

大規模水路における波浪による地盤の液状化に関する一実験

鈴木高二朗* ・ 多田 清 富** ・ 下迫健一郎***
山崎 浩 之**** ・ 姜 閔 求*****

浚渫土砂による人工干潟や人工浅場の造成等で見られる緩く堆積した地盤の液状化とその後の高密度化現象, さらには変動過剰間隙水圧による液状化現象を明らかにするため, 大規模水路において縮尺効果が問題とならない大規模な実験を行った。実験は人工的に緩く堆積させた粒径 0.2 mm の砂地盤に, 波高 0.5~2.5 m, 周期 3~7 s の規則波を作用させて行った。その結果, 高橋ら (1997) が粒径 0.08 mm の砂を用いて行った実験で観測された残留過剰間隙水圧の発生とその後の高密度化が観測された。高密度化後の相対密度は 79% で, 高密度化後は変動過剰間隙水圧による液状化も観測されなかった。

1. はじめに

浚渫土砂による人工干潟や人工浅場等の造成が現在各地で検討されているが, これらの地盤は緩く堆積した状態で造成されており, 造成後, 波浪が作用すると, 地震時に見られるような残留過剰間隙水圧の発生を伴った大規模な液状化が発生する可能性が高い。このような地盤の近くに構造物を設置した場合には波浪による液状化によって大規模な破壊に至る可能性がある。

しかし, 高橋ら (1997) が粒径の小さな砂 (0.08 mm) を用いて行った小型の造波水理模型実験では, 緩く堆積した地盤は, 液状化が発生した後, 高密度化し, その後は, 液状化が発生しないという結果も得られている。そのため, 施工の順序によっては, こうした液状化による破壊現象を防ぐことができる可能性もある。

一方, 締め固まった後の地盤の液状化については, 変動過剰間隙水圧による液状化による構造物の沈下も考えられる (善, 1993) が, 小型の造波水理模型実験では, このような液状化が観測された例はなく, より大規模な実験によってその性質を明らかにする必要がある。

本研究では, このような緩く堆積した地盤の液状化とその後の高密度化現象, さらには変動過剰間隙水圧による液状化現象を明らかにするため, 縮尺効果があまり問題とならない現地規模の大規模実験を行うこととした。

2. 実験方法

(1) 実験水路と計測器

実験は港湾空港技術研究所, 大規模波動地盤総合水路において行った。水路全長 184 m のうち, その中央部に延長 67 m, 層厚 4 m の地盤層が設けられている。水深は 4.5 m で, 周期 $T=3\sim7$ s, 波高 $H=0.5\sim2.5$ m の規則波を 200 波程度, 連続して作用させている。

水路内には図-1 に示すように, 波高計, 流速計, 間隙

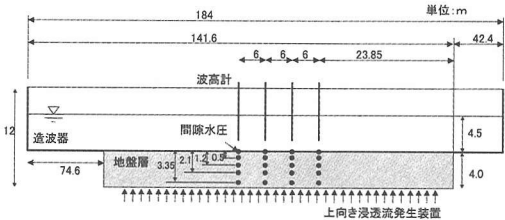


図-1 実験水路断面図

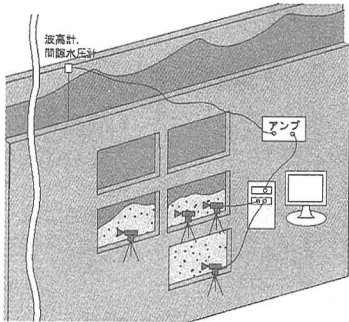


図-2 画像計測と波高, 間隙水圧の同時計測

表-1 実験砂フラタリーサンドの密度 (地盤下部 0.6 m)

	密度 (km/m ³)	相対密度
最小密度	1403	0
初期地盤	1480	31%
波作用後	1600	79%
最大密度	1654	100%

水圧計を設置している。間隙水圧計は水路側面に設置されており, 設置時に受感部とポーラスストーンの間の空気を抜いている。

この他, 液状化時の地盤の変位やひずみを計測するため, 図-2 に示すように観測窓からビデオ撮影によって地盤の動きを観測した。この際, ハンディーカムのような一般的な光学機器と間隙水圧等のアナログデータとの同期をとるため, 2 台のビデオ画像と間隙水圧等のアナ

