

粘土の載荷速度依存性に着目したポートアイランド鉛直アレー観測記録のシミュレーション

山本陽一¹・兵動正幸²・黒島一郎³・谷垣正治⁴

¹正会員 工修 三井建設株式会社 技術研究所 (〒270-01 千葉県流山市駒木518-1)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

³フェロー会員 三井建設株式会社 土木技術部 (〒261 千葉県千葉市美浜区中瀬1-9-1)

⁴工博 三井建設株式会社 技術研究所 (〒270-01 千葉県流山市駒木518-1)

本文では、異なる周波数での粘土の繰返し三軸試験結果に基づく有効応力解析を、兵庫県南部地震(1995)の際に激しい液状化現象が見られたポートアイランド鉛直アレー観測記録に対して行い、粘土の載荷速度依存性に伴う非線形性が強震動時の地盤応答に与える影響を検討した。

Key Words : clay, cyclic strength line, frequency, ground response, Hyogoken-Nanbu earthquake, liquefaction analysis

1. まえがき

兵庫県南部地震(1995)の際にポートアイランドで得られた鉛直アレー観測記録¹⁾については、地震後既にいくつかの有効応力解析プログラムによるシミュレーション^{2),3),4)}が行われているが、いずれの解析結果も沖積粘土層の非線形性が、埋立土層の地盤応答に大きく影響している。これらの解析は砂質土である埋土層の液状化に着目したものであり、粘土のモデル化は砂質土ほど適切に行われていないように思われる。粘性土は顕著な載荷速度依存性を示すことが知られており、これが地盤応答にどのような影響を与えているかを明らかにすることが、埋立土層の液状化を考える上でも重要であると考え。そこで、本研究では周波数を変化させた粘土の繰返し三軸試験結果⁵⁾に基づいて粘土層のモデル化を行い、上記アレー観測記録の有効応力解析を行った。

2. 解析概要

(1) 有効応力モデルの概要

解析に用いた有効応力モデル⁶⁾は、応力経路モデルと有効応力比・ひずみ関係に基づくモデルから構成されている。モデルの特徴として、砂質土のサイクリックモビリティを表現できること、砂質土のみならず粘性土にも対応可能なことが挙げられる。その他、応力経路モデルについては、次式に示す繰返し強度曲線の回帰式を直接用いたモデル化を行っ

ていることから、解析結果は強度曲線の回帰の精度に依存している。

$$R_f(\tau_{cyc}/\sigma'_e)_f = (C_1 + C_2 \varepsilon_{s4})/N + R_{min} \quad (1)$$

ここで、 R_{min} は $N = \infty$ における液状化強度であり、ひずみ振幅の大きさによらない。 C_1 、 C_2 は回帰に伴う定数であり、 ε_{s4} ($=DA/2$) は繰返し三軸試験における片振幅軸ひずみである。

(2) 解析方法および解析条件

ポートアイランドの鉛直アレー観測では、GL-83mの記録に方向誤差があること⁴⁾、GL-32m以浅の沖積砂層と埋立土層での液状化の可能性が指摘されていることから⁷⁾、本解析ではGL-32m以浅の地盤を解析の対象としている。

実施した解析は、水平成層地盤を仮定した一次元有効応力解析であり、地盤は直列のせん断多質点系でモデル化している。排水条件は非排水とし、地盤の透水性は考慮していない。解析方向は観測記録波形振幅の大きいNS方向とし、GL-32mでの観測波を入力動とした。

本解析では、粘土の載荷速度効果の違いが地盤応答に与える影響について検討するので、沖積粘土層の有効応力モデルに関する解析パラメータを変化させた以下の3ケースに対して解析を行った。

