

論文 鉄筋コンクリート柱の動的崩壊に関する研究

芳村 学<sup>1</sup>・山口 悟<sup>2</sup>・山中憲行<sup>2</sup>

**要旨:** 兵庫県南部地震で数多く見られた鉄筋コンクリート柱の軸崩壊現象を採り上げ、曲げ降伏型のものを対象としたファイバーモデル解析により、軸崩壊に至るまでの地震応答の再現を試みた。水平・鉛直の2方向地動に対する解析を行った結果、1) コアコンクリートへの圧壊の進展が軸崩壊の引き金となること、2) 水平動による応答がコアコンクリートの圧壊以下に止まる場合には鉛直動の影響は小さいが、それを越える場合には鉛直動の影響が大きいこと、等が明らかになった。

**キーワード:** ファイバーモデル、軸崩壊、鉛直動、鉛直変形、圧壊率

1. はじめに

兵庫県南部地震では鉄筋コンクリート造建物に多大な被害が生じ、軸方向に完全に崩壊した柱も多数見られた。このような柱の軸崩壊は耐震安全上重大の問題であるが、実験・解析両面における研究上の困難さから、これまで十分な検討が行われてこなかった。また、この現象に関しては鉛直動の影響があったとも言われているが、実体はよく分からない。そこで本研究では、水平・鉛直の2方向地動を受ける鉄筋コンクリート柱の、軸崩壊に至るまでの地震応答の再現を試みた。曲げ降伏型の柱を対象とし、崩壊現象を扱う上で必須となるコンクリートの圧壊を考慮するために、解析方法としてファイバーモデルを用いることとした。

なお、上記テーマに関連する数少ない研究として文献1)があり、多層建物を対象とした等価1質点系に対する検討より、崩壊に相当するようなレベルの地震動を受ける場合には鉛直動の影響がある、ことが示されている。

2. 解析方法

2.1 基本的なモデル化

逆対称曲げモーメントを受ける両端（回転）固定の鉄筋コンクリート柱1本を検討対象とし、

これを、定軸力に相当する質量を持ち、柱頭での水平変形と鉛直変形の2自由度を有する1質点2自由度系にモデル化する（図-1）。地震動として水平動と鉛直動を考慮する。

運動方程式中に定軸力を組み込むために、式を以下の形式とし、

$$\begin{aligned} & \text{慣性力項} + \text{減衰力項} + \text{復元力項} \\ & + \text{外力項} = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

外力項の鉛直変形に対応する部分に定軸力の値を入れ、水平変形に対応する部分はゼロとする。また、定軸力によるP-Δ効果を復元力項に考慮する。

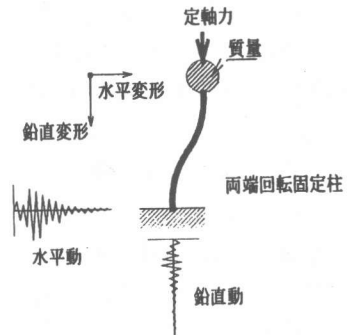


図-1 解析モデル

2.2 ファイバーモデル解析

柱頭変形に関する瞬間剛性マトリクス（増

<sup>1</sup> 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）

<sup>2</sup> 東京都立大学大学院，工学研究科建築学専攻

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-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、以下により算出する。

まず、ファイバーモデルにより危険断面での瞬間剛性マトリクス  $K$  を定める。

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix} = K \begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_0 \\ \Delta \phi \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $\Delta$ :増分記号、 $N$ :鉛直力(定軸力と異なることに注意)、 $M$ :危険断面での曲げモーメント、 $\epsilon_0$ :危険断面での軸歪度、 $\phi$ :危険断面での曲率。



a) 軸歪度分布      b) 曲率分布  
図-2 変形分布の仮定

次に、材軸に沿う軸歪度と曲率の分布を図-2のように仮定すると、危険断面での変形と柱頭での変形の関係は、

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_0 \\ \Delta \phi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/l & 0 \\ 0 & 6/l^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d_0 \\ \Delta D \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 $d_0$ :鉛直変形、 $D$ :水平変形、 $l$ :材長。また、柱頭での力と危険断面での力の関係は、

