第7回:1質点系モデルにおける様々な地震動と地震応答解析(2021年6月2日 久田作成)

1. 振動論の基礎と地震動・地震応答解析

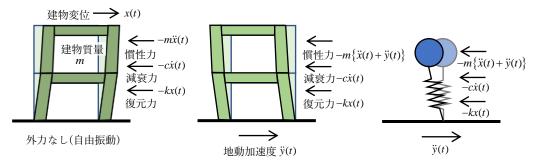
・1質点系振動モデルの運動方程式と自由振動・強制振動

地震時の建物の揺れをモデル化する際、最も単純なモデルは一つの質量 (質点:m)とばね剛性 (k)、減衰 (h) でモデル化する 1 質点系振動モデルである。現行の建築基準法による耐震規定の振動論の基礎はこのモデルで構築されている。

図1に建物の1質点系振動モデルと作用する外力を示す。作用する外力は慣性力・減衰力・復元力で、全て振動する正の向きに逆向きに作用する。外力がなく、初期条件(強制変位)を与えた後の振動を自由振動、地震による地動加速度による慣性力などの外力がある場合を強制振動と呼ぶ。地動加速度が作用した場合の力のつり合い式(運動方程式)は次式で表せる。

$$-m\{\ddot{x}(t) + \ddot{y}(t)\} - c\dot{x}(t) - kx(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{y}(t) \tag{1}$$

自由振動の場合は $\ddot{y}(t)=0$ である。さらに、多質点系モデルやフレームモデル(柱やはりなどの部材を全てモデル化)した場合、(1)式はマトリックスで表せる(教科書の 2.1.2)。任意の外力に対する振動 応答解は、コンピュータにより直接積分法など様々な数値解析手法によって計算される。



(a) 振動する建物に作用する外力(左:自由振動、右:地震力) (b) 1 質点系振動モデル 図 1.1 建物の 1 質点系モデルと自由振動(外力なし)と強制振動(地動加速度あり)

・自由振動解と建物の固有周期

外力のない自由振動の場合、 $x(t) = A \cdot \sin(\omega t) + B \cdot \cos(\omega t)$ や $x(t) = u \cdot \exp(i\omega t)$ などと振幅と振動の項に分離した振動関数を仮定して(1)式に用い、初期条件(t=0の変位・速度)を解くことで自由振動解が求まる。 1 質点系振動モデルの質量を m(kg)、剛性を k(N/m)とすると、その固有周期 T は

$$T(s) = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \tag{2}$$

で求められる(この式は振動論の基本式。1級建築士の試験などにも出題されている)。

周期とは振動する場合の往復に要する時間であり、秒(s)で表示する。全ての建物には固有の周期があり、図2にその目安を示す。一般に、

木造建物(古い): 0.2-0.5 秒程度、 木造建物(新しい): 0.1-0.3 秒程度、

RC 造: 0.015H 秒程度 (H: 軒高 m)、 S 造: 0.02H 秒程度 (H: 軒高 m)

が程度である。例えば、工学院大学新宿校舎(28階S造、軒高128m)の固有周期(厳密には1次 固有周期)は東西・南北方向とも約3秒である。

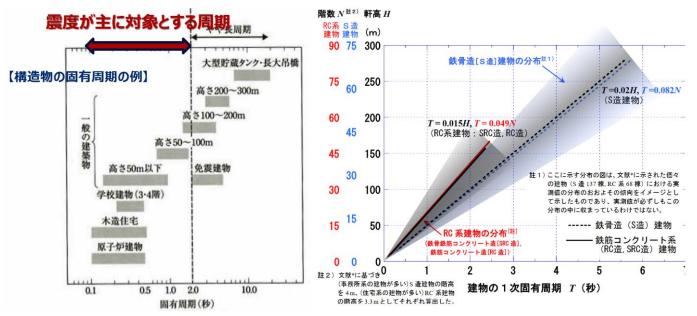


図 1.2 建物の 1 次固有周期の目安(「建物の揺れを科学する(山中ほか、東大出版会)」)

