

(27) 多層分割はり要素を用いた変動軸力と曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の解析

高知県庁
 横浜国立大学大学院
 横浜国立大学工学部 正会員 椿 龍哉

○坂本裕之
 市原 功

1. はじめに

1978年6月の宮城県沖地震によりラーメン高架橋の柱の上・下端および中層ばりにひび割れ発生等の被害を生じたように、構造物が地震力のような正負繰返しのような水平方向荷重を受ける際、構造物の外側や隅に位置している柱部分は、一定軸力ではなく、転倒モーメントによる大きな変動軸力と曲げを受ける¹⁾。

そこで、変動軸力と曲げが鉄筋コンクリート柱の変形に及ぼす影響を解析的に検討するための解析モデルの構築を目的として、多層分割はり要素モデル²⁾を採用した解析プログラムを用いて、変動軸力下で1軸曲げ、2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の解析を行う。多層分割はり要素では、変形に及ぼすせん断力の影響、有限変位の影響、ねじれの不均一性の影響などを考慮している。解析結果と既往の実験結果との比較から本解析モデルの妥当性を検討する。

2. 解析モデル

2.1 材料モデル

コンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ履歴特性には、Park らによるモデル³⁾を修正したもの(図-1参照)、GMPモデル⁴⁾(図-2参照)をそれぞれ用いる。

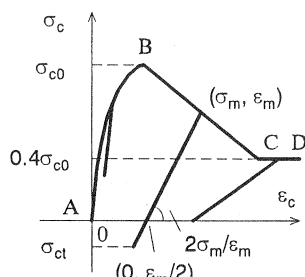


図-1 コンクリートの応力ひずみ関係

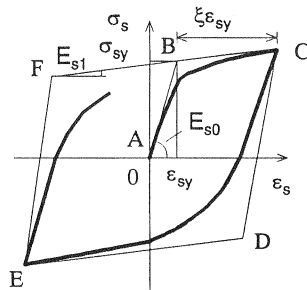


図-2 鉄筋の応力ひずみ関係

2.2 多層分割はり要素モデル

多層分割はり要素モデル²⁾は、図-3に示すように軸方向(x軸方向)は1次元の線材モデルとし、軸方向に垂直な断面(yz面)は格子状に分割する。

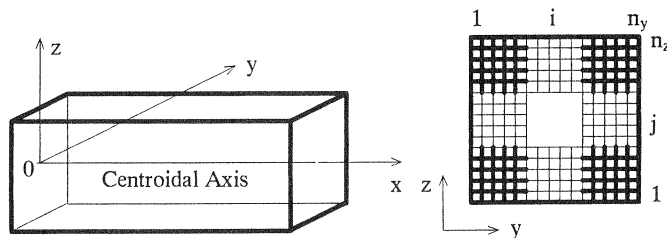


図-3 多層分割はり要素モデル

2. 3 剛性方程式

はり要素の変形は、断面が剛で変形しないという仮定、Bernoulli-Euler の仮定、および St.Venant のねじれ理論に基づく。また、変形に及ぼすせん断力の影響、有限変位の影響を考慮している。

要素剛性方程式は仮想仕事の式から次のように求められる。

$$k^e u^e = f^e \tag{1}$$

$$u^e = [u_1, v_1, w_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}, \theta'_{x1}, u_2, v_2, w_2, \theta_{x2}, \theta_{y2}, \theta_{z2}, \theta'_{x2}]^T \tag{2}$$

$$f^e = [f_{x1}, f_{y1}, f_{z1}, m_{x1}, m_{y1}, m_{z1}, m_1, f_{x2}, f_{y2}, f_{z2}, m_{x2}, m_{y2}, m_{z2}, m_2]^T \tag{3}$$

ここに、 u^e は要素節点変位ベクトル、 f^e は u^e に対する要素節点力ベクトルである。はり要素は両端に節点 1、2 をもつ。 u^e の成分は、x、y、z 軸に関する変位 u、v、w、回転角 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、x 軸まわりのねじれ角の x 軸方向の変化率 θ'_x からなる。 f^e は、x、y、z 軸に関する力 f_x 、 f_y 、 f_z 、モーメント m_x 、 m_y 、 m_z 、反りモーメント m から構成される。要素剛性マトリックス k^e の各成分は、はり要素の断面のひび割れ、鋼材やコンクリートの剛性の変化を考慮して、各荷重ステップごとに計算される。

