

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

Experimental Study on Response of Sandy Mud to Wave Action

熊谷隆宏¹・土田 孝²・安部太紀³・菊原紀子⁴・布谷信貴³

Takahiro KUMAGAI, Takashi TSUCHIDA, Taiki ABE, Noriko KIKUHARA and Nobuki NUNOYA

In the case where soft bottom mud with high water content is fluidized by wave-induced pressure, cracks are generated in the surface of the mud. In order to examine the behavior of sandy mud under wave action, a laboratory experiment has been conducted in a condition that sediment is fluidized and cracks are generated in the surface. It is found that water content of sandy mud is remarkably decreased under wave action by not only consolidation but washout of clay particles, which contain significant amount of water, from the mixture sediment. The characteristics of sediment transport of sandy mud are clarified in comparison with the experimental results on genuine mud reported by a conventional study. Also, it is found that resonant fluidization response occurs in sandy mud causing energy dissipation of surface waves.

1. はじめに

シルト・粘土の細粒分が河川から河口域に運搬され、フロック（凝集体）を形成して沈降し海底に堆積すると、高含水比の底泥が形成される。そのような高含水比で軟弱な底泥に波や流れが作用すると、底質の巻き上がり、浮遊移動が生じ、シルテーションや水質汚濁等の問題の発生に繋がることが知られている。

波による底泥の巻き上げ特性の解明に向けて、例えば、三村ら（1989, 1990）は、カオリン泥とベントナイト泥について、含水比が液性限界以上にある場合の底面せん断応力と巻き上げ・沈降フラックスの関係を調査し、各底泥グループに対して、巻き上げフラックスの評価式を提案している。

一方、海底に堆積した底泥は、波や流れの作用の影響下で、長期的に圧密されて地盤が形成される。波浪作用下の底泥の圧密挙動を解明する研究として、熊谷ら（2007）は、底泥の流動化に伴う亀裂の発生に着目し、亀裂が有する排水促進効果により底泥の圧密が速くなる特性を明らかにした。さらに、熊谷ら（2011）は、底泥内の過剰間隙水圧挙動を調べるとともに、数値解析による検討を行い、波浪の繰り返しせん断作用により亀裂先端部の周辺で過剰間隙水圧が蓄積される過程と、亀裂の排水促進効果によって過剰間隙水圧が消散する過程が繰り返される中で、圧密が促進されることを明らかにした。また、安部ら（2012）は、土田・五明（1999）が提案する波浪作用に対する地盤の安定解析手法に対して、粘土

の動的強度の指標として降伏値を用いる改良を行い、亀裂の発生を評価できる解析手法を提案している。

このように、既往の研究では、砂分をほとんど含まない底泥を対象にして、巻き上げ・沈降特性、亀裂特性、圧密特性等が明らかにされているが、海外の研究も含めて、砂分を多く含む底泥の波浪応答特性については明らかにされていない。河口域では、砂や粘土、それぞれの単一層だけでなく、砂と粘土混合層や、砂層と粘土層の互層構造が見られることが知られている。

本研究では、砂分を多く含む底泥を対象にして、底泥が流動化する条件下で実験を行い、底泥内の過剰間隙水圧の応答特性、圧密特性、および底泥の粗粒化特性等を明らかにすることにより、底泥の波浪応答特性を解明することを目的とする。

2. 実験の概要

砂分を含まない底泥に関して、熊谷ら（2011）は、波により底泥が流動化する条件下における底泥内の亀裂の発達特性や圧密特性、粗粒化特性等を実験により明らかにしている。本研究では、底泥が砂分を含むことによる影響を明らかにするため、既往の研究で用いた含水比165%の浚渫粘土を母材として、中央粒径0.17 mmの細砂

表-1 混合土物性値

土粒子密度 ρ_s		2650kg/m ³
粒度組成	砂分	51.9%
	シルト分	23.4%
	粘土分	24.8%
コンシステンシー	液性限界 w_L	54.0%
	塑性限界 w_P	24.4%
	塑性指数 I_p	29.6

