

## 液状化試験供試体の微視構造の非破壊評価法の基礎的検討

### Nondestructive Examination of Microstructure of the Sand Specimens for Liquefaction Test

山田かりん Karin YAMADA (広島大学工学研究科)  
高町茉莉 Mari TAKAMACHI (広島大学工学研究科)  
一井康二 Koji ICHII (広島大学工学研究院)

液状化試験では複数の供試体を必要とするが、供試体を破壊せずに、土の堆積状態や地盤内の細粒分の分布状態によって生じた供試体の性質の違い、特に微視構造の違いを把握する手法は未だ提案されていない。そこで本研究では、供試体の微視構造を非破壊的に把握する方法の開発を目指した基礎的検討として、供試体の作成方法及び向きの違いが土の吸水速度及び、保水性に与える影響を検討した。実験では、条件の異なる複数の供試体を作成し、吸水速度を計測した。また、土柱法によって供試体の水分特性曲線を作成した。実験結果より、供試体の作成手順の違いにより生じた砂の微視構造の違いは、土の吸水速度と保水性に影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：液状化，砂の微視構造，土の吸水性試験，土の保水性試験 (IGC : D03)

#### 1. はじめに

将来の液状化発生予測において、検討対象地点で試料を採取し、繰り返し三軸試験や中空ねじりせん断試験などの室内土質試験を行い、個々の地盤の特性を適切に考慮することが望ましいとされている。しかし、液状化試験の供試体の準備にはいくつかの留意点があり、それらは液状化試験結果に大きく影響することが明らかにされている<sup>1)</sup>。図-1は三軸圧縮・伸張方向の異方圧密応力履歴を与えて、その影響を調べた結果である<sup>2)</sup>。異方圧密応力比  $K < 1.0$  で三軸試験圧縮側の応力履歴を受けた供試体の強度は、 $K = 1.0$  で等圧圧密された供試体と変わらなかった。一方で  $K > 1.0$  で三軸引張側の応力履歴を受けた供試体の強度は、これよりもかなり増加したことが分かる。このような引張履歴は、圧密過程だけでなく、負圧を用いて供試体を自立させる過程においても、ピストンが固定されていたために軸方向の圧縮変形が妨げられたり、モールド内で作成した供試体の上面とギャップとの隙間があったりする不具合発生時に生じるので注意が必要である。

このように、液状化試験では慎重な供試体の準備が必要とされる。理由は、液状化強度が単に供試体の密度だけでなく微視構造の影響を受けるからである。このため、実際の液状化試験では、サンプリングから供試体作成過程における乱れの影響も考慮する必要がある。乱れの要因として、サンプリングに伴う振動や、せん断、応力解放、試料運搬時の振動、成型時に試料に加わる応力履歴などがある。この時の乱れは供試体の微視構造に影響しているが、さらに

乱れが進まないと供試体の密度変化には現れないと考えられる<sup>3)</sup>。また、供試体の微視構造は地盤の堆積条件や細粒分の分布状態によっても左右されると考えられる。例えば、図-2、図-3に示すように、同じ相対密度で供試体を作成しても、供試体作成方法や細粒分の含有率によって液状化強度が異なることが明らかにされている<sup>4),5)</sup>。

つまり、液状化試験においては、複数の供試体の微視構造が同様であることが重要である。供試体の微視構造を非破壊的に計測し、複数の供試体の性質の同一性を確認できると、液状化試験結果の解釈が容易になり、液状化予測の精度向上につながると考えられる。しかし、供試体を破壊せずに、土の堆積状態や地盤内の応力状態によって生じた供試体の微視構造の違いを把握する手法は、X線CT<sup>6)</sup>などのあまり一般的でない方法を除くと、未だ提案されていない。

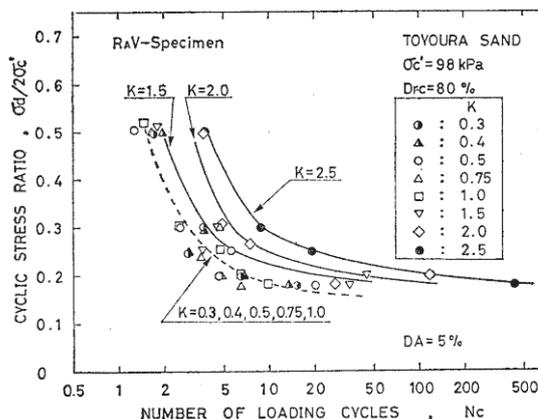


図-1 異方圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響<sup>2)</sup>

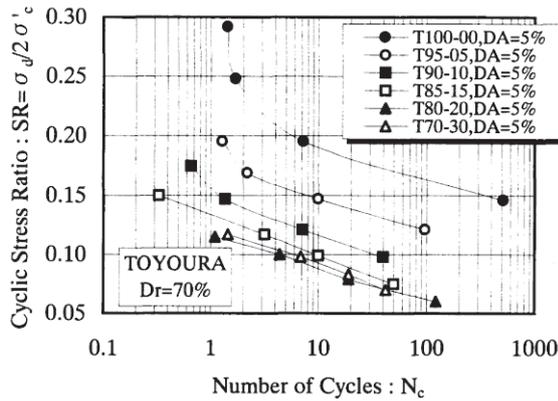


図-2 細粒分含有率が液状化強度に及ぼす影響<sup>4)</sup>

(TOYOURAは試料番号を指し、○○-△△は豊浦砂と細粒分との重量比を示している。例えば T85-15 とは、豊浦砂と細粒分を 85 : 15 の重量比で混合した試料のことを表している。)

