軟弱地盤上の免震構造物の応答特性に関する解析的評価

ANALYTICAL EVALUATION OF ISOLATION SYSTEM RESPONSES ON SOFT GROUND

福武毅芳 — *1 田村和夫 — *2

Kiyoshi FUKUTAKE — *1 Kazuo TAMURA — *2

キーワード:

免震, 軟弱地盤, 液状化, 地層構成, 有効応力解析, ベースシア係数, 動的相互作用, 入力地震動

Keywords:

Base isolation, Soft ground, Liquefaction, Stratum structure, Effective stress analysis, Base shear coefficient, Dynamic interaction, Input motion

We analyze the seismic responses of soil-pile-base isolated structure system for variety of ground types under constant input motion. And we discussed the effectiveness of an isolation system on soft grounds using three dimensional effective stress analysis. Analytical results such as base shear coefficient and shear strain of isolator show that the seismic responses are reduced even on the soft clay ground and liquefiable ground. There is a difference in the acceleration ratios of building to ground, for the different ground cases. However, the response acceleration values of building are nearly the same levels for the different ground cases. We also found out that the response motions of the ground which is lower than the base mat level, are close to the input motion to the building base.

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、免震構造が急速に普及してきている。これら免震建物の多くは硬質地盤上に建設されているが、中には軟弱地盤や液状化の可能性がある地盤に免震建物が建設されるケースもある¹⁾。建物に入力される地震動の性質には、震源特性や伝播経路の特性および建物近傍の地盤特性などが関係するが、同時に建物・基礎と周辺地盤との相互作用も影響する。免震構造の場合、比較的硬い地盤ではこの建物-地盤系の相互作用の影響は小さいが、軟弱地盤の場合には地震動が長周期化すると同時に、建物-地盤系相互作用が入力地震動特性に及ぼす影響も大きくなる可能性がある。

まず、従来の知見を基に軟弱地盤上の免震建物の応答を考えると、以下のような一般的な傾向が指摘できよう。

- 軟弱地盤では地盤-基礎系の固有周期が長いので、上部構造への入力地震動が長周期化する。従って、免震構造の1次振動モード成分の応答が硬質地盤の場合よりも大きくなる。在来構造の応答加速度も地盤により変化するが、一般的には地盤が軟弱になると在来構造に対する免震構造の応答加速度比が増加傾向になる(相対的に免震効果が発揮できなくなる)。従って、免震構造の場合には杭基礎に作用する上部構造からの慣性力が在来構造の場合よりも低減するものの、軟弱地盤ではこの慣性力の低減傾向が薄まると考えられる。
- 以上のような傾向は、大地震時に地盤が強非線形化あるいは液状化すると、さらに強調されて現れてくる。
- 軟弱地盤において免震効果を保持するためには、免震層の剛性をより低減し入力地震動の卓越周期よりもさらに長周期化させる必要があるが、この場合免震層の変形が過大になる恐れがあり、注意が必要である。

上記のような傾向は一般論としては指摘できるものの、軟弱地盤における免震構造物の応答特性については、未だ解析的にも十分に検討されているとは言い難い。このような状況の中で、著者らは軟弱地盤上の杭支持免震構造物の応答特性を、免震・非免震の差異や地盤改良の有無の観点から検討^{2),3),4)}してきた。

本論文では、軟弱地盤や液状化地盤における免震建物への入力地震動特性・応答特性と問題点の把握を目的としている。固有周期の異なる種々の地層構成からなる地盤を想定し、従来ほとんど検討されていなかった三次元液状化解析による建物-免震層-杭-地盤系の地震応答解析を行った。本検討では、同じ免震装置特性と一定の入力レベルの下で、4種類の地盤の違いによる応答の差異に着目した。次に免震構造物基礎への入力特性を応答加速度分布や応答スペクトルに着目して考察した。さらに、地盤との相互作用や下部構造(杭)の応答にも着目した。なお、地盤と入力地震動の特性に応じて免震構造の設計がなされるものであるが、本論文では応答特性を検討するため、ある1ケースの建物と免震装置のモデルを用いている。

2. 解析条件

2.1 解析手法の概要

本研究ではなるべく実物との乖離を少なくし、真実の現象を見ようという観点から、解析モデルはできる限り詳細にすべきと考え(特に基礎や地盤のモデル化において)、三次元の逐次非線形解析(時間領域の解析)を行った。本プログラム(HiPER)^{5),6)}では、土の構成式としては、応力~ひずみ関係として三次元に拡張したR-O(Ramberg-Osgood)モデル⁷⁾を用い、ダイレイタンシー~ひずみ関係としておわんモデル(Bowl Model)^{7),8)}を使用している。過剰間隙水圧の影響は、応力~ひずみ関係に反映さ

