

上層に礫層を有する砂質地盤の波浪場における水圧応答に関する造波水路実験

Wave flume experiment for water pressure response in sandy ground under the gravel layer induced by ocean wave

松田達也¹, 三浦均也², 佐藤隼可³, 澤田弥生⁴

- 1 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科建築・都市システム学系・t.matsuda@ace.tut.ac.jp
- 2 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科建築・都市システム学系
- 3 ショーボンド建設株式会社・首都圏北陸支社
- 4 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科博士前期課程

概 要

波浪による支持地盤の不安定化は海岸・海洋構造物の耐波機能を喪失する可能性があり、非常に重要な検討事項である。著者らは、Dean Number を適用した地盤材料による波浪場の移動床実験を行い、数式解との比較により地盤内応力変化を定量的に再現できることを示した。本研究では同実験手法を援用し、波浪場における海底地盤の液状化対策として上層に礫層を敷設した砂質地盤の二層地盤構造における水圧応答を考察し、その有用性について検討した。その結果、砂層の上部に透水性の高い地盤材料を敷設することは、礫層内で間隙水圧変動を抑制し、砂層との礫層間の水圧変動量を低減させる効果があり、過剰間隙水圧比の上昇を抑制することを明らかとした。また、砂層に上載荷重として作用し、支持地盤が強度増加するとともに、流れの作用が直接砂層地盤に作用しないため、掃流砂・洗掘現象を生じさせず、支持地盤を安定に保つことができ、液状化対策として有用であることを示した。

キーワード：波浪，海底地盤，液状化対策，造波水路実験，Dean Number

1. 諸言

波浪外力による地形変化は海洋・沿岸構造物の防災・環境における重要な課題である。これまで、水工学的視点において地表面に作用する流れに伴う掃流力¹⁾を考慮して、土砂移動現象について検討してきた。掃流力の概念に則った波動場における土砂移動についても国内外で多くの研究が行われてきた^{2), 3), 4), 5), 6)}。一方、波浪外力作用による地盤内の応力変化や液状化現象に着目し、地盤工学的視点に立って理論解の誘導および実験等による検討も行われてきた^{7), 8), 9), 10), 11)}。しかし、波浪場における土砂移動は表層流速と地盤内の透水力が複合的に作用する複雑な問題であり、両分野の視点を融合した検討が必要である。その一つとして、模型実験において実現現象を再現し、詳細に観察するためには、掃流力と地盤の応力状態を再現するための相似則を検討しなければならない。著者らは、波浪場の土砂移動現象に関して両分野が横断的に実験の整合性に対する共通理解を深め、詳細に現象の観察ができるよう、フルード相似則と漂砂の相似則 (Dean Number)^{12), 13), 14)}を満たした移動床造波水路実験を行った。その結果、地盤材料の選定に際し Dean Number を適用することで地盤内部の応力変化が再現でき、実際の現象を再現できる可能性

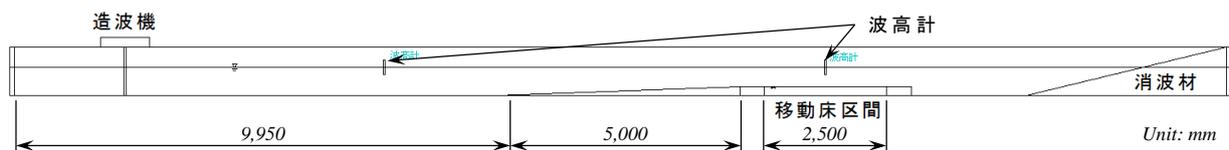
を示すことができた¹⁵⁾。

そこで、本研究では同実験手法を援用し、波浪場における海底地盤の液状化対策として上層に礫層を敷設した砂質地盤の二層地盤構造における水圧応答を考察し、礫層の有無による比較によって、その有用性を検討した。

