

造粒固化土を利用した人工海浜の 波浪安定性に関する遠心模型実験

CENTRIFUGE MODEL TEST ON WAVE FORCE RESISTANCE OF
ARTIFICIAL SEASHORE RECLAIMED BY GRANULAR TREATED SOIL

高橋英紀¹・小川 慧²・早野公敏³・森川嘉之⁴・二宮裕介⁵

Hiddenori TAKAHASHI, Kei OGAWA, Kimitoshi HAYANO, Yoshiyuki MORIKAWA,
Yusuke NINOMIYA

¹正会員 博(工) 国土交通省関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所
(前・港湾空港技術研究所 地盤・構造部) (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

²学生会員 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

³正会員 博(工) 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

⁴正会員 博(工) 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)

⁵正会員 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)

The cement granulation technique is a method of improving soft cohesive soil by converting to high-strength particles. This is one of the measures used to make efficient use of soft dredged soil. This paper reports the wave force resistance of artificial seashore reclaimed by high permeable granular treated soil. The model test results showed that the granular treated soil seashore had high resistance against normal-sized waves. In this study, a centrifuge model test technique was applied for investigating the wave force resistance. A centrifuge model test is used for simulating the ground behavior in a proto-type scale by small-sized ground model. The wave generated in centrifugal acceleration was similar to real wind wave.

Key Words : granular treated soil, centrifuge test, wave force resistance, artificial seashore

1. はじめに

近年, 沿岸域において人工海浜や人工干潟を造成することが多く検討されている。国土交通省港湾局監修のマニュアル¹⁾によると, 砂質土で海浜を形成することが基本とされているが, 現場では海砂の供給が困難な状況にあり地盤材料が枯渇している。一方で, 港湾地域における航路浚渫土の有効利用が望まれている²⁾。特に粘土・シルト系の浚渫土は有効利用できる箇所が限られており, 新たな利用方法が求められている。粘土・シルト系の浚渫土を直接人工海浜材として用いることも提案・施工されているが, 浚渫土自体が長期的に圧密することや覆砂が地盤内に沈み込むこと, 土砂の沖への流出の可能性などの問題点が指摘されている。

著者ら^{3), 4)}は, 軟弱な粘性土に対してセメントと含水比低下材を混合して砂礫程度の粒径の土に改良し, この粒状体の有効利用方法について検討を進めている。ここでは作製した粒状体を造粒固化土と称す。図-1に示すように人工海浜の海浜材として造粒固化土を利用すれば, 造粒固化土の単位体積重量は

小さいことから原地盤の沈下量を低減できる。また, 造粒固化土は浚渫土に比べて高強度であるために圧密や沈み込みの問題を解決できる。さらに, 粒径が大きいために透水性も高く, 波浪に対する表層材の安定性も高いと考えられる。透水係数が大きな礫などの材料を海浜材として用いると, 常時波浪の来襲時に細砂が堆積し易いことが石井ら⁵⁾や古谷ら⁶⁾の模型実験で観察されている。これらの研究に先立って柳嶋ら⁷⁾は透水性の高い材料を海浜に埋め込むことで海浜の安定化を図れることを模型実験や現場試験で明らかにしている。

本研究では, 透水性の高い造粒固化土を人工海浜材として用いた地盤の波浪に対する安定性を遠心模型実験によって調べた。

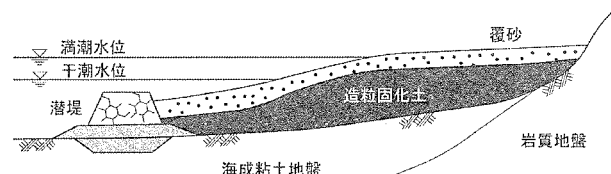


図-1 造粒固化土の人工海浜への適用

2. 遠心力場での波浪载荷実験について

本研究の特徴としては、遠心力場で波浪载荷実験を行っている点である。遠心力場では、模型寸法と実物寸法での地盤内応力を一致させられるため、小さな寸法の模型であっても大きな寸法の地盤における応力に依存する種々の地盤挙動を再現できる。遠心力場で波浪を起こして、それを外力とした地盤挙動を調べた初期の研究としては、前野賀彦・内田一徳⁸⁾、Sekiguchi *et al.*⁹⁾、Sassa & Sekiguchi¹⁰⁾などが挙げられる。これらの研究では、地盤内の間隙水圧伝播特性や、緩く堆積した砂地盤が波浪载荷によって液状化する現象などが調べられている。最近では、波浪が来襲する護岸や防波堤の挙動についても遠心模型実験によって調べられている^{11), 12)}。