1 正会員 Ph.D. 五洋建設(株)技術研究所
2 正会員 工博 広島大学大学院工学研究科 教授
3 学生会員 広島大学大学院工学研究科
4 正会員 修(環) 五洋建設(株)技術研究所

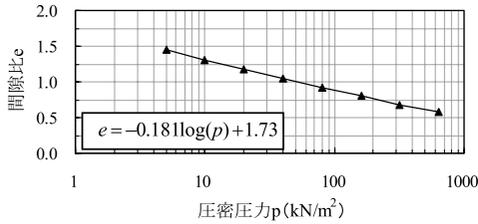


図-1 混合土の $e - \log p$ 関係

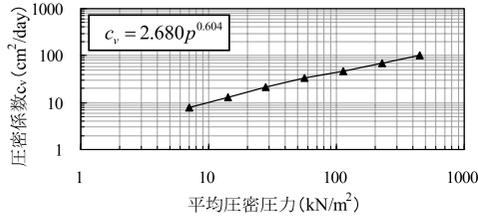


図-2 混合土の $c_v - p$ 関係

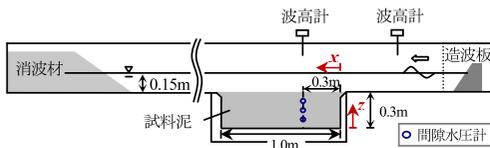


図-3 実験装置概要

を土粒子重量換算で50%混合した混合土を実験試料として用いた。試料の主な物性値を表-1に示すとともに、図-1と図-2に標準圧密試験より得られた圧密特性を示す。

底泥の波浪応答特性を調べるために使用した実験装置を図-3に示す。長さ10m、幅0.3m、高さ0.4mの造波機能を持つ水槽に長さ1.0m、深さ0.3mの土槽を取り付けた実験装置を用いた。波浪条件として、水深を0.15mに設定し、既往の研究で用いた波高0.05m、周期1.4sの規則波(Case1)を作用させるとともに、比較検討のため、波高0.07m、周期1.6sの規則波条件(Case2)を選定し、48時間にわたる波浪作用実験を実施した。実験期間中、土槽の沖側端から0.3m離れた位置において、水位変動を計測するとともに、土槽の底面から0.075m、0.150m、0.225mの高さで底泥内の間隙水圧変動を計測した。また、波浪作用の有無による挙動の違いを調査するため、直径0.3mの円筒を用いて、静水条件下の圧密実験を併せて実施した。

3. 底泥の挙動および含水比変化特性

与える波浪条件に対して砂を混合した底泥試料が流動化を始める動的強度(降伏値)の限界値 τ_{yc} を安部ら(2012)の手法に基づいて評価すると、Case1の波高0.05m時には $\tau_{yc}=31.3\text{N/m}^2$ 、またCase2の波高0.07m時には 42.9N/m^2 となる。一方、実験に用いた底泥試料の降伏値は 26.6N/m^2 であり、底泥が流動化を始める限界値に比べて十分に小さく、底泥の流動化が大きく発生する条件で

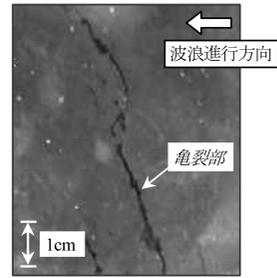


写真-1 底泥面の亀裂発生状況 (Case2)

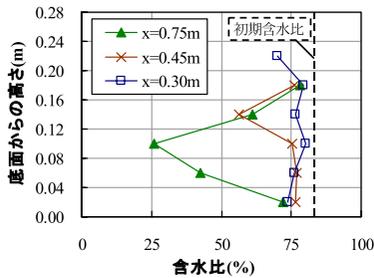
あった。砂分を50%含む底泥試料にCase1, 2の波を作用させたとき、砂分を含まない底泥と同様に、直ちに流動化し、波峰線と平行に亀裂が生じることが確認された。Case2における実験開始から5分後の亀裂発生状況を写真-1に示す。

