

建物と地盤の動的相互作用を考慮した免震建物の地震時上下動応答

(建築学科) 泉 洋輔

Study on The Vertical Response of Seismic Isolated Structures Considering Dynamic Soil-Structure Interaction

(Department of Architecture and Structural Engineering) Yosuke IZUMI

Abstract

It is generally recognized that seismic isolated structures have an excellent seismic performance, particularly after the Hyogoken Nanbu Earthquake in 1995. In practical structural design using the Notification-No.2009 of Ministry of Land, Infrastructure and Transport in which are applied to the seismic isolated structures, the response deformation of each devices, i.e. isolator and damper, are to be within the allowable design deformation, and the tensile stress is not permitted in the isolators considering the vertical seismic coefficient ± 0.3 , furthermore the eccentricity of the isolated story is to be less than 3%. This paper describes the vertical seismic coefficient by the dynamic response analysis based on the base-fixed model and dynamic soil-structure interaction model.

Key Words : dynamic soil-structure interaction, seismic isolated structure, vertical seismic coefficient, pile groupe effect, vertical impedance
動的相互作用, 免震構造, 上下方向震度, 群杭効果, インピーダンス

§ 1 はじめに

免震建物の構造設計においては、免震層を構成するアイソレータ、ダンパーなどの免震装置の水平変位が設計クライテリア以内に収まることを検証することの他に、アイソレータに引張力が発生するかどうかの検討が必須となる。一般建築物に適用される、国土交通省告示第 2009 号「免震建築物の構造方法に関する安全上必要な技術基準を定める等の件」の第 6 のいわゆる免震告示においては、上下方向の静的震度（以下、上下方向震度）を ± 0.3 としてアイソレータの面圧が鉛直基準強度以下となることおよび引張力が生じないことを確認するように規定されている。これは、引張力を受けるアイソレータの復元力特性が、あるせん断ひずみを超えるとハードニングを呈するようになり、設計時に設定している復元力特性モデルと乖離することを防止するためと考えられる。

本報告は、比較的小規模な中低層免震建物を対象として基礎固定条件とした場合と動的相互作用を考慮した場合の 2 ケースについて免震建物の上下動入力に対する応答解析を行い、免震層における上下方向震度の分布について検討を行ったものである。

§ 2 入力上下動

2.1 入力加速度波形

上下動解析はレベル 2 に対してのみ行うことになって

いるが、その上下動の目標スペクトルは、極めて稀に発生する地震動（レベル 2）の水平動の目標スペクトルに対して図 2.1 に示す上下動成分係数を乗じて設定される。

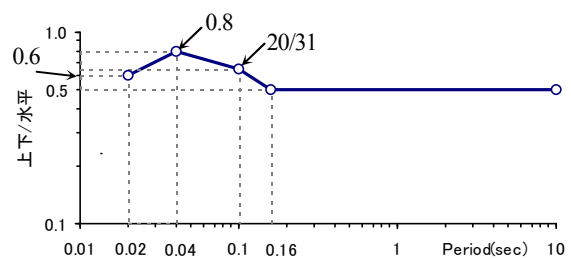


図 2.1 上下動成分係数

図 2.1 で設定されている周期間における上下動成分係数が必要な場合は、両対数軸上で直線補間することにより求める。例えば 0.05 秒での上下動成分係数は、 $(x_1, y_1) = (0.04, 0.8)$ 、 $(x_2, y_2) = (0.10, 20/31)$ として、2 点間の直線の式である、

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$$

を用いる。上式の両辺の常用対数をとると、

$$\log y = \log(8/10) + \frac{\log\left(\frac{20 \times 10 / 31}{10}\right) - \log(8/10)}{\log(10/100) - \log(4/100)} \times (\log x - \log(4/100))$$

となる. 上式で x に $0.05 = 5/100$ を代入すると,

$$\begin{aligned} \log y &= \log 8 - \log 10 \\ &+ \frac{\log 200 - \log 31 - \log 10 - \log 8 + \log 10}{\log 10 - \log 100 - \log 4 + \log 100} \\ &\times (\log 5 - \log 100 - \log 4 + \log 100) \\ &= -0.1197 \end{aligned}$$

これより, 0.05 秒での上下動成分係数は,

$$\therefore y = 10^{-0.1197} = 0.759$$

と求められる.

図 2.2(a)に上下動の目標スペクトルの加速度応答スペクトル S_a を, また同図(b)に擬似速度応答スペクトル S_{pv} ($S_a = \omega \cdot S_{pv}$, $\omega = 2\pi/T$ で変換する) をそれぞれ水平動の目標スペクトルと比較して示す. この場合においても水平動と同様に上下動の目標スペクトルは, 解放工学的基盤面で定義されている.

