

相対密度に着目した防波堤周辺地盤の 波浪による液状化に関する水路模型実験

FLUME TEST ON WAVE-INDUCED LIQUEFACTION AROUND
A BREAKWATER IN TERMS OF RELATIVE DENSITY

富裕一郎¹・善功企²・陳光齊³・笠間清伸⁴・梁順普⁵

Yuitiro TOMI, Kouki ZEN, Guangqi CHEN, Kiyonobu KASAMA and Yan Soon Bo

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²フェロー 博(工) 九州大学教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 理博 九州大学准教授 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 博(工) 九州大学助教 大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁵正会員 博(工) 特別研究員 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

A flume model experiment is newly developed to simulate the wave-induced liquefaction in seabed on a reduced scale of 1:100, and examine influential factors such as the relative density of seabed on the mechanism of wave-induced liquefaction. This experiment was carried out under these conditions; the depth of water, 17cm, the wave period, 1.0s, the incident wave height, 5.5cm, the thickness of permeable layer, 35cm, and the relative density, D_r (%), 20~60. In order to satisfy similarity law in 1g gravitational field, the polymer fluid was used to change the permeability of seabed. The main conclusions obtained from this study are as follows; 1) When the relative density is about 20~40%, wave-induced liquefaction due to the increase in residual excess pore water pressure were observed in deep seabed, and shear failure due to wave force were observed in shallow seabed. 2) When the relative density is about 50~60%, wave-induced liquefaction due to the increase in residual excess pore water pressure were not observed in the present experimental condition. 3) Vertical deformation of seabed decreases with increasing density while the shape of seabed surface is similar regardless of the relative density.

Key Words : Liquefaction, Relative density, Similarity law, Wave, Flume test

1. はじめに

近年, 海岸構造物等が暴波来襲時において, 海底支持地盤内に沈み込む被害が顕在化している. その原因として, 海底の砂地盤が波浪の作用によって液状化することが善¹⁾, 名合ら²⁾によって指摘され, 波浪による変動水圧によって海底地盤が液状化に至る条件が研究されてきた.

このような海底地盤の液状化を対象とした研究として, 例えば, 前野ら³⁾は, 波浪による防波堤および周辺部の動的挙動をVOF-FEMモデルを用いて再現し, 解析モデルの有用性を示した. 関口ら⁴⁾は, 液状化フロント進展モデルを拡張し, 液状化の発生から液状化の進展, 液状化土の凝固・圧密までの過程の予測を可能とした. 高橋ら⁵⁾は, 水路模型実験によって緩く堆積した地盤の波浪による液状化現象を再現し, 液状化後の締め固まり現象について報告している.

しかしながら, 波浪による液状化現象に関する研究はそれほど多くはなく, これらの現象を室内模型実験により再現し, 液状化発生に及ぼす影響要因について実験的に検証することが必要である. この海底地盤の液状化に及ぼす影響要因には, 水理学的要因として, 波浪の周期や波高など, 地盤工学的要因として, 地盤の密度, 透水性, 粒度, および透水層の厚さなどが挙げられる. われわれの研究グループでは, これまで, 周期, 波高, および透水層の厚さが及ぼす影響について検討した⁶⁾.

また, 通常重力場における模型実験では, 過剰間隙水圧の発生や消散に代表される圧密現象に関する時間相似則を満足させることが困難であり, 相似則を考慮するために, 遠心力場波浪実験や, 縮尺効果あまり問題とならない, 現地規模の水路模型実験が実施されている.

