

波浪作用下における砂泥質土の粗粒化および液状化特性について

熊谷隆宏¹・池野勝哉²・土田 孝³

豊かな生態系の形成を目指して創出される砂泥質地盤の安定性に着目し、波浪作用下における砂泥質土の粗粒化、地形変化特性、および液状化特性の解明を目的として、水理実験を行った。透水性の低い粘土を含有して形成された砂泥質土は、初期に過剰間隙水圧を保持し、地盤骨格が十分に形成されていない。このため、比較的小さい波浪条件においても、砂泥質土では、液状化が発生しやすいことが明らかになった。また、初期の砂泥質土は、未圧密地盤としての特徴を持ち、波浪作用後に有意な高密度化現象が生じる。液状化により、底質内部から細粒分が流出するとともに、底質の高密度化に伴い、圧密沈下による地形変化が生じることが明らかになった。

1. はじめに

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、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、開発等に伴う埋立によ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つとして、底質環境が挙げられる。李ら(1998)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示している。また、西嶋・岡田(1998)によれば、細粒分含量の高い砂泥質土壌では、低い透水性により、大型生物を支える細菌の生息に必要な還元層の形成が促進される。このため、人工的に造成される干潟において自然に近い生態系が形成されるためには、シルト・粘土を含有する底質環境を創出するとともに、その環境を長期的に維持することが重要であると考えられる。

混合粒径砂の漂砂特性に関する研究として、例えば、鈴木らは、砂漣形成状態およびシートフロー状態における混合砂の移動形態を実験的に明らかにするとともに、既往の漂砂量モデル(Dibajnia・Watanabe, 1992)に細砂含有率を加味して、混合砂の漂砂量を評価する手法を提案している。また、張ら(1995)は、侵食性と堆積性の波浪の各作用時における混合砂の岸沖方向の分級機構を実験的に明らかにしている。このように、混合砂の漂砂特性の解明に向けて多くの研究が行われているが、シルト・粘土分を多く含む砂泥質土の波浪作用下の安定性に着目した研究は少ない。本研究では、砂泥質土の細粒

分が遊離して抜け出す粗粒化特性、地形変化特性、および液状化特性の解明を目的として、水理実験を行った。

2. 水理実験概要

実験装置として、長さ50m、幅0.6m、高さ1.2mの断面2次元水路を用い、勾配1/50の斜面と接続する一様水深部に長さ2.0m、深さ0.2mの土層を設置した(図-1)。

木村(1994)の調査によれば、全国における自然干潟の多くは、シルト・粘土の細粒分含有率が20%未満であり、また平均すると、約15%である。本実験では、底質として、粒径の揃った砂質土($D_{50}=0.12\text{ mm}$, 0.3 mm)および、砂に、細粒分として浚渫粘土を土粒子重量換算で10~20%混合して作成した砂泥質土を用いた。特に、砂泥質土を対象にした実験は、自然干潟に倣って人工的に創出する底質環境の安定性を調査することを目的としている。表-1に細粒分として混合した粘土の土質特性を示す。

入射波については、底質として砂を用いた場合に、掃流砂と浮遊砂の漂砂形態が生じる条件(波高7cm、周期1.5sおよび波高9cm、周期1.7s)を設定し、3時間

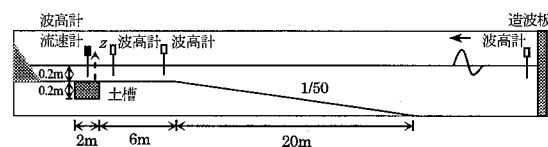


図-1 実験装置概要

表-1 粘土物性値

土粒子密度 ρ_s		2.59 g/cm ³
自然含水比 w_0		122.1 %
粒度組成	砂分	7.5 %
	シルト分	41.2 %
	粘土分	51.3 %
コンシステンシー	液性限界 w_L	111.6 %
	塑性限界 w_P	45.4 %
	塑性指数 I_p	66.2
強熱減量 L_i		10.3 %

