

## 波浪作用下における粘性土地盤の不安定化と含水比の変化

## Unstabilization in Seabed Containing Silts and Clays and Change in Water Content Under Wave Loading

安部太紀 Taiki ABE (広島大学大学院工学研究科)  
 土田孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究院)  
 熊谷隆宏 Takahiro KUMAGAI (五洋建設(株)技術研究所)  
 菊原紀子 Noriko KIKUHARA (五洋建設(株)技術研究所)

近年、軟弱な粘性土地盤上を波浪が進行する際に、部分的な含水比低下、せん断強度上昇、細粒分減少といった物性変化が発生することが確認された。これらの物性変化は底泥表面に発生する亀裂が大きな要因であると考えられ、亀裂の発生は、波浪作用により底泥表面に作用する水圧勾配が原因であると考えられている。しかし、この現象についての研究は過去数例しかされておらず、明らかとなっていない面が多い。これを明らかにすることにより、海底地盤の形成や海底地盤の問題に対し、新たな知見が得られると考えられる。本研究では、液性限界を超える含水比の粘土に対し、波浪作用実験を行い、波浪に対する底泥の挙動並びに物性変化と亀裂の関係の調査を行った。

キーワード：軟弱地盤、亀裂、物性変化

(IGC : D-6, D-7, E-8)

## 1. はじめに

シルト・粘土を含む海底地盤に波が作用する際に発生する、底泥の巻き上がり現象が問題となっている。波により巻き上げられた底泥の粒子は波により流され、波の穏やかな付近において沈降・堆積する。これは船の航路や泊地付近においても発生し、堆積した底泥を放置すると船の航行に支障をきたす。これをシルテーション問題と呼び、このシルテーションにより航路を浚渫する必要がある。しかし、この浚渫には多額の費用が掛かり、港湾の維持管理の大きな負担となっている。

土田・五明<sup>1)</sup>は波の作用を受ける底泥の不安定と巻き上がり現象について、土質力学的手法を適用する目的で波浪作用実験を行った際に、波浪作用を受ける土槽内の部分的な含水比低下、せん断強度増加といった物性変化が発生する現象を確認した。さらに熊谷ら<sup>2)</sup>は、亀裂の発生により亀裂内部から細粒分が抜け出すという現象を確認し、底泥表面からの巻き上がりだけでなく、シルテーションのような問題に対し、亀裂内部から抜け出す細粒分についての考慮が必要であることを示唆している<sup>2)</sup>

しかし、この現象は近年明らかとなったばかりの現象であり、これに関する研究は現在のところほとんどされていない。よって、その亀裂発生メカニズムや物性変化の再現性など、明らかとなっていない部分が多い。

よって本研究では、液性限界を超える高い含水比に調整した底泥試料に対し、波浪作用実験を行い、その際の底泥の挙動や実験終了後の物性変化について検討を行った。

## 2. 波浪作用実験の概要

## 2.1 試料の基本的物性

本研究では、徳山港において浚渫した粘土(以下、徳山港粘土)を使用した。試験時には礫や大きな貝殻等を取り除き、人工海水を用いて含水比を調整した試料を用いた。本研究では、浅瀬や干潟のような比較的浅い海域において堆積した軟弱な底泥を想定しているため、含水比は液性限界の1.5倍程度に調整した<sup>3)</sup>。主な物性値を表-1に示し、図-1にベーンせん断試験機を用いた含水比とせん断強度の関係、図-2に間隙比 $e$ と圧密圧力 $p$ の関係を示す。

表-1 徳山港粘土の物性

土粒子密度 $\rho_s$		2.62g/cm <sup>3</sup>
粒度組成	砂分	4.5%
	シルト分	46.0%
	粘土分	49.5%
コンシステンシー	液性限界	110.6%
	塑性限界	40.0%
	塑性指数	70.6

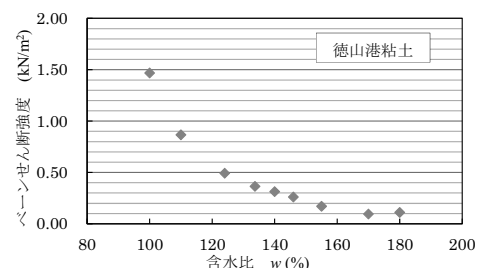


図-1 含水比-せん断強度特性

## 2.2 波浪作用実験の概要

波浪作用実験に用いた実験装置の概略図を図-3に示す。端に造波装置を取りつけ、反対側に消波材を敷いた、水路幅30cm、高さ40cmのアクリル製の水槽に、長さ100cm、深さ30cm、幅30cmのアクリル製の土槽を設置した構造となっている。この土槽内に、よく攪拌して含水比調整を行ったスラリー状の粘土を投入し、表面を成形した後、水路内に塩分濃度6‰に調整した人工海水を土槽表面に影響が及ばぬよう静かに流しこむ。その後設定水深に達したら造波板を操作し、試験を開始する。