左: 気象庁 (https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu191010/shiryou1.pdf) 右: 気象庁 (http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/ltpgm explain/about period.html)

・長周期と短周期:建築物と地震動(標準波と長周期地震動・長周期パルス)

一般に地震工学分野では、周期1秒程度以下は短周期、1-2秒程度以上は長周期(やや長周期)と呼ばれ、地震動として前者が卓越する地震動は短周期地震動、後者が卓越する地震動は長周期地震動と呼ばれている。一方、建物の固有周期では、中低層建物の短周期構造物、高さ60mを超える超高層建築や免震建築は長周期構造物、と呼ばれる。

一方、強い地震力を受けて建物が壊れると建物の剛性は低下し、周期が伸びる。古い低層建物が壊れると一般に周期1秒程度となり、この周期成分が卓越する強震動が発生すると、甚大な被害を生じる場合がある。1995 年兵庫県南部地震の神戸市の周期1秒程度のパルス性強震動はこの典型例であり、キラーパルス(指向性パルス、大振幅地震動)と呼ばれた。また巨大地震による関東平野などの柔らかい堆積盆地や沖積平野では継続時間の長い長周期地震動が発生し、超高層建築への影響が懸念されている(2011 年東北地方太平洋沖地震の東京・大阪など)。また地表に大規模な活断層(地表地震断層)が出現すると、そのごく近傍では断層変位に起因する長周期パルス(フリングステップ)が発生し、長周期構造物への影響が懸念されている(2016 年熊本地震の西原波など)。

参考資料1 (様々な地震動と建築の耐震・防災):

NHK スペシャル (2011 年熊本地震の長周期パルス): 長周期パルスと超高層の応答解析、長周期地震動との違い https://drive.google.com/drive/folders/1QWxBKtNR54Q-3OngqCvN03jCGiEqI-OG (注意:他人に渡さないこと!) 久田研究室:第1回:強震動と地震防災・減災 ~ 第4回 超高層建築の震災対策、ほか (構造技術者向けの解説) https://www.sein21.jp/TechnicalContents/Hisada/Hisada0101.aspx (NTT ファシリティーズ、SEBWEB)

久田研究室:第1回から第7回(NHK、そなえる防災:一般市民向けの解説)

https://www.nhk.or.jp/sonae/column/20150637.html

久田研究室:巨大地震、高層ビルを襲う「長周期地震動」「逃げずに留まる」「自助・共助」大都市型防災で臨む https://nordot.app/382767791499232353 (リスク対策.com)

久田研究室:「災害時、逃げる必要のない建物とまちづくり(第1部から第4部まで)」 https://shisokuyubi.com/special-column/Disaster-prevention-city01 (防災意識を育てる WEB マガジン 「思則有備」)

