

# 細粒土層における液状化時の変位特性 および間隙水挙動に関する一考察

森田 年一<sup>1</sup>・西丸 あずさ<sup>2</sup>・橋本 壮史<sup>3</sup>

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

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

<sup>2</sup>茨城大学 工学部都市システム工学科(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

<sup>3</sup>福島工業高等専門学校 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)

2000年鳥取県西部地震などの既往の地震において、シルト質土地盤が液状化する事例が確認されている。また、室内模型振動実験の結果より、全層にわたりシルトを50%程度含む地盤でも、液状化発生の可能性がある知見が得られている<sup>1)2)</sup>。そこで、本研究では、シルトを含む細粒土層を対象に土層構成の違いが液状化発生時の変位特性や間隙水挙動に及ぼす影響を探ることを目的として、6種類の仮想地盤を対象に模型振動実験を行った。その結果、地表面付近の地盤特性が、これら種々の液状化特性に大きく影響を及ぼしているという知見を得た。また、液状化発生時の土層境界における間隙水の滞留現象が地盤挙動に及ぼす影響についても言及した。

**Key Words** : Liquefaction , Shaking table test , Displacement characteristic , Pore water behavior , Silt

## 1. はじめに

本年3月に発生した能登半島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。一方、2000年鳥取県西部地震などの既往の地震において、シルト質土地盤が液状化する事例が確認されている。また、室内模型振動実験の結果より、全層にわたりシルトを50%程度含む地盤でも、地震動の大きさや地下水位位置により液状化発生の可能性がある知見が得られている<sup>1)2)</sup>。そこで、本研究では、シルトを含む細粒土層を対象に土層構成の違いが液状化発生時の変位特性や間隙水挙動に及ぼす影響を探ることを目的として模型振動実験を行った。また、液状化発生時の間隙水の排出について、地表へ排出するまでの時間的経過や、土層境界における間隙水の滞留状況についても言及した。

## 2. 実験方法

模型振動実験では、80cm×30cm×50cmの土槽内に高さ20cm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、乾燥天然砂である東北砂の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6ケースの水平成層地盤を採用した。用いた6ケースの地盤模型をケース1~ケース6として図-2に示す。全ケースともに地下水位は地表面から1cmとし、地表面から5cmごとに変位を測定するためのマーキングを施した。この5cmごとのマーキングを境界として、全ケースともに4層構成の地盤と考え、以下、本文中では、地表面から1層、2層、3層、4層とするとともに、1層と2層を上層、3層と4層を下層と表示する。入力加振波は5Hzの正弦波(5秒)とし、振幅を徐々に上げていくステップ加振により、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、加振時の様子を動画撮影した。実験における計測値として、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および各層ごとの沈下量を前述のマーキングにより測定した。