粘土は静置することで、シキソトロピーによる強度回復および自重による圧密が進行する。本研究では、底泥表面に発生する亀裂が底泥の物性変化を引き起こすかの検討が目的であるため、これらの現象の影響を受けないよう、短時間で速やかに試験準備を行った。試験中は土槽側方からのビデオ撮影および上方からのカメラ撮影を行う。試験が終了した後、図-4に示す地点において、含水比、ベーンせん断強度、粒度分布の測定を行った。深度方向には、それぞれの地点において0.04m間隔で測定およびサンプリングを行い、それぞれの物性の深度分布を作成した。

## 2.3 自重圧密実験

粘土は上述したように、静置する間にシキソトロピーと自重による圧密によって強度増加や含水比低下を引き起こす。本研究では最大で試験時間が72hrに及ぶため、その影響を無視することが出来ない。そこで、波浪作用実験と並行して自重圧密実験を行った。

自重圧密実験では、直径0.3m、高さ0.5mのアクリル製の円筒を用いて行った。そこに波浪作用実験と同条件の試料を速やかに深さ0.3mまで投入し、人工海水を土槽上に張り、波浪作用実験終了後まで静置しておく。実験終了後、波浪作用実験終了後の土槽内の粘土に対する場合と同様に、含水比とベーンせん断強度を測定し、波浪作用実験の結果との比較を行った。自重圧密実験に用いた容器を写真-1、サンプリング地点を図-5に示す。ここで細粒分については、自重圧密によって変化する事は考えられないため、計測を実施しなかった。

## 2.4 底泥の安定解析法

本研究の実験ケースを決定する際に使用した安定解析法を示す。土田・五明<sup>1)</sup>は底泥の挙動に着目し、波浪作用で底泥に作用する水圧変動により、底泥内にすべりが発生すると想定することで安定解析の手法を提案した。その概念図を図-6に示す。ここで底泥の強度は深度によらず一定値をとると仮定している。この概念図をもとに、底泥による抵抗モーメント $M_R$ および滑動モーメント $M_S$ を求め、

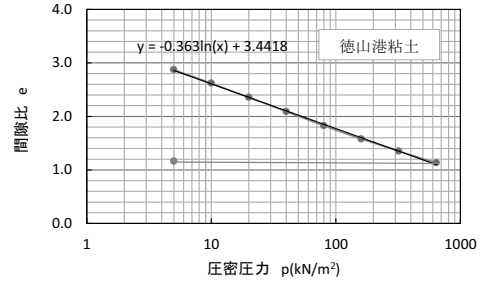


図-3 間隙比-圧密圧力関係

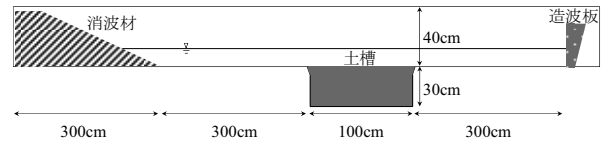


図-2 波浪作用実験装置概略図

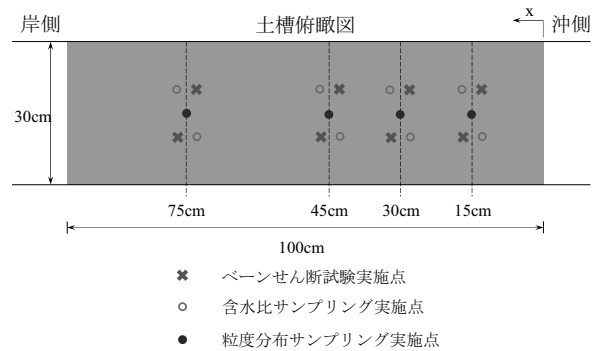


図-4 測定・サンプリング地点(波浪作用実験)

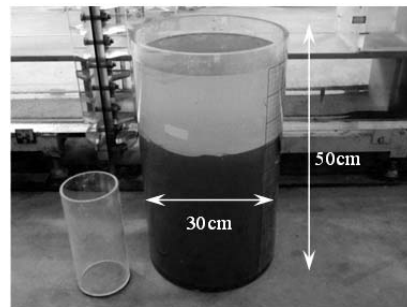


写真-1 自重圧密容器

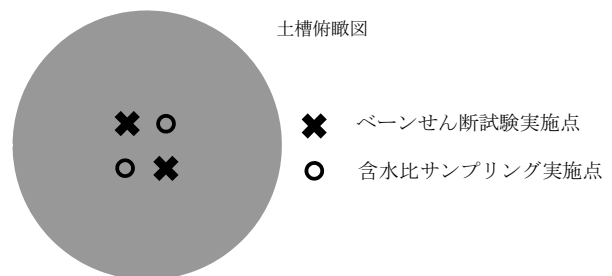


図-5 測定・サンプリング地点(自重圧密)