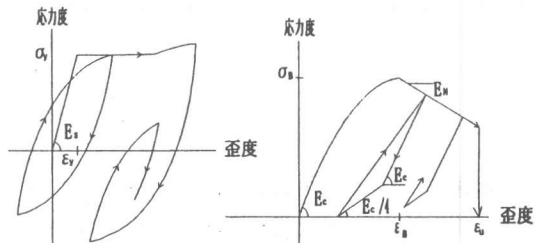
$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2/l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $P$ :水平力。

式(4)に式(2)、(3)を代入することにより、柱頭での瞬間剛性マトリクスを得る。

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta P \end{Bmatrix} = 3/l \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2/l \end{bmatrix} K \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2/l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d \\ \Delta D \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここで、柱頭での剛性マトリクスは、材軸に沿う変形分布の仮定から対称となっている。実際の計算では、 $P-\Delta$ 効果による柱頭での剛性マトリクスの補正を行う。



a) 鉄筋の履歴ルール    b) コンクリートの履歴ルール  
図-3 材料の応力度-歪度関係の仮定

鉄筋の応力度-歪度関係には図-3 a)に示す歪硬化とパウシンガー効果を表現できる Ramberg-Osgood 関数と類似のモデル<sup>2)</sup>を用いる。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-歪度関係には図-3 b)に示す青山・藤井によるルール<sup>2)</sup>を用いる。

### 3. 解析対象

図-4に示す85cm×85cmの正方形断面柱を解析対象とする。材長は400cmである。主筋は32-D25で、フープは4-D16@100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-3参照)。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た文献

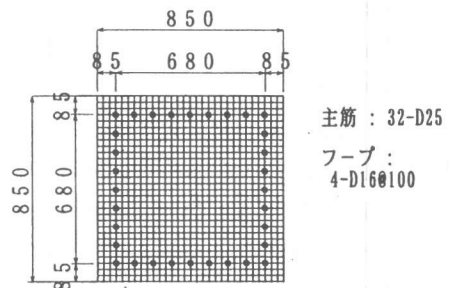


図-4 柱断面

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

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

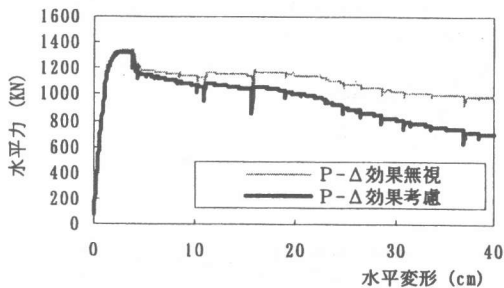
$E_s, \sigma_y, E_c, \sigma_B, E_N$ の単位は(MPa)

3)の方法により求めた。ファイバーモデルにおけるコンクリート断面の分割数は、図-4に示すように両方向にカバー部分6,コア部分24とした(計900要素)。

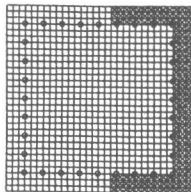
以後の解析では、定軸力として軸力比0.2と0.4を設定するが、そのときの柱の構造諸元を表-2に示す。曲げ耐力とせん断耐力は慣用式により求めた値であるが、いずれの軸力比の場合も曲げ降伏型となっている。同表より、降伏震度、水平周期、鉛直周期が現実的な範囲の値となっていることが分かる。

表-2 柱の構造諸元

軸力比	0.2	0.4
重量 (KN)	2980	5950
曲げ耐力 (KN)	1340	1600
降伏震度 (gal)	442	263
せん断耐力 (KN)	1650	1870
水平剛性 (KN/cm)	1680	1680
水平周期 (秒)	0.27	0.38
軸剛性 (KN/cm)	37200	37200
鉛直周期 (秒)	0.057	0.080

