

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

上田 稔¹・熊崎幾太郎¹・鈴木 隆²・永坂英明³

¹正会員 工博 中部電力(株)電力技術研究所 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1)

²正会員 (株)シーテック 技術コンサルタント部 (〒455-0054 名古屋市港区遠若町 3-7-1)

³(株)CTI 科学技術事業部 (〒455-0842 名古屋市港区稲永二丁目 1-80)

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かは、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係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を用いて解析した。その結果、弱振動の初動から主要動を含む加速度時刻歴波形と、フーリエスペクトルを良好にシミュレーションすることができた。

Key Words: seismic response analysis, ground surface, Port Island, hysteresis model, Hyougoken-Nanbu earthquake.

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。1995 年の兵庫県南部地震では、ポートアイランドで貴重な鉛直アレー観測記録が得られた。この観測記録のシミュレーション解析が、多くの研究者により行われている^{1)~6)}。これらの解析の多くは地震後まもなく実施されたもので、その時点で得られる範囲のデータに基づいたり、先に実施された解析にならってデータが設定されている報告も多い。また、既往の修正 R-O モデルや修正 H-D モデルで、さまざまな地盤材料のせん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性をともに広いひずみ範囲にわたって精度よく再現することは難しい。これに対し、著者らは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履歴モデル⁷⁾を提案している。

兵庫県南部地震後 4 年半あまりを経過した現在、これまでに得られた地震観測記録や土質試験などの実データを改めて検討して物性値を設定する。そして著者らが提案する履歴モデルを用いた地震応答解析により、実記録の再現がどの程度可能かを示し、その信頼性を実証することが本研究の目的である。

2. 解析の概要と手法

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⁸⁾、これを強軸成分 (N32° E) と弱軸成分の 2 成分に変換し、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。なお、解析で対象とするのは弱震の初動から強震動そして液状化状態までの主要動を含む 20 秒間である。

表-1 解析対象範囲と地盤物性

	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波検層 Vs (m/s)
地震計 GL-0m 埋立土 (使さず)	GLm	0	50m	200	158
			11.0m	217	195
			20m	220	210
地震計 GL-16m	-18	20m	220	216	220
地震計 GL-32m	沖積粘土	10.0m	1.60	155	180
	洪積砂礫	40m	1.80	211	245

解析は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⁷⁾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。修正 R-O モデルでは、減衰定数とせん断弾性係数比はひずみレベルにかかわらず直線関係があるとする。しかし、広いひずみ範囲にわたってこの関係は近似的にしか成り立たない。この点が修正 R-O モデルで、減衰定数とせん断弾性係数のひずみ依存性をともに精度よく再現できない理由である。これに対し提案する履歴モデルは、修正 R-O モデルと同じ形の骨格曲線と履歴曲線を用いるが、修正 R-O モデルでは繰り返し荷重が反転する瞬間の変形係数をひずみレベルにかかわらず微小ひずみのせん断弾性係数 G_{max} と一定値にしているのに対し、ひずみレベルに応じた値に置き換えたものである。これ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。ひずみ依存性の再現状況のわずかな差異が、全応力非線形解析では解析結果に大きな差異をもたらす。なお提案する履歴モデルで設定しなければならない物理パラメータは、修正 R-O モデルと同じく 3 個だけである⁷⁾。

3. 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⁹⁾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 34~67 km 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関らずほぼ一定であった。このことから対象とした地震波はいずれも、サイトではほぼ鉛直上方に伝播していると考えられる。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。

このように、地震波と S 波検層による波動伝播速度に差異が認められるのは、S 波検層の測定精度とまさ土に大きな礫が含まれているためと考えられる。砂礫や割れ目を有する硬質岩盤では、その不均一性により地震波伝播速度に比べて、S 波検層による波動伝播速度は速い^{10),11)}。