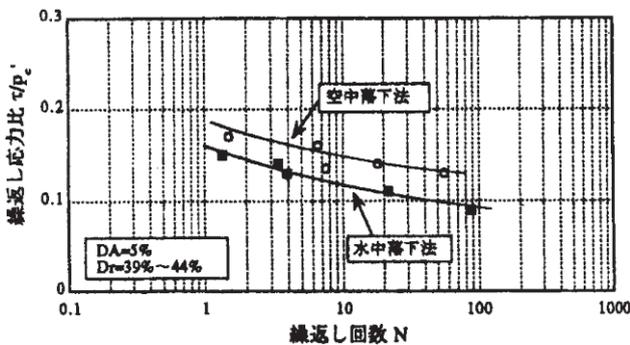


図-3 作成方法の異なる供試体の液状化強度<sup>5)</sup>

そこで本研究では、微視構造の違いを把握する方法の開発を目指し、土の保水性に着目した。本研究では、作成方法や堆積方向からの向きを変えた供試体の吸水速度を、微視構造を破壊しないという点で非破壊的に計測し、供試体の微視構造を評価する手法を提案する。土の保水性や吸水速度は間隙の大きさに依存するため、これらを計測することで、間隙径分布など微視構造を推定出来ると考えたためである。

## 2. 実験方法

### 2.1 土の吸水性試験

本実験では、図-4 に示す供試体ケースを用いて実験を行った。供試体ケースは内寸で1辺が9.5cmの立方体であり、底面に直径3mmの穴を6箇所開けて、そこから給排水できるように加工してある。以下に図-5 に示す実験手順について述べる。

Step 1: 空中落下法と水中落下法で試体を作成した。なお、供試体は相対密度が 50%となるように砂の落下

高さや水位を調節して作成した。

Step 2: 供試体を炉乾燥に入れて十分に乾燥させた後、質量を計測した。

Step 3: 図-6 に示すように、供試体の下部を 1.5cm 水につけ 10 分間隔ごとに供試体質量を計測した。

Step 4: 各測定時間での供試体質量及び炉乾燥後の供試体質量から、各測定時刻での含水比を算出した。

本実験の全実験ケースを表-1 に示す。ここで、表-1 に示す“Process”とは供試体作成手順の違いを示している。図-7 に供試体作成手順を示し、以下に Process 1, Process 2, Process 3 の供試体作成手順について述べる。また、実際に作成した供試体の相対密度を表-2 に示す。

#### <Process 1>

まず供試体ケースに空中落下法と水中落下法で砂を堆積させ、供試体を作成した。ここで空中落下法とは、漏斗を用いて 3~5cm の高さから砂を落下させ、供試体ケースに砂を 5 回に分けて堆積させることを示す。また、水中落下法とは、砂の表面からの水位が 2~3cm となるように水位を調節した上で、空中落下法と同様に砂を 5 回に分けて堆積させることを指す。このとき、水中落下法で作成した供試体に関しては、砂を堆積した後に排水を行った。この後、両方法で作成した供試体を炉乾燥に入れて十分に乾燥させた。

#### <Process 2 (飽和・凍結)>

Process 1 と同様に、まず供試体ケースに空中落下法と水中落下法で砂を堆積させた。このとき、空中落下法で作成した供試体に関しては、砂を堆積させた後、供試体ケースの底に開けた穴より給水し、供試体を飽和させた。飽和させた後、両方法で作成した供試体において排水を行い、供試体を凍結させた。最後に、Process 1 と同様に、両方法で作成した供試体を炉乾燥に入れて十分に乾燥させた。

#### <Process 3 (飽和・凍結・切り出し)>

まず、供試体ケースより大きな砂槽を用意して、砂槽に空中落下法と水中落下法で砂を堆積させた。このとき、空中落下法で作成した供試体に関しては、砂を堆積させた後、砂槽の底に開けた穴より給水して飽和させた。その後、砂槽から水を排水させ、冷凍庫に入れて凍結させた。この後、凍結した砂槽より供試体を 9.5cm 四方の立方体に切り出し、そのままの向き (Case 5 及び Case 7) と横向き (Case 6 及び Case 8) にして供試体ケースに入れた。最後に、Process 1 と同様に、両方法で作成した供試体を炉乾燥に入れて十分に乾燥させた。