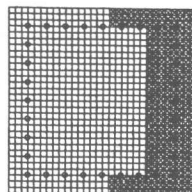


a) 水平力-水平変形関係



水平変形 20cm  
鉛直変形 0.344cm  
圧壊率 0.160

■ 圧壊部分



水平変形 30cm  
鉛直変形 -0.200cm  
圧壊率 0.280

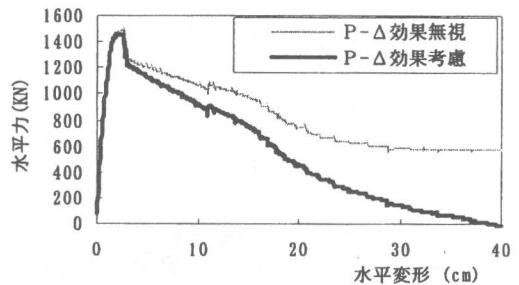
b) 圧壊の進展

図-5 静的解析  
(軸力比 0.2)

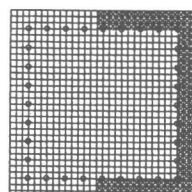
#### 4. 静的解析

予備検討として行った定軸力下での静的水平力漸増載荷解析における、水平力-水平変形関係とコンクリートの圧壊の進展を図-5, 6に示す。解析は水平変形が40cm(変形角10%)になるまで行った。圧壊の進展を示す図で、鉛直変形は縮みを負で表している。また、圧壊率はコンクリートの損傷程度を表す尺度として導入した指標で、コンクリート全要素数に対する圧壊要素数の比として定義した。なお参考のため、P-Δ効果を見無視した場合の水平力-水平変形関係も併せて示すが、以後の検討はすべてP-Δ効果を考慮した場合について行う。

軸力比が0.2の場合は水平力の低下が少なく、水平変形40cmのときでも最大強度の50%程度の耐力を有している。鉛直変形は、水平変形20cmでは伸びであるが、水平変形30cmでは縮みに転じている(図-5 b))。軸力比が0.4の場合は水平力の低下が激しく、最終時点では完全に水平耐力を失っている。鉛直変形は当初から縮みを示し、水平変形25cmでは2.26cm(平

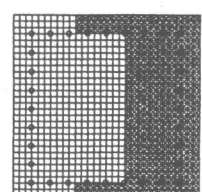


a) 水平力-水平変形関係



水平変形 15cm  
鉛直変形 -0.755cm  
圧壊率 0.187

■ 圧壊部分



水平変形 25cm  
鉛直変形 -2.26cm  
圧壊率 0.427

b) 圧壊の進展

図-6 静的解析  
(軸力比 0.4)

均軸歪度0.57%)にまで達している(図-6 b))。なお、いずれの軸力比の場合も、後の議論で重要となるコアコンクリートの圧壊は圧壊率約20%から始まった。また、軸力比が0.4の場合の最大強度が慣用式による値よりやや低くなっているのは、慣用式として比較的低軸力に対して精度の良い式を用いたためである。

