

キャパシティースペクトル法を用いた多層建物の弾塑性応答指定設計

正会員 ○加藤達也*1 同 吉富信太*2 同 辻 聖晃*2 同 竹脇 出*2

2. 構造—3. 応用力学・構造解析

キャパシティースペクトル法, 限界耐力計算, 逆問題, 多層建物, モデル復元

1. 序

建物の地震時の弾塑性応答を指定した分布とする逆問題型の設計法が Nakamura ら[1]により提案されているが、この手法は仮想弾性骨組を用いた間接的な方法であり、指定した塑性率を呈する多層建物を直接設計するものではない。

限界耐力計算において用いられているキャパシティースペクトル法（以下CS法）は、多層建物を1自由度系モデルに縮約し、応答スペクトル法を有効に用いて多層建物の地震時の応答を評価してその耐震安全性を簡易的に評価することを目的としている。しかしながら、CS法を多層建物の直接的な設計において用いた例は少ない。ここでは図1に示すような1自由度系モデルから多層建物への構築（復元）の1手法を提案する。

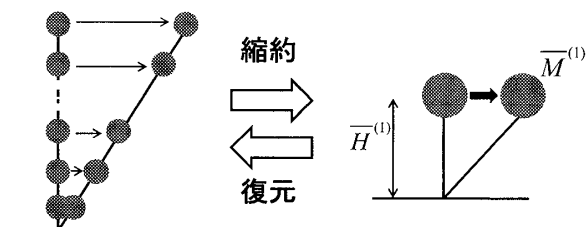
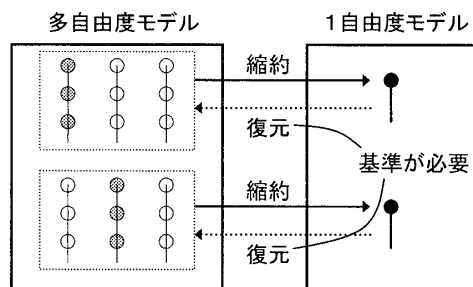


図1 1自由度モデルから多自由度モデルへの復元

2. 1自由度系モデルから多層建物への復元

2.1 復元の概要

図2のように、CS法では多自由度モデルから1自由度モデルへの縮約を行うため、一般には複数の多自由度モデルが同一の1自由度モデルに対応する。逆に、1自由度モデルから多自由度モデルを復元するには特別な基準が存在しなければ多自由度モデルは一意には定まらない。ここでは、1次固有モードの層間変位成分が降伏層間変位と相似形となることを復元の基準とする（図3）。



(基準: 降伏層間変位モードと対応する1次固有モードが相似)

図2 多自由度モデルの復元とその基準

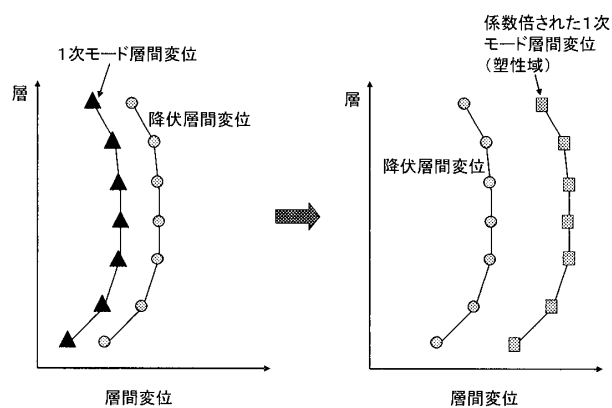


図3 降伏層間変位分布と1次固有モード

2.2 理論的背景

完全弾塑性型の復元力特性を有する1質点系モデルにおいて、幾何学的等価線形化の理論を用いると、塑性率 μ に対する等価減衰定数 h_{eq}^S は次のように表現できる。

$$h_{eq}^S = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \quad (1)$$

次に、多自由度モデルを考える。ここでは、簡単のため、全層の降伏層間変位は一定（ $=\delta_y$ ）とする。全層で塑性率が一定（ $=\mu$ ）とすると、 i 層の等価減衰係数は幾何学的等価線形化の理論に基づき次のように表される。

$$c_{ei} = \frac{\Delta W_i}{\pi \omega_{eq} (\mu \delta_y)^2} = \frac{4(\mu \delta_y - \delta_y) k_i \delta_y}{\pi \omega_{eq} (\mu \delta_y)^2} = \frac{4(\mu - 1)}{\pi \omega_{eq} \mu^2} k_i \quad (2)$$

