

平成21年 4月15日現在

研究種目：若手研究（B）	
研究期間：2007～2008	
課題番号：19760335	
研究課題名（和文）	海中構造物基礎周辺の洗掘機構の解明と流体・底質・地盤変動の統合解析モデルの構築
研究課題名（英文）	Elucidation on the mechanics of scour around marine structures and the numerical modeling of the interaction among fluid, sediment and seabed.
研究代表者	
楳田 真也（UMEDA SHINYA）	
金沢大学・環境デザイン系・講師	
研究者番号：30313688	

研究成果の概要：海中にある土木構造物の基礎部材として多用される円柱基礎を対象に模型実験を行い、周辺の渦流れや土砂の挙動および地盤面地形の変動過程を最新の計測技術を導入して詳しく調べた。さらに、構造物周辺の水・土砂・地盤面の運動を精密に表す数式モデルを作成し、様々な条件に対してシミュレーションを行った。その結果、基礎周辺で発生する海底地盤の侵食（洗掘）のメカニズムを明らかにするとともに、静的および動的な洗掘現象の発達過程の特徴を正確に再現可能な計算手法を開発することができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	0	2,300,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	270,000	3,470,000

研究分野：海岸工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：海中構造物、海底地盤、局所洗掘、底質輸送、渦流、流体解析、水理実験

1. 研究開始当初の背景

海岸・海洋構造物の被災の大部分は、基礎周辺の流体運動に起因する海底地盤の侵食から始まり、構造物自体の沈下や損傷へと進展するものである。特に利用頻度の高い沿岸海域では波浪と共に潮流や海岸流などの流れが混在し、海底土砂（漂砂）の移動範囲が広がるため、新たな構造物の建設が周辺海浜の変形、港湾施設の埋没および既設構造物の洗掘被害等を誘発する原因となりうる。従って、海中構造物基礎周辺の地盤変動および流体・漂砂環境を的確に予測することは、被

災リスクの適切な評価に基づく信頼性設計、局所洗掘の効果的な防止対策および構造物の総合的な保全計画等を検討する上で非常に重要な課題である。

海中構造物周辺の地盤変動現象は、流体・底質・海底地盤の各要素が影響し合う相互作用系である。その現象の複雑さおよび実験・観測データの不足などの要因により、その洗掘現象の数値モデル化に関する研究例は、その工学的重要性に反して国内外ともに未だ少ない。特に、従来研究は水深方向に積分した2次元モデルが多く、海中構造物周辺の流

体と底質の3次元運動を合理的に捉えることのできる数理モデルに関する研究例は稀である。従って、その3次元モデルの適用範囲や問題点などに関する知見は十分でなく、現状では実務的問題への対応は困難である。

3次元モデルに関する研究の大部分は河川流に代表される一方向流場における洗掘現象を対象とするもので、波浪場における海中構造物周辺の洗掘現象の予測に関する研究はあまり進んでいない。最近、海底パイプライン周辺の洗掘および海底掘削溝の埋没等の現象を断面2次的にモデル化した研究成果が発表されているものの、複雑な流体・底質運動を伴う小口径構造物周辺の局所洗掘現象の3次元モデル化に関する研究は稀少である。小口径構造物は海上風力発電や港湾の施設および橋梁などの土木構造物の基礎部材として頻繁に使用されるため、その周辺の海底地盤の洗掘メカニズムの解明および正確な予測のための信頼できる解析モデルの開発に関しては実務的要請が高い。

2. 研究の目的

本研究は、海中構造物周辺の流体運動、底質輸送、海底地盤変動および各要素間の相互作用を、理論・数値解析および実験を連携させて総合的に検討し、洗掘メカニズムの解明と高精度な3次元数理解析モデルの構築へと発展させるものである。研究目的は以下の3つにまとめられる。

(1)波浪下の小口径構造物周辺の水と土砂の運動および洗掘地形の発達過程に関する実験的解析を行い、各要素および要素間の相互作用の力学的な基本特性を解明すること。

(2)(1)で得られた流体運動・底質・海底地形の相互作用の相対評価に基づいて各要素モデルを連成的に統合し、3次元数理解析モデルを構築すること。

(3)(2)の数理モデルの適用範囲を検討するとともに、小口径構造物周辺の洗掘進行過程における渦流れと底質輸送の変動特性を数値的・実験的に明らかにすること。

3. 研究の方法

(1)円柱構造物周辺の流体運動、底質輸送および地盤変動に関する実験的解析

①円柱構造物周辺の流動構造、土砂輸送形態および底面地形変化の基本特性を理解することを目的として、一様流場の砂質地盤上に設置した円柱模型周辺の流況および洗掘地形の発達過程に関する水理実験を行った。排水後の円柱周辺の砂面地形を4方向から撮影したデジタル画像を用いてステレオ法解析することで円柱周辺の侵食・堆積地形を高精度で面的に捉えた。初期の洗掘進行過程について、一様径円柱周辺で発生した洗掘孔の