本実験の観察対象は、勾配を持った海浜に波浪が来襲する際の地盤挙動である。この挙動を遠心力場で取り扱った研究事例は無いため、ここでは実験相似則について触れておく。波浪が海浜地盤に来襲する場合、地盤の間隙水圧が繰り返し変動して水面低下時に発生する上向き浸透流によって地盤が緩み（拘束圧が低下し）、水の流れによって緩んだ砂が流される。この過程を考えると、地盤内での過剰間隙水圧の伝播と、砕波による砂の浮遊・沈降、水の流れによる表層砂の掃流をモデル化する必要がある。特に、地盤の安定性を評価するためには、地盤の緩みを適切に再現する必要がある。過剰間隙水圧の伝播を再現することが重要である。

1 つ目の過剰間隙水圧伝播現象については、間隙水の粘性を重力加速度に対する遠心加速度の比率だけ上昇させることで、伝播に要する時間の相似則と幾何学的な相似則を $1/N$ に合わせられることが明らかになっている^{9), 10)}。すなわち、本実験の目的において最も重要な相似則が合っている。2 つ目の浮遊・沈降および 3 つ目の掃流については、砂粒子に作用する重力（遠心力）、浮力、流体抵抗力の相似側を $1/N^2$ にする必要がある。地盤に Ng の遠心加速度を加えることで、重力および浮力の相似側は $1/N^2$ になる。流体抵抗には粘性抵抗 R_1 と慣性抵抗 R_2 があり、それぞれ以下の式で表せる。

$$R_1 = 6\pi a v \eta \quad (1)$$

$$R_2 = 0.25\pi a^2 v^2 \rho \quad (2)$$

ここで、 a : 砂粒子の半径、 v : 流速、 η : 粘性係数、 ρ : 流体の密度である。両式より、粘性抵抗 R_1 の相似側は 1、慣性抵抗 R_2 の相似側は $1/N^2$ となる。すなわち、遠心模型実験では粘性抵抗に関しては大きめに見積もることになる。レイノルズ数が小さい流れが生じる場合には粘性抵抗が卓越するために、砂粒子の掃流量と浮遊量が多く、加えて沈降量が少なくなり、漂砂が生じやすい実験条件である。ただし、実験では粘性流体を用いたために、砕波による乱流が発達しにくい状態である。この面からは、

乱流によって発生する浮遊砂は少なくなる。つまり、粘性抵抗の効果を打ち消す方向であると言える。

遠心力場において波浪変形や乱流の発達、それに呼応した漂砂の挙動に関する全ての相似則を満足することは難しい。しかしながら、このことは重力場の模型実験についても同じであり、模型実験では観察したい挙動の相似則を合わせることが重要である。本実験のようにある同一の波浪外力下で異なる地盤材料を用いた海浜の安定性を比較するような場合、実物スケールの地盤内応力や過剰間隙水圧の伝播現象を再現できる遠心模型実験は有用な実験手法である。

3. 遠心模型実験条件

(1) 実験装置および模型地盤の作製方法

遠心力場での波浪载荷実験の概略図を図-2に示す。実験装置は鋼製の試料容器と、遠心力場でモーターを利用して造波を行えるプランジャー式造波装置（図-3(a)参照）、計測センサー群（図-3(b)参照）で構成されている。試料容器の内寸は模型寸法では高さ60.0cm×幅120.0cm×奥行20.0cmであるが、実験は30G場で実施したので実物換算寸法は高さ18.0m×幅36.0m×奥行6.0mである。

人工海浜を想定した模型地盤は、相馬珪砂5号あるいは造粒固化土で形成されている。それぞれの物性を表-1に、撮影した写真を図-4に示す。表-1に示すように、相馬珪砂の平均粒径は $D_{50}=0.24\text{mm}$ と小さいことに比べ、造粒固化土の平均粒径は $D_{50}=5.1\text{mm}$ と大きい。また、造粒固化土の間隙比は砂に比べて大きいために、その水中単位体積重量は $\gamma'=3.96\text{kN/m}^3$ と小さい。相馬珪砂の透水係数に関し

