

ジェット流によって発生する過剰間隙水圧に及ぼす地盤条件の影響 Influence of soil properties on excess pore water pressure

山口 敦志¹, 前田 健一², 松田 達也³, 齊藤 啓⁴, 李 兆卿¹

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・社会工学専攻・cko18563@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・高度防災工学センター・都市社会工学科

3 豊橋技術科学大学・安全安心地域共創リサーチセンター・建築・都市システム学系

4 日本工営株式会社

概 要

本研究では津波等によって発生する構造物背後の越流に伴う落下水塊による地盤作用外力に焦点をあて、地盤の洗掘現象について考察した。考察にあたり、越流外力を単純化して模擬したジェット流を地盤に鉛直に作用させた実験を行い、地盤の有無や地盤種類および密度等の条件を変えた際の洗掘現象と間隙水圧の変化について検討した。まず、地盤を堆積させず貯水中にジェット流を作用させた場合、ジェット流直下において水圧の変動はあまり見られないことがわかった。次に、飽和状態で地盤堆積させた場合の間隙水圧挙動を調べたところ、地盤材料や相対密度によっては間隙水圧の変動に違いが生じることがわかった。特に、緩く堆積させた砂質地盤では、過剰間隙水圧の発生により液状化に近い現象が発生し、洗掘を助長していることが明らかとなり、過剰間隙水圧が発生する要因を分析した結果を本稿に示す。

キーワード：越流，洗掘，過剰間隙水圧

1. はじめに

津波による洗掘現象は、大規模な地形変化や海岸構造物の支持力低下をもたらす、甚大な被害を発生させることがある。例えば、2011年3月に発生した東日本大震災では、地震による被害に加え、同時に発生した津波による影響によって被害を拡大させた。この災害による各地での防波堤の被害報告から、その被災状況が岸壁等の係留施設や防潮堤の被害規模および背後地域への浸水に大いに影響していることがわかった。そのため、津波の作用による防波堤や防潮堤の破壊メカニズムの解明を早急に考えていく必要がある。

東日本大震災の津波による被害規模について、支持地盤の洗掘に伴う被害が大きく取り上げられている。その中でも、特に新たな課題である越流洗掘型に着目すると、八戸港八太郎防波堤では防波堤を越流した津波に伴い、防波堤背後地盤で洗掘が発生した(図-1)。これにより、被害規模が大きいところで深さ10m程度の洗掘した箇所もみられた¹⁾。このような洗掘現象については、地盤表面を移動する流体速度と土粒子の重量、浮力等のつり合いから判定する掃流力による検討が一般的である^{2), 3)}。しかし、近年の著者らの研究⁴⁾によると、地盤表面に流体力が载荷した際、地盤内部に過剰間隙水圧が発生し、地盤表層に液状化(流動化)に似た応力状態となる層が発生することがわかってきている。既往の研究では小型移動床水路に防波堤模

型を設置し、越流した水塊による洗掘現象について検討を行ったが、外力・現象が複雑で実現象に比べ応力レベルが著しく小さい等の問題があった。

そこで本研究では、津波等によって発生する構造物背後の越流に伴う落下水塊による地盤作用外力(以降、ジェット流と称す)に焦点をあて、越流による落下水塊を模擬した新たな実験装置を用いて実験を行った⁵⁾。この装置により、応力レベルを大きくするとともに、外力条件を単純化し、初期の衝撃的载荷と水塊の継続作用による洗掘現象について、地盤の有無や堆積地盤の種類および密度等の条件を変えた際の洗掘現象と地盤内部の間隙水圧挙動に与える影響に着目して実験を行った。