そこで本研究では, 粘性を増加させたポリマー溶液を用いて地盤の透水性を小さくすることで相似則

を考慮し、水路模型実験を行うことで、波浪による防波堤周辺地盤の液状化に及ぼす地盤の相対密度の影響について検討を行った。

2. 実験方法と実験条件

図-1 に本実験で用いた実験装置を、図-2 に計測器配置図を示す。水路幅は 400mm で、防波堤模型の幅も水路幅に合わせた。地盤の透水層は 350mm で、試料として豊浦硅砂を用い、水中落下法で目標の相対密度に作製した。それ以深の地盤は低透水層とするために、相対密度 80% で作製した。水深は 170mm である。縮尺は標準的な防波堤の 1/100 とし、模型の比重は、実物と同じ値に調整した。捨石マウンドには碎石 (2~11g/個) を使用した。表-1 に実験条件を示す。流体は、波浪伝播と地盤圧密に関する時間相似則を同時に考慮するために高粘性のポリマー溶液、または比較のために水を用いた。透水試験により、ポリマー溶液を用いた際の地盤の透水係数は水の場合の約 1/60~1/70 倍になるように設定した。地盤の相対密度は、20~60% に変化させた。作用波は、すべて正弦波とした。防波堤および地盤の変形状況を調べるために、防波堤および地盤の様子をビデオカメラで撮影した。水圧計は、深度 0, 4, 9,

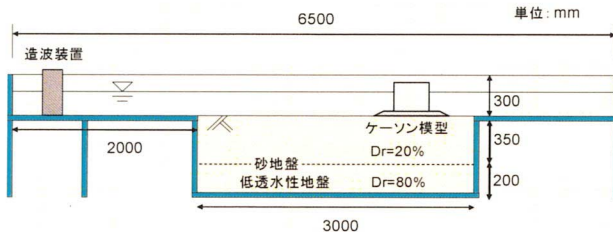


図-1 実験装置

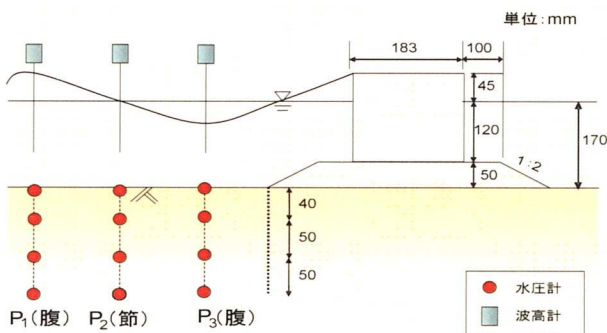


図-2 計測器配置図

表-1 実験条件

Case	流体	相対密度(%)	空隙率(%)	周期(sec)	入力波高(cm)
1	水	23	47.2	1.0	5.5
2		30	46.4		
3		35	45.9	1.2	9.0
4		35	45.9		
5	ポリマー溶液	20	47.5	1.0	5.5
6		30	46.4		
7		40	45.3		
8		50	44.3		
9		60	43.0		

14cm に設置し、造波装置側から P_1 , P_2 , P_3 地点とした。波高計は、 P_1 , P_2 , P_3 上に設置した。なお、本実験では、粘性が大きくなることによる波の再現性については、具体的にレイノルズ数を比較するなどして検討していない。

3. 透水係数について

本節では、重力場における水路模型実験での相似則を考慮するために、ポリマー溶液を用いて地盤の透水係数を 1/60~1/70 倍と設定するまでの過程を示す。

波浪伝播と地盤圧密を考慮した、地盤中の流れを支配する重要な要因として、 C で表される排水係数¹⁾が知られており、式(1)で示される。

$$C = \frac{c_v}{l^2} \cdot T \quad (1)$$

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (2)$$

ここで、 c_v :圧密係数、 l :層厚、 T :周期、 k :透水係数、 m_v :体積圧縮係数、 γ_w :水の単位体積重量である。実物の地盤における排水係数を C_p 、模型での排水係数を C_m とおき、

$$C_p = \frac{c_{vp}}{l_p^2} \cdot T_p \quad (3)$$

$$C_m = \frac{c_{vm}}{l_m^2} \cdot T_m \quad (4)$$

と表す。本論文では、 $C_p = C_m$ のとき相似則は満足され则认为、式(3)、(4)を連立させ、式(5)のように展開した。

$$k_m = \left(\frac{T_p}{T_m} \right) \cdot \left(\frac{l_m}{l_p} \right)^2 \cdot \left(\frac{m_{vm}}{m_{vp}} \right) \cdot \left(\frac{\gamma_{wm}}{\gamma_{wp}} \right) \cdot k_p \quad (5)$$

