

地盤液状化後の再堆積過程における 地下水流れの影響

一井 康二¹・木戸口 拓海²

¹ 正会員 関西大学教授 社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1)
E-mail: doboku@jsce.ac.jp

² 非会員 関西大学卒業生 社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1)
E-mail: ichiistudents@gmail.com

過去に液状化した地盤は、再堆積時の密度増加により液状化強度が増加していると考えられるが、実際には再液状化の被害がしばしば確認されている。この原因として、地点特有の事情、例えば地下水流が存在する地盤では、液状化後もゆるく再堆積して再液状化しやすいのではないかと考えた。そこで、地下水流の流れを模擬できる装置を作成し、液状化後の再堆積過程における水の流れの影響を実験的に検証した。初期地盤作成時の密度では、水流がないときより、水流下で堆積する砂の密度が大きい結果となった。しかし、液状化後は、水流があるときに再堆積した砂の密度増加は、水流がないときよりも小さいことがわかった。このことから、地下水に流れが存在する環境の地盤は砂がゆるく再堆積するため再液状化しやすいという可能性が示唆された。

Key Words: *liquefaction, Re-liquefaction, ground water, water flow, sedimentation*

1. 研究の背景と目的

地震で地盤が液状化したとき、噴砂・噴水とともに地盤が沈下する。こうして間隙が小さくなった地盤は密になっている訳であり、その後の地震では液状化しにくくなると期待できる。しかし、実際には、再液状化として、過去に液状化した地盤が次の地震でも液状化してしまうこともある。例えば2003年5月の三陸南地震では東松島市（宮城県）で液状化が発生した。そして、2003年7月に起きた宮城県北部地震においても同一地点で液状化が確認されている¹⁾。このように液状化した地盤が再び液状化してしまうメカニズムを明らかにすることは、今後の地震被害の予測や防災に役立つと考えられる。

そこで、本研究では再液状化に関して、その地点の特有の事情で液状化しやすくなっている可能性を考えた。具体的には、地下水に流れが存在する環境で堆積する地盤は、ゆるく堆積して液状化しやすいのではないかと考えた。例えば、地下水流がある河川堤防と、地下水流がない海の埋立地では液状化強度が違うのではないかと考えた。また、その違いは液状化後の再堆積の場合も同様であるだろうと考えた。そこで、地盤の堆積過程における地下水流の影響を実験的に検討する。

例えば、既往の液状化後の再堆積過程の研究として、大原・山本は液状化させた後の再堆積時の密度増加と地盤の液状化抵抗の増加の程度を調べている²⁾。彼らの論文によると完全液状化を生じた後の排水圧密によって供試体の相対密度が増加するため、1, 2, 3 回目の順で液状化が生じにくくなっている。

しかし、このような既往の実験的研究では、液状化地盤の作成時に土槽内の水が静止している。そのため、各方向から土粒子に加わる水圧は均等である。実際の地盤では地下水に圧力がかかり水の流れがある場合もある。よって、本研究では地下水流を模擬できる装置を作成し、地盤の堆積過程と液状化後の再堆積過程における水の流れの影響を実験的に検証する。

2. 実験概要

実験は2つのフェイズからなる。第1フェイズは初期地盤の堆積過程であり、容器に砂を降らしていき、堆積した砂の密度を測定した。第2フェイズは液状化地盤の再堆積過程であり、第1フェイズで作成した地盤を液状化させ、沈下量から再堆積後の密度を求めた。