液状化試験供試体の微視構造の非破壊評価法の基礎的検討

本実験では試料として豊浦標準砂を用いた。これは、後述する液状化強度との比較検討のためである。表-3 に試料の物理特性を、図-8 に粒度分布を示す。物理特性を調べる試験は、地盤工学会基準の土粒子の密度試験 (JIS A 1302)、砂の最小密度・最大密度試験 (JIS A 1324)、土の粒度試験 (JIS A 1304) に基づいて行った。

2.2 土の保水性試験

本実験では、土の保水性試験の1つである土柱法を行い

水分特性曲線を作成した。図-9 に示すように、内径 5.6cm、高さ 5cm の円筒をテープで繋ぎながら、円筒中に空中落下法と水中落下法で砂を堆積させ相対密度が 50%になるように供試体を作成した。供試体作成後は、供試体を十分に飽和させて1週間放置させた後、各円筒の含水比と土中水ポテンシャルを測定し、図-10 に示すように水分特性曲線を作成した。なお、定常状態は確認できていないが、1週間あれば供試体の特性の比較には十分であると考えた。

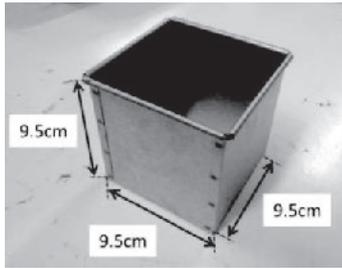


図-4 供試体ケース

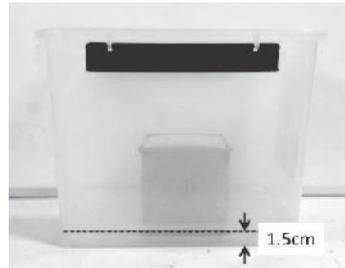


図-6 土の吸水性試験

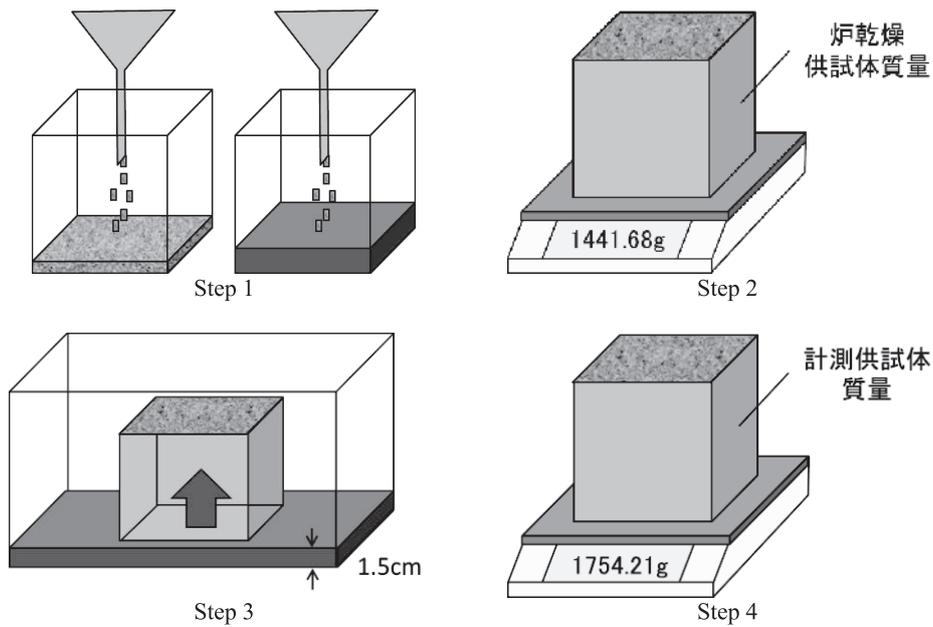
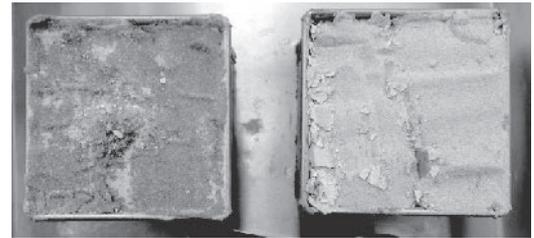


図-5 供試体作成手順

表-1 全実験ケース

Case	Process	供試体作成方法	向き
Case 1	Process 1	空中落下法	そのまま
Case 2		水中落下法	そのまま
Case 3	Process 2	空中落下法	そのまま
Case 4		水中落下法	そのまま
Case 5	Process 3	空中落下法	そのまま
Case 6			横向き
Case 7		水中落下法	そのまま
Case 8			横向き

