バウスラスターによる岸壁前面の局所洗掘と袋型被覆材による対策に関する研究

STUDY ON LOCAL SCOUR IN FRONT OF QUAY CAUSED BY BOW THRUSTER AND ITS COUNTERMEASURE USING FILTER UNITS

水谷法美[1]，篠田陽介[2]，小山裕文[3]
Norimi MIZUTANI, Yosuke SHINODA and Hirofumi KOYAMA

[1]正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）
[2]非会員 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（同上）
[3]正会員 工修 環境商品部長（株）不動テトラ ブロック環境事業本部（〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2 ぺんてるビル11F）

Strong flow generated by bow thruster may cause a severe local scour on the seabed in front of a quay and its countermeasure is required for effective use of port facilities. This study is intended to investigate local scour and its generation mechanism by conducting hydraulic model experiments. Also, countermeasures against local scour using armor stones and filter units are investigated. In the experiments, pore pressure inside seabed is measured as well as flow velocity and bed deformations. Time variation of pore pressure indicates the generation of liquefaction due to strong flow, and this may encourage the local scour. Experimental results clearly show that armoring by filter units is effective to reduce the local scour.

Key Words : *Filter units, armor stones, bow thruster, local scour, wall-jet*

1．はじめに

効率的な港湾の運用には，荷役の効率化などの他に，船舶の入港時間や出港時間の短縮化も有効である．大型船舶には，着岸・離岸の効率化のため，船首下部にバウスラスターが備え付けられており，これを使用することにより離着岸がスムーズに行えるようになる．バウスラスターは，スラスターを回転させることによって横方向に水流を発生させ，船舶の回頭の効率化が可能となるので，これを利用することはバース利用の効率化と海運の高度化が同時に達成されることになる．しかし，バウスラスターを使用すると周囲の流速に対して非常に速い水流（以下，本研究ではジェット流と呼ぶ）が発生することになる．岸壁に当たり放射状に広がったジェット流は，底部の土砂を巻き上げ，岸壁前面に洗掘を生じさせる．岸壁前面の海底地盤は，岸壁の安定性を保つ上で極めて重要であり，したがってバウスラスターを使用する上で有力な洗掘防止策が求められている．このようなバウスラスターより発生する流れについては，キャビテーションを対象としたプロペラ回りの流れの研究が行われているものの（例えば川村ら[1]），本研究で対象とするジェット流による局所洗掘に関する研究はほとんど無い．

また，この局所洗掘の対策工としては，捨石による被覆が挙げられるが，最近使用機会が増えつつある袋型被覆材（フィルターユニット，以下 FU と称す）も捨石に比べて様々な利点を有しており，その被覆による対策工も有効な手法の一つとして考えることができる． FU に関しては，久保田ら[2]などによって耐波安定性の観点などから研究がなされてきているが，このような対策工としての検討例はほとんどない．

そこで本研究では，バウスラスターによるジェット流が岸壁にあたって生じる局所洗掘に着目し，その実態と，その対策としての捨石や FU による被覆工法の効果について水理模型実験の結果に基づいて考究する．

2．水理模型実験

(1) 実験装置

水理模型実験を名古屋大学大学院工学研究科の平面波浪水槽（長さ28m，幅11m，深さ0.8m）で行った．

水槽内に，図-1と図-2に示す幅2000mm，奥行1000mm，高さ210mmの木製枠を設置し，この木製枠内に粒径0.1mmの砂を充填した．バウスラスターによる水流は，周囲に比べて局所的に早い一方向流である特徴に着目し，スラスターとは異なるが水中ポンプによりジェット流を発生させた．この際，水中ポンプと内径50mmの塩ビ管を接続し，塩ビ管を砂面から高さ130mmの位置に水平に設置した．実験水槽の水深は580mmとし，静水面から砂面までの静水深h_0を370mmとした．また，いずれの場合もジェット流は壁面に垂直になるようにした．