深さや規模の地形的特徴とともに洗掘の進行状況と砂の移動形態との関係を調べた。

②次に、地盤面の低下に伴う基礎部の露出を想定して、円柱構造物の直径比3:5の円柱基礎を持つ非一様径のモデル構造物を対象に、初期から平衡状態に到達するまでの長時間にわたる洗掘地形や各種水理量の計測および底質輸送過程の観測等を行った。さらに、水面上4方向から撮影したステレオ画像を光学的条件を考慮して解析することで、洗掘地形の連続的な進行過程を捉えた。円柱基礎部分の土被りや露出状態の違いによる平衡洗掘深および洗掘の発達過程の変化を調べた。

(2)海中構造物周辺の流体運動・底質輸送・地盤変動に関する数値モデル化

①流体運動・底質輸送・地盤変動の相互干渉過程を精度良く再現するために、構造物壁面や地盤面付近における境界層の剥離や再付着を伴う複雑な渦流れを厳密に解析するのに有効な移動一般曲線座標系に変換したNavier-Stokes方程式に基づく3次元流体解析モデルに、掃流砂と浮遊砂の両方を考慮した底質輸送モデル、底質の体積保存式からなる底面地形解析モデルおよび底質の安定条件を考慮した斜面滑動モデルを組み込むことで、非定常3次元の連成解析モデルを構築した。そして、本モデルの適用性を調べるために、小スケールの室内実験に対応する洗掘条件（静的洗掘：Clear water scour, 移動限界 Shields 数： $\theta_{c0}=0.05$, 砂の中央粒径 0.25mm, Keulegan-Carpenter 数： $KC=4\sim 20$, レイノルズ数： $Re=1000\sim 5000$)で、振動流中の直立円柱周辺の静的な洗掘現象に関するシミュレーションを行った。

②次に、既存の波動場における動的な洗掘実験に対応する条件（動的洗掘：Live bed scour, 砂の中央粒径 0.18mm, 円柱直径 $D=10\text{cm}$, $KC=15$, $Re=33000$)へと対象を拡大し、直立円柱周辺の流況、底質輸送および局所洗掘の発達過程を詳細に解析し、本モデルの妥当性を調べた。

4. 研究成果

(1)円柱構造物周辺の流体運動、底質輸送および地盤変動に関する実験的解析

①一様径円柱周辺の底質輸送と洗掘地形の変動特性に関する実験的解析

一様径円柱周辺の洗掘地形の発達過程に関して、ステレオ画像解析により侵食・堆積域を面的に捉えた結果を図-1に示す。洗掘は縮流により円柱の根元肩部より始まり、深くなりながら円柱壁面に沿って急速に拡大し、馬蹄形渦の発達に伴って逆円錐形状の洗掘孔が形成されること、円柱側面付近から掃流

された底質は後流域に堆積することでマウンドを形成し、その下流域には砂漣が徐々に発達すること、洗掘開始 10 時間後の洗掘深は円柱直径の約 1.3 倍、マウンドの高さは 0.7 倍に達すること等、静的洗掘の詳細な発達過程を理解することができた。

洗掘開始約 10 時間後の洗掘地形の縦横断面形状と底質輸送状況を図-2 に、洗掘過程における底質の侵食・堆積量の時間変化を図-3 に示す。図-3 は底質の侵食・堆積量は各洗掘段階の底面地形と初期地形との高低差より算出したもので、円柱直径 D の 3 乗で基準化した値を表記した。以上の結果より、1) 洗掘初期段階では馬蹄形渦や縮流の影響による掃流輸送が卓越するものの、側面侵食が進行した中期段階からは後流渦による底質の巻き上げによる浮遊輸送の比率が増大すること、2) 最終的には侵食体積が円柱直径の 3 乗の約 14 倍に達する大規模な洗掘孔と約 5.5 倍のマウンドを持つ洗掘地形が形成されること、3) 洗掘進行中の侵食量に対する堆積量の割合は約 0.4~0.6 の範囲で変動すること等、流動構造や底質輸送形態の変化と侵食・堆積量の関係を明らかにすると同時に、数値解析モデルの検証および改善に役立つ洗掘の初期発達過程に関する基礎データや知見を得ることができた。

