

(11) ワイルドライフの地震動記録の有効応力解析法による検討

飛島建設(株) ○三輪 滋
 飛島建設(株) 森 伸一郎

1. はじめに

液状化の生じる可能性のある飽和した緩い砂質土層の存在する地盤が大きな地震動を受けると、砂質土層では過剰間隙水圧（以下間隙水圧と呼ぶ）の上昇による有効拘束圧の減少で地盤のせん断剛性が急激に低下するため地盤の挙動は一変し、振幅の大きな相対変位が生じることが実地震動記録の検討により報告されている¹⁾。一方、地中構造物等の耐震性を考える場合、その挙動は地盤中に発生する相対変位に大きく影響を受けるため、液状化後の地盤に発生する相対変位は工学的に重要な検討項目となると考えられる。ここでは実際に液状化した地盤で得られた地中と地表の地震動記録に基づいて、非線形有効応力法・非線形全応力法・等価線形法により地震応答解析を実施した。そしてこれらの結果と実

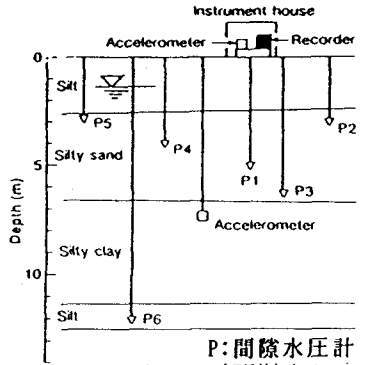


図-1 ワイルドライフ観測地点の地層構成と計器の設置位置²⁾

表-1 解析用の地盤モデル

層No	層厚 (m)	土質	せん断波速度 V_s (m/s)	単位体積重量 γ (tf/m^3)	せん断剛性 G_s (tf/m^2)	液状化強度比	
						R20	R5
1	0.6	Silt	99	1.6	1600		
2	0.6						
3	0.6						
4	0.7	Silty Sand	116	1.94	1940	0.14	0.19
5	0.5						
6	0.5	Silty Sand	116	1.97	2700	0.23	0.32
7	1.1					0.18	0.26
8	1.1					0.13	0.18
9	1.1	Silty Clay	130	2.0	3450		
10	0.7						

2. ワイルドライフの地震動記録

アメリカ・カリフォルニア州のワイルドライフは1981年以前に4つの地震で液状化の影響による地盤の変状が確認されている地点であり、1982年から加速度計と間隙水圧計を設置して液状化アレー観測が実施されている²⁾。加速度計は地表と地中 (GL-7.5m) に、間隙水圧計はシルト質細砂層に設置されている。地層構成と計器の設置位置を図-1、表-1に示す。

1987年11月24日に $M_s=6.6$ の地震が発生し、この観測点でも地震動記録が得られた。地表面加速度は 201cm/s^2 を記録し間隙水圧比が1.0に達して液状化し、周辺地盤で亀裂、噴砂、地盤の側方移動が生じた²⁾。図-2に得られた地表と地中のNS成分の加速度時刻歴とGL-2.9mでの間隙水圧の時刻歴を示す。また、加速度記録を積分して得られた変位記録¹⁾より求めた地表と地中の相対変位時刻歴をあわ

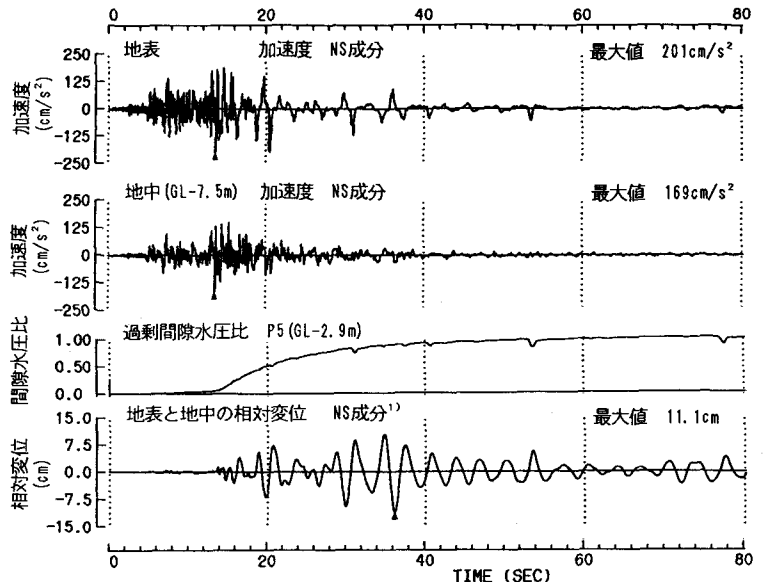


図-2 観測された加速度、間隙水圧、相対変位時刻歴

せて示す。

観測記録を見ると、最大加速度を示す13.6秒の前後で様相が異なることがわかる。この時点より後では加速度時刻歴は短周期成分が減少して長周期成分が卓越する。相対変位時刻歴もそれまで比較的短周期で振幅0.5cm以下の変位であったのが周期が伸びて振幅が急激に大きくなっていく。間隙水圧の時刻歴もほぼ対応して上昇が明瞭となり、この時点から間隙水圧の影響が応答に現れ始めると考えられる。なお、間隙水圧記録は間隙水圧計の現位置でのキャリブレーションテストで唯一正常に機能しているとされた³⁾P5の記録を示したが、この計器も気泡の混入で記録にやや時間遅れが生じている可能性があるとの報告がなされている³⁾。