2. 4 解析手順

本解析計算は変位制御による増分法で行う。計算手順は変位法に基づき、次のようにまとめられる。

- (1) 前荷重ステップのひずみおよびひずみ増分の値から、現荷重ステップで用いる各断面分割要素のひずみを Euler 法により計算する。
- (2) 各断面分割要素の材料の接線係数を各々の材料の応力ひずみ関係のモデルから計算する。
- (3) 各はり要素の要素接線剛性マトリックス k^e をもとに全体剛性マトリックス K を計算する。
- (4) 全体剛性方程式 $K \Delta U = \Delta F$ から全体節点変位増分 ΔU を求める。
- (5) 現荷重ステップの節点変位、ひずみ、応力を計算する。
- (6) 所定の変形履歴に応じて次の荷重ステップの節点変位を求め、ステップ(1)にもどる。有限変位の影響を考慮するために、Updated Lagrangian 法により各節点座標の値を更新する。

3. 鉄筋コンクリート柱の解析

3. 1 解析概要

解析モデルの妥当性を検討するために李らによる鉄筋コンクリート柱の実験データ⁵⁾を用いる。供試体の断面形状は図-4 に示す。柱の高さは 60cm である。解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料特性は表-1、表-2 に示す。供試体記号は表-3 にまとめられている。

供試体に作用させる変位は、供試体 U8-0、U8-1 は部材角最大水平変形 1/20 程度で 1 方向繰返し加力したものである。供試体 B8-0、B8-1、B8-2 は図-5 に示す変形経路のように水平 2 方向正負繰返し変形を与えたものである。

作用する軸力は図-6 に示すように軸力増分が y、z 方向のせん断力に比例するようにし、次の式で与えられる。

$$N = BD \sigma_0 + \Delta N_y + \Delta N_z \tag{4}$$

ここに、

$BD \sigma_0$: 基本軸力

ΔN_y : y 方向のせん断力 Q_y によって生じる軸力増分

ΔN_z : z 方向のせん断力 Q_z によって生じる軸力増分

各供試体に与える軸力は表-3 に示す。

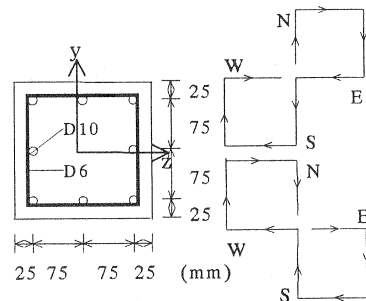


図-4 供試体断面 図-5 変形経路

表-1 コンクリートの材料特性

最大応力時ひずみ ϵ_{co}	圧縮強度 σ_{co} (N/mm ²)	ヤング率 E_{co} (N/mm ²)
0.00225	27.0	22540.0

表-2 鉄筋の材料特性

	降伏応力 σ_{sy} (N/mm ²)	ヤング率 E_{so} (N/mm ²)
D10	417.5	211680.0
D6	386.1	176400.0

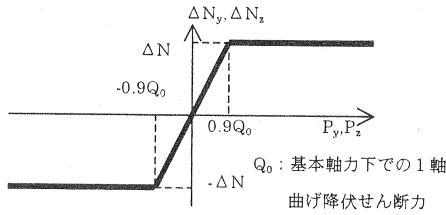


図-6 変動軸力

3. 2 1軸曲げ解析

断面分割数は y、z 方向ともに 24 分割とし、軸方向要素分割数は柱基部の損傷が激しいため基部付近は要素長を短く分割するよう 5 分割とした。基部付近の最小要素長は 4cm である。

一定軸力が作用している供試体 U8-0 の解析結果は図-7 に示す。解析結果と実験結果はよく一致している。表-4 に示した対称性を表すパラメータ P_2/P_1 もほぼ一致している。