1 正 会 員 Ph.D 五洋建設株式会社 技術研究所

2 正 会 員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所

3 正 会 員 工博 広島大学大学院工学研究科教授

表-2 実験条件

ケース名	波浪条件				底質条件		
	波高 (cm)	周期 (s)	水深 (m)	シールズ数	砂粒径 (mm)	含泥率 (%)	含水比 (%)
Case 1-1	7.0	1.5	0.2	0.25	0.12	0	—
Case 1-2	9.0	1.7		0.31		—	—
Case 1-3	7.0	1.5		—		10	30
Case 1-4	9.0	1.7		—		—	—
Case 1-5	9.0	1.7		—		20	30
Case 1-6	9.0	1.7		—		—	—
Case 2-1	7.0	1.5	0.2	0.10	0.30	0	—
Case 2-2	9.0	1.7		0.13		—	—
Case 2-3	7.0	1.5		—		10	30
Case 2-4	9.0	1.7		—		—	—

たる移動床実験を実施した。表-2に実験条件を示す。

計測装置として、沖側に波高計を3台、土層中央部に波高計および流速計を各1台設置し、また、20 cm厚の土層の内部には、間隙水圧計を地盤面から -10 cm および -15 cm の深度に2台設置した。実験中、波高、流速および地盤内間隙水圧をサンプリング周波数 20 Hz で連続的に計測した。また、実験後において、底質の粒度変化、密度変化、地形変化について調査した。

3. 液状化および高密度化特性

波浪作用下において、砂泥質土では、地盤の液状化と高密度化現象、および細粒分が遊離して抜け出す粗粒化現象等を経て、安定地形が形成されることが確認された。以下に、砂泥質土の液状化と高密度化特性、および粗粒

化と地形変化特性について、基礎的な特性を示す。

本実験で用いた透水性の低い粘土を含有して形成された砂泥質土は、波浪載荷時に圧密未了であり、初期状態において有意な過剰間隙水圧が残留している。この影響により、地盤骨格が十分に形成されていないため、波浪作用開始直後より、底質は流動化して波動運動を生じた。

砂泥質土を用いた代表的なケース (Case1-3, 1-4, 2-3, 2-4) における過剰間隙水圧と波高伝達率の時間変化を図-2～図-7に示す。ここでは、過剰間隙水圧を、静水圧に付加した圧力で定義し、底面の水圧変動に弾性的に応答する成分 (変動過剰間隙圧) と、地盤内に残留する成分 (残留過剰間隙圧) に分離して評価する。なお、本ケースに関連して、底質が砂の場合、Case1-3, 1-4 に対応する条件では、浮遊の漂砂、また、Case2-3, 2-4 に対応する条件では、掃流と浮遊の漂砂形態が現れている。

地盤内の実質的な過剰間隙水圧 u_e は、先に定義した過剰間隙圧から、底面に作用する圧力変動を差し引いた間隙水圧で評価される。 u_e が初期鉛直有効応力 σ'_v を超えて有効応力がゼロになるときに液状化が発生し、Foda・Tzang (1994), Sassa・Sekiguchi (1999) に示されるように、変動間隙圧が増幅する。波高 9 cm のケース (Case1-4, 2-4)、および波高 7 cm で砂の粒径が 0.3 mm のケース (Case2-3) において、深度 -10 cm で、液状化の発生が確認された。液状化時において、変動間隙圧は、底面水圧変動の3倍程度に増幅し、Foda・Tzang (1994) に示される完全液状化による共振流動状態が現れている。また、液状化発生時に、地盤内

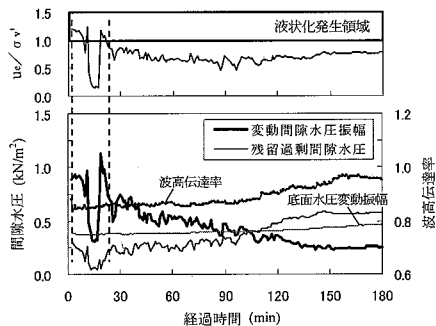


図-2 過剰間隙水圧と波高伝達率の時間変化 ($z = -10$ cm, Case 1-4)

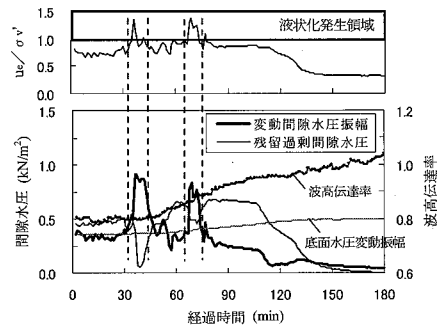


図-4 過剰間隙水圧と波高伝達率の時間変化 ($z = -10$ cm, Case 2-4)