Case1 : $f=1.0\text{Hz}$ での粘土の試験結果に基づく解析

Case2 : $f=0.1\text{Hz}$ //

Case3 : $f=0.01\text{Hz}$ //

表-1 解析パラメータ

土 層	深 度 GL (m)	密度 t/m ³	初期剛性 G_{max} (MPa)	破壊応力比 $\sin \phi'_f$	変形応力比 $\sin \phi'_{PT}$	水圧パラメータ		h_{max}	強度曲線に関する定数			K_{0l}	ν
						B	a		C_1	C_2	R_{min}		
埋立土	0 ~ -2.4	1.9	$300 \sigma'_{m0}{}^{0.5}$	0.574	—	—	—	—	—	—	—	0.5	0.35
埋立土	-2.4 ~ -19.0	1.9	$300 \sigma'_{m0}{}^{0.5}$	0.574	0.400	0.30	40	0.20	0.309	0.146	0.150	0.5	0.35
沖積粘土 Case1 Case2 Case3	-19.0 ~ -27.0	1.6	$138 \sigma'_{m0}{}^{0.5}$	0.352	0.309	0.7	40	0.20	0	0.430	0.285	0.5	0.40
				0.522	0.433				0	0.0953	0.275		
				0.692	0.543				0.0145	0.0966	0.250		
沖積砂	-27.0 ~ -32.0	1.9	$277 \sigma'_{m0}{}^{0.5}$	0.729	0.620	1.02	40	0.30	0.300	0.200	0.220	0.5	0.35

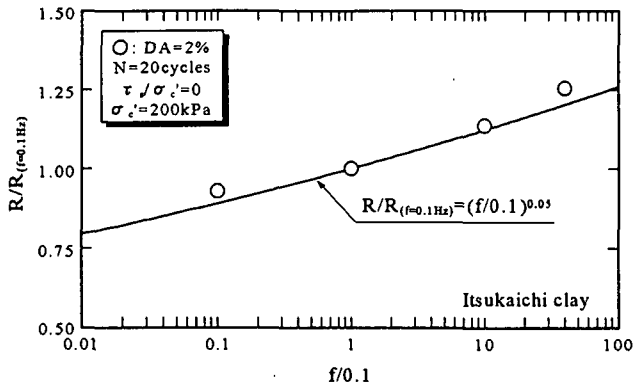


図-1 粘土の繰返しせん断強度に及ぼす載荷周波数の影響

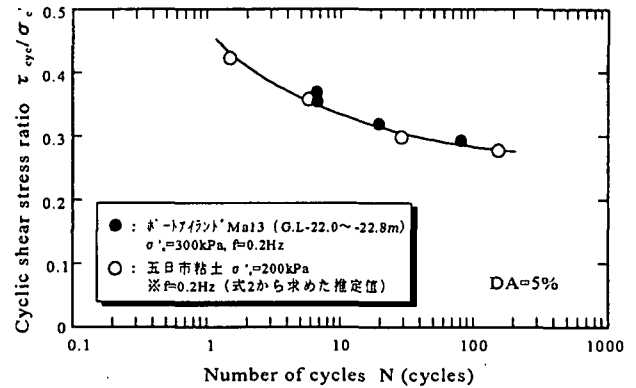


図-2 補正した五日市粘土の強度曲線とMa13の比較

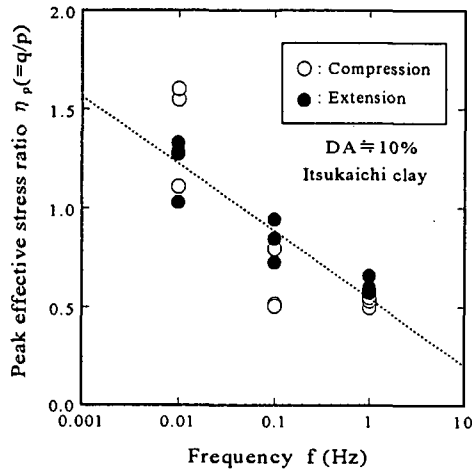


図-3 有効応力比と周波数の関係 (DA=10%)

