

波浪による水圧変動を受ける砂質地盤における細粒分流出に関する研究

Study on Washout of Fine Sandy Ground under Water Pressure Changes due to Waves

松井章弘 Akihiro MATSUI
土田 孝 Takashi TSUCHIDA
浅海綾一 Ryoichi ASAUMI

(広島大学大学院工学研究科)
(広島大学大学院工学研究科)
(清水建設(株))

沿岸環境改善事業として人工干潟を造成する事例が増加している。しかし、造成後に覆砂中の細粒分が抜け出し生態系が不安定になる事例が確認されている。細粒分の流出のメカニズムはいまだ明確な原因が明らかにされていない。海底地盤に力学的な影響を及ぼす外的な要因としては様々な要因が考えられる。本論文では波浪による水圧変動によって地盤が不安定化することに着目し、2種類の室内模型実験を実施した。その結果、いくつかの条件で細粒分の抜け出しが確認された。そして、試験後の細粒分の移動と試験中の地盤内の間隙水圧結果、模型地盤側方からの状況から、細粒分流出の原因を検討した。

キーワード：干潟，波浪，砂質土，細粒分，海岸

(IGC : D04)

1. はじめに

近年、沿岸環境改善事業として人工干潟を造成する事例が増加している。干潟は、底生動物などの多様な生物を育み、沿岸生態系の重要な構成要素である¹⁾。しかし、現状では藻場・干潟の再生へのニーズと造成技術にはギャップがあり、造成干潟に対する否定的な評価も存在する²⁾。篠崎らは成功事例として知られる尾道糸崎港海老地区の人工干潟において、成功の原因を分析した。その結果、干潟が良好な生態系を維持するためには、干潟表層地盤の環境、特に保水性とそれを維持するための細粒分の存在の重要性を指摘している³⁾。しかし、一方で渡り鳥などの野鳥の飛来地として設計された広島港五日市人口干潟では、造成後、数年の時間経過とともに当初、表層地盤に存在していた5~10%の細粒分が流出してしまう現象が確認され、地盤の保水性が低下して渡り鳥の数が減少しているという報告がある⁴⁾。図-1は、五日市人工干潟の粒度組成の経時変化を示しており、この図より造成後約3年で細粒分が流出していることがわかる。これより、安定した生態系を形成するために、細粒分の流出メカニズムの解明と防止策

の検討が必要である。

海底地盤に力学的な影響を及ぼす外的な要因として、波浪による水圧変動、底面せん断力などが考えられる。善らの研究によると、波浪などの比較的周期の短い水圧変動の場合、地盤表層での水圧変動が地盤内に瞬時には伝達せず、水圧低下時に地盤内部で過剰間隙水圧が発生して有効応力が低下し、砂質地盤が不安定化することが知られている⁵⁾。図-2に示すように、 σ_{v0}' を静穏時の砂地盤の有効鉛直応力とする。海底面の水面の伝達が遅れる場合、地盤内の変動水圧 p_m は海底面の水圧変動量 p_b と異なる。このとき地盤中には、 $(p_b - p_m)$ だけの過剰間隙水圧が発生し、海底地盤中の鉛直有効応力 σ_v' は、

$$\sigma_v' = \sigma_{v0}' \pm (p_b - p_m) \quad (1)$$

また、鉛直有効応力の変動量 $\Delta\sigma_v'$ は、

$$\Delta\sigma_v' = \sigma_v' - \sigma_{v0}' = \pm (p_b - p_m) \quad (2)$$

と表すことができる。

式(1)、(2)において、 $\pm(p_b - p_m)$ がプラスのときは波高上昇時で、マイナスのときは波高下降時である。波高上昇時

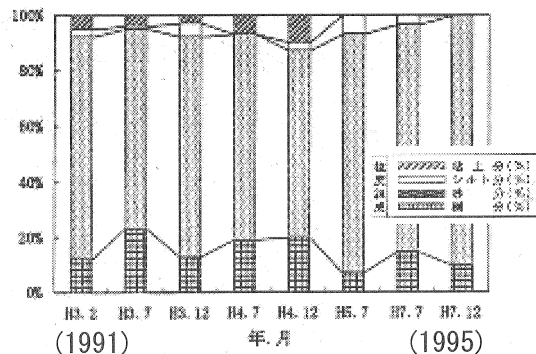


図-1 五日市人工干潟での粒度組成の経時変化⁴⁾

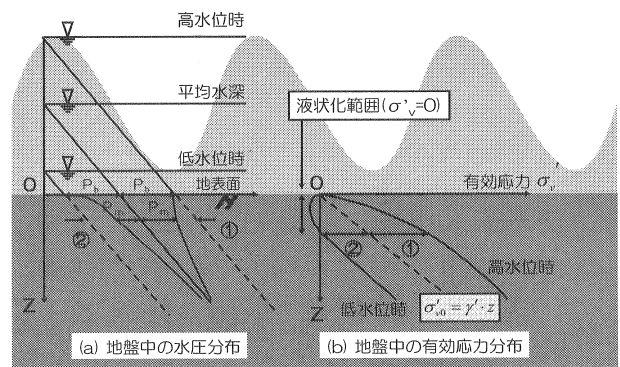


図-2 水圧変動と液状化のメカニズム⁵⁾

は図-2の①の分布のように地盤中の有効応力 σ_v' は $(p_b - p_m)$ だけ大きくなる。一方波高下降時には②の分布のように、 $(p_b - p_m)$ だけ有効応力が小さくなる。マイナス時の値が大きい場合には、図-2(b)の②のようにある深さ以下で有効鉛直応力が負となる。実際、有効鉛直応力は負になりえないので、有効鉛直応力がゼロになったときにその深さ以下で液状化が発生していると考えられる。

善らは水圧変動载荷時の地盤内間隙水圧を理論的に算出する基礎方程式として次式を示した⁵⁾。

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\partial P_b}{\partial t} \quad (3)$$

