりも小さい。履歴性状に関しては、試験体N-3、N-4共に軸方向変形が引張側から圧縮側に変移する変形量 ( $R_x=0.015\text{rad}$  程度) の前後で強度劣化が顕著となる傾向が認められる。なお、試験体N-3およびN-4では  $R_x=0.02\text{rad}$  以降でせん断ひび割れが伸展し、最終的には曲げせん断破壊の様相を呈しており、これらのことも各試験体の履歴性状を比較する上で考慮する必要がある。

以上の考察より、2軸あるいは3軸変動力を受けるRC柱の場合でも、既往の1方向曲げせん断実験結果[1, 2]と同様に軸圧縮変形の進行に伴い部材靱性が低下する傾向が認められる。また、本実験の範囲では、軸圧縮変形の進行度合いに対して、変動軸力レベルや横補強筋量よりもむしろ初期軸力レベルが大きく影響するようである。以下の節ではこの点も含めて、曲げ解析によって3軸変動力を受けるRC柱の軸方向変形挙動の解明を試みる。

### 3. 3軸変動力を受けるRC柱のモーメント-曲率解析

解析はコンクリートの引張応力負担を無視し、断面平面保持の仮定の下に、断面要素分割法を用いた剛性マトリックスによる増分型解析法による。解析断面は図3に示すように鉄筋と400分割されたコンクリートファイバー要素から構成されるものとし、カバーコンクリートとコアコンクリートの材料特性は異なるものとした。解析で考慮した基本式を示すと以下のようになる。

すなわち、図3において断面図心位置 $(X_0, Y_0)$ での軸ひずみ増分を $\Delta \varepsilon_0$ 、X軸およびY軸回りの回転に対する曲率増分を $\Delta \phi_x$ および $\Delta \phi_y$ とすると、要素 $(i, j)$ での軸ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{ij}$ は

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_0 + y_{ij} \cdot \Delta \phi_x + x_{ij} \cdot \Delta \phi_y \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $x_{ij}$ および $y_{ij}$ はそれぞれY軸およびX軸から要素 $(i, j)$ の図心位置までの距離

となる。また、力の釣合より、軸力増分 $\Delta N$ とX軸およびY軸に関するモーメント増分 $\Delta M_x$ および $\Delta M_y$ は剛性マトリックス [K] を用いて次式で表される。

$$\{\Delta N, \Delta M_x, \Delta M_y\}^T = [K] \{\Delta \varepsilon_0, \Delta \phi_x, \Delta \phi_y\}^T \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ただし、} \Delta N = 2(F_x \cdot \Delta M_x + F_y \cdot \Delta M_y) / L \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $F_x$  : X方向荷重時の変動軸力係数、 $F_y$  : Y方向荷重時の変動軸力係数、 $L$  : 部材長

本解析では  $\Delta \phi_x$  および  $\Delta \phi_y$  を入力値とし、上記(1)～(3)式と 鉄筋およびコンクリートの力学的特性を満足する  $\Delta M_x$ 、 $\Delta M_y$ 、 $\Delta N$  および  $\Delta \varepsilon_0$  を求めた。なお、材軸方向の曲率分布は曲げモーメント分布に比例するものとし、曲率と相対部材角の関係は  $\phi_i = 6 \cdot C_F \cdot R_i / L$  (ここに、 $i = X, Y$ ) と仮定した。ここで、 $C_F$  は主筋の抜け出しおよびせん断変形の影響等を考慮した係数であり、前述の実験結果を参考にし一律に  $C_F = 0.75$  とした。また、鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ履歴モデルは以下のように仮定した。

**鉄筋** : 鉄筋には柴田による区分線形のtri-linear型モデル[5]を使用した(図4)。なお、本解析では区間剛性  $E_{s1}$  および  $E_{s2}$  と補助直線の勾配  $C$  を文献[5]に従って、 $E_{s1} = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_{s2} = E_{s1} / 10$  および  $C = -E_{s1} / 200$  としたが、 $E_{s3}$  については 高強度鉄筋を解析対象にしていることを考慮して、 $E_{s3} = E_{s1} / 200$  とした(文献では  $E_{s3} = E_{s1} / 100$ )。