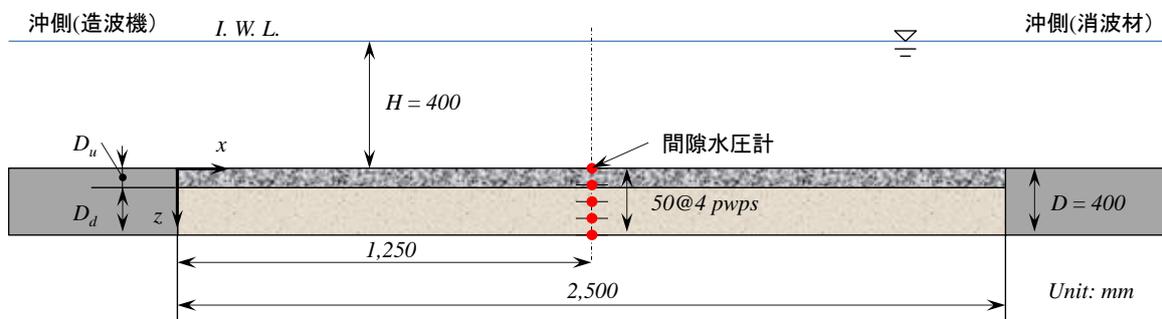
2. 実験概要

2.1 実験装置および計測機器

図 1 に実験装置全体および移動床の概略図を示す。全長 25 m の 2 次元造波水路内に長さ 2.50 m、幅 0.60 m、高さ 0.20 m の移動床区間を設け、各種地盤材料を実験条件に応じて堆積させた。移動床区間の長さについては、想定する波浪条件における約 1 波長程度の長さとなるように設定した。また、移動床より沖側には長さ 5.00 m、高さ 0.20 m、1/25 勾配の不透水斜面を設置した。水理条件にフルード相似則を適用し、縮尺比 $\lambda_L=1/25$ とした。実験では、容量式波高計 (KENEK 製) を用いて沖合 (CH1) と移動床上 (CH2) の 2 箇所波高を計測した。地盤内には小型間隙水圧計 (SSK 製) を地盤中央壁面の地盤深度 $z=0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ m に設置し計測した。土砂移動を観察するため、高速度カメラ (DITECT 製) とビデオカメラ



(a) 造波水路全体図



(b) 移動床詳細図

図 2 実験装置概要

ラ (29.97fps) で撮影した。

2.2 Dean Number による地盤材料の選定

フルード相似則に従い地盤材料の幾何学的縮尺を適用すると、Prototype が平均粒径 $D_{50lp} = 0.2 \text{ mm}$ の細砂の場合、Model は $D_{50lm} = 0.008 \text{ mm}$ のシルト質材料に分類されるため、材料特性が異なり、現象の再現性が得られない。そこで、漂砂実験等で用いられる Dean Number^{12), 13)} を適用して地盤材料を決定した。Dean Number とは、式(1)に示すとおり、土粒子の沈降速度に関する相似則である。

$$\left\{ w/(H/T) \right\}_p = \left\{ w/(H/T) \right\}_m \quad (1)$$

ここで、 H は波高、 T は波の周期、 w は土粒子の沈降速度であり、下添え字の p は prototype、 m は model をそれぞれ示している。

沈降速度は Hallermeier's Relationship に基づく次式で算定できる。

$$w = \frac{[(\rho_s - \rho_w) \cdot g]^{7/10} \cdot (d_{50})^{11/10}}{6 \cdot (\nu)^{2/5}} \quad (2)$$

ここで、 d_{50} は地盤材料の平均粒径、 ν は流体の動粘性係数 ($= 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、 g は重力加速度である。

上式を用いて Prototype が細砂 ($D_{50lp} = 0.2 \text{ m}$) の場合を想定した地盤材料は、Model では $D_{50lm} = 0.075 \text{ mm}$ となる。よって、実験では Prototype と同様の細砂に分類される地盤材料を用いることとなる。

2.3 実験条件

移動床地盤条件ならびに波浪条件については、書籍「海岸波動¹⁶⁾」を参照した。

表 1 実験ケースと実験条件

Case	上層材料	上層厚 D_u (m)	下層材料	下層厚 D_d (m)
Case-1	—	—	—	0.20
Case-2	—	0.03	硅砂 8 号	0.17
Case-3	碎石 6 号	0.08	—	0.12

