

兵庫県南部地震における神戸市灘区の建物の応答解析 (その1 地盤と基礎の応答)

渦岡良介¹・日比野浩¹・新井洋²・久保哲夫³・亀田弘行⁴

¹工博 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

²工博 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

³工博 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

名古屋工業大学 工学部 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

⁴工博 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

For the purpose of performing earthquake response analyses of a building, which suffered slight damage during the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, response analyses of deep basin structure, surface ground and pile foundation were carried out. 2-D finite element model were used for the analysis of deep ground. Estimated PGV distribution by the analysis showed good agreement with damage distribution. 1-D effective stress analyses indicated that the surface soft ground liquefied. 2-D effective stress analysis of soil-foundation-building system showed that bending cracks occurred along the RC piles. These simulated results agreed with the post-earthquake observation of surface ground and building.

Key Words : Earthquake damage, Ground motion distribution, Liquefaction, Pile foundation, Effective stress analysis

1. まえがき

兵庫県南部地震においては、大被害を受けた地域が阪神間に帯状に分布する現象(いわゆる震災の帯)が見られたが、この地域の被害分布を詳細に見ると狭い地域内でも必ずしも一様とはなっていない。これは地震動の特性、地盤の応答特性、構造形式や建築年代の違いによる構造物の振動特性などの構造物被害の要因が複雑に影響しているためとみられる。ここでは、震災の帯にありながら比較的被害が軽微であった神戸市灘区のA集合住宅を対象として、地震動の伝播から構造物の挙動に至るまでを一貫して評価し、建物の本震時の挙動を明らかにする。まず、その1では深部地盤、表層地盤および杭基礎の応答解析を実施する。

2. 深部地盤の応答

深部地盤構造と実地震記録を用いて、対象建物の立地地点(以下A点)の地震動を推定する。

(1) 解析条件

地震動分布の見地から震災の帯の解釈には、当該地域の深い地盤構造の考慮が必要不可欠であることが指摘されている¹⁾。そこで諏訪山断層にはほぼ直交しA点を横切るN332E断面(図-1)について2次元FEM解析を実施した。解析では、反射法地震探査に基づいて推定された神戸・阪神地域の断面²⁾のデータ、PS検

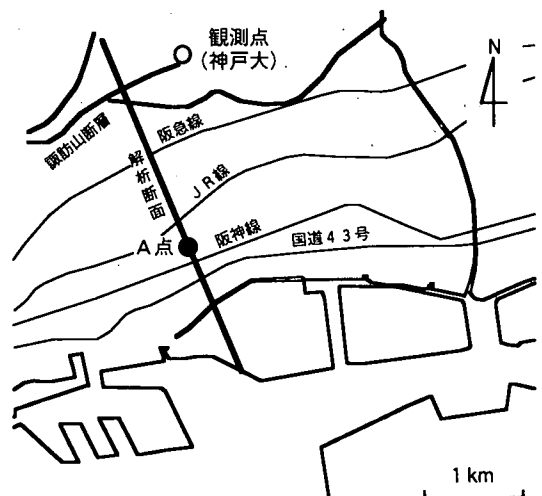


図-1 解析位置

層結果，ボーリング調査結果³⁾を反映した2次元FEMモデル(図-2)を作成した。モデルでは沖積層および上部洪積層地盤は取り除き，大阪層群以深より基盤岩までの深さ2.0km，幅3.5kmを解析対象とした。材料特性は線形とし，解析モデルの有効振動数を5Hz以下とした。神戸大の観測記録(速度記録をFFT法により加速度に変換)を面内方向成分に変換し，1次元重複反射理論に基づいて風化花崗岩以浅の影響を取り除いた露頭基盤波(図-3)を作成し，モデルの下端から鉛直下方入射した。

(2) 解析結果

大阪層群上面での水平最大加速度および水平最大速度分布を図-4に示す。x=2.8km地点付近で振幅が最大になっている他，x=0.8km地点から1.9km地点の範囲でも400cm/s²，90cm/sを越えており，最大速度分布は町丁目ごとに集計された被害率分布⁴⁾(図-4)と良い対応を示している。x=1.8kmに相当するA点の最大加速度・速度は460cm/s²，96cm/sとなった。解析で得られたA点の推定加速度波形を図-5に示す。