* 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
** (独法) 港湾空港技術研究所 耐波研究室
*** 正会員 (独法) 港湾空港技術研究所 耐波研究室長
**** 正会員 (独法) 港湾空港技術研究所 動土質研究室長
***** 正会員 三星物産 建設部門技術研究所

ログデータを同時に一台の PC 内に取り込んだ。ビデオ画像は IEEE 1394 経由で、15 fps でサンプリングし、歪み補正、座標変換した後、地盤の表層変位、液状化した地盤の砂の流速、砂粒子の軌跡、ひずみ等を求めた。

また、簡易動的コーン貫入試験により、液状化前後の地盤強度を計測した。

(2) 実験に用いた砂と初期地盤

用いた砂は中央粒径 0.2 mm のフラタリーサンドといわれる砂であり、透水係数 $k=0.0005 \text{ m/s}$ 、最大、最小密度はそれぞれ、表—1 に示すように $1654, 1403 \text{ kg/m}^3$ である。

浚渫土砂が緩く堆積してできるような緩い地盤を作成するため、地盤下部から上向き浸透流を作用させ、地盤を一旦ボイリングさせて柔らかい状態とした。水路には地盤層下部に、図—1 のように注水パイプが設置されており、実験前に上向き浸透流で締め固まった地盤をボイリングさせ、緩い地盤を作成した。

なお、 $4.3 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2)$ の上向き浸透流を作用させてボイリングさせ、その後、浸透流を止めて、砂を沈降させると、地盤層厚は 4 m ほどになっている。後述するように、周期 5 s 、波高 2 m 以上の波を作用させると、地盤は締め固まり地盤層は 3.7 m ほどになる。締め固まった後の地盤表層から 0.6 m 下部の密度、相対密度は 1600 kg/m^3 、 79% であり、地盤層厚の変化から推定すると、初期地盤の密度、相対密度は 1481 kg/m^3 、 31% である。

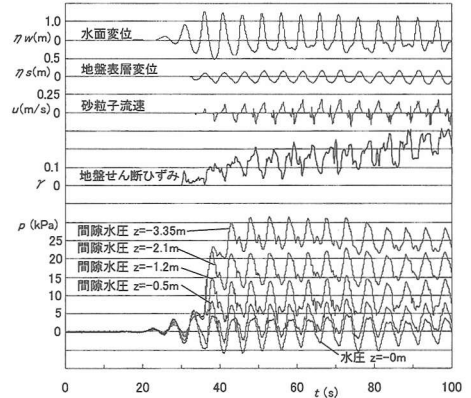
3. 液状化の発生と液状化時の地盤の挙動

図—3 は緩く堆積した地盤に周期 $T=5 \text{ s}$ 、波高 $H=2.0 \text{ m}$ の波を作用させた場合の水面変位 η と地盤内の間隙水圧 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 さらにビデオ画像から得た地盤表層変位、地盤内部流速、せん断ひずみである。

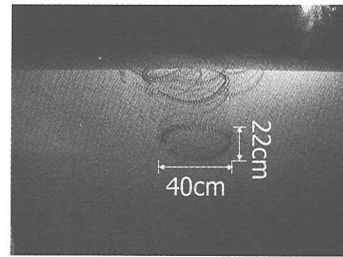
波が作用すると、地盤は液状化し、造波後 $t=32 \text{ s}$ から地盤表層が動き始めると、全振幅約 0.3 m で上下動している。 $T=32 \sim 45 \text{ s}$ では、地盤表層の動きは水面変位と同じように動いているが、時間が経つにつれて水面変位と逆の位相で動くようになる。

液状化した地盤の流速は徐々に大きくなり、水平方向、鉛直方向、それぞれ、約 $0.2, 0.1 \text{ m/s}$ である。流速波形がゼロになる時間があるが、これは水平方向の変位が最大になる際、地盤の動きが止まるからであり、砂粒子の軌跡を見るとその状況が分かる。