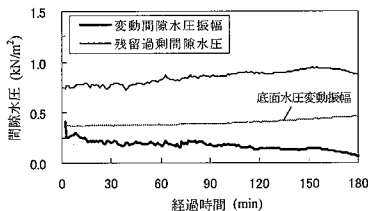


図-3 過剰間隙水圧の時間変化 ($z = -15$ cm, Case 1-4)

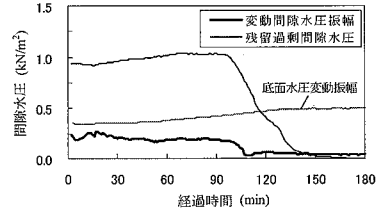


図-5 過剰間隙水圧の時間変化 ($z = -15$ cm, Case 2-4)

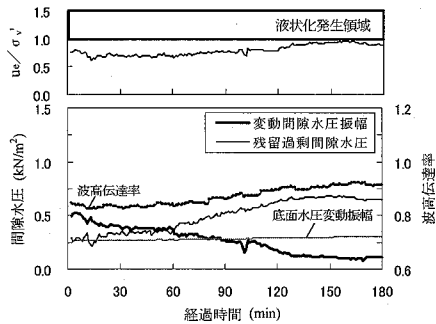


図-6 過剰間隙水圧と波高伝達率の時間変化
($z = -10\text{cm}$, Case 1-3)

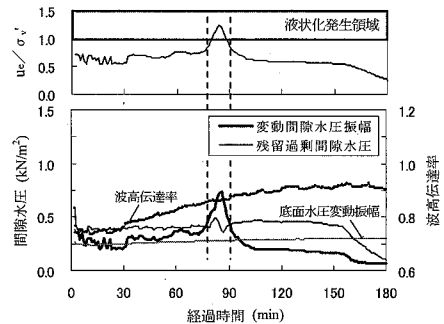


図-7 過剰間隙水圧と波高伝達率の時間変化
($z = -10\text{cm}$, Case 2-3)

の残留過剰間隙水圧が解放される現象が現れた。なお、深度 -15cm では、液状化の発生に至っていない。

実験で得られた過剰間隙水圧の変化特性より、砂泥質土の液状化の発生メカニズムは、次のように考えられる。

- ①透水性の低い粘土を含有して形成された底質は、初期状態において有意な(残留)過剰間隙水圧を保持する。
- ②繰り返しの波浪作用下において、地盤のせん断変形に伴う体積収縮(負のダイレイタンス)に起因し、(残留)過剰間隙水圧が徐々に蓄積される。
- ③底面の水圧変動に対して、地盤内の間隙水圧応答は遅れを伴い、周期的に正負の過剰間隙水圧が発生する(善ら, 1987)。波の周期的作用の中で、残留過剰間隙水圧に正の過剰間隙水圧が加わり、地盤の有効応力がゼロになると液状化が発生する。または、有効応力がゼロに近づくとともに、増幅を始める変動間隙水圧に起因する過剰間隙水圧の影響を受けて、液状化が発生する。

また、地盤が柔らかく、底面作用波圧が地盤の波動運動を引き起こすとき、波浪は進行とともに減衰する。入射波高に対する波高比で定義した波高伝達率は、波浪作用開始時では、0.8程度の値であり、時間とともに、1.0の値に漸近する。実験の結果、波高伝達率の変化と液状化等の地盤内部の応答に明確な相関が現れないことと、砂が粗く、高透水性の条件の方が波高伝達率の回復傾向が強いことから、波高伝達率は、地盤表層における過剰間隙水圧の消散に伴う骨格の形成および強度増加に依存すると考えられる。なお、目視により、地盤面の変動の減少に伴い、波高伝達率が回復することが確認されている。

波浪による底面の水圧変動に応答する変動過剰間隙水圧が液状化の発生に及ぼす影響を評価するため、Biot (1941) の多孔質弾性体理論を拡張した土田ら(2005)の粘弾性モデルを用いて、地盤の動的応答を解析する。

粘弾性モデルにおける地盤の運動方程式と連続式は、式(1)、(2)でそれぞれ表現することができる。モデルは地盤骨格が形成されている未液状化地盤を対象とする。

表-3 解析で与える物性パラメータ

	n	ν	$E(\text{N/m}^2)$	$\beta(\text{N/m}^2)$	$k(\text{cm/s})$	β'
Case 1-4	0.5	0.33	5.0×10^5	1.0×10^{-8}	1.5×10^{-4}	0.1
Case 2-4					1.5×10^{-2}	