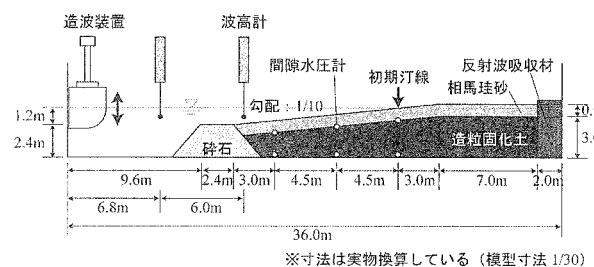


図-2 模型実験概略図

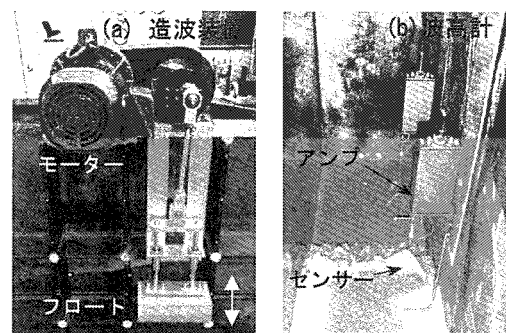
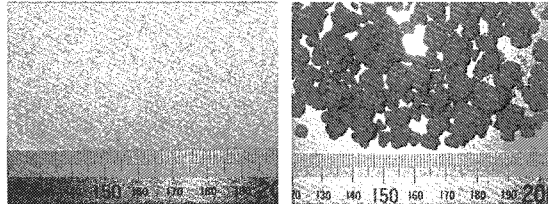


図-3 造波装置および波高計

表-1 地盤材料の物性

	相馬珪砂	造粒固化土
土粒子密度, ρ_s	2.65 g/cm ³	2.80 g/cm ³
水中単位体積重量, γ'	8.91 kN/m ³	3.96 kN/m ³
最大粒径	0.85 mm	19.0 mm
D_{50}	0.24 mm	5.1 mm
D_{10}	0.19 mm	2.2 mm
均等係数, U_c	1.5	3.0
透水係数, k	0.036 cm/s	1.3~1.6 cm/s



(a) 相馬珪砂 (b) 造粒固化土
図-4 実験に用いた地盤材料

ては, D_{10} をHazenの式 ($C_H=100$) に代入すると $k=0.036\text{cm/s}$ であるのに対して, 低動水勾配の変水位透水試験法¹³⁾で測定した造粒固化土の透水係数は $k=1.3\sim1.6\text{cm/s}$ (有効上載圧40kN/m²下) と2桁も大きく, 造粒固化土は透水性の高い材料である。

地盤の作製方法としては, 初めに地盤材料が沖側へ流れ出ないように潜堤を作製した。潜堤には粒径4.8~10.0mmの中礫を用いており, 礫の隙間に砂や造粒固化土が侵入しないように地盤と潜堤の間にガーゼを敷いた。次に, 地盤内を浸透する間隙水の試料容器側面での反射を和らげるために, 地盤と試料容器側面に剛性の大きいアルミニウムの箱にたわし状の金網を詰め込んだものを設置した。所定の位置に計測センサーを釣り下げた後に, 潜堤背後に地盤材料を作製した。砂地盤は気中で砂を落下させる砂降らし法で作製し, その相対密度は70%であった。造粒固化土地盤に関しては, 落下高さを設けずに土材料を緩くばらまくことで地盤を作製した。緩く堆積した造粒固化土は遠心加速度を加えることで大きく圧縮するため, 遠心加速度を加える前に重力場において一次元的に締固めた。なお, 波浪実験前後に計測した粒度を比較するとほぼ一致しており, 波浪による繰り返し载荷で造粒固化土が破碎することはなかった。覆砂として3cm (実物寸法換算で0.9m) の砂層を作製した。地盤作製後に, 12時間以上脱気した粘性流体 (水の30倍の粘性) を地盤下方から浸透させて地盤を水浸した。

(2) 模型実験方法

実験では, 模型地盤に遠心加速度30Gを加えた状態で造波装置を作動させて, 実物寸法換算で周期6秒の波浪を3.75日間にわたって地盤に入射し続けた。入射した波浪の詳細については次節で後述する。遠心模型実験装置としては港湾空港技術研究所が所有する装置¹⁴⁾を用いており, プラットフォームでの有効回転半径は3.8mで, 最大搭載質量は2.76 tonであ

