

# 論文 鉄筋コンクリート柱の崩壊に対する鉛直動の影響

中村 孝也<sup>\*1</sup>・芳村 学<sup>\*2</sup>

**要旨:** 本論ではピロティ形式の鉄筋コンクリート造建物の最下層柱を想定して、多質点系モデルを用いた水平・鉛直の2方向地動に対するファイバーモデル解析によって、鉛直動が柱の崩壊に及ぼす影響を検討した。その結果、損傷が大きい範囲では柱の軸力比が大きいほど鉛直地動が応答に与える影響が大きいことがわかった。また、鉛直地動の原記録の中から大きな加速度を持つ部分を取り出して解析した結果、大きな水平変形のピークで大きな鉛直動が作用するとその方向への変形が進み、その後の応答に大きく影響することがわかった。

**キーワード:** ファイバーモデル、多質点系、柱崩壊、鉛直動

## 1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震において、鉄筋コンクリート造建物の最下層が崩壊し、倒壊した深刻な例が多く見られた。建物の柱崩壊に伴う層崩壊は、人命への危険が大きな破壊形式であり、大地震が発生した場合でも層崩壊が生じないように耐震設計を行う必要がある。しかしながら、このような最下層の崩壊に対する鉛直動の影響は未だはっきりわからないのが現状である。本論では、柱崩壊に伴うコンクリートの圧壊を考慮できるファイバーモデルを用いて、水平および上下地震動を受ける鉄筋コンクリート柱の崩壊過程における鉛直動の影響を検討する。従来このような検討は、多層建物を1質点系に置換したモデルによって検討されているが<sup>1),2),3)</sup>、本論ではより現状に近い解析を行うために多質点系モデルを用いた。

## 2. 解析手法

### 2.1 解析モデル

兵庫県南部地震の際に最下層崩壊が生じたピロティ形式のRC造7階建て建物を参考としたモデルを用いて、弾塑性地震応答解析を行う。

解析に際しては、図-1に示すように、1層を

柱頭での水平1方向変形と鉛直変形の2自由度を有するファイバーモデルで表し、2層から7層までは弾性体であると仮定して水平1方向、鉛直方向ともに弾性パネで表す7質点系14自由度系にモデル化する。階高はいずれの層も300(cm)とする。1層においては、逆対称曲げモーメントを受ける両端(回転)固定の曲げ降伏型柱を対象とする。

運動方程式中に  
は定軸力を外力項  
として組み込み、  
また、定軸力によ  
るp-△効果を復元  
力項に考慮する<sup>2)</sup>。  
なお、ピロティ建  
物で問題となる転  
倒曲げによる変動  
軸力は考慮してい  
ない。減衰は初期  
剛性比例型とし、  
鉛直、水平方向と  
もに減衰定数1%  
とする。

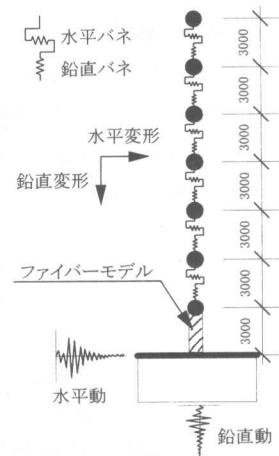


図-1 解析モデル

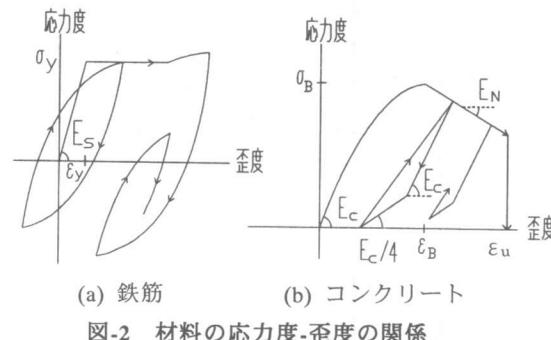
\*1 東京都立大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 修士(工学) (正会員)

\*2 東京都立大学大学院教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)

## 2.2 ファイバーモデル解析

1層部分の柱頭変形に関する瞬間剛性マトリクス（増分形式での水平変形・鉛直変形と水平力・鉛直力の関係）は、材料の応力度一歪度関係と平面保持の仮定に基づくファイバーモデルを用いて算出する<sup>2)</sup>。

