

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

土田 孝¹・吉牟田卓²・浅海綾一³

干潟が良好な生態系を維持するためには表層土が 10~20 % 程度の細粒分を含む必要がある。しかし、人工的に造成した干潟では細粒分が時間の経過とともに表層地盤から徐々に抜け出してしまい、細粒分を好んで生息するアサリなどの底生生物が定着できないという問題がある場合がある。本研究は海底地盤に作用する鉛直方向の変動水圧を模型実験により再現し、一次元的水圧変動のみで地盤内の細粒分が表層から抜け出すことを実験により明らかにした。このような上方への移動が起こる原因は、水圧変動の下で地盤表層に液状化が発生することが考えられる。細粒分の粘性が高い場合にはこのような移動が起こりにくいので、人工干潟の覆砂材料の細粒分を維持するには粘性の高い細粒分が含まれていることが望ましい。

1. はじめに

沿岸環境の再生事業として、人工干潟の造成が各地で実施されている。1978 年以降に造成された干潟は全国で約 2,100 ha にのぼり、今後も約 1,400 ha の造成が計画されているが (大山, 2003)、一方で人工的に造成した干潟においては、自然干潟と同等の生態系が形成されていないことも指摘されている (細川, 2002)。たとえば、広島港五日市地区の人工干潟の場合、表層の覆砂層から細粒分が徐々に抜け出し、生息する底生生物の量が減少していることが報告されている (広島県, 2001)。

干潟表層の砂層 (覆砂層) では、細粒分を適切に含む適度な保水性を維持することが生態系の安定した形成に重要である。李ら (1999) は細粒分が干潟表層の地盤中から抜け出す原因として、海水の流動にともなうせん断力により表層の微細粒子が移動するという観点から検討しているが、ある程度の深さがある砂層からの抜け出しは説明されていない。

善ら (1987) は、波浪による一次元的水圧変動を地盤に加えたときに地盤内で圧力伝達の遅れに起因した過剰間隙水圧が発生し、砂層が液状化と高密度化を繰り返す現象を実験と実測によって明らかにした。本研究は、一次元的水圧変動における地盤の液状化が細粒分の移動と関係していると仮定し、室内模型実験によって地盤に鉛直方向の一次元変動水圧を载荷したときの、細粒分の移動特性について検討を行った。

2. 実験の概要と実験結果

(1) 実験装置と試料および実験条件

図-1 に本実験で用いた変動水圧载荷実験装置を示す。図のように、本装置は模型地盤の上に水を満たし、上

部の水に水圧変動を与えるものである。土試料の高さは 20 cm とし、地盤表面から 2 cm 間隔で深度 10 cm までニードルを通じて間隙水圧を測定した。試料は 5 号珪砂 (平均粒径 0.338 mm) に細粒分 10 % (乾燥重量比) を混合した試料を用いた。水圧は、電圧変換器 (E/P) によりサイン波で制御した変動空気圧を、バルーンを介して水圧に変換し、試料面上に载荷している。

変動水圧による細粒分の移動には、細粒分の粘着力、地盤の透水性などの要因が関係すると考えられる。本研究では、細粒分が持つ塑性が抜け出しやすさに及ぼす影響を評価するため、細粒分として高塑性の海成粘土 (広島港出島粘土、液性限界 118.8 %) と塑性の無い碎石粉

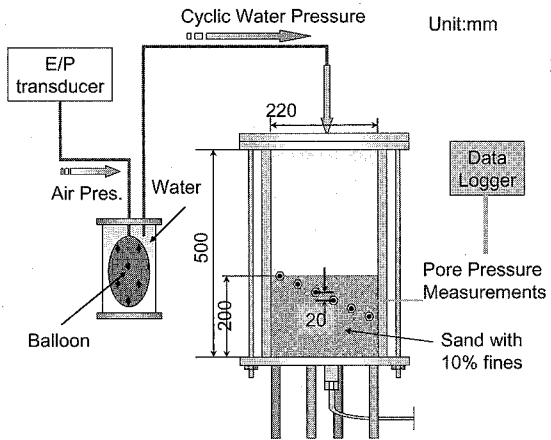


図-1 一次元水圧変動载荷装置

表-1 土試料の粒度分布と液性限界

試料名	砂	細粒分		液性限界 (%)
		海成粘土	石粉	
C0 - SF10	90 %	0 %	10 %	N.P.
C1 - SF9	90 %	1 %	9 %	N.P.
C3 - SF7	90 %	3 %	7 %	40.1
C5 - SF5	90 %	5 %	5 %	52.0
C10	90 %	10 %	0 %	118.8