変動軸力が作用している供試体 U8-1 の解析結果は図-8 に示す。軸力増大側の耐力増加はよく一致しており、変動軸力の影響が表現されている。

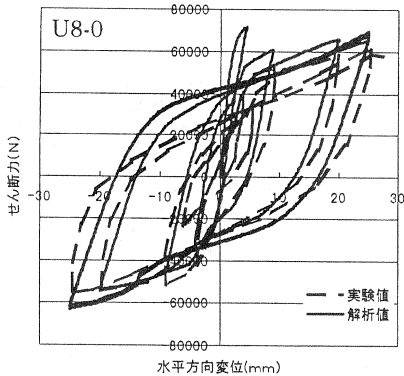


図-7 1軸曲げ(一定軸力)解析結果

表-3 供試体に作用する軸力

供試体 記号	水平 加力	基本軸力 BD σ_0 (kN)	変動軸力幅 (kN)	
			y方向 ΔN_y	z方向 ΔN_z
U8-0	1軸	78.4	0	0
U8-1	1軸	78.4	± 78.4	0
B8-0	2軸	78.4	0	0
B8-1	2軸	78.4	± 78.4	0
B8-2	2軸	78.4	± 78.4	± 78.4

表-4 1軸曲げの解析値と実験値の比較

		正側の最大耐力 P_1 (kN)	負側の最大耐力 P_2 (kN)	P_2/P_1
U8-0	解析値	71.2	-62.2	-0.87
	実験値	60.8	-55.2	-0.91
U8-1	解析値	73.4	-56.5	-0.77
	実験値	68.7	-39.5	-0.58

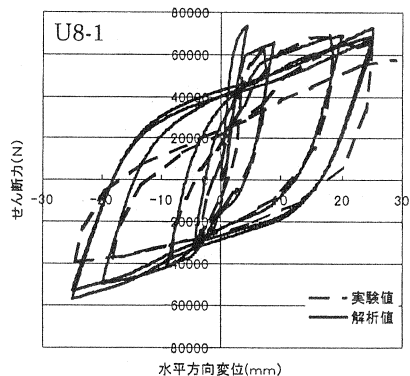


図-8 1軸曲げ(変動軸力)解析結果

3. 3 2軸曲げ解析

断面分割数、軸方向要素分割数は1軸曲げと同様に、各々24分割、5分割とした。

一定軸力を受ける供試体 B8-0 の解析結果は図-9、図-10 に示す。 $Q=(Q_y^2+Q_z^2)^{1/2}$ で表される最大耐力は 68.3kN となり、1軸曲げを受ける供試体 U8-0 の最大耐力 71.2kN と比べ約 4.3% 低下し、実験結果と同様の現象が生じた。また、NS 方向、EW 方向とも荷重変位曲線の対称性が高い。

軸力増分が NS 方向の水平力に比例している供試体 B8-1 の解析結果は図-11、図-12 に示す。実験結果と同様に、NS 方向では軸力増大側の耐力が

表-5 2軸曲げの解析値と実験値の比較

		正側の最大耐力 P_1 (kN)	負側の最大耐力 P_2 (kN)	P_2/P_1
B8-0 (NS)	解析値	62.4	-66.6	-1.1
	実験値	46.7	-53.7	-1.2
B8-0 (EW)	解析値	66.5	-56.6	-0.85
	実験値	53.5	-56.7	-1.1
B8-1 (NS)	解析値	77.8	-48.6	-0.63
	実験値	58.2	-40.5	-0.70
B8-1 (EW)	解析値	71.5	-60.2	-0.84
	実験値	54.8	-58.2	-1.1
B8-2 (NS)	解析値	69.1	-45.3	-0.66
	実験値	65.9	-43.0	-0.65
B8-2 (EW)	解析値	68.2	-50.9	-0.61
	実験値	65.4	-38.0	-0.58

大きく増加し、軸力減少側では耐力の低下が起きた。表-5 に示すように P_2/P_1 が小さくなり、荷重変位曲線が非対称となった。一方、EW 方向は実験結果と同様に、耐力の増加、減少が小さく、 P_2/P_1 も一定軸力の P_2/P_1 に等しく、荷重変位曲線が対称となった。