本実験では，洗掘対策工法として，捨石による被覆工とFUによる被覆工の2種類を採用した．そして，被覆工の無い場合を加えた合計3ケースについて実験を行った．使用した被覆材は，捨石を想定した石材（写真-1参照：平均質量208g）と4t・耐波型FU（以下，FU-Sと称す）の1/27スケールである1個の質量204g，直径90mm，高さ35mmのFU-S模型（写真-2参照）である．なお，被覆材は，吃水を確保することを優先し，底面上に設置せず，砂中に埋め込んだ状態で噴出口付近まで敷設することとした．この際，それぞれの配置を，石材の場合に壁面から一様に2層，FU-Sの場合に千鳥状に壁面から1列ごとに3層，2層，2層，1層とした．

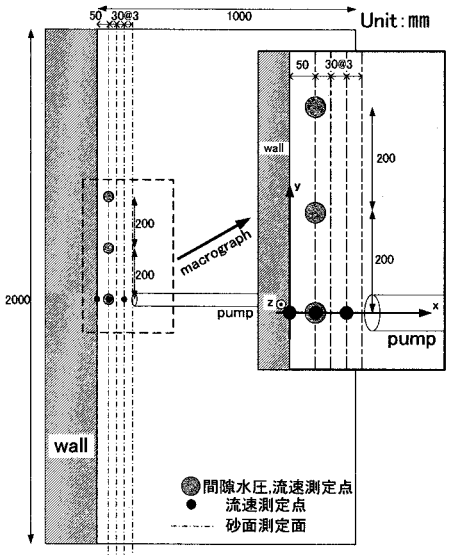


図-1 実験装置図（平面図）

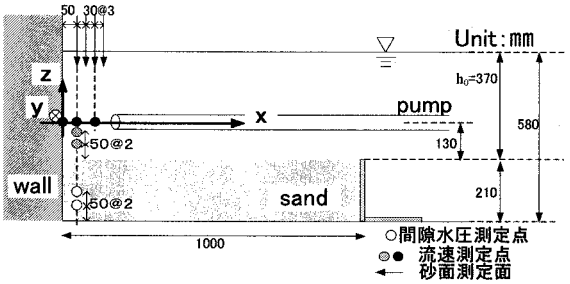


図-2 実験装置図（断面図）

写真-1 捨石模型

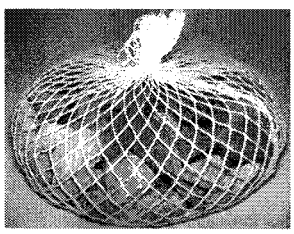


写真-2 FU-S模型

(2) 実験方法

実験を以下に示す手順で行った．すなわち，最初に砂面をならし，ジェット流を作用させる前の初期砂面形状を精密連続計測式水底形状測定器（正豊工学実験装置製作所製 MT-E.P.I.-2）を使用し，図-1，図-2に示す壁面に平行な4測線上（x=50mm，80mm，110mm，140mm，xは壁面からの水平距離）で連続計測した．なお，測線上のy座標（yは壁面に平行な水平軸）をポテンショメーター（共和電業製DTP-D-5KS）により計測した．

つぎに，ポンプを稼働させ，ジェット流を所定の時間作用させた．また，同時に地盤内部の水圧変動を計測するため，間隙水圧計（共和電業製 BPR-A-50KPS）を用いて間隙水圧を測定した．間隙水圧の測定点は，図-3に示す4点とした．その後，ジェット流を止め，ジェット流作用後の砂面を計測した．

また，洗掘時の流速分布を把握するため流速の計測を行った．測定位置は，図-1，図-2に示すように，間隙水圧の測定点直上で砂面から50mm，100mmの位置を2点ずつ計6点と，●で示す3つの測定点を中心に，各測定点まわりの流速分布を計測した．具体的には，壁面に平行な断面内の流速分布を図-4に示す13点で計測した．したがって，流速測定点は合計45点である．ただし，計測器の設置が困難な点については計測しなかった．流速の計測は，壁面上では2成分電磁流速計（ALEC電子社製 ACM200-A）で，残りの32点は3成分超音波ドップラー流速計（SonTek製 SP-16M00）で行った．ただしジェット流の流軸上の測定点でオーバーレンジとなるところでは1成分のプロペラ式流速計（KENEK製 VR-201V）を使用した．