**コンクリート** : コンクリートの履歴ループは図5に示すような区分線形モデルとした。カバーコンクリートでは一軸圧縮試験結果に基づいて、 $E_{c1} = 1.6 \cdot \sigma_B / \varepsilon_0$  (ここで、 $\varepsilon_0$  は最大強度時のひずみ度であり、 $-0.0022$  とした)、 $E_{c2} = E_{c1} / 2$  および  $E_{c3} = E_{c1} / 5$  とした。一方、コアコンクリートでは  $E_{c1}$  および  $E_{c2}$  をそれぞれカバーコンクリートと同じとしたが、 $E_{c3}$  は 試験体N-1、N-2 で  $E_{c1} / 80$ 、および試験体N-3、N-4 で  $E_{c1} / 40$  とした。さらに、コアコンクリートではコンクリート強度上昇係数  $K$  を考慮し、試験体N-1、N-2 で  $K = 1.25$ 、および 試験体N-3、N-4 で  $K = 1.15$  とした。除荷剛性  $E_{c4}$  は カバーコンクリートおよびコアコンクリート共に、除荷点のひずみ度  $\varepsilon_R$  と応力度  $\sigma_B$  および除

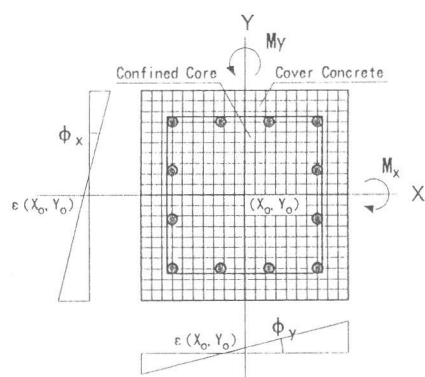


図3 解析断面

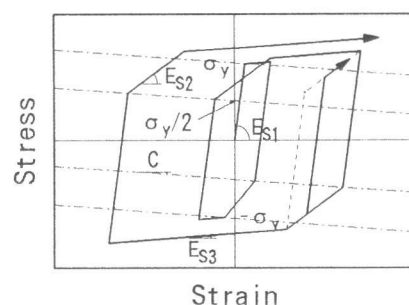


図4 鉄筋モデル

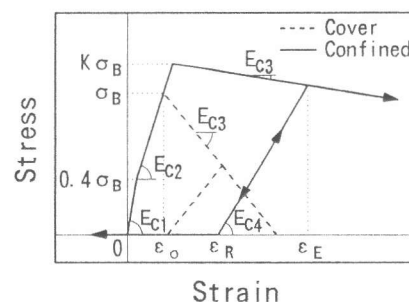


図5 コンクリートモデル

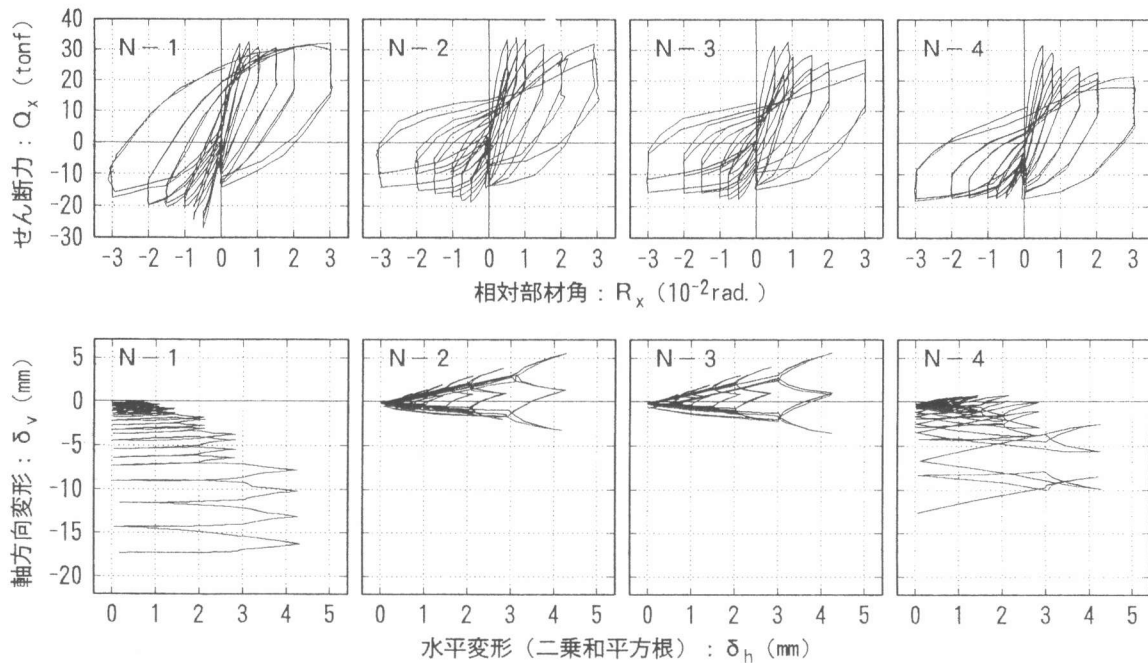


図6 解析結果

荷曲線とひずみ軸の交点におけるひずみ度（残留ひずみ） $\varepsilon_R$ によって、 $E_{C4} = \sigma_E / (\varepsilon_E - \varepsilon_R)$ で与えられるものとした。ただし、 $\varepsilon_R = 5 \cdot \varepsilon_E^{1.5}$ 、かつ  $|\varepsilon_R| \leq 4 \cdot |\varepsilon_E| / 5$ とした。