表 2 波浪外力条件

	波浪パラメータ : model (proto type)
周期, T (s)	1.6 (8.0)
波高, H (m)	0.12 (3.00)
水深, h (m)	0.40 (10.00)
波長, L (m)	2.8 (70.0)
水の密度, ρ_w (kg/m^3)	1,000

地盤材料について、砂層地盤においては緩い砂を対象として検討した。実験では、2.2 における Dean Number を踏まえて、prototype が平均粒径 $D_{50lp} = 0.2 \text{ mm}$ の細砂と仮定した場合、Dean Number を適用すると、Model は $D_{50lm} = 0.075 \text{ mm}$ となることから、Dean Number による平均粒径に近い地盤材料となる硅砂 8 号を用いることとした。移動床は水中落下法により飽和状態で相対密度 $D_r = 40 \%$ となるように密度管理を行いながら作製した。また、上層の礫材については碎石 6 号 (粒径 $d = 5 \sim 13 \text{ mm}$ 混合) を用いた。

表 1 に実験ケースを示す。実験では、二層の層厚比を変化させた実験を行った。Case-1 は比較のため硅砂単層地盤で実施したケースを、Case-2 は上層：碎石 6 号 (層厚 0.03m) + 下層：硅砂 8 号 (層厚 0.17m)、Case-3 は上層：碎石 6 号 (層厚 0.08m) + 下層：硅砂 8 号 (層厚 0.12m) の層厚比が異なるケースの実験を行った。

波浪条件を表 2 に示す。本実験では前述のとおり、フ

ルード相似則に従い、縮尺比 $\lambda_L=1/25$ の波浪場を再現した。表内の数値は model (proto type)の形式で示している。実験では水深 $h=0.4\text{m}$ において周期 $T=1.6\text{s}$ 、波高 $H=0.12\text{m}$ の規則波を20分間($tT=750$ 波)与えた。実験で用いる流体は、水道水を用いている。

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果の整理方法

実験により得られた時刻歴データに対して一般性を持たせて評価を行うために、フーリエ変換により周波数分析を行ったのちに、逆フーリエ変換により波の周期をもとにした位相角によるデータ整理した。図2に位相で定義した水位レベルのイメージ図を示す。