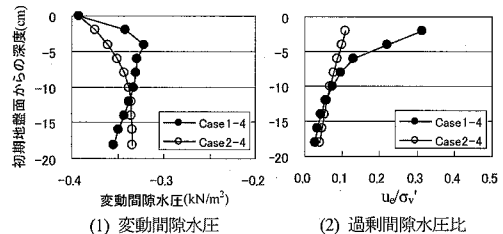


図-8 変動間隙水圧解析結果(波が谷の時)

$$G \left\{ \nabla^2 (\bar{u} + \beta' \dot{\bar{u}}) + \frac{1}{1-2\nu} \nabla \nabla \cdot (\bar{u} + \beta' \dot{\bar{u}}) \right\} - \nabla p = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{k}{\rho_w g} \nabla^2 p = \frac{n}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \bar{u} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 n : 間隙率、 ν : ポアソン比、 G : せん断弾性係数、 β : 水の体積弾性率、 k : 透水係数、 $\bar{u}$: 土粒子の変位、 p : 変動間隙水圧、 β' : 粘性パラメータである。

砂泥質土のケース (Case 1-4, 2-4) を対象にして、表-3に示す物性パラメータを用いて、地盤内の変動間隙水圧を解析した結果を図-8に示す。

変動間隙水圧は、深度方向に遅れを伴って生じるため、動水勾配に起因する透水力(過剰間隙水圧)が発生する。波の周期的作用の中で、透水力が鉛直上向きに作用するとき(正の過剰間隙水圧が発生するとき)、有効応力が減少する。解析により、砂が細かく透水性の低い底質条件では、変動間隙水圧の深度方向への伝播性が小さく、透水力が大きく発生することが示される。ただし、残留間隙水圧が付加されていない場合、初期有効応力に対する過剰間隙水圧は小さく、液状化の発生に至らないことがわかる。

すなわち、実験で現れた砂泥質土の液状化現象には、

前述した液状化メカニズムの中で、初期の過剰間隙圧の影響、およびせん断変形時の負のダイレイタンスに伴って蓄積される残留過剰間隙圧の影響が大きいことが推定される。また、実験において、細かい砂を用いた Case1-4 では、波浪作用直後に液状化が発生している。これは、砂が細かく透水性が低い底質条件では、変動間隙圧に起因する過剰間隙圧が大きく発生し、残留間隙圧の蓄積を待たずに液状化が発生しやすいことを示唆する。

粘土を含有して形成された砂泥質土は、初期に過剰間隙圧を保持し、未圧密地盤としての特徴を持つ。波の作用により、過剰間隙圧の消散とともに生じる間隙水の排水、または液状化後の粒子の再配列に伴い、初期に緩い状態であった底質が高密度化する現象が現れた。実験前に対する実験後の密度比、および密度変化より換算されるひずみ量を図-9 に示す。実験後に、5%程度の密度増加が生じるとともに、高密度化に伴い圧縮ひずみが5~15%程度生じている。特に、液状化が大きく生じたケース (Case1-4, 2-4, 2-3), また、粗い砂を用いた条件で、高密度化現象が明瞭に現れることがわかる。

4. 粗粒化および地形変化特性

底質の粗粒化および地形変化特性について、前節で明らかになった液状化および高密度特性を踏まえて考察する。砂泥質土を用いて液状化が発生したケース (Case1-4, 2-4) の実験後における底面状況を写真-1 に示す。底面では、粘土・シルト分が巻き上げによって抜け出した結果、粗粒化が生じるとともに、漂砂現象が現れ、砂漣が形成された。砂漣の頂部では、細粒分が完全に抜け出し、底質が砂に変化していたのに対し、谷部では、初期の状態から若干、細粒分が抜け出した粘土混じり砂の底質になっていた。また、そのような粘土混じり砂の底質は、流れに対して、強い移動抵抗を持つことが確認された。これらのケースにおいて、地盤内部の

底質粒度を分析した結果を図-10 に示す。ここでは、150 μm 以下の粒子を分析の対象とした。粗い砂を用いた Case2-4 では、地盤内部からも細粒分が抜け出す粗粒化が生じている。特に、液状化深さ (10 cm 程度) にあたる位置の近傍において粗粒化が顕著である。このケースにおける実験後の底質断面を写真-2 に示す。液状化発生時の噴砂により、粗粒化が生じている状況を確認できる。一方、細かい砂を用いた Case1-4 では、液状化の発生にも関わらず、地盤内部において有意な粗粒化は生じていない。