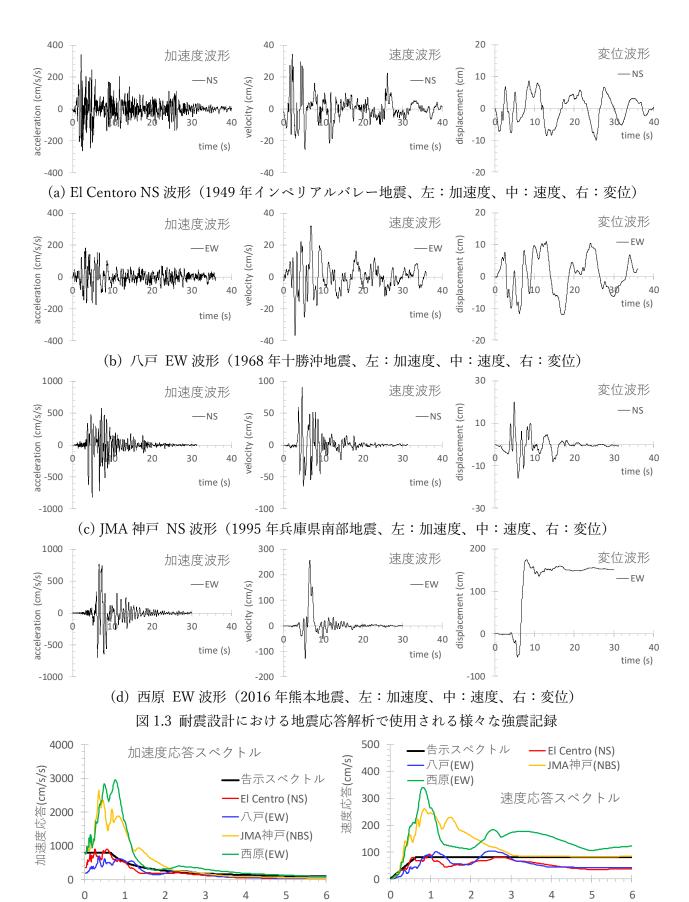


図 1.4 様々な強震記録による加速度・速度応答スペクトル (減衰 5%)

周期(s)

周期(s)

2.1 質点系モデルの振動解析ソフト(1 Mass Simulation.exe)の説明

1 質点系モデルの振動解析ソフトにより、自由振動解や定常応答解による周期や共振現象などの振動理論の基礎と、様々な入力地震動による応答解析を行い、建物の耐震対策を理解する。

参考資料2 (長周期地震動と超高層建築の振動解析、制振ダンパーの効果など):

- ・フジ TV NewsJapan (2011-6-21): 311 地震と南海トラフ地震による新宿校舎の地震応答解析・対策など) https://drive.google.com/drive/folders/1RHj6AHz30DucZSzhw1A5B6mSRhzMygcT (注意:他人に渡さないこと!)
- ・新宿校舎の地震応答解析(制振ダンパーの有無による被害程度の違い)
- ・311L2- D00 x D44-amp10.mp4: D00(ダンパー無し)と D44(44 個ダンパー)に告示 L2 波(工学院 311 波位相)を EW 方向に入力。振幅 1 0 倍表示
- ・告示 L2-D00 x D44-amp10.mp4: D00 (ダンパー無し) と D44 (44 個ダンパー) に告示 L2 波 (ランダム位相) を EW 方向に入力。振幅 1 0 倍表示
- ・中国の高層ビル 突然大きな揺れ:https://www.youtube.com/watch?v=AJF29ytSfjU
- ・強風による共振現象で崩壊したタコマ橋 (1940): https://www.youtube.com/watch?v=VJ0JILWo_vw

(1) 入力画面と初期設定

結果はエクセル等で結果を表示可能であり、振動論の基礎を理解する。まずソフトを起動すると、 図 2.1 の入力画面が現れる。



図 2.1 1 Mass Simulation.exe の入力画面

振動モデルのパラメータには、剛性 (k:kN/cm)、質量 (m:kg)、減衰 (h:%)、振動計算のための分割時間 $(\Delta t:s)$ 、解析時間 (s) を指定する。図 2.1 はデフォルトの初期設定値であり、m=100,000 kg (100 t) , K=300 kN/cm (=30,000,000 N/m)などであり、「固有周期の表示」ボタンを押すと、固有周期(T:s)が表示される $(T=2\pi\sqrt{(m/K)} = 0.362 s)$ 。

(2) 外力選択と振動解析(自由振動の場合)

自由振動解析(外力なし)を行う場合、入力画面の右欄の初期変位(cm)か、初期速度(cm/s)を 指定する。例として、初期変位の〇にチェックを入れると、デフォルトで 5 cm の初期変位の自由振動 が設定される。「解析開始」ボタンを押すと、図 2.2 のウィンドウが開き、振動計算を実行する。 画面 の左側の波形の図は、上から入力加速度(自由振動の場合は無し)、1 質点の応答加速度・応答速度・ 応答変位であり、その左覧には最大・最小値が表示される。画面の右側には、1 質点の振動の様子や 計算時刻とその時の入力加速度・応答加速度・応答速度・応答変位が表示される。