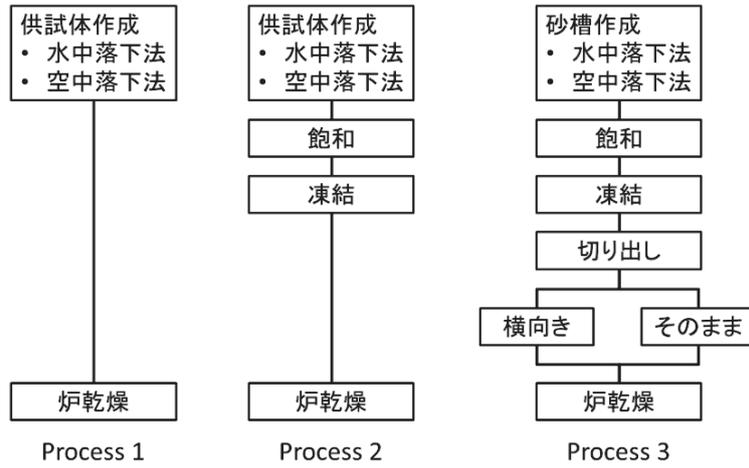


図-7 供試体作成プロセス

表-2 供試体の相対密度

Case	回数	Dr (%)
Case 1	1	50.2
	2	50.1
Case 2	1	47.5
	2	51.3
	3	50.4
Case 3	1	49.4
	2	43.4
	3	49.5
Case 4	1	49.4
	2	52.5
	3	50.1
Case 5	1	49.8
	2	54.3
Case 6	1	46.0
	2	51.0
	3	52.1
	4	51.5
Case 7	1	57.1
	2	47.7
Case 8	1	54.3
	2	52.9
	3	54.0
	4	53.2

表-3 試料の物理的特性

試料名	豊浦砂
土粒子密度	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) 2.627
最大乾燥密度	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> ) 1.655
最小乾燥密度	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> ) 1.345
最大間隙比	$e_{dmax}$ 0.934
最小間隙比	$e_{dmin}$ 0.591

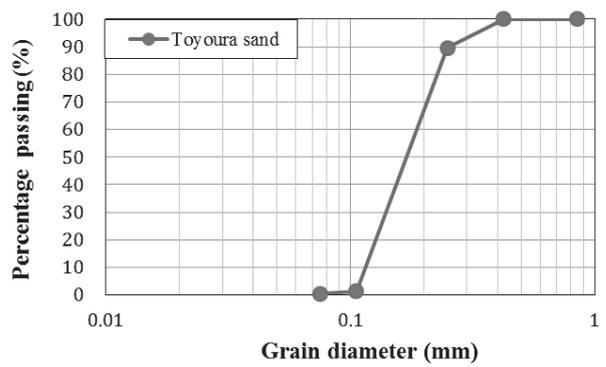


図-8 豊浦砂の粒径加積曲線

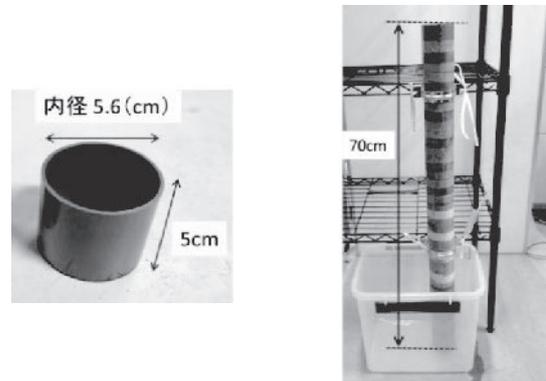


図-9 土柱法

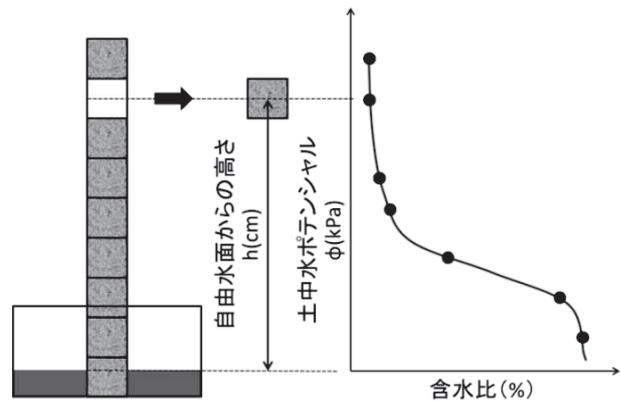


図-10 水分特性曲線の作成方法

### 3. 実験結果

#### 3.1 土の吸水性試験

図-11～図-13 に全実験結果を示す。図-11～図-13 の凡例に示す( )内は何回目の実験であったかを示している。今回、同じ実験ケースであっても実験結果にばらつきが見られた。これは、同様の供試体を作成することが難しいためである。このため、各実験ケースについて、実験結果が近いものを2ケース抽出し、検討を行うこととした。

図-11 は空中落下法で供試体を作成した場合 (Case 1) における実験結果と、水中落下法で供試体を作成した場合 (Case 2) における実験結果の比較である。これより、水中落下法で作成した供試体は空中落下法で作成した供試体に比べて、吸水速度が大きいことが見てとれる。これは、空中落下法で供試体を作成した場合は土粒子の間隙の大きさが均一に形成されるのに対し、水中落下法で作成した場合は土粒子の間隙の大きさにばらつきが生じるためだと考えられる。間隙の大きさにばらつきが生じると、小さい間隙における大きなサクシジョンの影響で、吸水速度が大きくなると考えられる。

