

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 10日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360186

研究課題名（和文）

シルト・粘土を多く含む地盤の波浪作用下における応答と物性変化メカニズムの解明

研究課題名（英文）

Study on dynamic response and property changes of soft ground mainly consisting of clay and silts under wave loading

研究代表者

土田 孝 (TSUTIDA TAKASHI)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10344318

研究成果の概要（和文）：

底泥および波浪の条件が異なる波浪作用実験を実施し、底面に発生する亀裂と作用後の物性変化、底泥のレオロジー特性の関連を調査した。その結果、波浪作用下における底泥の安定性（亀裂の発生）を評価できる安定解析法を提案した。安定解析により波浪に対する安定の条件から求められる海底地盤表層の含水比は液性限界の1.5～2.0倍の範囲になり、実際の海域の海底地盤表層における含水比と対応していることを示した。波浪作用実験の結果から、亀裂発生と物性変化に関係があり、亀裂の開閉時に底泥内部の細粒分が分離することを確認した。

回転粘度計から求めた底泥の降伏値を強度と考え、円弧すべり安定解析を行って得た安全率は、波浪作用下の底泥の安定性をよく表現することがわかった。さらに底泥の降伏値は、地盤工学において粘土の力学特性を把握する時に用いられる重要な指標である液性限界、練返し粘土の代表的な強度であるベーンせん断強度と明確な関連があることが判明した。

研究成果の概要（英文）：

A series of wave loading test with different conditions of bottom mud and waves were carried out and the relationship among the cracks made at the surface by loading, the property changes of mud after loading and the rheology characteristics of mud were investigated. An analysis method to predict the stability of bottom mud (the occurrence of crack) subjected wave loading was proposed. The result of the analyses showed that the water content at the surface of seabed should be 1.5-2.0 times the liquid limit, which agreed well with the observed water contents at actual seabed. It is found that the safety factor calculated by the analyses using a yield stress obtained by cyclic viscometer can be considered as undrained strength showed the actual behavior of muds observed in the wave loading tests fairly well. The yield stress of mud has a close relationship with the liquid limit and a vane shear strength of the mud.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 3,800,000 | 1,140,000 | 4,940,000 |
| 2011年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2012年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 5,000,000 | 1,500,000 | 6,500,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：粘土，海底地盤，含水比，液性限界，降伏値，細粒分，波浪

1. 研究開始当初の背景

干潟は多様な生物相を育み、豊かな生態系を形成するとともに、底生動物や海藻、プランクトン等の生物による水質浄化能が高く、自然環境の保全機能を有している。近年、干潟の諸機能および価値が再評価され、開発に伴って失われた干潟の修復・再生を目的とした環境創造事業の一環として、人工干潟の造成が各地で行われている。

干潟生態系の形成に重要な影響を及ぼす要因の1つが底質環境である。李らは、自然および人工干潟の調査により、底質にシルト・粘土の細粒分が少ない場合、マクロベントスの出現種類、個体数等が少ないことを報告している。また、佐々らは生物の生息条件が土砂の物理環境（保水性、地下水位、サクシオン、せん断強さなどの土砂の“性能”）によって多分に制御・支配されることを明らかにしている。このように底質が適度な細粒分を安定して含むことが生態系を育む人工干潟の重要な条件となっている。

波浪条件下で安定した土砂の物理環境を形成するためには、波浪の作用と細粒分を含む底質の応答・挙動との関係を明らかにする必要がある。海岸工学の分野では「細粒分を含む砂の漂砂」として研究が進められてきたしかし、これらの研究においては底質が粒径のみで評価されており、シルト・粘土分が有する粘着力を考慮した研究はほとんど行われていない。また、底質がシルト・粘土分を含む場合、波浪の作用により圧密と圧縮、分級などの変化が起こるがこれらの影響を考慮した研究もほとんどみられない。

研究代表者の土田らは、波の作用により底泥層が亀裂の発生を伴いながら流動化し、底泥層内で局所的に含水比の大幅な低下、細粒分の減少、せん断強度の増加が起こることを報告した。さらに熊谷・土田ほかは波浪作用中の底泥の圧密促進作用の原因が、波浪作用下で底泥層に周期的に発生する亀裂を通じたドレーン（排水）効果と推定されること、含水比の低下量から判断して底泥の自重以外に波圧の一部が圧密のための有効な外力として働いていると考えられることを明らかにしている。