*1 清水建設㈱和泉研究室 主任研究員・工博
(〒100-0011 千代田区内幸町2-2-2)

*2 清水建設㈱技術研究所 部長・工博

*1 Senior Researcher, Izumi Reserch Institute, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

*2 General Manager, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

図1 三次元FEMモデル(1/2モデル)

図2 基礎近傍の解析モデル

れ、有効応力の減少による軟化現象および液状化現象やサイクリックモビリティも表現可能である。

2.2 地盤・構造物系FEMモデル

FEMモデルの概略を図1に示す。モデルは対称性を考慮して1/2モデルとし、加振は一方向(x方向)加振とした。側方境界は水平ローラー(z方向固定)とし、底面はダンパー境界とした。地下水位はGL±0mに設定した。初期応力は成層地盤の値を想定し、静止土圧係数は $K_0=0.5$ とした。図2に基礎近傍のFEMメッシュを示す。図1の側方地盤と図2(a)中の中央杭の短い斜めの矢印は、3.2節で述べる加速度時刻歴出力位置を示す。

上部構造物は図3に示すように、高さ41m(10階)の建物で、線形のはり・質点系でモデル化した。はり要素は EI を十分大きな値としせん断変形が卓越するようにした。建物全質量は8813tonで、基礎固定時の1次固有周期 T_1 は0.8秒である。(上部構造の減衰は考慮していない。)

図3 上部構造のモデル化と物性(フルモデル)

表1 杭のはり要素の物性

杭種類	直径	断面積 A (m ²)	ヤング率 E_c (kPa)	断面二次 モーメント $I_x=I_y$ (m ⁴)	単位体積 重量 (kN/m ³)	ポアソン 比 ν
コンクリート杭 杭長38.5m	1.5m	1.767	2.4×10^7	0.249	23.5	0.17

$$E_c = 2.1 \times \sqrt{F_c/200}, F_c \text{ 設計規準強度} = 27000 \text{ kPa, 振じり定数 } J = 2I_x = 2I_y$$

杭は、表1に示す $\phi 1500$ の場所打ちコンクリート杭を想定し、線形はり要素でモデル化した。支持層(Ds5)への貫入長は2mとした。基礎の全質量は2592tonで剛体とした。基礎と上部構造物を合わせた質量は11405tonであるので、杭1本当たりの常時の軸力は5586kNとなる。なお、杭をはり要素でモデル化すると杭体積に相当する剛域がゼロとなり、実情と異なった結果を与える恐れがあるが、ここでは文献⁹⁾の結果に基づきその影響は小さいとして、剛域は考慮していない。

免震装置には文献¹⁰⁾に示されている高減衰積層ゴムを想定し、その非線形特性は、図4に示すように三次元R-Oモデル⁷⁾で表現した。解析モデルの積層ゴムの厚さは20cmである。R-Oモデルによる実験値へのフィッティング結果と設定されたパラメータの値を同図中に示す。履歴減衰定数 h は、せん断ひずみ γ_{iso} が50~200%の範囲では実験値と良い対応を示しているが、それ以外の範囲ではフィッティング精度はそれほど良くない。

高減衰積層ゴム(Type1)のパラメータ

図4 免震装置(高減衰積層ゴム)のひずみ依存特性とR-Oモデルのパラメータ

積層ゴムのせん断ひずみ $\gamma_{iso} = 100\%$ における剛性に対応する上部構造が剛体の場合の免震構造周期は $T_{100} = 3.5$ 秒である。設計では地盤ケースに応じて免震部材特性を変えるべきであるが、ここでは地盤の違いによる応答特性の差異に主眼を置き、ここで想定した免震装置の特性を全てのケースで一律に用いた。

2.3 地盤条件と解析ケース

表2に想定した地盤ケース(1)~(4)の周期 T_g 、単位体積重量 γ_t 、せん断波速度 V_s と、R-Oモデルのパラメータ(最大履歴減衰率 h_{max} 、規準せん断ひずみ $\gamma_{0.5}$)を示す。図5には、ケース(1)、(2)における液状化層である第1層As1(GL0~10m, $V_s = 140\text{m/s}$)と第2層As2(GL-10~-20m, $V_s = 160\text{m/s}$)のR-Oモデルによる非線形特性($G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係)と、R-Oモデルとおわんモデルによる非排水繰返し強度曲線(液状化強度曲線)を示す。

