

非線形解析による過剰間隙水圧が上昇した地盤の地震時挙動の検討

池田 隆明¹・三輪 滋¹・西川 純一²・林 宏親²・江川 拓也²

¹正会員 飛島建設株式会社 技術研究所 地盤耐震研究室 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

²正会員 北海道開発局 開発土木研究所 土質基礎研究室 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸一条三丁目)

液状化アレー観測において、過剰間隙水圧が有効拘束圧の0.75程度まで上昇した際の地盤の加速度と過剰間隙水圧の時刻歴記録が得られた。この観測記録を用いた地盤の有効応力解析と全応力解析から、過剰間隙水圧が上昇した地盤の地震時挙動を検討した。その結果、有効応力解析から得られた過剰間隙水圧の最大値は有効拘束圧の0.4程度、液状化層全体の平均的な上昇量は最大でも0.25程度であったが、地表の加速度時刻歴や伝達関数は観測記録を概ね評価できた。観測記録に見られた過剰間隙水圧の大きな上昇は部分的と考えられる。また、過剰間隙水圧の上昇を考慮しない全応力解析でも有効応力解析と同程度の結果が得られた。過剰間隙水圧の上昇量が有効拘束圧の0.25程度であれば、過剰間隙水圧の上昇が地盤の地震時挙動におよぼす影響は小さいと考えられる。

Key Words : liquefaction, non-linear, effective stress analysis, seismic behavior, excess pore water pressure

1. はじめに

表層地盤の地震時挙動を検討する場合、地盤に生じる非線形を考慮することは重要である。特に地盤内に緩い飽和砂層が含まれる場合、ひずみに依存する非線形に加え、過剰間隙水圧の上昇による有効応力の低下による拘束圧に依存する非線形を考慮する必要がある¹⁾。

1993年1月15日の釧路沖地震において、北海道ウトナイ湖南側で実施している液状化アレー観測²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾で過剰間隙水圧が有効拘束圧の0.75程度まで上昇した地盤の加速度と過剰間隙水圧の記録が得られた。そこで、この記録を用い、有効応力非線形解析(以後、有効応力解析と称す)と全応力非線形解析(以後、全応力解析と称す)から、過剰間隙水圧が上昇した地盤の地震時挙動を検討した。

2. 観測記録の概要

図-1に観測地点の土質柱状図と計器の配置図を示す。加速度計はG.L.-2m, G.L.-17m, G.L.-35mの3深度に、過剰間隙水圧計はG.L.-9.0m~G.L.-15.7mの砂層内の2深度(G.L.-10.5mとG.L.-14.5m)に設置されている。

図-2にG.L.-2mとG.L.-35mでの加速度(N42E方向)とG.L.-10.5mとG.L.-14.5mでの過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧/有効拘束圧)の時刻歴を示す。G.L.-10.5mでの過剰間隙水圧比の上昇量は、振動成分を除くと0.75程度と