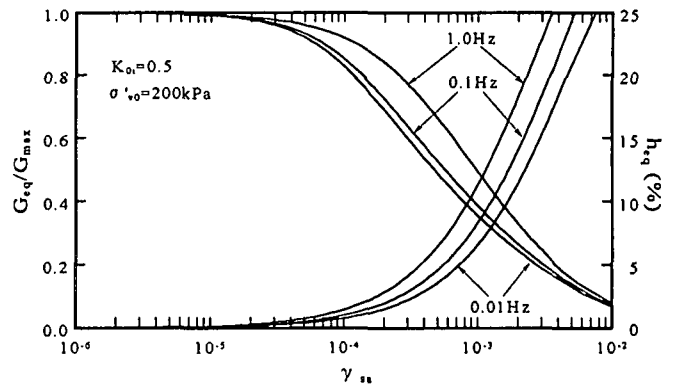


図-4 モデル化した粘土の繰返し変形特性

3. 地盤のモデル化

表-1 に本解析に用いた解析パラメータを示した。地下水位は GL-2.4m に設定し、初期剛性 G_{max} は、PS 検層結果を基に拘束圧依存性を考慮する形で設定した。その他、埋立土層および沖積砂層に関する解析パラメータは、 N 値や一般的な値を参考に設定しているが、この内、埋立土層の強度曲線に関する定数 (C_1 , C_2 , R_{min}) は、地震後に観測地点で採取された不攪乱試料に対する繰返し三軸試験結果⁹⁾から求めた。

本解析で問題とする沖積粘土層(Ma13)の有効応力モデルに関するパラメータは、この層の粘土 (文献 8)によれば、ほぼ正規圧密の状態にあり、塑性指数

は概ね 60 以上であることが示されている)と同程度の塑性指数を有する五日市粘土($I_p=72.8$)に対して、種々の周波数で実施した繰返し三軸試験結果⁹⁾に基づいて設定している。

図-1 は、 $DA=2\%$ 、 $N=20$ 回における繰返しせん断強度 R と周波数 f の関係を、それぞれ 0.1Hz の場合で正規化したものである。図から、繰返し強度が、顕著な載荷速度依存性を示していることが分かる。また、同図から繰返し強度に及ぼす載荷速度の影響として、両者の間に、図中実線示す次式のような関係がほぼ成り立つようである。

$$R/R(f=0.1\text{Hz}) = (f/0.1)^{0.05} \quad (2)$$

ポートアイランドアレー観測地点では、沖積粘土層についても、地震後に採取された不攪乱試料に対して、0.2Hz の条件で繰返し三軸試験が実施されている¹⁾。そこで、同試料 $DA=5\%$ の繰返し強度曲線と五日市粘土 0.1Hz の繰返し強度曲線を上式より 0.2Hz の場合に補正を行って比較したのが図-2 である。両者の強度曲線は極めて良い一致を示しており、五日市粘土の試験結果に基づくモデル化がポートアイランドにおける沖積粘土のモデル化として妥当なものであることを示唆している。

室内繰返し試験結果における粘土の載荷速度依存性は、強度のみならず過剰間隙水圧の発生量にも認められる。図-3 は、 $DA=10\%$ における繰返し応力サイクルピーク時の有効応力比 q/p と周波数の関係を示したものである。データに若干のばらつきはあるものの、周波数の大きなものほど有効応力比が低下する傾向にある。言い換えれば、過剰間隙水圧の発生量が減少する。したがって、粘土層の解析パラメータは、強度定数に関するものと応力比に関するものについて、それぞれの周波数での試験結果を用いている。

図-4 には、設定した解析パラメータによる沖積粘土の繰返し変形特性試験のシミュレーション結果として、 $G_{eq}/G_{max} \sim \gamma_{sa}$ 、 $h_{eq} \sim \gamma_{sa}$ 関係を示した。

4. 解析結果および考察

(1) 最大応答値

図-5 には、地盤の最大応答値の分布を示した。最大加速度分布は、いずれの解析ケースについても、沖積粘土層から始まる応答値の低下傾向が、上層の埋立土層 GL-13m 付近まで見られる。この応答値の低下傾向に解析ケースによる大きな違いはないが、わずかながら、周波数の小さい試験結果を用いたケースの方が低下の程度は大きい。

沖積粘土層においては、Case2、Case3 の最大ひずみが 2% 程度であるのに対して、Case1 では 1% に満たない。前者の最大過剰間隙水圧比は有効上載圧の 8 割を生じて破壊状態にあるが、後者は 1 割程度の上昇に止まっており、破壊過程にないことが分かる。

沖積砂層の過剰間隙水圧比は、Case1 で 5 割程度生じているのに対して、Case2、Case3 では 1 割に達しておらず、この影響がこの層の最大加速度分布の低下と増加という形で生じている。これは、上層にある沖積粘土層の応答の影響によることが明らかである。最大応答値に関しては、全体を通して Case2 と Case3 で解析パラメータの違いによる影響はさほどないようだ。