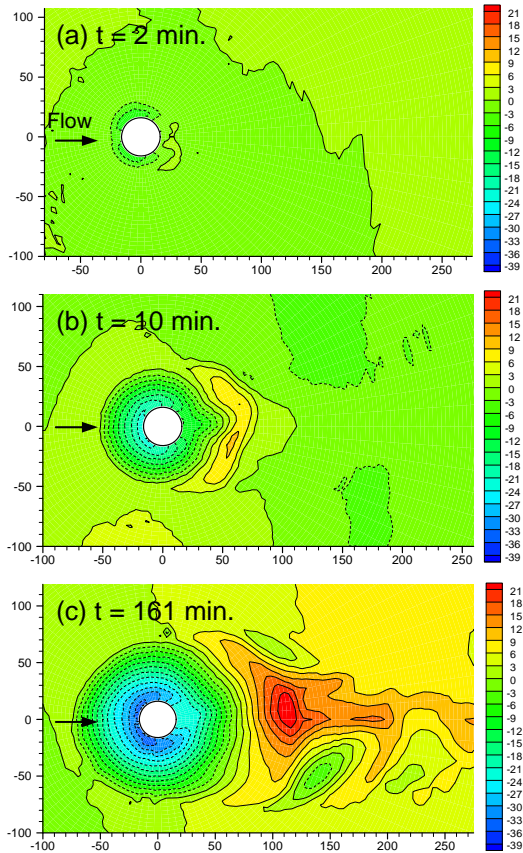


図-1 一様径円柱周辺の洗掘地形の発達過程 (単位: mm, 点線: 侵食域, 実線: 堆積域)

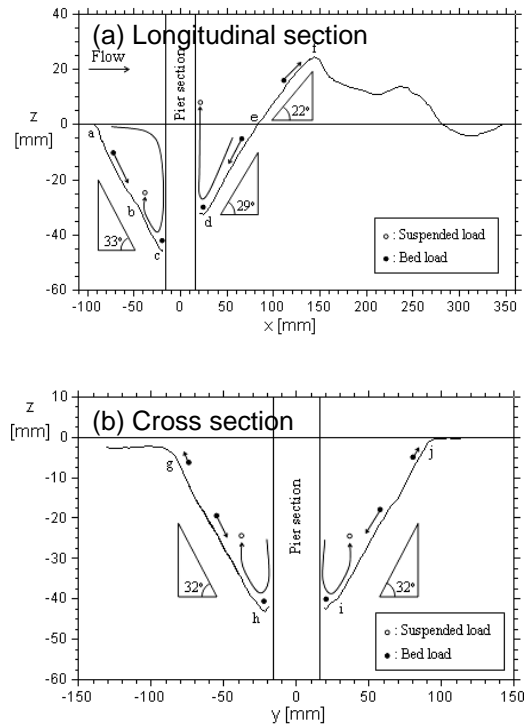


図-2 洗掘孔の縦横断面形状と底質輸送状況

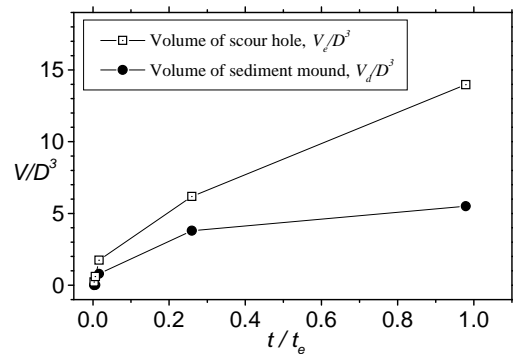


図-3 洗掘初期過程における侵食・堆積量の時間変化 ($t_e=620$ 分, D : 円柱直径)

②円柱基礎部の土被り・露出状態が洗掘現象に与える影響に関する実験的解析

図-4 は洗掘開始から 12 分後の直径 $D=3$ cm の円柱構造物模型周辺の河床地形を①で検証した計測システムを用いて解析したもので、直径 $D_*=5$ cm の円柱基礎部分の初期平坦床における平均床からの土被り厚 Y ($Y < 0$: 河床低下による基礎露出状態) の違いによる洗掘地形の変化を示す。初期段階において円柱基礎周辺の底面の侵食・堆積パターンは露出度合の違いによる流動構造・底質輸送量の変化の影響を大きく受けることが分かる。