(3) 実験条件

実験では，対策工法の有無と種類以外に，ジェット流の作用時間，噴出口の壁面からの距離，ジェット流の代表流速（噴出部の流速）を変化させ，合計15ケースの実験を行った．すなわち，船舶の入港・出港を想定したジェット流作用時間tを60sと180sの2種類，ジェット流噴出口と壁面の距離L

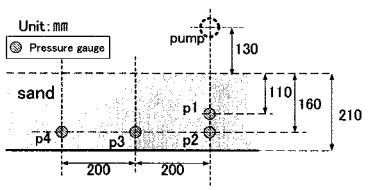


図-3 間隙水圧計配置図

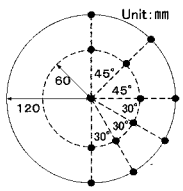


図-4 流速測定点

を 150mm と 450mm と 2 種類，ジェット流の流速 v を 2.0m/s，2.5m/s，3.0m/s の 3 種類変化させ，3 種類の被覆条件に対して実験を行った．なお，本実験は幾何縮尺 1/27 を想定し，フルードの相似則に基づいて条件の設定を行ったが，底質粒径は実験の制約上若干大きい．

3．実験結果と考察

(1) ジェット流近傍の流速分布

本研究で対象とする護岸前面の洗掘現象は，バウスラスターによるジェット流によって発生する砂面上の流動場に起因する．したがって，その機構を明らかにするためには，ジェット流による流動場の特性を検討する必要がある．そこでまず，ジェット流周辺の流速分布について以下に検討する．

本研究では，バウスラスターの代わりに水中ポンプによってジェット流を生起させている．このジェット流の流軸の延長線上におけるジェット流の噴出口から壁面までの流軸方向の流速 v_x の変化を図-5に示す．いずれのケースにおいても，壁面付近で流軸方向の流速は急激に減少していることがわかる．これは壁面が不透過のため，側方へ流向が変化するためである．また，噴出口が壁面に近いCase1，Case2，Case3では，噴出口から約0.05mの区間において，ほとんど流速は減衰していないことがわかる．これに対して壁面から離れた位置に噴出口があるCase4では，噴出口から離れるにしたがって徐々に流速は減少している．ただし，噴出口近辺での流速値がないため，噴出口近辺での変化については更なる検討が必要である．

つぎに，ジェット流が当たる壁面上（x=0）での yz 平面内の流速分布の計測結果を，図-6 に例示する．図より，ジェット流の流軸より浅い位置にある測定点（z>0）の流速ベクトルの大きさが，深い位置にある測定点（z<0）のそれらよりも大きいことがわかる．これは，流軸が自由水面よりも底面に近く，さらに底面では透水性が小さくなるのに対し，自由水面では流速が底面ほど強く境界で規定されないことなどによると考えられる．また，洗掘現象に特に直接的に寄与する砂面直上の流速について着目すると，Case2 と Case3 の砂面直上での鉛直方向流速はいずれも 0.4m/s とかなり大きい流速値となっ

