

地盤と建物の地震応答に及ぼす洪積層以深の非線形性の影響

清水建設和泉研究室 正会員 藤川 智
京都大学防災研究所 林 康裕

1. はじめに

耐震設計では工学的基盤で入力地震動が定義される。このとき工学的基盤より下方は半無限弾性体として扱われる。しかし、室内試験では沖積層のみならず、洪積層やさらに深部の地盤を構成する中硬岩や軟岩などでも小さなひずみ振幅から非線形化することが確かめられている。実際の地盤でも、洪積層以深の地盤が非線形化することは十分考えられ、非常に大きな地震動が入力する場合には、深部地盤の非線形化が表層の応答に影響を与えることも考えられる。各種設計指針等での工学的基盤は $V_s=300 \sim 400\text{m/s}$ 程度の地層とされるが、その定義は必ずしも明確でない。本研究では、一般の耐震設計で工学的基盤とされるような洪積層以深の地盤の非線形性に着目し、それが表層地盤応答と建物応答に与える影響を解析的に検討する。検討内容は、地盤の有効応力解析と、その地表面波形を入力波とする中低層RC造建物の非線形応答解析である。

2. 神戸港埋立地の有効応力解析

(1) 解析条件 対象地点は神戸港埋立地の運輸省神戸港湾事務所である。1995年兵庫県南部地震の本震時には同地点の埋土層は液状化したものと考えられる¹⁾。同地点の地層構成^{1),2)}と設定した地盤物性を図1に示す。S波速度 V_s は、GL-100m以浅については N 値や周辺のPS検層結果を参考に設定し、GL-100m以深の大阪層群につ

いては文献2)に示される値を用いる。解析は一次元成層モデルによる有効応力解析³⁾とする。土の構成式には、修正R-Oモデルとダイレイタンシーモデル³⁾を併用し、非排水条件を課すことにより過剰間隙水圧を算定している。埋土層と沖積砂礫層で過剰間隙水圧の上昇を考慮する。地盤の非線形特性($G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係)は、ポートアイランドにおける対応する地層の室内試験結果^{4),5)}を準用する。洪積砂礫2は洪積砂礫1の試験値を用い、大阪層群については軟岩に対する室内試験結果⁶⁾を参考に設定する。液状化強度は、埋土層については近傍で得られた室内試験結果⁷⁾を参考にし、沖積砂礫層は埋土層と同程度の値とする。図1には参考とする試験値に計算曲線をフィッティングしたときの基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ ($G/G_0=0.5$ に対応するせん断ひずみ)と最大減衰定数 h_{max} 及び繰返し回数15回に対応する液状化強度 R_{15} を示す。地盤モデルは図1に示す4モデルであり、GL-16.5m以深において非線形性を考慮する深さがそれぞれ異なる。入力地震動は林・他⁸⁾による推定基盤露頭波を用いる。

(2) 解析結果 図2に地表面における加速度と速度の最大値を示す。最大応答値は各地盤モデル間で10%程度の差がある。大阪層群下部までの非線形性を考慮した地盤モデル1に対して、GL-16.5mの洪積砂礫層上面以深を線形とした地盤モデル4の地表面最大応答値は35%程度大きい。深部地盤の非線形性に関するモデル化の差異が地表応答に大きな差異をもたらしていることがわかる。このような各地盤モデルの応答の差異は、洪積層以深の非線形化に伴う履歴減衰や剛性低下による波動インピーダンス比の変化、さらに非線形化による固有周期の