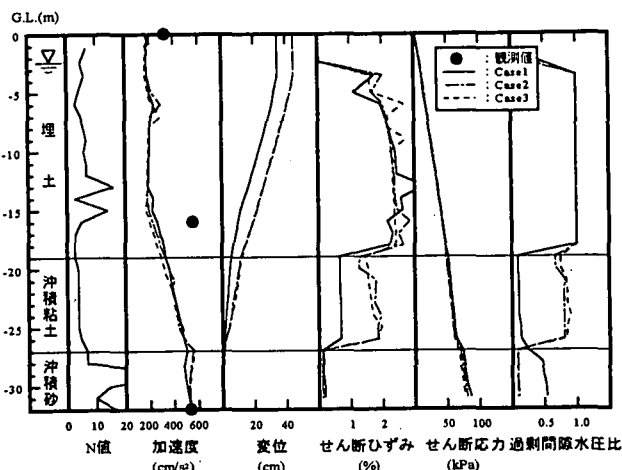


図-5 最大応答値

(2) 加速度波形と応答スペクトル

図-6 には、地表面、GL-16m、GL-20m における疑似速度応答スペクトル (減衰 5%) を示した。地震計設置位置の地表面と GL-16m については、観測記録についても示している。この内、解析ケースの違いによる影響が顕著に現れているのが、GL-16m と GL-20m での結果であり、低周波数の試験結果を用いたケースほど、3 秒以下の短周期成分を過小評価し、長周期側を過大評価する傾向にある。GL-16m で、スペクトルの形状を見た場合、Case1 の結果は観測値と良い対応にある。地表面の解析結果に、解析ケースによる違いは認められず、いずれも、観測値に比較して 4 秒以下の短周期成分を過小評価している。

図-7 には加速度時刻歴を示した。GL-20m の沖積粘土層については、Case1 と Case3 の解析結果の比較を示しているが、Case3 の結果は Case1 に比べて応答値を小さく、さらに長周期側になる形で徐々に位相がずれている。地表面と GL-16m については、観測値と Case1 の解析結果との比較を示したが、解析結果は観測波形の特徴を良好に表現している。特に GL-16m の解析結果と観測波形の位相はよく一致している。図には示していないが、GL-16m の他の解析結果は先の応答スペクトルの特徴に現れていたように、Case2、Case3 と低周波数の試験結果を用いたものほど、観測波形に比べて応答値を小さく、位相も長周期になる形でずれていた。地表面の波形については、解析ケースの違いによる影響は認められなかった。

これらのことから、本解析条件では、沖積粘土層の応答性状が、その下の沖積砂層と直上 GL-10m 付近までの埋立土層の応答に影響を与えていることが明らかである。地表面付近の応答は、埋立土の液状