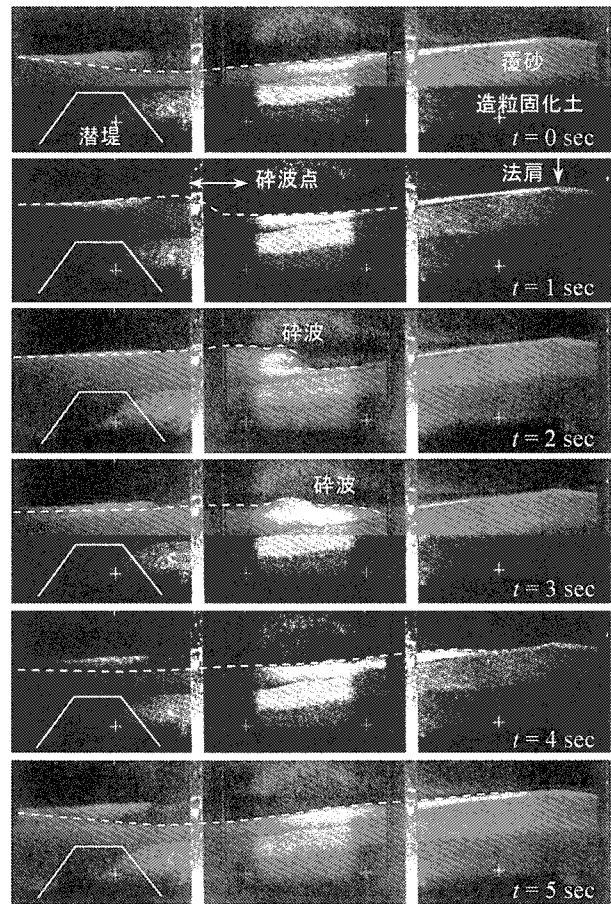


図-5 1周期の水面変動の状況

る。遠心力場で波浪を入射しながら模型地盤側面を動画撮影し, この撮影画像から地表面の変形を求めた。また, 小型の容量式波高計 (図-3(b) 参照) によって波高を計測し, 地盤内に埋め込んだ小型の間隙水圧計で間隙水圧を計測した。センサー群の設置位置は図-2を参照されたい。これらの計測項目から, 常時波浪に対する地盤の安定性について検討した。

(3) 波浪特性

造粒固化土を地盤材料とした実験ケースでの水面変動の状況を図-5に示す。これは, 波浪を入射して実物寸法換算で90時間後の1周期6秒を6コマで表した写真群である。図を見ると, 波が沖側から陸側に来襲していることが分かる。また, 時間 $t=1\sim3\text{sec}$ の写真を見ると波が砕けている様子を確認でき, 写真から判断すると波砕点は法肩から12m付近 (水深100cm) であった。写真から計測した砕波点付近の波高は $H=84\text{cm}$ であり, 例えばYamada & Shiotani¹⁵⁾ の砕波限界式 $h_b=H_b/0.827$ に当てはめると砕波限界水深は $h_b=102\text{cm}$ となる。この水深は, 実験で観察された砕波水深とほぼ一致していた。

潜堤上部に設置した波高計で計測した水面高さの時系列を図-6に示す。波高計はセンサー部のワイヤーが水浸して水面高さを計測するために, 計測は表面張力や水面上に発生する泡の影響を受ける。本実験の模型寸法比は1/30と小さく, それらの影響が特に大きく表れ, 水面高さの時系列は乱れていた。