(a) 非線形特性(R-Oモデルによる $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係)

(b) 非排水繰返し強度(R-Oモデル+おわんモデルによる)

図5 沖積砂: 第1層As1(GL0~10m), 第2層As2(GL-10~-20m)の土質特性

本検討では入力地震動として、建築センター波レベル1(BCJ-L1)を用いた(図12)。ただし、3.2節の地盤ケース(2)については、振幅を0.7倍、0.2倍と小さくした場合についても実施した(BCJ-L1: ケース(2)-1, BCJ-L1×0.7: ケース(2)-2, BCJ-L1×0.2: ケース(2)-3)。

表2 地盤ケース: (1)~(4)

GL (m)	軟弱地盤(第3種地盤)															硬質地盤(第2種地盤)				
	(1) $T_g = 0.79\text{秒}$					(2) [(2)-1, (2)-2, (2)-3] $T_g = 1.00\text{秒}$					(3) $T_g = 1.13\text{秒}$					(4) $T_g = 0.53\text{秒}$				
	土質	γ_t (kN/m ³)	V_s (m/s)	h_{max}	$\gamma_{0.5i}$ ($\times 10^{-4}$)	土質	γ_t (kN/m ³)	V_s (m/s)	h_{max}	$\gamma_{0.5i}$ ($\times 10^{-4}$)	土質	γ_t (kN/m ³)	V_s (m/s)	h_{max}	$\gamma_{0.5i}$ ($\times 10^{-4}$)	土質	γ_t (kN/m ³)	V_s (m/s)	h_{max}	$\gamma_{0.5i}$ ($\times 10^{-4}$)
	0																			
-10	沖積砂 (As1)	17.7	140	0.24	1.58	沖積砂 (As1)	17.7	140	0.24	1.58	沖積粘土 (Ac1)	15.7	100	0.20	6.32	洪積砂 (Ds1)	18.6	350	0.24	1.58
-20	沖積砂 (As2)	17.7	250	0.24	1.58	沖積砂 (As2)	17.7	160	0.24	1.58	沖積粘土 (Ac2)	15.7	150	0.20	6.32	洪積砂 (Ds2)	18.6	370	0.24	1.58
-30	洪積砂 (Ds3)	17.7	300	0.24	1.58	洪積粘土 (Dc3)	16.7	200	0.20	6.32	洪積粘土 (Dc3)	16.7	200	0.20	6.32	洪積砂 (Ds3)	18.6	380	0.24	1.58
-40	洪積砂 (Ds4)	17.7	350	0.24	1.58	洪積粘土 (Dc4)	16.7	250	0.20	6.32	洪積粘土 (Dc4)	16.7	250	0.20	6.32	洪積砂 (Ds4)	18.6	390	0.24	1.58
-50	洪積砂 (Ds5)	18.6	400	0.24	1.58	同 左														

..... 液状化層

注) 動的ボアソン比 $\nu = 0.33$, $\gamma_{0.5i}$ は $\sigma'_m = 1.0\text{tf/m}^2 = 9.8\text{kPa}$ における値($\gamma_{0.5} \propto \sqrt{\sigma'_m}$)

図6 地盤の最大変形と合せん断ひずみ Γ のコンターの例[地盤(2)]

図7 ベースシア係数 C の最大値

図8 積層ゴムせん断ひずみ γ_{iso} の最大値

3. 応答結果の比較・検討

3.1 地層構成の違いによる応答の差異

図6には基礎を取り除いて表示した地盤ケース(2)における最大変形図と合せん断ひずみ Γ のコンターを示す。GL-3~-5m付近で最大で7%のひずみが生じている。杭間地盤では杭に拘束されて2%程度のひずみに留まっている。なお過剰間隙水圧比は、地盤(1)と(2)の側方地盤において図2で示した「液状化層」において8秒付近で100%に達している。

図7に上部構造のベースシア係数 C を、図8に積層ゴムのせん断ひずみ γ_{iso} の最大値(積層ゴムの水平変位も併記)を示す。 C と γ_{iso} の大小順位は対応しており、両者とも値の大きい順に(2)>(3)>(1)>(4)となっている。液状化層厚が20mと深い地盤(2)で最も大きな値となっており、硬質地盤(4)では C も γ_{iso} も最も小さくなっている。液状化層厚が10mの地盤(1)よりも粘土地盤