図-5 は橋脚の根元上流部における洗掘深の時間変化を、図-6 は最終洗掘深と基礎の露出度合との関係を示す。1) 基礎が当初または初期段階で露出する状態では、洗掘孔は比較的遅い速度で発達し始めるものの最終的な

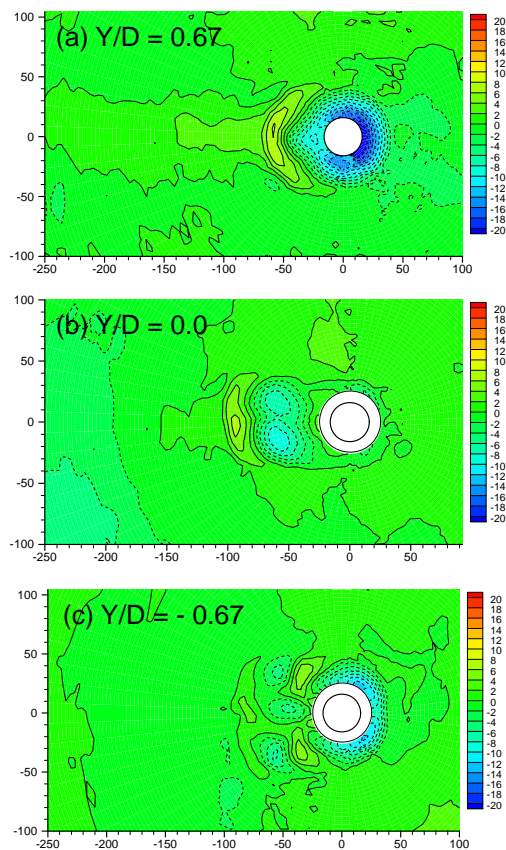


図-4 円柱基礎露出による初期洗掘地形の変化 (単位: mm, Y: 土被り厚, D: 上部円柱の直径, 点線: 侵食域, 実線: 堆積域)

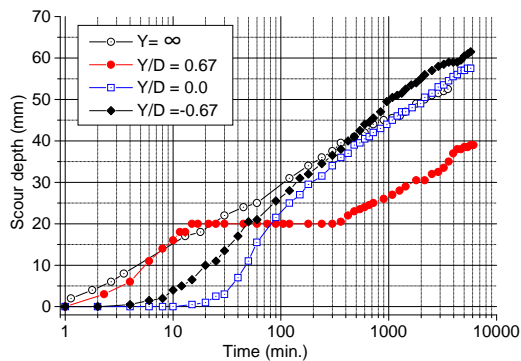


図-5 橋脚前面の洗掘深の時間変化

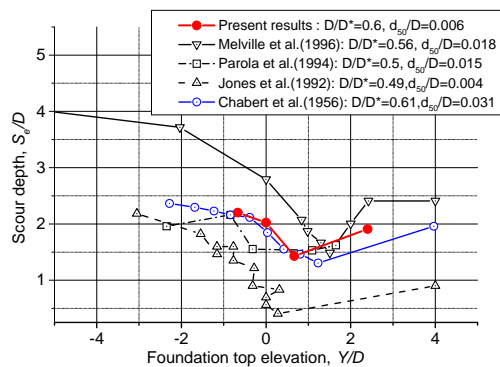


図-6 最終洗掘深と円柱基礎の露出度合と洗掘との関係 (D*: 基礎部の直径または幅)

洗掘の規模は大きいこと, 2) 円柱直径 D と同程度の深さに基礎部分を埋め込んだ状態では, 初期の洗掘進行速度は比較的速いものの最終洗掘の規模は小さく, 基礎頭部による洗掘拡大に対する抑制効果が期待できること, 3) 基礎がさらに埋め込まれた状態では, 初期の洗掘進行速度は 2) と同程度であるが, 最終的な洗掘規模は 1) 2) の中間になることなどの円柱構造物周辺の洗掘地形の変動特性に関する重要な知見を得ることができた。

