

(30) 上下動地震を受けるシェルのファジィ制御及び免震

FUZZY CONTROL AND SEISMIC ISOLATION OF A SHELL STRUCTURE
SUBJECTED TO VERTICAL SEISMIC FORCES

新宮 清志 * 福島 欣哉 **
Kiyoshi SHINGU, Kinya FUKUSHIMA

A seismic isolation and fuzzy vibration control system which is a shell with springs and variable dampers between the shell and the ground has been proposed. The shell is shaking due to vertical seismic forces, then a seismic isolation system is acted and fuzzy vibration control is carried out. The damping ratios are adjusted by fuzzy theory, and stresses of the shell are reduced.

Key Words : Damping, Fuzzy Control, Seismic Isolation, Shell

1. 序 論

我国は環太平洋地震帯に位置し、地震が建築構造物等に与える影響は極めて甚大なものがあり、そのため、ラーメン構造について耐震、免震、制震の研究が多く行われている¹⁾。

建築構造物には上下動地震及び水平動地震が作用し両者の影響が考えられるが、比較的扁平なシェル構造物では水平動地震に比べ上下動地震の影響が大きい²⁾。そこで上下動地震を受けるシェルについてシェル部分にダンパーを有する構造物を提案し、このダンパーの減衰をファジィ制御し変位・応力を低減できることを示した³⁾。更に扁平なシェルと地盤との間に水平方向には剛で、鉛直方向には柔なバネと可変ダンパーを付加した構造物(免震シェル構造)を提案した⁴⁾。ここでは、境界条件として水平移動・回転も許容する機構とし、併せて、ダンパーの減衰率をファジィ制御することにより振動変位・応力を抑制するものである。

2. 解析モデル

2.1 円錐形シェル

円錐形シェルの解析モデルを図1に示す。地盤とシェルとの間に鉛直方向に柔なバネと可変ダンパーを付加したものである。このダンパーの減衰率をファジィ制御する。Kはバネ定数、シェルの全質量 $M=1.657 \times 10^6 \text{kg}$ である。材料定数等については、ヤング係数 $E=1.353 \text{Gpa}$ 、質量密度 $\rho=400 \text{kg/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu=0$ 、シェル厚 $t=1.0 \text{m}$ とし、要素数は20とした。境界条件としてはC点において鉛直変位 $u^* \neq 0$ 、水平変位 $w^* \neq 0$ 、

* 工博 日本大学教授 大学院情報科学専攻 (〒274 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

** 日本大学大学院生 海洋建築工学専攻 (〒274 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

回転角 $\chi^* \neq 0$ である (図1)。

2.2 入力地震波

上下動入力地震波形としては、1978年6月12日の宮城県沖地震の上下動成分を用いた。この最大加速度は4.18秒において 152.99 cm/sec^2 であるが、最大が 200 cm/sec^2 になるように全体を拡大して用いた (図2)。

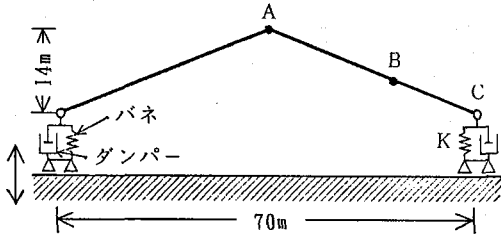


図1 円錐形シェル

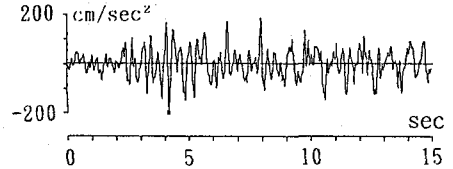


図2 入力地震波形

3. シェルの振動方程式

3.1 変位関数

円錐形シェルのような軸対称構造物において、軸対称荷重を受ける場合については、中央面上の任意点の変位は、接線方向変位 u と法線方向変位 w の二つの成分で表すことができる。円錐形シェルを円錐台形要素の集合体として扱い、有限要素解析を用いる。変位関数としては、要素の母線方向の長さ s の多項式で表されるものとする。回転角 χ は、 w を s で一階微分することによって求められる (図3)。

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 s \\ w &= \alpha_3 + \alpha_4 s + \alpha_5 s^2 + \alpha_6 s^3 \\ \chi &= dw/ds = \alpha_4 + 2\alpha_5 s + 3\alpha_6 s^2 \end{aligned} \right\}$$

未定係数 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は、要素両端の端末条件より求めることができる。

(1)