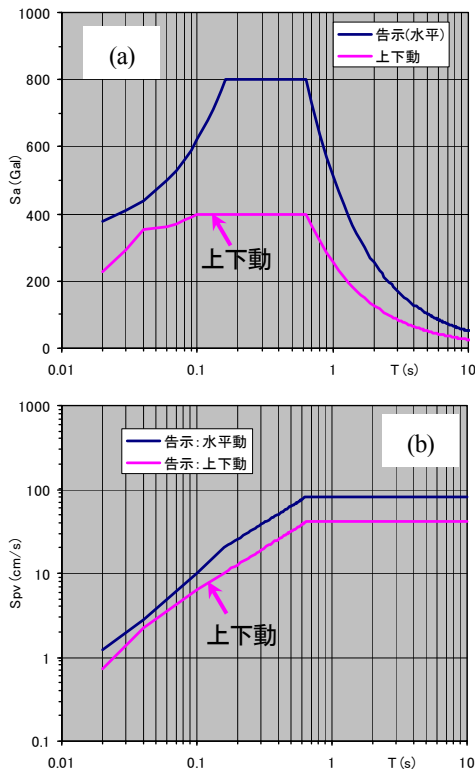


図 2.2 上下動の目標スペクトル

図 2.3 に上記の目標スペクトルにフィッティングさせた 3 種類の加速度波形およびその擬似速度応答スペ

クトルを示す. 位相特性は, 一様乱数, 八戸港湾 UD 成分 (十勝沖地震 1968), JMA 神戸 UD 成分 (兵庫県南部地震 1995) である.

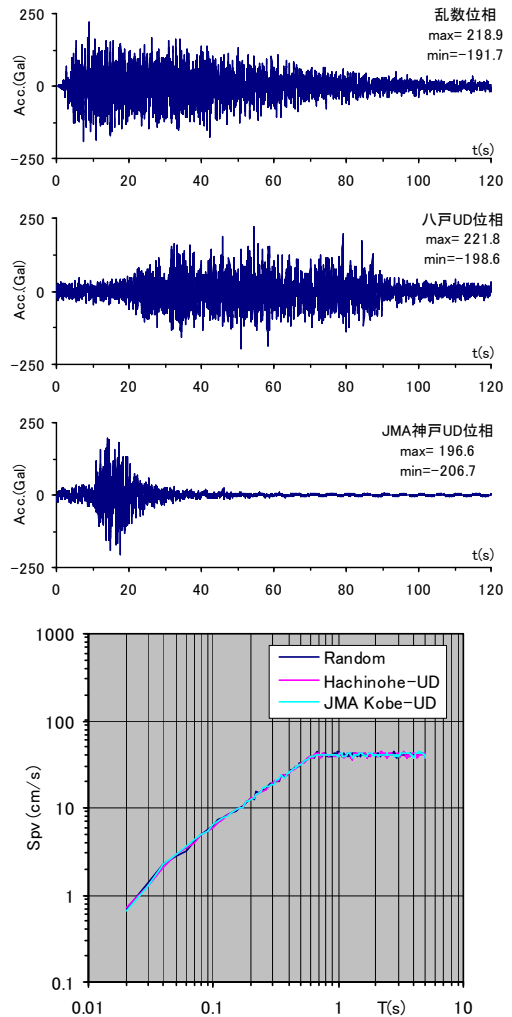


図 2.3 上下動の解放工学的基盤波と擬似速度応答スペクトル

2.2 自由地盤解析

地盤物性として, 密度, 疎密波 (P 波) 速度 V_p , 減衰定数 (通常 2% を設定) を用いて, 1 次元等価線形解析 SHAKE の線形応答解析を行い, 地表面の上下動加速度応答波形を計算する. なお, 不飽和土の上下応答については, 土の軸歪に依存した非線形性を考慮した解析が必要となるが, ここでは考慮しないものとする.

§ 3 上下動応答解析

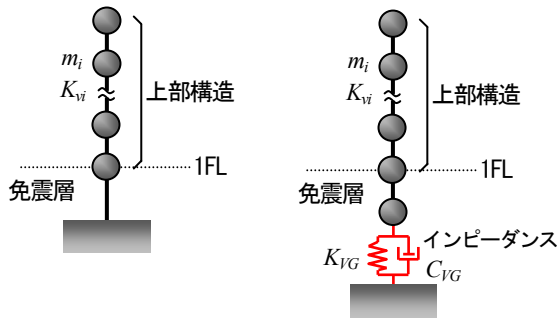
3.1 基礎固定条件の場合の応答解析

建物の各階ごとに鉛直部材のコンクリート水平断面積 (柱, 耐震壁, 上下階と一体となった壁も含める) を集計し, 鉛直剛性 K_V を次式で算出する.

$$K_V = \frac{A_C \cdot E_C}{H} \tag{3.1}$$

ここで、 A_c ：鉛直部材のコンクリート水平断面積、 E_c ：コンクリートのヤング係数、 H ：階高

また、アイソレータの鉛直剛性もメーカーカタログから求める。これより図 3.1(a)に示すような基礎固定条件の多質点振動モデルを作成し、前節で求めた入力地震動を用いて固有値解析および線形応答解析を行う。各層の減衰定数は通常 2% を設定する。設計用震度は、解析結果の応答せん断力係数に相当する。



(a) 基礎固定モデル (b) 動的相互作用モデル

図 3.1 応答解析モデル

3.2 動的相互作用を考慮した場合の応答解析

建物と地盤の動的相互作用を考慮した解析を考える。すなわち、図 3.1(b)に示すように基礎固定モデルに上下方向インピーダンス（地盤ばねとダッシュポット）を付加した振動解析モデルを作成する。ここではインピーダンスの算出には、文献 1 の実用算定手法を採用するものとする。以下に算定式を列挙する。

3.2.1 上下方向の群杭係数

群杭係数は、土方らの提案手法を採用する（文献 1 の評価法-2）。この方法は、1000 本程度の大規模群杭に適用するように開発されたものである。均質な表層地盤と支持層からなる 2 層地盤の結果に基づいているため、表層地盤を均質地盤に置換する必要があるが、これについては、自由地盤の地震応答解析結果の地盤物性値を用いて設定することになる。また、杭配置は正方配置でかつ杭頭は剛な基礎で連結されている仮定が設けられている。通常、杭の配置は不規則であるが、以下のような建物平面全体から平均化した杭間隔を用いる。