これらと同じで、まさ土にも大きな礫が含まれておりその影響があらわれたためと考えられる。ポートアイランドまさ土の最大粒径は、ボーリング試料の粒度分布曲線からは 40mm 程度である。しかし、掘削により採取された試料の最大粒径は 150mm 程度とかなり大きい⁹⁾。また大型 (直径 30cm) の凍結サンプリング試料の写真¹²⁾からも、かなり大きな礫の存在が確認される。

(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⁹⁾を、表-1 の右端の欄に示す。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 (直径 30cm, 高さ 60cm) 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^{12)~14)}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。善らの試験¹³⁾では、拘束圧は 0.9kgf/cm²と 1.8 kgf/cm²の場合で、ひずみが 0.2%程度までのデータが得られている。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、拘束圧が大きい場合の方が、弾性係数が低下しにくく、減衰定数が小さい結果が得られ、一般の砂礫に近い特性を示している。拘束圧が 0.9kgf/cm²と 1.8kgf/cm²の平均の大きさの範囲までを 0.9kgf/cm²、それ以深の範囲を 1.8kgf/cm²の拘束圧の試験結果で与えた。前田ら¹⁴⁾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している。大ひずみ領域の減衰定数については、文献 (12) に示された液状化強度試験の履歴ループから算出した。図-1~3 に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を示す。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。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をともに良好に再現することは困難である¹⁵⁾。なお、まさ土のひずみ依存性に関する試験結果は、港湾技研の

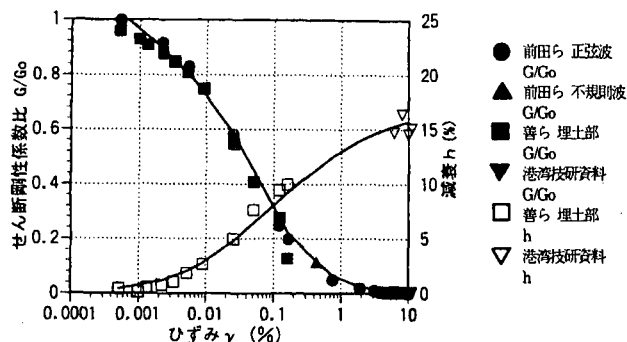


図-1 埋立てまき土のひずみ依存性に関するデータと
提案モデルによる再現状況

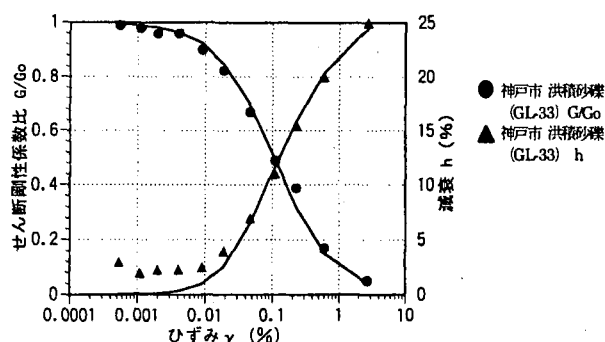


図-3 洪積砂礫のひずみ依存性に関するデータと
提案モデルによる再現状況

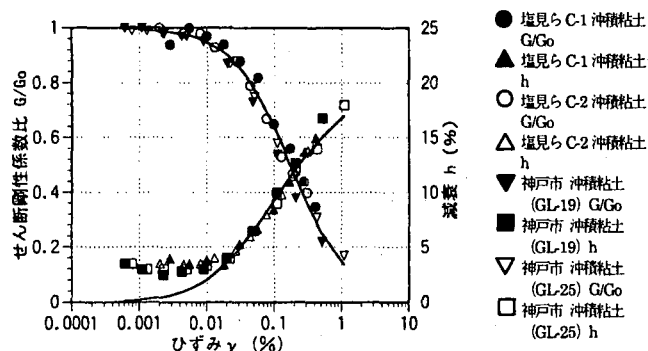


図-2 沖積粘土のひずみ依存性に関するデータと
提案モデルによる再現状況

他に吉田¹⁾、塩見ら⁵⁾により得られている。港湾技研の試験結果が、比較的小さいひずみからせん断弾性係数の低下が認められる。これは港湾技研の試験が最も供試体が大きく、大粒径の礫が含まれた試料となっているためと考えられる。