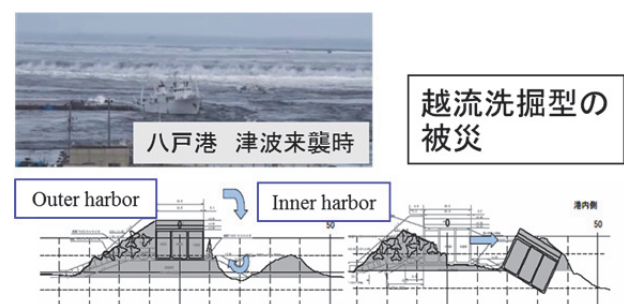


図-1 八戸港の防波堤被害⁶⁾

2. 実験概要

本研究では、図-2 (a)に示すような実験装置を用いた。本装置は、高さ $H=1,000\text{mm}$ 、半径 $R=400\text{mm}$ の半円筒の実験土槽で、 $h_s=700\text{mm}$ の高さまで水中落下法で地盤を製作し、これを背後地盤として想定した。地盤面とノズル管間は水で満たした。土槽上面に設置した半円筒のノズル管： $\phi=50\text{mm}$ （地盤面とノズル管のクリアランス： $h_w=300\text{mm}$ ）より、津波による防波堤背後地盤の越流を模擬するために毎分 0.12m^3 の水中ポンプを用いて、流入速度 $v=2.06\text{m/s}$ で一定速度としたジェット流を発生させて地盤に約3分間载荷した。堆積地盤内の間隙水圧の変化を計測するために、実験土槽表面の亚克力壁面に小型間隙水圧計(SSK製)を図-2 (b) のように設置した。また、実験観察のためにビデオカメラと高速度カメラにより記録し、実験の様子を観察した。

本研究で行った実験ケースを表-1に示す。堆積地盤の有無による水の流れや水圧変化を調べるため、地盤堆積させた状態と水のみによる場合を行った。地盤堆積を有した全ケースにおいて地盤高 $h_s=700\text{mm}$ で、地盤材料を飽和状態で堆積させた。外力条件としてジェット流の流量も一定とした。同地盤材料でも相対密度を変化させて、洗掘の進行と地盤内の過剰間隙水圧の変化を調べ、洗掘メカニズムの解明を試みた。なお、本稿では相対密度 $D_r=40, 55, 70\%$ をそれぞれ緩・中密・密と称す。実験結果の再現性をとるために、豊浦砂・緩、中密、密では2ケース、水のみについては4ケース行った。

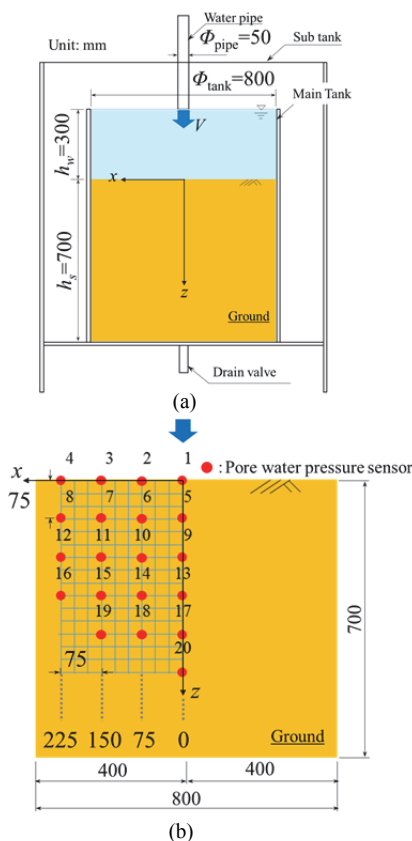


図-2 実験装置概略図：(a) 断面図，(b) 間隙水圧計の設置位置

表-1 実験ケース

地盤堆積	case	地盤材料	相対密度 D_r (%)	
あり	case1	碎石	—	
	case2,3	豊浦砂	40	
	case4,5	豊浦砂	70	
	case6,7	豊浦砂	55	
	case8	まさ土	40	
	case9	まさ土	70	
	case10	珪砂2号	40	
	case11	珪砂2号	70	
	なし (水のみ)	case12-15	—	—