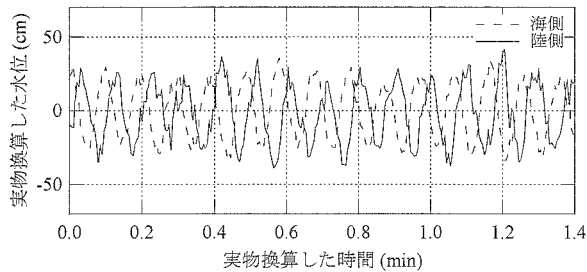


図-6 水面変動の一例（造粒固化土地盤）

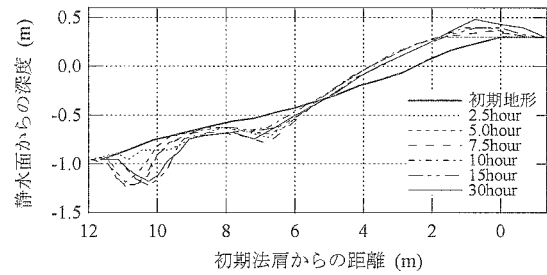
図-6に示した水面変動の極値を平均して波高を求めると実物寸法換算で57cmであった。実験中に撮影した写真から波高計の位置での波高を読み取ると72cmであり、波高計は多少小さく計測する結果となった。波高計の精度を向上することは今後の課題である。また、距離が6.0m離れた2箇所の波高計で計測した値の位相差から、潜堤上部での波速を求めると2.5～2.9m/sであった。さらに、間隙水圧計の設置位置での波高を撮影写真から読み取ると、相馬珪砂の実験ケースで沖側から71, 40, 9cmで、造粒固化土の実験ケースで沖側から75, 38, 7cmであった。

4. 遠心模型実験結果

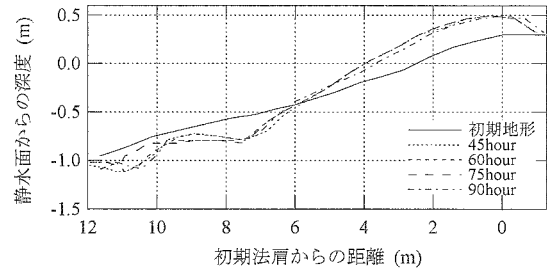
(1) 地表面形状の変化

実験中の各時間で撮影した画像から地表面の変位を読み取った。これを図-7 および図-8 に示す。横軸には初期の法肩からの距離を、縦軸には初期水面からの深度を実物寸法換算で表している。砂地盤の実験ケースを示した図-7(a)の30時間までの地表面変位を見ると、初期汀線の位置で前浜の高さが0.21～0.24mと発達し、初期法肩から7mと10～11m付近で局所的に削れていた。また、局所的に削れている箇所の位置や深度は時間毎に変化していた。波浪の入射開始から45時間以降の地表面変位を示した図-7(b)を見ると、前浜の高さは0.25～0.28mとさらに発達していた。局所的に削れている箇所は8mと11m付近と沖側へ移動しており、30時間までの場合と同様に地表面は時間毎に変化した。

地盤材料を造粒固化土とした図-8(a)を見ると、相馬珪砂のケースと同様に前浜が発達し、局所的に削れる箇所が沖側で観察された。初期汀線の位置で前浜の高さは0.25～0.30mと上昇しており、局所的に削れる箇所は初期法肩から7～9mとばらついていった。また、図に示すように地表面変位は時間毎に変化していた。一方、波浪の入射開始から45時間以降の地表面変位を示した図-8(b)を見ると、前浜の高さは0.1m程度と減少していたが、沖側の局所的な削れは見られなくなった。また、45時間以降に地形変化がほぼ収まり、地表面の深度は平衡状態に至っていた。このことから、限られた実験条件ではあるが、地盤材料を造粒固化土とした場合に常時波浪に対する地盤の安定性は高まることを確認できた。

