

土層構成の違いが地震時の 地盤挙動に与える影響について

森田年一¹・大和田祐加²

¹福島工業高等専門学校建設環境工学科 助教授
(〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾30)

E-mail: morita@fukushima-nct.ac.jp

²福島工業高等専門学校専攻科 物質・環境システム工学専攻
(〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾30)

本研究では、地盤の土層構成に着目し、地盤の土層構成の違いが地震時の挙動にどのような影響を与えるかについて、4種類の仮想地盤を対象に模型振動実験および有効応力解析を実施した。さらに、ここで対象とした仮想地盤と同様の実地盤を対象に、有効応力解析により実際の地震時の挙動をシミュレートするとともに、液状化が発生した場合における地盤の軟化の程度について言及した。その結果、上載圧が大きく液状化抵抗の大きい土層の存在が、地盤全体としての液状化の抑制に寄与しているという知見を得た。

Key Words : Liquefaction , Shaking table test , Effective stress analysis , Sand , Silt

1. はじめに

昨年10月に発生した新潟県中越地震における事例を含め、地すべり、がけ崩れ、地盤の沈下・陥没、液状化等の地震による地盤の被害事例はこれまで多々あり、これらの被害に対して影響を及ぼす因子はさまざま考えられている。本研究では、地盤の土層構成に着目し、地盤の土層構成の違いが地震時の挙動にどのような影響を与えるかについて、4種類の地盤を対象に模型振動実験および有効応力解析を実施した。併せて、このような地盤構成に該当する実地盤を対象に有効応力解析を行い、実際の地震時の地盤挙動を探るとともに、液状化が発生した場合における地盤の軟化の程度について言及した。

2. 実験方法

模型振動実験では、80cm×15cm×40cmの土槽内に高さ10cmの地盤模型を水中落下法により作製し、水平方向一次元により加振した。実験に用いた土試料は、東北硅砂(乾燥天然硅砂)の4号および8号である。図-1にそれぞれの試料の粒径加積曲線を示す。地盤模型として、この2種類の試料を用いた同一層厚の4層から成る4ケースの水平成層地盤を作製した。ここで、上層を1層、下層を4層とし、実験で採用した地盤模型をケース1～ケース4として表-1に示す。地下水位は1層と2層の境界位置とし、

入力加振波は、5Hzの正弦波(5秒)とした。加振は振幅を徐々に上げていくステージ加振とし、地表面において液状化が発生するまで繰り返し加振した。加振時には、地表面および土槽側面から地盤の挙動を観察するとともに、液状化発生時の入力加速度を設置した加速度計により、また、液状化発生時の加振後の地表面沈下量を設置したターゲットにより測定した。

3. 解析方法

(1) 解析プログラム

数値解析では、液状化発生時の地盤内の間隙水圧の上昇を考慮できる有効応力解析プログラムを用い、液状化発生時の地盤の挙動を探った。用いた解析プログラムは、応力-ひずみ関係については、任意方向せん断断面の双曲線モデルを、過剰間隙水圧については、塑性せん断仕事およびせん断応力の関数として与えるモデルを、それぞれ構成則として取り入れたFLIP¹⁾である。また、解析に用いるパラメタの具体的な設定方法については、別途の文献²⁾を参照した。