一方、多自由度モデルの非対角項を無視したときの1次の減衰定数（ここでは厳密に非対角化が可能）は次のように表現できる。

$$h_{eq}^M = \frac{1}{2\omega_{eq}} \frac{\phi^{(1)T} C \phi^{(1)}}{\phi^{(1)T} M \phi^{(1)}} \quad (3)$$

(2)式の c_{ei} を(3)式に代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\omega_{eq}} \frac{\phi^{(1)T} C \phi^{(1)}}{\phi^{(1)T} M \phi^{(1)}} &= \frac{1}{2\omega_{eq}} \frac{4(\mu - 1) \phi^{(1)T} K \phi^{(1)}}{\pi \omega_{eq} \mu^2 \phi^{(1)T} M \phi^{(1)}} \\ &= \frac{1}{2\omega_{eq}} \frac{4(\mu - 1)}{\pi \omega_{eq} \mu^2} \omega_i^2 = \frac{1}{2\omega_{eq}} \frac{4(\mu - 1)}{\pi \omega_{eq} \mu^2} \mu \omega_{eq}^2 = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

この式は、全層で塑性率が同じでその値が1質点系モデルの塑性率と同じであるとすると、多自由度モデルの1次の等価減衰定数が1質点系モデルの等価減衰定数と同じ値となることを示している。また、1質点系モデルの等価固有周期と多自由度モデルの等価1次固有周期も $T_{eq} = \sqrt{\mu}T$ で一致している。従って、1次固有周期と1次減衰定数が1質点系モデルと多自由度モデルで一致するため、(1)1次振動成分が卓越する、(2)構造物の地震時応答は地震動レベルに対して単調である、という仮定の下では、両モデルの地震時応答は近似的に一致すると結論付けられる。

3. 1自由度系モデルの設計

1自由度モデルの降伏変位 δ_y を、想定する多層建物モデルから仮定する。安全限界スペクトルに対する塑性率 μ を指定してそれを実現する弾性固有周期を見出す。キャパシティースペクトル $S_a = (2\pi/T)^2 \delta_y$ とデマンドスペクトル

$$S_a = \frac{5.12}{T_{eq}} \cdot \frac{1.5}{1+10h_{eq}} \cdot G_s \quad (T_{eq} = \sqrt{\mu}T) \quad (5)$$

が一致する点が正解の応答であることを用いると弾性固有周期は次のように求められる。

$$T = \frac{4\pi^2 \delta_y \sqrt{\mu} (1+10h_{eq})}{1.5 \times 5.12 G_s} \quad (6)$$

塑性率 μ と等価減衰定数の関係は次式を仮定する。

$$h_{eq} = \gamma \{1 - (1/\sqrt{\mu})\} + 0.05 \quad (\gamma = 0.25) \quad (7)$$

4. 数値解析

ここでは9層鉄骨造建物[2]を扱う。階高、床高さ、質量を表1に示す。また、降伏層間変位として図4(a)の3種類の分布を採用する。文献[2]の設計のものをrealisticと呼ぶ。図4(b)には1自由度と多自由度モデルの復元力特性の比較を示す。

表1 9層モデルの諸元

階	階高 (m)	床高さ (m)	質量 (kg)
1	3.5	3.5	277000
2	3.5	7	276000
3	3.5	10.5	276000
4	3.5	14	275000
5	3.5	17.5	275000
6	3.5	21	274000
7	3.5	24.5	272000
8	3.5	28	272000
9	3.5	31.5	379000