計算が終了すると、解析終了のボタンが現れるので、OK を押すと計算画面が閉じる。

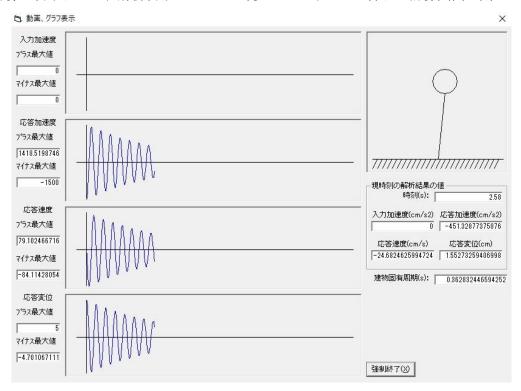


図 2.2 1 Mass Simulation.exe の計算画面

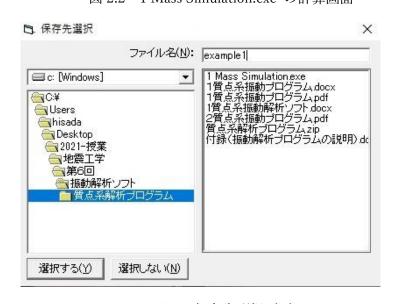


図 2.3 保存先選択画面

(3) 計算結果データの保存法:

入力画面(図 2.1)の「保存先選択」ボタンを押すと、図 2.3 のウィンドウが開く。結果を出力するファイル名を半角英数字で指定する(拡張子は不要)。例えば、example1 と入力し、「保存先選択」ボ

タンを押すと、画面が閉じる。入力画面(図 2.1)に戻り、「保存」ボタンを押すと、データが csv 形式で保存される。データは csv ファイルなので、エクセルで波形などの図を作成し、課題の作成に利用できる。

(4) 外力選択と強制振動による応答解析(定常波/sin 波入力の場合)

外力の地動入力を定常波(調和加振、sin 波加振)とする場合 、入力画面(図 2.1)の右欄の定常波(加速度)か、定常波(変位)を指定する。例として、定常波(加速度)の〇にチェックを入れると、デフォルトで周期 1 秒、振幅 300 cm/s² の定常波とする地動加速度による強制振動が設定される。「解析開始」ボタンを押すと、図 2.2 のウィンドウが開き、計算を実行する。画面左の一番上の波形は、外力の加速度波形であり、この場合は sin 波が表示される。計算が終了すると、解析終了のボタンが現れるので、OK を押すと計算画面が閉じる。計算結果データの保存法は、外力選択 1 と全く同じであり、図 2.3 の保存先選択ウィンドウで、例えば、example2 と入力し、「保存先選択」ボタンを押すと、画面が閉じる。入力画面(図 2.1)に戻り、「保存」ボタンを押すと、データが csv 形式で保存される。

・共振現象と対策を理解する(長周期地震動と制振・制震構造)

建物の周期と入力 sin 波の周期が一致すると、共振現象が発生し、建物の応答が時間の経過とともに増大する。建物の減衰が小さいと、建物応答はどんどん成長し、非常に危険な状態になる。応答を低減させるには、建物の周期を変化させて共振を避けるか、減衰を大きくする。一般に S 造の超高層建築は減衰が非常に小さく (1%程度)、長周期地震動に共振することが懸念されている。近年はダンパー(減衰)を付加し、制振(制震)構造にするなどの対策が求められている。

(5) 地震応答解析(地震波入力の場合の強制振動)

外力の地動入力を地震の加速度波形とする場合、入力画面(図 2.1)の右欄下の地震波を指定し、〇にチェックを入れる。「地震波選択」ボタンを押すと図 2.4 の地震波選択画面が開く。地震加速度波形は、例えば、下記のデータの選択が可能である。