ここで、 C_v ：圧密係数、 P_m ：地盤中の水圧の静水圧状態からの変動量、 P_b ：海底面上の水圧変動振幅、 α ：伝達係数である。 α は水圧の伝達のし難さを表す係数であり、以下の式で表される。

$$\alpha = 1 + \frac{n}{m_v} \left(m_{w0} S_r + \frac{(1 - S_r)}{P_{mg}} \right) \quad (4)$$

ここで、 n ：間隙率、 m_v ：体積圧縮係数、 m_{w0} ：水の圧縮率、 P_{mg} ：絶対圧力で表した間隙水圧である。この式より α は主に地盤の飽和度 S_r に依存している。つまり、地盤の飽和度が高ければ地盤中に水圧が伝わりやすく、低ければ水圧は伝わりにくく液状化しやすい状況になるといえる。

本研究はこの波高下降時における水圧応答の遅れによる有効鉛直応力の低下の影響に着目し、2種類の室内模型実験を実施することで、干潟地盤での現象を再現するとともに細粒分の流出原因について検討した。

2. 一次元水圧変動载荷実験

2.1 実験概要

1章で述べた波浪による水圧変動による地盤の液状化の現象を見るため、図-3で示される模型装置を用いて波浪による一次元的な水圧変動を再現した。直径22cm、高さ50cmの亚克力円筒内に試料を詰めて、模型上部より一次元水圧(sin波)を载荷した。亚克力円筒の側方よりニードル型の間隙水圧計を用いて、地盤深さ2cm間隔の水圧変動载荷中の地盤内の間隙水圧を測定できるようになっている。波浪条件は五日市人工干潟の設計波高を参考にして決定し、設定水深を2m、波高1.2m、周期5秒の波を24時間载荷した。用いた試料は5号珪砂に海成粘土(広島港出島粘土)、碎石粉(非塑性)を混ぜて相対密度50%、初期細粒分含有率10%に調整した試料で行った。細粒分の混合比については表-1に示す。表中のCは海成粘土(Clay)、SFは碎石粉(Stone Flour)の混合比を表しており、例えばC0-SF10は海成粘土0%、碎石粉10%の混合比を意味する。飽和条件については、「飽和」は模型地盤の間隙をCO₂で

置き換えた後、脱気水を通水し地盤内の飽和度を高くしたことを示し、「不飽和」は水道水を下からゆつくりと通水し、特に飽和度を高めていない条件で地盤を作成したことを示す。

载荷後、円筒内の水を排水し、直径5センチの塩ビ製の筒を中央部に差込み、試料をサンプリングした。サンプリング後、深さごとに試料を分割し、細粒分含有率と細粒分の粒度組成を測定した。粒度組成の測定には、少量の試料でも粒度組成が測定できるレーザー回折式粒度分布測定装置(SALD-2000J)で測定した。

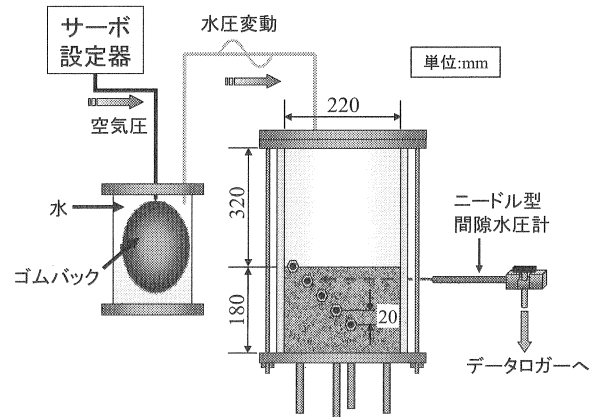


図-3 模型概略図(一次元水圧変動载荷実験)

表-1 実験条件(一次元水圧変動载荷実験)

試料	5号珪砂(%)	細粒分混合比(%)		飽和度
		海成粘土	碎石粉	
C0-S.F.10	90	0	10	飽和 不飽和
C2-S.F.8	90	2	8	飽和 不飽和

※相対密度 = 50%，载荷時間 = 24時間

設定水深 = 2m，波高 = 1.2m(11.76 kN/m²)，周期 = 5秒

2.2 実験結果および考察

図-4は载荷後の深さ方向の細粒分含有率の変化を示したものである。図のように、C0-SF10の不飽和条件では地盤表層で細粒分含有率が増加し、細粒分の流出を確認した。しかし、海成粘土を混合し粘性があるC2-SF8の不飽和条件では、流出は起きなかった。また、飽和度を高めた場合にはC0-SF10でも細粒分の抜け出しは起きなかった。細粒分が流出した実験ケース(C0-SF10 不飽和)の载荷後の細粒分の粒度組成は、表層部で粗粒化が起きており細粒分の中でも比較的粗い粒径のもの(10μm以上)が上方へ移動したと考えられる(図-5)。

図-6は、飽和条件と不飽和条件について、地盤に加わる水圧を増加させた時の地盤内の間隙水圧の応答を間隙水圧係数Bで示した結果である。B値は次式で算出され、地盤面に加えた水圧が完全に地盤内の間隙に伝わるとB値は1.0になる。

$$B = \Delta u_d / \Delta u_s \quad (5)$$

ここで、 Δu_d は表層の水圧増分、 Δu_s は各深さの間隙水圧増分である。図を見ると、いずれの場合も時間とともに最終的にはB値はほぼ1.0になるが、飽和条件では間隙水圧が約0.5秒で応答する。一方、不飽和条件では水圧が地盤中に伝達するまでに約3秒を要しており、間隙内の空気の影響により水圧応答の遅れが生じている。

図-7は载荷中の地盤内間隙水圧の測定の結果より式(1)に従って求めた12時間载荷後のある一波での水圧下降時での過剰間隙水圧の値である。これより、細粒分の流出が確認できたC0-SF10(図-7a)では水圧減少時(位相にして120~270°)において、地盤深さ3cm以下で過剰間隙