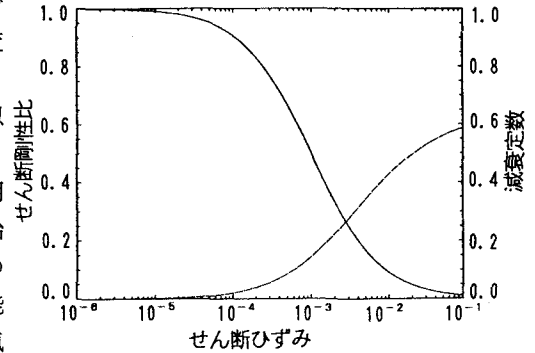


図-3 解析に用いたせん断剛性と減衰のひずみ依存曲線

3. 実地震動記録による地震応答解析

地中の地震動記録を入力地震動として非線形有効応力法、非線形全応力法、等価線形法による一次元地震応答解析を行い、実現象の工学的評価という面からそれぞれの解析法の適用性や問題点を検討した。解析に用いた地盤モデルを表-1に示す。物性値は地盤調査結果⁴⁾に基づいて決めた既往の解析例⁵⁾によった。液状化強度については標準貫入試験の結果⁴⁾からSeed・時松の方法⁶⁾に基づいて求めた。地盤の非線形特性は履歴型Hardin-Drnevichモデルで表し、基準ひずみは 10^{-3} (文献7))とした。図-3にせん断剛性と減衰のひずみ依存曲線を示す。有効応力解析には間隙水圧発生モデルに石原・東畑の有効応力径路モデル⁸⁾を組み込んだ解析法を用いた。等価線形解析には Schnabel等の方法⁹⁾を用いた。

4. 観測記録と解析結果の比較

図-4に各解析で求められた地表面の加速度時刻歴を示す。図-5に各解析で求められた地表と地中GL-7.5mの相対変位時刻歴を示す。変位は観測記録と同じ方法¹⁾で求

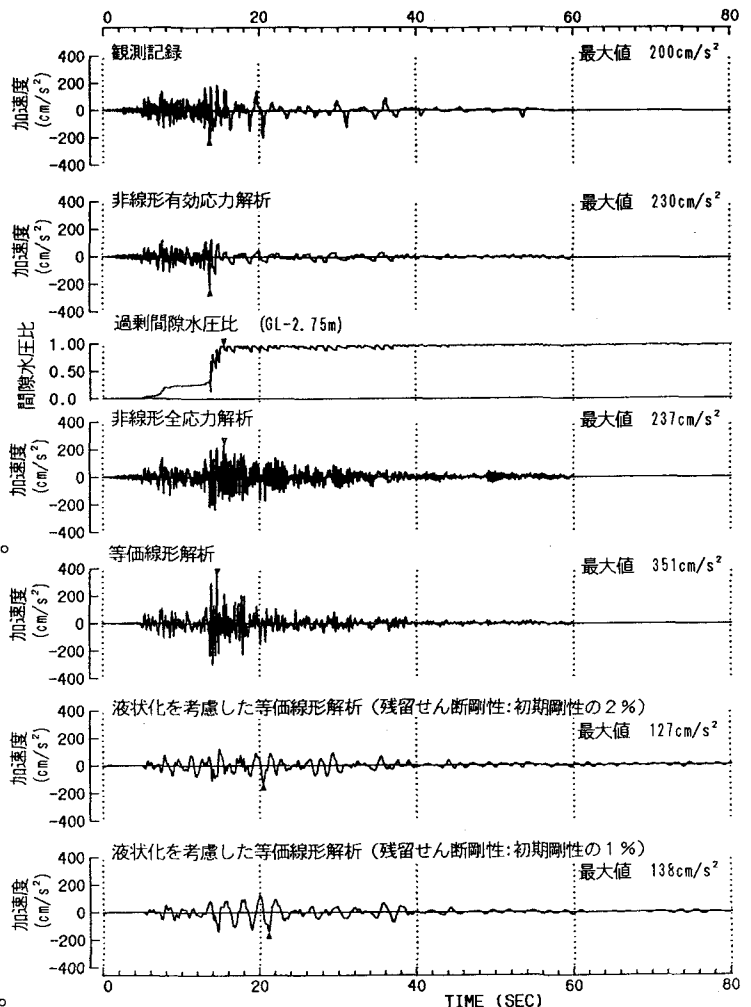


図-4 解析で求めた地表の加速度時刻歴 (714¹⁾ 補正後)