ここで、実物の波の周期を 10 秒程度と仮定し、 $T_p/T_m = 10$ とした。幾何学的な縮尺を 1/100 と設定したので、 $l_m/l_p = 1/100$ とした。ポリマー溶液の密度は、水とほぼ等しいため、 $\gamma_{wm}/\gamma_{wp} = 1$ とした。また、 m_v は、拘束圧 σ_v の関数として式(6)で示される⁷⁾。

$$m_v = \frac{1}{E} = C \cdot (\sigma_v)^n \quad (6)$$

ここで、 E :ヤング係数、 C :実験定数、 σ_v :拘束圧である。 $n \approx 0.5$ 程度であることから

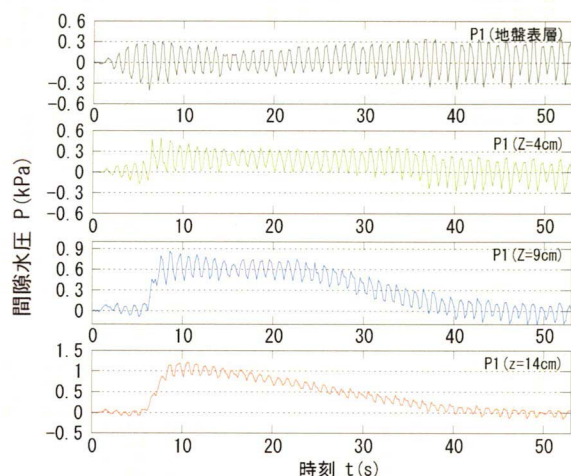


図-3 間隙水圧時系列

$$\frac{m_{vm}}{m_{vp}} = \left(\frac{\sigma_{vm}}{\sigma_{vp}} \right)^{-0.5} \cong \left(\frac{\gamma_{vm} \cdot l_m}{\gamma_{vp} \cdot l_p} \right)^{-0.5} = \left(\frac{1}{100} \right)^{-0.5} = 10 \quad (7)$$

である。以上より、

$$k_m \cong \frac{1}{100} \cdot k_p \quad (8)$$

となる。よって、本研究では、透水係数を 1/100 倍程度を目標としてポリマー溶液の粘性を調整した。

4. 水を流体として用いた実験

(1) 間隙水圧時系列

図-3 に、水を流体として用いた Case1 (水、相対密度 23%) の P₂ 地点における深度別の間隙水圧時系列をそれぞれ示す。縦軸の間隙水圧は、初期の静水圧からの差として示している。地盤内部では図に示すように、時間経過とともに液状化に特徴的な残留過剰間隙水圧が、鈴木ら⁸⁾が行った実験結果と同様に発生した。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や、地盤深部になるほど残留過剰間隙水圧の上昇が大きいこと等、同様な結果が得られた。

(2) 過剰間隙水圧比時系列

地盤の相対密度の違いによる水圧上昇の程度を比較するために、図-4 に P₂ 地点の z=14cm 地点における、各相対密度の残留過剰間隙水圧を有効応力で除した、過剰間隙水圧比の時系列をそれぞれ示す。D_r=23%では、t=12s において過剰間隙水圧比がおおよそ 1.0 になり、液状化が発生したと考えられる。しかし、D_r=30 および 35%では、過剰間隙水圧比は上昇せず、液状化は発生しない。これは、流体として水を用いると間隙水圧の消散が早くなることで、残留過剰間隙水圧が蓄積しないためだと考えられる。