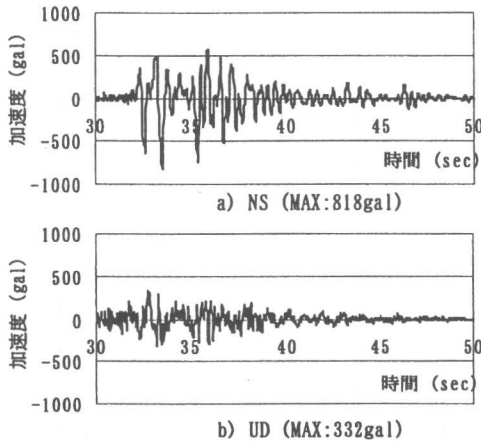


図-7 神戸海洋気象台記録

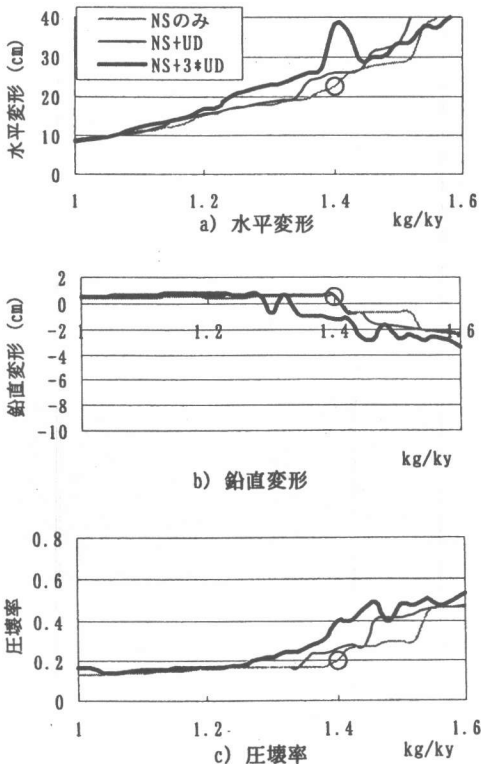


図-8 水平動及び鉛直動による影響 (軸力比0.2)

## 5. 地震応答解析

解析に用いた神戸海洋気象台記録のNS, UD成分を図-7に示す(各々, 最大加速度:818, 332gal)。以下の検討では、減衰をゼロとした場合を原則とするが、最後に減衰を考慮した場合の検討も行い、両者を比較する。

地動として水平動のみを考慮し、そのレベルを変化させた場合の水平変形最大値、鉛直変形最大値と圧壊率を、軸力比毎に図-8, 9に示す(図中の[NSのみ])。図の横軸は、表-2の降伏震度 $k_y$ に対する水平動の最大加速度 $k_g$ の比を表している。いずれの軸力比の場合も、コアコンクリートの圧壊開始に対応する圧壊率約0.2相当の地動レベル(軸力比0.2では $k_g/k_y=1.4$ , 軸力比0.4では $k_g/k_y=1.1$ )までは鉛直変形は小さい。しかし、それを越える地動レベルに対しては鉛直変形が増加し(軸力比0.4で特に顕著)、軸崩壊の様相を呈している。このことは、当然のこととはいえ、コアコンクリー

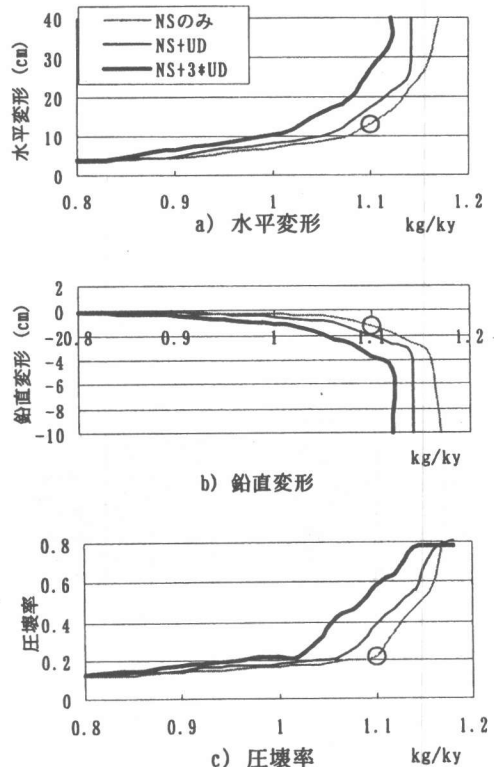


図-9 水平動及び鉛直動による影響 (軸力比0.4)

トの圧壊が軸崩壊に密接に関係していることを示している。なお、コアコンクリート圧壊開始時の圧壊率が静的解析の場合とほぼ同じであったのは、この地震動による水平応答が正方向に片振りを起こす性質を持っていたためである(図-10参照)。

次に鉛直動の影響を見るために、水平動のほかに、原記録に対する水平動の比率と同比率でUD成分を係数倍して考慮した場合(図-8, 9中の[NS+UD]), 及びUD成分をその3倍とした場合(図-8, 9中の[NS+3\*UD])の検討を行った。いずれの軸力比の場合も、圧壊率約0.2以下では鉛直動の影響は小さいが、0.2を越える場合は大きな影響があることが分かる。