水圧が有効応力を超えており、液状化が発生した。一方C2-SF8(図-7b)では、過剰間隙水圧の発生はみられるが、その値は σ'_{v0} より十分小さく液状化は発生しなかった。また、C0-SF10の飽和条件の過剰間隙水圧の結果も同様に液状化の発生はなかった(図-7c)。

この結果についてのまとめを以下に示す。

- 1) 波高1.2m相当の水圧を24時間载荷すると、地盤内の細粒分が上方へ移動することが確認できた。しかし、粘着性を有する試料では細粒分の移動は抑制された。
- 2) 液状化によって移動する細粒分は比較的粗い粒子であった。

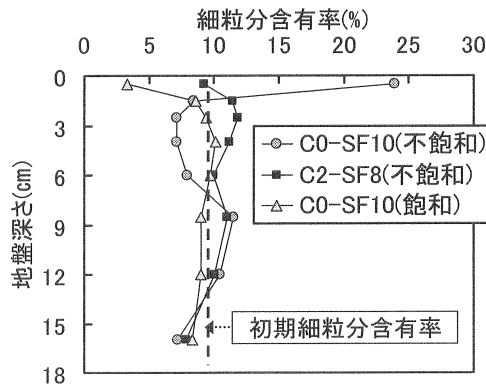


図-4 実験後の細粒分含有率の変化

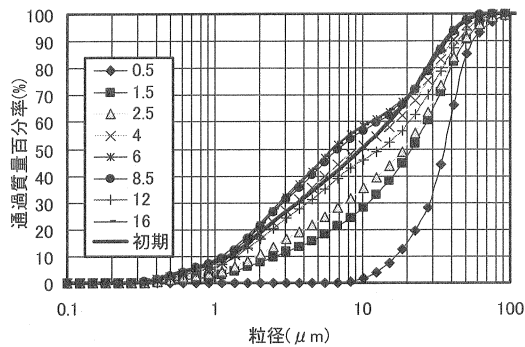


図-5 実験後の細粒分粒度組成 (C0-SF10 不飽和)

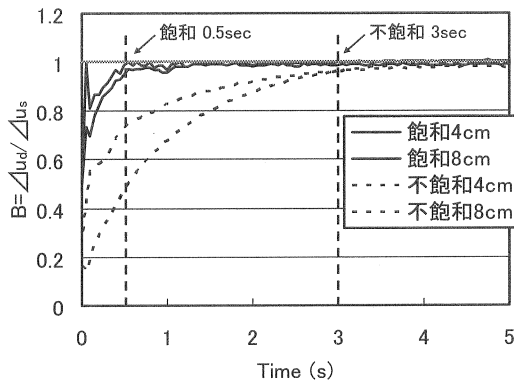


図-6 飽和度の違いによる間隙水圧応答の比較 (C0-SF10)

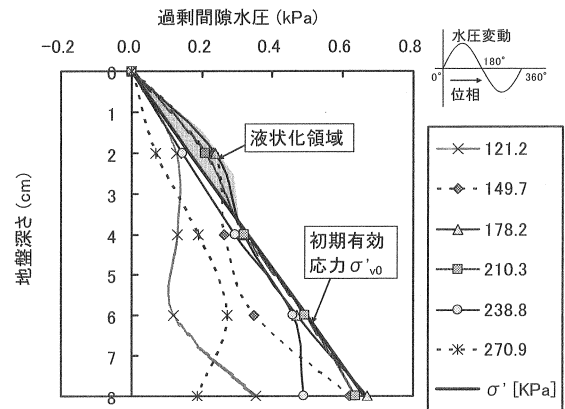


図-7(a) 過剰間隙水圧 (C0-SF10 不飽和)

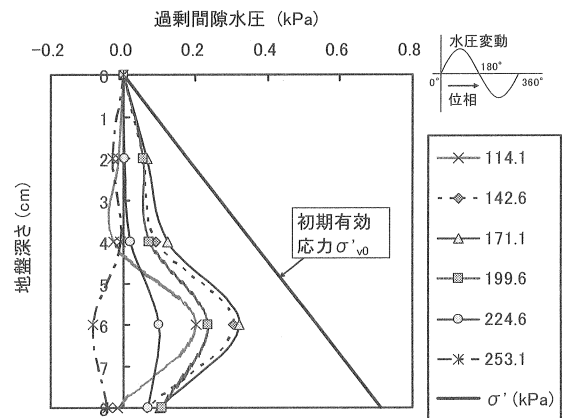


図-7(b) 過剰間隙水圧 (C2-SF8 不飽和)

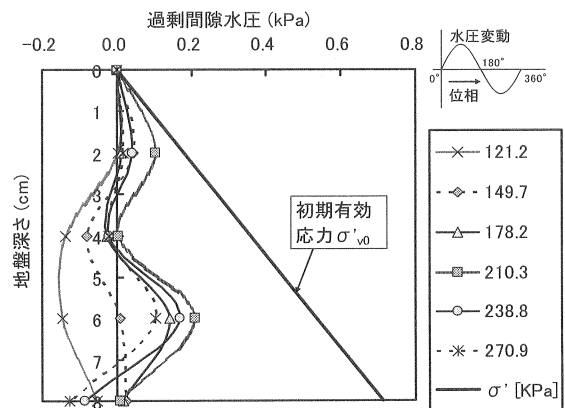


図-7(c) 過剰間隙水圧 (C0-SF10 飽和)

- 3) 細粒分が移動した試料では、載荷中の地盤内の水圧応答に遅れが生じており液状化が発生した。一方、抜け出しがない試料では液状化は確認されていなかった。
- 4) 飽和度を高めた場合、液状化は発生せず、細粒分の抜け出しも確認されなかった。

これより、細粒分の流出には間隙水圧応答の遅れによる地盤の有効応力の低下の影響が関係していると考えられる。また、間隙水圧応答遅れは細粒分の粘着性の有無や地盤の飽和度の高さによって決まることがわかった。飽和度は実際の干潟では潮汐の干出などによって海底地盤内は飽和度が低下している可能性がある。この実地盤との飽和度の比較については以下4章で述べる。