軸力増分が NS 方向、EW 方向の水平力に比例している供試体 B8-2 の解析結果は図-13、図-14 に示す。軸力増分が NS 方向だけに比例している供試体 B8-1 と異なり、NS、EW 方向ともに軸力増加側での耐力増加、軸力低下側での耐力低下が起き、 P_2/P_1 も低下し、荷重変位曲線が非対称になった。

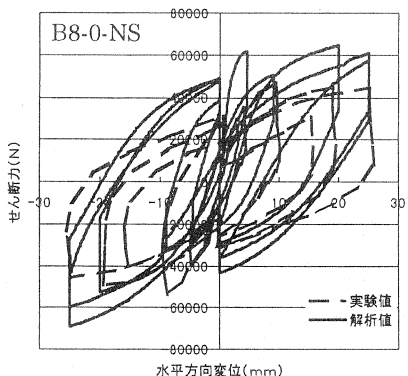


図-9 2軸曲げ (一定軸力) NS 方向解析結果

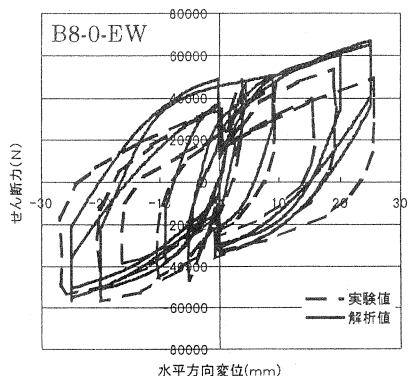


図-10 2軸曲げ (一定軸力) EW 方向解析結果

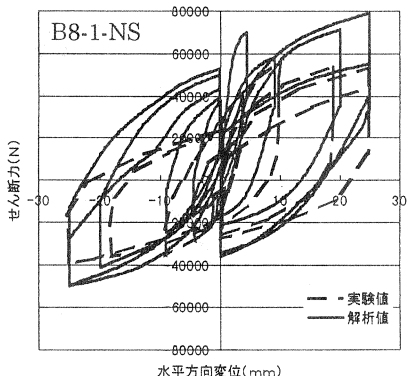


図-11 2軸曲げ (変動軸力、1方向水平力に比例) NS 方向解析結果

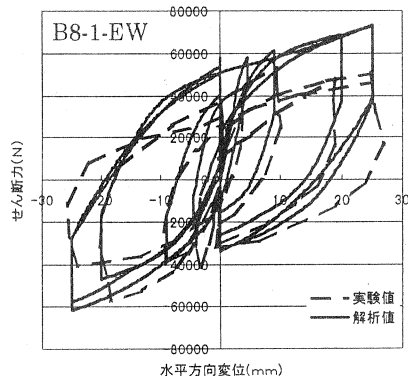


図-12 2軸曲げ (変動軸力、1方向水平力に比例) EW 方向解析結果

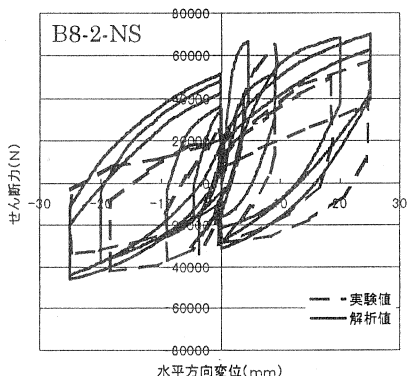


図-13 2軸曲げ (変動軸力、2方向水平力に比例) NS 方向解析結果

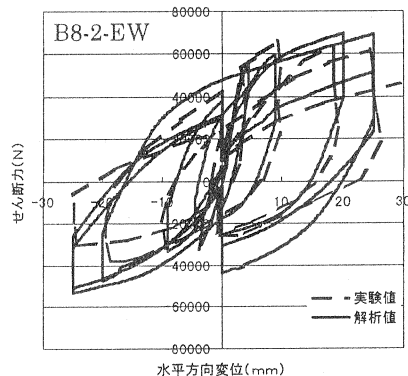


図-14 2軸曲げ (変動軸力、2方向水平力に比例) EW 方向解析結果