底泥試料に混合した中央粒径0.17mmの細砂によって底質が100%構成されていると仮定した場合、作用波に対するシールズ数は、Case1とCase2で、それぞれ0.15、0.21と評価される。すなわち、用いた細砂で底質が構成されているとき、掃流や浮遊状態の漂砂移動が現れると考えられるが、粘土との混合試料に対する本実験では、砂は粘着力を持つ粘土分に捕捉され、砂単独の掃流移動や浮遊移動は生じなかった。底泥の移動特性として、粘土粒子が巻き上げられて浮遊移動するとともに、自重によって沈降する現象が現れた。

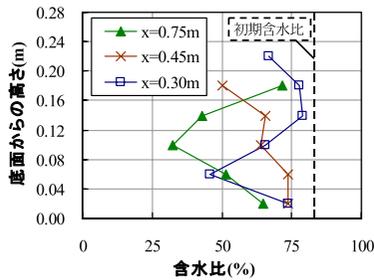
48時間にわたって波浪を作用させた後の含水比の深度分布を図-4に示す。ここでは、非ニュートン流体的な挙動を示す高濃度流動層であるFluid mudを除く底泥を調査対象として、土槽沖側端から $x = 0.30, 0.45, 0.75\text{m}$ の位置で含水比の変化を調査した。図中の含水比は、 x 軸直角方向の2測点で調査した平均値を示すものである。また、比較のために、砂分を含まない同一の底泥試料に対して、本実験のCase1と同じ波高0.05mの条件で行った既往の実験の結果(熊谷ら, 2011)を図-5に示す。

砂分を50%含む底泥試料に関しても、既往の研究と同様に、流動化を生じさせるような波浪が作用した後に、特定の深度で含水比が著しく低下する現象が確認された。このような含水比の著しい低下が現れる深度は、排水促進効果を持つ亀裂の先端深度に概ね一致することが、熊谷ら(2007)によって明らかにされている。

本実験で現れた波浪作用下の圧密特性と比較するために、静水条件下の自重圧密実験結果、および圧密試験結果より評価される自重圧密完了時の含水比分布を図-6に示す。ドレーン等による排水促進を行わず、底泥表面のみを排水境界とする条件では、図-2の圧密特性より、圧密係数が $10\text{cm}^2/\text{day}$ 程度と小さいため、圧密が完了するまでに50日程度の期間が必要であると評価される。また、



(1) Case1 (波高 0.05m)



(2) Case2 (波高 0.07m)

図-4 実験終了時 (48時間後) の含水比分布

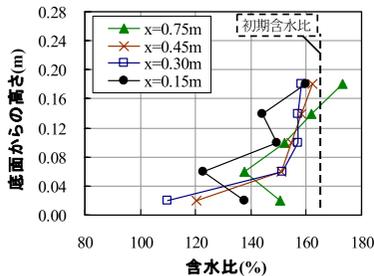


図-5 砂分を含まない底泥に対する実験結果 (波高0.05m, 72時間後; 熊谷ら, 2011)

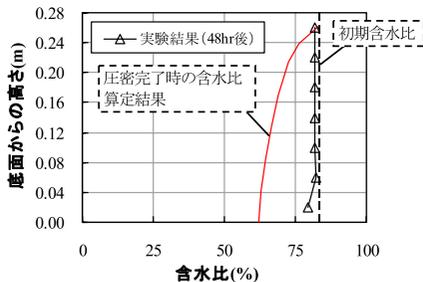


図-6 静水条件下の自重圧密による含水比変化

静水時の自重圧密では、含水比が低下できる限界は最大で62%程度までであることがわかる。

図-1の圧密試験結果によれば、波浪作用実験で得られたように含水比を25%程度にまで低下させるためには、圧力として300kN/m²程度が必要であることがわかる。

熊谷ら(2011)は、波の繰り返し作用を受ける中で、亀裂先端部周辺でせん断応力が集中しやすいことが、静水条件下の自重圧密以上に圧密が促進される原因の一つ

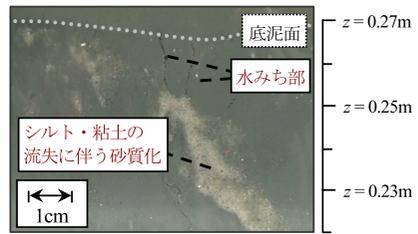


写真-2 シルト・粘土の流失に伴う砂質化状況例

として明らかにしている。しかしながら、このような効果によって、本実験で推定される300kN/m²に及ぶ大きな圧密圧力を説明することは困難である。砂分を含む底泥において、これまでに報告されている亀裂の圧密促進効果だけでは説明できない挙動が現れることがわかる。