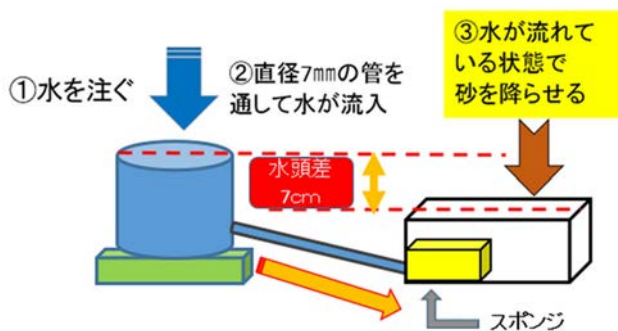


図-1 実験装置の概要（水流下の砂の堆積実験）

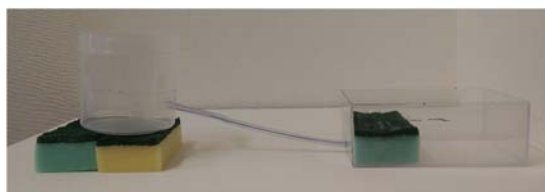


図-2 実験装置の設置状況（水流下の砂の堆積実験）

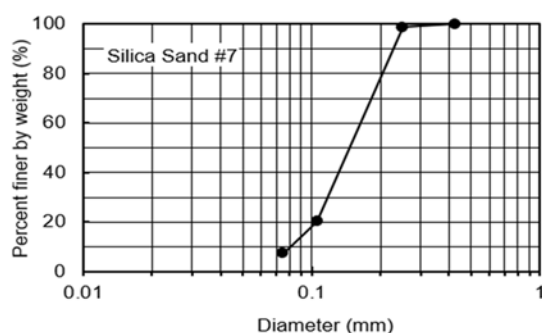


図-3 実験で用いた7号珪砂の粒度分布

(1) 実験方法（砂の堆積実験）

一定速度の水の流れを与えるため、容器を別の容器にストローでつなぎ、7 cmの水頭差を与えて、水が流れ込む装置を図-1のように作成した。これにより常に水が流れている状態を作り出すことができ、地下水の流れを想定することができる。そして、この上から砂を降らせた。

砂の受け皿には15.5 cm×10.5 cm×5.6 cm（体積911.4 cm³）で95 gの角型容器を使用した。その中には水流の勢いを調整するためのスポンジをセットした。スポンジの大きさは5.8 cm×10.5 cm×3.3 cm（体積200.97 cm³）で重さは10 gである。また、角型容器を直径7 mmのストローで丸形容器と図-2のように接続した。

実験では7号珪砂を使用した。粒度分布を図-3に示す。土粒子密度は2.62 g/cm³である。そして、試料の最小密度は1.192 g/cm³で、最大密度は1.541 g/cm³であった。

できるだけ均一に砂を降らせるため、高さを一定に保ちながら、粉ふるいを使用した。さらに、より均一性を上げるために図-4のように金網（網戸）を通過させた。

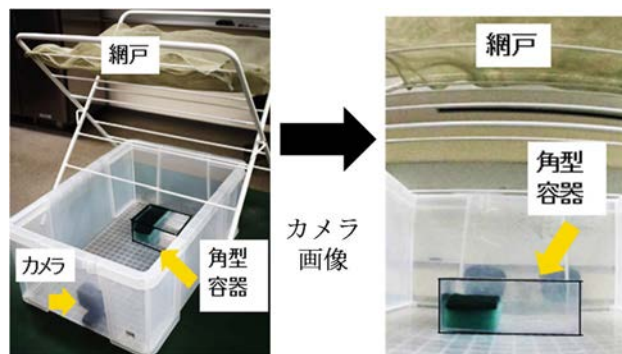


図-4 実験装置の設置状況（水流下の砂の堆積実験）

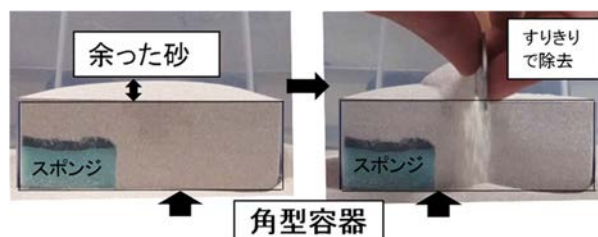


図-5 すりきりによる体積の調整（水流下の砂の堆積実験）

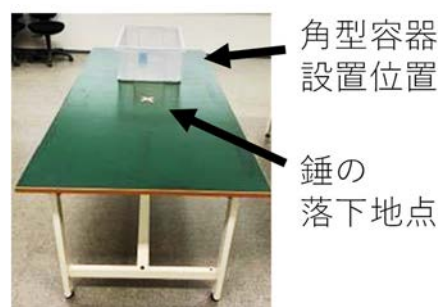


図-6 実験状況（テーブルおよび落下地点の設定）

砂の堆積状況は、図-4に示したカメラ位置より観察する。また、堆積終了後、密度測定のため図-5のようにすりきりをして高さを一定にした。そして、砂の重量を測定し、密度を求めた。

(2) 実験方法（液状化後の再堆積実験）

地盤作成後に振動を与えて液状化させ、液状化後の沈下量から再堆積時の密度を計測した。これは砂の堆積実験に引き続いて実施したため、容器内に堆積している砂はすりきり後のものである。

加振方法は、簡単のため、テーブル上に角型容器を置き、500 gのおもり（水を入れたペットボトル）を高さ30 cmから5回自由落下させた。テーブルと落下地点の設定状況の写真を図-6に示す。なお、水がこぼれるため、角型容器は写真奥のケース内に設置している。