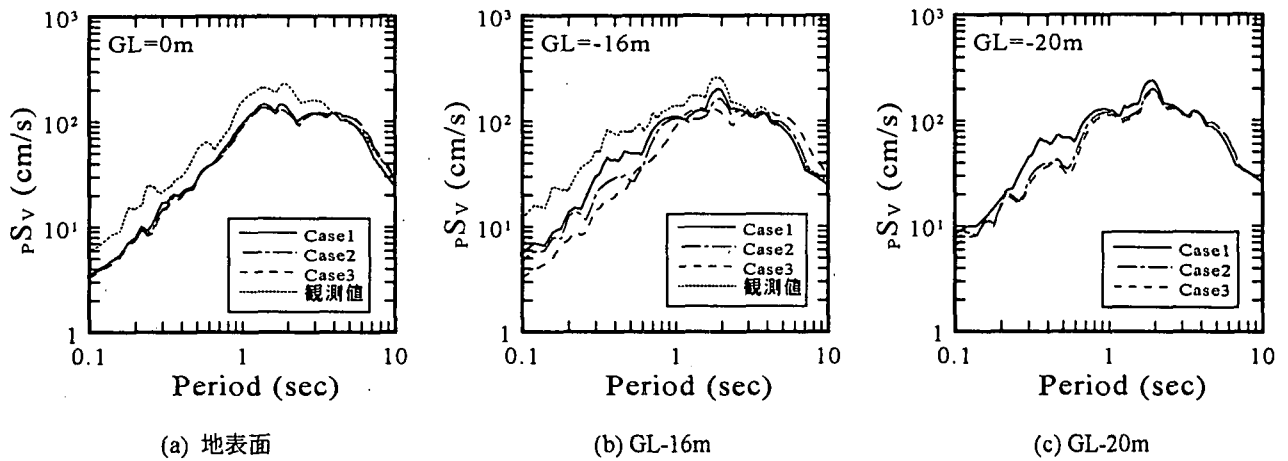


図-6 擬似速度応答スペクトルの比較

化, サイクリックモビリティ挙動に支配されていると考えられる. また, 地震時の状態に近いと思われる周波数 1.0Hz の粘土の試験結果を用いた Case1 の解析結果が, 観測値の応答性状に最も適合していることから, 応答解析において, 粘土の載荷速度依存性に伴う非線形性を考慮することの重要性が明らかになったものとする.

5. まとめ

本解析では, 粘土の載荷速度依存性が地震時の地盤応答に与える影響を検討する目的で, 異なる周波数の粘土の試験結果を用いた有効応力解析をポートアイランド鉛直アレー観測記録に対して行った. その結果, 沖積粘土層(Ma13)の応答性状が近傍の埋立土層と沖積砂層の応答に大きな影響を与えていること, 粘土の載荷速度依存性を適切に考慮することの重要性が明らかとなった.

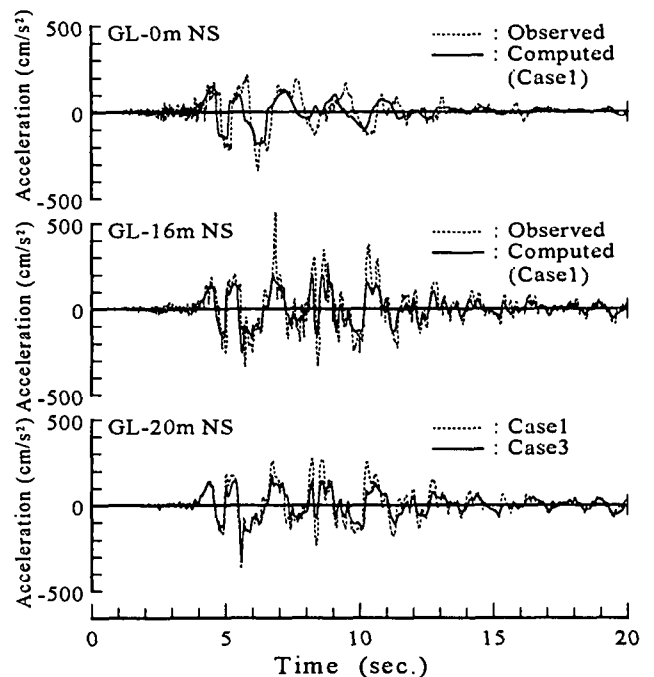


図-7 加速度波形の比較

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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. 10, pp. 49-54, 1995.
- 3) 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, 第 475 号, pp. 83-92, 1995.
- 4) Sugito, M., Sekiguchi, K., Yashima, A., Oka, F., Taguchi, Y. and Kato, Y. : Correction of Orientation Error of Borehole Strong Motion Array Records Obtained during the South Hyogo Earthquake of JAN. 17, 1995, *Proc. of JSCE*, No. 531/I-34, pp. 51-63, 1996.
- 5) 山本陽一, 兵動正幸：初期せん断を受ける正規圧密粘土の繰返しせん断強度に及ぼす周波数の影響, 第 32 回地盤工学研究発表会, 1997.
- 6) 山本陽一, 兵動正幸, 黒島一郎, 谷垣正治：砂および粘土の繰返しせん断強度に基づく有効応力モデルとその液状化解析への適用, 土木学会論文集, No. 561/III-38, pp. 295-308, 1997.
- 7) 地盤工学会阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(解説編), 1996.
- 8) 地盤工学会関西支部：海底地盤一大阪湾を例として, 1995.