位相角 $\theta=0^\circ$ は基準点における最大波高時を示しており、波高は実験との整合性を持たせた符号を定義した。

実験値は実験開始5分以降で繰返し定常状態となる約60秒間(37周期分)のデータを用いて平均化し、1周期分のデータに変換して整理した。

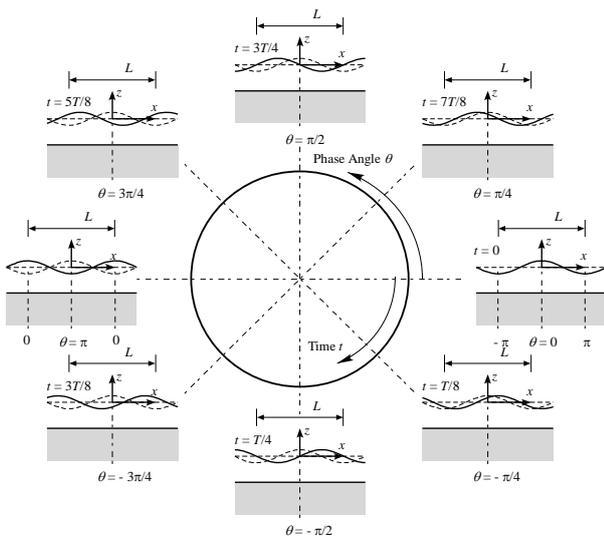


図2 位相角による水面変化の整理

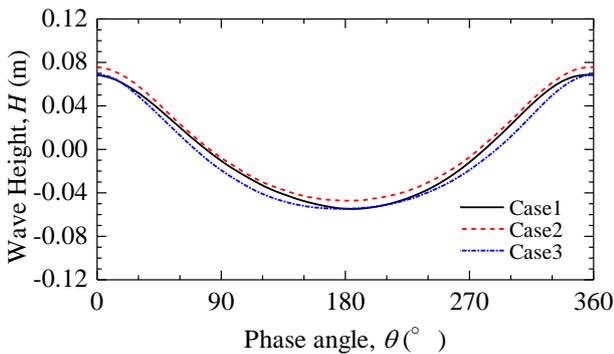


図3 移動床上の波高変化

3.2 波高変化

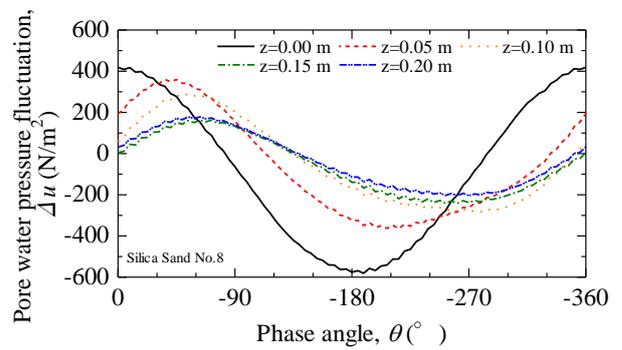
図3に位相角で整理した移動床上の波高変化を示す。初期水位はゼロである。

計測結果より、すべての実験ケースにおいて所定の波高条件 $H=0.12\text{m}$ を満足できていることがわかる。また、波の周期については造波板の変位を制御していることから、所定の周期が再現できていることを確認している。

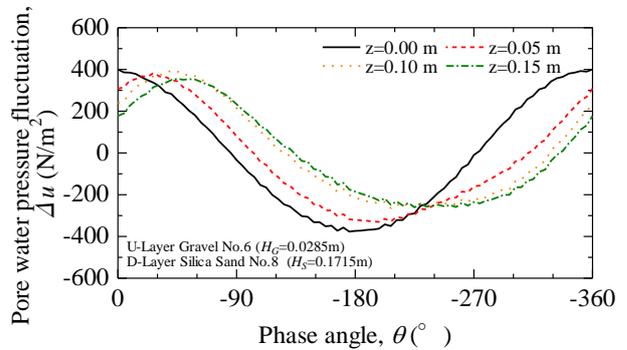
各ケースにおける波高変化をみると、実験ケースに応じて波高に大差がないことがわかり、地盤表層の透水性による波のエネルギー減衰が生じないことがわかった。

3.3 地盤内の間隙水圧変動

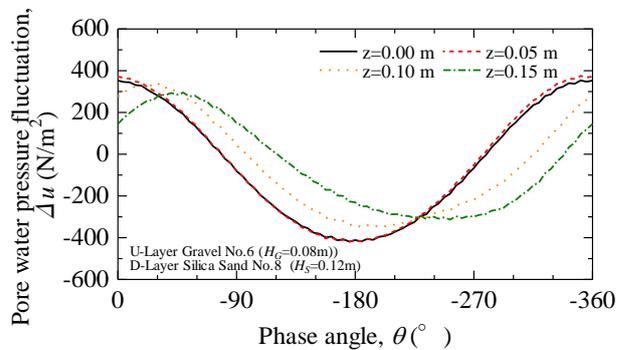
図4に地盤内の間隙水圧変動を示す。Case1の単層地盤



(a) Case-1



(b) Case-2



(c) Case-3

図4 波浪場における地盤内の間隙水圧変動

では、地盤深度の増加に伴い、間隙水圧変動は位相差を伴いながら振幅が減少していることがわかる。

Case2 および Case3 の二層地盤では、表層 ($z=0.0\text{m}$) において Case-1 と比較して間隙水圧変動量が低減していることがわかる。これは、ベルヌーイの定理に従うと、透水性が高いことにより速度水頭が増大することで、圧力水頭が減少するためと考える。また、Case-3 に着目すると、礫層内においては表層と同程度の水圧変動値であり、位相差が生じず同程度の水圧応答であることがわかる。一方で、二層地盤の下層である珪砂 8 号の砂質土層からは単層と同程度の水圧変動であり、さらに位相差が生じていることがわかる。砂層内での水圧変動については単層時の水圧変動値と比べ大きな差がないことがわかった。