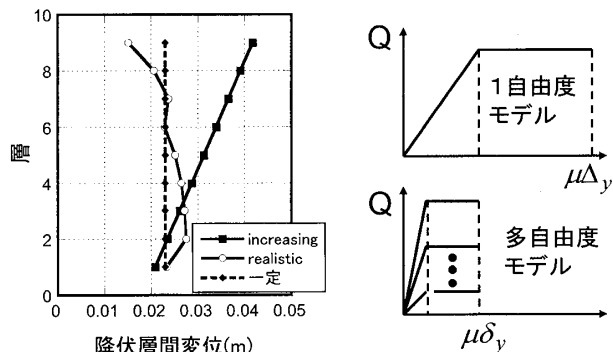


図4 3種類の降伏層間変位と復元力特性

4.1 1自由度モデルの設計と模擬地震動に対する応答

安全限界スペクトルを用い、地盤の増幅係数は簡略化して1種地盤： $G_s=1.5$ 、2種地盤： $G_s=2.2$ 、3種地盤： $G_s=2.7$ とする。塑性率は $\mu=3.0$ とする。等価1質点モデルの降伏層間変位は、等価高さに降伏層間変形角1/150を乗じて求める。塑性率—等価減衰定数関係は $h=0.25(1-1/\sqrt{\mu})+0.05$ を用いることとすると、 $\mu=3.0$ のとき $h=0.156$ となる。弾性固有周期は、1—3種地盤に対して、それぞれ2.30s、1.73s、1.28sとなる。