完全液状化には達していないものの大きな値が得られている。一方、G.L.-14.5mでの上昇量は0.12程度とG.L.-10.5mでの記録に比べて小さい。

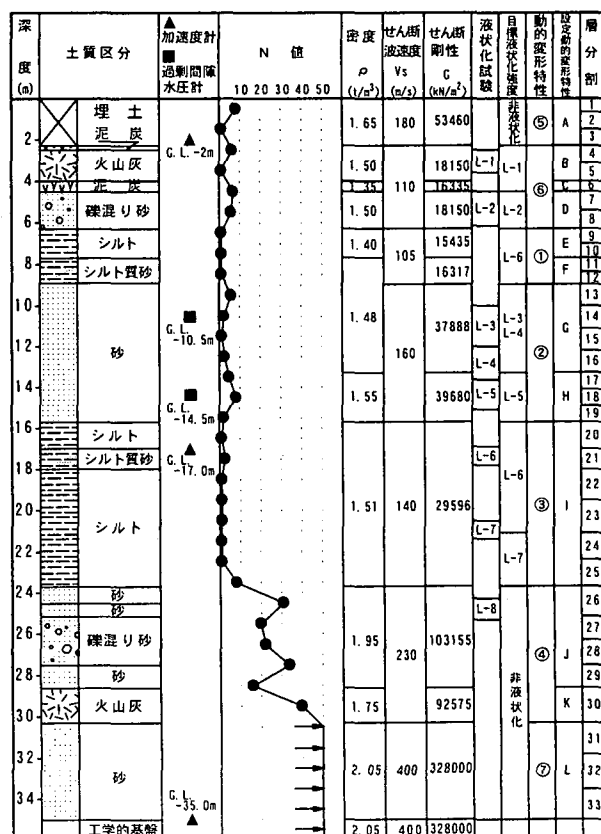


図-1 検討対象地点の土質柱状図と地盤物性

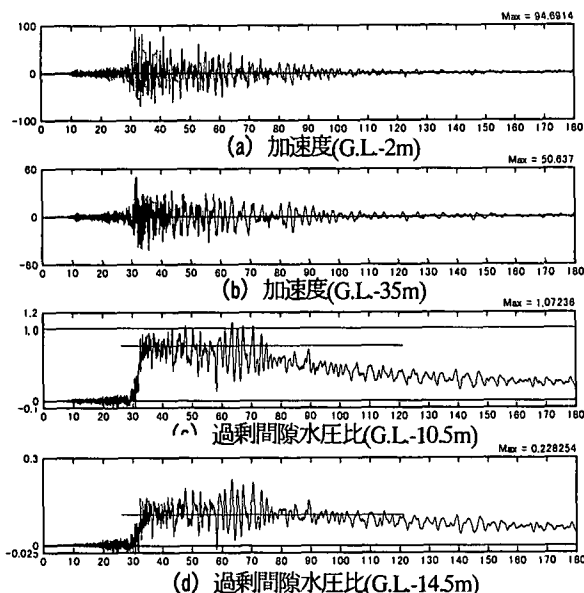


図-2 1993年1月15日鉏路沖地震での観測記録

3. 解析条件

3.1 解析方法

前章で示した記録を用いて地震応答解析を実施した。使用した解析コードはFLIP⁶⁾とYUSAYUSA⁷⁾であり、いずれも有効応力解析と全応力解析が可能である。FLIPは二次元有限要素プログラム、YUSAYUSAは水平成層を対象としたせん断ばね～集中質点系の一次元解析プログラムである。双方ともせん断応力～せん断ひずみの非線形関係には双曲線モデル、履歴関係にはMasing則を適用しているが、FLIPでは履歴ループの大きさを任意に調整可能なようにMasing則を修正している。

3.2 解析モデルと解析パラメータ

地盤構造に水平方向の方向性がないこと、近接する道路盛土の影響がないこと⁸⁾から、水平成層を仮定した一次元解析とし、有効応力解析では非排水条件とした。入力地震動はG.L.-35mでの観測記録をN42Eに変換した波形とし(図-2(b))、工学的基盤に入射波(E+F)を入力する。

図-1に地盤物性を示す。地盤物性は現地での地盤調査結果や採取した試料を用いた室内試験結果に基づいて詳細に設定した。解析に必要なパラメータは、せん断応力～せん断ひずみの非線形特性を規定する動的変形特性と過剰間隙水圧の上昇を規定する液状化特性に大別される。

(1) 動的変形特性

図-3(a)に示す現地で採取した試料を用いた動的変形

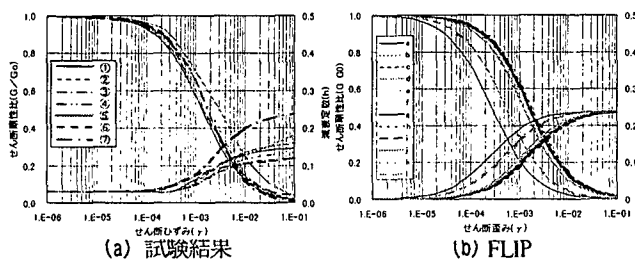


図-3 検討対象地点の動的変形特性

特性試験結果やCD試験結果、および既往の試験結果⁹⁾から双曲線モデルの最大せん断強度(τ_{max})と履歴ループの大きさ(h_{max} : FLIPのみ設定)を設定する。