沖積粘性土のひずみ依存性は、塩見ら⁵⁾と神戸市⁸⁾の試験結果を用いた。洪積砂礫のひずみ依存性は、神戸市⁸⁾の試験結果を用いた。沖積粘性土と洪積砂礫の微小ひずみの減衰定数は、ひずみが小さくなるにつれ、零%に漸近するように設定した(図-2, 3)。

(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。解析における時間刻みは0.001秒である。

4. 解析結果

図-4(a)(b)に、地表面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-4(a)は全体のもので、図-4(b)は、主要動前の弱振動の範囲を拡大したものである。弱振動から強振動そして液状化状態まで観測と解析

はよく一致していることがわかる。図-5は、地表面の加速度フーリエスペクトルの観測値と解析値の比較である。同様にG.L. -16mの観測値と解析値を比較したのが、図-6と図-7である。地表面、G.L. -16mともに、弱振動から強振動そ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。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。ただし、1次の山より高振動数側の2Hz付近に観測では山が見られるが、解析では現れていない。この点については今後の課題である。

5. まとめ

兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地盤応答のシミュレーション解析を、著者らが提案する履歴モデルに基づく全応力非線形解析により行い、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。対象とした埋立てまき土は、大粒径の礫の影響を受けた動的特性を示していると判断され、ひずみ依存性は凍結サンプリングによる大型供試体の試験結果を用いて、微小ひずみの速度構造は兵庫県南部地震以前の微小地震の観測記録に基づき設定して良好な結果を得た。今後、別のいくつかの地盤を対象に地震応答のシミュレーション解析を試み、本解析手法の有効性を検証していきたい。