図-12 (a) に空中落下法で供試体を作成した場合 (Case 1, Case 3, Case 5) における実験結果を示す。また、図-12 (b) に水中落下法で供試体を作成した場合 (Case 2, Case 4, Case 7) における実験結果を示す。ここで、Case 1, Case 2 は Process 1 で供試体を作成した場合、Case 3, Case 4 は Process 2 で供試体を作成した場合、Case 5, Case 7 は供試体を Process 3 で作成した場合である。図-12 (a) (b) より、Case 1 と Case 3, Case 2 と Case 4 では実験結果にそれほど違いが見られない。これより、空中落下法、水中落下法のどちらの方法で供試体を作成しても、それぞれ飽和させて凍結させたことによる供試体への影響は小さいと考えられる。また、Case 1, Case 3 と Case 5 の実験結果には

それほど違いが見られないのに対し、Case 2, Case 4 と Case 7 では実験結果に違いが見られる。これは、砂槽から供試体を切り出す際に、土粒子が乱れたことが影響していると考えられる。水中落下法で供試体を作成した場合、先に述べたように土粒子の間隙の大きさにばらつきが生じ、間隙の小さい部分があると考えられる。供試体の切り出しの際に土粒子が乱されると、この間隙の小さい部分が広げられるため、Case 7 ではサクシジョンが低下して吸水速度が抑えられた可能性が考えられる。

図-13 (a) に空中落下法で供試体を作成した場合 (Case 5, Case 6) における実験結果を示し、図-13 (b) に水中落下法で供試体を作成した場合 (Case 7, Case 8) における実験結果を示す。ここで Case 5, Case 7 は供試体の向きがそのままの場合の実験結果であり、Case 6, Case 8 は供試体の向きが横向きの場合の実験結果であって、供試体の向きの違いによる土の吸水速度の違いを比較している。図-13 (a) (b) より、空中落下法、水中落下法のどちらの方法で供試体を作成しても、供試体の向きがそのままの場合より、横向きの方が吸水速度が大きいことが見てとれる。

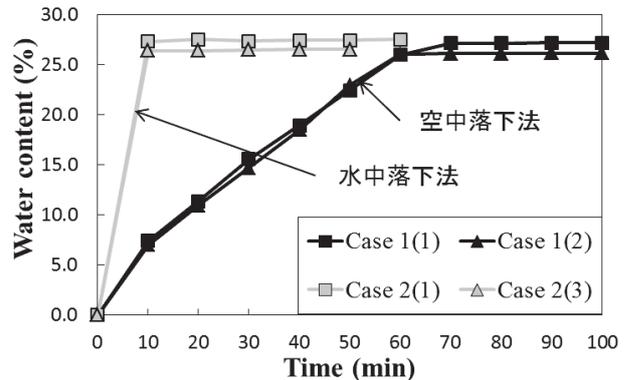


図-11 供試体作成方法による違い

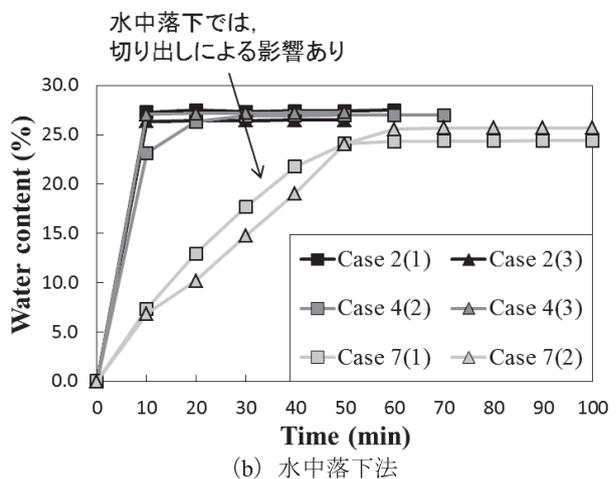
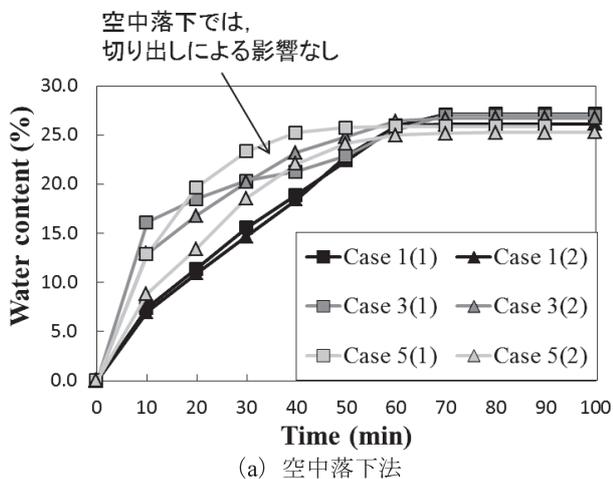
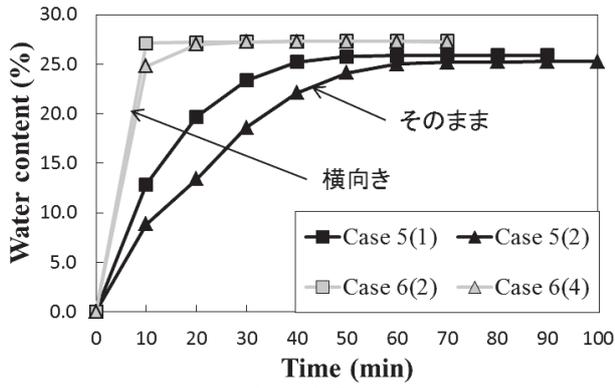
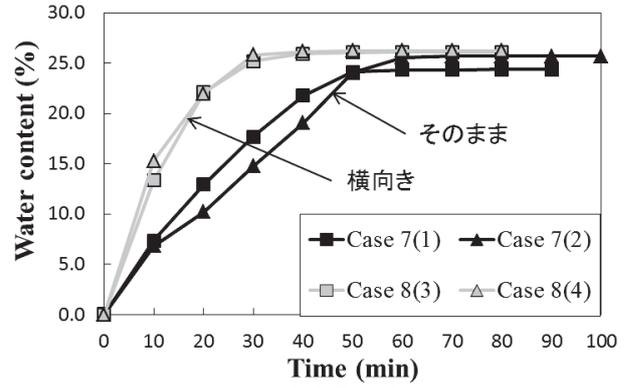