鉄筋の応力度一歪度関係には図-2 (a)に示す歪硬化とバウジング効果を表現できるRamberg-Osgood関数と類似のモデルを用いる<sup>4)</sup>。ただし、軸崩壊を含む大変形時に予想される鉄筋の破断や座屈は考慮しない。また、コンクリートの応力度一歪度関係には図-2 (b)に示す青山・藤井によるルールを用いる<sup>4)</sup>。



### 3. 解析対象

1層柱断面を図-3に示す。85(cm)×85(cm)の正方形断面で、主筋は32-D25 (SD345)、フープは4-D16@100 (SD295A)である。仮定した材料の定数を表-1に示す（記号の意味については図-2参照）。コアコンクリートに関する値は、フープによる拘束効果を考慮して求めた<sup>5)</sup>。

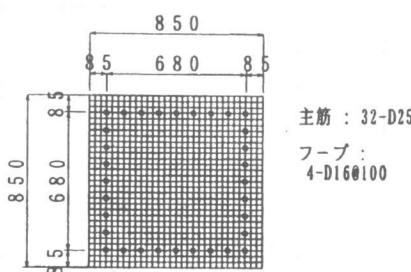


図-3 1層柱断面

表-1 材料の性質

(a) 鉄筋

$E_S$	$\sigma_y$
206000	378

引張、圧縮で同一

(b) コンクリート

	$E_C$	$\sigma_B$	$\epsilon_B(\%)$	$E_N$	$\epsilon_u(\%)$
カバー	20600	20.6	0.20	-2060	0.40
コア	20600	23.1	0.22	-766	2.63

$E_S$ ,  $\sigma_y$ ,  $E_C$ ,  $\sigma_B$ ,  $E_N$  の単位は(MPa)

各層の剛性分布を表-2に示す。1層の剛性を柱断面性状から求め、2層以上の剛性分布は、1層がピロティであることを考慮して2層の剛性を1層の2倍、7層の剛性を2層の0.7倍として、その中間の層は直線補間して求めた。

表-2 剛性分布

層	鉛直方向 (kN/cm)	水平方向 (kN/cm)	比率
7	254908	7174	0.70
6	276762	7791	0.76
5	298616	8408	0.82
4	320460	9026	0.88
3	342304	9643	0.94
2	364158	10251	1.00
1	182084	5125	0.50

1層の長期軸力として、実状に近い値である軸力比0.2, 0.3のほか、変動軸力を間接的に考慮した場合に相当する軸力比0.4を設定した。軸力比により全層の重量が求まり、各層の重量は同一と仮定して全層の重量を層数で除することにより求めた。重量と剛性から固有周期を求めた。また、全層の重量と、1層部分の曲げ耐力からベースシア係数を求めた。これらをまとめたものを表-3に示す。ここで、固有周期は1次の値のみを示す。表-3より、固有周期、ベースシア係数が現実的な範囲の値となっていることがわかる。なお、全層の重量が1層柱に定軸力として作用する。また、軸力比が大きくなるほど全重量が大きくなるため、ベースシア係数は小さくなる。

表-3 構造諸元

	軸力比 0.2	軸力比 0.3	軸力比 0.4
全層の重量(kN)	2969	4459	5949
各層の重量(kN)	424	637	850
1層曲げ耐力(kN)	1784	1901	1960
ベースシア係数	0.60	0.43	0.33
鉛直固有周期(sec)	0.038	0.047	0.054
水平固有周期(sec)	0.226	0.277	0.320

#### 4. 地震応答解析

##### 4.1 入力地震動

入力地震動として、図-4に示す神戸海洋気象台記録の NS 成分（水平方向）および UD 成分（鉛直方向）を用いる。解析に際しては、損傷の程度を調節するために NS 成分を係数倍して用いる。UD 成分は、重力加速度 980(gal)に対してアリティーを持たせるために原記録と同じ大きさで用いる。