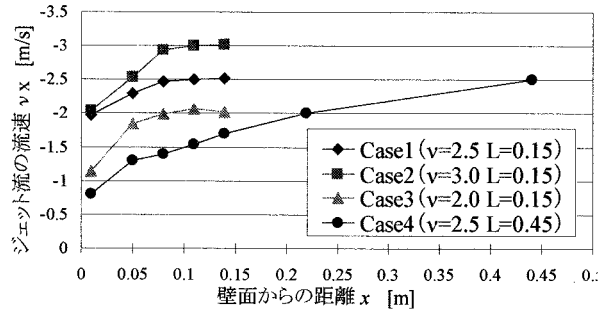
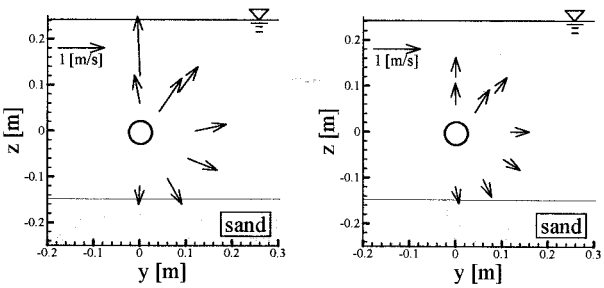
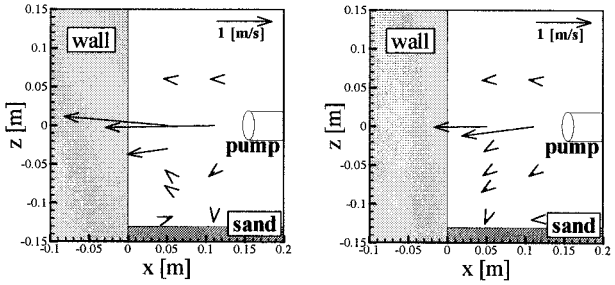


図-5 ジェット流の流軸上の流速分布



(a) Case2　(b) Case3

図-6　壁面上の流速分布



(a) Case1　(b) Case2

図-7　鉛直断面内の流速分布

ており，砂面上で流れがジェット流の上流方向（x 方向）に向きを変え，そこで大きなせん断力が砂面に生じて，砂を移動させ，局所洗掘を引き起こしていることが考えられる．

図-7 は，ジェット流の流軸上の xz 平面（y=0）における流速分布を例示したものである．なお，x<0 の領域は壁内に相当する．z=0 上の大きな流速ベクトルはジェット流の流軸上の流れである．それよりも上側の流速ベクトルは，ジェット流に沿った方向になっており，これらの図からは明瞭ではないが，その大きさもジェット流の流速の大きさに依存している．一方，ジェット流よりも下側の領域では少し乱れた場になっている．特に，図-7(a)に示す Case1 の場合，(x, z)=(0.05, -0.12)の位置において，x 方向に正の流速があることがわかる．これは，上述した砂面上での逆向きの流れであると思われる．

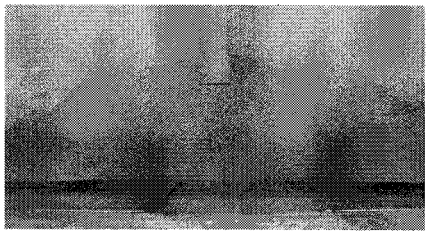


写真-3 Case1-Nの実験後の状況

写真-4 Case1-Sの実験後の状況

(2) 洗掘の状況

ジェット流によって生じる岸壁前面の局所洗掘の状況について検討する．写真-3は，Case1-Nのジェット流の作用後の様子を示したものである．ジェット流の流軸を中心に，ほぼ左右対称に洗掘が生じていることが確認できる．また，洗掘領域とそうでない領域との間に明瞭な境界線がある．このことは，洗掘領域の外縁では，砂移動が内向きであることを示唆する．すなわち，局所洗掘は壁面のごく近傍で生じており，急な勾配の斜面が形成され，その上部の砂が下方に落ちるような移動形態が考えられる．また，洗掘領域は壁面に近づくほどy方向に広がっていることがわかる．