3. 側方変位を許容した水圧変動実験

3.1 実験概要

2章では、地盤の側方変位を拘束した一次元条件での水圧変動下で細粒分の上方向への移動が起きることを確認した。しかし、水圧の載荷時間が24時間と長く、異常波浪の継続時間が2時間程度であることを考えるとやや非現実的な載荷といえるので実験条件について再検討する必要がある。また、実際の波は進行波であるため、地盤内のある一要素に着目すると、波浪伝播によって地盤内には水圧変動以外に、せん断応力が発生している。波長 L 、周期 T の正弦波荷重による応力分布から最大せん断応力 τ_m と主応力軸の方向 β を求めると、

$$\tau_m = p_0 \frac{2\pi z}{L} e^{-\frac{2\pi z}{L}} \quad (6)$$

$$\tan 2\beta = \tan \left(-\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (7)$$

となる。ここで、 p_0 は正弦波荷重の振幅で、 z は地盤深さである。これより、波浪による海底地盤内の応力変化は、最大せん断応力は一定に保たれるが、主応力軸の方向が波高の進行とともに、連続的に変化している⁶⁾。

しかし、このような地盤の応力状態を室内模型によって再現するのは困難である。そこで、図-8に示すように地盤の側面にゴム膜を設置し、土層が水圧載荷によって側方にも変位する条件で実験を行った。セル内の水圧によって、ゴム膜内の空気が圧縮・膨張を繰り返すことで、土層は水圧上昇時に側方へ膨らみ、水圧下降時に鉛直方向の圧力よりゴム膜内の圧力が大きくなり、タテにのびる挙動を示す。すなわち、せん断変形は主応力軸の方向が固定された圧縮と伸張である。試料寸法は、直径19cm、高さ25cmである。ゴム膜は円周の60°分カットされており、地盤面から2cm間隔で側面より間隙水圧計を設置し、水圧変動載荷時の地盤内の間隙水圧を測定した。側方への変動量は直径に対するひずみでゴム膜が水圧上昇時に1%縮み、水圧下降時に1%膨らむようにゴム膜内の空気量を調節した。実験条件は、2.1で述べた実験と比較するためにほぼ同様の条件で行

い、実験試料の細粒分の混合比などは表-2に示す。また、今回は載荷時間を2時間(約1500波)とし、一次元水圧変動載荷のみの実験も同様の条件で行い、載荷時間による影響も比較した。

3.2 実験結果

① 載荷後の細粒分含有率結果

図-9に載荷後のセル中央部での地盤深さ方向の細粒分含有率の変化を示す。まず、C0-SF10の不飽和条件での結果だが、一次元水圧変動載荷のみの場合、載荷時間が2時間になるとセル上端部で少し細粒分の抜け出しが確認できるものの、中央部では細粒分の抜け出しは見られなかった。一方、側方変位を許容した場合の結果は、載荷時間が2時間で少量ではあるが表層6cm以浅で細粒分含有率が増加しており細粒分の上方向への移動を確認できた。この結果から、側方変位を許容した場合、一次元的な水圧変動下よりも細粒分は抜け出しやすくなったといえる。次に、細

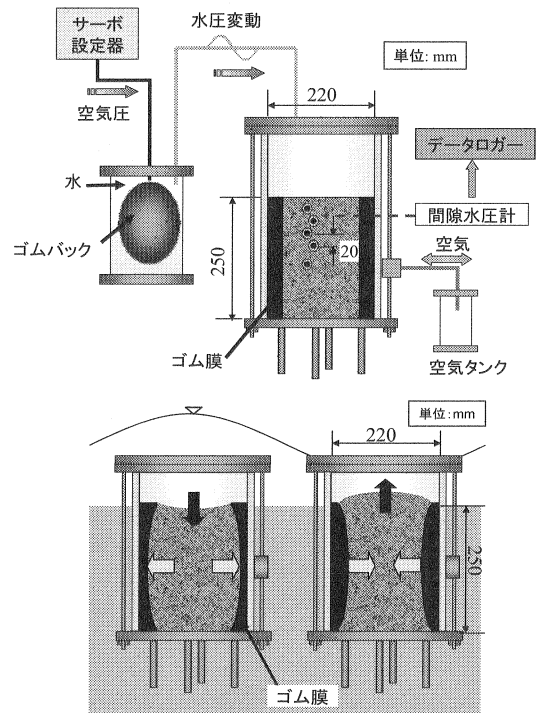


図-8 側方変位を許容した水圧変動載荷実験の概略

表-2 実験条件

(側方変位を許容した水圧変動載荷実験)

実験方法	試料	5号珪砂(%)	細粒分混合比(%)		飽和度
			海成粘土	砕石粉	
一次元水圧変動載荷実験	C0-S.F.10	90	0	10	飽和 不飽和
	C3-S.F.7	90	3	7	飽和 不飽和
側方変位を許容した水圧変動載荷実験	C0-S.F.10	90	0	10	飽和 不飽和
	C3-S.F.7	90	3	7	飽和 不飽和

※相対密度 = 50%, 載荷時間 = 24時間

設定水深 = 2m, 波高 = 1.2m(11.76 kN/m²), 周期 = 5秒

粒分に海成粘土を使用し、粘着性を考慮した C3-SF7 の結果は、不飽和条件において一次元水圧変動载荷実験の場合ほとんど細粒分の移動は見られなかった。しかし、側方変動を許容した実験では C0-SF10 と同様の結果が得られ、粘着性を考慮した試料条件でも細粒分の抜け出しが確認された。また、飽和条件下では d) の C3-SF7 で少し移動している傾向が見られるが载荷後の表層の様子などを考慮した結果どの実験においても顕著な変化は見られなかった。