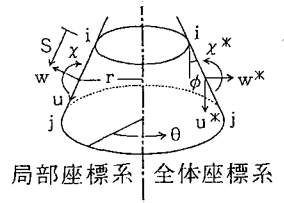


図3 変位成分

3.2 歪-変位の関係式

歪と変位の関係式は次のように表すことができる。

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_\theta \\ \kappa_s \\ \kappa_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} du/ds \\ (u \sin \phi + w \cos \phi)/r \\ -d^2 w / ds^2 \\ -(\sin \phi / r) \cdot dw/ds \end{Bmatrix}$$

(2)

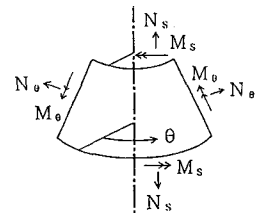


図4 応力成分

3.3 応力-歪の関係式

等方性の回転体シェルにおける応力と歪の関係式は次式で表される (図4)。

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} N_s \\ N_\theta \\ M_s \\ M_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K & \nu K & 0 & 0 \\ \nu K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & \nu D \\ 0 & 0 & \nu D & D \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_\theta \\ \kappa_s \\ \kappa_\theta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$K = Et/(1-\nu^2)$ $D = Et^3/12(1-\nu^2)$ E : ヤング係数 ν : ポアソン比 t : シェル厚

3.4 運動方程式

シェルの構造全体の運動方程式は(4)式で表される。質量、減衰マトリックスはそれぞれ(5)、(6)式で表せるものとする。ただし、シェルの構造減衰率 ζ は0.02で一定、支持部分の変ダンパーの鉛直方向の減衰率 ζ_{nv} はファジィ制御により0.02~0.2まで変化するものとする。

$$[M]\{a\} + [C]\{v\} + [K]\{d\} = \{F\} \quad (4)$$

$$[M] = \text{diag.} (m_1, m_1, 0, m_2, m_2, 0, \dots, m_n) \quad (5)$$

$$[C] = 2\omega \cdot [M] \cdot \text{diag.} (\zeta, \zeta, 0, \zeta, \zeta, 0, \dots, \zeta_{nv}(t)) \quad (6)$$

添字、1...n: 節点番号、n: 全節点数、V: 鉛直方向

ただし、 $[M]$, $[C]$, $[K]$ は構造全体の質量、減衰、剛性行列、 $\{a\}$, $\{v\}$, $\{d\}$, $\{F\}$ は加速度、速度、変位、外力ベクトル、 ζ はシェルの減衰率、 $\zeta_{nv}(t)$ はダンパーの減衰率(時間の関数)、 ω は一次の固有角振動数、 $m_1 \dots m_n$ は節点の集中質量である。

3.5 シェルの動的応答解析

任意の地震力が作用する場合の動的応答解析には、減衰マトリックス $[C]$ が時間の経過によって逐次変化していくものとして新たに誘導した逐次積分法を用いた⁵⁾。

$$\{d\}_{n+1} = [E]^{-1} \{ [G]\{d\}_n + [V]\{v\}_n + [A]\{a\}_n + \beta h^2 \{F\}_{n+1} \} \quad (7)$$

$$\{a\}_{n+1} = \{ \{d\}_{n+1} - \{d\}_n - h\{v\}_n - (0.5 - \beta)h^2 \{a\}_n \} / \beta h^2 \quad (8)$$

$$\{v\}_{n+1} = \{ 0.5h\{d\}_{n+1} - 0.5h\{d\}_n - (0.5 - \beta)h^2 \{v\}_n - (0.25 - \beta)h^3 \{a\}_n \} / \beta h^2 \quad (9)$$

$$\text{ここで、} [E] = [M] + 0.5h[C]_{n+1} + \beta h^2 [K] \quad [A] = (0.5 - \beta)h^2 [M] + (0.25 - \beta)h^3 [C]_{n+1}$$

$$[V] = h[M] + (0.5 - \beta)h^2 [C]_{n+1} \quad [G] = [M] + 0.5h[C]_{n+1}$$

ただし、加速係数 $\beta = 0.25$ 、微小時間間隔 $h = 0.02 \text{sec}$ である。

4. 制御理論

4.1 ファジィ推論法

ファジィ推論法としてmin-max 重心法を採用した。また、メンバーシップ関数としては、図5、6のような三角型を採用した。横軸は前件部では正規化された前件部変数、後件部では減衰率 ζ 、縦軸は度合いである。