図-12 供試体作成プロセスによる違い



(a) 空中落下法



(b) 水中落下法

図-13 供試体の向きによる違い  
(供試体は全て切り出しを含むプロセス (Process 3) で作成)

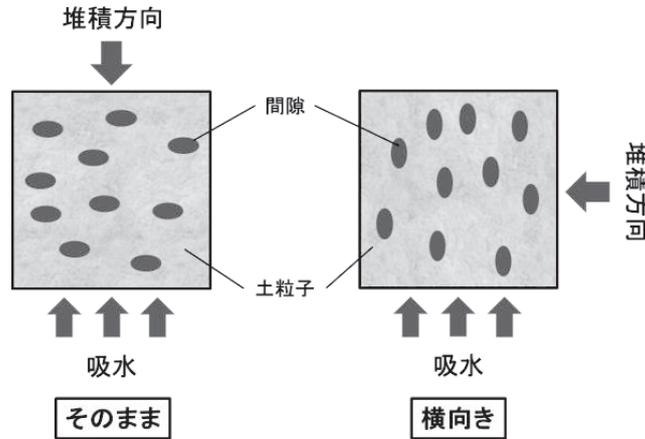


図-14 間隙の異方性のイメージ

この理由として、空中落下法、水中落下法で砂を堆積させると、土粒子間の間隙が水平方向に広がることを考えられる。つまり、供試体を横向きにするだけで、吸水方向に対し土粒子間の間隙が狭くなりサクションが大きくなることで、吸水速度が大きくなったと考えられる。図-14にそのイメージ図を示す。

### 3.2 土の保水性試験

図-15に空中落下法と水中落下法で供試体を作成した場合の、土柱法による実験結果を示す。これより、水中落下法で作成した供試体は、空中落下法で作成した供試体に比べて保水力が低いことが見てとれる。これは、水中落下法で供試体を作成すると間隙の大きさにばらつきが生じるためだと考えられる。つまり、水中落下法で作成した供試体は空中落下法で作成した供試体に比べて間隙の大きい部分があり、その間隙の水は保水されなかったと考えられる。

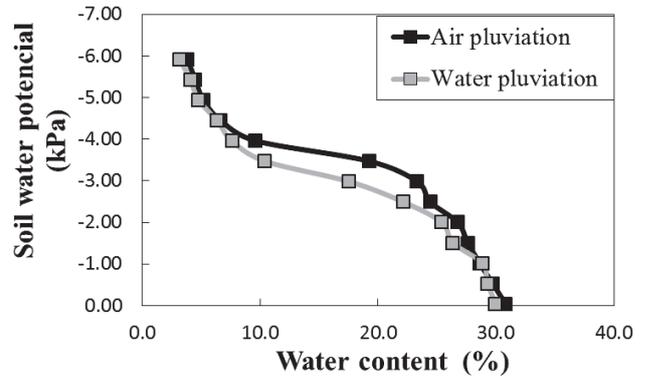


図-15 水分特性曲線 (主排水曲線)

## 4 間隙分布の推定

### 4.1 間隙分布の推定方法

本実験では土の保水性試験 (土柱法) の実験結果を用いて間隙分布の推定を行い、間隙分布と液状化強度曲線の間係について検討を行った。以下に間隙分布の算出方法について述べる。