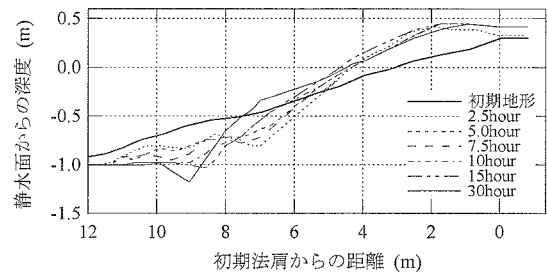


(a) 0～30時間

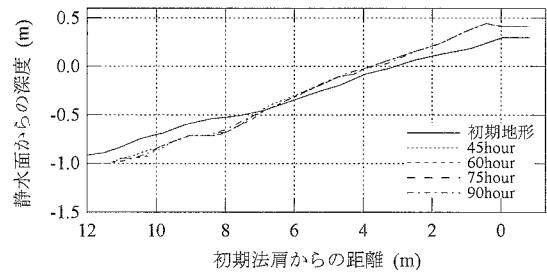


(b) 45～90時間

図-7 地表面変動（砂地盤）



(a) 0～30時間



(b) 45～90時間

図-8 地表面変動（造粒固化土地盤）

(2) 地形の時間変化

図-8に示した地表面の変位から汀線付近（初期法肩から2～6mの範囲）での斜面勾配を求めると、図-9のようになる。また、汀線の沖側への前進距離を図-10に示す。各図を見ると、実験ケースにかかわらず、波浪を入射し始めた直後に斜面勾配は初期値の0.10から0.22～0.24と大幅に大きくなり、汀線は1.3mだけ沖側へ前進していた。すなわち、地盤材料に関係なく、常時波浪の来襲によって前浜が早期に発達した。その後、砂地盤の実験ケースでは、斜面勾配が0.18～0.24と変動し、汀線の位置も1.2～1.5mと変動していた。一方、造粒固化土地盤の実験ケースでは、30時間までで斜面勾配は0.24から0.12まで減少し、その後は斜面勾配はほぼ変化せずに平

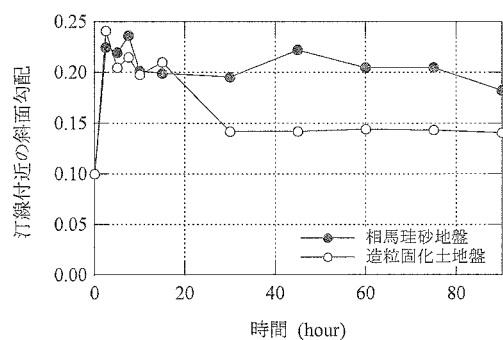


図-9 汀線付近の斜面勾配の時系列

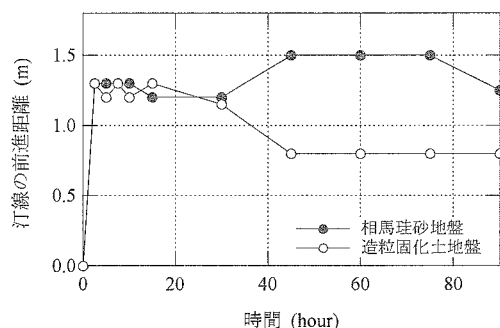


図-10 汀線の前進距離の時系列

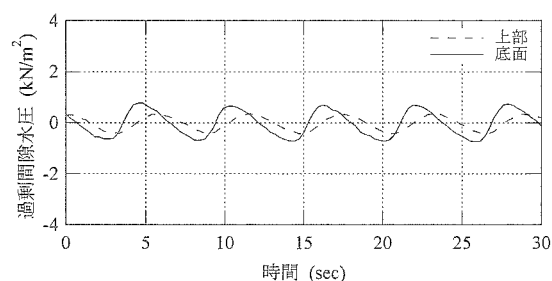
衡状態に至っていた。汀線の位置は1.3mから0.8mまで後退し、その後は汀線の位置はほぼ変化しなかった。このことから、造粒固化土地盤では45時間以降はほぼ地形変化を生じないことが確認できた。また、45時間以降の勾配を比較すると、砂地盤での勾配が造粒固化土地盤での勾配よりも1.29～1.56倍ほど大きく、地盤材料を造粒固化土とすることで緩勾配の海浜となることが分かった。

(3) 間隙水圧の変動特性

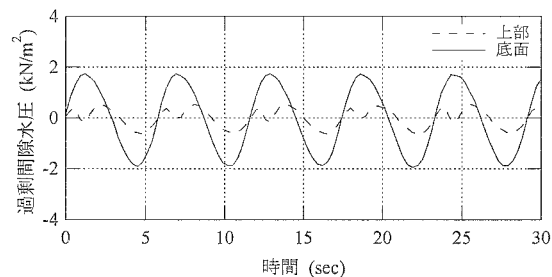
地盤材料を透水係数の大きい造粒固化土とすることで表層砂が安定化する原因を探るため、地盤内での間隙水圧の変動を調べた。砂地盤および造粒固化土地盤の実験ケースにおいて最も沖側の2深度で計測した過剰間隙水圧の時系列を図-11に示す。図の横軸は波浪入射開始5分後の時間である。