(2) 模型振動実験の再現ケース

解析においては、模型振動実験における液状化発

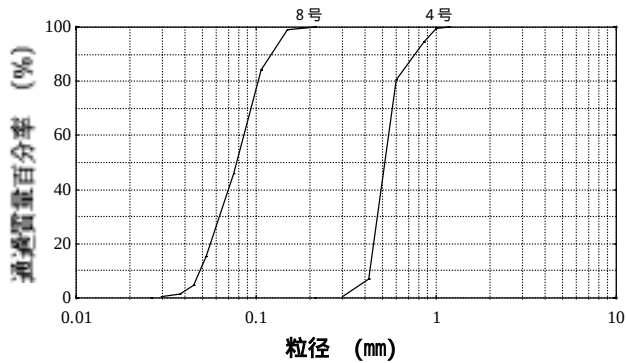


図-1 試料の粒径加積曲線

表-1 実験ケース

ケース	1	2	3	4
1層	4号	8号	8号	4号
2層	4号	8号	4号	8号
3層	8号	4号	8号	4号
4層	8号	4号	4号	8号

生時の様子を再現する目的で、表 - 1 と同様の 4 ケースについて実施した。ただ、実地盤のスケールを想定するという観点から、解析断面は、実験のような模型スケールではなく 1 層あたり 10m の土層が 4 層から成る深度 40m の水平成層地盤とし、地震波の入力時間を別途の相似則³⁾に従い調整することで、振動実験との条件における整合性を図った。その他の解析における諸条件は、すべて振動実験と同様とした。

(3) 実地盤を対象としたケース

本研究で対象とした地盤の土質柱状図⁴⁾を図 - 2 に示す。対象地盤は、地表から深度 1.3m が瓦礫層、1.3m ~ 7.05m が中砂、7.05m ~ 11.05m が固結シルトとなっており、深度 11.05m が工学的基盤である。なお、地下水位は深度 1.5m の位置である。液状化対象層である中砂層の直下に非液状化層である固結シルト層が存在しており、1 組の砂 - シルトの連続層から成る比較的単純な地盤構成となっている。

また、本研究で用いた地震波は、対象地盤において、近年、実際に観測された地震波である。地震波形を図 - 3 に示す。加速度の最大値は、工学的基盤面で 0.12m/s^2 (基盤波)、地表面で 0.48m/s^2 (地表観測波) となっている。

解析は、1 次元による応答解析とし、図 - 3 に示す基盤波を図 - 2 に示す地盤の工学的基盤面 (深度 11.05m) に入力した。さらに、地盤モデルの妥当性を検証したうえで、入力加速度の振幅をさまざまに変更して、液状化発生時における砂層の過剰間隙水

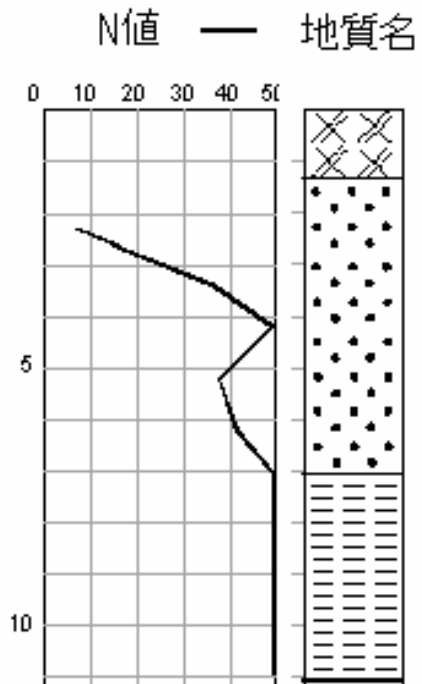


図-2 土質柱状図

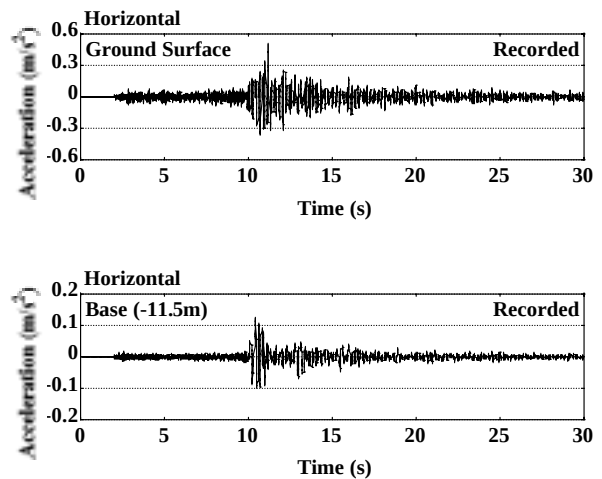


図-3 観測された地震波形

圧比に着目した。

4. 実験結果

模型振動実験における各ケースの液状化発生時の入力加速度および地表面沈下量を、表 - 2 に示す。

各ケースにおける液状化発生時の入力加速度から、地盤全体としての液状化抵抗は、ケース 4 が最も小さく、順にケース 3、ケース 2 と続き、ケース 1 が最も大きいと言える。比較的液状化しにくいと思わ