写真-5 Case1-Fの実験前（FU設置直後）の状況

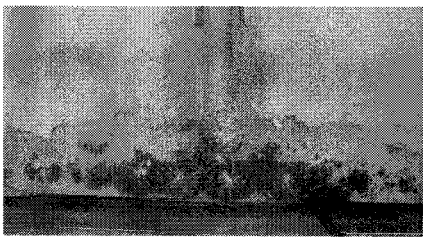
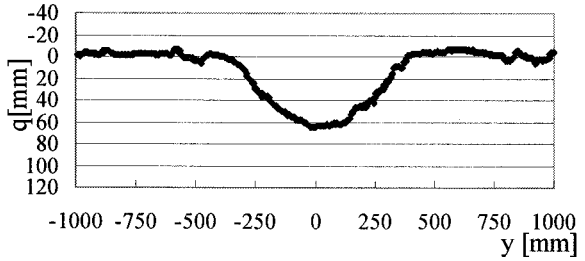
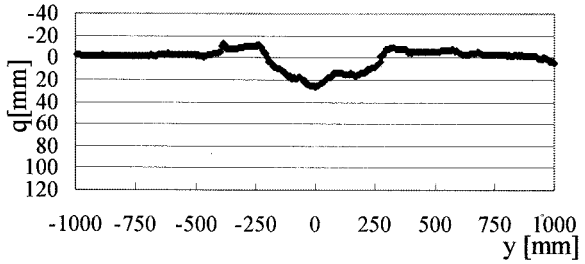


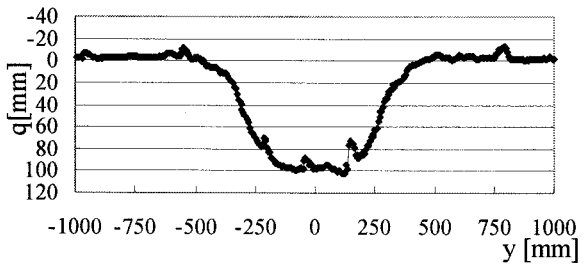
写真-6 Case1-Fの実験後の状況



(a)Case1-N（x=0.05m）



(b)Case1-N（x=0.14m）



(c) Case2-N（x=0.05m）

図-8 対策工の無い場合の地形変化

写真-4はCase1-Sのジェット流作用後の様子である．なお，捨石は設置後，さらに上から砂で覆った後にジェット流を作用させた．作用後，いくつかの捨石は壁方向に移動した．捨石周囲の砂がジェット流によって吸い出され，そこに捨石が落ちこんでいくために，このような結果になったと考えられる．よって，捨石の安定性に関しては，捨石自身のジェット流に対する安定性よりも，捨石周辺の砂が洗掘され，沈下することが問題になると考えられる．さらに，捨石を撤去する際に，部分的に3層以上になっている場所があることも確認された．当初2層で設置されていたものが，砂の吸い出しにともなって鉛直方向の沈下だけでなく，同時に水平方向にも移動するためであると考えられる．これらの結果より，局所洗掘の対策としては，空隙が大きい部材は必ずしも適していないと考えられる．

一方，FU-Sを被覆したCase1-Fのジェット流作用前後の様子を写真-5と写真-6に示す．FU-Sについても捨石と同様に，設置後砂で覆った．まず，写真-5より，FU-Sの場合，その可撓性により密に設置できていることがわかる．すなわち，被覆材間の空隙が小さくできる．このFU-S層上に砂を覆い，ジェット流を作用させた後の写真-6より，捨石の場合と比較して，安定性に差異が認められる．すなわち，捨石の場合，個々の捨石の位置の変化が確認されたが，FU-Sの場合，ジェット流作用前後でほとんど位置の変化がないことがわかる．

(3) 洗掘深の特性

つぎに洗掘深qについて検討する．なお，実験の都合上，各ケースの初期地形が完全に同一の状態にそろえることが困難であったため，本研究では，初期地形と最終地形の差に着目して検討することとした．すなわち，洗掘深qを，ジェット流の作用前後の砂面高の変化量として定義し，各ケースの各測線毎に，y方向に5mm間隔で砂面高の測定値を求め，その砂面高の差として洗掘深qを定義した．

(a) 対策工の無い場合

まず，被覆材を使用しない場合の砂面形状の変化を示す．図-8 に対策工の無い場合の洗掘深 q を例示する．基本的には，洗掘深 q は y=0 付近で最も大きくなり，壁面から離れるにしたがって小さくなる傾向がある．また，ジェット流の流速が速くなると q は大きくなる．図示していないが，ジェット流の噴出口と壁面との距離を増大させた場合，洗掘深に有意な差は認められないが，全般的に洗掘領域が広くなることが確認された．さらに，ジェット流の作用時間 t を増加させた場合，洗掘深 q が明瞭に増大した．したがって本実験で対象とした t=60s と