4. 底泥の粗粒化および移動特性

前章で示した砂分を含む底泥の含水比変化特性を解明するために、本章では、底泥の粗粒化および砂質化特性に着目して検討する。

波浪を作用させた実験期間中、写真-2に示すように、砂と粘土を混合した底泥から粘土分(細粒分)が流失し、砂質化する部分が見られることが観察された。また、Case2の実験終了後に、レーザー回折式粒度分布測定装置を用いて、100μm以下の範囲で底泥の粒度を調査した結果を図-7に示す。図より、土槽沖側端から0.45mと0.75m離れた位置(x=0.45m, 0.75m)で、実験後に20μm以下の細粒分が流失していることがわかる。特に、x=0.45m, z=0.18mの位置と、x=0.75m, z=0.10mの位置で流失が顕著である。100μm以下の粒子のうち、20μm以下の粒子の割合は、初期の底泥では83%であったのに対し、x=0.75m, z=0.10mの位置では57%と大きく低下し、底泥の粗粒化および砂質化が生じている。このような底泥内部からの細粒分の流失は、既往の研究で示されるように、深く発達した亀裂を通して生じていると考えられる。

また、x=0.45m, z=0.18mやx=0.75m, z=0.10mの位置のように、細粒分が著しく流失している場所と、図-4において含水比が著しく低下している場所が一致することがわかる。すなわち、前章で述べた混合底泥内の著しい含水比の低下は、多くの水分を保持する細粒分が選別的に流失する粗粒化に大きく起因すると考えられる。

前章で述べたように、砂と粘土が混合された底泥中の砂は、シールズ数の大きさより掃流や浮遊状態の漂砂移動が生じると示唆されるが、実際には、粘着力を持つ粘土分に捕捉され、砂単独の掃流移動や浮遊移動は生じなかった。底泥の移動特性として、底泥面に作用する波のせん断応力により、粘土粒子が巻き上げられて浮遊移動する現象が現れた。実験終了後、底泥の巻き上げフラッ

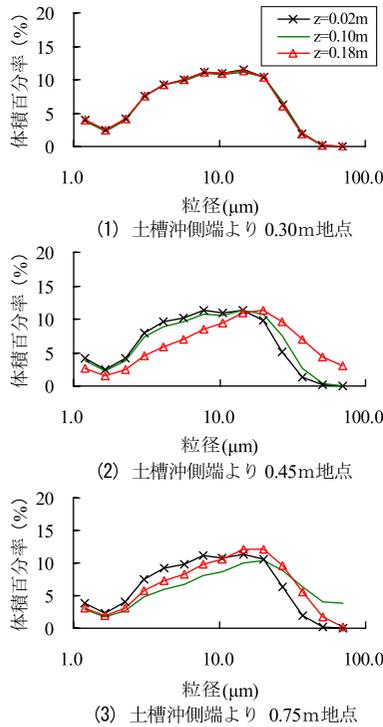


図-7 実験後の底泥に対する粒度分析結果

クスを調査するために、水中に浮遊する粘土粒子、Fluid mud、および土槽外に沈殿・堆積している粘土分を回収した。回収した粘土粒子の乾燥重量を算定し、粘土粒子の乾燥重量で換算した実験期間中の平均巻き上げフラックスを評価すると、Case1とCase2で、それぞれ 6.9×10^5 $\text{kg/m}^2/\text{s}$ 、 1.6×10^4 $\text{kg/m}^2/\text{s}$ であることがわかった。

熊谷ら (2011) は、砂を含まない条件で実験を行い、Case1と同一条件に対する巻き上げフラックスが 1.3×10^4 $\text{kg/m}^2/\text{s}$ であることを報告している。砂を含む底泥に対する本実験において、単位面積あたりの粘土粒子の巻き上げフラックスは、砂を含まない場合の1/2程度であるが、実験で使用した混合底泥の1/2が砂で構成されていることを考慮すると、粘土粒子個々の巻き上げ特性はほぼ同じで、砂を含むことの影響は小さいと考えられる。

