

4. 長周期地震に対する超高層ビルの安全性に関する解析的研究

02168080 浜野晋  
指導教官 藤井大地 助教授

長周期地震動 多質点系振動解析 多質点系応答解析  
応答スペクトル

1. はじめに

近年、東南海、南海地域を震源とする海溝型の大地震が発生する可能性が指摘されており、その際に厚い沖積層と盆状地の地下構造を有す大都市において、数秒から十秒に周期を持つ長周期地震動が発生する可能性が指摘されている。

この長周期地震動が問題になったのは十勝沖地震で、震度は 6 弱でほぼ被害は無かったが石油の原油タンクが炎上した。震度 6 の S 波による被害でなく、その後の人体に感じないゆったりした長周期地震波の揺れに石油タンクの中の油が共振して、スロッシングと呼ばれる現象が起きたのである。そして今、超高層ビルが長周期地震動と共振し大きな揺れが発生する可能性が指摘されている。超高層建築物が損傷した場合、社会的な影響も大きいと、想定される地振動に対する安全性を検討する必要がある。<sup>4)</sup>

そこで本研究では、既往の巨大地震動や、長周期地震動を用いて超高層ビルの安全性に関する研究を行うために、多質点系の振動解析及び応答解析プログラムの開発を行い、様々な事象における研究を行う。

以下、第 2 章では多質点系の応答について説明し、第 3 章では多質点系の振動・応答解析法について説明する。第 4 章では解析例を示し、第 5 章では結果と考察を示す。

2. 多質点系の応答

2.1 固有モード

多層の建物を串団子モデルとして考えたとき、層数だけの未知数を持つ連立方程式となり、そのときの各固有周期に対しての変形モードが求まる。これを固有モードという。本研究では固有周期が長い長周期地震動を用いるため、1 次モードのみを考慮する。

図 1 に振動モードにおける固有周期、振動数の関係を示す。

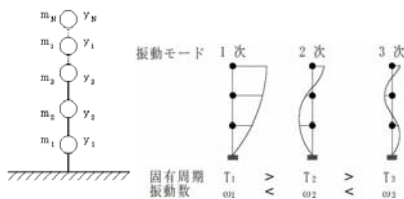


図 1 多質点系モデルと振動モード

2.2 多質点系モデル

多質点系モデルは、串団子状に各層に質量を集中させた最も一般的な解析モデルで、解析時間が短く済むことや、建物全体の応答を把握しやすいことから、最も多用

される振動解析モデルである。<sup>4)</sup>

本研究で用いる多質点系モデルの変位の自由度は、水平変位のみを考慮した等価せん断系モデルとする。

2.3 振動方程式

図 1 に示すように質点が下から順に 1,2,...,NとなるN点質点系を考える。各質点の質量は $m_i$ 、水平変位は $y_i$ で表される。また $i$ 点に作用する減衰定数を $c_i$ 、ばね定数を $k_i$ とする。このときせん断質点系の運動方程式は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{y}_i + c_i (\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}) - c_{i+1} (\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) \\ + k_i (y_i - y_{i-1}) - k_{i+1} (y_{i+1} - y_i) = -m_i \ddot{y}_g \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$m_n \ddot{y}_n + c_n (\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) + k_n (y_n - y_{n-1}) = -m_n \ddot{y}_g \quad (n=1 \cdots N)$$

3. 多質点系の振動・応答解析法

3.1 多質点系の振動・応答解析プログラム

本研究で開発した多質点系の振動・応答解析法プログラムでは、Excel VBA を利用して、(1)式を平均加速度法により数値積分することによって地震応答解析を行っている。必要なデータを入力し、多質点系の固有振動解析を実行すると、各モードの固有周期、固有振動数が求まる。そして、多質点系の応答解析を実行すると、地震動に対する最大変位応答、最大速度応答、最大加速度応答を求めることができる。

3.2 作成したプログラムの有効性の確かめ

プログラムの有効性を確かめるため、図 2 に示す 2 層モデルを多質点系にモデル化し、解析した結果を図 2 に示す。結果は武藤のD値法で得られた固有周期  $T_1=0.26s, T_2=0.10s$ <sup>1)</sup> とほぼ同じになり、プログラムの有効性が確かめられた。

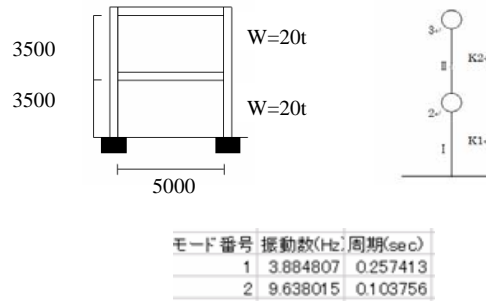


図 2 例題の解析

4. 解析例

4.1 解析モデル

解析に用いる多質点系モデルは、図 3 に示すように純ラーメン構造を対象とした等価せん断形モデルとする。対象とする超高層ビルは鉄骨造を想定し、架構の一次周期  $T_1$  は建物高さを用いた新耐震設計法の簡略式 ( $T_1=H \times 0.02$  H:高さ)を用いる。ただし、高さ 200m以上の超高層建築物に関しては、

一般的に使われる式( $T_1 = n/10$  n:階数)<sup>4)</sup>を用いる。

多質点系モデルの基準階床面積は、20m×30mの600m<sup>2</sup>とする。建物の高さは一階あたり4.5mとし、単位面積当たりの各階重量を10kN/m<sup>2</sup>とする。多質点系モデルの質量は各階の集中質量として与え、減衰定数は2%とする。