表-2 液状化発生時の入力加速度および地表面沈下量

ケース	加速度 (m/s^2)	沈下量 (cm)
1	5.37	0.5
2	4.31	0.5
3	3.61	0.7
4	3.19	0.5

表-3 基盤入力加速度, 地表面加速度, 応答比 (地表/基盤)

ケース	基盤加速度 (m/s^2)	地表加速度 (m/s^2)	応答比
1	5.37	1.80	0.34
2	4.31	5.07	1.18
3	3.61	3.88	1.07
4	3.19	2.03	0.64

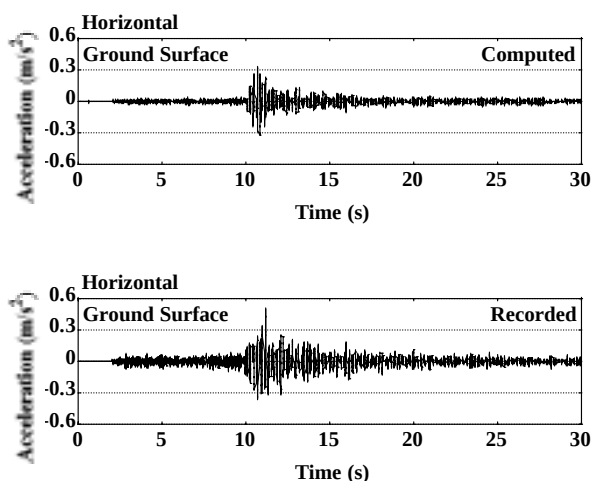


図-4 地表加速度時刻歴

れる8号の土層が2層連続して地盤が構成されたケースで、液状化抵抗が高いという結果になった。また、液状化発生時の地表面沈下量は、どのケースでも同じような数値になっており、液状化発生時における地盤の変形・軟化の程度は、全てのケースで同程度のものではあったと推測できる。

5. 解析結果

(1) 模型振動実験の再現ケース

数値解析における各ケースの基盤入力加速度、地表面加速度およびその応答比(地表/基盤)を、表-3に示す。なお、液状化発生時の様子を再現するという目的から、基盤入力加速度の振幅は、振動実験により測定された液状化発生時の加速度の値を用い

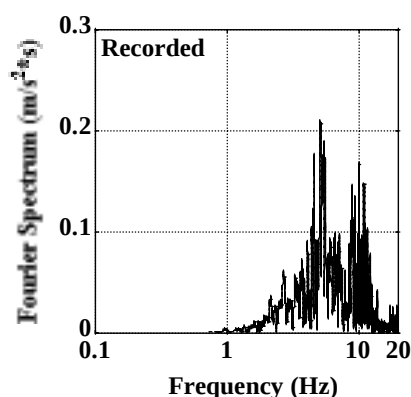
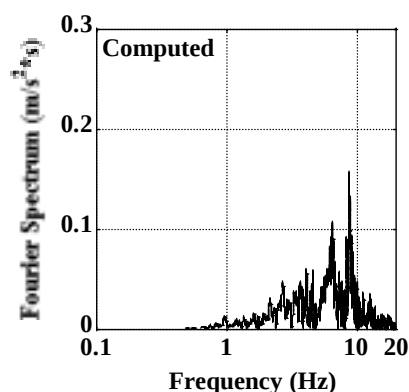


図-5 フーリエスペクトル

ている。また、数値解析では各深度ごとに過剰間隙水圧比が算出されるが、ここでは基盤入力加速度と地表面加速度の応答比(地表/基盤)を、液状化による地盤全体の軟化程度を示す指標とした。これより、加速度応答は、1層が4号であるケース1およびケース4で減衰し、1層が8号であるケース2およびケース3で増幅するという結果であった。