1 正 会 員 工博 広島大学大学院工学研究科社会システム専攻
2 (株)NIPPO コーポレーション
3 学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

(S.F.)を混合した試料を用いた。細粒分の種類と混合割合、混合試料の液性限界を表-1に示した。表においてC1-SF9は細粒分10%の内訳が海成粘土1%, 砕石粉9%であることを示している。

図-2は細粒分の粒径加積曲線を示すが、図のように粒度はほとんど差がないといえる。液性限界を比較すると砕石粉および粘土1-石粉9は非塑性であり、C3-SF7, C5-SF5, C10-SF0(海成粘土)はそれぞれ40.1, 52.0, 118.8%であって、海成粘土の比率が大きくなるとともに増加している。

今回用いた水圧は、広島県五日市人工干潟の設計に用いられた設計波をもとに決定した。水深5mを想定して地盤面に49 kN/m²の水圧をゆっくりと加え、安定した後に表-2に示す変動水圧を24時間载荷した。载荷後に土層中央で土試料をサンプリングし、深度1, 2, 3, 5, 8, 10, 14, 18 cmから試料を採取してレーザー回折法により粒度分布を測定した。

表-2 変動水圧の载荷条件

試験番号	変動水圧 (波高)	周期 (s)
Test No.1	11.76 kN/m ² ($H^*=11.2$ m)	3
Test No.2	11.76 kN/m ² ($H^*=11.2$ m)	3
Test No.3	11.76 kN/m ² ($H^*=1.2$ m)	3

H^* : 想定した波高

(2) 水圧変動による細粒分の移動

図-3(a)~(d)は、それぞれ細粒分がC0-SF10, C1-SF9, C3-SF7, C5-SF5であるときの载荷後の地盤内細粒分含有率の変化を示している。図のように、今回の変動水圧载荷試験では試料C3-SF7, C5-SF5, さらに図に示していないが、細粒分がすべて海成粘土の場合も、変動水圧载荷後の深さ方向の細粒分含有率分布(土層中央)は初期値とほぼ一致し、細粒分の上部または下部への移動は起こらなかった(ただし、後に述べるように円筒セルとの境界部では移動は起こっている)。

これに対して、細粒分が砕石粉の場合とC1-SF9の場合には深さ18 cmまでの細粒分の一部が減少し、表層0~2 cm付近における細粒分含有率が大幅に増加した。このことは深層の細粒分が上部に移動したことを示している。

表-3は、今回の実験において想定した波高 H^* と周期 T から得られる平均的な水圧変動速度 $H^* \gamma_w / T$ (kN/m²/s, γ_w は水の単位体積重量)と、载荷後の深さ1 cmにおける細粒分含有率の関係を示している。表のように水圧変動速度が大きいほど細粒分の移動が顕著であった。