鉛直動の影響が大きい場合の1例として、軸力比0.4で[NSのみ]の場合に圧壊率が約0.2となる $kg/ky=1.1$ を対象として、[NSのみ], [NS+UD], [NS+3\*UD]の場合の水平変形、鉛直変形、圧壊率の時刻歴を図-10に示す。各場合の

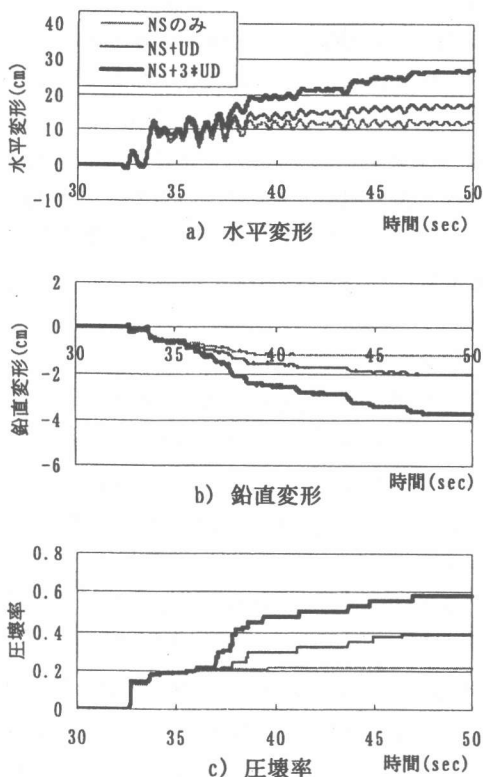


図-10 鉛直動による影響  
(軸力比0.4,  $kg/ky=1.1$ )

水平動の最大加速度は290galで、鉛直動の最大加速度はゼロ, 118, 354galである。約38秒までは応答にほとんど違いが見られないがそれ以後違いが見られ、[NSのみ]の場合には水平変形、鉛直変形、圧壊率ともほとんど変わらないのに対して、鉛直動を考慮した場合にはこれらが増加している([NS+3\*UD]の場合が特に顕著で、[NSのみ]の場合に比べて、水平変形:12→27cm, 鉛直変形:1.2→3.7cm, 圧壊率:21→59%に増加)。なお、以上のような鉛直動の影響が、地震動の主要部を過ぎた約38秒以降で現れるのは興味深い。

上記の場合についての復元力項における鉛直力(これがネットの柱軸力を表している)の時刻歴を図-11に示す(値は負が圧縮)。  
 [NS+3\*UD]の場合には、定軸力5950KNに対して最大で10000KNにも達する鉛直力が働いている。鉛直力が最大となるのは約33秒で損傷の少ない段階であるが、そのあとにも8000KNを越え

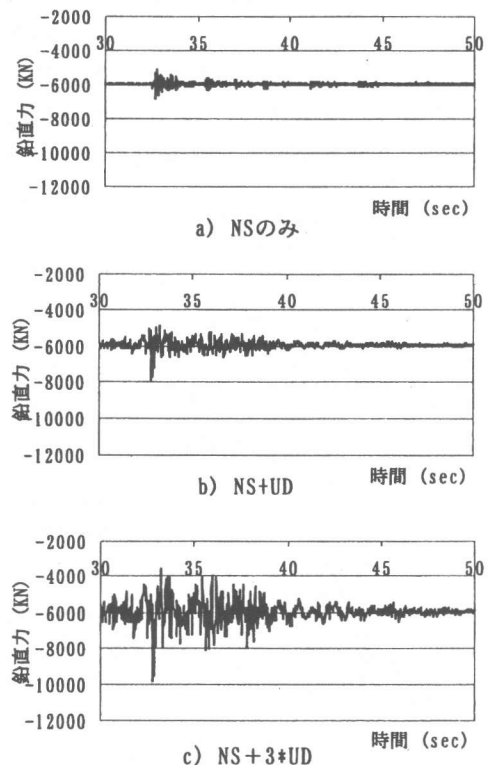


図-11 鉛直力時刻歴の比較  
(軸力比0.4,  $kg/ky=1.1$ )