② 地盤内間隙水圧測定結果

図-10 は一次元水圧変動载荷実験での不飽和条件载荷中の地盤内の間隙水圧の変化を示している。図より、間隙水圧は表層の水圧に位相遅れをしながら変動しており、地盤深さが深くなるほど水圧応答の遅れが大きくなっていた。そして、水圧下降過程で、過剰間隙水圧が有効応力より大きくなり、液状化していた。

一方、側方変動を許容した水圧変動载荷の実験では、図-11 に示すように地盤内の間隙水圧がほとんど上昇しなかった。この原因として、せん断変形によって土層が体積膨張しようとし、負の間隙水圧が発生して水圧が引き下げられたことが考えられる。図-12 は、C0-SF10 の乾燥試料で一面せん断試験を実施した結果である。今回の実験条件に合わせるため、鉛直方向拘束圧力をできる限り小さい条件（1.63kPa, 3.76kPa）で試験を行った。図より、せん断初期では明瞭な正のダイレイタンス特性は確認されないが、せん断変位が大きくなると試料は膨張側に変形した。今回の実験中、側方からの様子では地盤面は 2 時間の水圧変動の载荷により最終的に約 2cm 沈下した。これは主に側方のゴム膜が柔らかいため水圧下降時に土層の自重によって元の状態に戻らず、载荷を繰り返す過程で下部を中心に側方へはらみだしたと推定された（上部からの観察、試験終了後の確認による）。繰り返し载荷における地盤の側方の変形は平均的に ±1% に設定したが、地盤の中央部ではより大きなせん断変形が生じ、これによって地盤が正のダイレイタンスを示したと考えられる。

次に、図-13 に示すように側方変位を許容した実験の水圧変動時の平均有効主応力とせん断力の関係を求め、実験中の地盤内の応力状態を考えた。せん断力と平均有効主応力の求め方は、地表面の水圧変動とゴム膜内の空気圧と各深さの間隙水圧の値より以下のように求める。

地盤内の深さ z cm の σ'_1 と σ'_3 は、

$$\sigma'_1 = \text{深さ } z \text{ cm の } \sigma'_{v0} + \text{表層の水圧変動} - \text{深さ } z \text{ cm の } u$$

$$\sigma'_3 = \text{深さ } z \text{ cm の } \sigma'_{v0} + \text{ゴム膜内の空気圧} - \text{深さ } z \text{ cm の } u$$

ここで、 σ'_{v0} : 有効主応力, u : 間隙水圧である。これより、

$$\text{平均有効主応力 } p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (8)$$

$$\text{せん断応力 } q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (9)$$

と求まる。図より水圧下降時にはせん断応力がマイナスになり、平均有効主応力が低下しており、水圧上昇時には逆

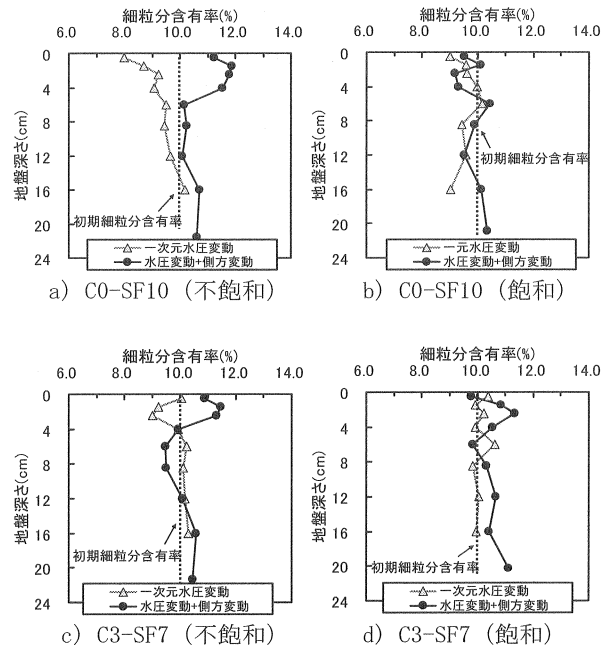


図-9 細粒分含有率結果（载荷時間 2 時間）

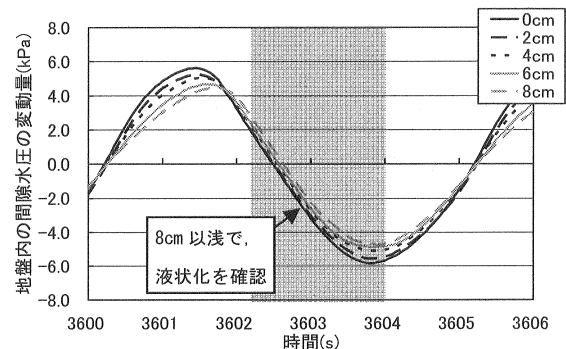


図-10 地盤内間隙水圧結果(C0-SF10 不飽和)
 (一次元水圧変動载荷実験 载荷 60 分後)

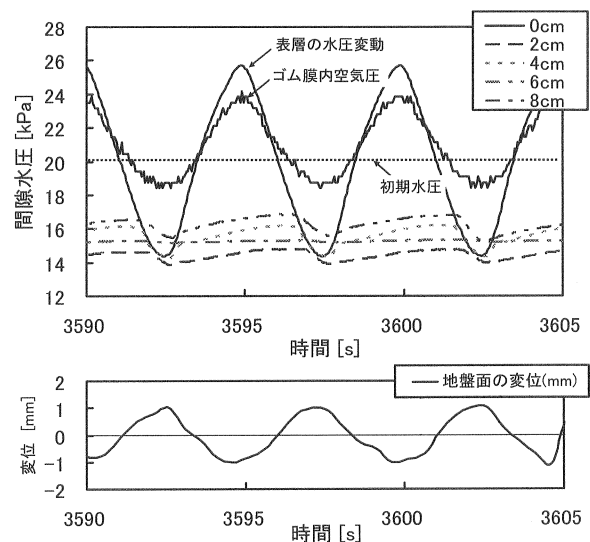


図-11 地盤内間隙水圧結果と表層地盤の変動
 (C0-SF10 不飽和)
 (側方変動を許容した水圧変動载荷実験)