3. 4 変動軸力、2軸曲げおよび繰返しの影響

変動軸力を受ける供試体は一定軸力を受ける供試体と比べ、軸力増加側では耐力増加が起き、軸力低下側では耐力低下が起きる。これは、図-15 に示すように、軸力増加側では一定軸力よりも大きな圧縮軸力が作用しているためにひび割れが閉じている部分が大きく、耐力増加が生じ、軸力低下側では一定軸力よりも小さな圧縮軸力しか作用していないためにひび割れが閉じている部分が小さく、耐力低下が生じたと考えられる。2軸曲げでは軸力増分が比例するせん断力方向に耐力増加、低下がよく現れている。

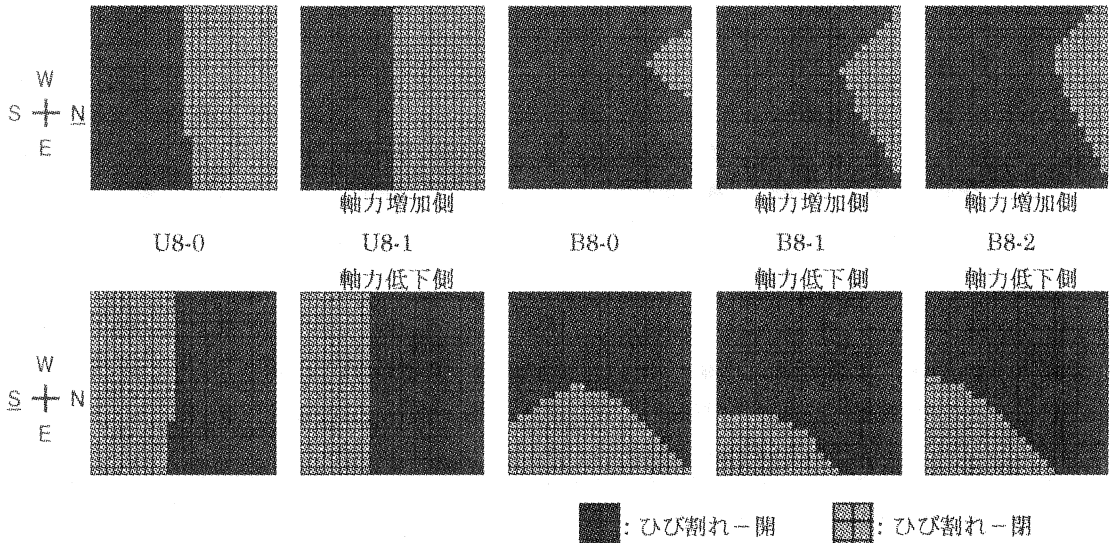


図-15 ひび割れ状況 (変位±25mm)

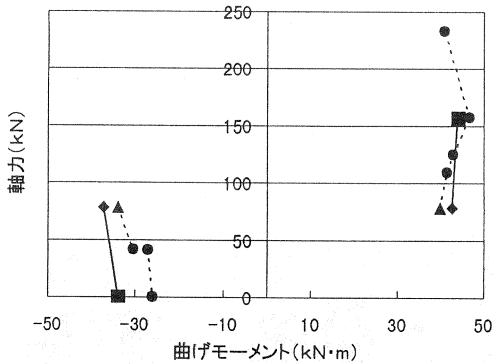
また、図-7~14 からわかるように、変位±25mm で同一変位を繰り返した場合、一定軸力に比べ、変動軸力増分が与えられる方向 (B8-1 では NS 方向、B8-2 では NS 方向、EW 方向) で繰返しによる耐力低下が大きい。

次に、変動軸力と2軸曲げを受ける供試体は一定軸力と2軸曲げを受ける供試体と比べ、2軸曲げの相互作用による耐力低下、すなわち、一方向の変位を最大に保ち、他方向の変位を増加させる荷重経路で生じる荷重低下が表-6 に示すように軸力増加側では大きくなり、軸力低下側では小さくなる傾向を示した。