底泥の粒度や塑性の影響に関しては、波浪作用下の砂泥質土の挙動を実験的に調べ、土骨格に作用する有効応力がゼロとなる液状化が発生し、同時に土の分級が起こって底質が粗粒化することを明らかにした。また、液状化の発生時に底質内に発生する変動間隙水圧は地盤面水圧変動の3倍程度まで増幅することを実験で確認している。波浪作用下における底泥の圧密・圧縮促進、増幅された間隙水圧の発生は、地盤工学上新たに得られた知見であるが、これらのメカニズムは十分明

らかなっていない。

さらに、土田らは一次元的な水圧変動のもとでのシルト・粘土分を含む砂の挙動を実によって調べた結果、水圧変動によって発生する表層の液状化によって細粒分が上方に移動して底質が粗粒化し、細粒分は最終的には表層に吹き出すこと、細粒分の持つ粘性が小さい場合ほど上方に移動しやすいこと、を明らかにしている。しかし、上方への移動メカニズムについては定性的な説明にとどまっており、十分解明されていない。

2. 研究の目的

シルト・粘土分を多く含む地盤の波浪作用下における応答と物性変化メカニズムに関して以下を達成することを目的とした。

- (1) シルト・粘土分を含む地盤の波浪作用下での応答と物性変化特性を把握する。
- (2) 波浪作用下における自重を越えた有効圧密圧力の発生の原因、波浪作用下における地盤内間隙水圧の増幅現象を解明する。
- (3) 波浪-構造物-地盤の連成解析プログラムによる細粒分を含む底質の波浪安定性の解析手法を提案する。
- (4) 研究の成果に基づいて海底の底泥を利用して造成した人工干潟における地盤・底質の安定条件について検討する。

3. 研究の方法

波浪を地盤に作用させて底質の圧密・圧縮と間隙水圧応答、含水比変化を連続的に測定した。また、地盤内から流出する細粒分を回収して透明度を確保し、底質内の亀裂の発生と地盤内の変形を撮影して、解析を行った。これらの実験により、地盤内の圧密圧力発生、間隙水圧応答の増幅、地盤内の有効応力の変化と分級及び細粒分の上部移動のメカニズムについて検討した。

底泥を利用して瀬戸内海に造成された人工干潟地盤において、軽量動的コーン貫入試験を用いて覆砂層と浚渫土層の貫入抵抗値を測定し、人工干潟地盤の強度評価と環境に対する安定性を検討した。

4. 研究成果

波浪作用下において高含水比状態の底泥に発生する物性変化に着目し、その原因である亀裂の発生の条件を明らかにした。厚さ30cmの底泥に波浪を作用させる実験を行い、亀裂の発生と底泥の挙動の関係を調べた。主要な結論は以下のようである。

- 1) 一連の実験によって、波浪の作用によって底泥が変形し、表面に亀裂が発達していく過程を確認した。波の山の下では底泥表面が水平方向に伸張変形し最終的に亀裂が発

生するが、波が谷になると亀裂は閉じ、このとき亀裂内から細粒分を含む水が排出される。

- 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、亀裂の発生とともに生じることを確認した。含水比の低下とせん断強度の上昇が起こる箇所において、細粒分の減少が起こっており、いずれも亀裂の発生と亀裂の開閉による水の動きと関連づけられると考えられる。
- 3) 含水比 150%の底泥に対し、波浪を 24 時間作用させる実験ケースでは、液性限界を大きく下回る 67%にまで含水比が低下する部分が発生した。この含水比低下は圧密圧力約 80kN/m^2 で圧密した時と同様の含水比の低下であり、亀裂によるドレーン効果以外に、底泥振動による動的な力の作用など含水比を低下させる要因があると考えられる。
- 4) 砂分を 50%含む底泥に対する実験により、砂分を多く含む底泥では、既往の研究で報告されているような亀裂による圧密促進効果だけでなく、粘土分の流失に伴う粗粒化および砂質化により、著しい含水比の低下が生じることを明らかにした。
- 5) 混合底泥中の粘土の巻き上げ特性は、砂の影響を受けにくいものの、砂の漂砂特性については、粘土による砂の捕捉特性の影響を大きく受けることがわかった。また、底泥内の過剰間隙水圧の調査により、砂や粘着力のない細粒分が支配的な底質だけでなく、粘着力を持つ粘土が同程度に含まれる「中間土」に対しても、共振流動状態の液化現象が現れることがわかり、共振流動応答の発生が波浪に及ぼす影響について明らかにした。