過剰間隙水圧を考慮する層では、CD試験から得られる内部摩擦角に基づいて τ_{max} を設定する。考慮しない層については、 τ_{max} をせん断応力～せん断ひずみの非線形特性を表すパラメータととらえ、双曲線モデルで表される動的変形特性が室内試験から得られた動的変形特性と一致するように設定する。 h_{max} はFLIPにおいて最大減衰定数を規定するパラメータであり、既往の研究結果⁹⁾に基づき $h_{max}=0.24$ と設定する。そのため、YUSAYUSAの方がFLIPに比べ減衰定数を2.6倍程度大きめに設定している。図-3(b), (c)にFLIPおよびYUSAYUSAで設定した動的変形特性を示す。

(2) 液状化特性

地下水位下のG.L.-2.3m～G.L.-23.7mを過剰間隙水圧の上昇を考慮する層とし、各層からトリプルチューブサンプリングにより採取した試料に対して、三軸試験により実施した液状化試験結果に基づき、それぞれの層の液状化強度曲線を設定する。この液状化強度曲線とFLIPおよびYUSAYUSAによる液状化試験のシミュレーション解析から得られた液状化強度曲線が一致するようにパラメータを設定する。

図-4に過剰間隙水圧の記録が得られたG.L.-9.0m～13.3mおよびG.L.-13.3m～G.L.-15.7mでの液状化強度曲線の対応を示す。FLIP、YUSAYUSAともに液状化強度曲線は、三軸試験から得られたものと概ね一致している。

4. 解析結果

4.1 最大値の深度分布

図-5に加速度、相対変位、せん断応力、せん断ひずみ、過剰間隙水圧の最大応答値の深度分布を観測記録と解析結果を比較して示す。

過剰間隙水圧については、FLIP、YUSAYUSAともにG.L.-15.7m～G.L.-21.0mのシルト層が最も上昇している。これを過剰間隙水圧比でみると、YUSAYUSAではG.L.-6.3m～G.L.-9.0mのシルト層も同程度に上昇している。この層での過剰間隙水圧比の上昇量は、FLIPでは0.21～0.25、YUSAYUSAでは0.36～0.39と0.38～0.40であり、層内ではほぼ同一である。式(1)より液状化層全体

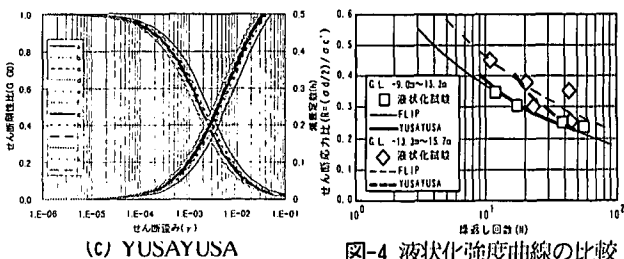


図-4 液状化強度曲線の比較

の見かけの平均値を求めると、FLIP では 0.1 程度、YUSAYUSA では 0.25 程度であり、過剰間隙水圧の上昇程度は小さい。観測記録と比較すると、G.L-14.5m に対しては、FLIP、YUSAYUSA とともに概ね一致しているが、G.L-10.5m に対しては FLIP では 0.1 程度、YUSAYUSA では 0.2 程度である。

$$PWPRave = \frac{\sum(Hi \times PWPRi)}{\sum Hi} \quad (1)$$

PWPRave: 過剰間隙水圧比の平均値
PWPRi : i 層の過剰間隙水圧比
Hi : i 層の層厚

このような過剰間隙水圧の上昇程度が有効応力解析と全応力解析の結果や、二つの解析コードの結果の微妙な違いとなって現れている。たとえば、過剰間隙水圧の上昇の有無でせん断ひずみの相対的な分布形状が異なったり、加速度応答の違いとなっていると考えられる。一方、最大せん断応力の分布は、いずれの解析結果ともほぼ同様である。また、観測記録と直接比較できる加速度や相対変位についても、ほぼ観測記録と一致する結果が得られており、いずれの解析も実際の地盤の挙動をほぼ再現していると考えられる。