図6に各試験体に対するNS方向の荷重-変形曲線および軸方向変形-水平変形関係の解析結果を示す。同図は図2に示した実験結果と対応している。荷重-変形関係において、解析結果は $R_x = 0.015$ rad.以降のループの膨らみが大きいことを除けば、概ね実験結果と対応している。軸方向変形-水平変形関係に関しては、全試験体共に本解析によって実験結果を精度良く再現できている。なお、試験体N-3およびN-4において、荷重-変形関係および軸方向変形-水平変形関係共に、 $R_x = 0.02$ rad.以降の変位振幅で解析精度が低下しているのは前述した曲げせん断破壊の影響が大きいものと考えられる。

#### 4. 数値実験

前節ではファイバーモデルによる曲げ解析によって、3軸変動力を受けるRC柱の荷重変形履歴および軸方向変形挙動を概ね再現できることが示された。そこで、本節ではパラメトリック解析を実行し、部材靱性と軸方向変形の相互関係のより一般的な結論の導出を試みる。

表2に解析変数を示す。選択した解析変数は初期軸力 $N_0$ 、変動軸力係数 $F_x$ および $F_y$ 、およびコンクリートの応力下降剛性 $E_{c3}$ の4種類であり、Case A~Kの計11水準について解析した。なお、解析変数以外の諸量は試験体N-1と同じとした。

表2 解析変数

Case	$N_0$	$F_x$	$F_y$	$E_{c3}$	Case	$N_0$	$F_x$	$F_y$	$E_{c3}$	Case	$N_0$	$F_x$	$F_y$	$E_{c3}$
A	150	0	0	$E_{c1}/80$	B	150	4	0	$E_{c1}/80$	C	150	4	4	$E_{c1}/80$
D	50	0	0	$E_{c1}/80$	E	50	4	0	$E_{c1}/80$	F	50	4	4	$E_{c1}/80$
G	150	0	0	$E_{c1}/30$	H	150	4	0	$E_{c1}/30$	I	150	4	4	$E_{c1}/30$
J	150	2	2	$E_{c1}/80$	K	150	6	6	$E_{c1}/80$	—	—	—	—	

図7は、変動軸力係数のみが異なる3ケース：Case A～C（グループ1）、Case D～F（同2）、Case G～I（同3） およびCase C, J, K（同4）の4グループについての解析結果を示したものである。同図上段は軸方向変形－累積水平変形関係、および下段は各変位振幅の最大軸力時におけるコアコンクリートの最外圧縮縁ファイバーの応力度をそれぞれ表している。なお、上段図において○印で囲んだ数字は下段図の横軸の数値と対応している。これらの解析結果から得られた3軸変動力を受けるRC柱の軸方向変形挙動に関する知見は、以下のように要約できる。