3.4 地盤内の過剰間隙水圧比

移動床表面と地盤内の間隙水圧の差分により過剰間隙水圧 Δu を求めた。また、有効応力変動について考察するため、算出した過剰間隙水圧を用いて、間隙水圧計を設置した深度における初期有効応力 σ_0' で除した過剰間隙水圧比 ($= \Delta u / \sigma_0'$) を算出した。

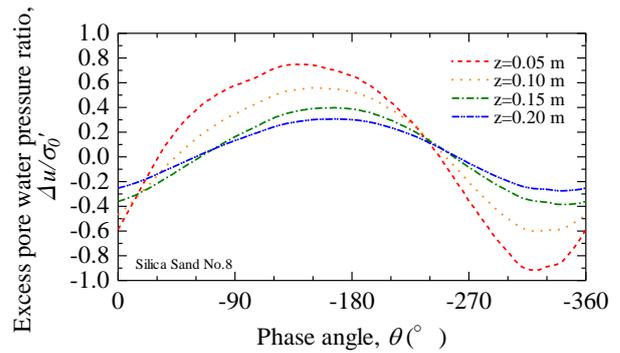
図 5 に過剰間隙水圧比の変化を示す。実験により計測した過剰間隙水圧比による応力変化の妥当性については、Case-1 の単層地盤における実験値と u-p formulation を用いた数式解との比較により、地盤深度の各点において数式解により得られた値と実験値が非常に近いことから定量的にその妥当性を確認している¹⁵⁾。

Case-1 の単層地盤については、最大で 0.75 となり、液状化には至っていないものの過剰間隙水圧の発生により、地盤の強度が低下することがわかった。

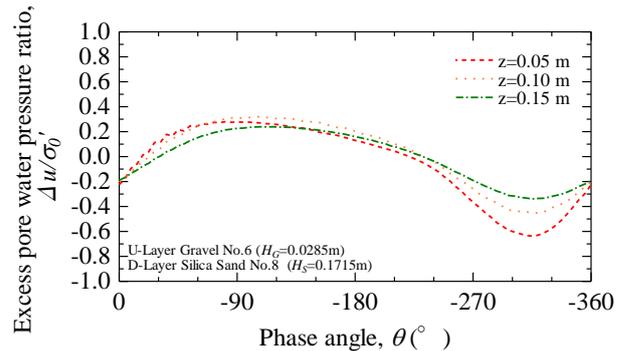
一方、Case2 および Case3 の二層地盤においては、上部に透水性の高い碎石を敷くことで、過剰間隙水圧比を抑えられることがわかる。その効果は、上部層厚に依存しており、 $z=0.005\text{m}$ において Case-1 と比較すると、Case2 では最大値が大凡 4 割、Case3 では大凡 3 割程度まで減少していることがわかった。詳細にみると砂層の上部に透水性の高い地盤材料を敷設することは、礫層内で間隙水圧変動分を抑制し、砂層との礫層間の水圧変動量を低減させる効果があり、過剰間隙水圧比の上昇を抑制する効果があることが明らかとなった。

3.5 移動床の変化

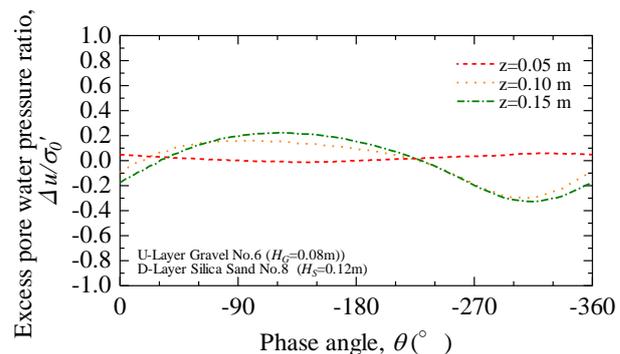
地盤内部の応力変化を踏まえて移動床の変化について考察する。図 6 は Case-1 : (a)-(f), Case-2 : (a')-(f'), Case-3 : (a'')-(f'') として、移動床変化の様子を示している。また、