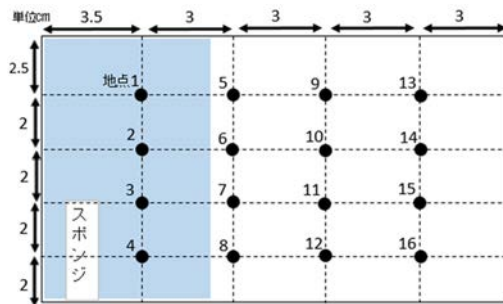


図-7 容器内の沈下量計測地点

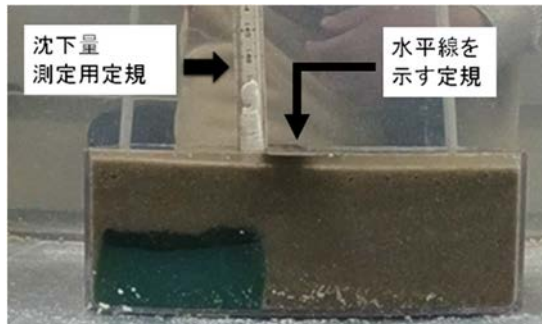


図-8 容器内の沈下量の計測方法

そして、図-7のように容器内に16地点を設定して沈下量を測定した。また、沈下後の密度を算出し、それぞれのケースの密度増加を比較した。なお、沈下量の測定は、図-8のように目盛りを添付したアクリル棒に水平器を取り付けて垂直に保ちながら、容器の両端にさしわたした水平線(水平器を設置した定規)と地盤表面の高さの差を測定した。

3. 実験結果

(1) 砂の堆積実験

スポンジの空気を抜き、容器内に水を満タンにしてから、砂を降らせて密度を測定した。砂の堆積の途中経過を図-9に示す。水の流れがないケースでは、スポンジの端面にくっつくように砂の厚さが変化している。一方で、水の流れがある場合は、スポンジの端面の段差が全くなっている。これは水の流れの影響と思われる。

砂の堆積終了後のすりきり途中の写真を図-10に示す。かなり緩く砂が堆積しているため、すりきり中に表面に水が浮いてきていることが分かる。

再現性を確認するため、水流なしと水流有りのそれぞれについて、2回ずつ実験を行った。実験結果を図-11にまとめて示す。



(a) 水の流れがない場合



(b) 水の流れがある場合

図-9 容器内の砂の堆積状況



図-10 すりきり中の砂の表面の状況

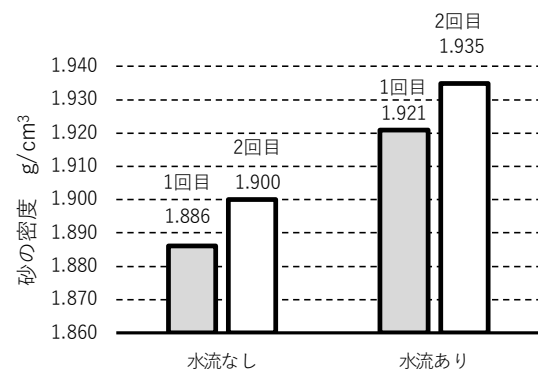


図-11 水流の有無による砂の堆積密度の違い

水流の有無にかかわらず、1回目より2回目の方が堆積砂の密度は大きくなった。しかし、それぞれの1回目と2回目の違いよりも、水流の有無による違いの方が大きく、水流がある方が密度が大きくなった。水の流れという外力があることにより、より締まった状態で砂が大成したものと思われる。

なお、スポンジの影響の有無を検討するため、水流なしのケースについては、スポンジなしのケースも実施した。その結果、スポンジがない場合の密度は、 1.734g/cm^3 と、非常に緩い状態となった。

