

洪積層以深の非線形性が地盤と建物の 地震応答に与える影響

藤川 智¹・林 康裕²

¹正会員 清水建設和泉研究室 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2)

²京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

洪積層以深の非線形性が、地盤応答と建物応答に与える影響を数値解析により検討する。神戸港の埋立地を対象とし、入力地震波は1995年兵庫県南部地震における基盤波とする。液状化を考慮した地盤の有効応力解析と、RC造建物の非線形解析を実施する。解析結果は、洪積層以深の非線形性に関するモデル化の差異が、地表および建物応答に大きな差異をもたらす場合があることを示す。これらは、地震被害予測や被害原因の定量的解釈のためには、洪積層以深の地盤の非線形性を適切に考慮することが重要であることと、工学的基盤の設定位置が耐震設計上の重要な要素となる可能性を示している。

Key Words : Engineering bedrock, Soil nonlinearity, Ground response, Building response, Hogoken-nambu earthquake, Effective stress analysis

1. はじめに

耐震設計においては、ボーリングデータなどの地盤調査結果の深度の限界から、いわゆる工学的基盤が設定される。工学的基盤としては、それ以深では非線形化が無視できるような、 $V_s=300\sim 400\text{m/s}$ 程度の洪積層以深の地盤が選ばれる。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。このため、洪積層以深の非線形性が表層地盤応答、さらには構造物の応答に与える影響を明らかにしておくことは、耐震設計及び地震防災の観点から重要と考えられる。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、そのモデル化の差異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。対象地点は神戸港の埋立地とし、地盤モデルの有効応力解析と、その地表面波形を入力波とする中低層RC造建物モデルの非線形応答解析を実施する。

2. 地盤モデルの解析

(1) 対象地点と解析条件

対象地点は神戸港の埋立地であり、図-1に示す運輸省神戸港工事事務所(以下、工事事務所)とポートアイランドの鉛直アレー観測地点(以下、ポートアイランド)の2地点である。これらの地点では、1995年

兵庫県南部地震の本震時に、表層の埋土層の液状化が観測されている^{1),2)}。このため、地盤モデルの解析は一次元成層モデルによる有効応力解析³⁾とする。

両地点の地層構成と設定した地盤物性を図-2に示す。まず、工事事務所の地層構成は、文献1)のボーリング柱状図と文献4)に示される深部地盤構成に基づく。S波速度 V_s は、GL-100m以浅についてはN値や周辺のPS検層を参考に設定し、GL-100m以深の大坂層群については文献4)に示される値を用いる。地盤の非線形特性($G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係)は、後述する

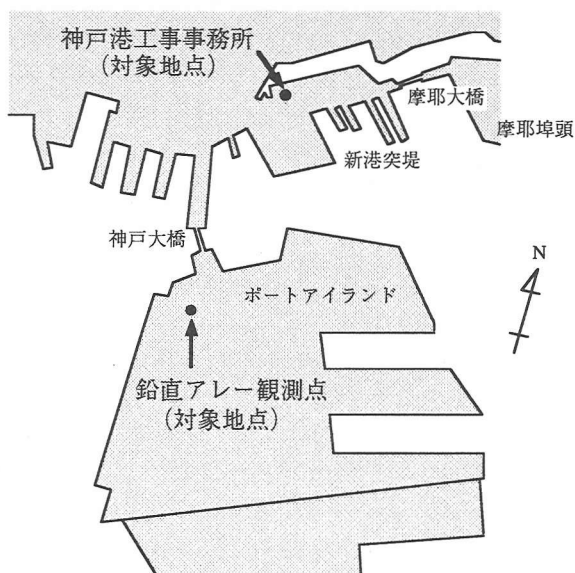
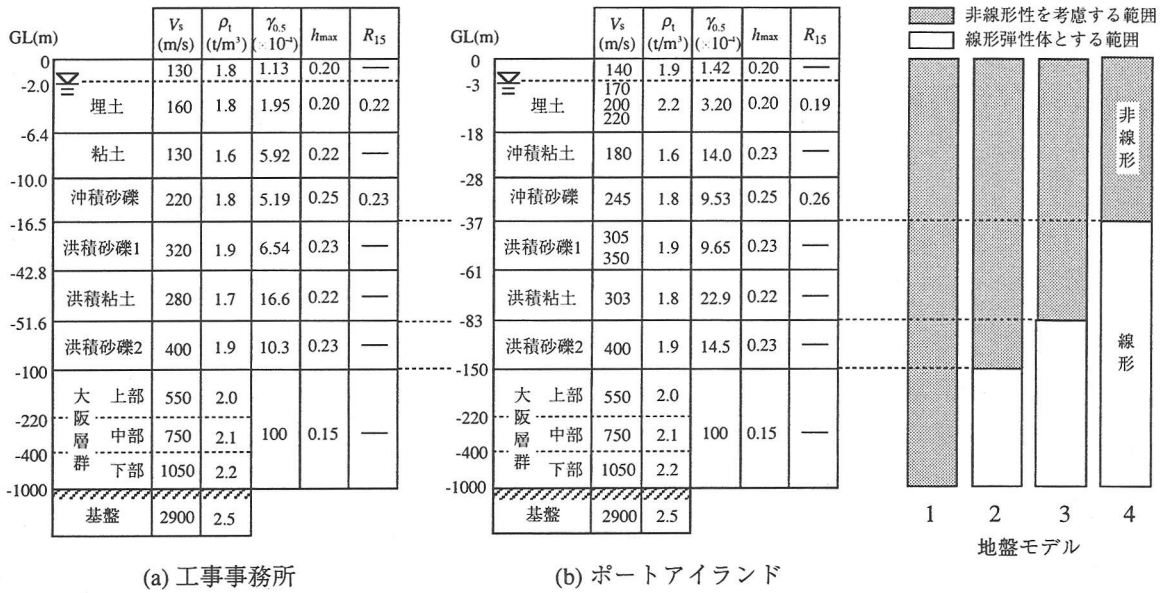