3. 実験結果および考察

3.1 水のみ供試体におけるジェット流れの挙動

まず、地盤材料を用いず実験土槽内を水で満たした状態でジェット流を作用させた。水の場合、断面変化はないが、鉛直下方向へ進行したジェット流は底板によって跳ね返り、その流れが鉛直上方向へ進行している様子が確認できた（図-3）。断面から観察される水の流れからはジェット流直下以外に水の動きはほとんどみられなかった。

また、図-4に示す幅方向 $x=0\text{mm}$ 、 150mm の列に設置した間隙水圧計 (CH1, 9, 17 と CH3, 11, 19) から過剰間隙水圧の挙動を調べたところ、ジェット流直下の $x=0\text{mm}$ において、約 500Pa 以下の水圧変化がみられる一方、幅方向 $x=150\text{mm}$ ではほとんど変化がなかった。ジェット流直下でのみ水圧変動から、鉛直に作用する比較的高速な流れは土槽全体への拡散はほとんどなく、主に深さ方向に鉛直に作用することが考えられる。さらに、ジェット流の継続作用による過剰間隙水圧の経時変化から、水のみ

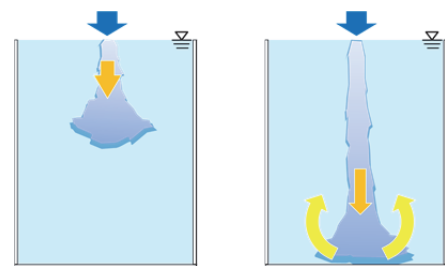


図-3 ジェット流の作用による落水塊の挙動をイメージ：ジェット流の底板での跳ね返りと鉛直上方向へ進行

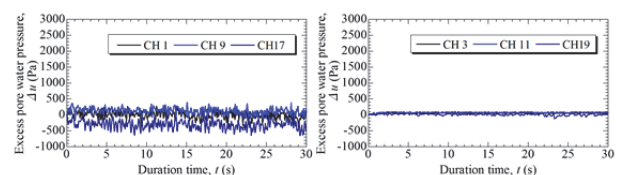


図-4 供試体が水のみの場合の水圧挙動：(a) 幅方向中央 $x=0\text{mm}$ ，(b) $x=150\text{mm}$

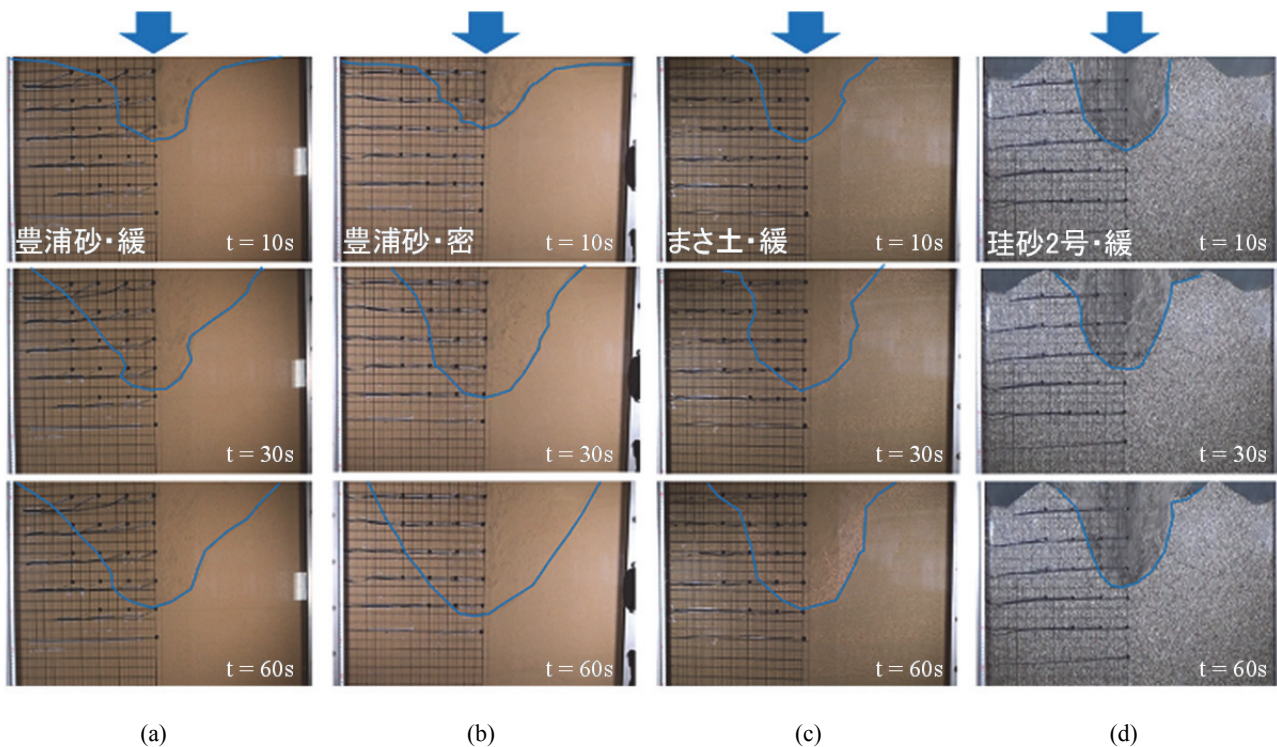


図-5 洗掘の進行の様子：(a) 豊浦砂・緩, (b) 豊浦砂・密, (c) まさ土・緩, (d) 珪砂2号・緩