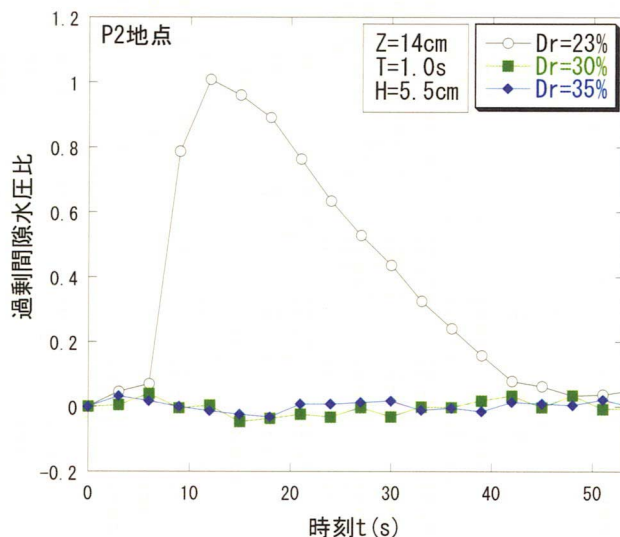


図-4 過剰間隙水圧比時系列

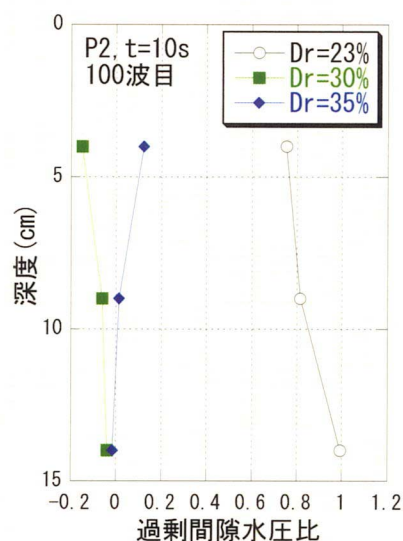


図-5 過剰間隙水圧比深度分布

(3) 過剰間隙水圧比深度分布

図-5 に P₂ 地点における、t=10s の過剰間隙水圧比の深度分布を、相対密度別に示す。D_r=23%ではどの深度においても、過剰間隙水圧比が 1.0 に接近しており液状化が発生したと考えられる。しかし、図-4 と同様に D_r=30 および 35%では過剰間隙水圧比は上昇せず、どの深度においても液状化は発生しない。

(4) 防波堤模型の挙動

図-6 に、防波堤の沈下量の時刻歴を示す。時刻の経過とともに沈下量も増加した。当初、地盤の相対密度が小さく、液状化が発生した際に、防波堤の沈下量が最大になるのではないかと予想していたが、相対密度によらず顕著な沈下量の違いはみられなかった。特に、D_r=23%では残留過剰間隙水圧による液状化が発生したにもかかわらず、沈下量は予想より小さかった。この原因として、防波堤直下の地盤は、防波堤や捨石マウンドの上載圧の作用により地