安全率を算定した。抵抗モーメント  $M_R$  を式(1)、滑動モーメントを式(2)、安全率を式(3)に示す。

$$M_R = c \left( \frac{y^2}{d} + d \right)^2 \tan^{-1} \left( \frac{2dy}{y^2 - d^2} \right) \quad (1)$$

$$M_S = \frac{LH^*}{2\pi} \gamma_w \left\{ \frac{L}{2\pi} \sin(ky) - y \cos(ky) \right\} \quad (2)$$

$$F = \frac{M_R}{M_S} = \frac{c}{H^* \gamma_w} \cdot \frac{(y^2/d + d)^2}{\sin(ky)/k^2 - y \cos(ky)/k} \tan^{-1} \left( \frac{2dy}{y^2 - d^2} \right) \quad (3)$$

ここで、 $H^* = H/\cosh(kh)$ 、 $c$  は底泥粘着力、 $k = 2\pi/L$  である。

この式中の  $y$  を変化させていくことによってすべりの安全率が最小となる円弧を求めることが出来る。この最小の安全率を波浪作用に対する底泥の安全率としている。

### 2.5 実験ケース

波浪作用実験で行った実験のケースを表-2 に示す。ここで、すべての実験ケースにおいて、波形勾配が約 0.03 程度となるように決定している。表-2 中の安全率は、2.5 節で示した底泥の安定解析法を使用して計算し、底泥の強度はベーンせん断強度の 0.1 倍のものを使用した結果である。この強度は、動的せん断強度として定義されており、ベーンせん断試験などで得られる静的せん断強度の 0.1~0.3 倍程度になると土田・五明<sup>1)</sup>は示している。この安全率をもとに実験ケースを決定し、比較的穏やかなケースを 2 ケース、厳しいケースを 2 ケース用意した。ここで安全率は、土田・五明<sup>1)</sup>が提案した円弧すべりを想定した安定解析法を用いて算出している。

表-2 実験ケース

ケース	含水比 w (%)	作用時間 (hr)	波高 H (cm)	周期 T (s)	波形勾配 H/L	安全率 F
1	170	45	5.0	1.40	0.030	0.341
2	165	72	4.0	1.20	0.029	0.535
3	150	24	9.0	2.00	0.030	0.440
4	150	24	5.0	1.40	0.030	0.704

## 3. 波浪作用時の地盤の挙動

### 3.1 底泥の挙動

波浪作用下における底泥の挙動を撮影した写真を写真-2 に示す。若干底泥側の波浪に対する応答が遅くなっているが、波浪の山が底泥上を通過するとき底泥は下降し、波浪の谷が底泥上を通過するとき底泥は上昇していることが分かる。波浪が山となる部分において、静水時と比較し水圧が増大し、底泥表面に作用する圧力が上昇する。波浪が谷となる場合には逆に水圧が減少し、底泥表面に作用する圧力が減少するため、このような挙動を示す。

また、熊谷ら<sup>2)</sup>が実験を行った際に撮影した動画を切り取った、波浪および底泥の挙動に対する亀裂の挙動を写真

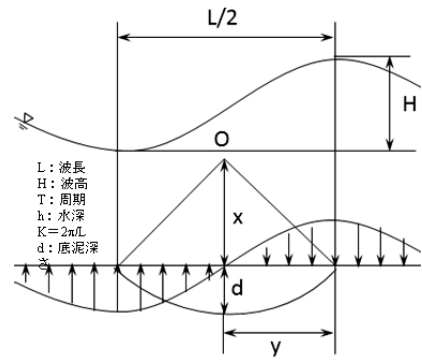


図-6 安定解析法概念図<sup>1)</sup>

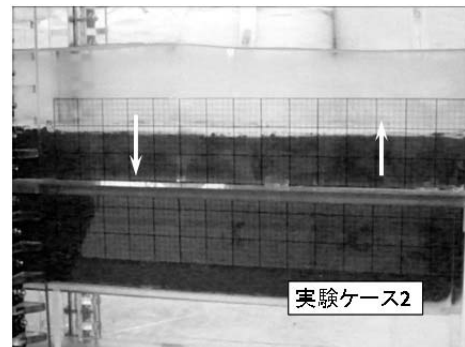
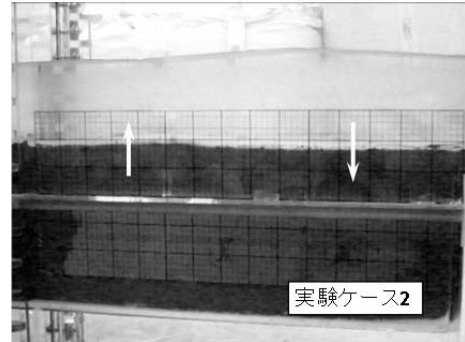