安全限界スペクトルに適合する3波の模擬地震動に対する1質点モデルの塑性率は、1-3種地盤に対して、それぞれ2.03、2.27、1.88となる。

4.2 剛性・強度分布

上記の3種類の降伏層間変位分布（increasing, realistic, 一定）に対する層剛性分布を図5に、層強度分布を図6に示す。

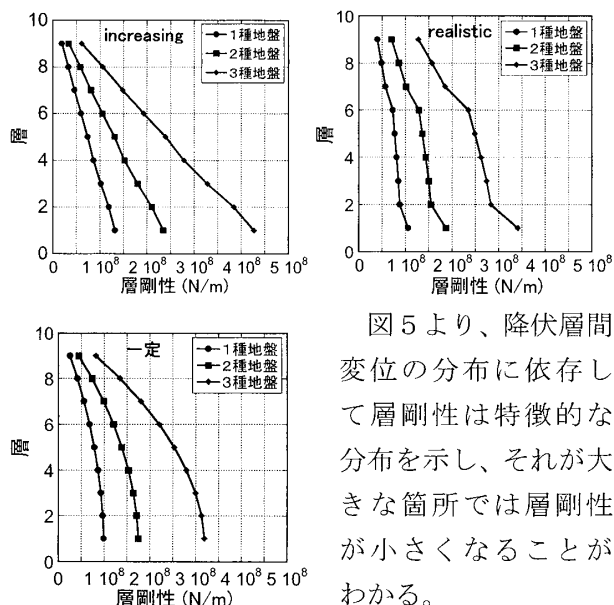


図5 3種類の降伏層間変位分布に対する層剛性分布（第1-3種地盤）

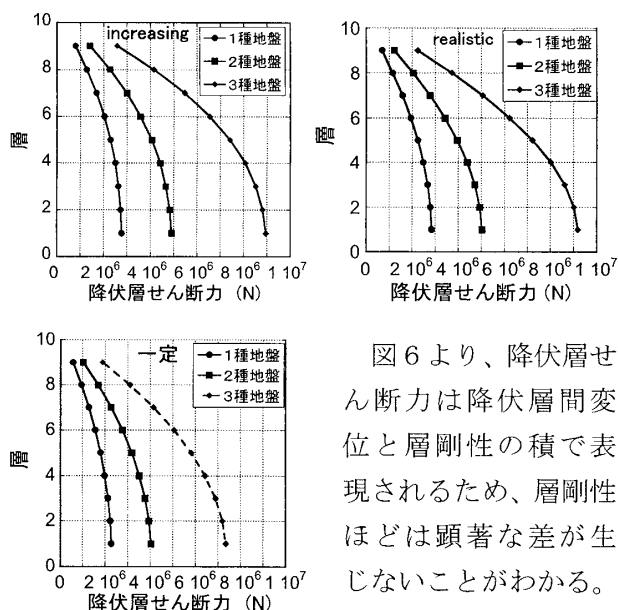


図6 3種類の降伏層間変位分布に対する降伏層せん断力分布（第1-3種地盤）

4.3 降伏層間変位が上層ほど大きな場合

降伏層間変位が上層ほど大きな場合に対する模擬波3波に対する時刻歴解析結果を図7に示す。

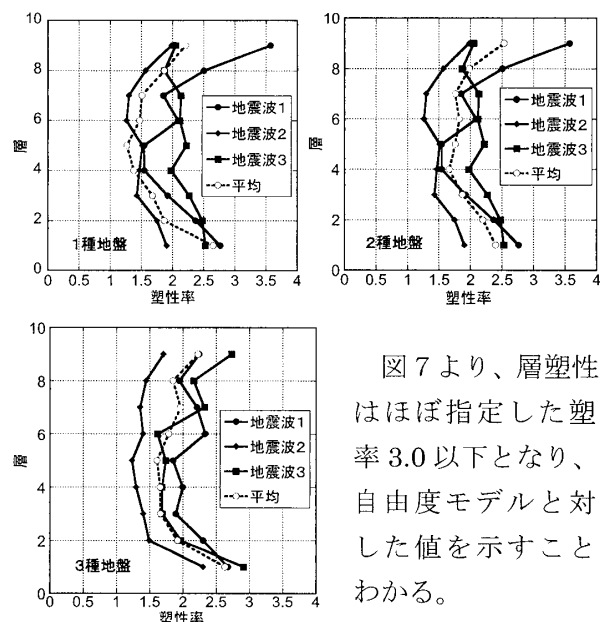


図7 降伏層間変位が上層ほど大きな場合に対する模擬波3波に対する時刻歴解析結果

4.4 降伏層間変位が現実的な場合

降伏層間変位が現実的な場合に対する模擬波3波に対する時刻歴解析結果を図8に示す。

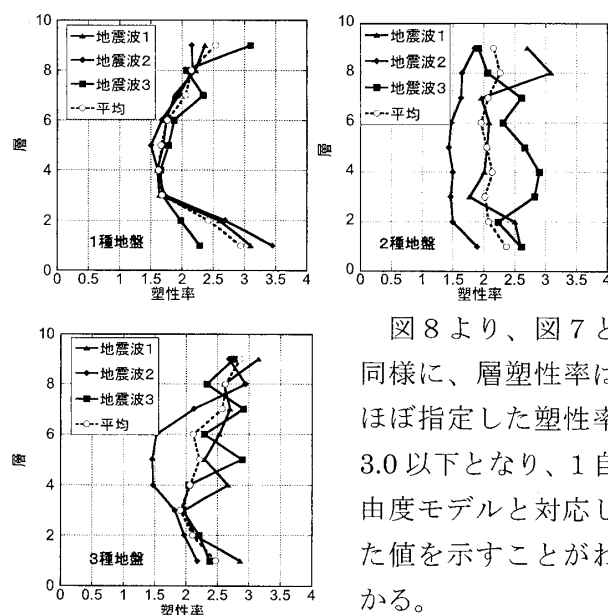


図8 降伏層間変位が現実的な場合に対する模擬波3波に対する時刻歴解析結果

図7より、層塑性率はほぼ指定した塑性率3.0以下となり、1自由度モデルと対応した値を示すことができる。

図8より、図7と同様に、層塑性率はほぼ指定した塑性率3.0以下となり、1自由度モデルと対応した値を示すことができる。

4.5 降伏層間変位が一定の場合

降伏層間変位が現実的な場合に対する模擬波3波に対する時刻歴解析結果を図9に示す。

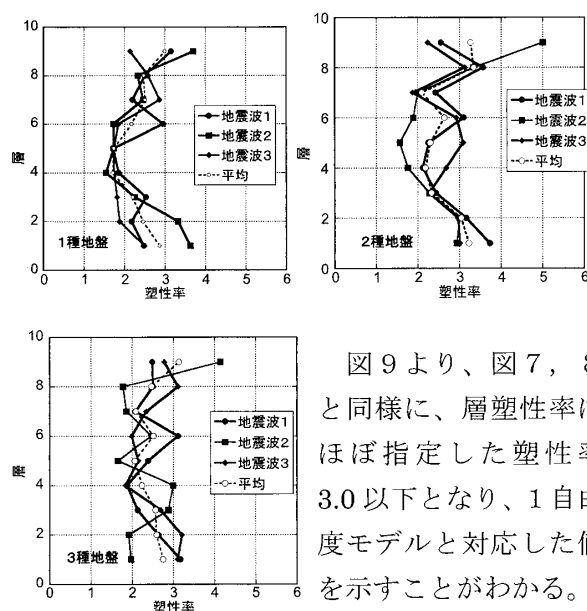


図9 降伏層間変位が現実的な場合に対する模擬波3波に対する時刻歴解析結果

1自由度と多自由度モデルの応答塑性率の精度は(7)式の精度に依存する。

4.6 実際の設計との比較

文献[2]における設計との比較を図10に示す。図より、本提案手法により塑性率 $\mu=3.0$ のもとで第3種地盤に対して設計したものは実際の設計とよく対応しているといえる。

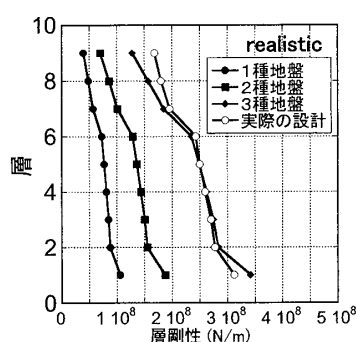


図10 提案手法による層剛性分布と文献[2]の設計の層剛性分布との比較