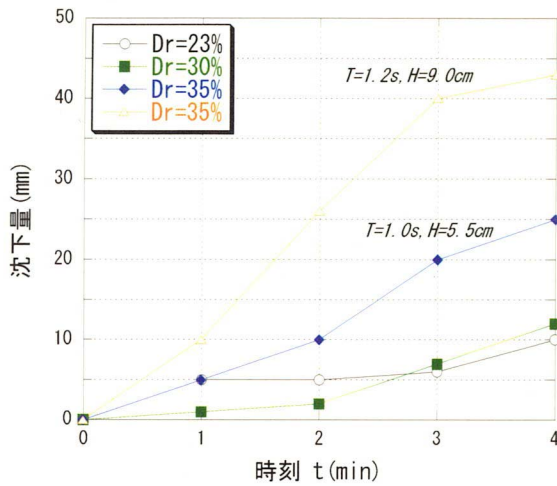


図-6 防波堤沈下量の時刻歴

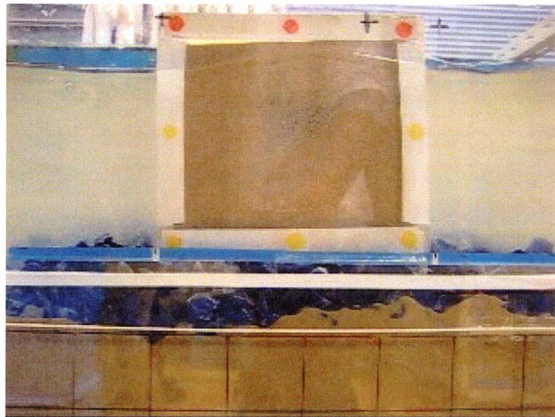


写真-1 実験後の防波堤模型の断面図

盤の液状化強度が増加し、捨石マウンドの法先より沖方向の地盤でしか液状化が発生しなかったことが考えられる。一方、相対密度を35%に固定して、周期と波高を変化させて波力を大きくした場合、沈下量が約2倍に増加した。

写真-1に、Case3における実験後の防波堤模型の断面図を示す。写真-1より、砂が吸い出されて、捨石マウンド内に入り込んでいる様子が観察できる。また、防波堤は実験後に、若干ではあるが傾斜した。洗掘によって防波堤直下の陸側の砂が吸い出されたことが原因と考えられる。

また、鈴木ら⁹⁾は、波高・周期が大きいくほど捨石マウンド下部の洗掘量が大きくなることを示しているが、今回の水を流体として用いた実験条件では、地盤の液状化よりも地盤の洗掘による防波堤の沈下が支配的であったと考えられ、この点については、さらなる検討が必要である。