の場合では落下水塊の衝撃に起因した著しい水圧変化は発生しないと考えられる。この結果を踏まえたうえで、次にジェット流が堆積地盤に作用する場合について考察していく。

3.2 地盤の進行的な洗掘挙動

各地盤材料にジェット流を作用させた時刻歴の洗掘の進行を図-5 に示す。すべての地盤材料で 60s 以降は洗掘が進行しない状態（限界状態）であったため、実験開始から 60s までにおける洗掘の進行について述べる。以下に相対密度や地盤材料の違いによる検討を行った。

(a) 豊浦砂における相対密度の違いによる洗掘挙動

豊浦砂・緩と密の結果について比較する。なお、豊浦砂においては各相対密度でそれぞれ2ケースずつ行い、実験データの再現性がとれていることを確認した。そこで、各1ケースずつの洗掘の進行の様子を比較する。

まず、豊浦砂・緩では、実験開始とともに鉛直方向へ洗掘が進行し、約 20s 後から水平方向の土を削る現象が見られた。ジェット流の衝撃に伴い、堆積地盤の表層が上下に移動するような様子も観察できた。また、露出した洗掘孔側面が崩れるようにして洗掘孔底に堆積する様子も確認できた。豊浦砂・密では緩に対して鉛直方向への進行は遅いが、水平方向の洗掘を伴いながら進行していることがわかった。緩な地盤では洗掘孔側面が不規則に崩れたが、洗掘の進行は幅方向中央 $x=0\text{mm}$ に左右対称な形状であった。

実験開始から 20s までは緩になるほど鉛直方向への洗掘が進行されているが、20s 以降は密になるほど洗掘の進

行が速くなっており、洗掘幅を見ても密の方が大きくなっている。緩な地盤では洗掘孔側面の土が崩れていき、洗掘孔底に堆積するため、洗掘の進行が遅くなったと考えられる。洗掘の進行は深度方向が約 300mm のところで収束し、洗掘幅は実験土槽の最大幅まで到達していた。この最終的な洗掘形状・最大洗掘深は両相対密度でほぼ同様であり、越流の洗掘の進行では地盤材料に起因している可能性がある。