めもので、加速度はその際にバンドパスフィルター¹³をかけたものを示した。なお、以下では間隙水圧の上昇が明瞭となる13秒までを液状化前、有効応力解析の間隙水圧比がほぼ1.0となる16.5秒を初期液状化と考え、13秒から16.5秒の間を間隙水圧の上昇過程、その後を液状化後とよぶことにする。

液状化前の13秒までは、加速度は等価線形解析の最大値がやや大きめであることを除けば、どの解析も観測記録とほぼ同様な応答を示す。また、相対変位はどの解析結果も0.5cm以下の小さな変位量であり、観測記録と良い対応を示している。

しかし、13秒以降では、それぞれの解析結果に違いが生じる。加速度では観測記録に見られる短周期成分の減少、長周期成分の卓越という傾向をある程度表現できているのは有効応力解析の結果だけであり、全応力解析と等価線形解析の結果は液状化前と同様に短周期成分の卓越した波形が続いている。

相対変位では、観測記録は液状化後の加速度振幅が小さくなる20秒以降も大きな変位振幅が続き、36秒付近で最大値11.2cmを示す。また、液状化後も周期が徐々に伸びているのがわかる。全応力解析・等価線形解析の結果は、短周期の小さな振幅の変位が液状化後もそのまま続き、14秒付近で観測記録の最大値より1オーダー小さい1cm程度の最大値を示した後徐々に小さくなる。この2つの解析では間隙水圧の上昇過程や液状化後の地盤の挙動をほとんど表現できていないことがわかる。

一方、有効応力解析は間隙水圧の上昇過程で変位振幅が徐々に大きくなり、唯一観測記録とほぼ一致した応答を示す。しかし、最大値を示す液状化後の20秒付近までは観測記録にほぼ近い応答を示すものの、その後は振幅が減少し観測記録に見られる30~40秒にかけての大きな振幅やその後も続く長周期の大きな振幅を表現することができない。

このように有効応力解析では初期液状化までの間隙水圧の上昇過程の地盤の挙動はよく表現することができる。また、液状化後の挙動については十分に表現できるとは言えないが、これは、実現象では徐々に剛性低下が進み周期が伸びて位相の遅れが大きくなるのに対し、ここで実施した有効応力解析では液状化後もせん断剛性が3%を保持するとしているので周期の変化に追従できないこと、また、解析では減衰が実際より大きく評価されていることなどが原因と考えられる。これらの点を考慮できれば液状化後の挙動も表現できる可能性がある。