- ・ 基礎寸法： $B_X \times B_Y$ （建物外周寸法）
- ・ 総杭本数： N_p
- ・ 杭 1 本あたりの基礎面積： $A_B = B_X \times B_Y / N_p$
- ・ 平均杭間隔： $S = \sqrt{A_B}$
- ・ X および Y 方向杭本数： $N_x = B_X / S, N_y = B_Y / S$
- ・ 杭間隔杭径比： S / B

上下方向の群杭係数は次式で求められる。

$$\beta_V = N_p^{-c} \quad (3.2)$$

$$c = \begin{cases} 2.0f_z & f_z \leq 0.2 \\ 0.7f_z + 0.26 & f_z \geq 0.2 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$f_z = \left\{ 0.3 \log(E_p / E_s) \lambda + 0.5(1 - \lambda) \delta \right\} (B / S) \quad (3.4)$$

ここで、 N_p ：杭本数、 E_p ：杭のヤング係数、 E_s ：地盤のヤング係数 $= 2(1 + \nu)G$ 、 λ ：表層地盤の応力分担率、 δ ：杭頭と杭先端の変位比、 f_z ：影響係数、 $\log(E_p / E_s)$ ：3.18 が上限値

$$1 - \lambda = 2 / \left\{ (e^{\beta_s L} + e^{-\beta_s L}) + d(e^{\beta_s L} - e^{-\beta_s L}) \right\} \quad (3.5)$$

$$\delta = 2 / \left\{ (e^{\beta_s L} - e^{-\beta_s L}) / d + (e^{\beta_s L} + e^{-\beta_s L}) \right\} \quad (3.6)$$

$$d = \frac{E_p \cdot A \cdot \beta_s}{k'_b} \quad \text{or} \quad d = \frac{E_p \cdot A \cdot \beta_s}{k_b} \quad (3.7)$$

$$\beta_s = \sqrt{S_V / (E_p A)} \quad (3.8)$$

$$k'_b = S'_V \cdot l \quad (3.9)$$

ここで、 L ：支持層貫入部を除いた杭長、 A ：杭の断面積、 $E_p A$ ：杭の軸剛性、 S_V ：表層地盤単位深さあたりの鉛直の杭周地盤ばねで式(3.10)で算定、 k'_b ：支持地盤への貫入部のばねで式(3.12)の k_b を用いることができる、 S'_V ：支持層地盤の S_V で式(3.10)において G_e を支持層地盤の G_b とする、 l ：杭の支持層への貫入長

3.2.2 上下方向インピーダンス

群杭の上下方向の地盤ばねは、限界耐力計算法の回転地盤ばねの評価法を用いて以下のように評価される。

(1) 単杭杭周の上下地盤ばね

Randolf の式を採用する。

$$S_V = \frac{2\pi G_e}{\log_e(2r_m / B)} \quad (3.10)$$

$$r_m = 2.5L(1 - \nu_e) \quad (3.11)$$

ここで、 B ：杭径、 L ：工学的基盤までの杭長（支持層貫入部を除いた杭長）、 $G_e = (1/L) \cdot \sum G_i \cdot H_i$ ：表層地盤の平均せん断剛性、 $\nu_e = (1/L) \cdot \sum \nu_i \cdot H_i$ ：表層地盤の平均ポアソン比、 G_i 、 ν_i 、 H_i ： i 層のせん断剛性、ポアソン比、層厚

(2) 単杭杭先端の上下地盤ばね

単杭の杭先端の上下地盤ばねは、平均変位仮定による次式で求める。

$$k_b = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{\pi G_b B}{2(1-\nu_b)} \quad (3.12)$$

ここで, G_b : 支持層のせん断剛性, ν_b : 支持層のポアソン比

(3) 単杭杭頭の上下地盤ばね

上記(1), (2)で求めた杭周および杭先端の地盤ばねから, 次式で単杭杭頭の上下地盤ばねを求める.

$$K_{VS} = E_p \cdot A \cdot \beta_s \frac{E_p A \beta_s (1 - e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 + e^{-2\beta_s L})}{E_p A \beta_s (1 + e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 - e^{-2\beta_s L})} \quad (3.13)$$

ここで, $\beta_s = \sqrt{S_V / (E_p A)}$, E_p : 杭のヤング係数, A : 杭の断面積

(4) 群杭杭頭の上下地盤ばね

群杭杭頭の上下地盤ばねは, 式(3.2)の群杭係数および式(3.13)の単杭杭頭の上下地盤ばねから次式で求められる.

$$K_{VG} = \beta_V \cdot N_p \cdot K_{VS} \quad (3.14)$$

ここで, β_V : 上下地盤ばねの群杭係数, N_p : 杭本数

(5) 上下方向の減衰係数

限界耐力計算でのインピーダンスの減衰の評価方法の考え方が踏襲され, 地盤の1次固有振動数 f_g 以下では地盤の材料減衰が支配的な減衰定数一定領域, f_g 以上では逸散減衰が支配的な減衰係数一定領域, を設定して減衰を評価する^{*)}.