図—4 は一周期間の画像の各画素について最小の輝度値を抽出したものである。砂地盤内部に黒い粒子（汚れ等）があると、黒は輝度値が小さいため、黒い粒子の一周期間の軌跡（砂粒子の軌跡）を見ることができる。波の水粒子の運動と同じように、砂粒子も楕円運動をして



図—3 液状化時の地盤変位、流速、ひずみ、間隙水圧 ($T=5 \text{ s}$, $H=2.0 \text{ m}$)



$T=7.0 \text{ (s)}$, $H=1.5 \text{ (m)}$

図—4 砂地盤の楕円運動（砂粒子の軌跡）

いる。また、流速からも類推されたように、水平方向の粒子の動きが最大となる場所で、砂の動きが止まっているのが分かる。

せん断ひずみ γ は、4 点のトレーサー粒子の位置を抽出し、大根田ら (1984) の画像解析手法によって求めた。砂が徐々に岸側へ移動していたため、せん断ひずみがドリフトしている。地震では、せん断ひずみが 5% 程度になった時点で液状化とみなしており、この定義からすると、図—3 では造波後 $t=30 \text{ s}$ で液状化したことになる。なお、場所によっては砂が沖側へ移動している場所もあり、せん断ひずみのドリフトは、波による質量輸送とは違う現象である。水路内に発生する部分重複波の影響等が出ているのではないかと推測されるが、原因は不明である。

一方、間隙水圧は $t=32 \text{ s}$ 以降、徐々に上昇し、液状化に特徴的な残留過剰間隙水圧が発生しているのが分かる。また、地盤下層の方が表層より、残留過剰間隙水圧が上昇しきるまで時間がかかっており、表層部の方が早く液状化することが分かる。また、間隙水圧の変動成分（変動間隙水圧）は、液状化後、地盤上層から下層までほぼ同じ位相で発生している。

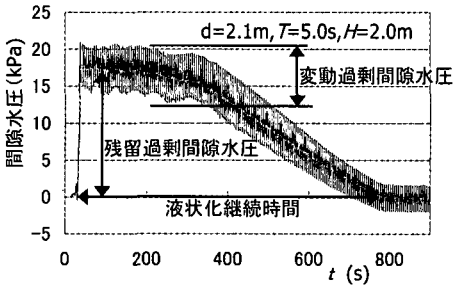


図-5 地盤の高密度化と間隙水圧の変化

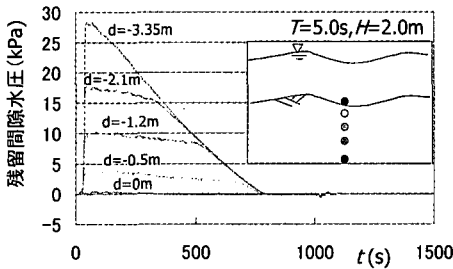


図-6 残留過剰間隙水圧の消散

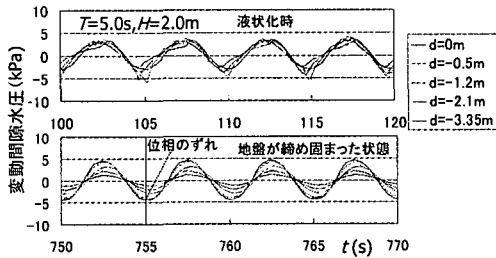


図-7 地盤の締め固まりの変動間隙水圧の変化

4. 液状化後の地盤の高密度化

(1) 高密度化と間隙水圧

残留過剰間隙水圧により地盤内部の間隙水が徐々に地盤表層から抜けていくと、液状化による残留過剰間隙水圧は徐々に消散する。図-5は、地盤深さ2.1mでの間隙水圧の時系列波形である。また、図-6は、間隙水圧の1周期間の移動平均をとることにより、残留過剰間隙水圧のみを分離して表示したものである。造波開始後 $t=750$ sには残留過剰間隙水圧がゼロになっている。このような残留過剰間隙水圧の消散は、地震による液状化や高橋ら(1997)が行った細粒砂を用いた小型造波実験でも見られた現象であり、間隙水が地盤表層から抜ける際に噴砂が見られる場合もある。ただし、今回の実験では、砂の透水係数が大きいためか、噴砂を見ることはできなかった。