次に、波浪が繰返し作用する場合の底泥の強度として、回転粘度計から求めた粘土の降伏値を用いることを検討し、高含水比状態の海成粘土の降伏値を調べ、底泥の液性限界とベーンせん断強度との関係に着目して整理した結果、以下のことがわかった。

- 6) 両対数グラフ上における底泥のずり速度とせん断応力の関係は、領域Ⅰ（ずり速度を小さくしてもせん断応力がほぼ一定である領域）、領域Ⅱ（ずり速度とせん断応力が対数グラフ上でほぼ直線関係となる領域）、領域Ⅲ（ずり速度を大きくしてもせん断応力がほぼ一定である領域）に分けることができる。
- 7) 粘土の降伏値 τ_y と、せん断強度 1.5kPa のときの含水比として定義した液性限界で正規化した含水比 $w/w_{L(1.5)}$ とには、底泥の種類の違いによらず良好な相関がみられる。
- 8) 領域Ⅲのせん断応力 τ_B と $w/w_{L(1.5)}$ とにも良好な相関がある。また、 τ_B はベーン試験で求めたせん断強度 τ_{vane} にほぼ等しい。

- 9) 流動曲線のせん断応力 τ に $(w/w_{L(1.5)})^3$ を乗じた $\tau(w/w_{L(1.5)})^3$ とずり速度について領域Ⅱにおける関係をみると、粘土の種類によらずほぼ狭い範囲に入っており、液性限界で正規化した含水比を用いて流動曲線の領域Ⅱを統一的に表現できといえる。

以上の結果をもとに、底泥の降伏値を強度として行った円弧すべりによる地盤安定解析で求めた安全率と、底泥に亀裂が発生し物性変化が起きる現象の有無との比較を行った結果、以下のことがわかった。

- 10) 降伏値を用いて波浪の形状を正弦波と仮定した円弧すべり安定解析を行うことにより、波浪作用に対する海底地盤の挙動を比較的良く評価できた。

- 11) 波浪作用下の底泥の挙動を底泥における亀裂の発生と運動状態から 5 段階に分類し、降伏値を粘土の強度として用いた安全率と底泥挙動の関係を検討した。

段階 1: 底泥運動および亀裂が発生しない状態

段階 2: 底泥運動が発生するが亀裂が発生しない状態

段階 3: 表面に小さい亀裂が発生する状態

段階 4: 大きな亀裂が発生し底泥が大きく運動する状態

段階 5: 発生した亀裂が非常に大きく、底泥が激しく運動し攪乱される状態

検討の結果、多少の誤差はあるが安全率は、実験時の底泥挙動と概ね一致し、波浪により底泥表層に亀裂が生じ始める条件において安全率が 1 付近となることが分かった。

- 12) 安定解析により安全率が 1 となるために必要な底泥含水比の条件を求めた結果、液性限界の 1.3~2.0 倍の含水比と計算された。この結果は海底地盤表層から採取した底泥の含水比とほぼ一致しており、海底地盤の含水比が、波浪に対する底泥の安定条件によって決まっていることを示唆すると考えられる。

本研究の目的のひとつである海の底泥を利用して造成した人工干潟地盤に関して、以下のことがわかった。

- 13) 軽量動的コーン貫入試験機(PANDA)を用いることで、人工干潟の層厚の推定、浚渫土層の圧密度の評価が可能であった。また、覆砂表層の貫入抵抗値が各干潟で差があり、その調査結果は物理的要因や生物的要因による底質強度への影響を反映するものであった。