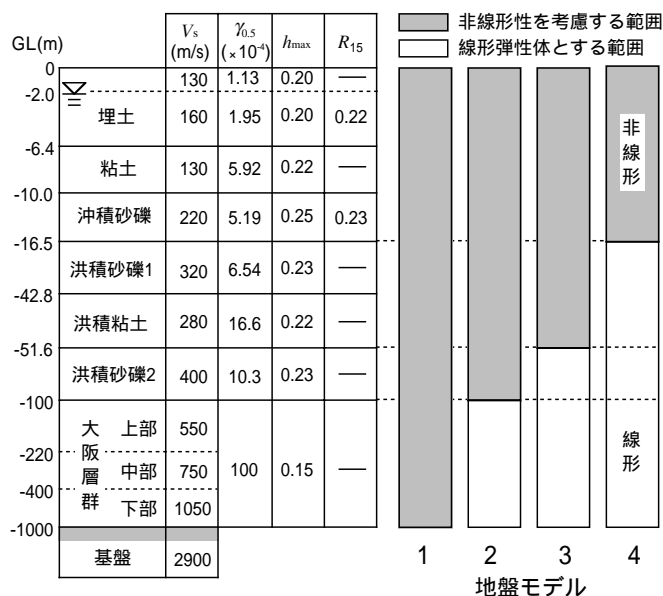


図1 地層構成と地盤モデル

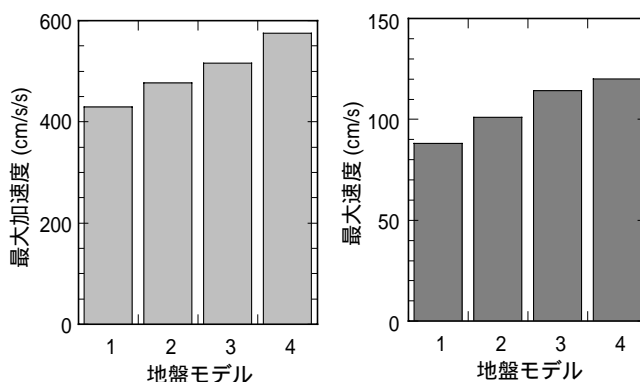


図2 地表面最大応答値

Key Word : 工学的基盤, 地盤の非線形性, 建物応答, 有効応力解析, 兵庫県南部地震

連絡先 : 〒100-0011 千代田区内幸町2-2-2富国生命ビル27F, Tel:03-3508-8101, Fax:03-3508-2196

変化などによる影響と考えられる。

3. 中低層RC造建物の非線形解析

(1)解析条件 地盤の有効応力解析から得られた地表面応答波形を入力波として、非線形1自由度系でモデル化した鉄筋コンクリート造(RC造)建物の応答解析を実施する。これにより深部地盤の非線形性に関するモデル化の差が建物応答に与える影響を検討する。対象は3階建てと5階建ての中低層RC造建物である。建物モデルとその復元力特性を図3に示す。建物の階数 N と降伏せん断力係数 C_y の関係を比例定数 γ を介して、 $C_y = \gamma / N$ と仮定する⁹⁾。 γ は建物の耐力を表し、この値が大きいほど耐力が大きい。ここでは $\gamma=2,3,5$ の場合について検討する。建物の復元力特性はトリリニア型のスケルトンとし、履歴モデルは武田モデルを適用する。降伏点に対応する層間変形角 R_2 は $1/150$ で固定とする。減衰は瞬間剛性比例型とし、一次の固有周期に対して3%とする。

(2)解析結果 図4に各建物モデルの最大応答塑性率(R/R_2)を示す。3階建てでは、耐力を表す γ の値によらず R/R_2 は1以下で降伏点に達していない。建物モデルへの入力が大きくなる地盤モデル1から4にかけて、 R/R_2 がわずかに大きくなるがその差は小さい。一方、5階建てでは耐力の違いによって R/R_2 の差が大きく見られる。耐力の余裕度があまり大きくない $\gamma=2,3$ の場合には、地盤モデルによっては R/R_2 が大きい。 $\gamma=2$ の場合、地盤モデル1では R/R_2 3であるのに対して、地盤モデル4は R/R_2 7と大きな差が見られ、深部地盤のモデル化の差

異が建物応答に大きく影響している。最大塑性率を建物被害と関連づけて考えると、耐力の余裕が小さい建物モデルの場合には、地盤モデルによっては被害の程度に大きな違いを示すものと考えられる。