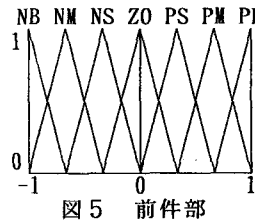


図5 前件部

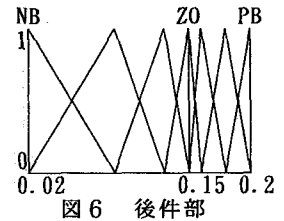


図6 後件部

4.2 制御方法

本論文では、地盤とシェルの付け根、すなわち支持部分において鉛直方向について制御を行う。時刻 nh における地盤に対する構造物の相対応答変位、速度をそれぞれ d_n 、 v_n とし、時刻 $(n+1)h$ における相対応答変位 d_{n+1} 、速度 v_{n+1} は各々(10)、(11)式で予測するものとする。これはニュートンの補間公式を外挿したものである。

$$d_{n+1} = d_{n-3} + 4(d_n - d_{n-3}) + 6(d_{n-1} - 2d_{n-2} + d_{n-3}) + 4(d_{n-3}d_{n-1} + 3d_{n-2} - d_{n-3}) \quad (10)$$

$$v_{n+1} = v_{n-3} + 4(v_n - v_{n-3}) + 6(v_{n-1} - 2v_{n-2} + v_{n-3}) + 4(v_{n-3}v_{n-1} + 3v_{n-2} - v_{n-3}) \quad (11)$$

予測相対変位 d_{n+1} と予測相対速度 v_{n+1} を前件部変数とし、後件部変数としては時刻 $(n+1)h$ における減衰率 ζ_{n+1} を考えファジィ推論を行う。

4.3 ファジィ制御器の設計

本論においては、制御規則は次のようにして定める。
時刻 n において予測相対応答変位 d_{n+1} と、予測相対応答速度 v_{n+1} との関係から相対変位が大きくなる方向に運動していれば減衰率 ζ_{n+1} を大きくして運動を妨げ、相対変位が小さくなる方向に運動していれば減衰率 ζ_{n+1} を小さくして運動を妨げないようにする。

以上のような考え方に基づいて他の制御規則も作成し、表にまとめると表1のようになる。縦の列は d_{n+1} の値、横の行は v_{n+1} の値、表の中は ζ の値を示している。

これらの制御規則をもとにして、ファジィ理論による多重推論を行い減衰率を逐次定めていく。

表1 制御規則

$v_{n+1} \backslash d_{n+1}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
NM	PB	PB	PM	NM	NS	NB	NB
NS	PB	PS	PS	NS	ZO	PS	PM
ZO	PB	PM	PS	ZO	PS	PM	PB
PS	PM	PS	ZO	NS	PS	PS	PB
PM	NB	NB	NS	NM	PM	PB	PB
PB	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB

表2 固有振動数 (Hz)

Order K/M	1st	2nd	3rd	4th	5th
1	0.16	3.94	6.36	9.55	13.36
10	0.48	4.06	6.38	9.56	13.37
10^2	1.15	4.95	6.71	9.74	13.50
10^3	1.53	5.79	8.52	11.67	15.37
10^4	1.59	5.86	8.79	12.36	15.96
Roller	1.59	5.86	8.82	12.41	15.97

5. 解析結果

5.1 固有振動

$K/M=1, 10, 10^2, 10^3, 10^4$ 、Roller supportにおける1次～5次の固有振動数を表2に、固有振動モードを図7に示す。なお、この図は鉛直・水平変位成分を合成したものである。

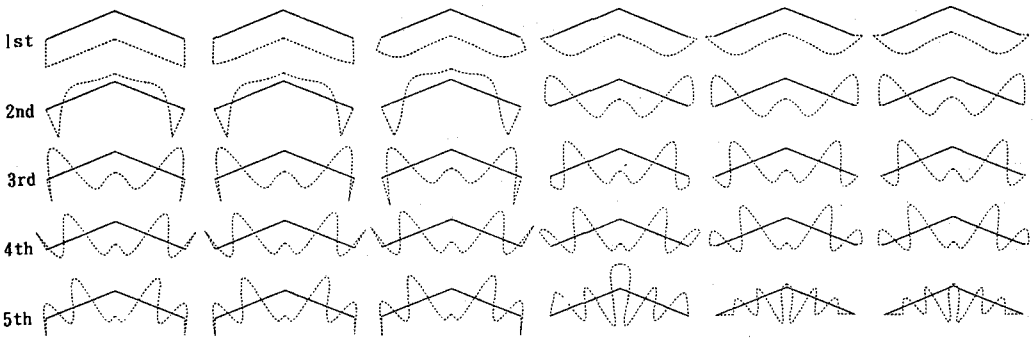


図7 固有振動モード

5.2 非制御時地震応答

$K/M=1, 10, 10^2, 10^3, 10^4$ 、Roller supportにおける、非制御時の一次モード腹部分であるB点(図1参照)の鉛直変位 u^* の時刻歴応答を図8に、また鉛直変位 u^* が最大になる時の変位分布を図9に、経線方向曲げモーメント M_B を図10に示す。