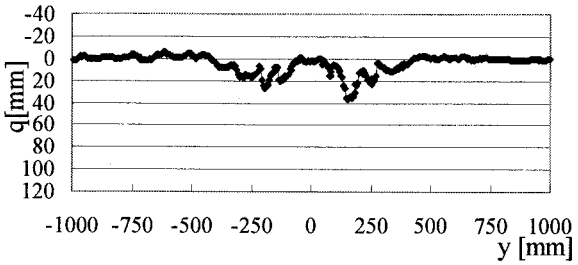


図-9 Case1-S（x=0.05m）の砂面変化

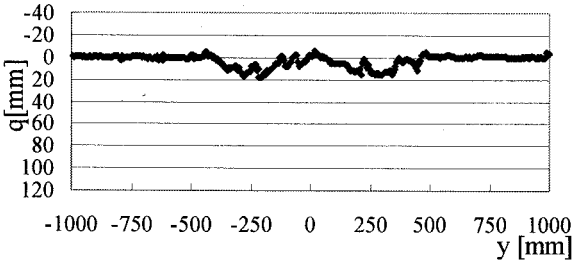


図-10 Case1-F（x=0.05m）の砂面変化

t=180s のケースでは平衡な状態にはなっておらず，まだ洗掘は進行しうるといえる．

(b) 対策工のある場合

つぎに，洗掘に対する対策工として使用した捨石と FU-S の効果について検討する．図-9 と図-10 はそれぞれ Case1-S と Case1-F の場合の x=0.05m での洗掘深 q の分布を示したものである．同図より，被覆工のある場合，ジェット流作用後の地形に細かい変動が認められる．これは，ジェット流作用後に露出した被覆材を計測器が検出したためである．しかしながら，被覆材の間のわずかな隙間に局所的に深い洗掘が生じていることがわかる．そして，図-9 と図-10 を比較すると，その洗掘深 q は捨石の方が大きくなっている．これは，捨石の方が被覆材の空隙が大きくなり，そこからの吸い出しが FU-S の場合に比べて顕著に生じたことによる．

これらの洗掘現象を2次元的に評価するために，計測線ごとに洗掘深qを積分し，これを洗掘量Q (mm^2) とした．図-11と図-12にそれぞれCase2とCase5の洗掘量Qの変化特性を示す．

被覆材を使用していない場合に着目すると，ジェット流の流速が大きいCase2-Nよりもジェット流の作用時間の長いCase5-Nのほうが洗掘量は大きい．また，全てのケースにおいて，捨石を被覆したときよりもFU-Sを被覆したときの方が洗掘量は小さくなった．これは，既述したように，FU-Sの方が被覆材間の間隙が小さく，下層の砂の吸い出しが生じにくいために，捨石の場合のように吸い出しにともなう沈下が生じにくいことによる．この観点からは，局所洗掘に対する対策工として，捨石で砂面を被覆するよりもFU-Sで被覆する方が効果的であると言える．

(4) 洗掘と砂層内の間隙水圧

中村ら[3]は，陸上への遡上津波による構造物周辺の局所洗掘には，地盤内の応力状態が影響を及ぼすことを指摘している．本研究でも，ジェット流の作用によって進行する洗掘に対して砂層内の間隙水圧がどのように寄与しているのかについて検討することとした．

図-13はCase1-Nの間隙水圧pの時間変化を示したものである．ジェット流作用直後のt=0から間隙水圧が上昇し，ジェット流に近い計測点ほど間隙水圧が大きくなっていることがわかる．各点の間隙水圧の変動に着目すると以下のような特性がある．まず，ジェット流の流軸直下のp1とp2はジェット流の作用後に大きく増加する．これは，静止状態の静水圧からジェット流による流動成分にともなう動圧による上昇分と壁面にあたったジェット流が上昇流も生じさせ，局所的に水面が上昇するので，それにともなう静水圧の上昇分が加わったことによると考えられる．流れの作用直後に上昇した間隙水圧は徐々に低下する．一方，p3とp4では，p1とp2のような急激な間隙水圧の上昇は生じない．これらの計測点の直上での流れがそれほど大きくないことによると考えられる．