写真-2 波と底泥挙動



写真-3 亀裂の挙動<sup>2)</sup>

-3に示す(試料は宇部港浚渫粘土, LL=112%, 含水比190%, 波高 2.0~3.0cm). 写真中の白丸で囲んだ部分は同一の亀裂発生地点であり, 底泥の下降が最大るとき亀裂が開口し, 底泥の上昇が最大るときに亀裂が閉口していることが分かる. このような挙動は, 底泥が下降する部分から底泥が上昇する部分へ底泥が移動することによって生じると考えられる.

底泥がこのような挙動を示すことで, 亀裂の発生および亀裂の開閉が生じる. 波浪作用によって生じた亀裂がドレーン効果を発揮することによる圧密の促進, 亀裂の開閉による細粒分の抜け出しが発生するのではないかと考えられている.

### 3.2 カオリンを用いた影響深さの検討

波浪による底泥の挙動が底泥のどの程度の深さまで達しているかを検討する目的で, カオリンによってターゲットを作成した土槽に対して波浪を作用させる実験を行った. 実験条件はケース 1 と同様に設定し, 作用時間は 10 分間で行った. ターゲットは土槽沖側から 15, 30, 45, 60cm 地点に幅 3cm 程度のものを設置した. ターゲットの設置状況を写真-4 に示す. この土槽に対し, 波浪を作用させた時の挙動を土槽側方からカメラで撮影を行った. その写真を写真-5 に示す.

波浪作用開始直後からターゲット上部では, 深度 10cm 程度までの部分において, 徐々に土槽岸側方向に伸びていくような形状となった. 一方でターゲット下部は, 実験終了後もほとんど変化は確認されず, 微小に変動していることが確認できる程度であった. このことから, 波浪が底泥に大きな影響を与えるのは土槽表面から 10cm 程度までであると判断できた.

また, ターゲット上部のカオリンが, 底泥上に発生した亀裂まで伸びていき, 亀裂内部からカオリンが抜け出していく様子を確認することができた. このことは, 亀裂の開閉によって細粒分の減少が発生することを裏付ける挙動ではないかと考えられる.

### 3.3 亀裂の深度方向への発達状況

波浪作用実験を行う前に, 発生した亀裂が深度方向に発達しているかを確認する目的で, 石膏スラリーを用いた亀裂深さの確認を行った. 亀裂深さを確認する際には, ケース 1 の条件(含水比 170%, 波高 5.0cm)を用いた. 以下にその手順を示す.

- 1) 試料を投入した土槽に波浪を 10 分程度作用させる.
- 2) 底泥表面に亀裂が発生するのを確認した後, 波浪作用を一度中断する.
- 3) 写真-6 に示すシリンジを用いて, 石膏スラリーを亀裂内部に注入する.
- 4) 亀裂内部に十分量の石膏スラリーを注入後, 亀裂の最

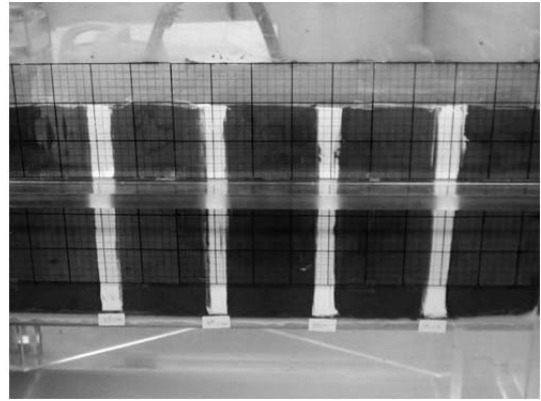
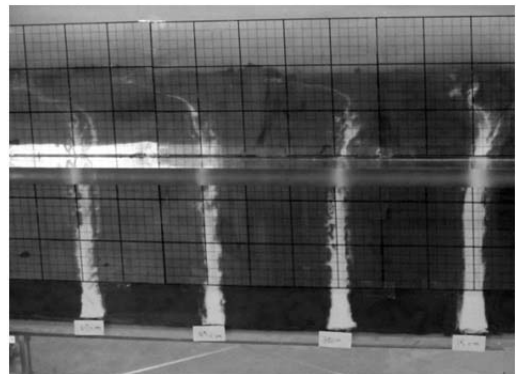