(3)の方が大きな値を示している。これは、粘土地盤では加速度が液状化時のように極端に小さくならないため、類似の傾向は既往の結果⁴⁾においても見られた。よって、液状化層が浅い地盤よりも液状化しない深い軟弱粘土地盤の方が免震建物にとって不利になる場合があることに注意を要する。

次に杭の曲げモーメントに着目してみる。本ケースではいずれの場合も杭頭で最大値を生じている。図9に示すコーナー杭a(図2(a)参照)の最大曲げモーメント M_a の地盤種類による大小順位と C や γ_{iso} の大小順位とは対応していない。すなわち、 M_a の値は大きい順に(2)>(1)>(3)>(4)となっており、全層粘土地盤である(3)と液状化層厚10mの地盤(1)とが逆転している。これは地盤(1)や(2)では、液状化による地盤の大きな変形が、杭の曲げ応力増大に大きく影響しているためである。(曲げモーメントの分布形状については文献⁴⁾を参照されたい)

図10に免震装置の変位(底版に対する上版の変位)時刻歴を示す。大局的に見れば地盤ケースによる顕著な差異は見られない。地盤ケース(2)が最も周期が長くなっている。15秒以降では他のケースに比べ(2)が振幅が小さくなっているが、これは液状化により基礎への入力動が非常に小さくなったためである。25秒付近において粘土地盤(3)の変位が大きくなっているが、この理由も同様で液状化地盤ではこの時点で加速度振幅が非常に小さくなっているのに対し、粘土地盤では加速度振幅が大きいためである。

図7~10で示されているように、地盤構成の種類による応答の差異はそれほど際立ったものではない。この理由としては、液状化地盤では建物への入力動が長周期になるものの地盤でエネルギー消費があって振幅が小さくなり、非液状化地盤では入力動は短周期となり免震構造の周期成分は少ないが加速度振幅は大きくなるためである。

以上の結果より、軟弱地盤や液状化地盤における10階程度の免震建物は、ここで想定した入力レベルと免震特性に対して十分成立すると思われる。

3.2 入力動特性に関する考察

図11に、BCJ-L1入力時の建物・杭・地盤の最大加速度分布を示す。杭としては中杭の値を、地盤としては建物コーナー部より30m程度離れた側方地盤の値を、それぞれ採っている(図1, 図2(a)の矢印の地点)。

表層地盤が液状化したのはケース(1), (2)-1, (2)-2の場合であったが、これらでは液状化層の加速度がそれ以深の層より小さくなっている。図12にケース(2)-1の応答波形と入力波形を示す。側方地盤では浅くなるに従い液状化により短周期成分が消失し、周期数秒の波になっている。これに対し他の液状化しない

図9 コーナー杭aの最大曲げモーメント M_a (杭頭で最大)

図10 免震装置の変位時刻歴

図11 建屋・杭・地盤の最大応答加速度分布

ケースでは、地表に近い程加速度が大きくなる傾向を示している。なお、側方地盤とは図1中に示す右奥の矢印の位置を示す。

液状化したケースのうち表層10mのみが液状化したケース(1)では地盤よりも杭の加速度が増大している。これは表層付近の杭の応答が10m以深の地盤震動の影響を強く受けたためと解釈できる。これに比べ表層20mまで液状化した(2)-1, (2)-2のケースでは、杭の加速度は地盤と同様に低減している。

建物応答加速度は、ケース(4)が若干小さいものの大きな差は見られない。しかしこれは、表層地盤による増幅特性、地盤-杭系の相互作用効果、免震装置の非線形復元力特性の影響が複合化して作用している結果であり、これらの個々の要因の影響はそれぞれ異なるものと考えられる。

図12 建物基礎盤と側方地盤の応答波形(ケース(2)-1)と入力波形BCJ-L1 (2E)

図13 最大加速度応答倍率

図13に加速度応答倍率を示す。建物頂部(RF)の側方地盤地表面に対する応答倍率は、液状化したケース(1), (2)-1の方が液状化しないケース(3), (4)より大きくなっており、これだけを見ると液状化によって免震効果が低減しているとも言える。ただし、これはあくまで地表面地盤応答を基準にした建物最大加速度値の比率であることに注意を要する。