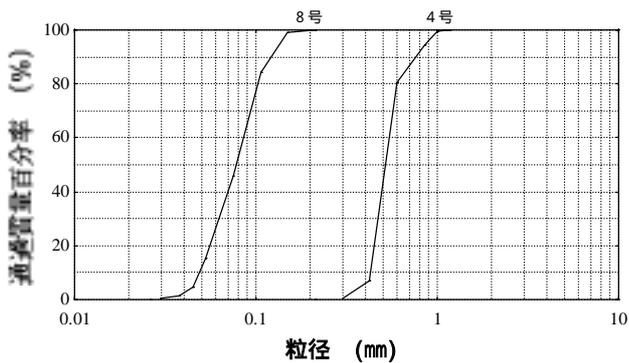


図-1 試料の粒径加積曲線

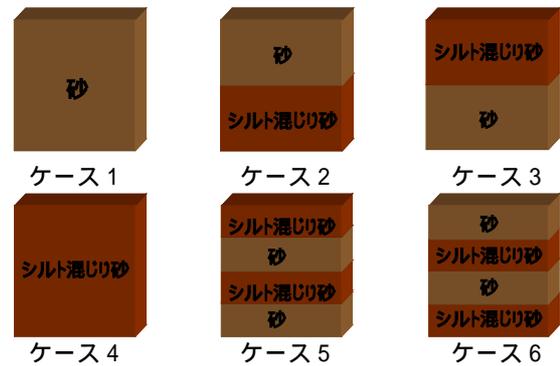


図-2 実験ケース

表-1 液状化時の入力加速度，地表面沈下量，沈下時間

ケース	1	2	3	4	5	6
液状化時の入力加速度 ( $m/s^2$ )	2.99	3.92	5.72	7.78	5.30	5.54
地表面沈下量 (cm)	1.200	1.250	0.250	0.500	0.650	0.350
沈下時間 (s)	0	0	50	260	60	0

表-2 各層の沈下量

	●●●砂		■●●シルト混じり砂			
1層沈下量 (cm)	0.750	0.650	0.250	0.100	0.325	0.050
2層沈下量 (cm)	0.225	0.150	-0.450	0.125	0.275	-0.050
3層沈下量 (cm)	0.150	0.150	-0.100	0.060	-0.250	0.350
4層沈下量 (cm)	0.075	0.300	0.550	0.215	0.300	0

### 3. 実験結果

#### (1) 結果の概要

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と地表面沈下量および沈下に要した時間を、表-1に示す。また、各層の沈下量を表-2に示す。これらの全ケースの結果より、地表面付近の地盤特性が、地盤全体の液状化特性や液状化発生時の地表面沈下量および沈下時間に大きく影響を及ぼすと考えられる。また、実際の施工において地盤改良を施す場合には、地下水位付近の範囲のみ地盤改良を行うだけでも、相応の液状化対策の効果が期待できると本実験結果から推測できる。

#### (2) 液状化特性

液状化時の入力加速度より、全層が砂であるケース1が最も液状化しやすく、全層がシルト混じり砂であるケ

ース4が最も液状化しにくいというきわめて妥当な結果となった。ケース4においては  $7.78m/s^2$  という非常に大きな加速度により液状化が発生した。これより、シルトを50%程度含む地盤であっても地震動が大きく地下水水位が高いと、液状化が発生するということが明らかとなった。また、用いた2つの土試料の分量が等しいケース2, 3, 5, 6の4ケースを比較すると、液状化抵抗は強い順に  $3 > 6 > 5 > 2$  となり、地表面付近の上層に位置する土質が液状化抵抗に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。とりわけ、ケース2のように液状化強度の低い土質材料が上層に位置することの影響は大きいと言える。