図-4はC1-SF9試料の実験結果において、横軸に変

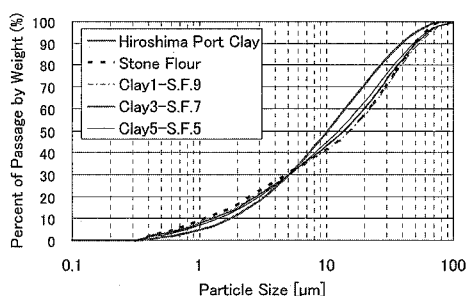
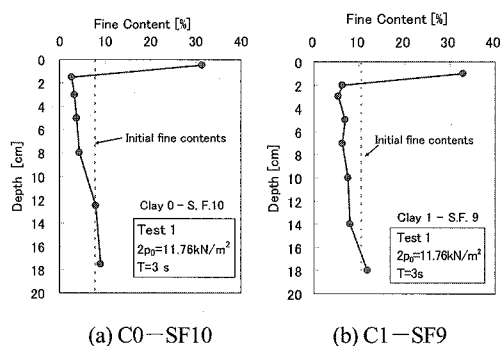
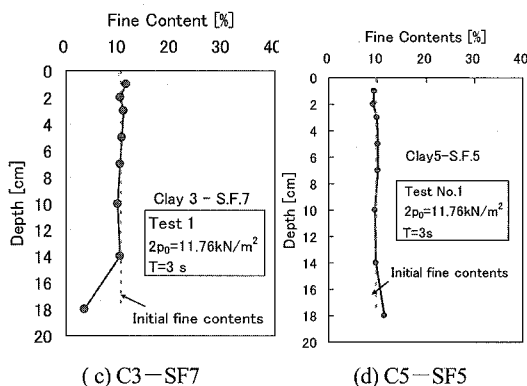


図-2 珪砂と混合した細粒分の粒度分布



(a) C0-SF10

(b) C1-SF9



(c) C3-SF7

(d) C5-SF5

図-3 一次元水圧変動による細粒分含有率の深さ方向変化 (Test No.1)

表-3 水圧変動速度と深さ1 cmにおける細粒分含有率

試料名	水圧変動速度 (kN/m ² /s)			
	3.92	2.35	1.96	1.18
C1-SF9	31.4 %	29.8 %	5.5 %	9.3 %
C3-SF7	32.1 %	19.6 %	10.4 %	

動水圧载荷後の各粒度帯を、縦軸に粒度帯ごとの含有率を深さごとに载荷前の初期値と比較して表している。凡例の数値は地表面からの深度である。図を見ると、移動

した細粒分の成分はほぼシルト分であり、粘土分はほとんど移動していない。また、地表近くをみると粘土分が減少しているが、これは後に述べるように変動水圧によって地盤の液状化が起こり、粘土の微細な粒子が攪拌され懸濁状態となって水中に流出したことが考えられる。実際に、ほぼすべての実験において変動水圧載荷後に水が濁る現象が確認された。

以上のように一次元的な水圧変動を加えることにより、砂層中の細粒分が表層に上昇する現象が確認された。このことは、人工干潟の表層から細粒分が抜け出す原因の一つとして波浪による水圧変動が考えられることを示している。ただし、今回の実験では、海成粘土の比率が大きく細粒分の液性限界が40%以上であるときは移動と抜けだしがみられず、細粒分の粘性がこの現象に大きく影響しているといえる。

(3) 地盤内間隙水圧の応答

海底面の圧力変動が地盤内に伝わる時圧力伝達の遅れに起因して周期的に過剰間隙水圧 Δu^* が発生する。ここでは間隙水圧応答と抜け出しの関係について検討する。

今回の実験では Δu^* は次式で求められる。

$$\Delta u^* = u_z - p_w - \gamma_w z \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに u_z は深度 z における間隙水圧、 γ_w は水の単位体積重量、 p_w は地盤表面における変動水圧である。また、各深度における有効応力 σ_v' は次式で求められる。

$$\sigma_v' = \sigma_{v0}' - \Delta u^* \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに σ_{v0}' は変動水圧載荷前の初期有効上載圧であり、地盤の水中重量 γ を用いると $\sigma_{v0}' = \gamma' z$ となる。

変動水圧を載荷するとそれぞれの位相において、地盤内の間隙水圧応答が変化する。地盤面の水圧が増加するときは地盤内の間隙水圧応答が遅れるため、式(1)より Δu^* は負となって有効応力は増加する。一方、地盤面の水圧が減少する位相では Δu^* が正になるので有効応力は減少する。有効応力がもっとも減少する位相での深度方向の過剰間隙水圧を、過剰間隙水圧比 $\Delta u^* / \sigma_{v0}'$ として図-5(a), (b)に示した。 $\Delta u^* / \sigma_{v0}' > 1$ の場合には過剰間隙水圧が有効応力を上回り、液状化ないしはボーリングに近い状態が起きていることを意味する。