(2) 海中構造物周辺の流体運動・底質輸送・地盤変動に関する数値モデル化

① 静的洗掘現象への本モデルの適用性に関する数値的解析

振動流中の直立円柱周辺の洗掘地形および渦流の発達過程に関する計算結果の一例を図-7 および図-8 に示す。図-7 より局所洗掘は円柱根元肩部から始まり, 円柱壁面に沿って周辺に拡大すること, 洗掘の初期段階に

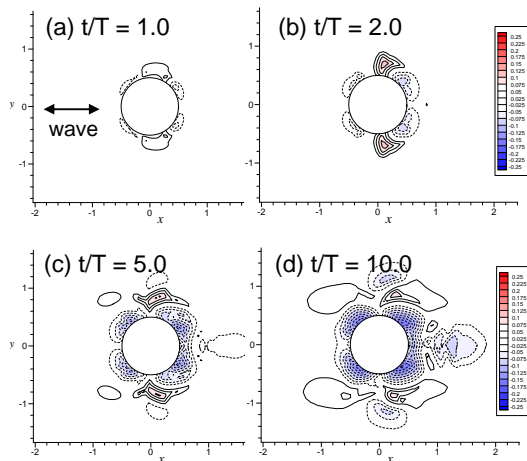


図-7 振動流中の直立円柱周辺の洗掘地形の時間変化 ($KC=20$, t : 時間, T : 周期, 点線: 侵食域, 実線: 堆積域)

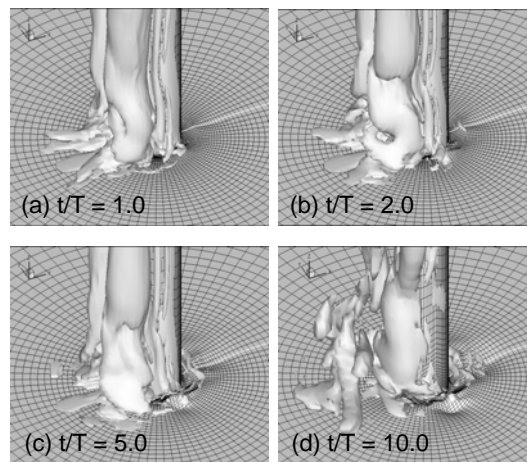


図-8 振動流中の直立円柱周辺の渦流の時間変化 ($KC=20$, λ_2 法による渦核の可視化)

において侵食された底質の一部は円柱側面付近に堆積し、その堆積域は洗掘孔の拡大につれて洗掘孔の外縁部に移動すること、よどみ点付近の円柱根元も馬蹄形渦の影響を受けて徐々に洗掘が進み、次第に逆円錐形の洗掘孔が円柱周辺に形成されることなど、従来の波動場の洗掘実験で観測されている静的洗掘の進行過程の特徴を良好に再現できた。さらに、実験による観測の困難な洗掘進行過程における馬蹄形渦や後流渦などに代表される渦流れの内部構造および掃流力の変動特性に関する貴重な知見を得ることができた。

図-9 および図-10 は円柱周辺の洗掘深の時間変動および最大洗掘深と KC 数の関係を示す計算結果である。洗掘開始直後に洗掘深は急激に増加し、徐々に増加率が減少して、最終的にはある一定値に漸近すること、その洗掘深は KC 数の増加につれて大きくなることなどが分かる。この結果は従来の実験結果と整合するものであり、本解析モデルによる洗掘深の正確な予測の可能を示している。ただし、従来の実験結果のばらつき具合からも容易に推測されるように、洗掘深は KC 数の他に、底質砂の条件（大きさ、粒径分布、間隙率、粘性性など）や流れ場の条件（レイノルズ数、フルード数、波と流れなど）に依存するため、さらに計算条件を拡大して本モデルの適用範囲を検討する必要がある。

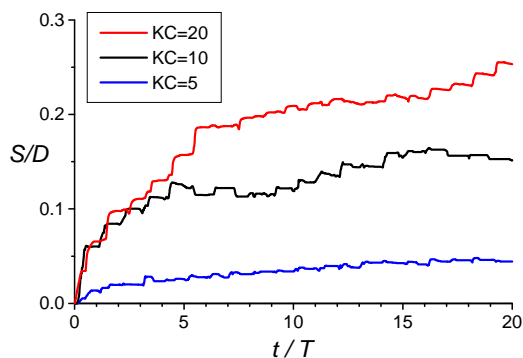


図-9 振動流場における直立円柱周辺の洗掘深の時間変化 (t: 時間, T: 振動周期)