図-1 対象地点



図一 2 地層構成と地盤モデル

ポートアイランドにおいて得られている室内試験結果^{2),5)}を対応する地層に準用する。洪積砂礫2は洪積砂礫1の試験値を準用し、大阪層群については軟岩に対する室内試験結果⁶⁾に基づく。液化強度は、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。次にポートアイランドについては、GL-83m以浅の地層構成とS波速度 V_s は文献2)による調査結果に基づく。GL-83m以深の地層構成は、洪積粘土層と洪積砂礫2層の底面深度が工事事務所の場合と比例関係にあると仮定して、洪積砂礫2層の底面深度をGL-150mとする。両地点で同じ入力基盤波を用いるため、基盤深度は工事事務所と同じGL-1000mに設定する。洪積砂礫2層以深の V_s は工事事務所と同じ値とする。 $G/G_0 \sim \gamma h \sim \gamma$ 関係は、GL-83m以浅については文献2)の試験結果に基づき、洪積砂礫2と大阪層群については工事事務所と同様の設定方法とする。液化強度は、埋土層については近傍で得られた室内試験結果⁸⁾に基づき、沖積砂礫層は文献2)の試験結果に基づく。

図一2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} 、及び液化強度曲線で繰返し回数15回に対応する液化強度 R_{15} を示す。地盤モデルは図一2に示す4モデルであり、洪積層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。

地盤の有効応力解析では、土の構成式として修正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する。両地点ともに、埋土層と沖積砂礫層で過剰間隙水圧の上昇を考慮する。その他の層では、応力-ひずみ

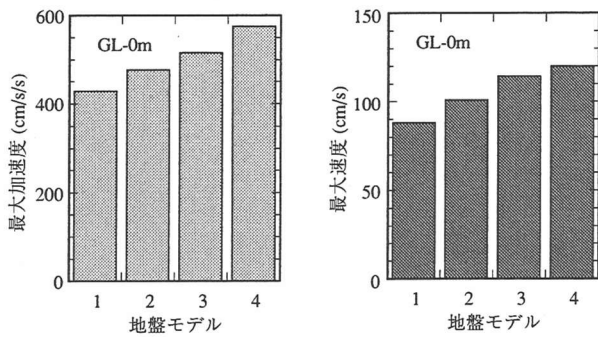
関係の非線形性のみを考慮するか、もしくは線形弾性体とする。入力地震動には、林・川瀬⁹⁾による推定基盤露頭波(最大値は2Eで335cm/s/s)を用いる。これは、神戸海洋気象台で得られた本震記録から、最大主軸方向(N32°W)断面の地盤モデルによりGL-1000mの基盤波を逆算したものである。

(2) 解析結果

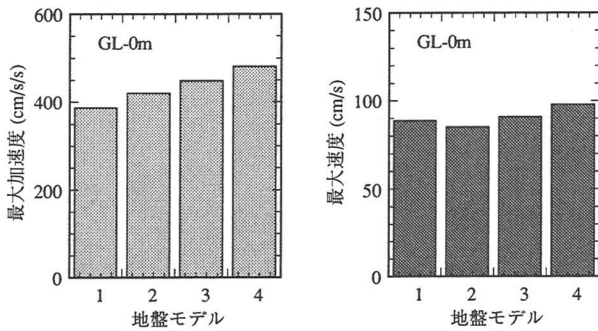
(a) 工事事務所 図一3に地表面における加速度と速度の最大値を示す。最大応答値は各地盤モデル間で10%程度の差がある。大阪層群下部まで非線形性を考慮した地盤モデル1に対して、GL-16.5mの洪積層上面以深を線形とした地盤モデル4の地表面最大応答値は35%程度大きい。深部地盤の非線形性に関するモデル化の差異が地表応答に大きな差異をもたらしていることがわかる。このような各地盤モデルの応答の差異は、洪積層以深の非線形化に伴う履歴減衰や剛性低下による波動インピーダンス比の変化、さらに非線形化による固有周期の変化などによる影響と考えられる。