また，t=40s付近でp1とp2の大きさが逆転しており，この現象は洗掘深qが比較的大きなケースでも確認された．これは，洗掘深qが大きくなるとp1の間隙水圧計が露出，あるいは砂面表層に非常に接近してしまうために，水圧のみになってしまうのに対し，p2では水圧に加え，砂層内に発生した間隙水圧が残っていることによると考えられる．また，p1とp2の逆転が生じるような状況では，局所的に液状化が発生している可能性も指摘できる．液状化の発生は，より洗掘が生じやすい状況になるので，岸壁前面での局所洗掘に対しても，局所的な液状化がそれ

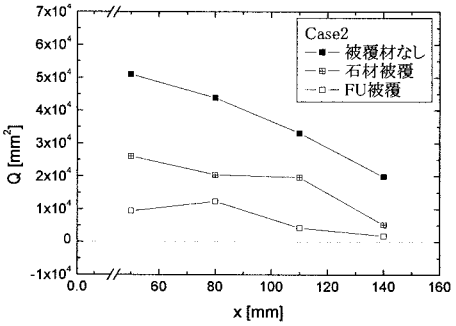


図-11 Case2 の洗掘量の変化

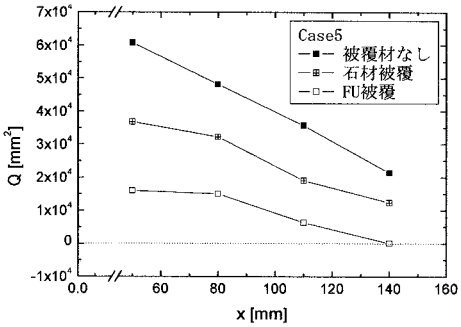


図-12 Case5 の洗掘量の変化

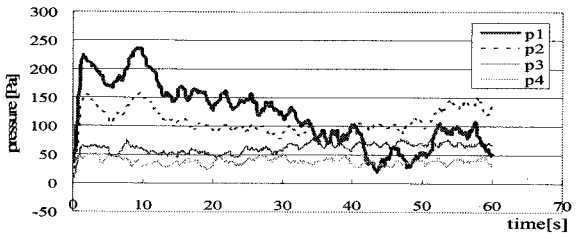


図-13 Case1-Nの間隙水圧の時間変化

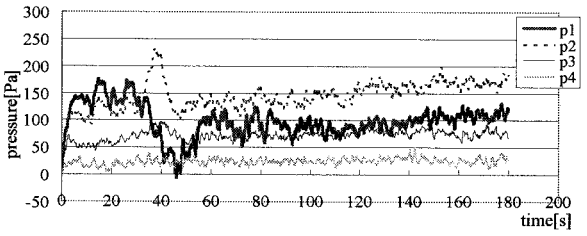


図-14 Case5-N の間隙水圧の時間変化

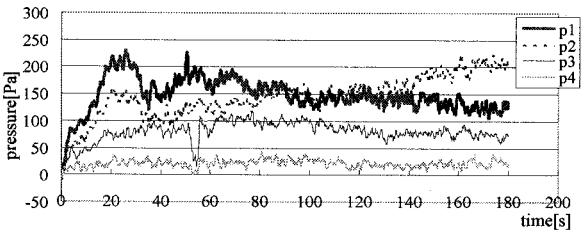


図-15 Case5-S の間隙水圧の時間変化

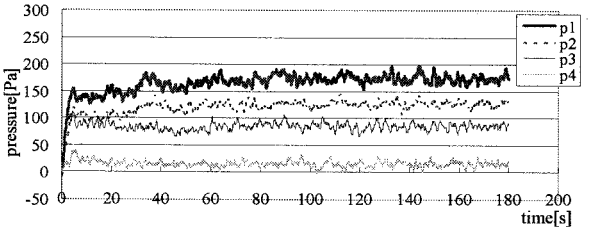


図-16 Case5-Fの間隙水圧の時間変化

を促進させている可能性も指摘できる．さらに時間を経ると，p2が上昇すると共にp1も再上昇する傾向がある．これには，記述した洗掘の進展状況が関係していると推察される．すなわち，局所洗掘は岸壁前面の限られた範囲で発生するが，洗掘が進むと洗掘領域外縁から安息角を満たすように砂が崩れ落ち，それが間隙水圧を増大させている可能性がある．地形変化が落ち着いてくると，崩れ落ちる砂も減ってくるのでCase5-Nに対する図-14からも認められるように，p2の時間変化も落ち着いてくると考えられる．

つぎに，間隙水圧が定常になる傾向が確認され，洗掘深qも大きいCase5に着目し，被覆材が間隙水圧の変動に及ぼす効果について考察する．Case5-SとCase5-Fの間隙水圧の時間変化を，図-15と図-16に示す．Case5-Sでは，Case5-Nと同様にp1とp2はジェット流作用後に大きく上昇し，その後低下する傾向が確認できる．また，p1とp2の逆転が生じる．Case5-Sでは被覆材があるため，計測中の間隙水圧計の露出は確認できていないが，圧力の逆転も生じていることから，間隙水圧計の露出か局所的な液状化が生じたと考えられる．ただし，逆転が生じるまでに要する時間はCase5-Nに比べてCase5-Sのほうがかなり長く，被覆材のないCase5-Nに比べ，捨石で被覆したCase5-Sは洗掘が緩やかに進行し，圧力の逆転現象の発生にも時間を要すると考えられる．

