

I - B112

兵庫県南部地震のポートアイランドにおける地盤地震応答の全応力非線形解析によるシミュレーション

シーテック 技術コンサルタント部 正会員 ○ 鈴木 隆
 中部電力 電力技術研究所 正会員 上田 稔 熊崎機太郎
 コンピューターテクノロジーインテグレイタ 科学技術事業部 永坂英明

1 はじめに

地盤の地震時応答が、解析により十分な信頼度をもって把握できるためには、適切な解析モデル、物性値を用いる必要があり、この妥当性を実地震に対する応答シミュレーション解析を行って確認する必要がある。本研究は兵庫県南部地震におけるポートアイランドの液状化した地盤の地震応答シミュレーション解析を、全応力非線形解析により行ったものである。物性値について、現状で可能なデータの積み上げや検討を行った上で、せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性を精度よく再現可能な、著者らが提案する履歴モデル¹⁾を用いた解析を行い、どの程度まで実記録の再現が可能か検討したものである。

2 解析の概要

解析対象範囲と物性値を表-1に示す。地震計が設置されているG.L.-32m以上を対象領域とする。地震観測記録は水平成分はNSとEWの2方向の記録が得られているが²⁾、これを強軸成分(N32°E)と弱軸成分の2成分に変換した波形のうち強軸成分をシミュレーション解析の対象とした。G.L.-32mの位置で観測記録を与え地表面とG.L.-16mの応答を解析し、観測記録と比較した。解析で対象とするのは弱振の初動から主要動を含む20秒間である。

3 解析手法

せん断応力とせん断ひずみの関係に、提案する履歴モデル¹⁾を用いた全応力非線形解析で、逐次積分法により運動方程式を解いている。提案する履歴モデルは、繰り返し荷重が反転する瞬間の変形係数のひずみレベルに応じた変化を考慮することにより、ひずみレベルごとのせん断弾性係数と減衰定数の関係を満足させるもので、試験で得られたひずみ依存性を高精度に表現可能である。なお設定しなければならない物理パラメーターは、修正R-Oモデルと同じく3個だけである³⁾。

4 解析条件

(1) 地震観測記録から求めた地震波伝播速度とS波検層による波動伝播速度の比較

兵庫県南部地震以前の微小地震の観測記録³⁾から、地震計設置間の地震波伝播時間を算出した。時間差を変数とした2点間の地震観測記録の相互相関関数を算出し、最も相関の高い時間差を2点間の地震波伝播時間とした。用いた地震観測記録は、シミュレーション解析の対象とする強軸成分(N32°E)に近いNS方向水平成分の記録で、最大加速度は4~9gal程度で、震源距離は34~67kmである。対象とした地震観測記録は5記録であるが、相関の高い時間差が明確に算出できなかった1記録を除いて、得られた時間差は対象とした地震にかかわらずほぼ一定であった。得られた地震波伝播時間は表-1に示すとおりで、S波検層から得られた波動伝播速度(表-1の右端の欄)より一割程度小さい。これは、まさ土には最大粒径は150mm程度の大きな礫が含まれておりその影響⁴⁾⁵⁾やS波検層の測定精度の影響によるものと考えられる。

(2) 微小ひずみ速度構造の設定

解析対象領域のS波検層による速度構造を、表-1の右端の欄に示す³⁾。このS波検層による波動伝播速度を、上記の地震波とS波検層による波動の伝播時間の比で補正して、それぞれの層での微小ひずみでの地震波の平均伝播速度とした。解析では各メッシュのせん断波速度を、各メッシュ位置での平均有効拘束圧の1/4乗に比例し、かつ地震計設置位置間の平均速度が表-1の地震波の平均伝播速度となるように与えた。

(3) せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性

まさ土には大きな礫が含まれている。そこで既往の試験結果のうち、供試体寸法が大きくかつ試料の乱れが少ないと考えられる、凍結サンプリング試料を用いた港湾技研の試験結果^{6)~8)}を用いることとした。図-1に、それらのデータを引用した文献ごとに記号を変えて示す。比較的小さなひずみレベルからせん断弾性係数の低下が認められ、一般の砂礫に近い特性を示している。前田ら⁹⁾は正弦波や不規則波の液状化強度試験結果の履歴曲線から、ひずみが10%程度までのせん断弾性係数を求めている。これによれば、正弦波も不規則波も同様のせん断弾性係数のひずみ依存性を示すようである。大ひずみ領域に対する減衰定数は、文献(6)に示された液状化強度試験の履歴ループから算出した。沖積粘土は神戸市²⁾と塩見ら⁹⁾の、洪積砂礫は神戸市²⁾の試験結果にもとづき、ひずみ依存性を設定した。

まさ土のデータに対して、本研究で用いる履歴モデルによるせん断弾性係数と減衰定数の再現状況を図-1に示す。微小ひずみから大ひずみまでせん断弾性係数、減衰定数ともに試験結果をよく再現していることがわかる。図は略すが、沖積粘土、洪積砂礫の試験結果に対しては良好な再現状況である。既往の修正R-Oや修正H-Dモデルでは、このようにせん断弾性係数、減衰定数のひずみ依存性とともに良好に再現することは困難である¹⁰⁾。

(4) メッシュサイズと時間刻み

解析結果によれば、最大のせん断ひずみは1から2%程度である。その際のせん断弾性係数低下時に対しても、10Hzの波に対して10分割程度となる大きさとして、メッシュサイズは0.5m程度とした。また解析における時間刻みは0.001秒である。

キーワード：地震応答解析, 全応力解析, ポートアイランド, 履歴モデル, 兵庫県南部地震,
 〒459-8522 名古屋市区大高町字北関山20-1 中部電力(株)電力技術研究所構築G Tel 052-624-9184