(b) ポートアイランド 図一3より、地盤モデル1に対する地盤モデル4の地表面最大値の増加は、加速度は24%程度、速度は10%程度である。工事事務所の場合に比べ、地盤モデル間の差は小さく、深部地盤のモデル化の差異が地表応答に及ぼす影響が小さくなっている。

ここで、地盤応答のメカニズムを近似的に把握するために、両地点の地盤モデルに対する等価線形解析を実施した。その結果、図一4に示す洪積層上面における加速度(2E)は、両地点でほぼ同じ最大振幅となる。従って、両地点の地表応答の差は、主として沖積層以浅の応答によるものと考えられる。両地点の

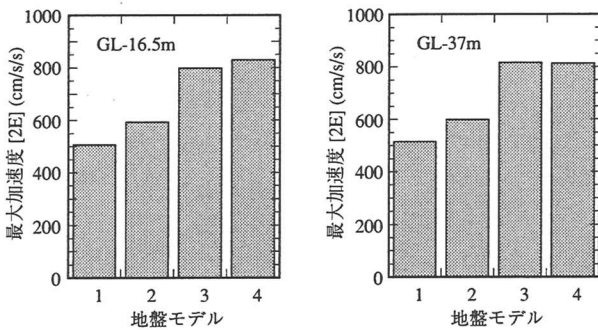


(a) 工事事務所



(b) ポートアイランド

図-3 有効応力解析による地表面最大応答値



(a) 工事事務所

(b) ポートアイランド

図-4 等価線形解析による洪積層上面の加速度振幅

地盤条件の主な違いは沖積層の厚さである。沖積層が厚いポートアイランドでは、過剰間隙水圧の上昇を含めた非線形化による長周期化が著しく、表層の固有周期が入力波の卓越周期からより大きく離れるものと考えられる。このため、沖積層に入射する地震動の振幅の差が地表応答に現れにくいものと考えられる。以上は、表層の地盤条件によっては、深部地盤の非線形性に関するモデル化の差異が、地表応答に現れにくい場合があることを示している。