- (1) 初期軸力が同一の場合、軸圧縮変形の進行度合いに及ぼす変動軸力の影響は少なく、むしろ変動軸力レベルが大きくなるほど、大変形時における軸圧縮変形量が少なくなる傾向がある。
- (2) 初期軸力レベルが高いほど、変動軸力を受ける部材の軸圧縮変形進行度合いが一定軸力を受けるものに比して小さくなる傾向がある（グループ1と2の比較）。
- (3) コンクリート応力下降剛性が低い（横補強筋量が少ない）ほど、一定軸力を受ける部材に対して、変動軸力を受けるものの軸圧縮変形進行度合いが小さくなる傾向がある（グループ1と3の比較）。
- (4) 変動軸力レベルが同一の場合には、初期軸力が小さく、コンクリート応力下降剛性が高いほど軸圧縮変形の進行度合いは小さくなる。
- (5) 初期軸力が同一の場合、各変位振幅の最大軸力時におけるコアコンクリートの最外圧縮縁ファイバーの応力度は、変動軸力レベルに拘らずほぼ一定の値を示す。すなわち、最大軸力時の圧縮縁ひずみは、変動軸力レベルの影響をあまり受けない。

上記の考察のうち、特に(5)の知見が興味深い。すなわち、最大軸力（変動軸力）レベルが高いにも拘らず、同一部材角で圧縮縁ひずみ度が一定（低）軸力を受ける部材と同程度であるということは、換言すれば、軸力差をコア中央部のコンクリート要素あるいは鉄筋要素で負担していることを意味する。図8および図9はこの点を明確にしたものであり、それぞれグループ1における各変位振幅の最大軸力時について、最外縁主筋と中間主筋の応力度（図8）、および鉄筋とコンクリートの総負担軸力（図9）を比較している。この図より、変動軸力を受けるRC柱の軸