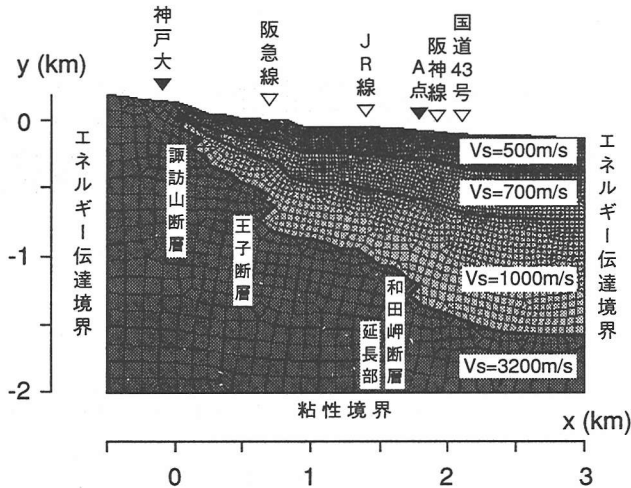


図-2 解析モデル(深部地盤)

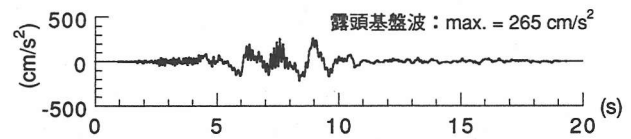


図-3 露頭基盤波

3. 表層地盤の応答

2章で得られた大阪層群上面(GL-113m)での露頭波を入力として，表層地盤の1次元有効応力解析を行う。

(1) 解析条件

解析には，社本らの提案する1次元有効応力解析手法⁵⁾を基本として，限界応力状態線の移動現象⁶⁾やPost-Liquefaction⁷⁾を考慮した土のモデルを用いる。

A点近傍では4地点(図-6)のボーリングデータ³⁾が公開されている。そこで，4地点(以下B01-B04)を解析対象とし，解析モデルの下端は大阪層群上面とした。B01-B04の表層地盤構造を図-7に示す。いずれの地点でも，深度10m以浅は表土および沖積の砂礫互層，それ以深は洪積層となっている。S波速度・密度の値は，検層結果が無いため，既往の研究⁸⁾を参考にN値から推定した。また，ボーリングが得られていない深度15m以深は，近傍での微動アレイ観測結果⁹⁾を参考に仮定した。なお，いずれのボーリングでもモデルパラメータを設定するのに必要な室内試験は実施されていないため，モデルパラメータはN値および砂の種別から既往の研究^{10), 11), 12)}に基づき推定した。