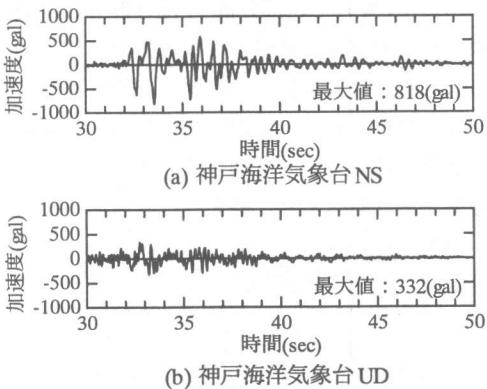


図-4 入力地震動（原記録）

##### 4.2 鉛直動の影響

軸力比 0.2, 0.3 および 0.4 の場合について、水平動のみを入力した場合に、残存耐力（最大耐力に対する地震終了時の水平耐力の比）がそれぞれ約 80%, 約 60% および約 40% となるように水平動の大きさを決めた。本論では、残存耐力約 40% が「崩壊」に相当するような大きな損傷を受けた場合であると考える。鉛直動が応答に与える影響を考察するために、それぞれのケースについて係数倍した水平動を用いて、水平動のみを入力した場合（NS のみ）と、水平動

および鉛直動を入力した場合（NS+UD）の応答を比較する。なお、本論では 1 層部分の応答値のみを検討の対象とする。

例として、軸力比 0.3, 残存耐力約 40% の場合の 1 層の応答を図-5 に示す。この場合、入力した水平動は原記録の 0.61 倍である。ここで、鉛直力は、定軸力と、振動によって鉛直方向に受ける力を足し合わせたものであり、実際にその柱が受ける鉛直方向の力を表している。また、鉛直変形では負の値が縮み、鉛直力では負の値が圧縮であることを示している。水平変形、鉛直変形、鉛直力は、いずれも鉛直動を考慮した場合の方が応答が大きくなり、鉛直動の影響があることがわかる。鉛直力については、鉛直動を考慮した場合には、定軸力 4559(kN) に比べて大きな 6000(kN) 程度の力がたびたび作用していることがわかる。

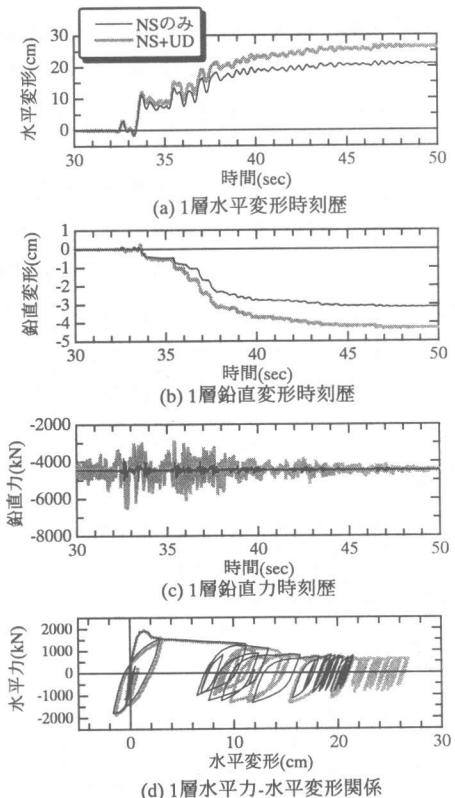


図-5 1層についての応答（軸力比 0.3）

表-4 鉛直動を考慮しない場合と考慮する場合の応答（最大値）の比較

		残存耐力約 80%		残存耐力約 60%		残存耐力約 40%	
		NS のみ	NS+UD	NS のみ	NS+UD	NS のみ	NS+UD
軸力比 0.2	NS 成分倍率	0.61		0.99		1.03	
	水平変形(%)	1.02	1.02	7.06	7.72	9.73	11.07
	鉛直変形(cm)	0.20	0.27	1.18	1.62	2.37	2.89
軸力比 0.3	NS 成分倍率	0.31		0.55		0.61	
	水平変形(%)	0.63	0.72	3.11	2.98	7.16	8.93
	鉛直変形(cm)	0.09	0.19	0.70	0.84	3.15	4.31
軸力比 0.4	NS 成分倍率	0.33		0.36		0.37	
	水平変形(%)	1.00	0.76	1.67	2.17	2.94	4.45
	鉛直変形(cm)	0.15	0.18	0.55	1.05	1.43	2.71