細粒分の移動が起きている C1-SF9 の試料の場合である図-5(a)をみると、表層から深度約4 cm までの範囲で $\Delta u^* / \sigma_{v0}' > 1$ となり深度2 cm で $\Delta u^* / \sigma_{v0}'$ が約1.3となっている。図-5(b)をみると、細粒分の移動が起きなかった C5-SF5 のケースでも $\Delta u^* / \sigma_{v0}'$ が1を上回った部分がみられるがその範囲は小さく、上回った程

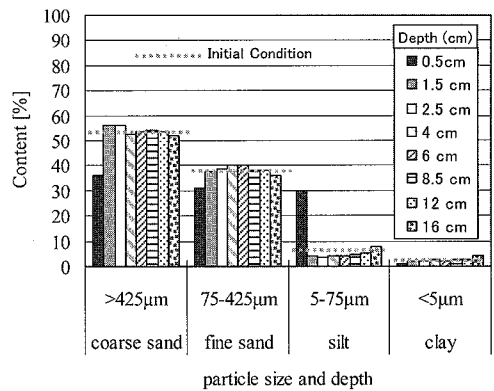


図-4 各深度における粒度分布の変化(C1-SF9, Test No.1)

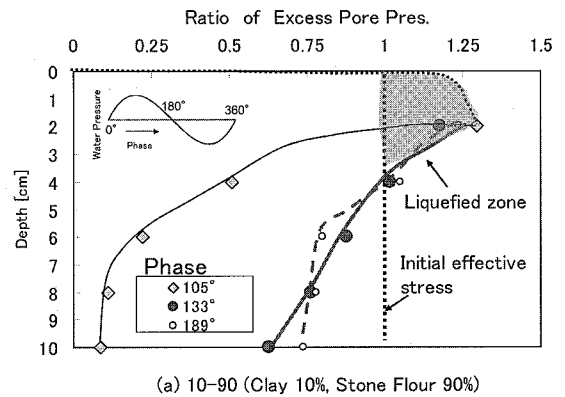


図-5(a) 一次元水圧変動過程において地盤中に発生する過剰間隙水圧 (C1-SF9, Test No.1)

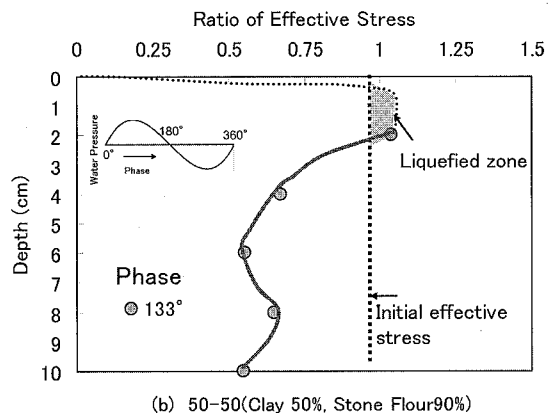


図-5(b) 一次元水圧変動過程において地盤中に発生する過剰間隙水圧 (C5-SF5, Test No.1)

度は C1-SF9 の場合よりも小さい。このように、細粒分の移動は表層付近において過剰間隙水圧が有効上載圧を上回っていることが原因のひとつと考えられる。

3. 細粒分抜け出しのメカニズムの検討

一次元的な水圧変動のもとで細粒分が上昇するメカニズムについて検討する。水圧変動のもとでの地盤面の振動を高精度 CCD カメラで撮影し、地盤から細粒分が抜け出す状況を観察した。

図-6 は水圧変動があるときの地盤面の振動を示している。図のように地盤面は振幅 1.0～1.5 mm で振動しており、水圧が上昇するときに下がり、水圧が低下するときに上がっている。このような地盤の振動は、地盤骨格に作用する有効応力の変化によって説明できる。水圧が増加するときは地盤内の間隙水圧応答が遅れるため有効応力が増加するので地盤の骨格が圧縮し、地盤面は下がる。水圧が増加する場合は反対に地盤内に間隙水圧が残る有効応力が低下するため地盤は膨張する。