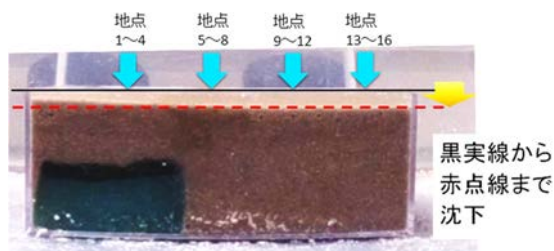


図-12 水流なし（1回目）の液状化後の沈下の様子

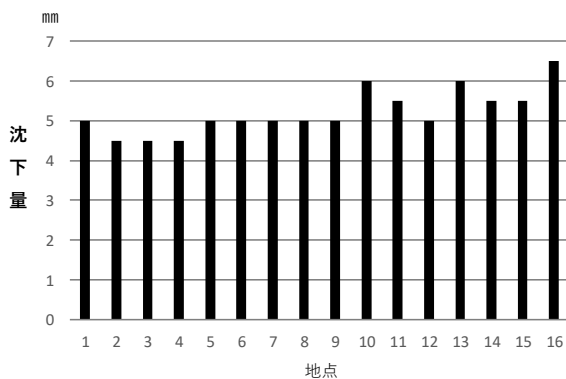


図-13 水流なし（1回目）の液状化後の沈下（計測結果）

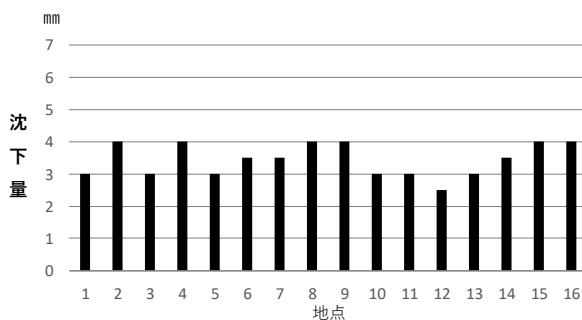


図-14 水流あり（1回目）の液状化後の沈下（計測結果）

スポンジを設置することによって、砂を降らせている途中にもスポンジ上部にたまった砂が滑り落ち、この時の衝撃等で、より密に堆積したと考えられる。

(2) 液状化後の再堆積実験

加振のためのおもりの落下を重ねるごとに、水分が表面に染み出し、液状化の発生が確認できた。水流なしのケース（1回目）について、液状化後の沈下の様子を図-12に示す。液状化後は4.5mm～6.5mmの沈下が見られた。そこで、最後のおもりの落下からおおよそ70秒後、沈下が落ち着いた時に沈下量を計測した。計測結果を図-13に示す。スポンジを敷いている地点1～4に関しては、その他の地点よりもわずかに沈下量が少ない。

水流がある場合（1回目）の沈下量の計測結果を同様に図-14に示す。図-13に示した水流なしのケースより、明らかに沈下量が小さい。また、全体の沈下量が小さい

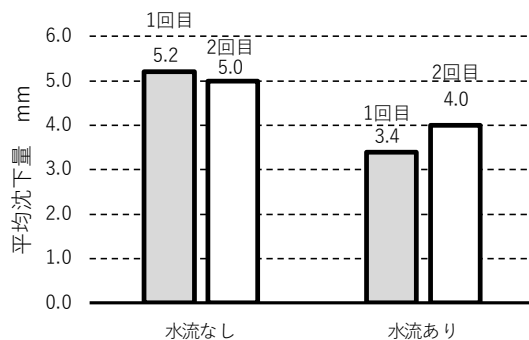


図-15 水流の有無による液状化後の沈下量の違い

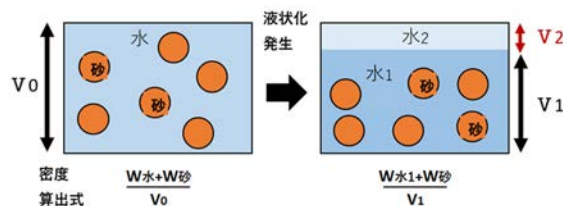


図-16 液状化後の地盤の構造と密度の算出

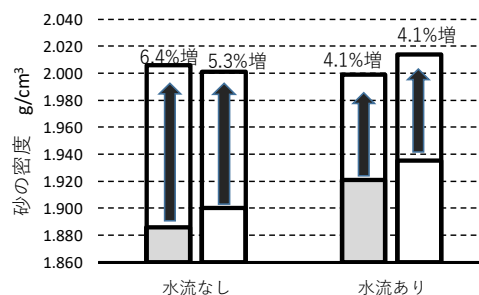


図-17 液状化後の地盤密度の増加

ため、スポンジを敷いている地点1～4に関して沈下量が小さくなるという特徴は、図-13と異なり、明瞭には確認できない。

全計測地点の平均沈下量は、水流なしで（1回目）で5.2mm、水流ありで3.4mmである。計測地点ごとのばらつきがそれなりに大きいため、以下は平均沈下量で比較することとし、計測結果を比較したものを図-15に示す。実験ケースごとのばらつきはあるが、水流の有無についてそれぞれ2回の実験を通じて、水流ありのケースの方が沈下量は小さい。ただし、図-11に示したように、初期の密度が水流ありのケースの方が大きいため、水流ありのケースの沈下量が小さくなることは自然である。