Case5-Fの場合，p1とp2の時間変化に，これまでのようなジェット流作用直後の間隙水圧の上昇が認められない．これは，FU-Sがフィルター層を形成するために，砂面上の大きな流速変動に対して緩衝効果を発揮していることが考えられる．その後の間隙水圧も安定しており，間隙水圧の逆転も生じていないため，液状化の発生もないものと推察される．このため，洗掘があまり発生しなかったと考えられる．

4．結論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する．

1) 洗掘対策として被覆材を使用する場合，洗掘量の比較から捨石よりもFU-Sの方が洗掘防止効果が大きいことが明らかとなった．
2) 洗掘は壁面の近くで発生し，それによって生じた局所的な急斜面に対し，砂が安息角を満たすように洗掘領域の外縁から内向きに落ち込んで洗掘域が拡大していくことが推察された．
3) 捨石による被覆の場合，被覆材間の空隙が大きくなり，そこからの吸い出しによって洗掘が進行するとともに，捨石の移動・沈下もFU-Sに比べて顕著に生じ，被覆工法としてはFU-Sの優位性が認められた．
4) ジェット流が作用すると，流軸下部の砂層内の間隙水圧が上昇し，その後間隙水圧は消散する．また，流軸下部の間隙水圧は，洗掘の進行や局所的な液状化などの条件によっては深さ方向で大小関係の逆転が生じる．
5) 捨石による被覆工法を行った場合，間隙水圧は被覆材が無い場合と同様の特性を示す．一方，FU-Sによる被覆を行った場合，間隙水圧はほぼ一定で安定しており，局所的な液状化なども生じていないと考えられ，間隙水圧の観点からもFU-Sによる洗掘対策の有用性が指摘できる．

参考文献

1) 川村隆文・渡辺貴之・竹腰善久・前田正二・山口一：キャビテーションを伴うプロペラ周り流れの数値シミュレーション，日本造船学会論文集，第 195 号，pp. 211-219，2004.
2) 久保田真一・松本朗・半沢稔・篠村幸廣・尾池宣佳・池谷毅・下迫健一郎：袋型根固め材を用いた混成堤マウンド被覆材の耐波設計法，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 776-780，2003.
3) 中村友昭・倉光泰樹・水谷法美：遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘に関する研究，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 856-860，2007.