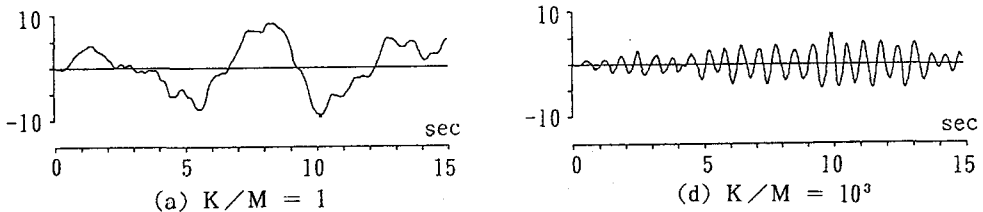


図8 非制御時の鉛直変位 u^* (cm) の時刻歴応答

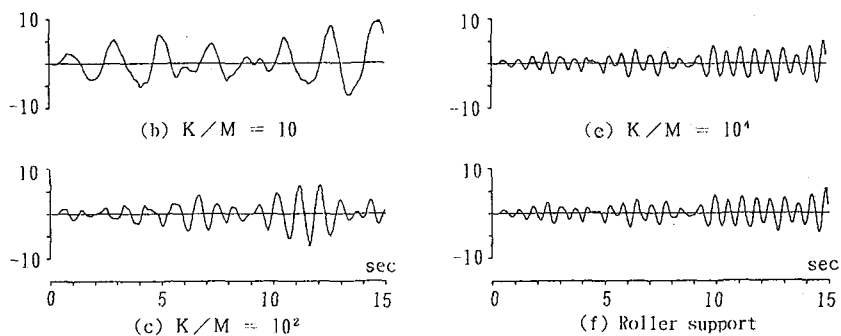


図8 非制御時の鉛直変位 u^* (cm) の時刻歴応答

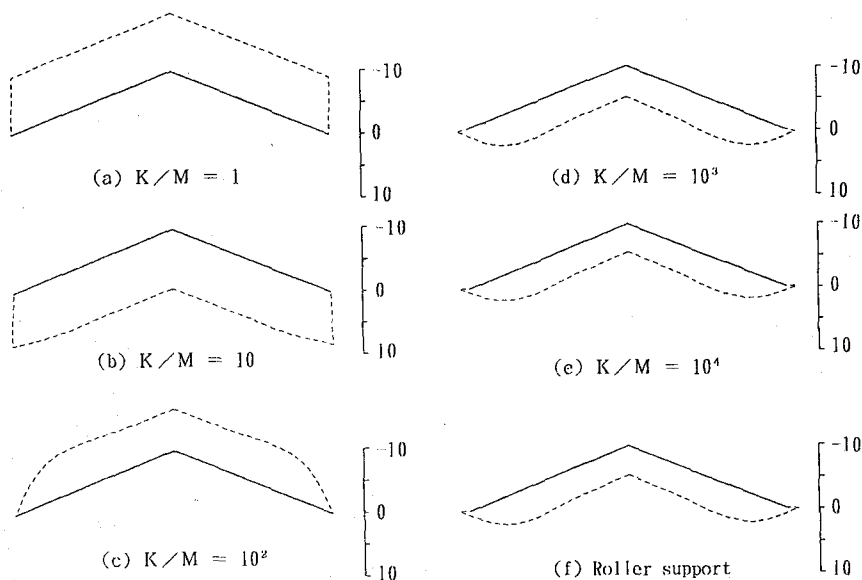


図9 非制御時の変位分布 (cm) [鉛直・水平変位の合成]