解析した 9 ケースについて、入力した水平動の倍率、鉛直動を考慮しない場合と考慮する場合の水平および鉛直変形の最大値を表-4 にそれぞれ示す。また、鉛直変形の最大値について、鉛直動を考慮しない場合に対する鉛直動を考慮した場合の鉛直縮みの増加量を図-6 に示す。表-4、図-6 より、柱の損傷が小さい残存耐力約 80% の場合には、NS のみの場合と NS+UD の場合には水平変形、最大変形ともにごく微少な違いにとどまっており、鉛直動の影響はほとんどほとんどないといえる。それに対して、残存耐力約 80%、60% と柱の損傷が大きくなっていくにつれて、鉛直動の影響が出てくることがわかる。また、非常に損傷が激しい残存耐力 40% の場合には、軸力比が大きくなるにつれて鉛直動の影響が大きくなるといえる。ここで、軸力比 0.3、残存耐力 60% の場合および軸力比 0.4、残存耐力 80% の場合では、鉛直動を考慮した場合のほうが水平変形が小さく、必ずしも鉛直動によって損傷が進むとは限らないといえる。

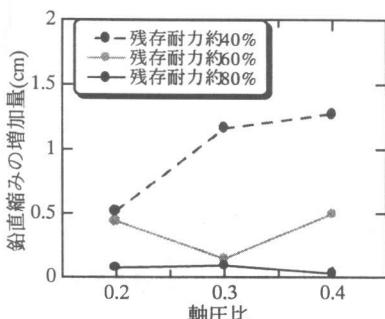


図-6 鉛直動が鉛直縮みに与える影響

#### 4.3 部分的な鉛直動による検討

鉛直動が応答に与える影響をさらに詳しく検討するため、UD 成分の原記録から一部分を取り出した鉛直地動を用いて解析を行う。図-7 に示すように、柱を圧縮する方向に作用する成分のうち、最大加速度(332gal)を含む部分およびその次に大きな加速度(288gal)含む部分を取り出して、それぞれ部分波 1、部分波 2 とする。取り出す範囲は、波形がゼロ線とクロスしてから次にクロスするまでの間とし、それ以外の範囲ではゼロとした。圧縮方向に作用する鉛直成分を使うのは、軸力を増やす方向なので、柱の損傷により関係すると考えられるからである。

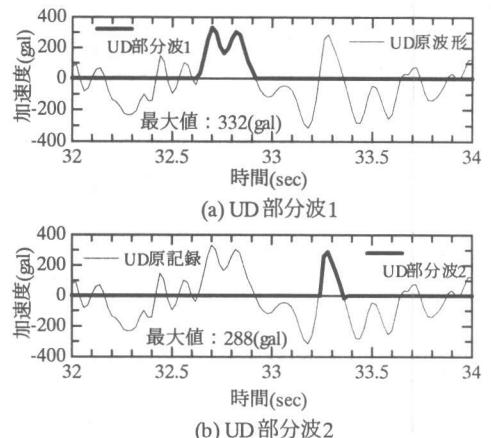


図-7 一部分を取り出した鉛直動

4.1 節で検討した 9 ケースのうち、最も損傷が激しい軸力比 0.4、残存耐力 40% の応答について、鉛直動として、UD 原記録、UD 部分波 1、UD 部分波 2 をそれぞれ入力した応答を、NS の

み入力して鉛直動を考慮しない場合と比較する。**図-8**に応答の時刻歴を示す。NSのみの場合と比較して、UD部分波1を入力したものは応答が大きくなり、UD部分波2を入力したものは応答が小さくなる。ここで、UD部分波1を入力したものは、UD原波形を入力した場合と同程度の応答になっており、この部分が鉛直動の損傷を増大させる成分の中で支配的な部分であると考えられる。