地盤内部の粗粒化は、液状化と密接な関係があり、特に、細粒分と砂との粒径差が大きい場合、粒子相互に作用する分子間引力が弱い場合、液状化が発生すると、細粒分が遊離しやすく、顕著な粗粒化が発生するものと考えられる。一方、液状化が発生しない場合には、粗粒化が発生する領域は、表面部に限られると考えられる。

また、粗い砂を用いた条件では、砂粒子間に存在する細粒分の流出に伴って空隙が増加するため、前節で確認したように、高密度化現象が現れやすいと考えられる。

次に、砂泥質土の地形変化特性を評価する。底質の移動および応答が大きい波高 9 cm の波を作用させたケースにおける地形変化観測結果を、図-11 と図-12 に示す。粒径が 0.12 mm の砂を使用したケースにおいて、細粒分を含有しない砂質の条件と比較して、砂泥質の条件では、砂漣の形成が小さいと同時に、地形変化が抑えられる傾向にあることがわかる。特に、細粒分含有率が 20 % と高く、かつ、含水比が小さい砂泥質条件の Case1-5 では、地形変化がほとんど生じていない。なお、細粒分

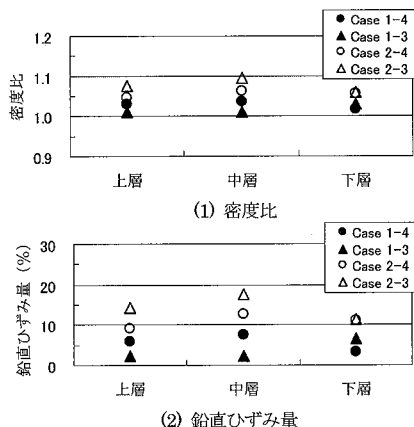


図-9 実験後の底質密度および鉛直ひずみ量

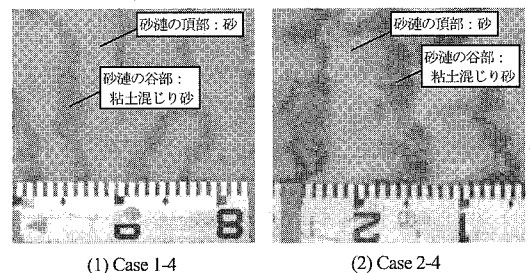


写真-1 実験後の底面状況

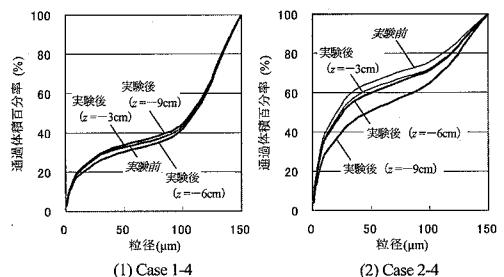


図-10 粒度分析結果

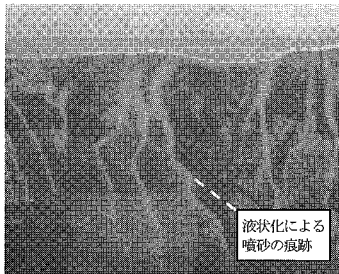


写真-2 実験後の底質断面
(Case2-4)

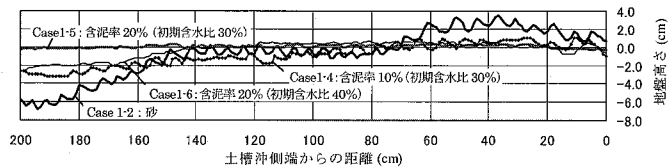


図-11 砂と砂泥質土の地形変化観測結果 (波高9cm, $D_{50}=0.12\text{mm}$ の砂使用のケース)

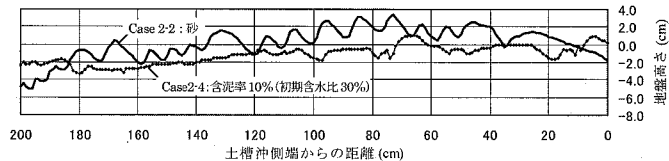


図-12 砂と砂泥質土の地形変化観測結果 (波高9cm, $D_{50}=0.3\text{mm}$ の砂使用のケース)