図-7は、間隙水圧から残留過剰間隙水圧を差し引い

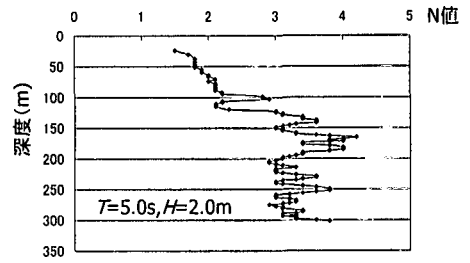


図-8 締め固まった後の地盤強度 (N_d 値)

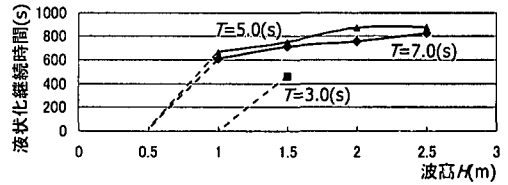


図-9 周期・波高と液状化継続時間

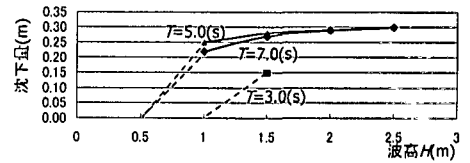


図-10 周期・波高と地盤沈下量

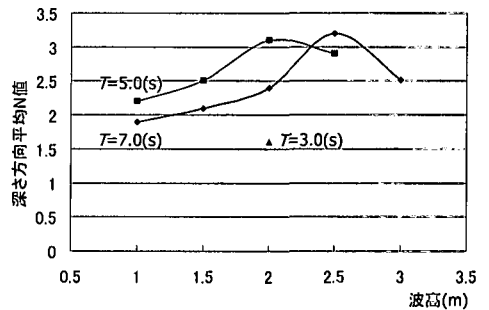


図-11 周期・波高と高密度化後の地盤強度

て得た変動間隙水圧である。液状化時には間隙水圧が地盤表層から下層まで、同位相、同振幅で発生しているが、地盤が高密度化するにつれて、間隙水圧は位相が遅れ、減衰しながら地盤下層に伝わっている。

(2) 高密度化と地盤強度の増加

表-1に見られるように、波によって地盤は締め固まると、密度、相対密度は 1480 kg/m^3 、0.31から 1600 kg/m^3 、0.79へと大きくなる。図-8は、地盤が高密度化した後の簡易動的コーン貫入試験から得られた地盤強度(N_d 値)を示している。初期地盤では、 N_d はゼロで、コーンが自沈して地盤底部まで達していたが、地盤が高密度化することによって、 N_d 値が大きくなり、深さ3mで

3～4である。

(3) 波高、周期と高密度化との関係

図-9は、図-5のように定義した液状化の継続時間と波高、周期との関係である。液状化の発生限界は、周期3sで波高1.5m、周期5、7sで波高1mである。また、液状化の継続時間は、波高が大きいほど長い。また、周期は5sの方が7sの場合より、継続時間が長い。

図-10は、波高、周期と高密度化による地盤沈下量との関係である。地盤沈下量と残留過剰間隙水圧の継続時間の傾向はよく一致しており、液状化が発生した深さと液状化の継続時間が関連していることが分かる。

図-11は、波高、周期と高密度化後の地盤強度 N_d 値との関係である。 N_d 値は、深さ方向の平均値を用いている。この場合も、図-9、10の関係と一致している。

(4) 高密度化後の変動過剰間隙水圧による液状化

図-12は、高密度化後の変動過剰間隙水圧の鉛直分布と有効土被り圧との関係である。変動過剰間隙水圧が有効土被り圧より大きくなると、液状化が発生すると考えられている(善, 1993)が、今回の実験の範囲ではいずれの周期、波高でも有効土被り圧より大きくならなかった。相対密度が80%まで高密度化した状態では、変動過剰間隙水圧による液状化は発生しにくい可能性がある。