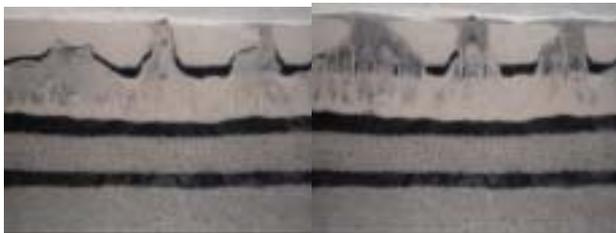
#### (3) 地表面および各層の沈下特性

各ケースの地表面沈下量の値より、ケース1, 2においては著しく値が大きく、ケース3では小さい値となった。



加振終了時

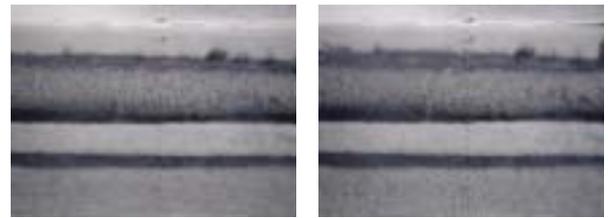
加振終了2.5秒後



加振終了5秒後

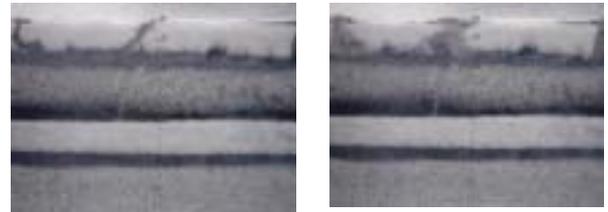
加振終了20秒後

図-3 ケース3における加振終了後の地盤挙動



加振終了時

加振終了10秒後



加振終了13秒後

加振終了60秒後

図-4 ケース5における加振終了後の地盤挙動

ケース3では、ケース1, 2に比較して入力加速度が1.5～2倍になっているにもかかわらず、地表面沈下量は1/5程度に抑制された。

また、全ケースを通じて、沈下量は砂層で大きくシルト混じり砂層で小さいという妥当な結果となった。本実験より得られた各層の沈下量は、間隙水の排出量との関連が大きいと考えられることから、時々刻々の間隙水挙動と沈下挙動には密接な関連があると推測できる。ケース2の沈下傾向からは、地表面付近の土層の間隙水の排出の影響で、下層の沈下が抑制された様子がうかがえる。一方、各層の沈下量は地盤の上載圧の影響も受けると考えられる。

#### (4) 間隙水挙動

ケース1, 2, 6のように地表面が砂層である場合とケース3, 4, 5のように地表面がシルト混じり砂層である場合では、間隙水挙動に大きな違いが見られた。前者の場合においては、液状化発生時の排水は瞬時に行われ、沈下の時間的遅れも生じていない。一方、後者の場合には、液状化発生時の排水に時間を要し、それに伴って表-1に示す沈下時間のとおり、沈下の時間的遅れが生じた。

ここで、沈下の時間的遅れが生じた3つのケースの地盤挙動について詳細を以下に述べる。

##### a) ケース3

ケース3における加振時の挙動は、下層である砂層の液状化が発生し、その間隙水排出の過程で上層であるシルト混じり砂層の支持力が失われ、地表面が沈下すると

いうものであり、沈下終了までに50秒を要した。

図-3にケース3における加振終了時、加振終了2.5秒後、加振終了5秒後、加振終了20秒後の様子を示す。これより、加振終了20秒後においても間隙水の排出が続いていたことがわかる。本ケースでは、上層が比較的透水性の低いシルト混じり砂のため、2層と3層の境界部に間隙水が滞留する傾向が見られ、これが要因となって間隙水の排出に時間的遅れを生じさせることとなったと考えられる。また、これらの一連の間隙水の滞留現象の影響で上層のシルト混じり砂層が浮遊状態となる現象も見られた。このような滞留・浮遊現象は北海道南西沖地震の際の現地調査でも確認されており<sup>3)</sup>、この挙動が側方流動の要因の一つとして考えられている。

一方、液状化発生時の地表面沈下に対して、間隙水の排出が影響することを考慮すると、土層境界部に間隙水が滞留することで、間隙水の排出が抑えられ、結果として地表面沈下量が抑制される形となったのではないかと考えられる。前節で述べたとおり、ケース3はケース1, 2と比較しても地表面沈下が抑制された結果となっているが、この「間隙水の滞留」と「沈下量の抑制」の定量的な相関関係の解明については今後の課題としたい。

##### b) ケース4

ケース4においては、全層がシルト混じり砂であり、透水性の低さの影響から間隙水が排出しにくく沈下終了までに、著しく時間を要した。

##### c) ケース5

ケース5における地盤挙動の特徴は、間隙水の排出開始までに相応の時間を要しているということである。図-4

にケース5における加振終了時，加振終了10秒後，加振終了13秒後，加振終了60秒後の様子を示す．これより，間隙水の排出が顕著に見られるまでに13秒の時間を要し60秒後まで間隙水の排出が続いていることがわかる．他のケースでは，加振のタイミングに連動するかたちで間隙水は地表面に排出されているが，ケース5では異なる現象が見られた．これについてケース3における地盤挙動との比較から，本ケースでは液状化層である2層の砂層の厚さが小さいことにより間隙水圧消散のエネルギーが弱くなり，間隙水の排出開始までに時間を要したのではないかと推測できる．これより，透水性の低いシルト混じり砂層の下に位置する砂層厚によって間隙水圧消散のエネルギーが変化し，結果的に沈下の時間的遅れに影響しているということが言える．