(b) 地盤材料の違いによる洗掘挙動

次に、各地盤材料について相対密度が緩 ($D_r=40\%$) の状態における洗掘の進行の様子を比較する。

まさ土の場合、洗掘の進行が収束していくにつれて土粒子が分粒し、細粒分は巻き上がったジェット流とともに流出し、粗粒分が洗掘孔底に堆積した。洗掘孔側面は崩れるよりもジェット流の流れで削られるようにして幅方向への進行がみられた。また、洗掘の進行では、側面の進行が左右非対称に洗掘されていった。地盤内で有効応力や粘着力が小さいところから洗掘されることが考えられ、土粒子内空隙や粒度・粒径で結果に影響を与えることが予想される。

珪砂2号では、洗掘の進行はジェット流が堆積地盤に当たった跳ね返りにより土粒子がほぼ垂直に上がり、洗掘孔周辺の表層に落掘の形成や直接洗掘孔底に堆積した。一方、鉛直方向に対して、水平方向への進行は見られなかった。実験開始約 10s から洗掘形状の変化はほとんど見られず、早期の段階で最大洗掘深まで到達した。表層に堆積された土粒子も時間の経過とともに洗掘孔側面へ滑るようにして孔底に堆積しており、最大洗掘深はほかの地盤材料より

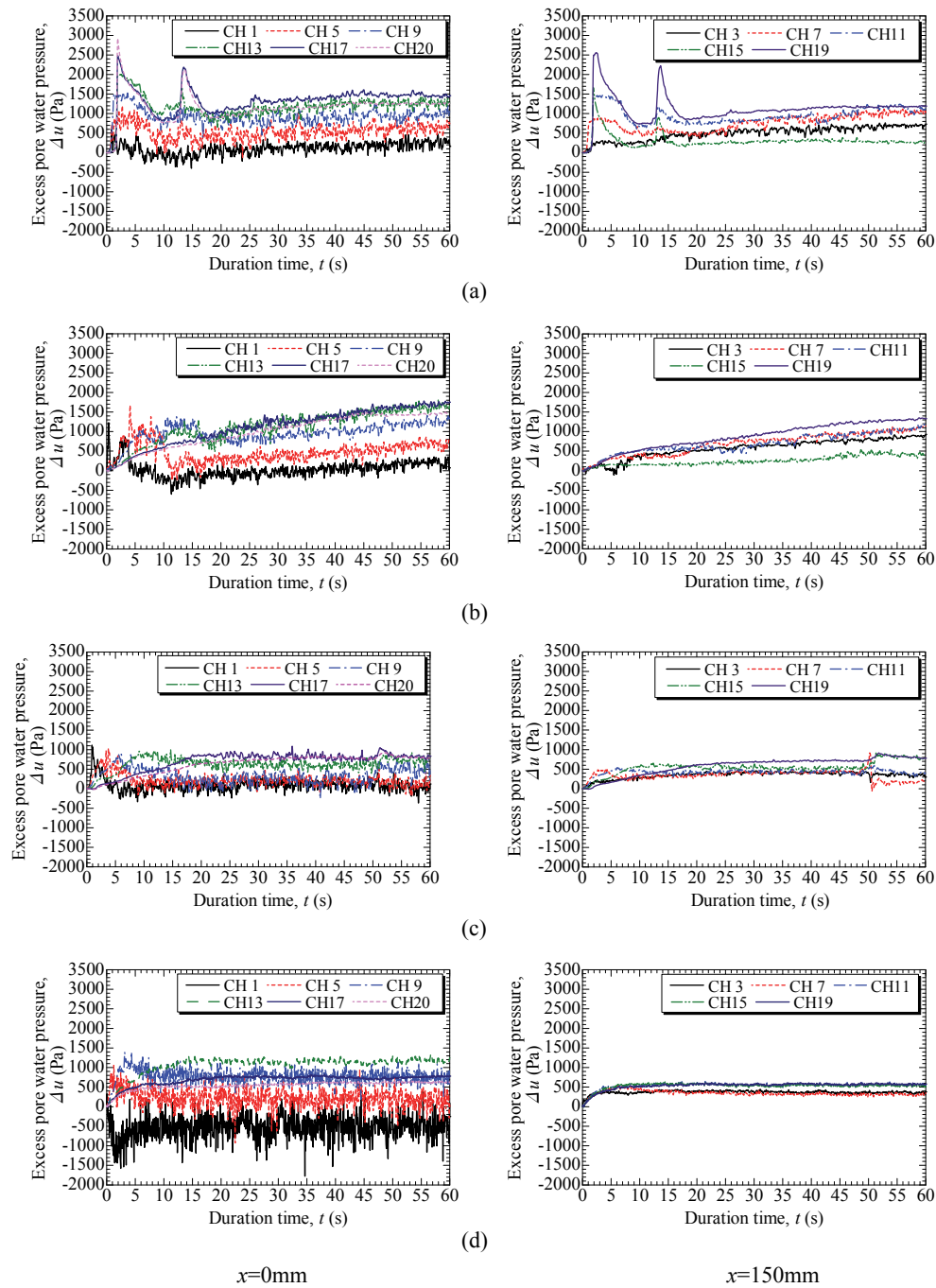


図-6 各地盤材料における過剰間隙水圧の経時変化：(a) 豊浦砂・緩、(b) 豊浦砂・密、(c) まさ土・緩、(d) 珪砂2号・緩、(左列) 幅方向 $x=0\text{mm}$ 、(右列) 幅方向 $x=150\text{mm}$

も小さかった。

この結果から、地盤材料の違いにより洗掘進行の過程や洗掘形状が異なることがわかった。そこで、地盤内部の応力変化について検討を試みた。