5. ポリマー溶液を流体として用いた実験

(1) 波高および間隙水圧時系列

図-7にCase6（ポリマー溶液、相対密度30%）のP₁地点の波高と間隙水圧の時系列を示す。地盤内部で

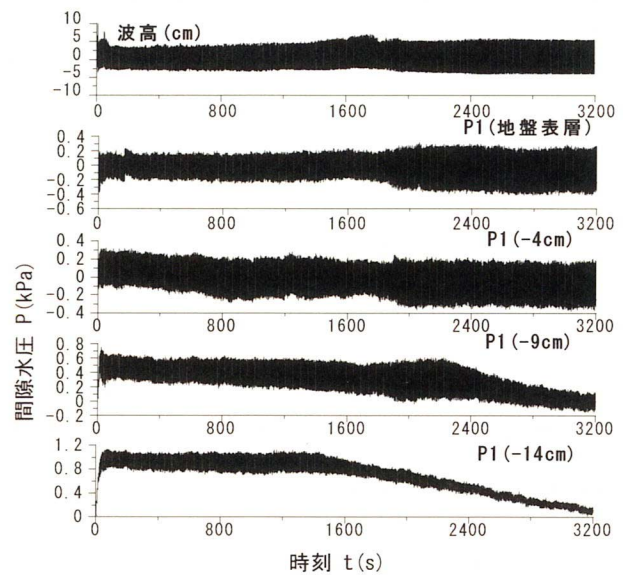


図-7 波高と間隙水圧時系列

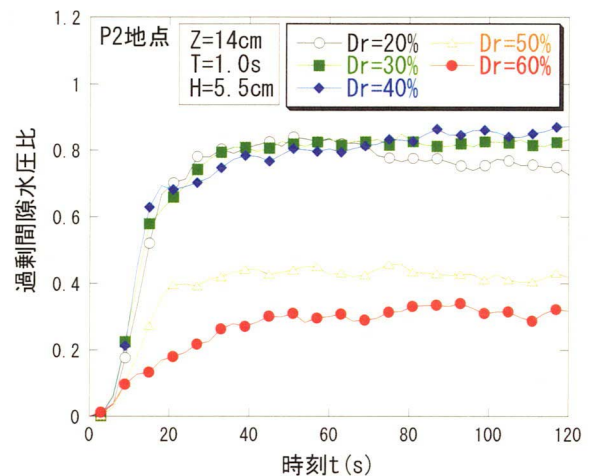


図-8 過剰間隙水圧比時系列

は図-3と同様に、経過時間とともに残留過剰間隙水圧が上昇した。また、波高と地盤内の水圧には関係があり、残留過剰間隙水圧が上昇すると、波高が減衰する様子が見える。

(2) 過剰間隙水圧比時系列

地盤の相対密度の違いによる水圧上昇の程度を比較するために、図-8にP2地点の $z=14\text{cm}$ 地点における、各相対密度の残留過剰間隙水圧を有効応力で除した、過剰間隙水圧比の時系列をそれぞれ示す。 $D_r=20\sim40\%$ では、過剰間隙水圧比が0.8程度と、1.0に近づいており、液状化が発生したと考えられる。しかし、 $D_r=50, 60\%$ では、過剰間隙水圧比はそれほど大きくなり、液状化は発生しない。これは、地盤の負のダイレイタンスの影響が小さくなるため、残留過剰間隙水圧が大きならないことが原因と考えられる。水を流体として用いた場合には、 $D_r=30\%$ で過剰間隙水圧比が大きならないのに対し、

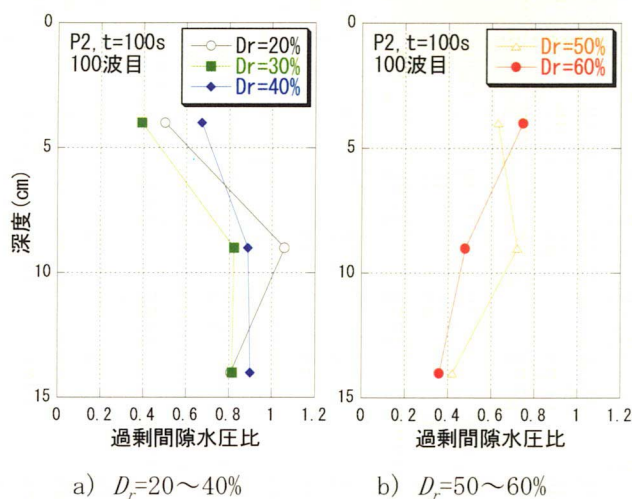


図-9 過剰間隙水圧比深度分布

ポリマー溶液を用いた場合、図-8 のように $D_r=60\%$ でも僅かながら過剰間隙水圧比が大きくなったのは、ポリマー溶液を用いた場合に、地盤の透水係数が $1/60 \sim 1/70$ 倍と小さくなるため、排水性が極端に低下し、間隙水圧が蓄積しやすいことが原因と考えられる。

(3) 過剰間隙水圧比深度分布

図-9 に P_2 地点における、 $t=100s$ の過剰間隙水圧比の深度分布を、相対密度別に示す。 $D_r=20 \sim 40\%$ では、 $z=9, 14cm$ では過剰間隙水圧比が 0.8 以上でかなり 1.0 に接近しており、液状化に近い破壊形態を示したと考えられる。しかし、海底表面に近い $z=4cm$ では、過剰間隙水圧比は 1.0 に達しておらず、波の直接的なせん断力により、せん断破壊した可能性が高い。海底表面付近は、有効応力が小さく、排水距離が短いために、排水条件が深部に比べて良いことが原因と考えられる。 $D_r=50 \sim 60\%$ では、 $D_r=20 \sim 40\%$ の場合と異なり、深部へいくにつれ過剰間隙水圧比が小さくなった。波浪による繰返しせん断力の影響が、深度方向へ減衰することが原因と考えられる。また、どの深度においても過剰間隙水圧比が 0.8 に達しておらず、液状化は発生しないといえる。