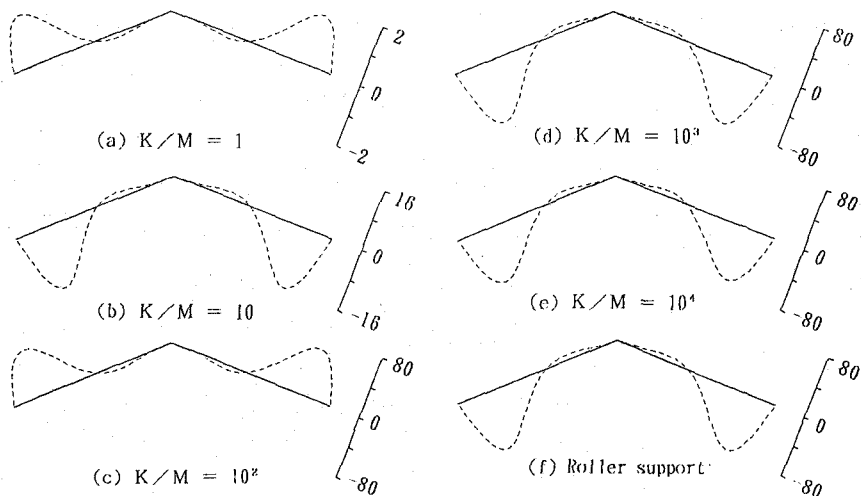


図10 非制御時の曲げモーメント M_s (kN·cm/cm)

5.3 ファジィ制御時地震応答

$K/M=10$ 、ファジィ制御時のB点(図1参照)の鉛直変位 u^* の時刻歴応答を図11に、C点(図1参照)のダンパーの減衰率 ζ の時刻歴変化を図12に、また鉛直変位 u^* が最大になる時の変位分布(鉛直変位 u^* 、水平変位 w^* を合成したもの)、経線方向曲げモーメント M_s を図13に示す。

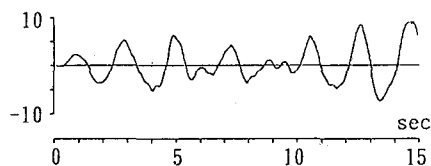


図11 制御時の鉛直変位 u^* (cm) の時刻歴応答

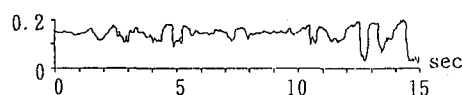


図12 制御時の減衰率 ζ の時刻歴変化

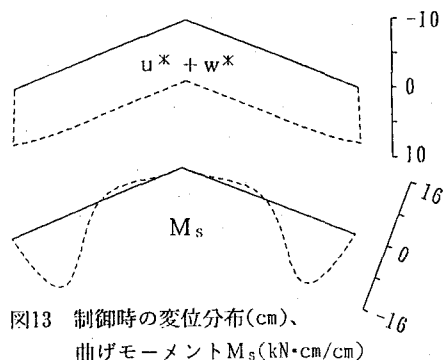


図13 制御時の変位分布(cm)、
曲げモーメント M_s (kN·cm/cm)

6. 結論

- 1) バネ定数が小さい場合、変位は大きいこれはほとんど支持部分に付加したバネが変位しているのでありシェル自体はほとんど変位していない。即ち、シェルの弾性変形は極めて小である。従って、応力は非常に小である。例えば、 $K/M=1$ の時、曲げモーメント M_s はRoller supportの場合の約1/40程度になっている。
- 2) バネ定数を大きくしていくと、剛体変位は小さくなりRoller supportの状態に近づいていく。
- 3) バネ定数を大きくしていくと、弾性変形・応力は $K/M=10^3$ まで大きくなり、その後Roller supportと同じ様な状態に近づいて行く。
- 4) ファジィ制御することにより更に変位・応力が低減している。例えば、 $K/M=10$ の時で5%程度変位(弾性変形)・応力が低減している。

参考文献

- 1) 武田寿一：「構造物の免震・防振・制振」、技報堂出版、1988年5月
- 2) 西村敏雄、新宮清志：「上下動および水平動地震を受ける裾梁付回転体シェルの動的応答に関する研究」、日本建築学会論文報告集、第326号、pp47-59、1983年4月
- 3) 新宮清志、船本大蔵：「動的外力を受けるシェル構造物および質点系のファジィ制御」、日本機械学会論文集(C編)、第58巻、550号、pp1742-1747、1992年6月
- 4) 新宮清志、福島欣哉：「上下動地震を受けるシェル構造物の免震及びファジィ振動制御」、日本機械学会論文集、(投稿中)
- 5) 新宮清志、福島欣哉：「地震力を受ける回転体シェルのファジィ制御に関する研究」、日本ファジィ学会誌、第5巻3号、pp650-662、1993年6月