5. せん断型モデルから骨組への復元

上谷と竹脇ら[3, 4]は、骨組とせん断型モデルの対応関係について、せん断型モデルの弾塑性復元力特性を

実現する骨組の部材断面サイズを決定する理論を展開している。この方法を用いることにより、本論文で得られた多層せん断型モデルの復元力特性（バイリニア一型）から、骨組の部材断面を決定することも可能である。

6. 結論

(1) 1自由度系モデルの代表点変位と塑性率 μ を指定して、初期剛性における周期 T と等価減衰定数 h_{eq} を導く設計問題を提示し、その解の誘導方法を示した。

(2) 設計した1自由度系モデルを多層建物モデルに復元する一手法を提案した。具体的には、1次固有周期は1自由度系モデルと同じものを採用し、1次固有モードはその層間変位モードが降伏層間変位と比例するものを採用した。

(3) 第1, 2, 3種地盤に対して1自由度モデルの塑性率が $\mu=3.0$ となるモデルをそれぞれ設計した。1自由度モデルで塑性率を $\mu=3.0$ とした場合には、9層モデルに対する模擬地震波3波についての限定された範囲ではあるが、第二勾配が0.0の場合において、ほぼ塑性率 $\mu=2.0\sim 2.5$ 程度の範囲に収まることが確認された。この精度は(7)式の塑性率-等価減衰定数関係に依存する。

参考文献

- [1] Nakamura, T., Tsuji, M. and Takewaki, I. (1993). Design of Steel Frames for Specified Seismic Member Ductility via Inverse Eigenmode Formulation, Computers & Structures, 47(6), 1017-1030.
- [2] 日建設計東京オフィス構造設計室編、建築物の性能設計と検証法、オーム社、2003年9月。
- [3] 上谷宏二、竹脇 出：縮約モデル - 骨組逆置換法のためのトータル量表現型設計感度解析、構造系論文集, 第511号, pp101-106, 1998.
- [4] 竹脇 出、杉山哲彦、辻 聖晃、上谷宏二：縮約モデル - 骨組逆置換法に基づく骨組設計法、構造系論文集, 第512号, pp119-125, 1998.

*1 京都大学大学院工学研究科大学院生

*2 京都大学大学院工学研究科

Graduate Student, Kyoto University
Kyoto University