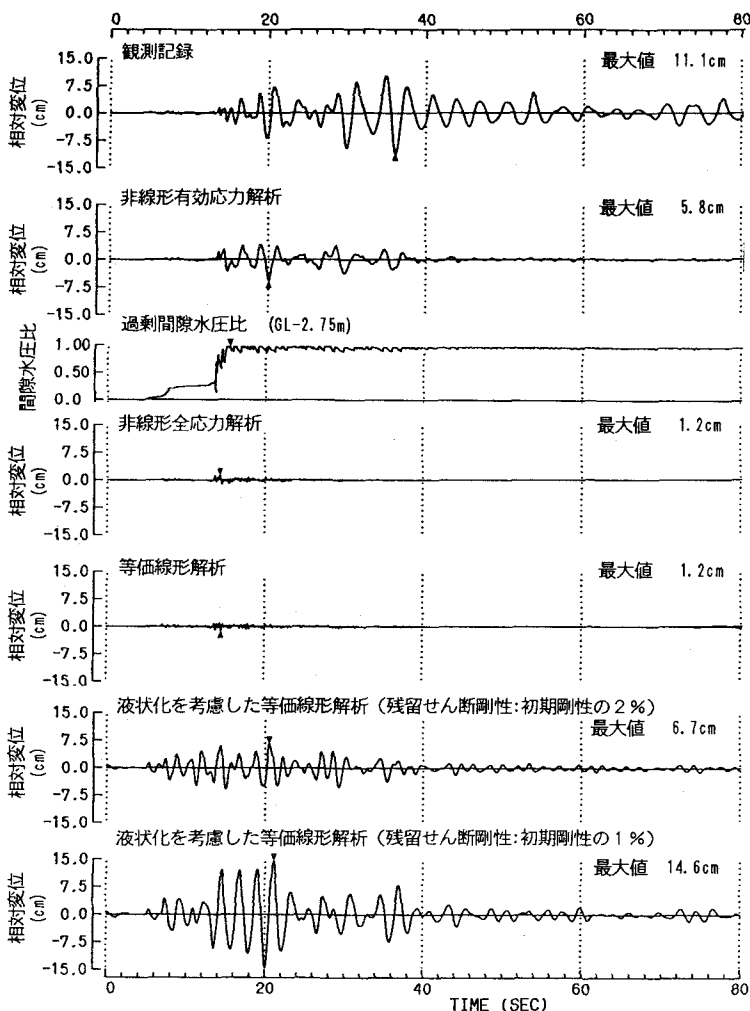


図-5 解析で求めた地表と地中 (GL-7.5m) の相対変位時刻歴

5. 液状化後の地盤の挙動の工学的評価の試み

液状化後の地盤の相対変位に焦点を絞り、液状化後の低下した地盤のせん断剛性（残留せん断剛性）を考慮した等価線形解析を試みた。せん断剛性は、粘性土層は等価線形解析の結果から初期剛性の50%に、液状化層は初期剛性の2%と1%に低下させた2ケースを考えた。減衰定数は観測記録の液状化時の応力-ひずみ曲線のループから概略求めた値をもとに一律15%とした。

解析で得られた加速度と相対変位の時刻歴を図-4、図-5に示す。最初から液状化後のせん断剛性を仮定しているため液状化前から長周期の加速度、大きな変位振幅が生じている。しかし、液状化後に限ってみれば加速度は観測にかなり近い応答を示す。相対変位は、剛性が初期剛性の2%の場合は間隙水圧上昇過程から液状化後の30秒付近までは観測記録とよい対応を示す。剛性が初期剛性の1%の場合は間隙水圧上昇過程と液状化後の20秒ぐらいまでに観測より大きい変位を示し最大14.6cmの振幅を与えるが、30~40秒では振幅はやや小さいものの観測記録とかなり良い対応を示す。このように、実現象で見られるような周期のゆるやかな変化は一つの剛性だけでは十分には表現することはできず、実現象よりも大きな変位が生じる可能性もある。しかし、せん断剛性について適切な範囲を考慮して何通りかの等価線形解析を行えばそれらの変位を包絡することで、地中構造物の耐震性にとって工学的に重要な相対変位の最大値をある程度予測することができると思われる。この際、液状化後の残留せん断剛性の評価が重要となる。

6. まとめ

- 1) 過剰間隙水圧が上昇して初期液状化に達するまでの地盤の挙動は有効応力非線形解析で十分に評価できる。
- 2) 工学的に重要な液状化後の地盤の相対変位は、液状化後の地盤の残留せん断剛性を適切に評価できれば等価線形解析でも予測できると考えられる。

謝辞：文献8)を通じ有効応力径路モデルを使用させて頂きました。東京大学工学部の石原研而先生、東畑郁生先生に謝意を表します。

《参考文献》

- 1) 森伸一郎, 三輪滋, 関宝琪: 液状化した地盤の地震時挙動に関する検討, 第22回地震工学研究発表会, July, 1993 (投稿中)
- 2) R. Dobry, M. H. Baziar, T. D. O' Rourke, B. L. Roth, T. L. Youd: Liquefaction and Ground Failure in the Imperial Valley, Southern California During the 1979, 1981, 1987 Earthquakes, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Vol. 2 United States Case Studies, 1992
- 3) B. Hushmand, R. F. Scott, C. B. Crouse: In-place Calibration of USGS Pore Water Pressure Transducers at Wildlife Liquefaction Site, California, USA, Proc. of 10WCEE, pp. 1263-1268, July, 1992
- 4) M. J. Bennett, P. V. McLaughlin, J. Sarmiento, T. L. Youd: Geotechnical Investigation of Liquefaction Sites, Imperial Valley, California, Open File Report No. 84-252, USGS, 1984
- 5) C. M. Keane, J. H. Prevost: An Analysis of Earthquake Data Observed at The Wildlife Liquefaction Site, Imperial County, California: Proc. from 2nd U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effect on Lifelines, pp. 176-192, Dec. 1989
- 6) H. B. Seed, K. Tokimatsu, L. F. Harder, R. M. Chung: Influence of SPT Procedure in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Journal of G. E. Division, ASCE, Vol. 111, No. GT12, Dec. 1985
- 7) R. Dobry, A-W. Elgarnal, M. Baziar: Pore Pressure and Acceleration Response of Wildlife Site during the 1987 Earthquake: Proc. from 2nd U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effect on Lifelines, pp. 145-160, Dec. 1989
- 8) K. Ishihara, I. Towhata: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquake Based on Effective Stress Method, J. of Fac. of Eng., Univ of Tokyo, 1980
- 9) P. B. Schnabel, J. Lysmer, H. B. Seed: SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontal Layered Sites, Report No. BERC72-12, University of California, Berkley, 1972