$$f \leq f_g : K'_{VG} = 2h_{VG1} \cdot K_{VG} \quad (3.15)$$

$$h_{VG} = h_{VG1} = h_b = \text{const.} \quad (3.16)$$

ここで, h_b : 支持層の減衰定数で 0.02

$$f > f_g : K'_{VG} = 2h_{VG1} \cdot K_{VG} + C_{VG2} \cdot 2\pi(f - f_g) \quad (3.17)$$

$$C_{VG2} = \rho_b \cdot V_{Lab} \cdot \pi \cdot r_{V0}^2 \quad (3.18)$$

$$h_{VG} = h_{VG1} + C_{VG2} \cdot \pi(f - f_g) / K_{VG} \quad (3.19)$$

^{*)} インピーダンス (複素剛性) は,

$\bar{K} = K + iK' = K(1 + i2h) = K + iC\omega$ で表され, K は実部で地盤ばね, K' は虚部で減衰に関する. 減衰係数は $C = K' / \omega = K' / (2\pi f)$ で求められる.

ここで, ρ_b : 支持層の密度, V_{Lab} : 支持層の Lysmer の波動速度 $= 3.4V_{sb} / \{\pi(1-\nu_b)\}$, V_{sb} : 支持層のせん断波速度, ν_b : 支持層のポアソン比, r_{V0} : 上下ばね算定用の等価基礎半径 $(= (B_X \cdot B_Y / \pi))^{1/2}$, 加振方向は X 方向

(6) 群杭基礎の上下地盤ばねの減衰係数

以上まとめると, 群杭基礎の上下地盤ばねの減衰係数は次式で求められる. 式中 f は連成系の1次固有振動数を代入する.

$$\therefore C_{VG} = \begin{cases} h_{VG1} \cdot K_{VG} / (\pi f) & : f \leq f_g \\ h_{VG1} \cdot K_{VG} / (\pi f) + C_{VG2}(f - f_g) / f & : f > f_g \end{cases} \quad (3.20)$$

なお, 減衰係数の過大評価に対する処置として次式が設定されている.

$$C_{VG} = h_{VG1} \cdot K_{VG} / (\pi f_g) \quad (3.21)$$

§ 4 解析例および解析結果

建物モデルは, 免震層を鉛プラグ入り積層ゴムとすべり支承で構成した鉄筋コンクリート造集合住宅3, 5, 8階建の3ケースである. 基礎構造は, 場所打ちコンクリート杭で, 杭径は1000~1200φとしている. 地盤モデルは, 図4.1に示すPS検層が実施された実地盤3ケース (地盤1次固有周期は, Site-1 : 0.29s, Site-2 : 1.20s, Site-3 : 1.52s) とし, 各地盤に対して3ケースの建物を対応させた.

図4.2に基礎固定 (以下, FIX) モデルと動的相互作用 (以下, SSI) モデルの連成系1次固有周期の比較を示す. 基礎部分にインピーダンスを付加することにより, FIXモデルより約1.2~1.5倍建物の連成系固有周期が伸びることがわかる.

図 4.3 に地表面での上下動の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を示す. Site-3 の軟弱地盤では, 0.1 秒付近に他の2つの地盤に対して約1.6倍のスペクトル値のピークを示している.

図 4.4 に計算したインピーダンスの振動数依存特性を示す. 図中には, 地盤の1次固有振動数, 連成系の1次固有振動数をプロットしている. 各地盤において8階建てモデルの連成系の1次固有振動数が, 3, 5階建てモデルより大きいのは, アイソレータの配置個数の違いによるものである. インピーダンスは地盤の硬軟の影響が表れており, 地盤ばねである実部 K_{VG} は Site-3 が最も小さく, また, 減衰に関する虚部 C_{VG} は Site-3 で大きく評価されている.