写真-4 ターゲット設置状況



1分後



5分後



10分後

写真-5 ターゲットの挙動

深部まで重鎮されるように波浪作用を再開する。

- 5) 石膏スラリーが固化するまで 30 分程度波を作用させた後、波浪作用を終了し、土槽内から石膏を取り出し、その深さを測定する。

ここで石膏スラリーを注入したのは土槽沖側から 45cm 付近である。波浪は底泥上を進行していくに従い、減衰していくことが確認されており<sup>4)</sup>、本実験では、土槽沖側から 50cm 以内では亀裂の発生が確認できた。実験終了後に取り出した石膏片を写真-7 に示す。

取り出した石膏片の深さを測定した結果、亀裂の深さは 30 分程度の波浪作用によって、深さ 6.0cm 程度まで発達していることを確認できた。この結果から、亀裂は表面にのみ発生するのではなく、深度方向に発達していくことが確認できた。

#### 4. 波浪作用実験の結果および考察

##### 4.1 亀裂発生状況

波浪作用実験開始後の底泥表面の状況を写真-8 に示す。これらの写真は実験開始 10 分後、土槽沖側から 45cm 付近で撮影した。

ケース 1, 3 では明瞭な亀裂が深度方向に発達していく様子が確認できた。一方で、ケース 2 では表面に微小な亀裂が発達する程度、ケース 4 では亀裂がほとんど確認できない状況であった。この亀裂発生傾向は、安全率の傾向と比較的に合致している。

時間経過とともに、底泥表面は底泥の巻き上がりによって高濁度層が形成され、底泥表面の撮影は困難となった。その後は目視によって亀裂状況の確認を行ったが、人工海水全体が濁るまで(2~5 時間程度)は、目視による確認で亀裂の存在を確認することが出来た。このことから、実験終了時まで亀裂は存在し、底泥に影響を及ぼしていたものと考えられる。

##### 4.2 側面から観測した底泥の挙動

波浪作用実験を実施している間、底泥の挙動並びに巻き上がりの状況を土槽側方からビデオカメラによって撮影を行った。底泥は波浪作用後 20~30 分程度経過した後、底泥表面を覆うように高濁度の層が形成される。その状況を写真-9 に示す。これは底泥表面および亀裂から流れ出る細粒分によってこの層が形成されるものと考えられる。この高濁度層は、発生する時間は異なるが、すべての実験ケースにおいて確認された。

また、波浪作用時の時間経過の様子を写真-10 に示す。波浪作用から時間や程度は異なるが、底泥が巻き上がることによって底泥が巻き上がる様子が確認できた。

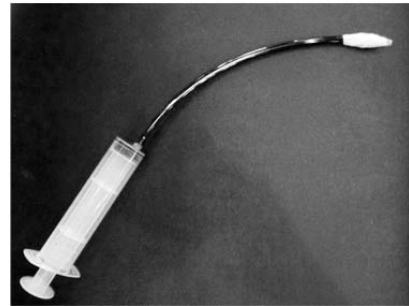


写真-6 石膏スラリー注入に使用したシリンジ

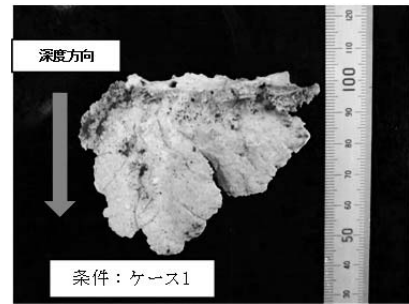


写真-7 取り出した石膏片

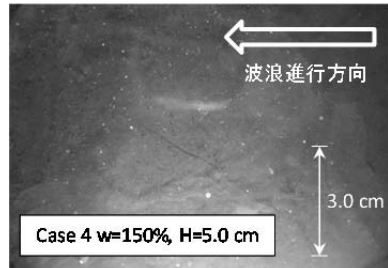
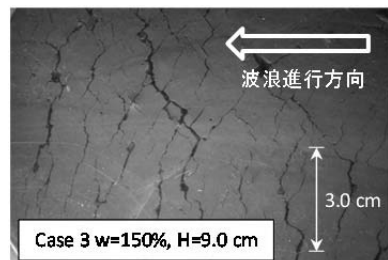
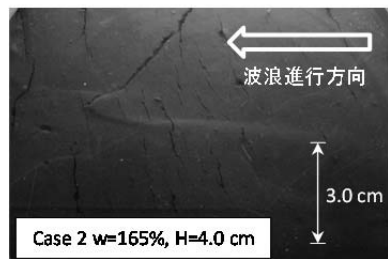
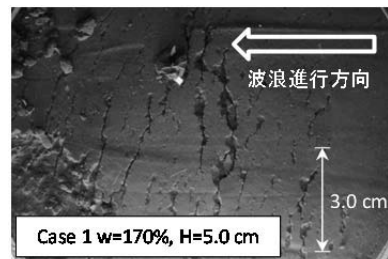