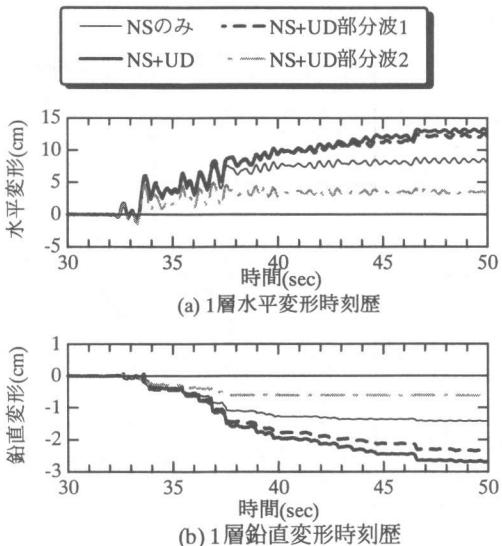


図-8 応答の時刻歴の比較

UD部分波1, 2は共に鉛直力を増加させる作用があるが、UD部分波1が応答を増大させて柱の崩壊を進めるのに対して、UD部分波2では応答が小さくなる。ここで、その原因を検討する。NSのみ入力した場合と、UD部分波1および2を入力した場合の応答の比較を一部の時間だけ取り出して、**図-9**、**図-10**にそれぞれ示す。**図-9(a)**、**図-10(a)**では、鉛直地動が作用し始める時刻と終了する時刻を縦の破線で示してある。

**図-9**より、UD部分波1を入力すると、鉛直動が作用した後に、鉛直動を考慮しない場合よりも水平変形が大きくなっていく様子がわかる。また、鉛直動は水平変形のピーク（正方向）の手前付近で作用し始めている。また、鉛直動が

作用することによって、鉛直変形が負方向（縮む方向）に進むが、**図-8(b)**より、鉛直動が作用し終わった後でも徐々に差が広がっていく様子がわかる。**図-9(b)**より、鉛直動が作用すると、作用しない場合よりも変形が進み、それに伴うコンクリートの耐力低下によって水平耐力が小さくなることがわかる。これが以後の応答に影響を及ぼし、鉛直動が作用し終わった後で徐々に応答の差が大きくなっていく原因であると考えられる。このUD部分波1が作用し始める時刻では、コンクリートが圧壊し始める現象がおこっており、このようにコンクリートが圧壊するような大きな水平変形が生じる時に、大きな圧縮方向の鉛直力が作用することが、鉛直動を考慮した場合に損傷が進む原因であるといえる。

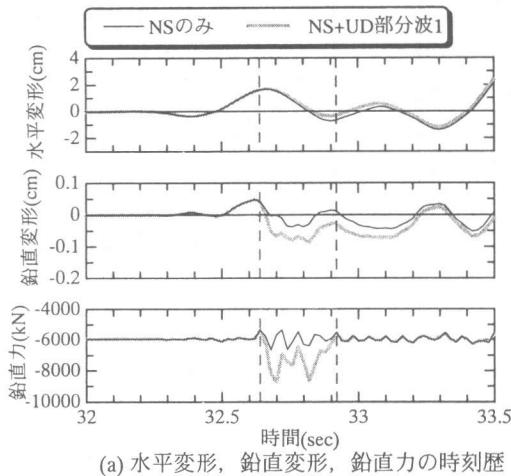
**図-10(a)**より、UD部分波2は、UD部分波1の場合とは逆向き（負方向）に水平変形のピークに近い部分で作用し始めていることがわかる。**図-10(b)**より、鉛直動の作用によって水平変形が進み、その分水平耐力が低下していることがわかる。ここでは、鉛直動を考慮しない場合にはコンクリートが圧壊しないのに対して、UD部分波2を入力した場合には大きな鉛直力の作用によってコンクリートが圧壊するという違いがある。水平変形の最大値は正方向で生じているが、負方向での耐力の低下が、正方向の応答を抑制するように働いたものと考えられる。