4.2 時刻歴

(1) 過剰間隙水圧

図-6 に G.L-10.5m と G.L-14.5m での過剰間隙水圧比の時刻歴について、観測記録と解析結果を比較して示す。G.L-14.5m では FLIP、YUSAYUSA とともに上昇開始時刻や、鉛直動に起因して発生する水圧上昇過程での振動成分¹⁰⁾を除く上昇量は概ね評価できている。また、G.L-10.5m でも上昇量は小さいものの、上昇開始時刻は一致している。

(2) 加速度

図-7 に G.L-2m における加速度の時刻歴について、観測記録と解析結果を比較して示す。FLIP、YUSAYUSA とともに全体的な振幅や位相は概ね一致している。詳細に観察すると、有効応力解析は全応力解析に比べ位相の遅れが見られる。これは、過剰間隙水圧の上昇分だけせん断剛性が低下したことに起因すると考えられるが、過剰間隙水圧の上昇量が小さいため、その程度は小さい。

4.3 伝達特性

図-8 に入力地震動に対する G.L-2m での伝達関数(以後、伝達関数)を、観測記録と解析結果を比較して示す。伝達関数は 0.2Hz の Parzen ウィンドウで平滑化している。

いずれの解析も、伝達特性に支配的な 1 次のピークは再現できている。FLIP では 2 次、3 次のピークも概ね表現できている。一方、YUSAYUSA では減衰定数を大きめに評価しているため、2 次以降のピークの増幅が小さい。また、FLIP、YUSAYUSA とともに有効応力解析と全応力解析には明瞭な差異は見られない。

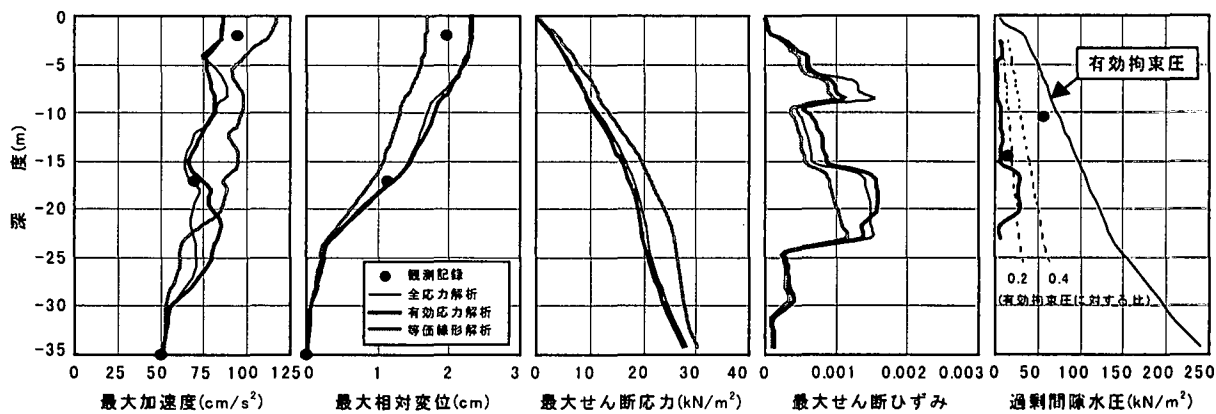
有効応力解析では、G.L-10.5m での過剰間隙水圧を小さめに評価したにもかかわらず、地表の加速度時刻歴や伝達関数は観測記録と一致した。G.L-14.5m で観測された過剰間隙水圧が小さかったこと、有効応力解析から得られた液状化層全体の見かけの平均値は最大でも 0.25 程度であることから考えると、G.L-10.5m で観測された大きな過剰間隙水圧の上昇は部分的であり、拘束圧が低い砂層上部の限られた層だけが上昇したと推測される。過剰間隙水圧の上昇が比較的小さかったことから、全応力解析でも地盤の挙動を再現できたと考えられる。