- ・Elce NS.csv (エルセントロ波形の NS 成分):世界標準で用いられる加速度波形
- ・Hach EW.csv:八戸波 (EW 成分): 1968 年十勝沖地震の八戸港湾で得られ、約周期 2.8 秒の長周期地震動を観測した波形。日本では標準波の1つとして扱われる。
- ・Kobe NSR.csv (JMA 神戸波形の NS 成分): 1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で得られた 波形。活断層近傍の指向性パルス(キラーパルス)が観測されている。
- ・Nishi EW.csv (西原波形の EW 成分): 2016 年熊本地震の地表地震断層ごく近傍の西原村役場で観測された波形。断層すべりに起因する長周期パルス(フリングステップ)が観測されている。

例えば、標準波である Elce NS.csv を選択した場合が、図 2.4 の画面であり、決定の場合は「選択する」ボタンを押す。時間分割、その他のメッセージが現れるので、「OK」ボタンを押す。「解析開始」ボタンを押すと、図 2.2 のウィンドウが開き、計算を実行する。 計算が終了すると、解析終了のボタンが現れるので、OK を押すと計算画面が閉じる。計算結果データの保存法:外力選択1と全く同じ。図 2.3 の保存先選択ウィンドウで、例えば、example3 と入力し、「保存先選択」ボタンを押すと、画面が閉じる。入力画面(図 2.1)に戻り、「保存」ボタンを押すと、データが csv 形式で保存される。



図 2.4 地震波選択画面

(6) 特徴ある地震動による様々な建物の地震応答特性を調べる

標準波である Elce NS.csv の地震応答と比べて、特徴ある地震動に対して短周期や長周期の建物、減衰の大小の建物などの応答特性がどのように変化するかを調べてみる。

- ・建物の固有周期を変える: 固有周期を変えるには、剛性あるいは質量を変化させる。例えば、デフォルトの $k=300 \, kN/cm$ 、 $m=100,000 \, kg$ の固有周期 (T) は $0.36 \, \vartheta$ で低層建物のイメージである。 $k=40 \, kN/cm$ とすると、 $T=0.99 \, \vartheta$ で高層建物(あるいは、大被害を受けた古い建物)、 $k=4 \, kN/cm$ とすると、 $T=3.14 \, \vartheta$ で超高層建物(あるいは、免震建物)のイメージとなる。
- ・建物の減衰を変える: デフォルトの減衰は 2%で、やや減衰の大きな鉄骨造、あるいは、振幅の小さな新しい木造・RC 造のイメージである。R C造や制振 S 造では 5%程度、免震建物では 10%程度の減衰のイメージである。
- ・入力地震動を変える: Elce NS.csv は短周期地震動が卓越する万国共通の標準波であり、現行の大地震に対する耐震設計の基準のイメージである。一方、HACH EW.csv は軟弱地盤で周期 2.8 秒程度が卓越する長周期地震動、KOBE NS.csv は活断層近傍の周期 1 秒程度が卓越するキラーパルス(指向性パルス)、NISHI EW.csv は、地表地震動のごく近傍で周期 3 秒程度以上の長周期パルス(フリングステップ)、がそれぞれ特徴となる地震動である。

(7) 地震応答スペクトルを理解する

ある地震動を選び、建物の固有周期を変化させて、地震動応答の最大値(絶対値)を記録する。通常は減衰を5%として、横軸に固有周期、縦軸に地震動応答の最大値(絶対値)をプロットした図が地震応答スペクトルである。地震動応答の最大値が加速度、速度、変位の場合は、それぞれ、加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルと呼ばれている。このうち、加速度応答スペクトルに建物の質量を乗じると地震荷重に対応する。図 2.5 に建築基準法による告示スペクトルと、標準波である El Centro NS 波、八戸 EW 波、および、活断層近傍の強震動である JMA 神戸 NS 波(震度6強)、西原 EW 波(震度7)の加速度・速度応答スペクトルを示す。後者の地震動が前者を凌駕していることに注意されたい。