にせん断応力はプラスになり、平均有効主応力は増加している。今回の図-11 に示す間隙水圧測定の結果からでは、一次元水圧変動载荷実験と違い、水圧下降時に過剰間隙水圧が発生せず、液状化の発生は確認できなかった。しかし、図-13 の地盤内の応力状態から考えると、液状化は発生していないものの水圧上昇時には地盤が締まり、水圧下降時には地盤内の拘束力が緩む傾向になっている。

③ 細粒分流出のメカニズムについての考察

図-14 に側方変動を許容した水圧変動载荷実験の C0-SF10 の不飽和条件における、载荷中の側方からの様子を示した。上が水圧下降時で、下が水圧上昇時である。図に示すように载荷中に、地盤面は水圧変動により水圧下降時に 1mm 上昇し、水圧下降時に 1mm 沈下していた。それに伴い水圧下降時に地盤内から濁った間隙水が上方へ流出し、細粒分が移動しているのが確認された。

これより、今回の側方変動を許容した水圧変動载荷実験での細粒分の移動の要因として、この間隙水の流れが考えられ、この現象が不飽和条件のとき起こることから、間隙空気の影響を考える。間隙空気は水圧の変動によって、圧縮・膨張を繰り返す。そこで、この変化した体積の量だけ間隙水の流出入が起こるとして、水圧変動による間隙空気の変化を算出する。

不飽和条件の土層の正確な飽和度は求められないが、ここでは間隙水圧応答を式(3)のモデルを利用し、間隙水圧の実験値に計算値をフィッティングさせるようにし、その時の α を求めて式(4)より飽和度を求める。間隙水圧の実験値は図-10 での側方変動がない条件での結果を用いた。計算の結果、不飽和条件での飽和度は約 90.9% となった(フィッティングの結果を図-19 に示した)。C0-SF10 の初期間隙比は $e=0.771$ であり、土粒子の体積は $V_s=4517\text{cm}^3$ 、間隙の体積は $V_v=3482\text{cm}^3$ となる。飽和度が 90.9% だから、間隙空気の体積は $V_a=317\text{cm}^3$ である。ここで、ボイル・シャルルの法則を用いて、水圧上昇時と下降時の間隙空気の体積を算出すると、水圧上昇時は $V_a=302\text{cm}^3$ で、水圧下降時は $V_a=333\text{cm}^3$ と求まり、水圧変化によって間隙空気は水圧上昇時に 15cm^3 圧縮しており、水圧下降時に 16cm^3 膨張していると推定される。

この結果より、間隙水の流れは間隙空気の圧縮・膨張により起こると考えられる。これを図-12 の結果とあわせて考えると、側方変動を許容した水圧変動载荷実験は一次元水圧変動载荷のみと比べると体積が変動しやすく水圧下降時に地盤内の拘束力が緩む傾向にあることで、間隙が増減する分だけ水の流出入が多くなり、それに伴って細粒分流出も多くなったと考えられる。

細粒分流出のメカニズムを以下のようにまとめる。

- 1) 水圧変動によって地盤は変形しようとするが、側方変位が許容されているので、一次元水圧変動载荷実験より、地盤の変動が大きい。
- 2) 水圧下降時には平均有効主応力が低下し地盤が緩む傾向にあり、粒子の間に存在する細粒分の拘束が離

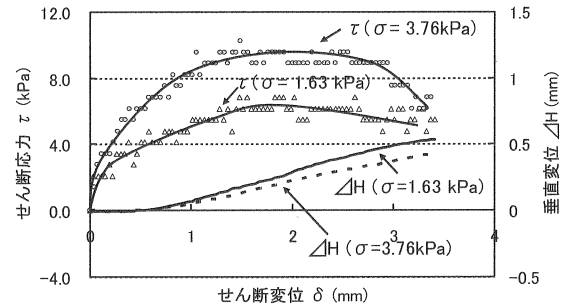


図-12 一面せん断試験結果 (C0-SF10)

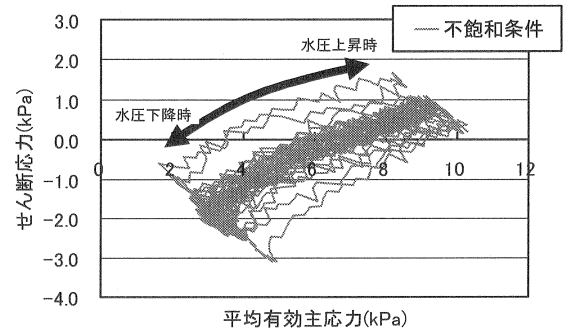


図-13 地盤深さ 4cm での平均有効主応力とせん断力の関係 (C0-SF10)

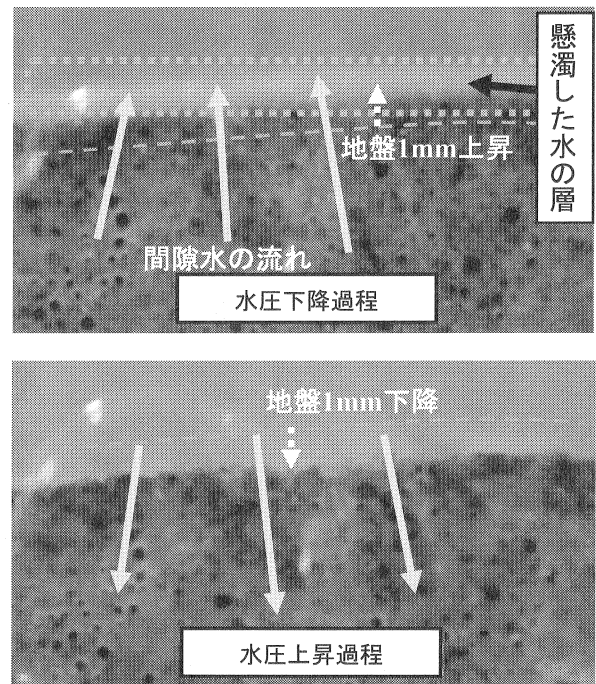


図-14 载荷中の地盤表層部の側方からの状況 (実線の矢印…間隙水の流れ)