図-7 は供試体の圧縮試験の結果より圧縮指数を 0.01、初期間隙比を 0.815 とし、計測した間隙水圧応答から地盤の有効応力を計算して地盤面骨格の変形を計算した結果である。図のように地盤面の振動はほぼ実験値の傾向と対応している。このように、振動する地盤面において、細粒分は水圧が減少するときの表層付近の地盤内を上昇し、最終的に表面に抜け出す現象が観察された。

図-8 は C0-SF10 の試料における Test No.3 において水圧が減少したときの表層付近の状況である（左は減少前、右は減少後）。図のように水圧の低下とともに地盤面は上昇するが、細粒分はこの過程で地盤内を相対的に上に移動した。図-8 には珪砂の比較的大きな粒子に着目し黒くマークして示している。水圧減少後地盤表面は上昇しているが、マークした粒子は水圧減少後もほとんど動かず、地盤表面の変動量と一致しない。地盤面は大きな粒子の間をすり抜けるように小さな粒子が上に動くことで上昇した。さらに、この地盤上昇過程では上昇する細かい粒子の間隙の間にさらに細粒分を巻き込んだ流れが観察され、地盤面が上昇する速度よりも早く細粒

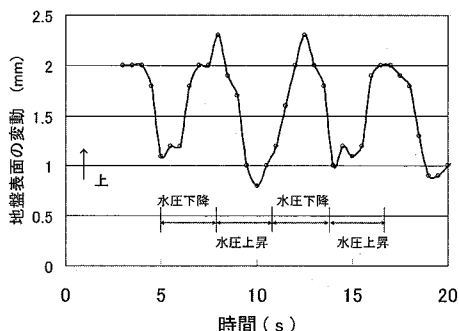


図-6 水圧変動下における地盤面の運動 (C0-SF10, Test No.3)

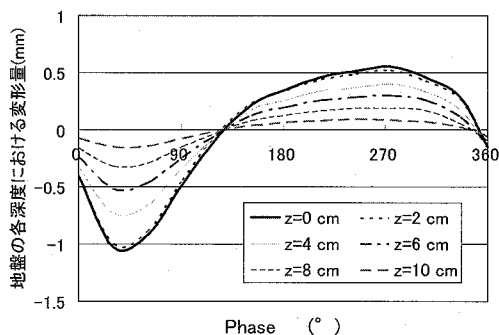


図-7 水圧変動の各位相における地盤面の変形量 (計算結果)

分が上方へ移動する様子も観察された。このことから、水圧減少過程で地盤面が上昇するときに、大きい粒子と細かい粒子、細粒分の間で相対移動（分級）が起こって、このことが細粒分の上への移動の原因と考えられる。

地盤は水中で飽和しているので、地盤面が上昇する場合には地盤内に水が入る必要がある。しかし、観察によるとこのときに細粒分は上向きに移動している。図-5 (a), (b) に示すように、水圧下降過程では地盤中に高

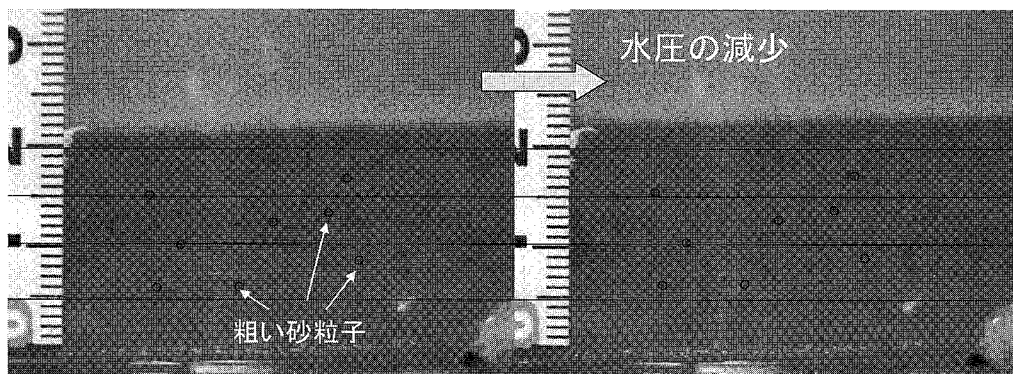


図-8 水圧が減少したときの表層付近の状況 (細粒分は碎石粉, Test No.3)