謝辞：本研究に際して、運輸省港湾技術研究所山崎浩之氏、名古屋工業大学前田健一氏には、貴重なご意見、ご助言をいただきました。ここに記し謝意を表します。

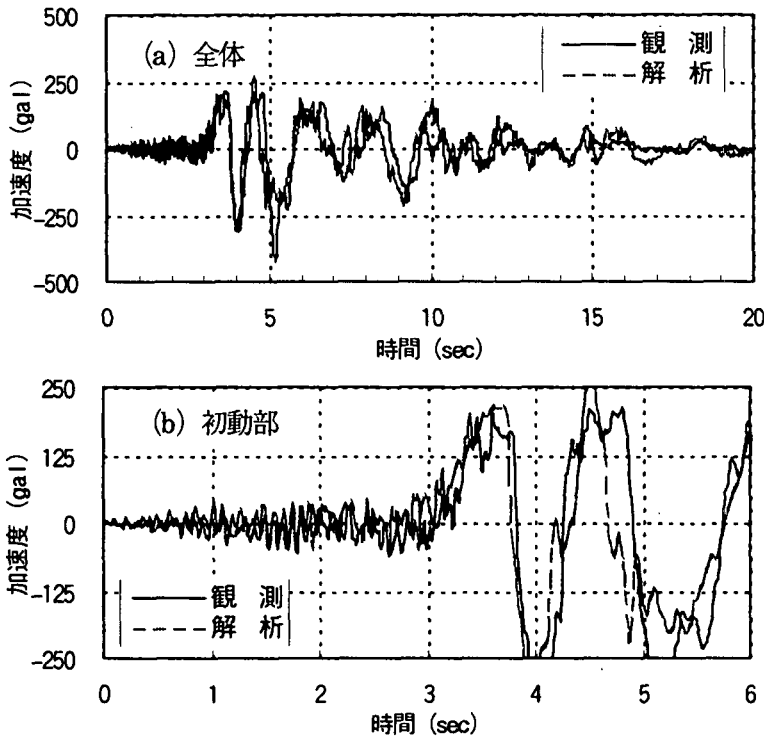


図-4 地表面の加速度時刻歴波形の観測と解析の比較

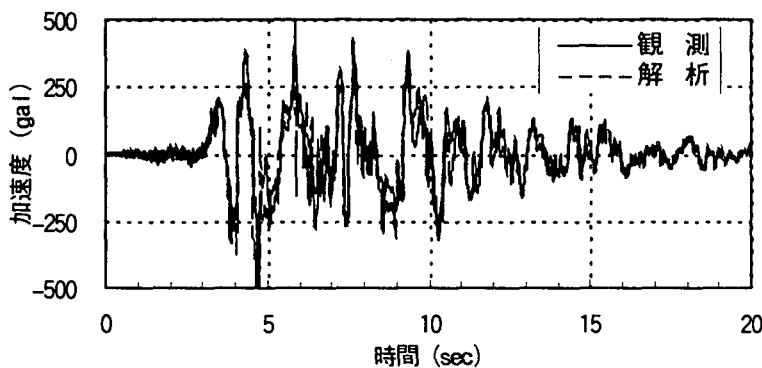


図-5 GL-16mの加速度時刻歴波形の観測と解析の比較

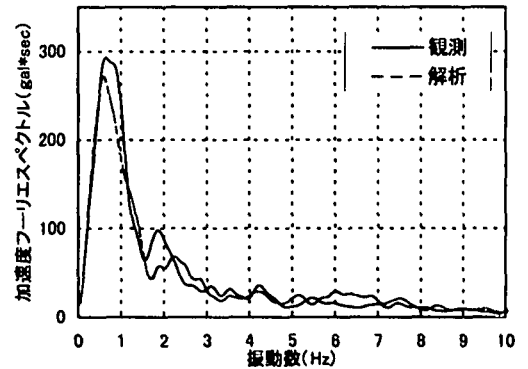


図-6 地表面の加速度フーリエスペクトルの観測と解析の比較

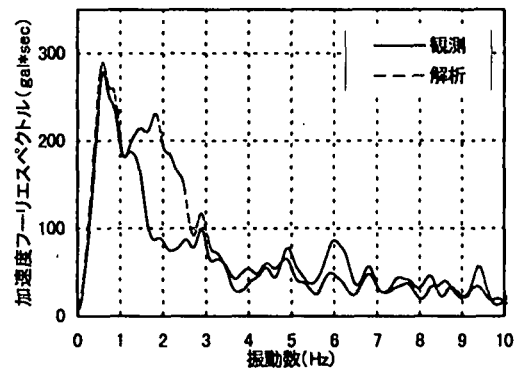


図-7 GL-16mの加速度フーリエスペクトルの観測と解析の比較

参考文献

- 1) 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，43-10(453)，報文-2399，pp.49-54，1995。
- 2) 川瀬博，佐藤智美，福武毅芳，入倉孝次郎：兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録とそのシミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No.475，pp.83-92，1995。
- 3) 福武毅芳：ポートアイランドにおける地盤の液状化と基礎の挙動解析，日本建築学会関東支部構造部会シンポジウム，No.5，pp.44-51，1995。
- 4) 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，Miskoら，仙頭ら，鄭ら，岡らの発表論文，1996。
- 5) 塩見忠彦，畑中宗哉，内田明彦，吉沢啓博：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，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp.815-816，1996。
- 6) 宮本裕司，酒向裕司，古山耕司，三浦賢治：1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文集，No.493，pp.23-30，1997。
- 7) 熊崎幾太郎，杉山武，上田稔，長谷川英明：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。
- 8) 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。
- 9) 関西地震観測協議会
- 10) 上田稔，佐藤正俊，長谷部宣男：砂礫地盤の地震波伝播速度とP-S換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。
- 11) 上田稔，佐藤正俊，長谷部宣男：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。
- 12) 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。
- 13) 善功企，山崎浩之：埋立地に用いたまさ土の液状化特性，土と基礎，44-2，pp.60-63，1996。
- 14) 前田健一，山崎浩之，小池二三勝，高橋邦夫：まさ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。
- 15) 熊崎幾太郎，上田稔：全応力履歴モデルによるポートアイランドのまさ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。