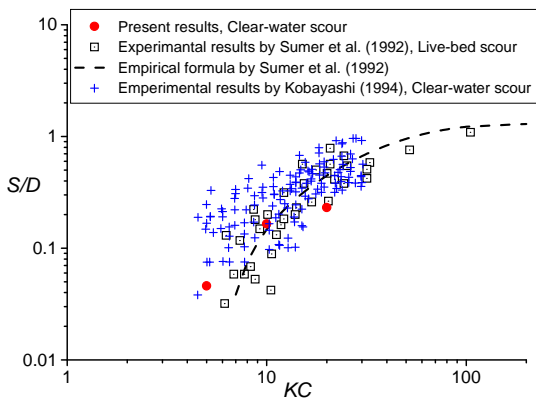


図-10 最大洗掘深と KC 数の関係

②動的洗掘現象への本モデルの適用性に關する数値的解析

図-11 は洗掘開始から 10 周期後における流況、底面せん断応力、浮遊砂濃度および底面の洗掘状況を示す。半周期毎に 1 組の渦対が発生・放出する渦流れパターンが形成され、後流渦、馬蹄形渦および円柱周辺の縮流の影響下で掃流力が増大するとともに、主に後流渦内の上昇流による浮遊砂の発生および渦流れによる浮遊砂の移流・拡散現象を良好に捉えていることが分かる。この時点では底面地形変動は円柱周辺部に限られ、洗掘は円柱

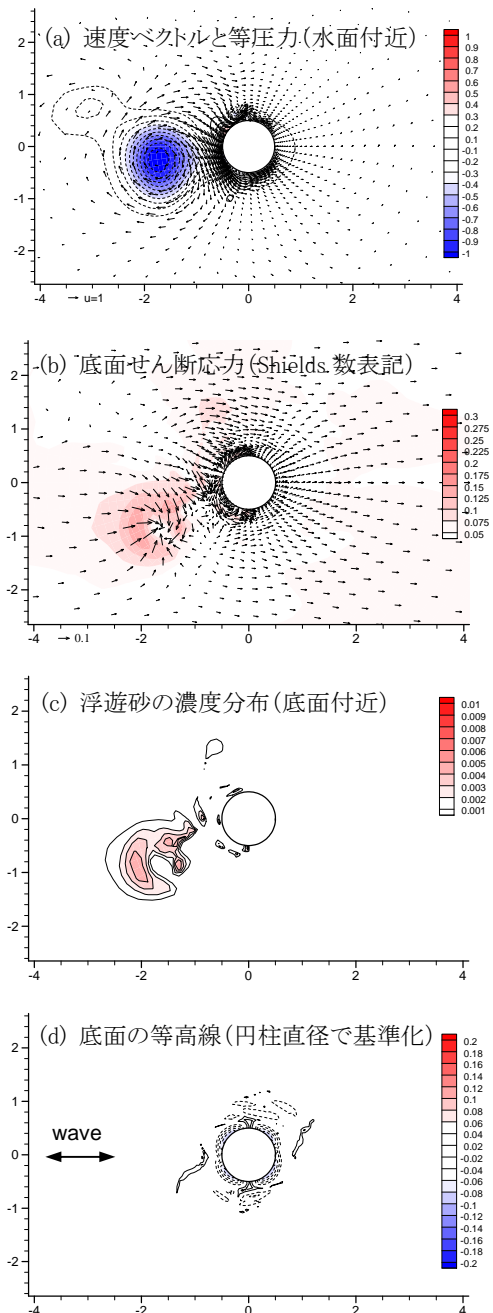


図-11 洗掘開始から 10 周期後の流況、底面せん断応力、浮遊砂濃度、底面地形の様子

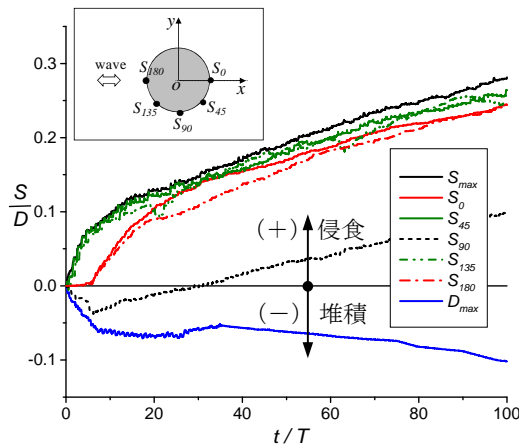


図-12 最大洗掘深・堆積高および円柱周辺の底面高の時間変化 (t:時間, T:振動周期)