図 4.5 に上下方向震度の最大応答値分布を FIX モデルと SSI モデルを比較して示す. これによると, 免震層

泉：建物と地盤の動的相互作用を考慮した免震建物の地震時上下動応答

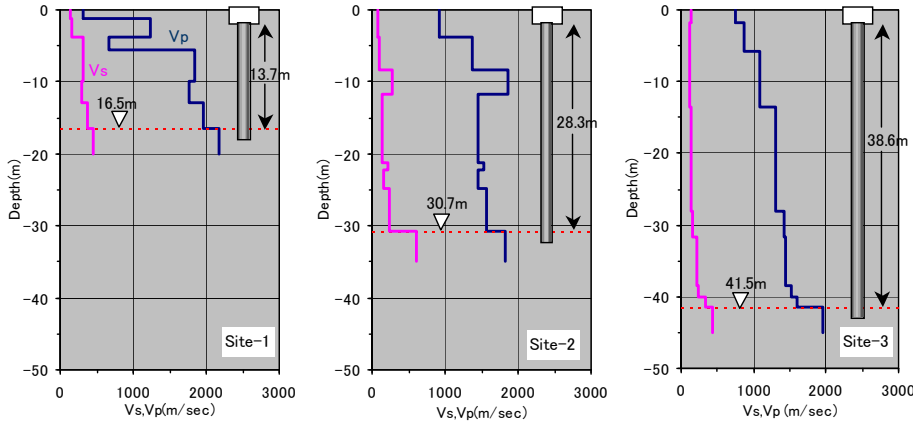


図 4.1 地盤モデル

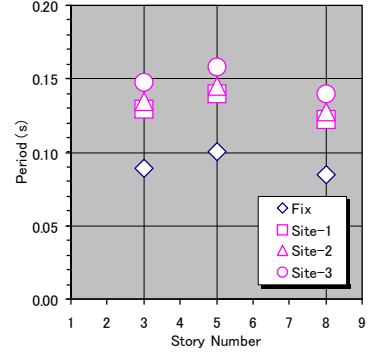


図 4.2 固有周期の変化

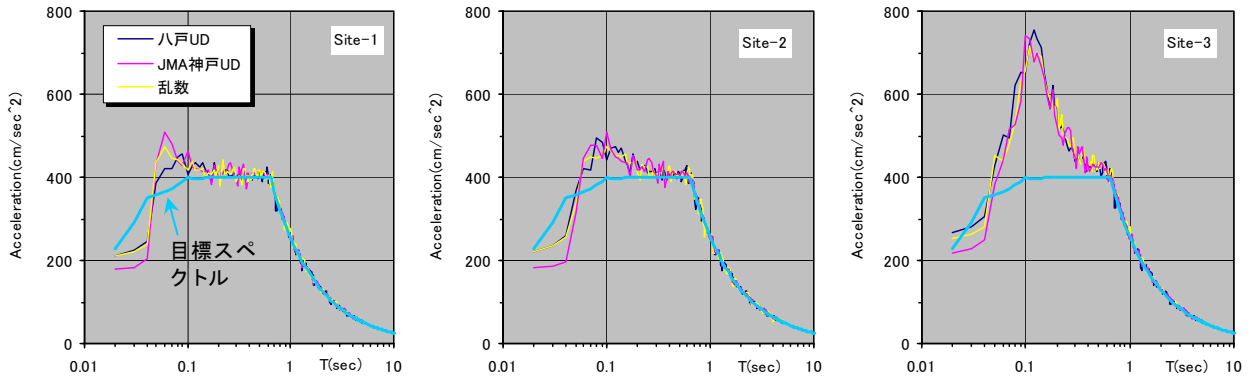


図 4.3 地表面での加速度応答スペクトル(h=0.05)

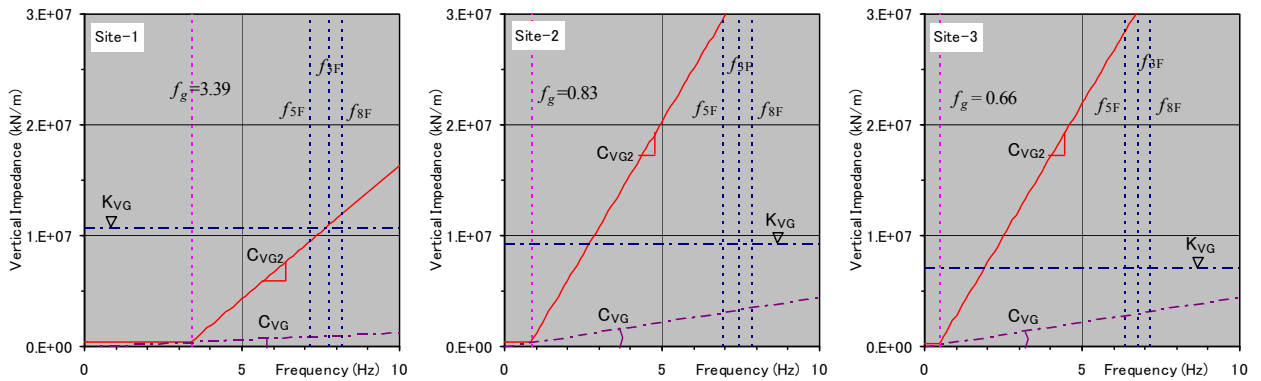


図 4.4 上下方向のインピーダンス (f_g : 地盤の1次固有振動数, f_{*F} : 連成系1次固有振動数)

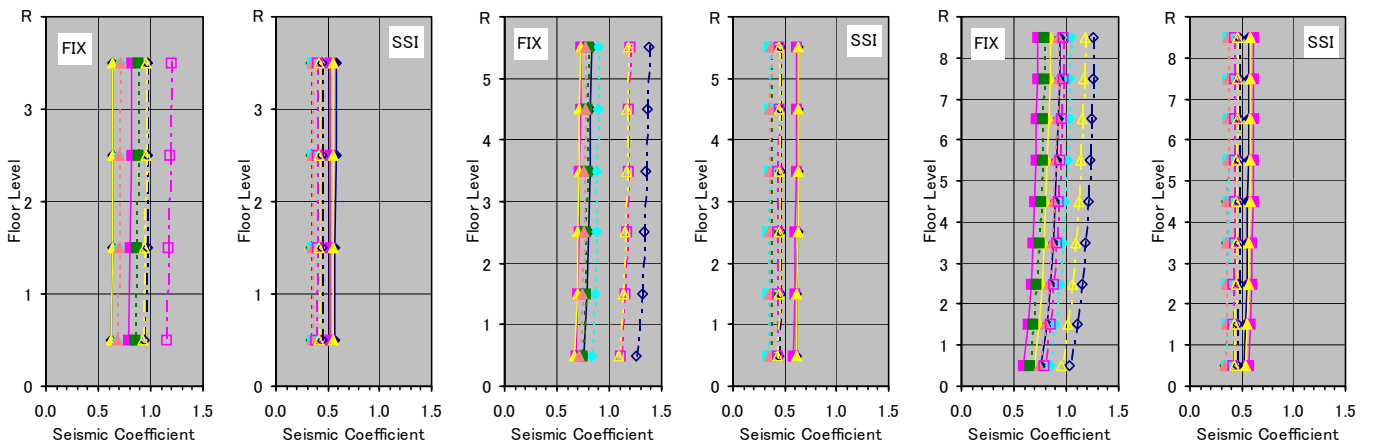


図 4.5 上下方向震度の分布(実線: Site-1, 点線: Site-2, 一点鎖線: Site-3, ◇: 八戸, □: JMA 神戸, △: 乱数)