(4) 海底地盤の沈下について

a) 平均鉛直ひずみ

図-10に海底地盤の平均鉛直ひずみと相対密度の関係を示す。ここで鉛直ひずみは、地表面の沈下量を透水層の厚さで割って計算し、平均鉛直ひずみは、防波堤沖側のマウンド法先から202.5cmまでを平均した値である。相対密度が大きくなるほど、平均鉛直ひずみは小さくなった。

b) 地表面の沈下形状

防波堤模型からの距離と海底地盤の鉛直ひずみの関係の評価するために、図-11にCase5～9における液状化後の鉛直ひずみの水平方向分布を示す。

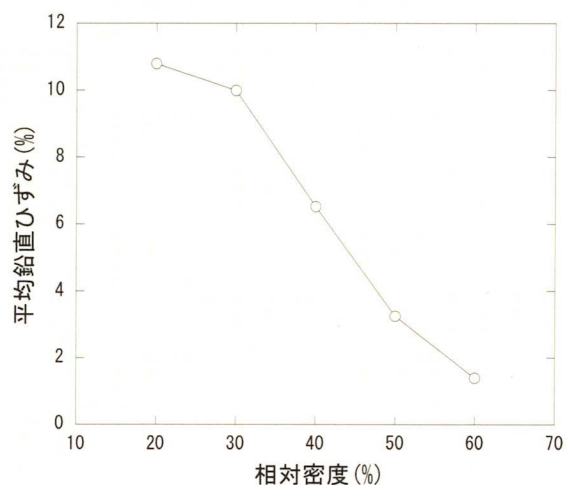


図-10 平均鉛直ひずみと相対密度の関係

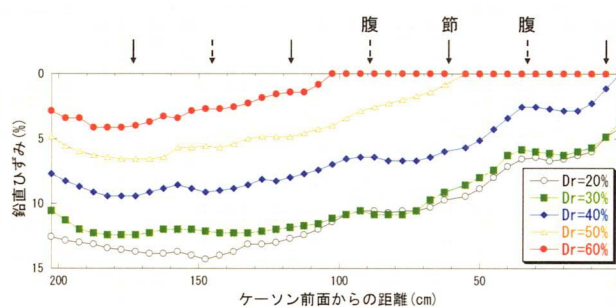


図-11 地表面の沈下形状

図-11の右側に防波堤模型があり、左側にある造波装置から波が送られてくる状態である。相対密度が大きくなるほどひずみは減少した。また、防波堤に近づくほどひずみが小さくなった。液状化が起ると波が減衰し、防波堤に近づくほど波の影響が小さくなるからだと考えられる。したがって、最もひずみが大きいのは、造波装置に近い所に現れた。また、相対密度が増加しても、地表面の形は類似しており、ひずみが均一ではなく上下に波状の曲線となった。これは、重複波の節と腹の位置が関係していると考えられる。つまり、節では主応力軸の回転が生じるにより、液状化領域は節を中心に腹方向に拡大していく¹⁰⁾ことから、節は腹に比べて液状化による地盤の高密度化の影響が大きく出たと考えられる。

6. 透水性が液状化に及ぼす影響

図-12に P_1 地点の、Case1(水、相対密度23%)、Case5(ポリマー溶液、相対密度20%)の $z=14cm$ 、および $z=9cm$ の残留過剰間隙水圧の時系列を示す。流体として水を用いた場合 $z=9cm$ 、および $z=14cm$ どちらにおいても $t=12s$ で残留過剰間隙水圧が最も大きくなるのに対し、ポリマー溶液を用いた場合では $z=14cm$ において $t=60s$ 、 $z=9cm$ において $t=24s$ でよう