- 14) 細粒分含有率が増加するにしたがい、許容地下水位の値が増加し保水性が向上し、貫入抵抗・ベーンせん断強度が低下する。生物の活動という点からみても、細粒分の影響は大きく、細粒分を安定的に含むこと

は生物が住活動可能な環境を造る上で重要である。

15) PANDAによる表層の貫入抵抗値と表層に生息する生物の住み分けとの対応を確認することができた。本試験機の結果は干潟の生態系を評価する上で、一つの指標となるうる可能性があり、今後さらに調査データを増やし、生物の住活動との関係についてより明確にしていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- 1) 宇高薫, 土田孝, 渡部要一, 田中政典, 今井遥平: $e-\log p$ 曲線を用いた簡易モデルによる自然海成粘土地盤における構造の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.4, pp.435-447, 2012. (査読有)
- 2) 安部太紀, 土田孝, 熊谷隆宏, 菊原紀子: 波浪作用下における粘性土地盤の応答と安定解析手法の適用性について, 地盤工学ジャーナル, Vol. 7, No. 1, pp.51-3 60, 2012. (査読有)
- 3) 布谷信貴, 土田孝, 安部太紀: 高含水比状態における海成粘土の流動特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, p.I_551 -I_555, 2012. (査読有)
- 4) 熊谷隆宏, 土田孝, 安部太紀, 菊原紀子, 布谷信貴: 砂分を含有する底泥の波浪応答特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, p.I_546-I_550, 2012. (査読有)
- 5) 安部太紀, 土田孝, 熊谷隆宏: 波浪作用下における軟弱地盤の安定性について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, p.I_711-I_715, 2012. (査読有)
- 6) 安部太紀, 土田孝, 熊谷隆宏, 菊原紀子: 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, 地盤と建設, pp.63-70, Vol.29, No.1, 2012. (査読有)
- 7) 熊谷隆宏, 土田孝, 安部太紀, 菊原紀子: 波浪作用下における底泥の圧密挙動に関する実験的研究”, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I_506 -I_510, 2011, 10.2208/kaigan. 67. I_506. (査読有)
- 8) 松井章弘, 土田孝, 川崎大輔, 森宏美: 軽量動的コーン貫入試験を用いた干潟地盤の調査, 地盤と建設, Vol.28, pp.55-62, 2011. (査読有)
- 9) 松井章弘, 土田孝, 川崎大輔: 浚渫土と覆砂で造成された人工干潟地盤における軽量動的コーン貫入試験の適用, 土木学会海洋開発論文集, Vol.26, pp. 711-716, 2010. (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- 1) 布谷信貴, 土田孝, 安部太紀: 練り返しを受けた高含水比状態の粘土の力学特性, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.273 -274, 八戸工業大学, 2012 年 7 月 15 日. (査読無)
- 2) 安部太紀, 土田孝, 布谷信貴, 熊谷隆宏, 菊原紀子: 波浪作用下における底泥の安定性評価に関する研究, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.849-850, 八戸工業大学, 2012 年 7 月 15 日. (査読無)
- 3) 布谷信貴, 土田孝, 安部太紀: 高含水比状態で練り返された粘土の力学特性, 土木学会中国支部研究発表会, 呉高等工業専門学校, CD-Rom, 2012 年 6 月 9 日. (査読無)
- 4) Taiki ABE, Takashi TSUTIDA, Takahiro KUMAGAI and Noriko KIKUHARA: Response and Physical Property Changes in Seabed Containing Silts and Clays under Wave Loading, 10th International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE2011), 国立中央大学, CD-Rom, 台湾, 2011 年 11 月 14 日. (査読無)
- 5) 安部太紀, 土田孝, 熊谷隆弘, 菊原紀子: 波浪作用下における底泥の応答と物性変化に関する研究第 46 回地盤工学研究発表会, 神戸国際会議場, pp.911-912. , 2011 年 7 月 6 日 (査読無)
- 6) 安部太紀, 土田孝: 波浪作用を受ける底泥の安定性に関する研究, 土木学会中国支部研究発表会, CD-Rom, 岡山大学, 2011 年 5 月 21 日. (査読無)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土田孝 (TSUTIDA TAKASHI)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 10344318

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: