

兵庫県南部地震におけるポートアイランド 地盤応答の有効応力解析

鹿島建設(株) 鄭 京哲*, 大保直人*

兵庫県南部地震の際、ポートアイランドの地盤において大変貴重な鉛直アレー観測記録が得られている。本報告では、この観測記録を用いて地盤応答特性の解明を試みた。まず線形解析による観測点間の伝達関数と観測記録から求めた伝達関数を比較し、地震による地盤剛性の変化を検討し、次に3次元有効応力解析による地盤地震応答の検証解析を実施した。検証解析に用いたコードはDYNFLOWであり、構成則はMulti-Yield-Surfaceに基づく塑性理論によるものを用いた。ここで検討した結果、今回の地震によって地盤剛性は大きく低下し、表層砂質地盤は液状化が発生し、比較的硬い洪積層も剛性が大きく低下したことが確認できた。さらに、有効応力解析によって観測結果を概ね再現できることが示された。

1. まえがき

兵庫県南部地震の際、神戸市ポートアイランドにおいて大規模な地盤液状化が発生し、港湾施設などは大きな被害を被ったことが報告されている¹⁾²⁾。今回のような直下型大地震の場合の地盤液状化現象を検証し、液状化による被害を防ぐための対策を確立することが重要である。ここでは、関西地震観測研究協議会より提供されたポートアイランドで観測された加速度記録を用いて、加速度記録の分析と3次元有効応力解析による地盤液状化シミュレーションを行い、地震時の地盤応答の再現と応答特性の検討を試みた。

2. 地盤条件と観測結果

(1) 地盤条件

兵庫県南部地震の際、ポートアイランドにおいて加速度波形が記録された。図-1に観測地点の土質柱状と加速度計の設置位置を示す。この地点では、地表面から深さ約18mまでがN値が10以下の埋立砂地盤で、18mから28mまでがN値が5以下の粘土層で、これより深い部分が硬い洪積層となっている。加速度計は地表面、GL-16m、GL-32mとGL-83mに設置されている。

(2) 観測結果と考察

観測地点で得られた加速度波形を図-2に示す。水平方向の加速度は、地表面での最大値が深さ83mでのそれより大幅に低減しており、地震によって地

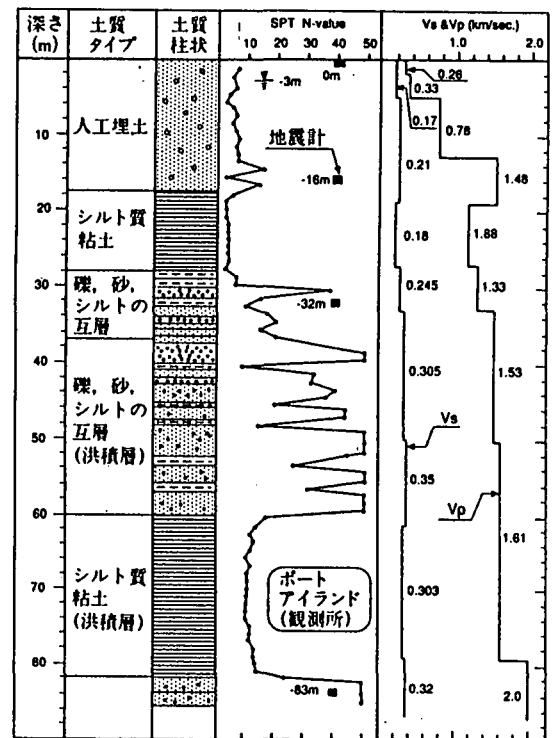


図-1 観測地点の土質柱状 (文献3)より

盤の剛性が大きく低下していることが推測される。上下方向の加速度は地表面で大きく増幅されており、振幅がGL-83mのそれの約3倍となっている。水平方向と上下方向は、加速度振幅の増幅特性が異なっている。

各観測点の間の地盤増幅特性を見るため、NS方向の加速度波形を用いてGL-0mとGL-16m、GL-16mとGL-32m、それからGL-32mとGL-83mの間の伝達関数を求めた。これを図-2に示す。また、今回の地震による各観測点間の地盤剛性の変化を見るため、図-1に示す物性を用いて線形解析(重複

キーワード：有効応力解析、ポートアイランド、地震応答

*鹿島建設(株) 技術研究所, 0424-89-7087

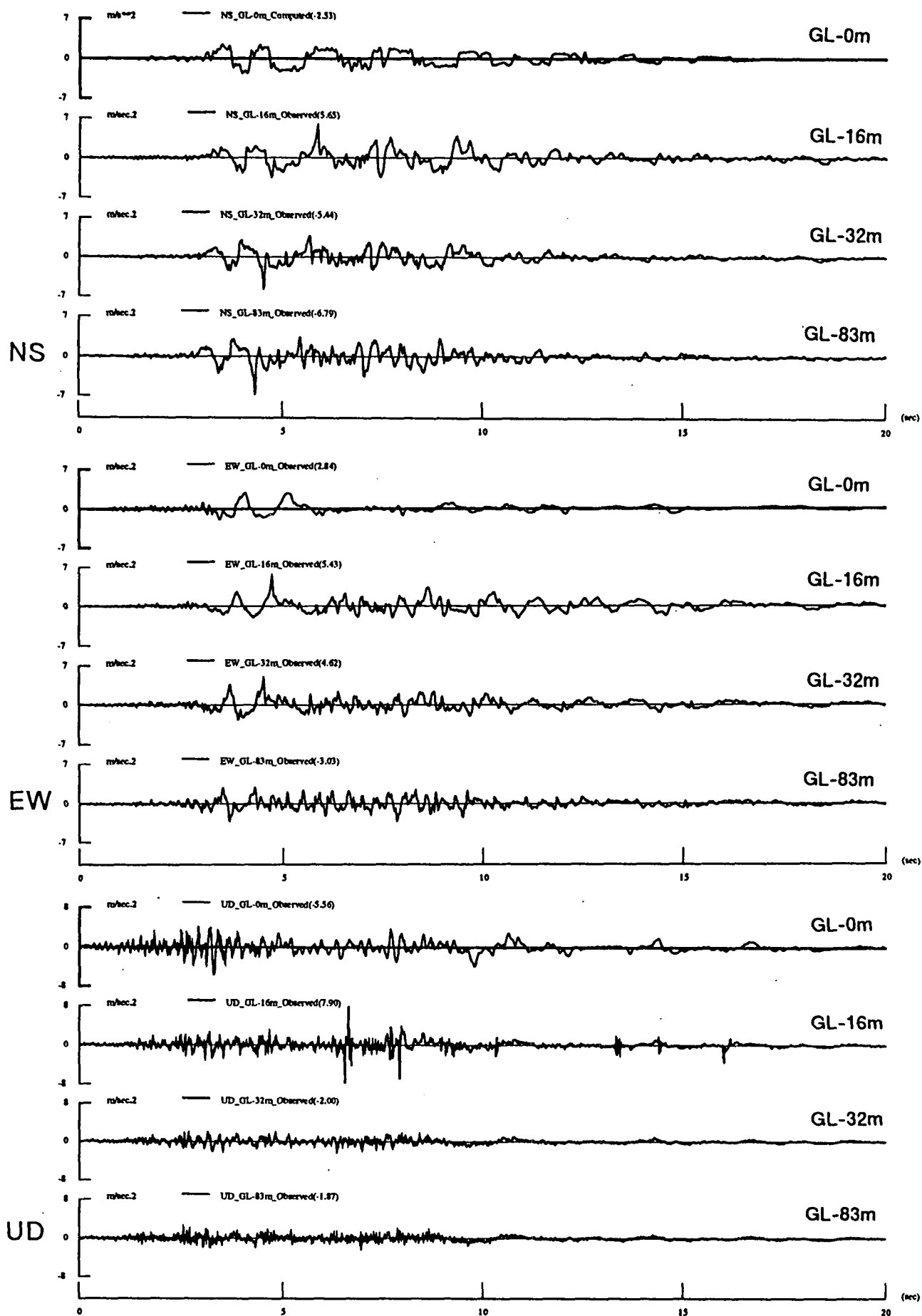


図-2 観測された加速度波形

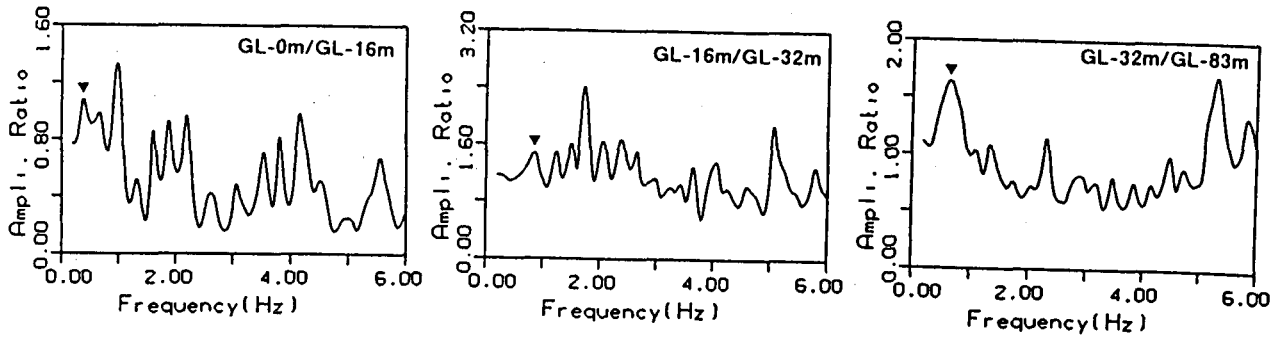


図-3 加速度記録から求めた各観測点間の伝達関数 (▼: 1次卓越振動数)

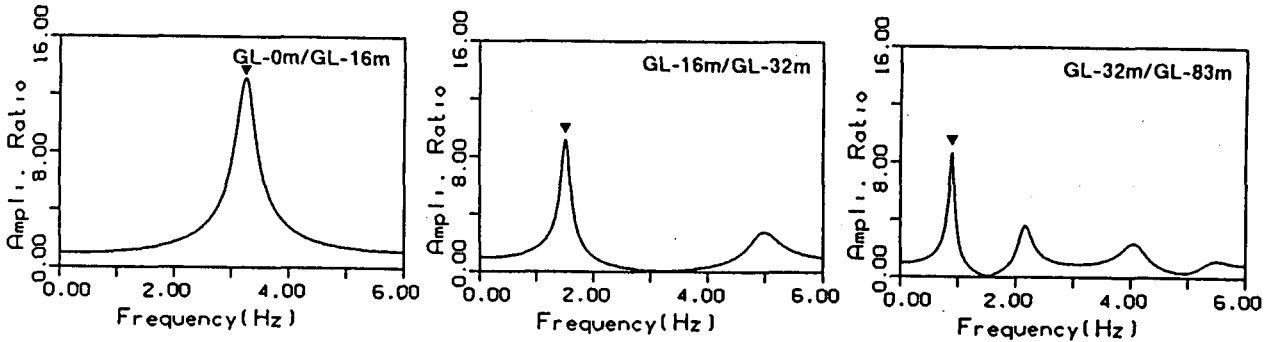


図-4 線形解析によって求めた各観測点間の伝達関数 (▼: 1次卓越振動数)

反射理論)によって求めた各観測地点の間の伝達関数を図-4に示す。図-3と図-4の結果を比較すると、記録波形から求めた伝達関数の1次卓越振動数は地震前より低くなっており、今回の地震によって地盤の剛性が低下していることが分かる。地震記録から求めた伝達関数の1次卓越振動数と地震前のそれとの比はGL-0mとGL-16mの間では0.12, GL-16mとGL-32mの間では0.56, GL-32mとGL-83mの間では0.73となっており、地表の近くでは地盤剛性の低下が大きいことが示されている。GL-32mとGL-83mの間の洪積層は地盤剛性の低下が比較的小さいが、今回の地震の場合、初期せん断波速度が300m/sを超えているにも拘わらず、伝達関数の1次卓越振動数が27%も低くなった。

3. 有効応力解析

(1) 解析モデル

解析コードは有効応力解析プログラムDYANFLOWを用い、構成則はMulti-Yield-Surfaceに基づく塑性理論によるものを用いた⁴⁾。

本解析では、GL-83mを剛基盤と想定し、その上の地盤を1列の土柱としてモデル化した。地下水位をGL-3mに設置し、その上の埋土を1相系材料としてモデル化した。GL-3mからGL-18mまでの

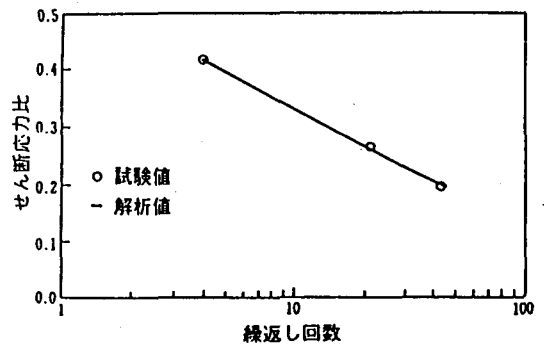


図-5 液状化強度

砂質埋土を2相系材料とし、それより深い地盤を1相系材料とした。解析モデルの側方境界条件については、同じ深さの節点が常に同じ挙動になるように拘束条件を与えた。入力は、GL-83mで記録された水平・上下3成分の加速度波を底面より与えた。計算はまず自重解析によって初期応力を求め、次に加速度波形を入力して動的解析を行った。

物性パラメーターの内、せん断弾性係数はPS検層の結果によって定めた。粘着力は砂質地盤の場合は0とし、粘性土の場合は文献5)に示されている方法によって算出した。内部摩擦角はDunhumの式によって決めた。2相系材料の場合のダイレタンシーパラメーターは液状化強度曲線を合わせるこ

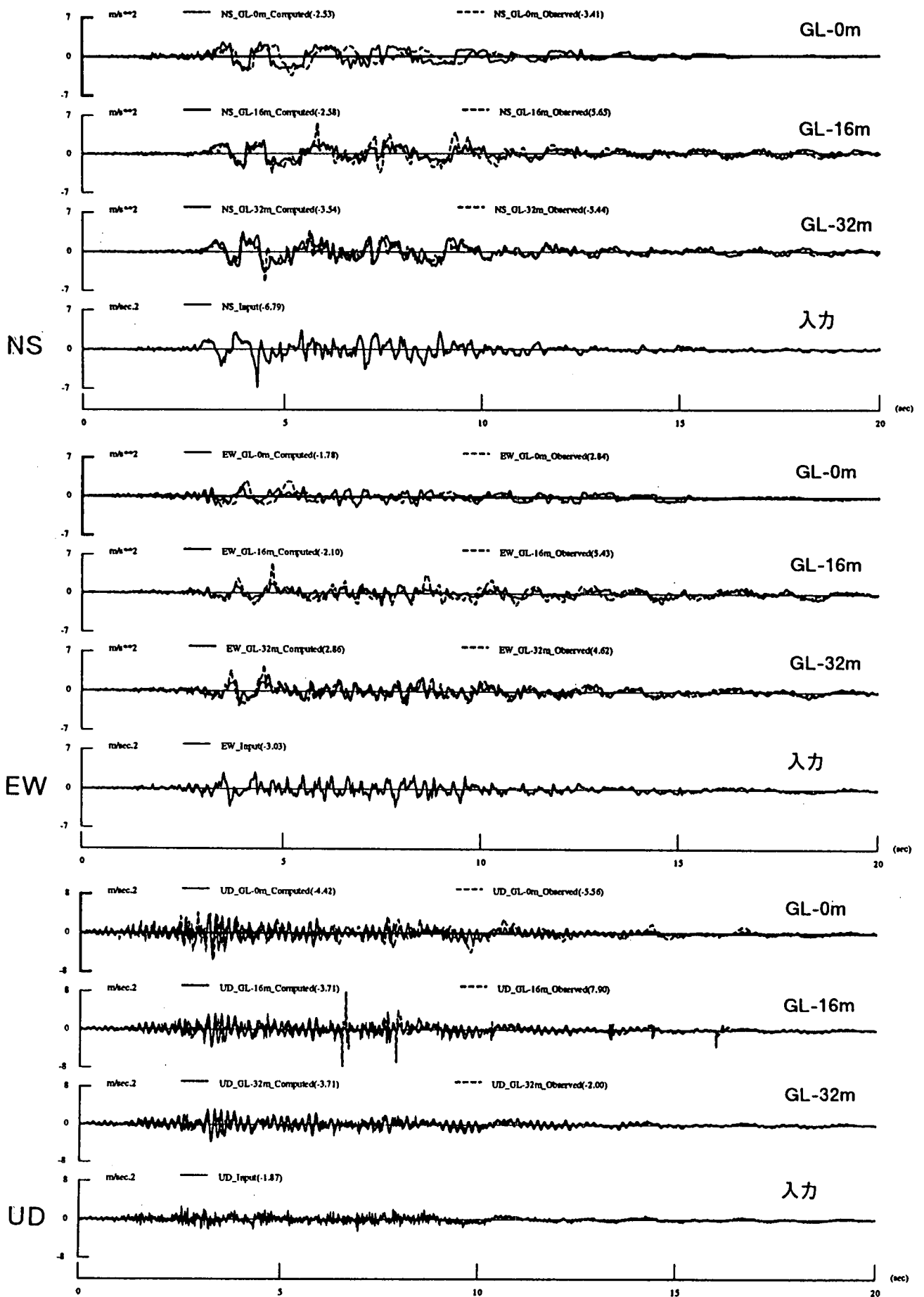


図-6 解析結果と実測結果の比較 (実線：解析； 点線：実測)

とによって設定した。図-5に試験で得られた液状化強度曲線と計算結果の比較を示す。なお、試験結果は文献5)に示されているものを用いた。

(2) 解析結果

図-6に加速度の解析結果と実測結果の比較を示す。水平方向加速度の比較を見ると、GL-32mでは、NS方向もEW方向も解析結果と実測結果が良く一致している。GL-16mにおいては、実測結果NS成分5.8秒前後とEW成分4.7秒前後のスパイクが再現されていないものの、全体として解析結果と実測結果は一致している。地表面については、解析結果が実測結果の傾向を概ね表現できているが、約5秒あたりから解析と実測結果は位相がずれている。

上下方向については、解析結果と実測結果は細部に差が認められるものの、傾向として両者が一致していることが分かる。実測結果も解析結果も地表での加速度が増幅されている。

解析で得られた過剰間隙水圧の時刻歴を図-7に示す。過剰間隙水圧は加速度振幅が大きくなってから上昇し始め、その後はほぼ同じレベルになっている。有効応力の結果より計算した各深さにおける地盤剛性の低減率はGL-4mでは98%であり、これより深い地盤においても50%前後となっている。この結果によると、GL-4m前後の地盤は液状化し、これ以深の地盤も過剰間隙水圧が大きく上昇していることが推測される。

4. まとめ

兵庫県南部地盤の際にポートアイランドで観測さ

れた加速度記録を用い、記録の分析と有効応力検証解析を実施し、次のような結果が得られた。

a)線形解析による各観測地点間の伝達関数と観測記録から求めた伝達関数を比較することによって、今回の地震によって地盤剛性が大きく低下したことが確認できた。地盤剛性の低減率はGL-0mとGL-16mの間で一番大きく、GL-32mとGL-83mの間の洪積層でも大きいことが分かった。

b)有効応力解析によってポートアイランドにおける観測地点の地盤応答を概ね再現できることが示された。

今回は、詳細な土質データが不足なため、物性パラメーターによっては経験式より定めたものもあった。今後、詳細な土質データを蓄えることによって、より信頼性のある検証解析が期待される。

【参考文献】

- 1)JSCE: Preliminary report on the Great Hanshin Earthquake,1995
- 2)鹿島建設：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書（第一報），1995年2月1日
- 3)石原研而，安田進，原田健二：土質特性と地盤の挙動，阪神・淡路大震災特集第4回，土木学会誌，Vol.80，pp50-53，1995年
- 4)Prevost,H. J. : A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.4, No.1, pp28-36, 1985
- 5)吉田望：1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析，土と基礎，Vol.43, No.9, pp49-54, 1995年

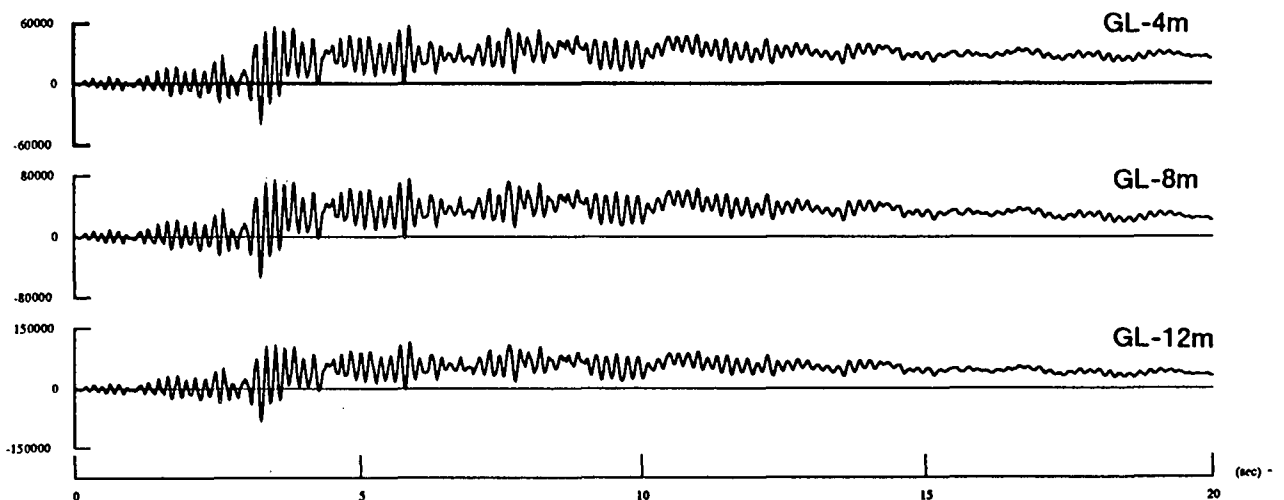


図-7 過剰間隙水圧の時刻歴

Analysis of ground earthquake response in Port Island

Jingzhe Zheng, Naoto Ohno

This paper investigates the ground response in Port Island during the Great Hanshin Earthquake through the analysis and simulation of observed acceleration records. The transfer functions between observing points are first computed using observed records, and compared with those before the earthquake to study the degree of soil stiffness reduction. And then the simulation of observed responses is performed using 3D nonlinear 2-phase FEM code DYNAFLOW. The analysis results demonstrate that the soil liquefaction occurs at the site, and that DYNAFLOW could simulate the actual ground response during large earthquake.