(2) 解析結果

B01-B04地点の解析から得られた最大加速度応答および最大過剰間隙水圧比の深さ方向分布を図-8に示す。

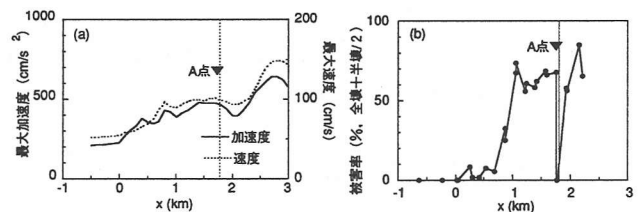


図-4 (a)最大水平加速度・速度分布および (b)建物被害率分布⁴⁾

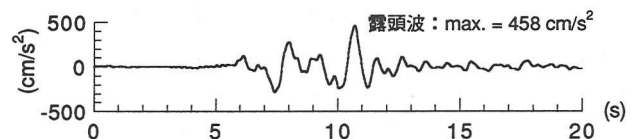


図-5 A点での推定地震動

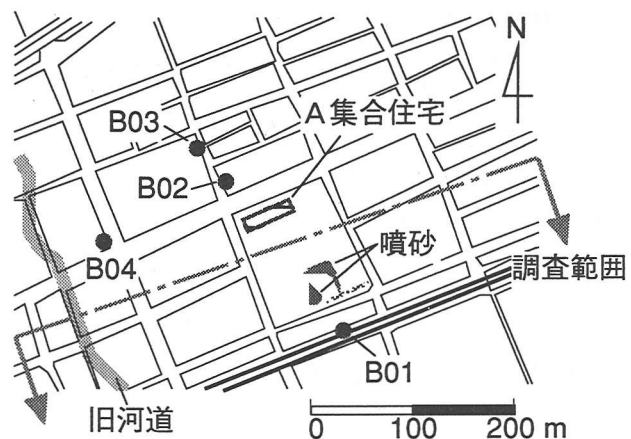


図-6 A点近傍でのボーリング地点

す。各地点の地表付近での加速度応答には差異が見られる。また、最大過剰間隙水圧比が1に達する層（推定液状化層）の深さと厚さは各地点で異なっている。図-7、8の比較から、表層付近の加速度応答の差異は、各地点の深度10m程度以浅のS波速度および液状化の程度の差異に起因していると考えられる。

推定液状化層は海側のB01地点では深度2-8m程度であるが、山側のB02、B03地点では深度6-8m程度と、B01地点に比べ深く薄い。このことは、本震時には海側のB01では噴砂が報告されているが、山側のB02、B03では報告されていないこと¹³⁾と調和的である（図-6）。また、解析から得られた地表最大加速度および最大速度の値は 520cm/s^2 、 110cm/s であり、これらは、やや東側の測線に沿う既往の地震応答解析結果（ 600cm/s^2 、 120cm/s ）¹⁴⁾と概ね調和的である。以上の結果は、推定された地表地震動の妥当性のある程度を示すものと思われる。

4. 杭基礎の応答

3章で得られた洪積砂礫層上面（GL-14.5m）での応答を入力として、軟弱地盤-杭基礎-建物の2次元有効応力解析を行う。

(1) 基礎杭の概要

解析対象の建物は昭和36年に建設されたRC造5階建ての集合住宅で、図-9に示すような杭基礎により支持されている。径300mmのRC杭で長さは6mである。建物荷重を算定した結果、基礎杭一本あたりの常時荷重は188kN程度であった。地震後の調査によると、建物周辺の側溝やエントランス部の底面にクラックが発生しているが、建物全体としては傾斜、沈下等は見られず、基礎杭に大きな損傷は生じていなかったと思われる。

(2) 解析条件

砂の弾塑性モデル¹⁴⁾を組み込んだ有効応力法を用いて、建物-杭-地盤系の二次元平面ひずみ解析を行う。建物短辺方向のFEMモデルを図-10に示す。建物、杭、地盤の全て奥行き1mあたりに換算してモデル化している。土層構成は3章でのボーリングB01のうち、GL-14.5mまでをモデル化した。地盤の材料パラメータについても3章で推定した土質定数をもとに設定した。建物は短辺方向構面を線形はり要素でモデル化した。質量は柱頭部に集中質量として配置し、梁は剛体とした。また、南北方向の壁も平面要素でモデル化している。基礎杭については、杭種をRC杭B種とし、常時の軸力を考慮して算定したM- ϕ 関係を