図-9(a) 変動水圧載荷後の供試体 (地盤表面)



図-9(b) 変動水圧載荷後の供試体 (深度10cm付近)

い間隙水圧が残留するので、この間は上向きの動水勾配が存在する。しかし、本実験は一次元的な現象であるため、質量保存則を考えると地盤内から地盤の外への全体的な流れは起こりえず、観察されたような細粒分を含む上向きの水の流れが存在するためには、地盤内に水を吸い込む部分がなければならないと考えられるが、今回の実験では確認できなかった。

このように、水圧減少時に地盤の骨格の膨張と同時に起こる細粒分の上向きの移動は十分説明できず、また、図-3(a), (b)のように液状化が発生しない深度である深さ 10 cm 以深でも細粒分の上への移動が起こっているメカニズムも明かでない。

図-9(a)は、波浪条件 Test No. 1 ($H=1.2$ m, $T=3$ s) で、細粒分として海成粘土を用いた試料を使用した実験の変動水圧載荷後の供試体表面の状況である。図のよう円筒セルと供試体の境界部に粒子の細かい粘土分が堆積している。また、図-9(b)は、供試体を解体する際に上から二段目 (深度 10~20 cm) の円筒セルの断面を撮影したものであるが、境界部は細粒分を含まない砂となっている。このことから、図-9(b)の境界部における粘土分が変動水圧載荷によって図-9(a)に示す表層に移

動したと考えられる。このように、細粒分が粘土の場合、粘土層の中央では細粒分の移動は全く見られなかったが、円筒セルの壁面では局所的に細粒分の上への移動が発生した。細粒分の移動が発生しやすい局所的な条件やメカニズムが存在すると考えられ、今後さらに検討する必要がある。

4. 結 論

人工的に造成した干潟の覆砂層から細粒分が流出する問題を解明することを目的として、一次元変動水圧下において砂層からの細粒分の抜けだしに関する実験を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 細粒分 10 % を含む飽和した砂層上に一次元的に変動水圧を載荷すると、地盤内の細粒分が上昇し表層に抜け出す現象が起こることを確認した。移動したのは主にシルト分であった。
- (2) この現象は、細粒分の液性限界が 40 % 以上の場合、土層中央では起きなかった。人工干潟の覆砂材料の細粒分を維持するには粘性の高い細粒分が含まれていることが望ましいと考えられる。
- (3) 水圧が下降する過程において、砂層の表層付近で有効土被り圧を上回る過剰間隙水圧の状態 (液状化) が発生した。また、水圧が下降するとき、砂層の砂粒子の間隙において細粒分を巻き込んだ流れがあり、地盤面が上昇する速度よりも早く細粒分が上方へ移動する様子が観察された。
- (4) 粘土分を細粒分とした場合、土層中央では細粒分の移動が無いが、円筒セルの壁面で局所的に細粒分が上方に移動する現象が観察された。

謝辞：本研究は(財)中国電力技術研究財団、(財)港湾空港建設技術サービスセンターによる研究開発助成を得て実施した。関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 大山洋志(2003)：浚渫土を用いた干潟・藻場再生事業，土木施工 44 巻 7 号 pp. 38-43。
- 善功企・山崎浩之・渡辺 篤(1987)：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，港湾技術研究所報告 第 26 巻 第 4 号，pp. 125-180。
- 広島県(2001)：広島港五日市地区人工干潟環境モニタリング記録，pp. 1-47。
- 細川恭史(2002)：人工干潟・海浜の造成の可能性，沿岸海洋研究，第 39 巻，第 2 号，pp. 107-115。
- 李正奎・鄭正朝・西嶋渉・岡田光正・馬場栄一(1999)：干潟の土壌構造に及ぼす海水の流動の影響，水環境学会誌，第 22 巻，第 8 号，pp. 677-682。