る鉛直力が度々作用しており、このような大きな軸圧縮によりコンクリートの圧壊が進んだものと考えられる。なお、[NSのみ]の場合にも鉛直力の値が定軸力から変動しているが、これは鉛直動を考慮しなくても鉛直変形に伴い慣性力が生じるためである（減衰力はこの場合ゼロ）。

以上から明らかなように、鉛直動の影響については、水平動のレベルに大きく左右され、これがコアコンクリートの圧壊を引き起こす程度以下の場合には小さいが、それを越える場合には大きい、と言える。軸崩壊を議論する場合、外柱における変動軸力の考慮のほか、全柱を対象とした鉛直動の考慮も重要となる。

ここまでの検討では減衰をゼロとしたが、最後に減衰による影響を見るため、軸力比0.4,  $kg/ky=1.1$ , [NS+3\*UD]の場合について、初期剛性比例型減衰で減衰定数3%としたときの検討を行い、ゼロの場合と比較する。なお、減衰を考慮する場合に瞬間剛性比例型としなかったのは、こうすると負勾配域で励起力として減衰力が作用してしまうためである。水平変形の時刻歴と水平力-水平変形関係を図-12に示す。減衰定数をゼロとしたときは、水平変形27cm、鉛直変形3.7cm、圧壊率59%で（図-10）、ほぼ軸崩壊と

言える状態であったのが、減衰を付与することにより地震動の主要部以降での応答の増加が押さえられている（図-12 a）。図-12 b)の荷重変形関係より、減衰をゼロとした場合には水平変形15cm以上のほとんど履歴を描かない範囲に応答が入っているのに対して、減衰を与えた場合には水平変形10cm未満の大きな履歴を描く範囲に応答が止まっている、ことが分かる。軸崩壊が生じるような変形範囲では履歴減衰はほとんど期待できないが、逆にそのために、わずかな減衰力の付与によっても応答を大幅に低減することができる、と言える。

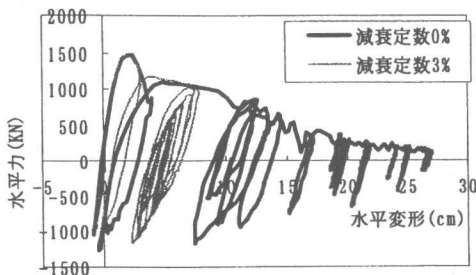
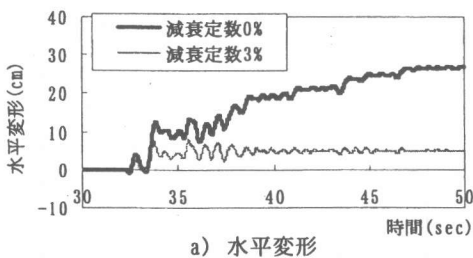
## 6. まとめ

簡略化されたモデルによる検討ではあるが、地震時における鉄筋コンクリート柱の軸崩壊過程の再現を試みた。その結果、軸崩壊に関連する事項として以下のことが明らかになった。

- 1) コアコンクリートへの圧壊の進展が軸崩壊の引き金となる。
- 2) 鉛直動の影響は、水平動による応答がコアコンクリートの圧壊以下に止まる場合には小さいが、それを越える場合には大きい。
- 3) 軸崩壊が生じるような変形範囲では履歴減衰はほとんど期待できないが、逆にそのために、わずかな減衰力の付与によっても応答を大幅に低減することができる。

## 参考文献

- 1) 張富明：水平動と鉛直動を受ける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) 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
- 3) Park, R., Priestley, N. and Gill, W : Ductility of Square-Confined Concrete Columns, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.929-950, April 1982



b) 水平力-水平変形関係  
 図-12 減衰による影響  
 (軸力比0.4,  $kg/ky=1.1$ , [NS+3\*UD])