砂地盤での計測結果を示した図-11(a)を見ると、底面で計測した過剰間隙水圧の振幅は 0.77kN/m^2 で、上部の振幅は 0.39kN/m^2 であり、底面での振幅の方が大きかった。また、両者の位相を比較すると、底部の位相から上部の位相は遅れており、底部に先に水圧が伝播していることが分かった。これらは、実験では台形形状の潜堤を透水性の高い礫材で作製しており、潜堤に近い底部の間隙水圧計に先に水圧が伝播したためと考えられる。

実験では地表面での間隙水圧を計測しなかったが、水圧が地盤内を伝播する必要があるために地表面での水圧の位相は底部での水圧の位相に近いが、それよりも速い。これから、地表面での間隙水圧が最小値となる時に、位相遅れがある地盤内上部の水圧は最小とならない。すなわち、表層の覆砂部での動水

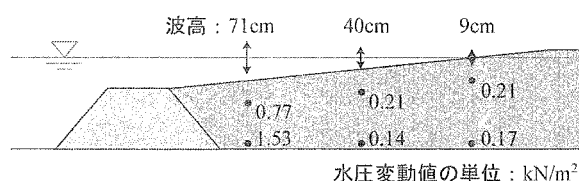


(a) 砂地盤

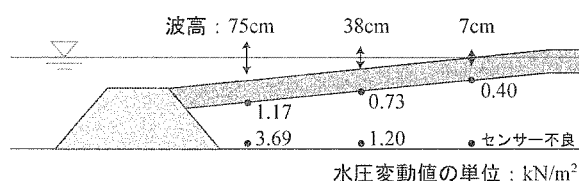


(b) 造粒固化土地盤

図-11 過剰間隙水圧の時系列



(a) 砂地盤



(b) 造粒固化土地盤

図-12 地盤内の間隙水圧の変動幅

勾配は大きく、上向き浸透力によって地盤が緩むと考えられる。なお、波浪が来襲する際の動水勾配と上向き浸透流の関係については文献^{16), 17)}が詳しい。

造粒固化土地盤での計測結果を示した図-11(b)に注目すると、底面で計測した過剰間隙水圧の振幅は 1.85kN/m^2 で、上部の振幅は 0.59kN/m^2 であり、やはり底面での振幅の方が大きかった。これについても、透水性の高い潜堤を介して水圧が伝播したためと考えられる。また、図-11(a)の砂地盤と図-11(b)の造粒固化土地盤における過剰間隙水圧の振幅を比較すると、造粒固化土地盤での振幅の方が大きかった。これは地盤の透水性が高いために、潜堤から大きく水圧が伝播するためである。また、地盤の間隙水圧の振幅が大きいということは、地表面での間隙水圧が最小値となる時に、地盤の水圧も比較的低下することを示している。このため、表層部での動水勾配は小さく、上向き浸透力による地盤の緩みも少ないと考えられる。

波浪が来襲することによって地盤内の間隙水圧は変動するが、その変動幅（振幅の2倍）をまとめたものが図-12である。図に示した数値は、実物寸法換算で波浪入射開始5分後での間隙水圧の変動幅である。図-12(a)に示した砂地盤での水圧変動を見ると、沖側で 1.53kN/m^2 程度の水圧変動が見られるが、陸側では $0.14\sim 0.21\text{kN/m}^2$ の水圧変動に留まっている。また、陸側では底部よりも上部での変動幅の方が大きく、地表面での水圧変動が下層へ伝播している。一方、図-12(b)に示した造粒固化土地盤での水圧変動を見ると、沖側で 3.69kN/m^2 と大きな変動が見られ、陸側でも $0.40\sim 1.20\text{kN/m}^2$ の変動が見られた。これは、潜堤を介して地盤内に水圧が伝播するためである。このことから、地盤材料を造粒固化土とすることで、地盤内の間隙水圧の変動が大きくなることが確認できた。上述のように、間隙水圧の変動が大きい場合、表層部での動水勾配が小さくなり、上向き浸透流が弱まるために海浜が安定化し易かったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、透水性の高い造粒固化土を人工海浜材として用いた地盤の波浪に対する安定性について遠心模型実験によって調べた。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 勾配を有する海浜地盤に波浪が来襲する際の地盤挙動に関して、遠心模型実験における相似則を検討した。その結果、一部の現象について相似則が合わないが、同一の波浪外力下で異なる地盤材料を用いた海浜の安定性を比較する上では遠心模型実験は有効な手段であることを示した。
- 2) 遠心力場で発生させた波浪は、経験式から求まる深度と同程度の深度で碎波し、波高が減衰していく状況を再現できた。
- 3) 常時波浪を来襲した際の地表面変化の観察結果から、地盤材料の種類にかかわらず前浜が発達し、沖側で局所的に削れる箇所があった。長時間にわたって波浪を来襲し続けると、砂地盤では地表面の形状が変化し続けたが、造粒固化土地盤では地表面変化が収まって平衡状態に至った。このことから、地盤材料として造粒固化土を用いると、地盤が安定化する傾向にあると言えた。
- 4) 地盤内の間隙水圧の変動結果から、沖側かつ底部ほど水圧変動幅が大きかった。これは、透水性の高い潜堤を介して地盤内に間隙水圧が伝播するためと考えられた。地盤材料を造粒固化土とすることで地盤内の水圧変動は大きくなり、表層の覆砂部での動水勾配は小さくなる。このため、上向き浸透流が小さくなって海浜が安定化したと考えられた。