写真-8 実験開始10分後の底泥表面の亀裂発生状況

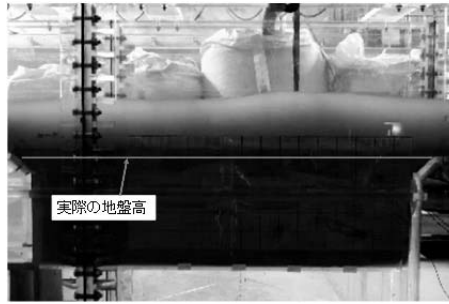


写真-9 高濁度層の発生状況

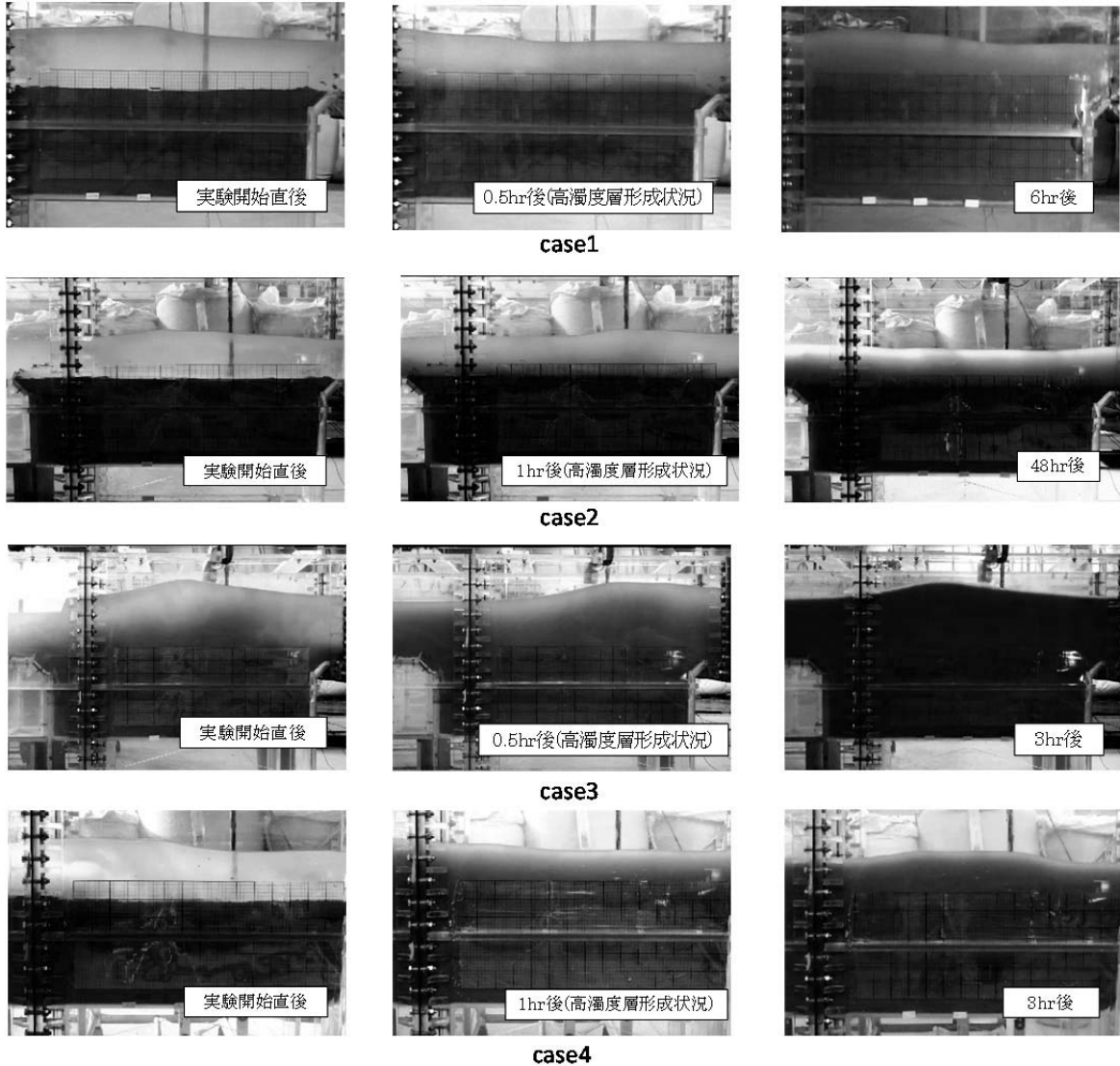


写真-10 波浪作用実験中の地盤の挙動

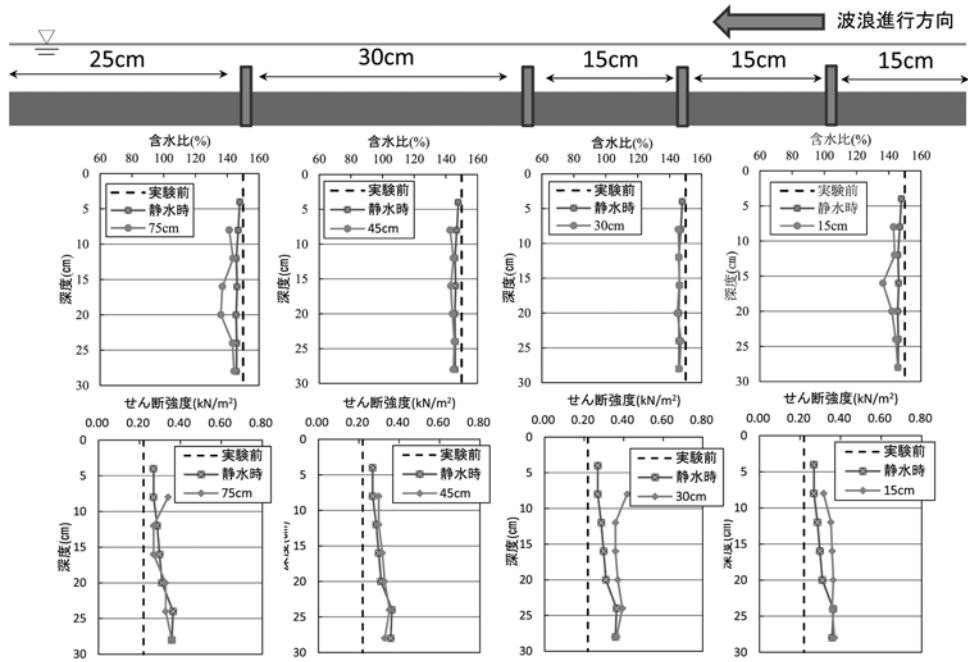
#### 4.3 波浪作用後の含水比・ベーンせん断強度の変化

各ケース終了後に測定した含水比およびベーンせん断強度の深度分布を亀裂の発生が確認できなかったケース4および亀裂が発生したケース1を代表して図-7に示す。