3.3 洗掘の進行時における地盤内の水圧応答

各地盤条件の、0-60sにおける幅方向中央 $x=0\text{mm}$ と $x=150\text{mm}$ の列に設置した間隙水圧計の計測値より算出した過剰間隙水圧の経時変化を図-6に示す。豊浦砂・緩の場合、約1.0-3.0sに尖った波形の応答が発生しており、深層部(CH17, 20)ほど、過剰間隙水圧が著しく増大して

いることがわかった。緩では、幅方向 $x=150\text{mm}$ においても、深層部(CH19)で同様の圧力上昇をしており、広範囲に影響を与えていることがわかる。ジェット流の作用により、深層部の体積圧縮およびせん断変形が最大となり、水圧増加したと考えられる。一方、密においては深層部の過剰間隙水圧に大きな挙動はみられず、時間経過とともに緩やかな上昇をしていることがわかった。落下水塊による洗掘は地盤条件により、表層部だけでなく深層部で過剰間隙水圧が増加することで土粒子骨格間の力が弱まり、支持力の低下を助長することが考えられる。この現象には落下水塊の衝撃に加え、地盤構成粒子の自重のほか、地盤の透

水性，土の等方圧縮やせん断変形の影響が考えられる。

まさ土では，過剰間隙水圧は深層部で 20s まで緩やかに上昇し，それ以降は約 800Pa で一定になっている。表層に対して深層部の水圧の変化は見られなかった。相対密度は緩の状態に設定したが，水圧の挙動は豊浦砂・密に酷似していると思われる。豊浦砂の緩の場合とは異なり，深層部で局所的な水圧計の応答は見られなかった。まさ土の方が粒度分布が広く，深層部での土粒子の移動が小さいことから，土のせん断作用の差異によるものと思われる。