の上下方向震度は、FIX モデルでは 0.59~1.26, SSI モデルは 0.33~0.61 の範囲となっている。地盤の硬軟で上下方向震度を比較すると、FIX モデルでは Site-1 の方が小さく、逆に SSI モデルでは Site-3 の方が小さくなる傾向が見られ、明らかに動的相互作用の影響が現われている。また、動的相互作用を考慮することによって、上下方向震度の分布は入力地震動によらず収束する傾向を示すものの、地盤条件によって上下方向震度が 0.3 以上となる結果が得られた。建物階数が大きいほど、側柱や隅柱は地震時の変動軸力が大きくなりアイソレータの引張に対する検討がクリティカルになることを考慮すると、±0.3 を用いて設計を完了することには十分注意する必要がある。

§ 5 まとめ

以上、比較的小規模な中低層免震建物を対象として動的相互作用を考慮した免震建物の上下動の応答解析を行い、設計用の上下方向震度の分布性状について検討した。

その結果、基礎固定モデルによる設計用上下方向震度は、実際上免震層の設計を行うことができない応答結果となる傾向が大きくなることが明らかとなった。一方、動的相互作用を考慮したモデルによると、設計用上下方向震度としては 0.3 の 10% 増となる 1/3 を採用する方が安全側の評価となる結果が本解析の範囲から得られた。

文献1で示されている上下方向のインピーダンスの算定法は、実務設計において比較的少ない計算量で建物モデルを従来からの基礎固定モデルと比較してより現実的なモデルに近づけるのに有効なものであることが本解析から確認できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，2006.2

付録 A

§3 で示した上下方向の群杭係数およびインピーダンスの具体的な計算を示しておく。図 A.1 に基礎平面形状と杭配置を示す。杭直径は P1 : 1000φ (2 本), P2 : 1000-1300φ (8 本), P3 : 1200φ (5 本) であり、杭頭は剛な基礎で連結されているものと仮定する。基礎寸法は長辺方向長さ $B_X = 33.7\text{m}$ を固定して、図に示す建物外周線で囲まれた面積 (333.09 m^2) から短辺方向長さ B_Y を設定した。杭配置が不規則なため、以下のような平均化した杭間隔を算出するものとする。

- 基礎寸法 : $B_X \times B_Y = 33.7 \times 9.88\text{ m}$
- 平均杭径 : $(1 \times 10 + 1.2 \times 5) / 15 = 1.07\text{ m}$
- 総杭本数 : $N_p = 15$
- 杭 1 本あたりの基礎面積 : $A_B = B_X \times B_Y / N_p = 33.7 \times 9.88 / 15 = 22.2\text{ m}^2$
- 平均杭間隔 : $S = A_B^{0.5} = 4.71\text{ m}$
- X 方向杭本数 : $N_x = B_X / S = 33.7 / 4.71 = 7.15$ 本
- Y 方向杭本数 : $N_y = B_Y / S = 9.88 / 4.71 = 2.10$ 本
- 杭間隔杭径比 : $S / B = 4.71 / 1.07 = 4.4$

群杭係数およびインピーダンスを求めるために必要となる地盤物性値は、RO モデルによる SHAKE の結果を用いるものとし、入力地震動 3 波の平均値を採用する。図 A.2 に等価 2 層地盤の諸元と杭の深さ方向の位置関係を示す。なお、地盤モデルは図 4.1 の Site-2 である。