以上より、砂と粘土が同程度に混合した底質では、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る。特に、砂と粘土の混合底質の漂砂特性については、従来のシールズ数を用いた評価方法では表現が困難であることが示唆される。

また、Case2の実験において、Fluid mudの表層部および底泥の表面で採取した試料の粒度分析結果を図-8に示す。原泥の粒度分布と比較すると、底泥表面から $10\mu\text{m}$ 以下の細粒分が流失している一方、Fluid mudの表層部で

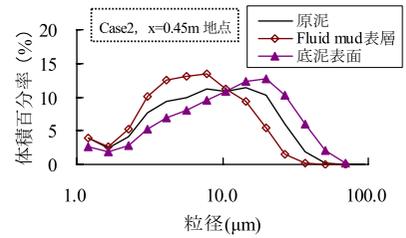


図-8 Fluid mud内および底泥表面に対する粒度分析結果

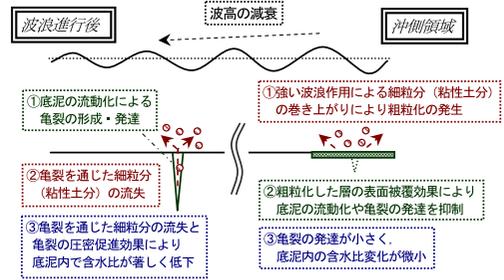


図-9 底泥内の含水比変化のメカニズムの模式図

は、対応する成分が増加していることがわかる。底泥表面において、波の作用によって粘土粒子が巻き上げられる一方、砂は粘土分に捕捉されて漂砂移動しない現象が実験中に観察されているが、この粒度分析結果からも、そのような現象が生じていることを確認できる。

軟弱な底泥上を波が進行する場合、進行とともに波のエネルギーが減衰していくことにより、底泥の流動化や亀裂の形成が小さくなるため、距離が離れた地点では、圧密の促進程度が小さく、底泥内部で含水比の低下量が小さいことが既往の研究で報告されている (例えば、土田ら, 2005; 熊谷ら, 2007)。しかしながら、砂を混合した底泥に対する本実験では、図-4において確認されるように、含水比の低下は、沖側に近い地点 ($x = 0.30\text{m}$) に比べて距離が離れた地点 ($x = 0.75\text{m}$) の方が大きく、これまでに報告されていない新しい現象が現れている。この現象は、次のメカニズムで生じると考えられる。①波がそれほど減衰していない沖側に近い地点では、底泥表面において、早期に粘土粒子の巻き上げによる粗粒化が進むと同時に、強い土骨格が形成されやすい。②そのような層による表面被覆効果により、底泥全体の流動化や亀裂の形成・発達が生じにくくなり、その結果、底泥内部からの細粒分の流失や、亀裂による圧密促進効果に伴う底泥内部の含水比の低下が生じにくくなる。

図-9に、これまでに述べた底泥内の含水比変化のメカニズムの模式図をまとめて示す。

5. 底泥内部の波浪応答および波浪との相互作用特性

実験期間中、土槽沖側端から0.30m離れた位置におい

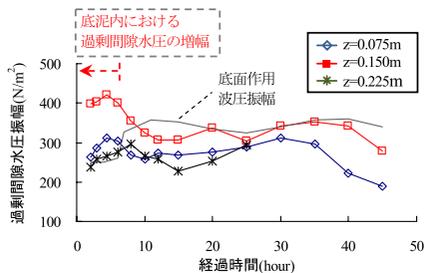


図-10 底泥内の過剰間隙水圧振幅の時間変化 (Case2)

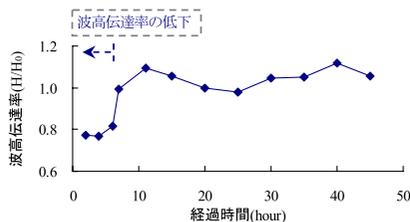


図-11 底泥上の波高伝達率の時間変化 (Case2)