(2) 実地盤を対象としたケース

解析の結果得られた地表における加速度時刻歴(解析波)を、地表観測波とあわせて図-4に示す。また、図-5に解析波と観測波のフーリエスペクトルを示す。これより、解析波と観測波は、ともに5Hz、10Hz前後の2点において、卓越していることがわかる。解析波・観測波の両者において、時刻歴・スペクトルともに、概ね整合性が認められる結果であった。

さらに、対象地盤において最も液状化が発生しやすいと想定される砂層上部付近に着目し、入力加速度の振幅が変更された場合の地盤挙動について検証した。図-6に、深度2mにおける入力水平最大加速度と最大過剰間隙水圧比の関係を示す。これより、

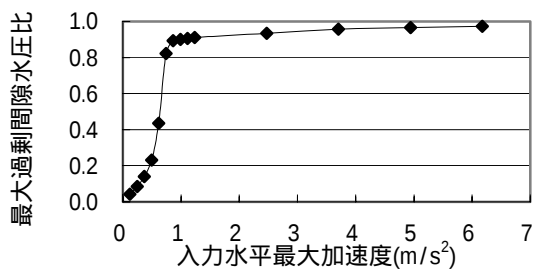


図-6 入力加速度と間隙水圧比の関係(深度2m)

深度2m地点では、約 1.0m/s^2 程度の入力加速度で液状化による軟化が発生する地盤であると推測される。

6 . 結論

- (1) 模型振動実験の結果より、液状化抵抗の大きい土層が長く連続する地盤構成の方が、地盤全体としても液状化しにくいと推測できる。
- (2) 模型振動実験のケース1とケース2の結果より、下層が液状化抵抗の大きい土層で構成された地盤の方が地盤全体として液状化しにくいと推測できる。上載圧が大きく液状化抵抗の大きい土層の存在が、地盤全体としての液状化の抑制に寄与している可能性がある。
- (3) 模型振動実験の再現を目的とした数値解析の結果より、液状化発生時における地盤全体の加速度応答の程度は、地表層の土質に影響されると推測できる。
- (4) ケース1の解析結果より、上載圧の小さい地表面に近い地盤が、液状化した場合には、地盤全体としての加速度減衰の傾向、すなわち地盤の軟化の傾向が顕著であると言える。

- (5) 本研究で対象とした実地盤は、深度2m付近の砂層上部では約 1.0m/s^2 程度の入力加速度で液状化による軟化が発生する地盤であると推測できる。

7 . 今後の課題

今後は、土層厚さ、入力地震動の周波数、地下水位位置など、入力条件や地盤条件をさまざまに変更したケースでの模型振動実験や有効応力解析を行い、地盤の土層構成の違いが地震時の挙動にどのような影響を与えるかについて、より詳細に検討していきたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所による港湾地域強震観測の地震データおよび地盤データを使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1)Susumu Iai, Yasuo Matsunaga, and Tomohiro Kameoka: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No2, pp.1-15, 1992.
- 2)森田年一、井合進、劉漢龍、一井康二、佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法、港湾技術研究所資料、No.869、1997年
- 3)Susumu Iai: Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and Foundations, Vol. 29, No1, pp.105-118, 1989.
- 4)一井康二、佐藤幸博、佐藤陽子、星野裕子、井合進：港湾地域強震観測地点資料(その6)、港湾技術研究所資料、No.935、1999年

(2005. 6. 15 受付)

CASE STUDIES OF GROUND MOTION DURING EARTHQUAKE

Toshikazu MORITA and Yuka OWADA

The damage was observed at many ground surface in 2004 Niigataken-Chuetsu Earthquake. In order to study the mechanism of ground response during earthquake, shaking table tests and effective stress analysis were conducted on the sand-silt deposit. We carried out shaking table tests on 4 type models. The analysis model used for this study was a strain space multiple mechanism model, which takes into account the effect of principal stress axis rotation. The recorded earthquake motion at a depth of 11.5 meters was used as the input earthquake motion for the analysis. The results of shaking table tests and effective stress analysis suggested that the decrease in shear resistance due to excess pore water pressure increase in the sand deposits increased the deformation of the ground surface.