次に、液状化後の地盤の密度を比較する。この実験では、液状化後の地盤（容器内の土粒子と間隙水と地盤上部の自由水）で体積と質量ともに変化する。この液状化後の構造を図-16に示す。液状化後の地質の体積は図-16に示すV1であり、質量も水のV2分を除いて考える必要がある。

そこで、容器の高さから沈下量分を減算した高さで体

積 VI を求めることとした。また、地盤上部の自由水の密度は 1 g/cm^3 と仮定して、自由水部分の水の重量を求め、全体の重量から減算し、密度を算出した。

液状化後の地盤密度の増加の算出結果を図-17 に示す。液状化後の密度が上昇率には差があり、水流があるケースのほうが若干小さい上昇率となった。つまり、水の流れがあると、液状化後の密度増加は小さく、若干ではあるが水の流れがないときと比べて密な状態には達しにくい。簡単に言えば、再液状化が発生しやすいといえる。ただし、初期堆積時に水流があるケースの方が密度が若干大きいため、再堆積後の密度は水流の有無にかかわらず、ほぼ同程度であった。つまり、水流のない地盤より水流のある地盤の方が再液状化が起こりやすいといっても、再堆積時の密度上昇が比較的小さいという意味であって、水流のある地点で再堆積した地盤が特に液状化しやすくなるという意味ではない。

4. 結論

本研究では再液状化に関して、その地点の特有の事情で液状化しやすくなっている可能性を考えた。具体的には、地下水に流れが存在する環境で堆積する地盤は、ゆるく堆積して液状化しやすいのではないかと考え、地盤の堆積過程における地下水の流れの影響を実験的に検討した。得られた結論を下記に示す。

- 1) 砂の堆積実験では、水の流れがない場合より水に流れがある場合のほうが堆積密度は大きかった。この時の水の流れは地下水の流れとは異なるが、水の流れがある地点に堆積する地盤のほうが密になるといえる。
- 2) 地下水に流れがある場合とない場合のモデル地盤を作成し、振動を与えて液状化を発生させたあと、沈

下量を計測した。水に流れがあるケースのほうが沈下量が少なく、密度の上昇率が小さかった。つまり、水の流れがあると、液状化後の密度増加は小さく、若干ではあるが水の流れがないときと比べて密な状態には達しにくい。簡単に言えば、再液状化が発生しやすいといえる。

ただし、初期堆積時に水流があるケースの方が初期の密度が若干大きいため、再堆積後の密度は水流の有無にかかわらず、ほぼ同程度であった。つまり、水流のない地盤より水流のある地盤の方が再液状化が起こりやすいといっても、再堆積時の密度上昇が比較的小さいという意味であって、水流のある地点で再堆積した地盤が特に液状化しやすくなるという意味ではない。

また、今回のモデル実験では、水の流れの制御が難しく、必ずしも実地盤で観測されるような地下水流を模擬できているとは限らない。今後、河川堤防などでの後背地からの水の流れの計測事例などをもとに、実験条件を精査して、詳細な検討を行うことが望ましい。

謝辞：本研究は、科学技術研究費・基盤研究(A)（一般）「一斉遠心実験・数値解析による社会基盤施設の地震時挙動予測手法の高精度化」（代表者・飛田哲男関西大学准教授）のサポートを受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 若松加寿江・先名重樹：2011 年東北地方太平洋沖地震による東北地方の液状化発生と土地条件，日本地震工学会論文集，Vol.14, No.2, pp.124-143, 2014
- 2) 大原資生・山本哲朗：振動台による飽和砂の再液状化特性に関する実験的研究，土質工学会論文報告集，Vol.22, No.2, pp.123-132, 1982.

(Received September 10, 2019)
(Accepted *****, ****)

INFLUENCE OF THE UNDERGROUND WATER FLOW IN THE RE-DEPOSITION PROCESS OF A GROUND AFTER LIQUEFACTION

Koji ICHII and Takumi KIDOGUCHI

Liquefaction damage was often observed at the sites where liquefaction was occurred before. It maybe related to the site specific characteristics, and we assume the underground water flow at these sites made the loose deposition of the ground to make the multiple occurrence of liquefaction. In order to examine the above-mentioned assumption, we made the device which could simulate a flow of the underground water. we measured the density of deposited ground with and without water flow. As a result, after giving vibrations to liquefy, the density increase of the re-deposited sand after liquefaction with the water flow was smaller than that of the case without a water flow. It means that the soil density will not increase a lot after liquefaction when groundwater flow exists. Thus, the place with the underground water flow is easy to be liquefied.