5. 結論

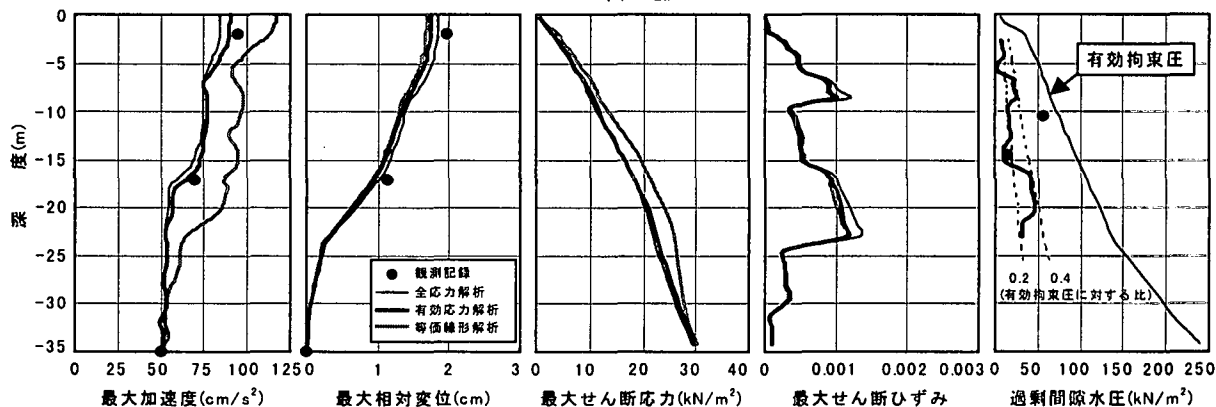
- ① 有効応力解析で得られた G.L-10.5m の過剰間隙水圧は観測記録の 1/6～1/9 程度であったが、地表での加速度時刻歴や伝達関数などに見られる地震時挙動はほぼ再現できた。
- ② G.L-10.5m で観測された大きな過剰間隙水圧の上昇は部分的であり、拘束圧が低い砂層上部の限られた層だけが上昇したと推測される。また、液状化層全体の平均的な過剰間隙水圧の上昇量は有効拘束圧の 0.25 程度と考えられる。
- ③ 過剰間隙水圧を考慮しない全応力解析でも有効応力解析と同程度に地震時挙動を評価できた。過剰間隙水圧の上昇量が有効拘束圧の 0.25 程度であれば地盤の地震時挙動には過剰間隙水圧の影響は小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 三輪 滋、森 伸一郎、関 宝琪: ワイルドライフの地震動記録を用いた地盤の増幅特性に及ぼす過剰間隙水圧の影響の検討, 第 28 回土質工学研究発表会, pp.1145～1148, 1993.6
- 2) 林 宏親: 自動化された液状化観測システムの設置—高規格幹線道路日高自動車道(北海道)—, 土と基礎, Vol.39, No.1, pp.117-118, 1991.1
- 3) 西川 純一、小田島 大、森 伸一郎、三輪 滋: 1993 年釧路沖地震における液状化アレー観測, 土と基礎, Vol.42, Ser.No.434, No.3, pp.57-62, 1994.3
- 4) 林 宏親、西川 純一、谷口 啓二郎、池田 隆明、三輪 滋、森 伸一郎: 液状化アレー観測記録を用いた地盤の地震時挙動の検討, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1217-1222, 1998.12
- 5) 林 宏親、西川 純一、谷口 啓二郎、三輪 滋、池田 隆明: 地震観測記録にもとづく表層地盤の地震動増幅特性の検討, 第 25 回地震工学研究発表会, 1999, (投稿中)
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, 1990.12
- 7) K., Ishihara, I., Towhata: One-Dimensional Soil Response Analysis Earthquakes based on Effective Stress Method, The University of Tokyo(B), Vol. XXXV, No.4, 1980
- 8) 谷口 啓二郎、西川 純一、林 宏親、森 伸一郎、三輪 滋、池田 隆明: 液状化アレー観測地点における近接道路盛土の影響, 第 24 回地震工学研究発表会, pp.121-124, 1997.7
- 9) 運輸省港湾局監修: 埋立地の液状化対策ハンドブック, (財)沿岸開発技術研究センター刊, pp.1-285, 1993
- 10) 森 伸一郎、三輪 滋、沼田 淳紀: 1995 年兵庫県南部地震におけるまき土埋立地盤の液状化挙動に関する振動台実験, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.231-248, 1996