5 解析結果

図-2(a)(b)に、地表面および G.L.-16m 地点の加速度時刻歴波形の観測値と解析値を比較して示す。図-3 は、同様に地表面の加速度フーリエスペクトルの観測値と解析値を比較したものである。地表面、G.L.-16mともに、弱振動から強振動として液状化状態まで加速度時刻歴波形の観測と解析は大体一致していることがわかる。加速度フーリエスペクトルも振動数にかかわらず実測値と解析値はよく一致している。

6 まとめ

対象としたまき土は、大粒径の礫の影響を受けた動的変形特性を示していると判断される。その微小ひずみから液状化状態の大ひずみまでのひずみ依存性を、著者らが提案する履歴モデルを用いて表現し、この履歴モデルにもとづく全応力非線形解析を行った。その結果、初動の弱振動から強振動そして液状化状態までの地盤応答の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルの良好なシミュレーションを行うことができた。

- 参考文献 1) 熊崎幾太郎：瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデル，第53回土木学会年次講演概要集第3部，pp.176-177,1998.
 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報告書，1995。 3) 関西地震観測協議会
 4) 上田稔ら：砂礫地盤の地震波伝播速度とP S検層による波動伝播速度の比較，第32回地盤工学研究発表会，pp.801-802,1997。
 5) 上田稔ら：砂礫や硬質岩盤で地震波と異なる伝播速度を与える波動の波長について，第32回地盤工学研究発表会，pp.803-804,1997。
 6) 運輸省港湾技術研究所：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料 No. 857，1997。
 7) 善功企ら：埋立地に用いたまき土の液状化特性，土と基礎，44-2,pp.60-63,1996。
 8) 前田健一ら：まき土凍結サンプリング試料の不規則波下における液状化特性，第33回地盤工学研究発表会，pp.95-96,1998。
 9) 塩見忠彦ら：兵庫県南部地震で液状化したポートアイランドの地震応答解析，建築学会大会講演概要集，pp.815-816,1996。
 10) 熊崎幾太郎ら：全応力履歴モデルによるポートアイランドのまき土地盤の非線形地震要素シミュレーション，第34回地盤工学研究発表会，1999。

表-1 解析対象範囲と地盤物性

| 地震計 | 地層区分 | 層厚 (m) | γ (t/m^3) | 波動伝播速度 | |
|---------------|-----------|--------|----------------------|---------------|----------------|
| | | | | ①地震波 Vs (m/s) | ②S波残留 Vs (m/s) |
| 地震計 GLm | GLm | 0 | 2.00 | 158 | 170 |
| | 埋立土 (まき土) | 5.0m | 2.17 | 195 | 210 |
| 地震計 GL-16m | | 11.0m | 2.20 | 216 | 220 |
| | | 2.0m | 1.80 | 155 | 180 |
| 地震計 GL-32m | 沖積粘土 | 10.0m | 1.80 | 211 | 245 |
| | 洪積砂礫 | 4.0m | 1.80 | 211 | 245 |

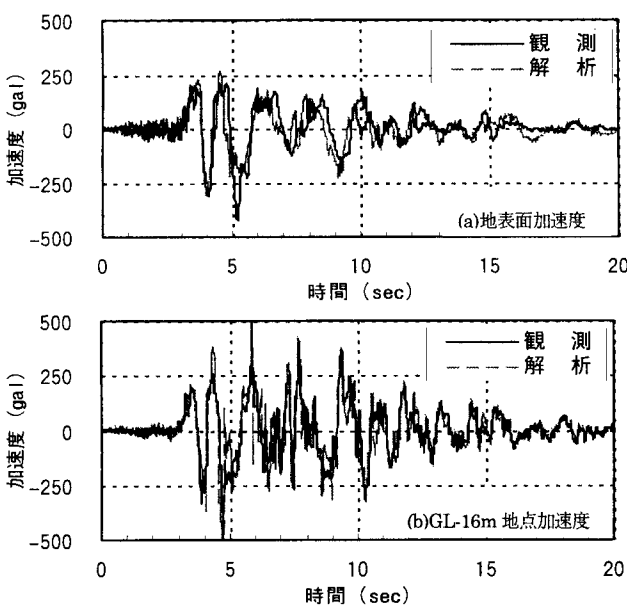


図-2 加速度時刻歴波形の観測と解析の比較

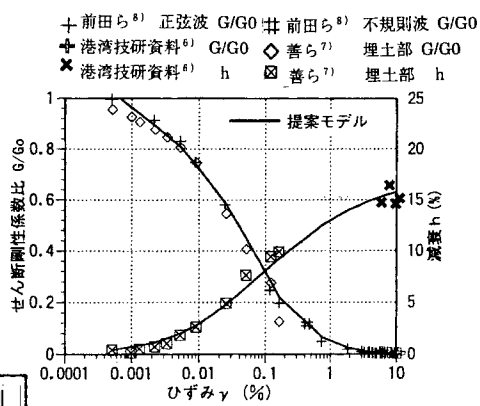


図-1 埋立てまき土のひずみ依存性に関するデータと提案モデルによる再現状況

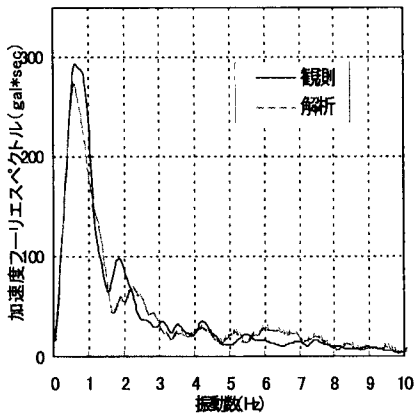


図-3 地表面加速度フーリエスペクトルの観測と解析の比較