$$V_{se} = (1/H) \cdot \sum V_{si} \cdot H_i = 102\text{ m/s}$$

$$G_e = (1/H) \cdot \sum G_i \cdot H_i = 25624\text{ kN/m}^2$$

$$v_e = (1/H) \cdot \sum v_i \cdot H_i = 0.493$$

$$E_S = 2(1+v_e)G_e = 2(1+0.493) \times 25624 = 76513\text{ kN/m}^2$$

$$E_p = 2.442 \times 10^7\text{ kN/m}^2$$

$$A = 0.8992\text{ m}^2$$

$$E_p \cdot A = 21958464\text{ kN}$$

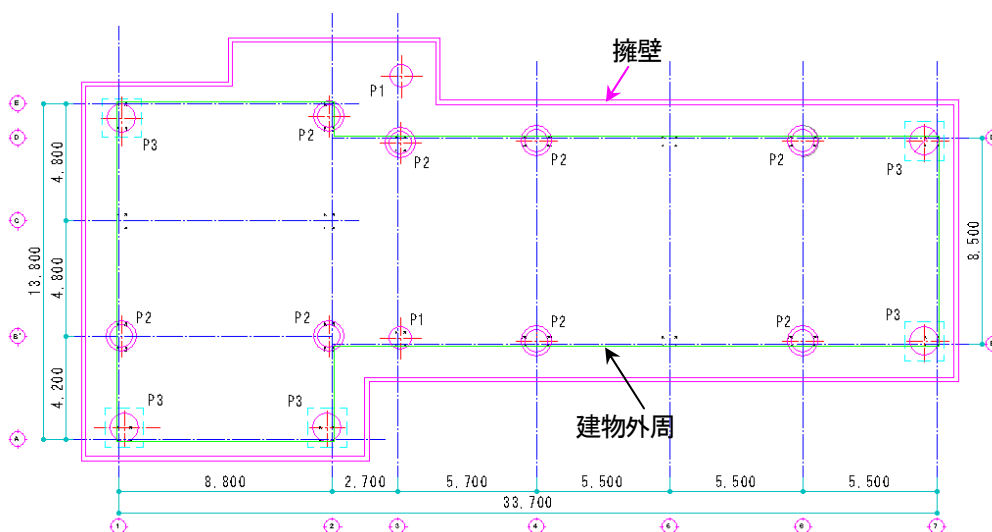


図 A.1 基礎平面形状と杭配置

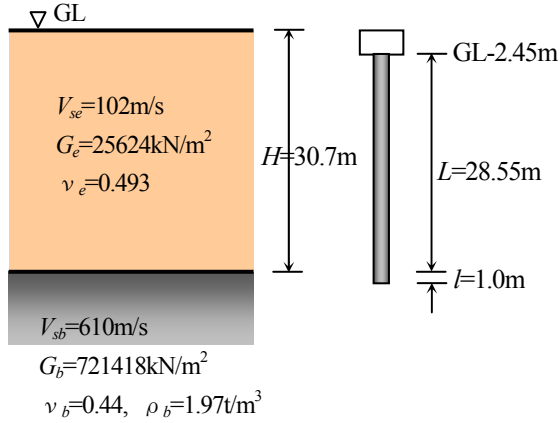


図 A.2 等価 2 層地盤への置換

【地盤の 1 次固有周期】

層厚 H : 30.7 m平均 S 波速度 : $V_{se} = 102$ m/s $T = 4H/V_{se} = 4 \times 30.7/102 = 1.204$ s ($f_g = 0.831$ Hz)

【群杭係数】

$$r_m = 2.5L(1 - v_e) = 2.5 \times 28.55 \times (1 - 0.493) = 36.19 \text{ m} : \text{式(3.11)}$$

$$S_V = \frac{2\pi G_e}{\log_e(2r_m/B)} = \frac{2\pi \times 25624}{\log_e(2 \times 36.19/1.07)} = 38204 \text{ kN/m}^2 : \text{式(3.10)}$$

$$k_b = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{\pi G_b B}{2(1 - v_b)} = \frac{3\pi^2 \times 721418 \times 1.07}{8 \times 2 \times (1 - 0.44)} = 2550843 \text{ kN/m}^2 : \text{式(3.12)}$$

$$\beta_s = \sqrt{S_V / (E_p A)} = (38204/21958464)^{0.5} = 0.0417 \text{ (1/m)}$$

$$E_p \cdot A \cdot \beta_s = 21958464 \times 0.0417 = 915668$$

$$d = \frac{E_p \cdot A \cdot \beta_s}{k_b} = 915668 / 2550843 = 0.359 : \text{式(3.7)}$$

$$e^{\beta_s L} = \exp(0.0417 \times 28.55) = 3.289$$

$$e^{-\beta_s L} = \exp(-0.0417 \times 28.55) = 0.304$$

$$1 - \lambda = 2 / \{ (e^{\beta_s L} + e^{-\beta_s L}) + d(e^{\beta_s L} - e^{-\beta_s L}) \} = 2 / \{ (3.289 + 0.304) + 0.359 \times (3.289 - 0.304) \} = 0.429$$

$$\therefore \lambda = 0.571 : \text{式(3.5)}$$

$$\delta = 2 / \{ (e^{\beta_s L} - e^{-\beta_s L}) / d + (e^{\beta_s L} + e^{-\beta_s L}) \} = 2 / \{ (3.289 - 0.304) / 0.359 + (3.289 + 0.304) \} = 0.168 : \text{式(3.6)}$$

$$\log(E_p/E_s) = \log(2.442 \times 10^7 / 76513) = 2.504 < 3.18$$

$$f_z = \{ 0.3 \log(E_p/E_s) \lambda + 0.5(1 - \lambda) \delta \} (B/S) = \{ 0.3 \times 2.504 \times 0.571 + 0.5 \times 0.429 \times 0.168 \} \times (1/4.4) = 0.106 < 0.2 : \text{式(3.4)}$$

$$c = 2.0 f_z = 2.0 \times 0.106 = 0.212 : \text{式(3.3)}$$

$$\beta_V = N_p^{-c} = 15^{-0.212} = 0.563 : \text{式(3.2)}$$

【インピーダンス】

$$1 + e^{-2\beta_s L} = 1 + \exp(-2 \times 0.0417 \times 28.55) = 1.093$$

$$1 - e^{-2\beta_s L} = 1 - \exp(-2 \times 0.0417 \times 28.55) = 0.908$$

$$K_{VS} = E_p \cdot A \cdot \beta_s \frac{E_p A \beta_s (1 - e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 + e^{-2\beta_s L})}{E_p A \beta_s (1 + e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 - e^{-2\beta_s L})} = 915668 \times (915668 \times 0.908 + 2550843 \times 1.093) / (915668 \times 1.093 + 2550843 \times 0.908) = 999176 \text{ kN/m} : \text{式(3.13)}$$

$$K_{VG} = \beta_V \cdot N_p \cdot K_{VS} = 0.563 \times 15 \times 999176 = 8438041 \text{ kN/m} : \text{式(3.14)}$$