含有率が 20% のケースでは、表面に有意な粗粒化は現れないと同時に、漂砂現象が現れず、砂漣は形成されなかった。

砂泥質土において、地形変化が抑えられる原因としては、次のように考えられる。

- ・砂粒子の重量に加えて、含有する粘土分が持つ粘着力が、底質の移動・巻き上げに対する抵抗力として働く。特に、含水比が小さい条件で、粘着力が発揮される。
- ・波浪に応答して、底質が波動運動を示す場合、底質は、波浪とほぼ同位相で運動するため、底質表面に作用する水粒子速度が相対的に減少するとともに、底質の移動・巻き上げの外力となる底面せん断力が減少する。
- ・底面の粗粒化が生じて、形成される砂漣が小さいため、砂漣部で底質を浮遊させる渦の発生が抑制される。

砂の粒径が 0.3mm の砂泥質土の条件では、砂質土の条件と比較して、形成される砂漣が小さいものの、地形変化が抑制される傾向については、明瞭には認められない。この原因として、粗い砂を用いた条件で液状化が発生した場合、底質の高密度化に伴って地盤の沈下が大きく現れることが挙げられる。すなわち、粘土を含有して形成された砂泥質土は、漂砂による地形変化は小さいが、初期に過剰間隙水圧を保持し、未圧密地盤としての特徴を持つため、波浪作用による高密度化に伴って、圧密沈下による地形変化が有意に現れやすいことが示される。

なお、波高 7cm の波を作用させたケースにおいても、同様の粗粒化および地形変化特性が確認された。

5. おわりに

本研究では、砂に粘土を混合して作成した砂泥質土の波浪作用下における液状化と高密度化特性、および粗粒化と地形変化特性について、実験的に明らかにした。

透水性の低い粘土を含有して形成された砂泥質土は、初期に過剰間隙水圧を保持し、地盤骨格が十分に形成さ

れていない。このため、砂であれば、掃流砂や浮遊砂の漂砂形態が現れる程度の波浪条件に対して、砂泥質土では、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粗粒化する。また、初期の地盤は、未圧密地盤としての特徴を持つため、波浪作用下で、間隙水圧の消散とともに、顕著な高密度化現象が現れることを明らかにした。

本研究では、細粒分として、粘土分を多く含有する底質を対象にしたが、粘着力を持たないシルト分を多く含む場合、今回明らかになった特性と異なる特性を示すことが考えられる。細粒分の組成が与える影響について、今後の研究課題として重要であると考えられる。

参 考 文 献

- 木村賢史(1994)：人工干潟(海浜)の水質浄化機能，ヘドロ，No. 60, pp. 59-81.
- 鈴木高二朗・渡辺晃・磯部雅彦・M. Dibajnia(1994)：振動流作用下における混合粒径底質の移動現象について，海工論文集，Vol. 41, pp. 356-360.
- 善功金・山崎浩之・渡辺 篤(1987)：海海底盤の波浪による液状化および高密度化，港研報告 第26巻 第4号，pp. 125-180.
- 土田孝・熊谷隆宏・池野勝哉・渡部要一・五明美智男(2005)：波浪作用下の底泥の挙動に関する解析手法について，海工論文集，Vol. 52, pp. 451-445.
- 張達平・山本幸次・佐藤慎司・田中茂信(1995)：混合砂の分級過程に関する実験的研究，海工論文集，Vol. 42, pp. 481-485.
- 西嶋渉・岡田光正(1998)：人工干潟における生態系の創出・保全，土木学会誌，Vol. 83, pp. 34-35.
- 李正奎・西嶋渉・向井徹雄・瀧本和人・清水徹・平岡喜代典・岡田光正(1998)：自然及び人工干潟の有機物分解能の定量化と広島湾の浄化に果たす役割，水環境学会誌，21-3, pp. 149-156.
- Biot, M. A (1941)：General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155-164.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe(1992)：Sheet Flow under nonlinear waves and currents, Proc. 23rd Int. Conf. on Coast Eng., 2015-2028.
- Foda, M. A. and S.-Y. Tzang(1994)：Resonant fluidization of silty soil by water waves, J. Geophys. Res., Vol. 99, pp. 463-475.
- Sassa, S. and H. Sekiguchi(1999)：Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, Geotechnique, Vol. 49, No. 5, 621-638.