(5) 地盤の膨張によって発生する変動水圧の負圧

図-13は、 $T=5.0$ s, $H=2.0$ mでの水面変位、地盤変位と間隙水圧である。この図に見られるように残留過剰間隙水圧をともなって液状化が発生する場合、変動過剰間隙水圧に鋭い負圧のピークが見られる。こうした負圧は、Fodaら(1991)や高橋ら(1997)で見られている。負圧のピークは、地盤表層の変位が上昇する際に発生している。一方、地盤表層の下降時には、そのような負圧は発生していない。したがって、このような負圧は、地盤が上昇しようとする際、地盤骨格が膨張しようとして発生している可能性がある。

(6) 液状化を伴わない地盤の高密度化

(1)～(4)では、激しい液状化によって残留過剰間隙水圧が発生し、その後、残留過剰間隙水圧が消散することで、地盤が高密度化する状況について述べてきた。また、周期3s、波高0.5mの波高の小さい条件では液状化が発生なかったと述べたが、詳細を見ると地盤表層数mmの部分は締め固まっており、波をかけてしばらくすると表層に砂澱が発生するようになった。

この表層のみが締め固まった地盤に図-9で液状化が発生したようなより大きな波を作用させても液状化は発生しなかった。図-14は、このときに見られた地盤内の砂粒子の軌跡を示すものである。液状化は発生しなかったものの、徐々に地盤が高密度化し、砂粒子が沈下して