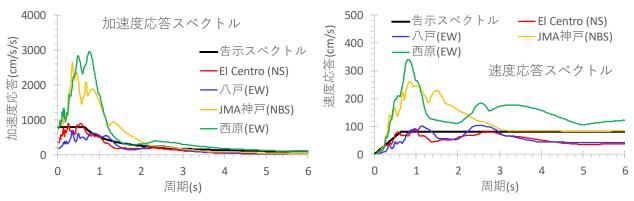


図 2.5 建築基準法・告示スペクトルと標準波による加速度(左)・速度(右)応答スペクトル

(8) 地震応答スペクトルをさらに理解する

図 2.6 に El Centro NS 波の加速度応答スペクトル(5%減衰)の加速度応答スペクトルを示す(この 図は専用ソフトで作成)。1 Mass-Simulation.exe を使用して、図 2.6 の意味をさらに理解する。例えば、 固有周期を 0.5、 1 、2、 3、 4 秒として、その加速度応答の最大値(絶対値)が図 2.6 に記入された値 に等しくなることを確認する。すなわち、1 Mass-Simulation.exe を起動して、減衰定数を 5%、外力選択を地震波とし、地震波選択で Elce NS.csv を選択する。ここでは周期の変更は、剛性を変化させて行う。例えば、剛性を 158 kN/cm とすると、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{100,000(kg)}{158(kN/cm)}} = 2\pi \sqrt{\frac{100,000(kg)}{158\times1,000\times100(N/m)}} \approx 0.5(s)$$

であり、周期は約0.5秒となる(固有周期の表示で確認)。解析開始で応答解析計算を行い、応答加速度の最大値が、約820 gal(cm/s²)であることを確認する。同様に剛性を39.5,9.87,4.39,2.47 kN/cmとすると、固有周期はそれぞれ、1,2,3,4秒になり、応答解析から最大加速度の応答値が図2.6 に記入された値でになる。同時に、固有周期が長い建物の応答波形の性状や最大振幅が小さくなる特徴や、「標準波」に対して、超高層建築や免震建築など長周期構造物の応答加速度(地震荷重)が減少すること、さらには1981年新耐震基準の振動特性係数Rt(図2.7の第1種地盤相当)や2000年告示スペクトル(図2.6の解放工学的基盤)の基になっていることを理解する。

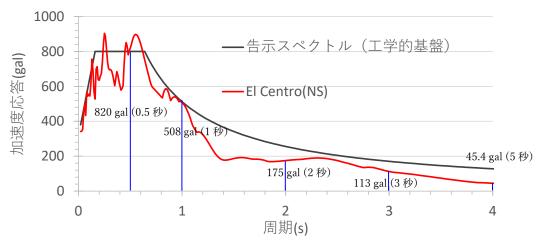


図 2.6 El Centro NS 波の加速度応答スペクトル(h=0.05)と 2000 年告示スペクトル

 $T > T_c$ の場合 $R_t = 1 - 0.2 \left(\frac{T}{T_1} - 1\right)^2$ $T \leq T_c$ の場合 1.0 振動特性係数 R, $R_t = 1.0$ T: 設計用一次固有周期 0.6 T_c : 地盤特性係数 0.4 第1種地盤 $T_c = 0.4$ 0.2第 2 種地盤 $T_c = 0.6$ 0.0 1.0 2.0〔秒〕 第 3 種地盤 $T_c = 0.8$ --- 建築物の設計用-次固有周期 T [秒]

図 2.7 1981 年新耐震基準の振動特性係数 Rt

2.3 課題(振動論の基礎と耐震対策)

下記の課題に対してレポートをまとめる。このうち、1)から 3)は必須、4)と 5)は任意(加点)とす る。

1) 建築物の地震応答解析と耐震対策の理解(必須)