【減衰係数】

 $f \leq f_g$ の領域 : 地盤の材料減衰で決まる領域

$$h_{VG1} = 0.02 : \text{式(3.16)}$$

$$K'_{VG} = 2h_{VG1} \cdot K_{VG} = 2 \times 0.02 \times 8438041 = 337522 \text{ kN/m (インピーダンス虚部)} : \text{式(3.15)}$$

 $f > f_g$ の領域 : 逸散減衰で決まる領域

$$V_{Lab} = 3.4 V_{sb} / \{ \pi(1 - v_b) \} = 3.4 \times 610 / \{ \pi(1 - 0.44) \} = 1179 \text{ m/s}$$

$$r_{V0} = (B_X \cdot B_Y / \pi)^{1/2} = (33.7 \times 9.88 / \pi)^{0.5} = 10.29 \text{ m}$$

$$C_{VG2} = \rho_b \cdot V_{Lab} \cdot \pi \cdot r_{V0}^2 = 1.94 \times 1179 \times \pi \times 10.29^2 = 760845 \text{ kN} \cdot \text{s/m} : \text{式(3.18)}$$

$$\begin{aligned}
 K'_{VG} &= 2h_{VG1} \cdot K_{VG} + C_{VG2} \cdot 2\pi(f - f_g) \\
 &= 337522 + 760845 \times 2\pi(f - 0.831) \\
 &= 337522 + 4780530(f - 0.831) \quad : \text{式(3.17)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{VG} &= h_{VG1} + C_{VG2} \cdot \pi(f - f_g) / K_{VG} \\
 &= 0.02 + 760845 \times \pi(f - 0.831) / 8438041 \\
 &= 0.02 + 0.283(f - 0.831) \quad : \text{式(3.19)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{VG} &= h_{VG1} \cdot K_{VG} / (\pi f_g) = 0.02 \times 8438041 / (\pi \times 0.831) \\
 &= 64643 \text{ kN} \cdot \text{s} / \text{m} \quad : \text{式(3.21)}
 \end{aligned}$$

$$C_{VG} = \begin{cases} 53718 / f & : f \leq f_g \\ 53718 / f + 760845(f - 0.831) / f & : f > f_g \end{cases} \quad : \text{式(3.20)}$$

上記の式(3.15)および(3.17)から求まるインピーダンス虚部と振動数の関係をグラフ化すると、図 A.3 のようになる。図中には、地盤の 1 次固有振動数 f_g 、固有値解析から求まる連成系の 1 次固有振動数 f および式(3.14)の静的地盤ばね K_{VG} (インピーダンス実部) をプロットしている。

図 3.1(b)の振動モデルにおけるインピーダンスの減衰係数の与え方としては、式(3.21)の最小値とするか、連成系の 1 次固有振動数を用いて式(3.20)の値を用いるか、の 2 通りがあり、減衰の過大評価を避けるためには前者を採用することになる。本解析においてもこれを採用している。

以上より、図 3.1(b)に示す振動モデルのインピーダンスには、

地盤ばね : $K_{VG} = 8438041 \text{ kN/m}$

減衰係数 : $C_{VG} = 64643 \text{ kN} \cdot \text{s} / \text{m}$

を付加するものとする。

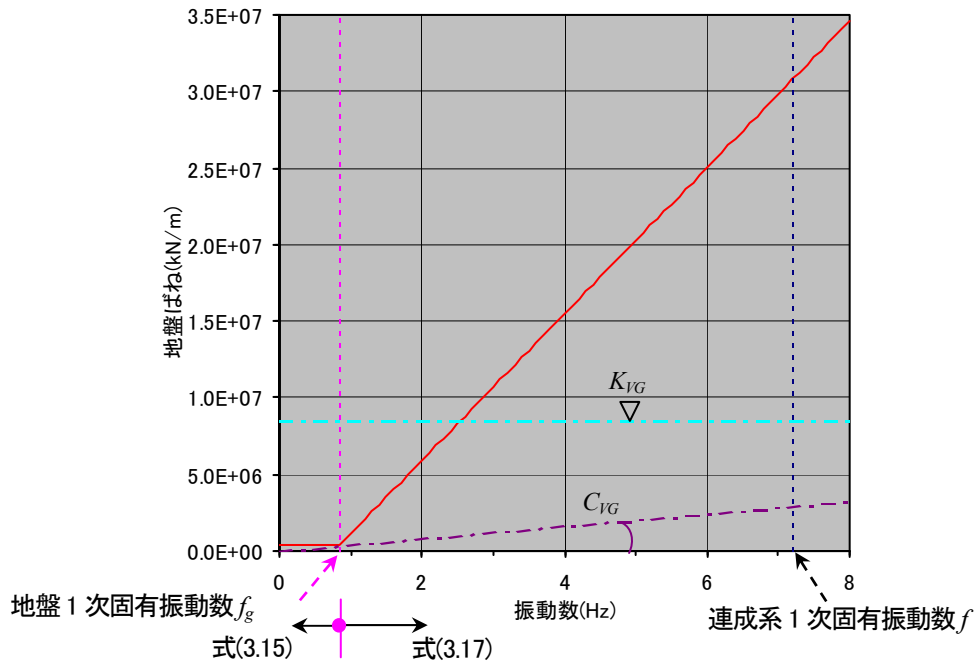


図 A.3 上下方向インピーダンスの振動数依存特性