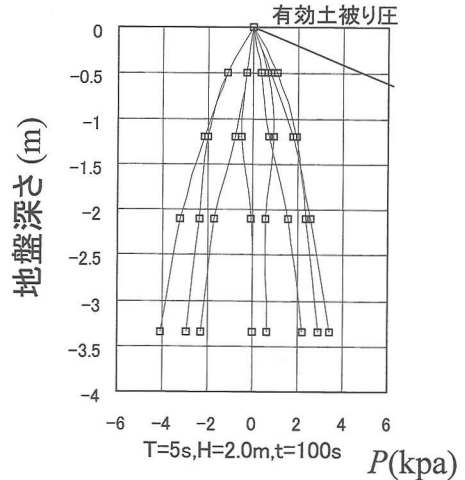


図-12 周期・波高と高密度化後の地盤強度

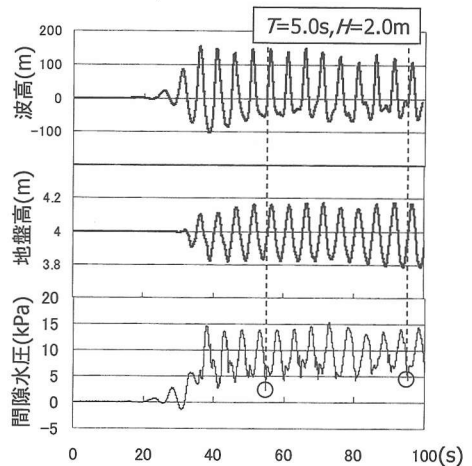


図-13 地盤の膨張によって発生する変動水圧の負圧

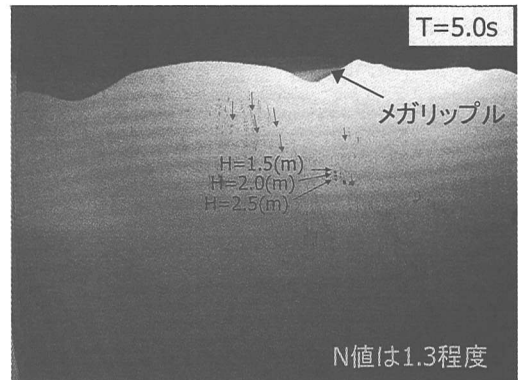


図-14 液状化を伴わない地盤の高密度化

いる。

また、初期地盤では、 N_d 値がゼロであったが、徐々に

(1)底部まで高密度化 (2)再液化化により底部まで高密度化 (3)液状化しないで徐々に高密度化

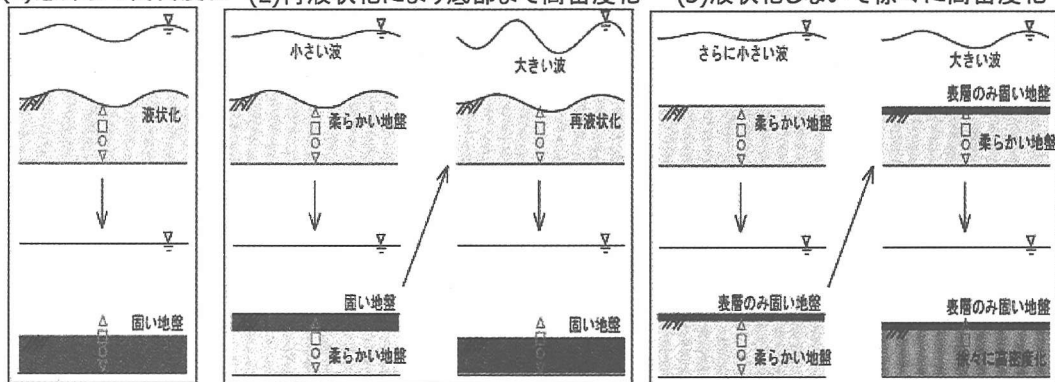


図-15 地盤の高密度化のパターン

締め固まり N_d 値は 1.3 程度になっている。依然強度は小さいが、繰り返し波が作用するにつれ、液状化が発生した場合と同様に高密度化するものと推定される。

こうした液状化をともしない高密度化現象は、今回の実験で初めて見られたものであり、これまでに行われてきた小型実験も含めてまとめると、高密度化現象には図-15のような3パターンがあるものと考えられる。すなわち、(1)液状化をとまなわって一度に地盤表層から下層まで高密度化する。(2)小さい波高の波で地盤表層のみが高密度化するが、さらに大きな波高の波が作用すると再び液状化し、地盤下層まで高密度化する。(3)小さい波高の波で地盤表層のみが高密度化すると、その後、より大きな波を作用させても液状化が発生しないが、波の繰り返し作用により徐々に高密度化していく。

5. おわりに

水深 4.5 m、波高 0.5~2.5 m、周期 3, 5, 7 s の現地規模の条件で、中央粒径 0.2 mm、透水係数 0.0005 m/s の海浜砂を用いて緩く堆積した地盤の波浪による液状化に関する実験を行い、以下の現象を観察した。なお、初期地盤は上向き浸透流によって、地盤をボイリングさせ、緩くした状態で実験した。

1) 緩く堆積した地盤に波浪が作用すると、地盤は残留過剰間隙水圧をとまなわって液状化し、砂粒子は波の水粒子と同様に楕円軌道を描いた。

2) 残留過剰間隙水圧は、間隙水が徐々に地盤表層から抜けていくことにより消散し、地盤は高密度化した。地盤の液状化とその後の高密度化にともなう間隙水圧の変化は高橋ら (1997) の粒径 0.08 mm の砂を用いて行っ

た小型実験結果と同様であった。

3) 初期地盤および高密度化後の密度と相対密度は、それぞれ、 1481 kg/m^3 , 31% と 1600 kg/m^3 , 79% であった。

4) 液状化時の砂地盤の楕円運動流速は $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$ であり、せん断ひずみは 5% を越えていた。

5) 波高が大きいほど、液状化の継続時間、液状化後の地盤沈下、地盤強度 (N_d 値) の増加量は大きくなる。また、周期 3~7 s の条件では、5 s で最も液状化の程度が大きい。

6) この他、液状化が発生しなくても、波の繰り返し作用により地盤が徐々に締め固まる新たな現象が見られた。

謝辞：本研究を行うにあたって、大嵯菜々子港湾空港技術研究所耐波研究室研究員、長岡科学技術大学実習生石川ゆき子氏他、耐波研究室、動土質研究室の方々からご協力を頂いている。ここに深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 大根田秀明・梅原靖文・樋口嘉章・入澤一明 (1984): 波の繰り返し载荷を受ける粘性土地盤の安定性に関する実験的研究, 港研報告, Vol. 23, No. 3, pp. 127-151.
- 善 功企 (1993): 海底地盤の波浪による液状化に関する研究, 港研資料, No. 755, 112 p.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・姜 関寿・常数浩二 (1997): 細粒砂地盤の波による液状化に関する一実験, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 916-920.
- Foda, M. A., S. Y. Tzang, Y. Maeno (1991): Resonant Soil Liquefaction by Water Waves, GEO-COAST'91, Vol. 1, pp. 549-554.