## 5. まとめ

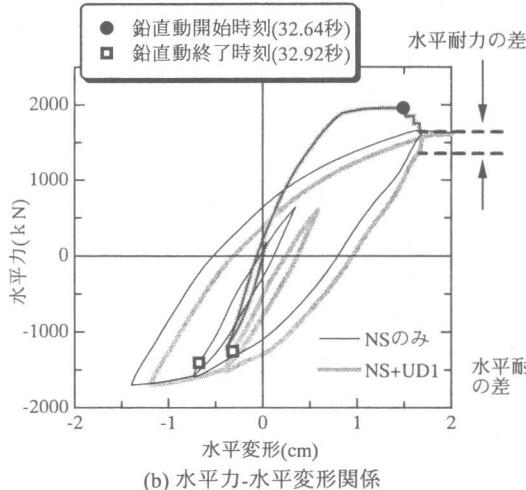
本論では、兵庫県南部地震で倒壊したRC建物を想定して、地震時における柱の応答に対する鉛直地動の影響を検討した。

得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 水平地動のレベルが小さく、応答が小さければ鉛直動による影響は小さいが、残存耐力が約40%となるような大きな損傷を受けた応答では、鉛直動の影響が大きい。また、その影響は軸力比が大きいほど顕著である。
- 2) コンクリートが圧壊するような大きな水平変形のピーク（最大変形が生じる方向）の



(a) 水平変形、鉛直変形、鉛直力の時刻歴



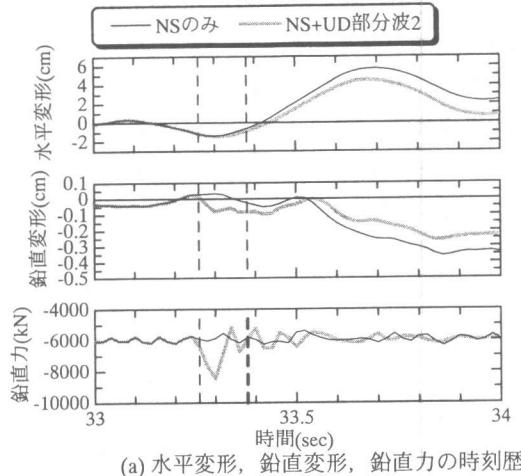
(b) 水平力-水平変形関係

図 9 NS のみ入力と UD 部分波 1 入力の比較

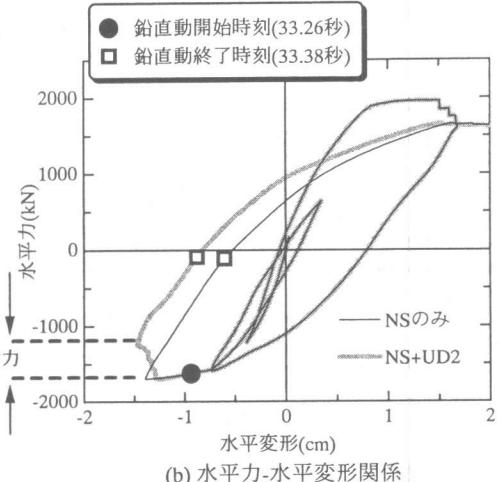
付近で、鉛直力を増加させる方向に大きな鉛直地動が作用した場合、鉛直動によって柱の損傷が進み、それ以降の応答に影響を及ぼす。ただし、鉛直動の作用によって必ずしも損傷が大きくなるとはいえず、最大変形が生じる方向と反対方向のピーク付近で大きな鉛直力が作用した場合には、最大応答を抑える効果があることもあり得る。

### 謝辞

本論を作成するに当たり、大学院生岩瀬英雄君の協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。



(a) 水平変形、鉛直変形、鉛直力の時刻歴



(b) 水平力-水平変形関係

図 10 NS のみ入力と UD 部分波 2 入力の比較

### 参考文献

- 1) 張 富明: 水平動と上下動を受ける 1 質点 2 自由度系の地震応答及び崩壊性状, 構造工学論文集, Vol. 42B, pp. 41-48, 1996. 3
- 2) 芳村 学, 山口 悟, 山中憲行: 鉄筋コンクリート柱の動的崩壊に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 1039-1044, 1998. 7
- 3) 竜 泰之, 芳村 学, 山中憲行: 鉛直動が RC 柱の崩壊に与える影響, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp. 815-816, 1999. 9
- 4) 藤井俊二, 青山博之, 梅村 魁: 材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 449-450, 1973. 10
- 5) Park, R., Priestley, N. and Gill, W : Ductility of Square-Confining Concrete Columns, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.929-950, April 1982