#### 4．まとめ

本研究では，細粒土層における液状化を対象に，6 ケースの地盤模型を用いて振動実験を実施し，実験結果より，地盤の液状化特性，沈下特性，間隙水挙動について考察した．

本研究により得られた結果をまとめると以下のとおりである．

- 1)全ケースの結果より，地表面付近の地盤特性が，地盤全体の液状化特性や液状化発生時の地表面沈下量および沈下時間に大きく影響を及ぼすと考えられる．とりわけ，ケース2のように液状化強度の低い土質材料が上層に位置することの液状化被害への影響は大きいと言える．また，実際の施工において地盤改良を施す場合には，地下水位付近の範囲のみ地盤改良を行うだけでも，相応の液状化対策の効果が期待できると本実験結果から推測できる．
- 2)全層をシルト混じり砂としたケース4においても $7.78\text{m/s}^2$ の加振で液状化が発生した．これまで，一般的に，シルト混じり砂は液状化しにくいとされてきたが，この結果より，シルトを50%程度含む地盤であっても地震動が大きく地下水位が高いと，液状化が発

生するということが明らかとなった．

- 3)ケース2の沈下傾向より，地表面付近の間隙水排出の影響で下層の沈下が抑制された様子がかがえたことから，細粒土地盤における時々刻々の間隙水挙動と沈下挙動には密接な関連があると推測できる．
- 4)加振時の間隙水挙動に対しても，地表面付近の地盤特性が大きく影響を及ぼすことが，全ケースの結果より明らかとなった．特に，地表面をシルト混じり砂としたケースにおいては，液状化発生時の排水に時間を要し沈下にも時間的遅れが生じた．
- 5)ケース3のように液状化層の上に透水性の低い地盤が存在する場合，加振時において層の境界部に間隙水が滞留するとともに上層が浮遊状態となる現象が見られた．このような滞留・浮遊現象は既往地震の現地調査結果と整合するものであり，土層境界が傾斜している場合においては側方流動の起因となる現象である．また，これらの間隙水の滞留現象により間隙水の排出が抑えられ，地盤全体の沈下量が抑制される傾向も見られた．
- 6)液状化する範囲が小さいと液状化時における間隙水圧消散のエネルギーは小さくなる．また，この場合に上層が透水性の低い地盤であると間隙水の排出開始が遅れ，結果的に沈下の時間的遅れに影響する．

#### 参考文献

- 1)西丸あずさ，森田年一，安原一哉：地盤の堆積条件が液状化時の間隙水挙動に及ぼす影響，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，2006年
- 2)森田年一，西丸あずさ，大和田祐加：層状砂質地盤の液状化に及ぼすシルトの影響，第41回地盤工学研究発表会発表講演集，2006年
- 3)陶野有隆：液状化による砂層の堆積構造の変化が強度特性に及ぼす影響に関する基礎的研究，文部省科学研究費補助金研究成果報告書，1998年

(2007.06.29 受付)

## CASE STUDIES OF LIQUEFACTION CHARACTERISTIC ON SILTY SAND LAYER

Toshikazu MORITA, Azusa SAIMARU and Takeshi HASHIMOTO

The damages were observed at many ground surface in 2000 Tottoriken-Seibu Earthquake. In order to study the mechanism of ground response during earthquake, shaking table tests were conducted on the silty sand deposit. We carried out shaking table tests on 6 type models. The results of shaking table tests suggested that ground characteristic of upper layer effect settlement of ground surface.