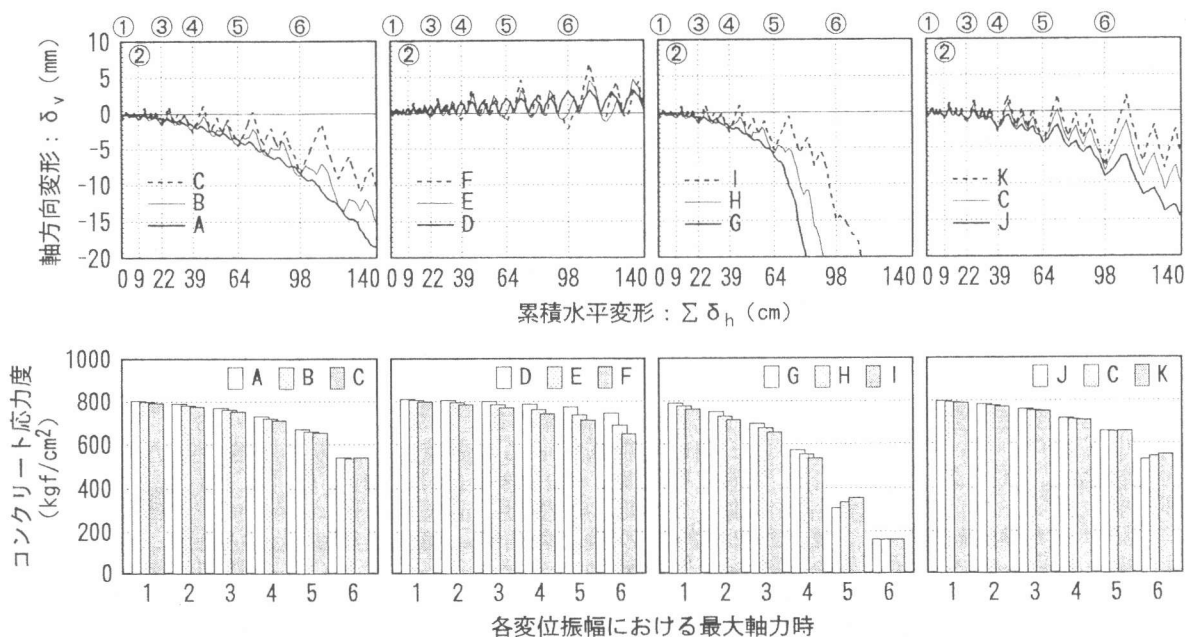


図7 軸方向変形－累積水平変形関係、およびコンクリートファイバーの応力負担推移状況

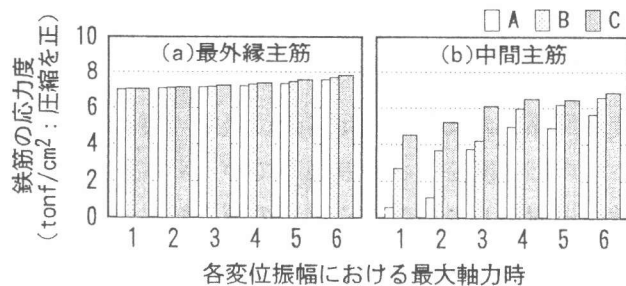


図8 主筋の応力負担推移状況

圧縮変形制御に中間主筋およびコア中央部のコンクリートが貢献していることが明確に認められる。

以上示したように、RC柱の軸圧縮変形挙動に及ぼす変動軸力による悪影響は少なく、むしろ変動軸力レベルが大きくなるほど、最大軸力時においてコア中央部のコンクリートおよび中間主筋が圧縮力を有効に負担し、結果として軸圧縮変形の進行を抑制する傾向がある。したがって、3軸変動力を受けるRC柱（隅柱、外柱）の設計において軸圧縮変形の影響を考慮する場合でも、基本的には初期（長期）軸力と2方向曲げせん断を受ける柱として設計しても、概ね安全側の設計となると予想される。なお、具体的な設計方法については今後の研究課題としたい。

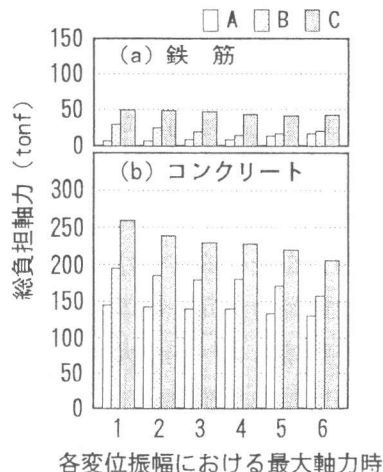


図9 各要素の負担軸力

## 5. まとめ

本論で得た主要な結論を以下に要約する。

- 1) 2軸あるいは3軸変動力を受ける高強度RC柱の場合でも、一定軸力と1方向曲げせん断を受ける柱と同様に軸圧縮変形の進行に伴い部材靱性が低下する。
- 2) RC柱の軸圧縮変形の進行に対して変動軸力レベルの及ぼす影響は少ない。
- 3) 初期軸力が大きく、横補強筋量が少ない柱ほど軸圧縮変形の進行度合いが大きい。
- 4) 中間主筋の配筋は変動軸力を受けるRC柱の軸圧縮変形制御に有効である。
- 5) 本研究の範囲では、隅柱、外柱に対して軸圧縮変形の影響を考慮した設計を行う場合、それらの長期軸力が作用する中柱として設計しても、概ね安全側の設計となると予想される。

## 【謝辞】

本研究は文部省科学研究費補助金総合研究(A)（代表者：東京大学 青山博之教授）の分担研究として行われたものである。

## 【参考文献】

- [1] 平石久廣、他7名：高強度鉄筋コンクリート造柱の高軸力下の変形性状（その1～6）、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、C 構造Ⅱ、1989.10、pp.755-766
- [2] 小谷俊介、境 有紀、青山博之：曲げ圧縮破壊する高強度コンクリートを用いたRC柱の変形性能、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻第2号、1991.6、pp.421-426
- [3] 申 範昊、李 康寧、壁谷澤寿海：3軸応力を受ける高強度鉄筋コンクリート造柱の挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻第2号、1991.6、pp.463-468
- [4] 申 範昊、倉本 洋、壁谷澤寿海：3軸変動力を受ける高強度RC柱の弾塑性挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、投稿中
- [5] Shibata M. : Analysis of Elastic-Plastic Behavior of a Steel Brace Subjected to Repeated Axial Force, International Journal of Solids and Structures, Vol.18, No.3, 1982.3, pp.217-228