建物基礎部への入力動と地盤震動の振動数特性を比較するため、これらの応答スペクトルを重ね描いたものを図14に示す。図には、構造物振動モデルへの入力動として簡易的検討で多用される地表面および基礎盤底面レベル(GL-3.5m)の加速度波、さらにより深いGL-10mレベルの加速度波を示している。ケース(1), (2)-1の地表面加速度波では液状化により長周期化し、周期2秒付近で増幅している。また基礎盤への入力動の応答スペクトル形状は、地表面の地震動とは異っており、地盤ケースによっても傾向が違ふ。いずれのケースでも、免震構造の応答への影響が大きい周期数秒の範囲では、GL-10mレベルの地盤震

図 14 基礎盤と側方地盤の加速度応答スペクトルの比較 ($h=0.05$)

動の方が、地表面や基礎盤底面レベルの地盤震動よりも、基礎盤への入力動に近いスペクトル形状になっている。この傾向の程度は杭剛性と地盤剛性の両方に深く関係すると思われる。また図には示していないが、基礎直下の杭間地盤ではGL-10mよりも浅い所で基礎盤入力動に近いスペクトル形状になっている。これは図6に示すように杭間地盤では側方地盤に比べひずみが小さく液状化の程度が弱いためである。

4. まとめ

本研究では、軟弱地盤における免震周期3.5秒程度の10階建て免震建物モデルを用いて、三次元液状化解析により応答特性を検討した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 液状化地盤(1)、(2)や軟弱粘土地盤(3)では、第2種地盤(4)に比べベースシア係数や積層ゴムの水平変形が大きくなるものの、免震効果は発揮でき、安全性は確保できる。
- 2) 液状化層が浅い地盤よりも液状化しない深い軟弱粘土地盤の方が免震建物の応答が大きくなる場合がある。
- 3) 地盤構成の種類による応答の差異はそれほど際立ったものではない。この理由は、液状化地盤では建物への入力が高周期となるが振幅が小さくなり、非液状化地盤では入力は短周期となり免震構造の周期成分が少なくなるが、加速度振幅値は大きくなるためである。
- 4) 軟弱地盤上の建物で、ある程度の水平剛性を有する杭で支持された本ケースの場合には、基礎盤よりも低いレベルの地盤の震動が建物への入力動に比較的近い。

今回の検討は、4ケースの限られた地盤条件下で、ある特定の免震装置に対する検討であり、さらに多様な条件下についても今回の結論がそのまま当てはまるとは言えない。しかし、地盤

が液状化しても、免震効果が十分発揮される場合があることは確認できた。

なお今回は検討しなかったが、入力動特性と免震装置の特性の影響、杭剛性が応答に及ぼす影響、地層構成が複雑で不整形の場合の免震構造物の応答特性についても今後検討を進めたい。

参考文献

- 1) 大前安和・北村佳久：軟弱・液状化地盤と免震構造，施工，建築の技術，No.390，彰国社，pp.114-119，1998
- 2) 福武毅芳・菊地 優：軟弱地盤における強震時の免震構造の成立性，日本建築学会大会学術講演概要集，B-2，pp.649-650，1999
- 3) 福武毅芳・玉置克之：地盤固化改良併用による杭基礎免震建物の成立性の検討，日本建築学会大会学術講演概要集，B-2，pp.407-408，1999
- 4) 福武毅芳・菊地 優・竹間信博・玉置克之：軟弱地盤・液状化地盤における免震構造の成立性について，清水建設研究報告，第69号，pp.25-36，1999
- 5) 大槻 明・福武毅芳・藤川 智・佐藤正義：液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析，土木学会論文集，No.495/I-28，pp.101-110，1994.
- 6) 福武毅芳・大槻 明・藤川 智：液状化問題における二次元解析の適用限界と三次元解析の利点，地盤破壊の三次元的評価に関するシンポジウム，土質工学会，pp.229-236，1995
- 7) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究，名古屋工業大学博士論文，1997
- 8) 福武毅芳・松岡 元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的理解，土木学会論文集，No.412/III-12，pp.143-151，1989
- 9) 福武毅芳・太田 泰博・中村 紀吉・勝沢 勝栄・鈴木 康夫：建屋—杭—地盤系の有効応力解析のモデル化の研究(その5)3次元解析と2次元解析の比較・杭体積考慮の影響，日本建築学会大会学術講演概要集，B-2 構造Ⅱ，pp.465-466，1996
- 10) Kikuchi, M. and Aiken, I.D. : An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings, EESD, Vol. 26, 215-231, 1997

[2000年7月31日原稿受理 2001年2月22日採用決定]