4. まとめ

一般の耐震設計で工学的基盤とされる洪積層以深の非線形性が、表層地盤と中低層RC造建物の応答に与える影響を解析的に検討した。その結果、深部地盤の非線形性に関するモデル化の違いは、地表面の最大応答値と建物の最大塑性率に大きな差をもたらすことを示した。建物塑性率の差異は、予測される建物被害の程度に大きな違いを示すものと考えられる。以上は、耐震設計における工学的基盤の設定位置の重要性を示している。また、被害予測や実際の被害原因の定量的な解釈のためには、深部地盤の非線形性を的確に考慮した検討が必要であると考えられる。このため、深部地盤のボーリングデータなどが得られない場合の工学的基盤の設定方法と、非線形特性に代表される深部地盤の物性に関するデータ収集が重要な課題であると考えられる。

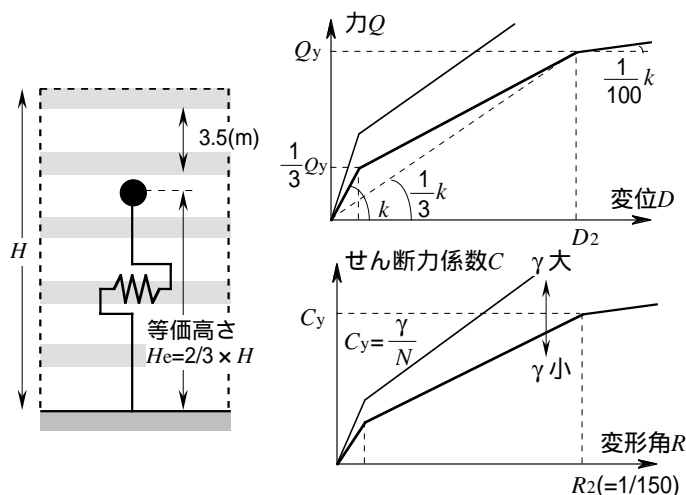


図3 RC造建物モデルとその復元力特性

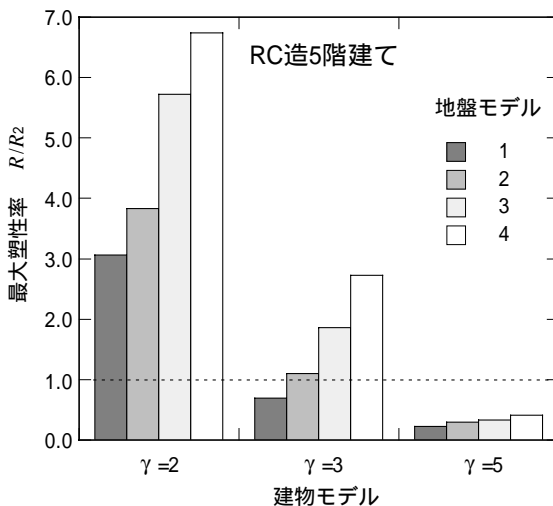
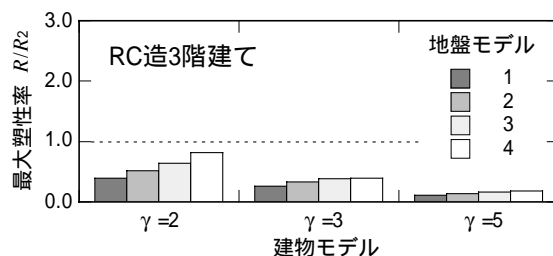


図4 最大応答塑性率

参考文献 1)運輸省港湾技術研究所：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察，港湾技研資料，No.813，1995。 2)関西地盤情報活用協議会：新関西地盤 - 神戸および阪神間 - ，1998。 3)K.Fukutake et al.: Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test, Earthquake eng. struct. dyn. 19, pp.977-992, 1990。 4)善・他：埋立地に用いたまさ土の液状化特性，土と基礎，Vol.44, No.2, pp.60-63, 1996。 5)神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド，六甲アイランド)報告書，1995。 6)西・他：振動載荷時における軟岩の動的強度 - 変形特性，電力中央研究所研究報告，383050，1985。 7)畑中・他：ある埋立地盤の液状化強度 - 神戸新港埠頭 - ，土木学会年次学術講演会，1996。 8)林・他：1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価，日本建築学会構造系論文集，第481号，pp.37-46, 1996。 9)林・他：1995年兵庫県南部地震における相互作用効果と建物応答，日本建築学会構造系論文集，第520号，pp.45-51, 1999。