現行の耐震設計では高さ 60 m より高い超高層建築や小規模住宅を除く免震建築には適切な入力地 震動を用いた地震応答解析を行い、耐震安全性能(大地震で倒壊しない、など)を確認し、外部機関か ら認証を得ることが義務化されている。現在では、最低基準の入力地震動としては El Centro 波などの 標準波や 2000 年耐震基準の告示波(図 2.6 参照)が一般に使用されている。一方、近年、2011 年東 北地方太平洋沖地震や想定南海トラフ・相模トラフ巨大地震などによる関東・大阪平野などに生じる 長周期地震動、あるいは、2011年熊本地震などの活断層帯地震の近傍で発生する大振幅地震動(指向 性パルスや長周期パルス)など、標準波の振幅や継続時間を凌駕する特徴のある地震動の存在が明ら かになり、法的な義務はないもののその対策が求められている。そこで、教科書、および、参考文献 1, 2などを参考として、下記の項目

- ・標準波と、特徴ある地震動(長周期地震動、指向性・キラーパルス、長周期パルス・フリングステ ップ)との特徴の違い
- ・超高層建築の応答性状の違いと、その耐震対策(ハザードと建物の脆弱性の調査、リスク低減など) を調査し、自分の考えをまとめよ。

2) 振動論の基礎(必須1:自由振動解析)

下記の課題に対して 1 Mass-Simulation.exe による振動解析を行い、レポートをまとめる。

•自由振動(固有周期と減衰):任意の剛性と質量を設定し、各自でオリジナルの固有周期を計算せよ (固有周期は0.3~1 秒程度の間に設定する)。その際、(2)式で計算した固有周期と、ソフトによる固 有周期の値が一致することを確認すること。次に減衰を5%として、外力選択を「初期変位(5 cm)」 を選択し、「解析開始」にて振動計算を行う。計算結果は画面コピー(キーボードの「Print Screen」)

からワードにて貼り付け(「Ctrl」+「V」)、あるいはできれば csv ファイルに結果を保存し、エクセルにて図を作成し、ワードに貼り付ける。さらに減衰定数を 5%以外の値(0 から 20%程度まで)を使用し、結果をワードに貼り付け、両者を比較する。その結果、振動モデルが固有周期で往復を繰り返していること、減衰定数の大小で、振動解析結果に差が出ることを確認する。

3) 振動論の基礎(必須2:地震応答解析)

下記の課題に対して1 Mass-Simulation.exe による振動解析を行い、レポートをまとめる。

・標準波と地震応答スペクトル:外力選択を地震波として、標準波である Elce NS.csv を選択し、いくつかの固有周期(0.2 秒から 3 秒程度)で地震応答解析を行い、短周期の建物と長周期の建物での加速度と変位の最大応答の変化を調べよ(減衰定数は 5%とする)。計算結果の図は、2)と同様に画面コピーか、エクセルによる図をワードの貼り付けて、比較検討する。さらに地震応答スペクトル(図 2.6)は何か(どのようにして計算されるのか)、それが現在の耐震設計法にどのように活用されているのかを説明せよ。

4) 振動論の基礎(加点1:共振現象と制振構造)

外力選択を定常波とし、外力 sin 波の周期と 1 質点系モデルの固有周期が一致する場合(共振)と共振しない場合で応答解析結果を比較し、共振現象とは何か、説明すること。さらに共振現象を避けるためには、どのような対策があるか(剛性を変化、あるいは、減衰の増大など)、説明し、その効果を振動解析結果から説明せよ。さらに、現在の超高層建築では、制振ダンパーの設置が望ましいとされる理由を説明せよ。

5)振動論の基礎(加点2:特徴ある地震動による地震応答解析)

Hachi EW.csv (周期 3 秒程度が大きい長周期地震動)、Kobe NS.csv (指向性パルス)、あるいは、Nishi EW.csv (長周期パルス) による応答解析を行い、3)の標準波である Elce NS.csv による応答解析の結果と比べて、その特徴を説明せよ。

提出:課題の提出は Course Power の課題フォルダーより、6/15(火)の 17 時までに、ワードまたは pdf ファイルにて提出。