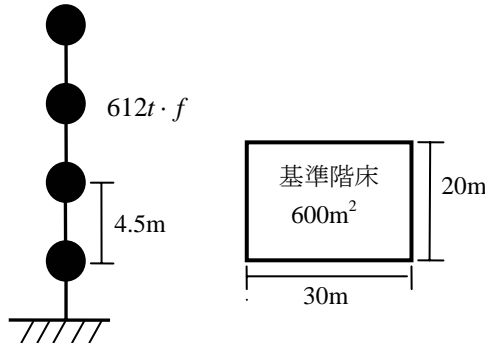


図3 解析モデル

#### 4.2 解析方法

解析例として10層から80層の8タイプの等価せん断系モデルを用いる。各層の剛性は、1次固有周期を指定された多質点せん断形構造物の最適設計法<sup>3)</sup>で求め、これらの解析例に対して、多質点系の応答解析プログラムを用いて応答を求める。

入力地震動は、長周期地震動として十勝沖地震 NS 波、新潟中越地震 NS 波の東京の観測データを入力する。比較用の地震波は、中国地方の地域地震動として、芸予地震 NS 波、鳥取県西部地震 NS 波を入力する。また、最近起きた大地震として兵庫県南部地震 NS 波、十勝沖地震 NS 波、新潟中越地震 NS 波、一般に設計用に使われる地震動として El Centro NS 波を用いる。図4は、地震波の特性の比較として、これらの地震波の加速度応答スペクトルを示したものである。

地震応答解析に用いる地震波は、K-netのデータベース<sup>5)</sup>から取得したデータをExcelシートに編集し、与える。解析に用いる際の入力地震動の継続時間は40秒、長周期の地震動に関しては120秒とし、解析時間刻みは0.01秒とする。

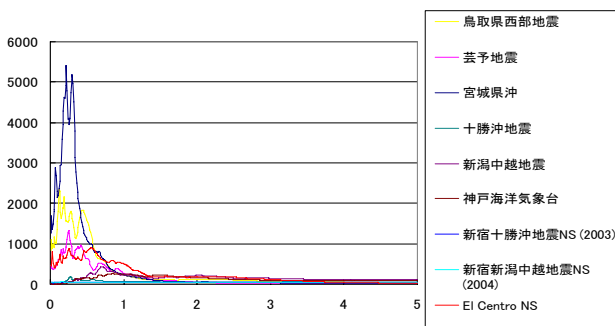


図4 各地震波の加速度応答スペクトルの比較

### 5. 結果と考察

#### 5.1 解析結果

8タイプの建物を多質点系の応答を用いて、各地震波に対して解析し、その結果から各層の最大応答値を比較し、得られた解析結果を図5に示す。順に、最大変位応答スペクトル、最大速度応答スペクトル、最大加速度応答スペクトルを示す。

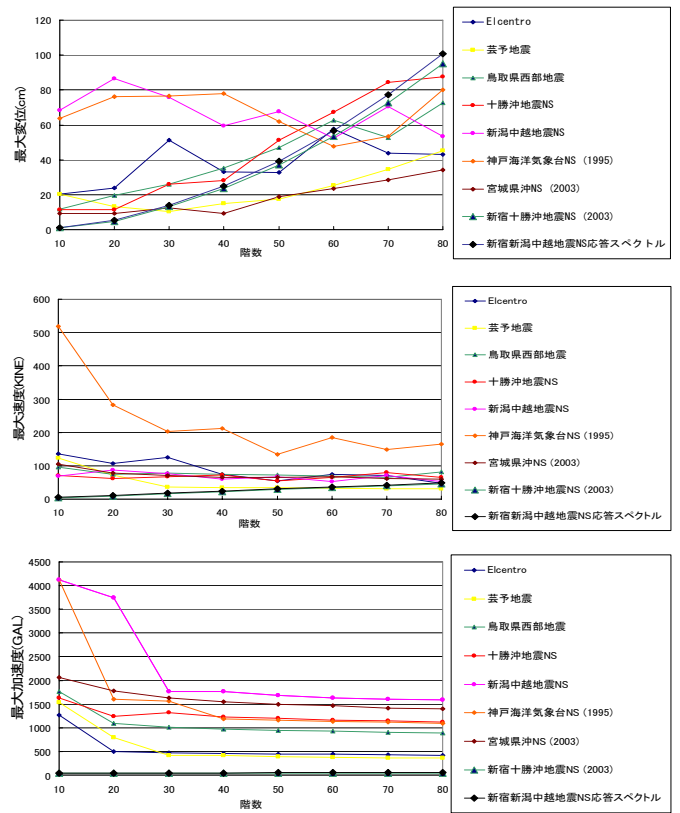


図5 各層における最大応答スペクトル

#### 5.2 考察・まとめ

本研究では、多質点系の振動解析・応答解析プログラムを作成し、8タイプの高層建物について解析を行った。その結果、長周期地震動に対する最大速度、最大加速度は他の巨大地震に比べると小さくなったが、最大変位は階数に比例して揺れの振幅が大きくなり、十勝沖地震、新潟中越地震の東京で観測された地震波両方で最大1mの応答が得られた。

以上の結果より、長周期地震に対して、速度、加速度は小さいので構造的な損傷はほぼ無いと思われるが、長周期地震動の応答時間は長く、特に高層階では変位が大きいため、家具等の転倒が被害を及ぼす可能性がある。したがって、家具などに対して転倒防止策が講じられる必要があることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 柴田明徳, 「最新 耐震構造解析」, 森北出版 1981.6
- 2) 藤井大地, Excel で解く 3 次元建築構造解析, 丸善 2005.2
- 3) 中村恒善, 建築骨組みの最適設計, 丸善 1980.1
- 4) 日本建築学会, 巨大地震時に予測される長期地震動とその耐震問題, 2005.9
- 5) 強震ネットワーク K-net (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>)