(a) Case-1



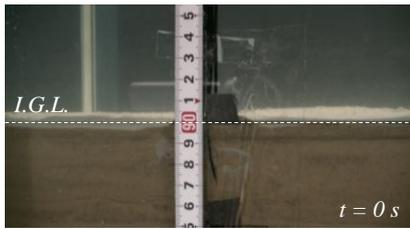
(b) Case-2



(c) Case-3

図 5 波浪場における地盤内の過剰間隙水圧比変動

(a), (a'), (a'')は初期($t = 0\text{s}$)の状態, (b), (b'), (b'')は実験開始後 $t = 120\text{s}$ 時点, (c), (c'), (c'')は実験開始後 $t = 360\text{s}$ 時点, (d), (d'), (d'')は実験開始後 $t = 600\text{s}$ 時点, (e), (e'), (e'')は実験開始後 $t = 900\text{s}$ 時点, そして, (f), (f'), (f'')は実験開始後 $t = 1200\text{s}$ 時点をそれぞれ示している。また、各図の「I.G.L.」は初期の地盤表層面を示しており、その位置は点線で示している。



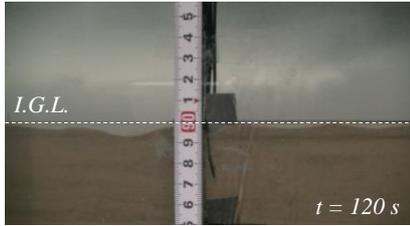
(a) Case-1: $t = 0$ s



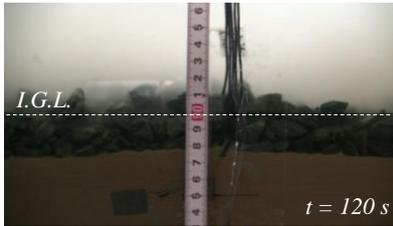
(a') Case-2: $t = 0$ s



(a'') Case-3: $t = 0$ s



(b) Case-1: $t = 120$ s



(b') Case-2: $t = 120$ s



(b'') Case-3: $t = 120$ s



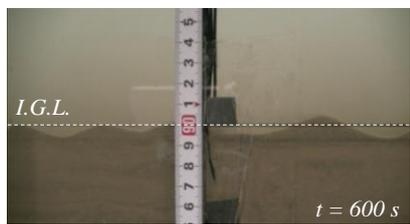
(c) Case-1: $t = 360$ s



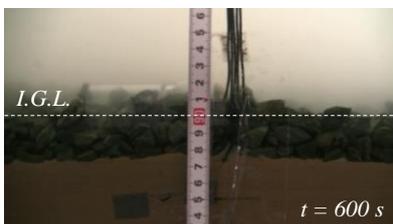
(c') Case-2: $t = 360$ s



(c'') Case-3: $t = 360$ s



(d) Case-1: $t = 600$ s



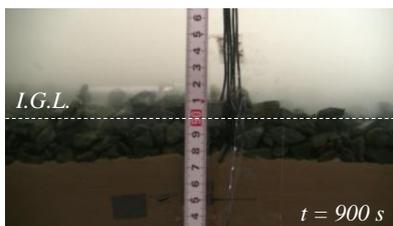
(d') Case-2: $t = 600$ s



(d'') Case-3: $t = 600$ s



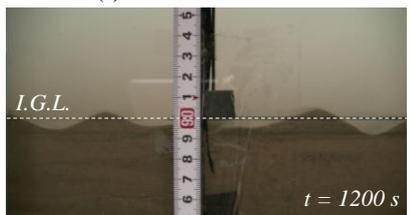
(e) Case-1: $t = 900$ s



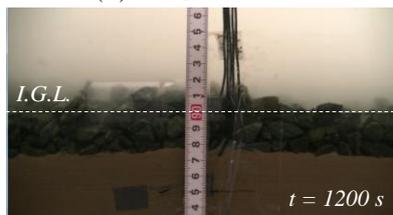
(e') Case-2: $t = 900$ s



(e'') Case-3: $t = 900$ s



(f) Case-1: $t = 1200$ s



(f') Case-2: $t = 1200$ s



(f'') Case-3: $t = 1200$ s

図 6 移動床の経時変化

Case-1 では、細粒分が多く含まれていることから、浮遊砂が発生し、濁りが発生した。また、表層においては掃流砂・洗掘等により不規則な地形変化が生じた。鈴木¹⁴⁾は、大型実験の結果より液状化現象と砂漣の形成について述べており、液状化を伴わないと規則的な砂漣が形成されるとしており、本研究においても過剰間隙水圧の影響を受ける Case-1 の地盤では非常に複雑な地形変化が生じる結果となった。一方で、Case-2 および Case-3 においては上層部が礫層であることから移動は確認できない。ただし、上層と下層の層境界における下層地盤の珪砂 8 号については、流れの作用に浸食が生じ、若干ではあるが砂移動が生じることを目視により確認した。これにより、上層の礫が下層地盤にめり込むように数ミリ程度沈下する様子が伺えたが、相対的に小さな変状であった。

4. 結言

本研究は、フルード相似則と漂砂の相似則 (Dean Number) を満たした移動床造波水路実験を行い、波浪場における海底地盤の液状化対策として上層に礫層を敷設した砂質地盤の二層地盤構造における水圧応答を考察し、その有用性について検討した。

砂層の上部に透水性の高い地盤材料を敷設することは、礫層内で間隙水圧変動分を抑制し、砂層との礫層間の水圧変動量を低減させる効果があり、過剰間隙水圧比の上昇を抑制する効果があることが明らかとなった。また、砂層に上載荷重として作用するため、支持地盤の強度を増加させるとともに、流れの作用が直接砂層地盤に作用しないため、掃流砂・洗掘現象を生じさせない効果があることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金研究活動スタート支援 26889035、日本学術振興会学術研究助成基金