3. 中低層RC造建物モデルの解析

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。

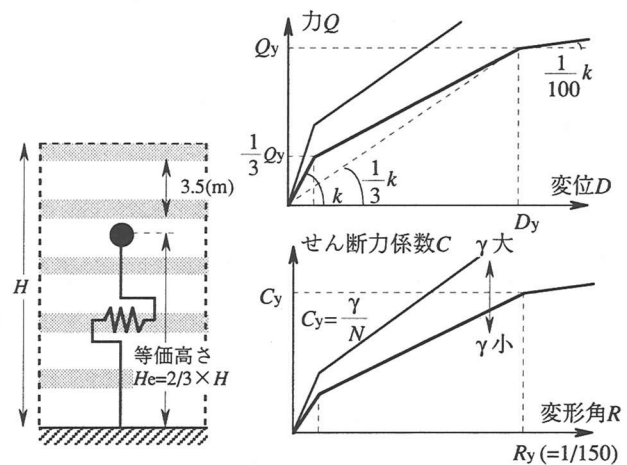


図-5 RC造建物モデルとその復元力特性

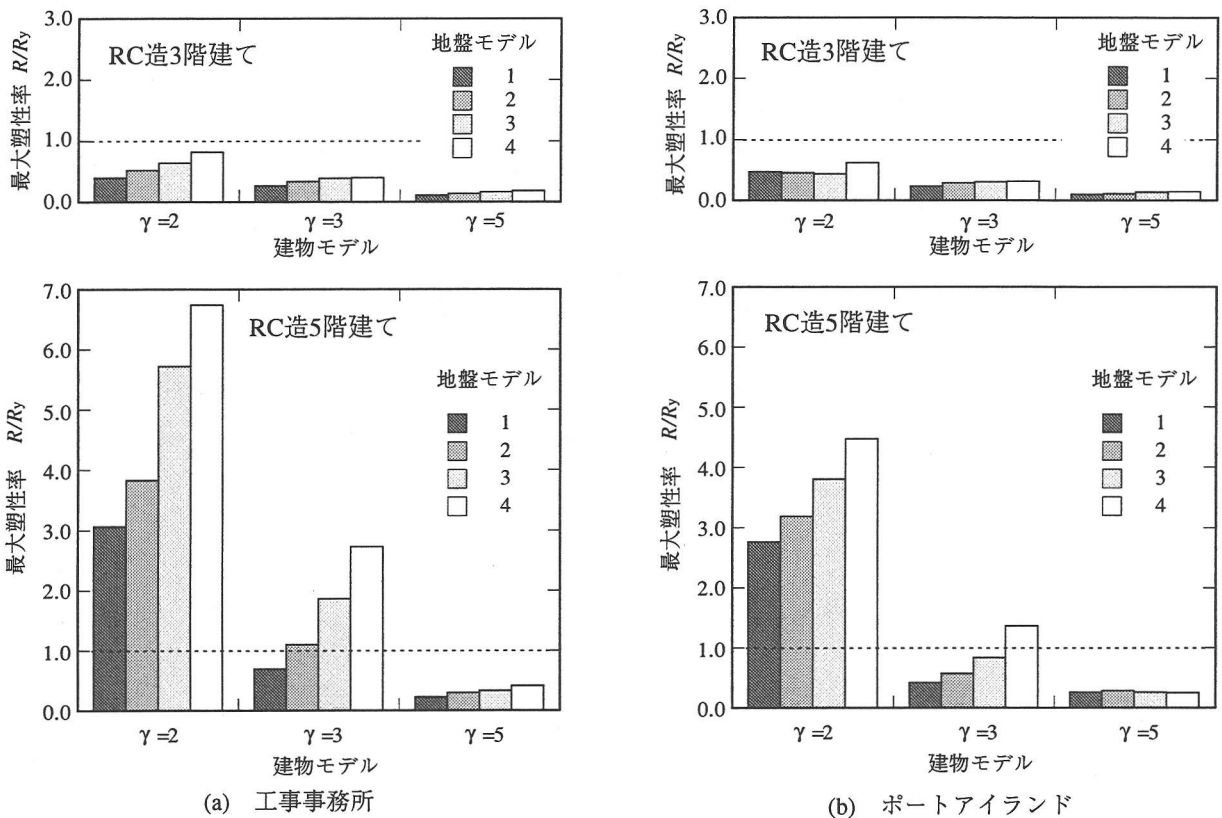
(1) 解析条件

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-5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¹⁰。 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_y 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。入力波は各地点の各地盤モデルの有効応力解析で得られた地表面加速度波形とする。

(2) 解析結果

(a) 工事事務所 図-6に各建物モデルの最大応答塑性率(R/R_y)を示す。3階建てでは、耐力を表す γ の値によらず R/R_y 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_y 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_y 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_y が大きい。 $\gamma=2$ の場合、地盤モデル1では $R/R_y \approx 3$ であるのに対して、地盤モデル4は $R/R_y \approx 7$ 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、耐力の余裕度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。

(b) ポートアイランド 図-6より、3階建てでは R/R_y は1以下で降伏点に達しておらず、地盤モデルによる差異はほとんど見られない。5階建てでは、 $\gamma=2,3$ の場合には地盤モデルによる差異が見られる。しか



図一6 建物モデルの最大応答塑性率

し、工事事務所の場合に比べ、地盤モデル間の差異は小さい。 $\gamma=2$ の場合、地盤モデル1が $R/R_y \approx 3$ であるのに対して、地盤モデル4では $R/R_y \approx 4.5$ であり50%程度の増加にとどまっている。

両地点の建物モデルの解析から、深部地盤の非線形性に関するモデル化の差異が、建物被害の程度に大きな差異を及ぼす場合があるものと考えられる。しかし、表層の地盤条件によっては、その影響の程度があまり大きくない場合があることを示している。

4. まとめ

兵庫県南部地震時の神戸港の埋立地を対象として、工学的基盤とされるような洪積層以深の非線形性が、地表と中低層RC造建物の応答に与える影響を解析的に検討した。本研究で得られた結論を以下に示す。(1)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場合がある。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。(2)これより、地震被害予測や被害原因の定量的解釈のためには、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。また、入力地震動を工学的基盤上で与える場合には、その設定位置が耐震設計上の重要な要素になる可能性が考えられる。(3)このため、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と、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が重要な課題であると考えられる。(4)ただし、表層の地盤条件によっては、深部地盤のモデル化の差異があまり大きく現れない場合がある。このため、表層地盤条件と地表及び建物応答との関係を明らかにすることも課題であると考えられる。

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)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。3)Fukutake, K. 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)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。5)善・山崎：埋立地に用いたまき土の液状化特性，土と基礎，Vol.44, No.2, pp.60-63, 1996。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)内田・他：神戸ポートアイランドの埋立マサ土地盤の静的及び動的強度特性，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.135-142，1997。9)林・川瀬：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。10)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。