土壌中の間隙を管径  $d$  のパイプと仮定すると、毛管上昇高さ  $h_c$  と間隙の間には式 (1) の関係がある。

$$h_c = \frac{2T_s \cos \alpha}{\gamma_w d} \quad (1)$$

ここで、 $T_s$ ：水の表面張力 (N/m)、 $\alpha$ ：水、土粒子表面、大気の上における接触角 ( $^\circ$ )、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量 ( $\text{kN/cm}^3$ ) である。

式(1)において、 $25^\circ\text{C}$ における水の表面張力を  $T_s=0.074\text{N/m}$  とし、接触角  $\alpha$  が  $0^\circ$  として計算を行うと式 (2) を得る。

$$h_c = \frac{0.15}{d} \quad (2)$$

図-16 は土柱法における上から 1～3 番目の供試体の間隙を、管径  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  のパイプとしてモデル化した図である。それぞれ管径  $d_i$  は、 $i$  番目の供試体中心位置までの毛管上昇高さに対応した管径である。また、管径  $d_i$  以外の間隙はないものとして仮定する。図-16 における 1 番目、2 番目、3 番目の供試体の中心位置における断面を図-17 に示す。図-17 より、1 番目の供試体では管径  $d_1$  の間隙のみ飽和しており、2 番目の供試体では管径  $d_1$ ,  $d_2$  の間隙が飽和しており、3 番目の供試体は管径  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  の間隙が飽和していると考えることができる。

ゆえに、管径  $d_i$  の間隙による間隙比を  $e_i$  とすると、 $i$  番目の供試体の飽和度は式 (3) のように表わすことができる。

$$S_{ri} = \frac{\sum_{k=1}^i e_k}{e} \times 100 \quad (3)$$

ここで、 $e$  とは全体の間隙比であり、何番目の供試体であっても  $e$  は等しいものとする。土の保水性試験から、1～ $i$  番目の供試体の飽和度が分かると、式 (3) より  $e_1$ ,  $e_2$ , ...,  $e_i$  の順に管径  $d_i$  の間隙による間隙比を算出することができる。 $e_i$  が分かると、 $e$  と  $e_i$  から管径  $d_i$  の分布を求めることができる。

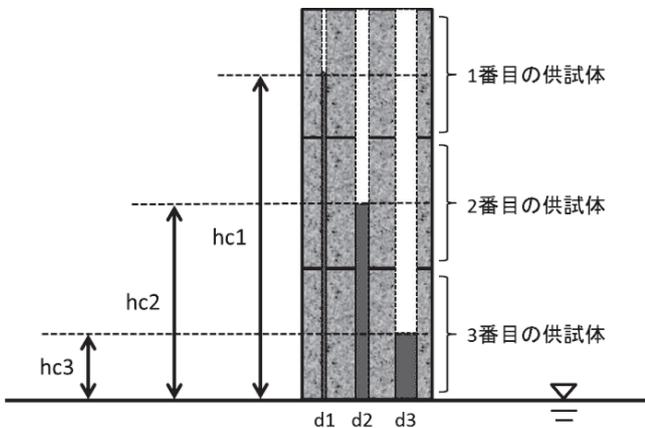


図-16 供試体の間隙をモデル化した図

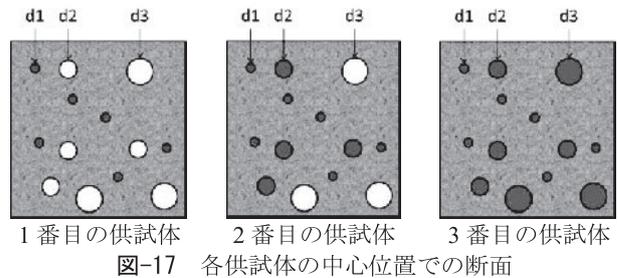


図-17 各供試体の中心位置での断面

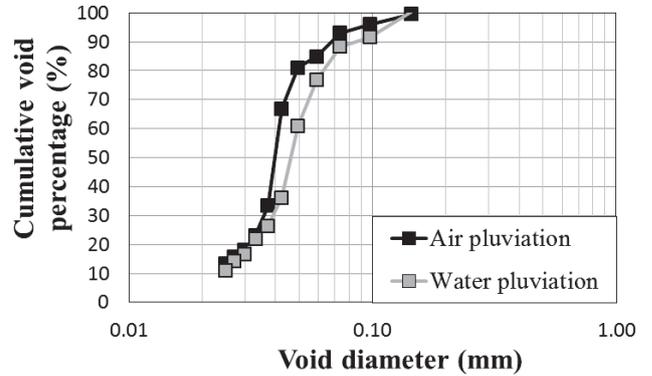


図-18 推定された間隙分布

#### 4.2 推定結果

図-18 に空中落下法と水中落下法で供試体を作成した場合の間隙径分布を示す。これより、水中落下法で作成した供試体は、空中落下法で作成した供試体に比べて間隙径が大きいことが見てとれる。