助成金基盤研究(c) 17K06553 の助成を受けています。また、豊橋技術科学大学学長裁量経費の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究(I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21, 1956.
- 2) Madhav Manohar: Mechanics of Bottom Sediment Movement due to Wave Action, Beach Erosion Board, Tech. Memo., No. 75, 1955.
- 3) Vincent, G. E.: Contribution to the Study of Sediment Transport on a Horizontal Bed due to Wave Action, Coastal Eng., No. 6, 1958.
- 4) 岩垣雄一, 野田英明: 海岸変形の実験における縮尺効果の研究, 第8回海岸工学講演会講演集, pp. 139-143, 1961
- 5) 佐藤昭二, 田中則男: 水平床における波による砂移動について, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 95-100, 1962.
- 6) 中村充, 大西亮一, 南出英男: 波による海底砂内の浸透について, 第20回海岸工学講演会講演集, pp. 421-428, 1973.
- 7) Madsen, O. S. : Wave Induced Pore pressures and Effective Stresses in a Porous Bed, Geotechnique, Vol.28, No.4, pp.377-393, 1978.
- 8) Yamamoto, T.: Sea Bed Instability from Waves, Proceedings, 10th Annual Offshore Technology Conference, Paper No. 3262, Vol.I, pp.1819-1824, 1978.
- 9) 前野賀彦, 長谷川高士: 波浪による砂層内の間隙水圧の特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 596-600, 1984.
- 10) Zen, K. and Yamazaki, H.: Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.90-104, 1990.
- 11) 三浦均也, 浅原信吾, 大塚夏彦, 上野勝利: 波浪に対する海底地盤応答の連成解析のための地盤の定式化, 地盤工学シンポジウム論文集, Vol.49, pp.233-240, 2004.
- 12) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. Eng. Dyn. in Surf zone, pp. 208-214, 1973.
- 13) Hughes, S. A.: Physical models and laboratory techniques in coastal engineering, World Scientific, pp.568, 1993.
- 14) 鈴木高二朗: 大規模波動地盤総合水路施設における波動実験, ながれ, Vol.34, pp.255-260, 2015.
- 15) 松田達也, 三浦均也, 佐藤隼可, 諫山恭平, 澤田弥生: Dean Number を適用した移動床造波水路実験における地盤内水圧応答, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, 2017 (掲載決定).
- 16) 土木学会: 海岸波動一歩・構造物・地盤の相互作用の解析法, pp481-483, 1994.