凡例内に静水時と示した分布は自重圧密実験の結果を表している。これらの結果を比較すると、明瞭な亀裂が発生した実験ケース1では、部分的に大きく含水比が減少していることが分かる。また、土槽沖側から15, 30cm地点では、それらと同地点においてせん断強度の増加も生じてい

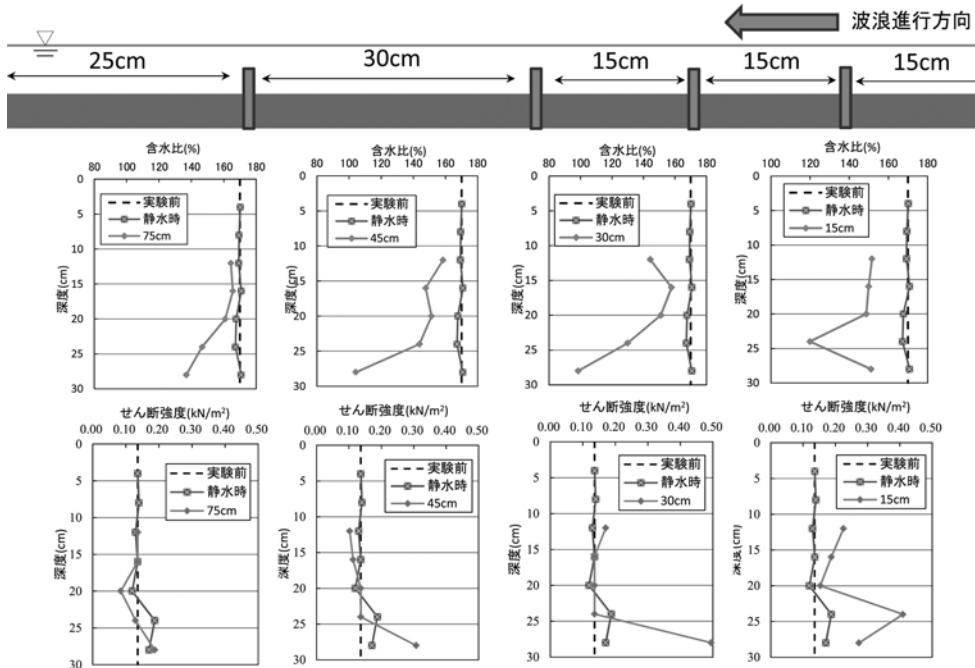
る。一方で、亀裂がほとんど発生しなかったケース4では、含水比、ベーンせん断強度ともに自重圧密の結果からほとんど変化していないことが分かる。つまり、底泥表面に亀裂が発生しない場合では、底泥が波浪作用を受ける状況下にあっても、静水時と地盤の圧密特性は変化しないと言える。