謝辞：造粒固化土の作製と透水係数の計測に関して、横浜国立大学大学院の大草陽太郎氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 海の自然再生ワーキング・グループ：海の自然再生ハンドブック，国土交通省港湾局，2003。
- 2) 国土交通省港湾局：港湾の技術開発にかかる行動計画～安全で活力ある持続可能な社会の実現を目指して～，国土交通省港湾局，17p.，2005。
- 3) 高橋英紀，市川栄徳，大草陽太郎，早野公敏，森川嘉之：貧配合セメント造粒砂の力学特性に関する一検討，海洋開発論文集，Vol. 25，pp. 215-220，2009。
- 4) 高橋英紀，大草陽太郎，早野公敏，森川嘉之：遠心力場における造粒固化土の岸壁背後地盤への適用性の検討，地盤工学シンポジウム論文集，No. 54，pp. 519-526，2009。
- 5) 石井秀雄，中村友和，宇多高明，大木康弘，熊田貴之，芹沢真澄：茨城県神向寺海岸での粗粒材養浜による砂浜の安定化，海洋開発論文集，Vol. 22，pp. 887-892，2006。
- 6) 古谷真広，小林昭男，宇多高明，野志保仁，清水達也，遠藤将利：礫浜における細砂中砂の挙動に関する実験的研究，海洋開発論文集，Vol. 25，pp. 1113-1118，2009。
- 7) 柳嶋慎一，佐藤勝弘，原 隆，齋藤正文，岩佐直人，堀 謙吾，長谷川巖，長谷川準三：透水層埋設による海浜安定化工法の開発，港湾空港技術研究所報告，Vol. 42，No. 1，pp. 1-113，2003。
- 8) 前野賀彦，内田一徳：遠心載荷装置による波浪を受ける海底地盤内応力場の再現，海岸工学論文集，Vol. 37，pp. 754-758，1990。
- 9) Sekiguchi, H., Kita, K., and Okamoto, O.: Response of poroelastoplastic beds to standing waves, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 3, pp. 31-42, 1995。
- 10) Sassa, S. and Sekiguchi, H.: Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 5, pp. 621-638, 1999。
- 11) 馬場慎太郎，三宅達夫，金 夏永，鶴ヶ崎和博：波・地盤・構造物の新しい実験手法，海岸工学論文集，Vol. 49，pp. 1536-1540，2002。
- 12) 三宅達夫，角田紘子，前田健一，坂井宏隆，今瀬達也：津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用，海洋開発論文集，Vol. 25，pp. 87-92，2009。
- 13) 地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版），地盤工学会，p. 416，2000。
- 14) 北詰昌樹：新遠心模型実験装置の開発と研究への適用，港湾技術研究所資料，No. 812，35p.，1995。
- 15) Yamada, H. and Shiotani, T.: On the highest water waves of permanent type, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 18, No. 135, pp. 1-22, 1968。
- 16) Zen, K. and Yamazaki, H.: Field observation and analysis of wave-induced liquefaction in seabed, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 4, pp. 161-179, 1991。
- 17) 浅原信吾，三浦均也，大塚夏彦，田中隼矢：透水性コラムを用いた波浪に対する海底地盤の安定化工法の有限要素法による検討，海岸工学論文集，Vol. 54，pp. 966-970，2007。