て、 $z = 0.075, 0.15, 0.225\text{m}$ の3つの深度で底泥内の過剰間隙水圧を計測した。図-10に、Case2における過剰間隙水圧振幅の時間変化を示す。経過時間が5時間程度以内の底泥の強度が増加していない状態では、 $z = 0.150\text{m}$ の底泥中央部で、過剰間隙水圧が底面作用波圧の2倍程度に増幅する現象が現れている。このような現象は、Foda・Tzang (1994) が示す液状化に伴う共振流動応答 (Resonant fluidization response) と考えられる。共振流動応答は特に、土骨格が弱い条件で現れることが示されており、そのメカニズムについて、Foda (1994) は、細粒分の流失に伴って形成される亀裂状の細い流路に浸透流 (Channeled seepage flow) が集中する仮説を立てて説明している。熊谷・上田 (2008) は、粘土の含有が10%程度の砂泥質土に関して、共振流動状態の液状化現象が現れること、またその液状化特性がFoda (1994) のChanneled seepage flow理論により説明できることを報告しているが、粘土の含有が50%と高く、砂と粘土の「中間土」に分類される底質に対しても、共振流動状態の液状化特性が現れることが本研究により明らかになった。

また、造波機前面の波高 H_0 に対する $x = 0.30\text{m}$ 位置の底泥上の波高 H の比で表した波高伝達率の経時変化を図-11に示す。経過時間が5時間程度以内で、底泥の共振流動応答が現れるとき、波高伝達率が著しく低下することがわかる。波浪作用によって底泥が共振流動応答を示すとき、その底泥の応答によって波のエネルギーが減衰し、波と底泥の相互作用が現れることがわかる。また、時間経過とともに底泥の強度が増加した後は、底泥の応答が小さくなるため、波高伝達率は概ね1.0となり、有意な波浪エネルギーの減衰は現れないことがわかる。

6. おわりに

海底面を強く攪乱する高波浪の発生が少ない閉鎖性水域では、海底に堆積した底泥は、波や流れの作用の影響下で、長期的に圧密されて地盤が形成される。本研究では、砂分を多く含む底泥の波浪応答特性を解明することを目的として実験的研究を行った。

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。また、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を明らかにした。また、底泥内の過剰間隙水圧の調査により、砂や粘着性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、共振流動状態の液状化現象が現れることを新たに報告するとともに、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。

本実験では、底泥が堆積した後の時間経過が少ない状態を想定し、初期含水比を一定にした条件を設定したが、実際の地盤の形成過程を考えた場合、自重圧密が進行した後に、波が作用することが十分に考えられる。自重圧密が進行し、含水比が鉛直分布を持つ条件を含めて検討することが今後の課題として重要であると考えられる。

参考文献

- 安部太紀・土田 孝・熊谷隆宏・菊原紀子 (2012) : 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.351-360.
- 熊谷隆宏・土田 孝・大坪政美・渡部要一・五明美智男・塩田耕司 (2007) : 波浪作用下における底泥表層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.
- 熊谷隆宏・上田正樹 (2008) : 砂泥質土の波浪応答および自重圧密特性に関する研究, 海工論文集, 第55巻, pp.511-515.
- 熊谷隆宏・土田 孝・安部太紀・菊原紀子 (2011) : 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.
- 土田 孝・五明美智男 (1999) : 波による水圧変動に対する底泥層の安定について, 海工論文集, 第46巻, pp.596-600.
- 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, 第52巻, pp.451-455.
- 三村信男・田口 智・加藤 始 (1989) : 波による底泥の巻き上げ・沈降フラックス, 海工論文集, 第36巻, pp.309-313.
- 三村信男・田口 智・加藤始 (1990) : 底泥の波に対する応答と巻き上げ・沈降フラックス, 海工論文集, 第37巻, pp.230-234.
- Foda M. A. (1994): Inertial (non-Darcian) channeled seepage flow, *J. Geophys. Res.*, Vol.99 (C10), pp.20477-20485.
- Foda M. A. and Tzang S.Y. (1994): Resonant fluidization of silty soil by water waves, *J. Geophys. Res.*, Vol.99(C10), pp.20463-20475.