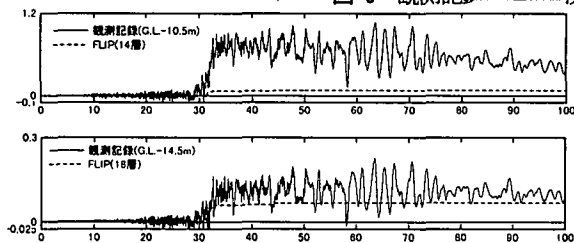


(a) FLIP

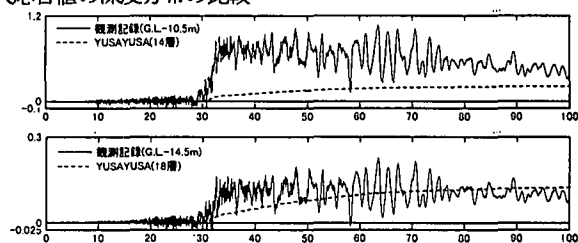


(b) YUSAYUSA

図-5 観測記録と解析結果との最大応答値の深度分布の比較

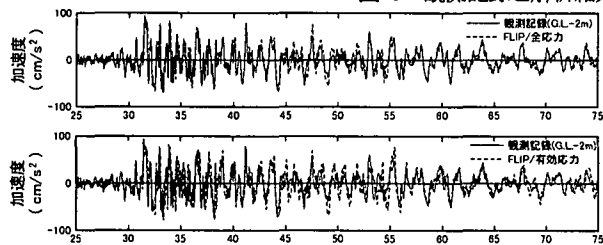


(a) FLIP

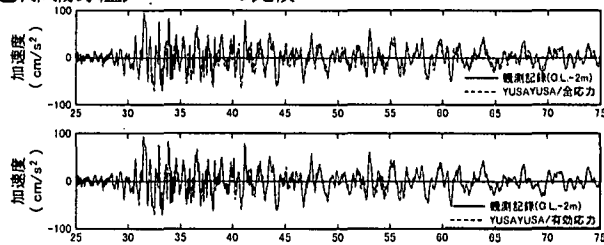


(b) YUSAYUSA

図-6 観測記録と解析結果との過剰間隙水圧と時刻歴の比較

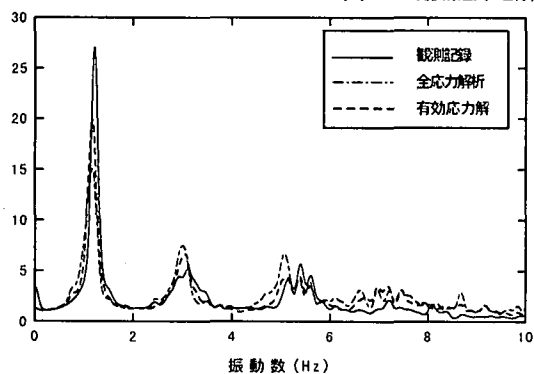


(a) FLIP

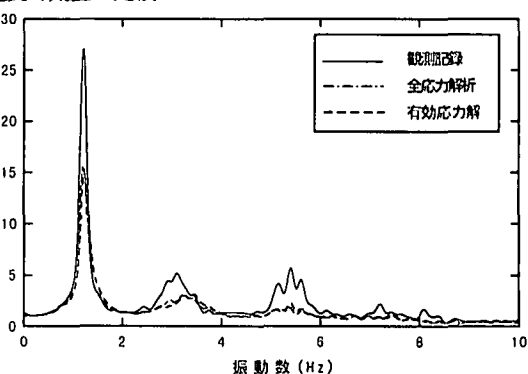


(b) YUSAYUSA

図-7 観測記録と解析結果との加速度時刻歴の比較



(a) FLIP



(b) YUSAYUSA

図-8 観測記録と解析結果との伝達関数(G.L.-2m/G.L.-35m)の比較