(上) : 水圧下降過程

(下) : 水圧上昇過程

れやすい。

- 3) 飽和度が低いことにより間隙空気の圧縮・膨張が大きく間隙水の流れが生じ、その流れとともに拘束力が弱まった細粒分が上方へ移動する。

飽和度が高い場合は間隙水の流れが少ないため、細粒分の移動がしにくかったと考えられる。実地盤との飽和度の比較については次章で述べる。

4. 現場観測による干潟表層での間隙水圧応答と実験値と観測値の比較

模型実験では飽和度が低い条件の時に於いて、細粒分の移動を確認することができた。そこで、実際の干潟地盤と模型実験での間隙水圧応答・飽和度の高さを比較するために、実際の干潟地盤内での間隙水圧を測定した。観測は、2007年11月に五日市人工干潟において行った。観測装置を図-15に示す。長さ60cm、直径6cmの亚克力製の円筒の内部に間隙水圧計が地盤面から0, 5, 10, 15, 20, 30, 40cmの間隔で合計7個取り付けられている。装置を測定地点に所定の高さまで差し込み、波が届かない場所からケーブルでつないで間隙水圧を測定した。

干潟の状態は全体として勾配が急であり、細粒分はほとんどなく砂浜に近い状態であったが、一部では表層に粘性のある細粒分が覆っている場所もあり、水鳥も飛来していた。観測地点の表層の細粒分の粒度分布を図-16に示す。細粒分含有率は1%未満であり、1mm以下の砂が多いが最大で2cmぐらいの砂礫も存在していた。また、細粒分の粒度分布を調べると、10 μ m以上の粒径のものしか存在していなかった。一方、表層に細粒分を多く含んでいた場所では細かい粒子も存在しており、模型実験で用いた試料と同じような粒度分布を示していた。

観測は、潮が満ちていくときに観測し、図-17の結果は水深が約55cmの時のある一波の間隙水圧の結果を地表面

の水圧0として補正したデータである。波高は約15cmであった。地表面(0cm)の水圧変動に対して、地盤深さが深くなるにつれて、地表面の波による水圧が伝わっておらず、水圧の変動が小さくなっている。またそれと同時に、地盤深さが増すごとに水圧応答の遅れも大きくなっている。この図-17の一波の間隙水圧結果の最初を位相0°とし、地盤内の過剰間隙水圧を算出したものが図-18である。

水圧上昇時に負の間隙水圧が発生し、水圧減少時に正の過剰間隙水圧が発生していることが分かる。

また、3章の一次元水圧変動载荷実験と現場観測の地盤間隙水圧の結果において、式(3)、式(4)より、理論値にフィッティングする伝達係数 α を求めてそこから地盤内の飽和度 S_r を推定した。図-19に、理論値と実験値、観測値のフィッティングした時の間隙水圧の結果を示す。結果より、一次元水圧変動载荷の模型実験の場合、C0-SF10の不飽和条件については $\alpha=1.34$ の時によく一致し、このときの飽和度は90.9%であった。また、飽和条件では $\alpha=1.06$ で一致し、飽和度98.2%であった。一方、現場の観測値は $\alpha=3.5$ の時によく一致し、飽和度は95.0%であった。これより、実験での飽和度と現場での飽和度は少し差があるものの、干潟表層の飽和度は干潮の影響で低くなっている。この結果より実際の干潟地盤は、飽和度が低く水圧応答の遅れが生じており、模型実験での不飽和条件に近い状況といえる。この理論値とのフィッティングの結果については解析上の問題としてパラメータの仮定による誤差なども考えられるので、実地盤の飽和度の算出には今後更なる検討をしていく必要がある。

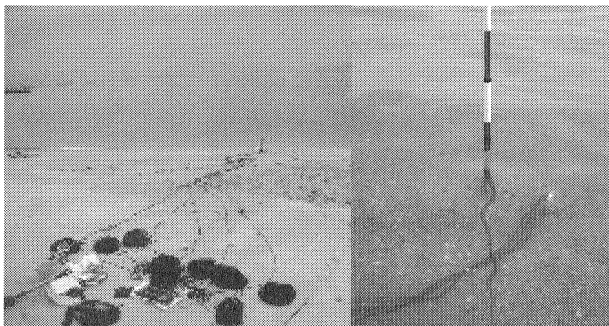


写真-1 現場観測状況
(左：全景 右：測定器設置状況)

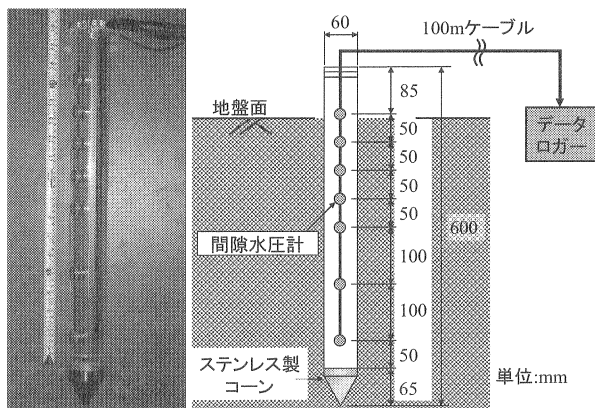


図-15 現場用地盤内間隙水圧観測装置

表-3 五日市人工干潟表層での
細粒分含有率 (2007年5月実測)