表-6 2軸曲げの相互作用による耐力低下

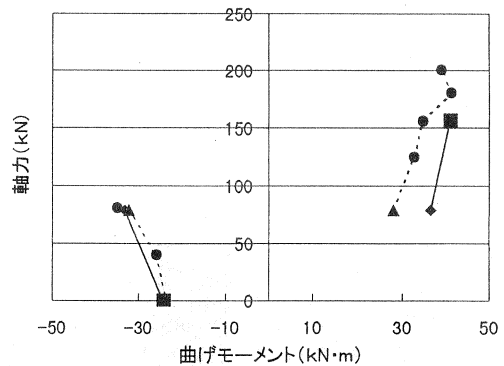
		変位 (mm)							
		-25	-20	-9	-4.5	4.5	9	20	25
耐力低下 (kN)	B8-0-NS	33.3	36.6	19.9	20.0	26.7	22.2	31.1	26.7
	B8-1-NS	34.0	29.9	20.0	16.6	28.9	24.4	35.5	38.9
	B8-2-NS	33.6	32.2	22.2	16.7	27.8	22.3	30.0	30.0
	B8-0-EW	28.8	22.2	24.4	13.3	11.1	22.1	24.4	28.9
	B8-1-EW	33.3	28.8	21.1	13.3	14.4	31.1	31.1	34.4
	B8-2-EW	26.6	22.0	20.0	11.1	15.0	30.6	28.9	40.0

最後に、1軸曲げと2軸曲げの最大耐力時の軸力-曲げモーメント (柱基部) 関係を、解析値は図-15 に、実験値は図-16 に示す。解析値、実験値ともに同じ軸力での曲げモーメントは2軸曲げの方が1軸曲げより小さくなる傾向があることがわかる。軸力を考慮した鉄筋コンクリート部材の設計は道路橋示方書⁶⁾ に示されているが、軸力-曲げモーメント関係において繰返しや2軸曲げの影響を考慮することが重要であることがわかる。



— : 1軸曲げ (◆ : 一定軸力、■ : 変動軸力)
 - - - : 2軸曲げ (▲ : 一定軸力、● : 変動軸力)

図-16 軸力-曲げモーメント関係 (解析値)



— : 1軸曲げ (◆ : 一定軸力、■ : 変動軸力)
 - - - : 2軸曲げ (▲ : 一定軸力、● : 変動軸力)

図-17 軸力-曲げモーメント関係 (実験値)

4. まとめ

多層分割はり要素モデルを採用した解析プログラムを用いて、変動軸力下で1軸曲げ、2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の解析を行い、本解析プログラムの妥当性を検討した。数値シミュレーションの結果、本解析モデルについて次のようにまとめられる。

- (1) 多層分割はり要素モデルを用いた本解析モデルで鉄筋コンクリート柱の荷重変位関係に及ぼす変動軸力の影響を表現することが可能である。
- (2) 軸力を受け同一変位を繰り返す時に生じる耐力低下を表現することが可能である。
- (3) 2軸曲げでは同一軸力でも1軸曲げよりも最大曲げモーメントが小さくなるという2軸曲げの影響を表現することが可能である。

参考文献

- 1) 石橋・吉野：鉄筋コンクリートラーメン構造物の耐震性に関する実験，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.221~224，1983.
- 2) 田村・椿：多層分割はり要素を用いたコンクリートの3次元解析モデル，第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.1~6，1999.
- 3) Park, R., Kent, D.C., and Sampson, R.A. : Reinforced Concrete Member with Cyclic Loading, Journal of the Structural Division, Proc. of ASCE, Vol.98, No.ST7, pp.1341~1360, 1972.
- 4) 右近・幸左・井上・吉澤：RC標準橋脚のファイバーモデルによる交番載荷実験シミュレーション解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.2, pp.463~468, 1995.
- 5) 李・小谷・青山：変動軸力と水平2方向地震力を受ける鉄筋コンクリート柱の挙動，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.8, pp.489~492, 1986.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説，9章など，1996.12.