3.2 節で述べたように、土の保水性試験では、水中落下法で作成した供試体は空中落下法で作成した供試体に比べて保水力が小さくなった。これは、水中落下法で作成した供試体の場合、間隙の大きい部分の間隙水が排水されたためだと考えられ、これは間隙分布の推定結果と一致する。

また、3.1 節で述べたように、土の吸水性試験では、水中落下法で作成した供試体は空中落下法で作成した供試体に比べて吸水速度が小さくなった。これは、水中落下法で作成した供試体内の間隙の小さい部分で発生するサクシジョンが大きいためだと考えられる。しかし、図-18 に示す間隙分布では、間隙径の小さい部分で、水中落下法と空中落下法に違いが見られない。これは、土柱法による土中水ポテンシャルの測定範囲が狭いことが原因であると考えている。

なお、土柱法に代わる土の保水性試験時として、吸引法(水頭法)があるが、この試験法を用いた場合、測定可能なポテンシャルは  $16\text{kPa}$  程度となる。毛管上昇高さ  $h_c$  に換算すると  $163\text{cm}$  に相当し、式 (2) よりそのときの間隙径を推定すると約  $0.01\text{mm}$  となる。今後、本実験での土の吸水性試験の実験結果と整合する間隙径分布が得られるか検討する必要がある。

下井田らによれば、図-3 に示すように、水中落下法で

作成した供試体は、空中落下法で作成した供試体に比べて液状化強度が小さい<sup>5)</sup>。これは、水中落下法で作成した供試体では大きな間隙が多いことにより、粒子が間隙に落ち込みやすく、液状化強度が低下していると考えることができ、間隙分布の推定結果と一致する。

## 5 結論

本研究では土の保水性に着目し、供試体の微視構造を土の吸水性試験及び保水性試験を用いて非破壊的に評価を試みた。本実験で得られた結論を以下に示す。

- (1) 空中落下法で供試体を作成した場合より、水中落下法で作成した場合の方が吸水速度が大きくなった。この結果より、水中落下法で作成した供試体は、空中落下法で作成した供試体に比べて、間隙の大きさにばらつきが生じ、小さい間隙が存在すると考えられる。これは、土の吸水性試験が小さな間隙の分布の推定に用いることができる可能性があることを示している。
- (2) 空中落下法、水中落下法のどちらの方法で供試体を作成しても、供試体の飽和、凍結によって吸水速度は変化しなかった。しかし、水中落下法で供試体を作成した場合では、切り出しによって吸水速度が小さくなった。これは、供試体の切り出し時に間隙径分布が変化する可能性を示している。
- (3) 空中落下法、水中落下法のどちらの方法で供試体を作成しても、堆積方向が鉛直方向のままより、横向きに変えた方が吸水速度が大きくなった。これは土粒子間の間隙が水平方向に広く、供試体を横向きにすることで、吸水方向に対し土粒子間の間隙が狭くなりサクションが大きくなる可能性があることを示している。
- (4) 水中落下法で作成した供試体は、空中落下法で作成した供試体に比べて排水が早く、保水力が小さくなった。これは、水中落下法で作成した供試体は空中落下法で作成した供試体に比べて間隙の大きい部分があり、その間隙水が排水されやすいことを示している。

- (5) 水中落下法で作成した供試体は、空中落下法で作成した供試体に比べて間隙径が大きいと推定された。これは、同じ相対密度であっても水中落下法で作成した供試体は空中落下法で作成した供試体に比べて液状化強度が小さいことと整合している。

今後の課題として、まず土の吸水性試験については、実験結果を用いた間隙径の推定が行えていない。今後、吸水速度に着目して間隙径の分布の推定を行う方法をする必要がある。次に、土の保水性試験については、土柱法による実験を行ったが、土柱法では計測可能な土中水ポテンシヤル範囲が狭いことが課題である。今後、吸引法(水頭法)の実験装置の改良を行い、供試体の作成方法及び向きの違いについて、土の保水性試験をさらに行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，pp.645-648，2006.
- 2) 山下聡，土岐祥介，三浦清一：異方圧密履歴による構造異方性砂の液状化挙動の変化．土木学会論文報告集，Vol.51，No.2，pp.167-178，1990.
- 3) 三上武子，一井康二：液状化試験の精度と結果の解釈についての一考察，地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」，Vol.29，No.1，pp.115-123，2011.
- 4) 矢島寿一，沼田佳久，中根淳：細粒分を含む砂質土の液状化特性と液状化強度評価，土木学会論文集，No.624，pp.113-122，1999.
- 5) 下井田貴史，木下貴夫，佐藤研一，吉田信夫：供試体作成方法に着目した砂の液状化特性.土木学会西部支部研究発表会，1997.
- 6) 大谷順，弘中淳市，椋木俊文，平井貴雄：鉛直荷重下における杭先端地盤の3次元支持力特性，土木学会論文集C，Vol.62，No.2，pp311-319，2006.

(2014年6月23日 受付)