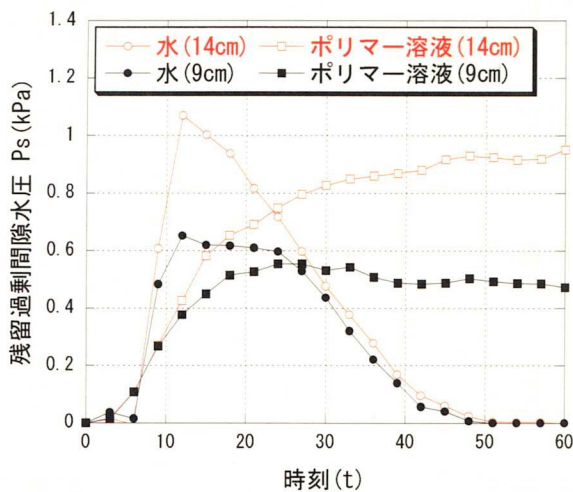


図-12 残留過剰間隙水圧時系列

やく残留過剰間隙水圧の上昇が終了した。つまり、残留過剰間隙水圧は、水を用いた場合には急激に上昇するのに対し、ポリマー溶液を用いた場合には緩やかに上昇した。また、水を用いた場合、上昇した残留過剰間隙水圧はすぐさま下降に転じ、 $t=50\text{s}$ で消散したのに対し、ポリマー溶液を用いた場合は、上昇した後一定の値を保ち、 $t=5000\text{s}$ でようやく残留過剰間隙水圧は消散した。残留過剰間隙水圧の消散だけでなく、残留過剰間隙水圧の上昇にも、透水性の影響が大きく現れた。

7. まとめ

本研究では、海底地盤の透水性を考慮した水路模型実験を行い、地盤の相対密度が波浪による防波堤周辺地盤の液状化に及ぼす影響について検討した。本研究によって得られた結果を以下に挙げる。

- (1) 波浪による繰返しせん断応力に起因した、海底地盤内の残留過剰間隙水圧の上昇による海底地盤の液状化が、水とポリマー溶液どちらを用いた場合でも確認された。
- (2) 相対密度が 20～40%のとき、地表面から深いところでは、残留過剰間隙水圧による液状化が発

生し、浅いところでは、せん断破壊に近い挙動を示した。

- (3) 今回の実験条件では、相対密度が 50～60%では、残留過剰間隙水圧の上昇は抑えられ、液状化は発生しなかった。
- (4) 波浪により海底地盤に生じる鉛直ひずみは、相対密度の増加とともに減少し、その水平方向分布は、相対密度によらず同様の形状を示した。
- (5) 流体としてポリマー溶液を用い、地盤の透水性を小さくすると、液状化の開始時間や継続時間に大きく影響が出る。たとえば、透水性が小さいほど液状化は遅く始まり、継続時間は長くなる。

参考文献

- 1) 善功企：海底地盤の波浪による液状化に関する研究，港湾技研資料，No. 755，pp. 32-52，1993。
- 2) 名合宏之，前野詩朗，西岡操：変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究，海岸工学論文集，第 38 巻，pp. 826-830，1991。
- 3) 前野詩朗，Lechoslaw G. Bierawski，小川誠：波-混成堤-地盤系の相互応答に関する研究，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 826-830，2004。
- 4) 宮本順司，佐々真志，関口秀雄：波浪作用下における液状化の進展および凝固・圧密過程，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 846-850，2002。
- 5) 高橋重雄，鈴木高二朗，姜閏求，常数浩二：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. 916-920，1997。
- 6) Yan Soon Bo：THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON THE WAVE-INDUCED LIQUEFACTION，doctoral thesis，2007。
- 7) 地盤工学ハンドブック，pp. 67-76，1999。
- 8) 鈴木高二朗，多田清富，下迫健一郎，山崎浩之，姜閏求：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，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 856-860，2003。
- 9) 鈴木高二朗，高橋重雄：消波ブロックの洗掘による沈下について，京都大学防災研究所「水圧変動と水中地盤に関するシンポジウム」，pp. 25-30，2002。
- 10) Sassa, S. and H. Sekiguchi：Analysis of Wave-induced liquefaction of sand beds, *Geotechnique*, 51, No.2, pp.115-126, 2001。