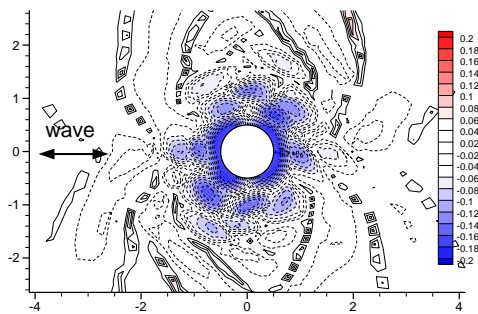


図-13 100周期後の底面地形 (t/T=100)

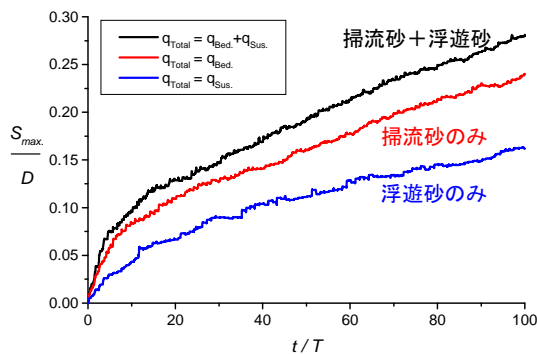


図-14 底質輸送モデルによる洗掘深の変化

肩部を中心に壁面に沿って広がり、堆積は円柱側面に僅かに発生する。図-12は洗掘開始から100周期までの空間的な最大洗掘深・堆積高および円柱周辺の各固定点での洗掘深の時間変化を示す。洗掘は円柱肩部(S_{45} , S_{135})で開始し、約5周期以降になると円柱岸沖よどみ点(S_0 , S_{180})でも洗掘が始まる。円柱側面部(S_{90})においては初期段階で侵食された底質が一時的に堆積するものの、洗掘孔の拡大に伴い洗掘傾向に転じる。最大洗掘深は初期段階で急激に増加するが、徐々にその増加率が減少する。図-13は100周期後の洗掘状況を示すもので、洗掘が円柱周辺で逆円錐形に発達するとともに、砂漣が形成されている様子が分かる。これらの洗掘発達段階の地形

変動の特徴は既存の実験観測結果と整合する。図-14は底質輸送モデルの違いによる洗掘深の変化を示すもので、本解析においては浮遊砂より掃流砂による底質輸送が洗掘深に大きな影響を与えることが分かる。

本研究では、移動一般曲線座標系 Navier-Stokes 方程式に基づく流体解析モデルに掃流砂・浮遊砂輸送モデルおよび斜面滑動モデル等を連成的に組み込んだ3次元流体・底質輸送・移動床解析モデルを開発し、振動流場における直立円柱周辺の底面地形変化を解析した。以上の計算結果より、本モデルは既存の実験で観測されている動的な洗掘地形の発達過程、底質輸送バランスおよび流況変化の主要な特性を良好に再現することができることが分かった。ただし、洗掘の進行速度が過大評価される傾向があるため、今後さらに底質輸送モデルの改良を集中的に進めて、本モデルの信頼性向上を図りたい。

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3件)

- ① S. Umeda, M. Yuhi and H. Ishida, Three-dimensional numerical model for wave-induced scour around a Vertical Cylinder, Proc. of the 31th Int. Conf. on Coastal Engineering 2008, ASCE, 13p, in press, 査読有
- ② S. Umeda, M. Yuhi and H. Ishida, Forces and vortex patterns around a circular cylinder in asymmetric oscillatory plus mean flow, Proc. of the 5th Coastal Structures International Conference, pp.1000-1012, 2009, 査読有
- ③ S. Umeda, T. Yamazaki and H. Ishida, Time evolution of scour and deposition around a cylindrical pier in steady flow, Proc. of the 4th Int. Conf. on Scour and Erosion, pp.140-146, 2008, 査読有

[学会発表] (計1件)

- ① 山崎達夫, 高田亮平, 榎田真也, 石田啓, 円柱橋脚周辺の洗掘地形のステレオ画像計測実験, 平成20年度土木学会中部支部研究発表会, 2009.3.3, 名古屋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎田 真也 (UMEDA SHINYA)

金沢大学・環境デザイン学系・講師

研究者番号: 30313688