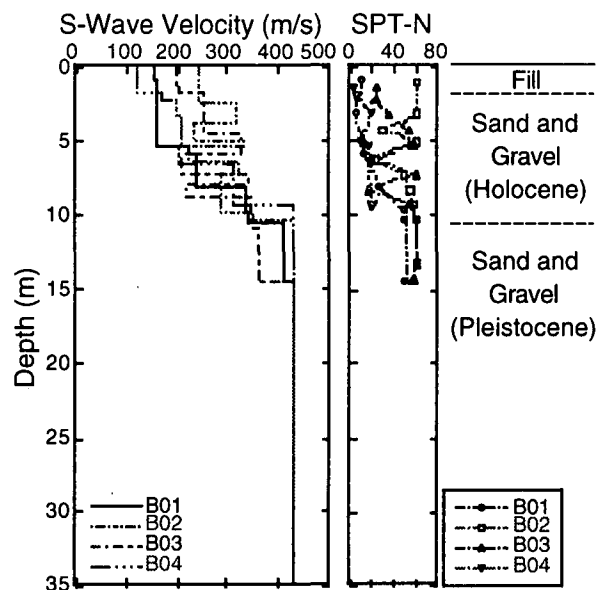


図-7 ボーリングB01地点の推定地盤構造

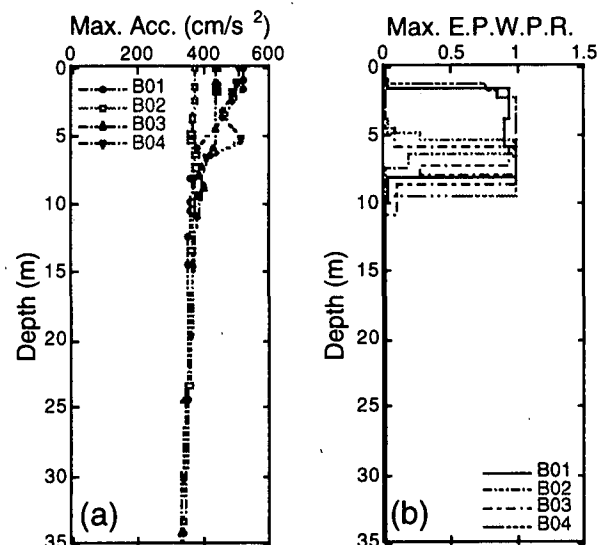


図-8 最大加速度および最大過剰間隙水圧比の深度分布

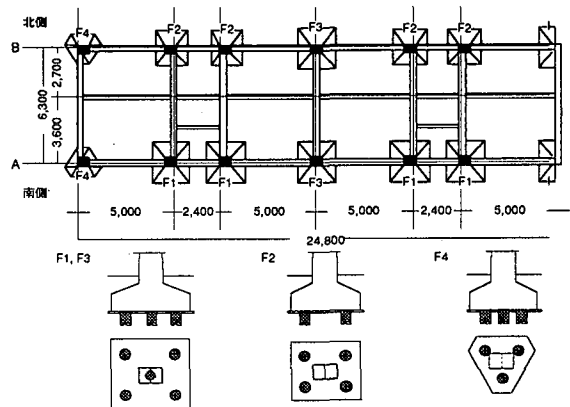


図-9 杭基礎の配置

有する非線形はり要素でモデル化した。基盤での入力加速度には3章のボーリングB01での解析で得られたGL-14.5mの波形を用いた。

(3) 解析結果

自由地盤部での水平変位、過剰間隙水圧および南側の基礎杭のせん断力、曲げモーメントの最大値の深度分布を図-11に示す。図中の基礎杭の断面力は解析で得られた単位奥行きあたりの値を、杭一本あたりに換算したものである。せん断力図中の一点鎖線は道路橋示方書¹⁵⁾の手法で算定したせん断耐力を示している。また、曲げモーメント図中の内側の一点鎖線は引張側のコンクリートにひび割れが発生する曲げモーメントの値、外側の一点鎖線は鉄筋が降伏する曲げモーメントを示している。液状化層（沖積砂質土層 N=10）の最大相対変位は約2.5cmであり液状化地盤としてはさほど大きくない値である。これは、完全液状化に至る層厚が沖積砂質土層の一部（約3m）であり、さほど厚くないことが原因と思われる。このため、杭のどの部分でも、最大せん断力は耐力を上回っておらず、最大曲げモーメントもひびわれ発生モーメント程度である。

5. おわりに

兵庫県南部地震における神戸市灘区の集合住宅の応答解析の一環として、深部地盤、表層地盤および地盤-基礎杭-建物系の応答解析を行った。これらの解析はお互いに地盤定数や入力地震動の整合性を保つことで、擬似的に一連の解析を表現している。深部地盤の応答解析の結果得られた大阪層群上面の地震動分布は、建物被害分布と概ね対応するものであった。表層地盤の1次元有効応力解析の結果は、地震後に観察された地表面の噴砂の状況や既往の地震応答解析結果と整合するものであった。地盤-杭基礎-建物の2次元有効応力解析の結果は、地震後には基礎杭に大きな損傷が発生していないことと整合するものであった。