また、ケース3の土槽沖側から10~30cm付近、実験後地盤高から5~10cm付近において、含水比の顕著な低下が生じている層が確認できた。この部分の含水比を測定する

波浪作用下における粘性土地盤の不安定化と含水比の変化



ケース 4



ケース 1

図-7 波浪作用実験中の地盤の挙動

と、24 時間で 150%から液性限界の 110.6%を大きく下回る 67%まで低下していることが判明した。ここで、この含水比低下に必要な圧密圧力を求めるため、標準圧密試験の結果をもとに計算を行った。その結果を表-3 に示す。これを見ると、67%まで含水比が低下するには、圧密圧力が約 80kPa 程度必要となることが分かった。ここまでの含水比低下は、波浪作用による圧力および亀裂が発揮するドレーン効果のみでは考えにくく、この他にさらに原因が存在すると考えられる。

表-3 標準圧密試験結果からの含水比算出

圧密圧力 $p$ (kPa)	間隙比 $e$	含水比 $w$ (%)
0	3.08	117.7
5	2.87	109.8
10	2.62	100.2
20	2.36	90.1
40	2.09	79.9
80	1.83	69.8
160	1.58	60.3
320	1.35	51.6
640	1.14	43.4

#### 4.4 細粒分抜け出し特性

各ケースの実験前後に、粒度分布の測定を行った。

明瞭な亀裂が発生したケース1では、実験前に測定を行った粒度分布と比較し、細粒分が減少することによって粗粒化が進んでいた。一方で、ケース2では、実験前の粒度分布からあまり変化が見られず、細粒分の変化がないことが分かる。このことから、細粒分減少の原因も亀裂の発生であることが確認できた。抜け出した細粒分および舞い上がった細粒分は、波浪によって移動・堆積し、水路上に堆積した。

さらに、含水比の顕著な低下が発生していた、ケース3の土槽沖側から15cm付近での粒度分布を図-8に示す。含水比低下が顕著に発生したのは、図-8中の深度16cm付近であり、この結果を見ると他の部分と比較し、細粒分の減少がより大きく発生していることが分かる。これは他のケースと比較し波浪条件が厳しく、亀裂の開閉がより大きく発生したためだと考えられる。以上のことから、含水比低下および細粒分抜け出しの特性は、亀裂に起因するものであり、再現性を持った現象であることが分かった。

#### 5. 結論

本研究では、近年明らかとなった波浪作用下での亀裂を伴った物性変化特性に着目し、波浪作用下での底泥の挙動や亀裂との関連性について検討を行った。波浪作用実験を4ケース行った結果、亀裂と物性変化の関連性を確認することが出来た。以下に結論を示す。

- 1) 底泥が、波浪作用に追従して変形することにより、亀裂が発達していく様子を確認することが出来た。
- 2) 波浪作用実験の結果から、底泥内の部分的な含水比の低下およびせん断強度の上昇が亀裂によって生じ

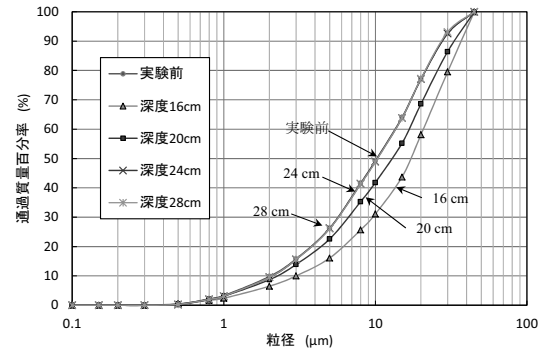


図-8 顕著な含水比低下が発生した部分での粒度分布測定結果

る事が確認できた。また、細粒分の減少も亀裂によって生じる事が確認できた。

- 3) 含水比が24時間で150%から、液性限界を大きく下回る67%にまで低下していた部分が存在することを確認した。この含水比低下は圧密圧力約80kPaで圧密した時と同様の含水比低下であり、現在考えられている亀裂のドレーン効果以外の要因があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土田孝, 五明美智男: 波による水圧変動に対する底泥層の安定について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.569-600, 1999.
- 2) 熊谷隆宏, 土田孝, 大坪政美, 渡辺要一, 五明美智男, 塩田耕司: 波浪作用下における底泥表面の圧密促進メカニズム, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.223-235, 2007.
- 3) 五明美智男, 矢内栄二, 塚和彦, 大槻忠: 波と底泥の相互干渉に及ぼす物性の影響について, 海岸工学講演会論文集, 第33回, pp.322-326, 1985.
- 4) 土田孝, 熊谷隆宏, 池野勝哉, 渡辺要一, 五明美智男: 波浪作用下の底泥の挙動に関する解析手法について, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.451-455, 2005.

(2011年6月29日 受付)