	細粒分含有率(%)
干潟表層no.1	0.073
干潟表層no.2	0.73
表層(no.1)深さ20cm	0.55
護岸付近	0.023

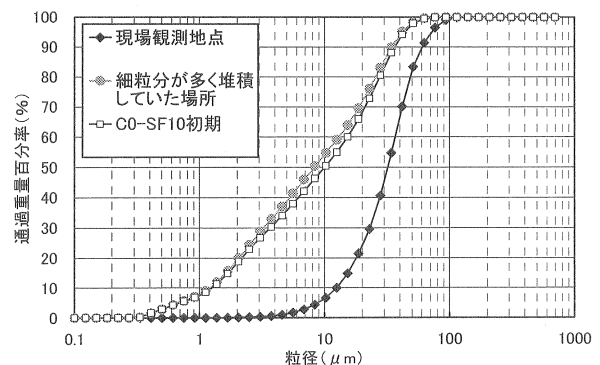


図-16 観測点位置の細粒分の粒度組成

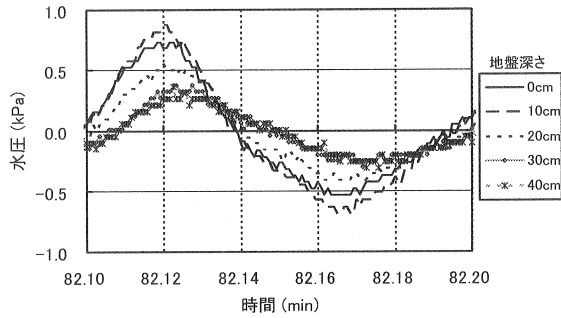


図-17 干潟表層の間隙水圧測定結果

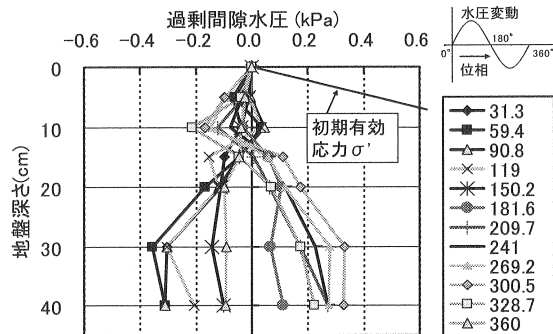
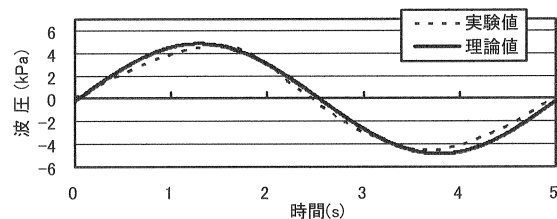
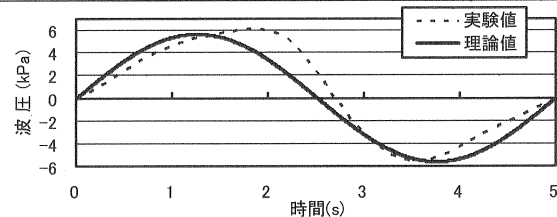
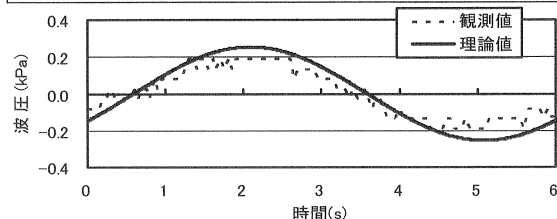
図-18 過剰間隙水圧結果
(図-17の結果より)室内(不飽和) 深さ 8cm $\alpha=1.34$ 飽和度 $S_r=90.9\%$ 室内(飽和) 深さ 8cm $\alpha=1.06$ 飽和度 $S_r=98.2\%$ 観測値 深さ 30cm $\alpha=3.5$ 飽和度 $S_r=95.0\%$

図-19 室内実験値・観測値と理論値の比較

5. 結論

本研究は、人工干潟の安定な生態系を維持するために必要とされている細粒分が、造成後、波浪による影響によって流出してしまう原因について、波浪による水圧変動に着目し、室内模型実験と現場観測を行った。以下にその結果を示す。

- 1) 一次元水圧変動条件で波高 1.2m 相当の水圧を 24 時間載荷すると、地盤内の細粒分が上方へ移動することが確認できた。抜け出しが起きた条件として非塑性の細粒分と飽和度が低い条件の時であった。
- 2) 抜け出しが確認されたケースでは水圧変動载荷中に表層付近において水圧応答の遅れにより液状化が発生していた。
- 3) 側方変位を許容した実験では少量ではあるが载荷時間 2 時間でも細粒分の移動が確認できたが、地盤内の間隙水圧が一次元水圧変動载荷実験のように上昇せず、液状化は発生しなかった。
- 4) 細粒分の流出が増加した原因としては、飽和度が低かったことによる気泡の膨張による間隙水の流れが考えられる。
- 5) 実際の人工干潟表層でも水圧応答の遅れが起きており、有効応力の低下が確認でき、飽和度は潮汐の干出の影響で低くなっていることがわかった。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：海の自然再生ハンドブック—その計画・技術・実践—第三巻藻場編，pp. 1-110，2003。
- 2) 花輪伸一，古南幸弘：人工干潟の問題点と課題，海洋開発論文集，第 18 巻，pp.43-48，2002。
- 3) 篠崎孝，羽原浩史，山本裕規，明瀬一行，竹口はや人，吉武理恵，土田孝：造成干潟における機能発揮要因に関する研究，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 1026-1030，2006。
- 4) 広島県広島港湾振興局：広島港五日市地区人工干潟環境モニタリング記録，pp.1-112，2001。
- 5) 善功企，山崎浩之，渡辺篤：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，湾研報告，第 26 巻，第 4 号，pp. 125-180，1987。
- 6) 石原研而：第 2 版土質力学，丸善株式会社，pp.209-212，2001。
- 7) 土田孝，吉牟田卓，浅海綾一：一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.491-495，2006。
- 8) 土田孝，高橋祐子，浅海綾一：波浪による水圧変動をうける砂質土地盤からの細粒分の流出に関する研究，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.1266-1270，2007。

(2008 年 8 月 22 日 受付)