謝辞：本研究に際し、兵庫県からは解析対象とした建物の資料をご提供いただいた。強震記録は関西地震観測研究協議会により観測・公開されたものを利用した。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kawase, H.: The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect", Constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, Seismological Research Letters, Vol.67, No.5, pp.25-34, 1996.
- 2) 阪神地域活断層調査研究会: 阪神・淡路地域活断層調査報告書, 1996.
- 3) 神戸市: 阪神・淡路大震災と神戸の地盤, - 神戸 JIBANKUN の構築ならびに地盤と被害の分析 -, 1999.
- 4) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996.

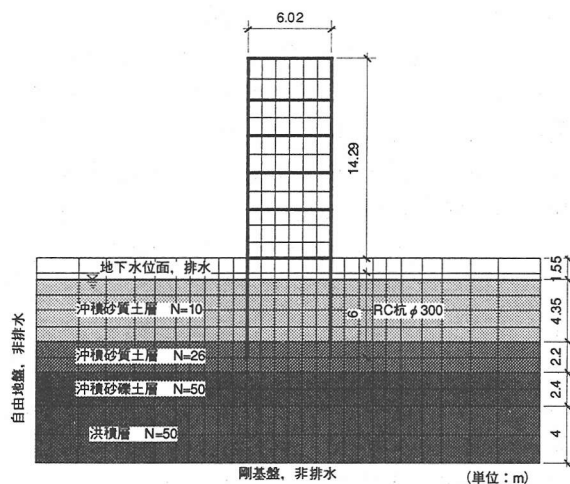


図-10 解析モデル（地盤-基礎-建物系）

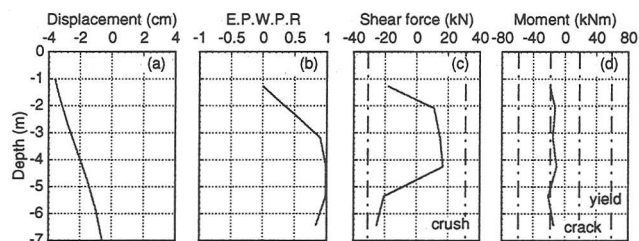


図-11 最大応答値の深度分布

(a)変位, (b)過剰間隙水圧比, (c)せん断力, (d)曲げモーメント

- 5) 社本康広ほか: 1次元有効応力解析の実地盤に対する適用性, 日本建築学会構造系論文報告集, No.433, pp.113-119, 1992.
- 6) Zhang, J. M.: Cyclic Critical Stress State Theory of Sand with Its Application to Geotechnical Problems, A Thesis for the Doctor degree, Tokyo Inst. of Tech., 1997.
- 7) Shamoto, Y. et al.: Mechanism of Large Post-Liquefaction Deformation, Soils and Foundations, Vol.37, No.2, pp.71-80, 1997.
- 8) 多田公平ほか: 神戸市におけるボーリング資料を利用した表層S波速度構造推定, 日本建築学会大会梗概集, 構造II, pp.317-318, 1996.
- 9) 時松孝次ほか: 微動観測から推定した神戸市住吉地区の深部S波速度構造と地震動特性, 日本建築学会構造系論文集, No.491, pp.37-45, 1997.
- 10) 畑中宗憲ほか: 砂質地盤の内部摩擦角 ϕ と標準貫入試験のN値の関係についての一考察, 日本建築学会構造系論文集, No.506, pp.125-129, 1998.
- 11) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-Value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.
- 12) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, pp.240-245, 1996.
- 13) Hamada, M. et al.: The 1995 Hyogoken-Nanbu(Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, Assoc. Development of Earthq. Prediction, 1995.
- 14) Oka, F. et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 15) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 下部構造編, 1996.