珪砂 2 号では，地盤高から深さ $z=300\text{mm}$ 以降になると水圧の変化はなく，約 500Pa で一定であった。幅方向 $x=150\text{mm}$ ではほとんど水圧の変化が見られないことから，ジェット流による落下水塊が与える堆積地盤の影響範囲は豊浦砂のような砂質土地盤と比較すると小さいと思われる。珪砂 2 号のような砂質土と比較して透水性の高い地盤材料では，幅方向中央 $x=0\text{mm}$ のジェット流直下のみ水圧変化が生じ，それ以外の水圧の変化はほとんどない。ジェット流の落下水塊の作用による衝撃を砕石のような礫が抑制する役割を担い，高い透水性能により過剰間隙水圧の消散を促進させているものと思われる。

3.4 洗掘の限界状態における地盤内の水圧応答

地盤材料の中で，特に豊浦砂・緩では著しい水圧上昇がみられた。そこで，洗掘進行の限界状態以降地盤内の水圧応答を調べるため，実験開始から 90s までジェット流を継続作用させたときの水圧の挙動を図-7 に示す。実験開始直後の尖った波形では，どの水圧計も同等の応答を示していたが，洗掘形状が収束し始める 20s から最深部(CH20)よりも CH17, 18 の方が水圧が高い状態を保持していることがわかる。豊浦砂の最大洗掘深は，相対密度によらず約 300mm で，この深さは CH17 の位置に近く，水圧計は露出していることがわかった。CH20 はまだ地盤内であったことから，落下水塊により生じた洗掘孔の底部が反力板のような役割を担い，底部に水塊が当たった衝撃や跳ね返りにより，その付近に設置された CH17 や CH18 の水圧計がそれに応答して圧力上昇したと考えられる。

また，実験開始から 90s までの継続作用において，幅方向 $x=75\text{mm}$ に設置した CH18 が最も高い値を示している。ジェット流による落下水塊の衝撃により，堆積地盤では等方圧縮とせん断変形の作用が発生すると予想される。本実験で CH18 が最も高い水圧を応答したことから，深層部において等方圧縮よりもせん断変形の方が水圧上昇に大きく影響を与えることが考えられる(図-8)。一方，深層部に水圧計を設置した中で，CH19 が最も水圧が小さいことを鑑みると，せん断変形を与える影響範囲を調べるとともに地盤内の土粒子の移動を考慮する必要がある。

3.5 洗掘深と過剰間隙水圧分布

図-9 に幅方向中央 $x=0\text{mm}$ での 0-20s までの時間経過における深度方向と過剰間隙水圧の関係について各地盤材料・条件の結果を示す。なお，水圧分布の縦軸は深度

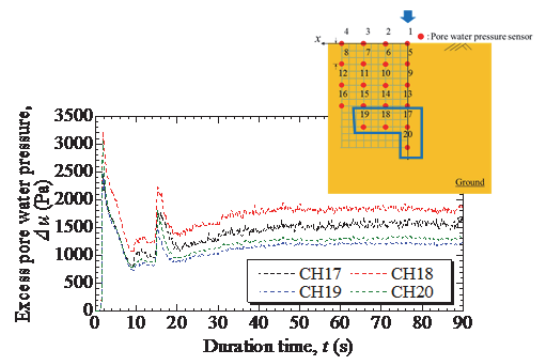


図-7 深層部 (CH17-20) における過剰間隙水圧の経時変化

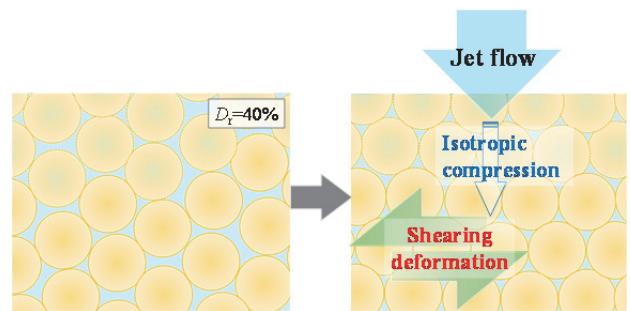


図-8 ジェット流作用時の地盤内における等方圧縮およびせん断変形の影響のイメージ図

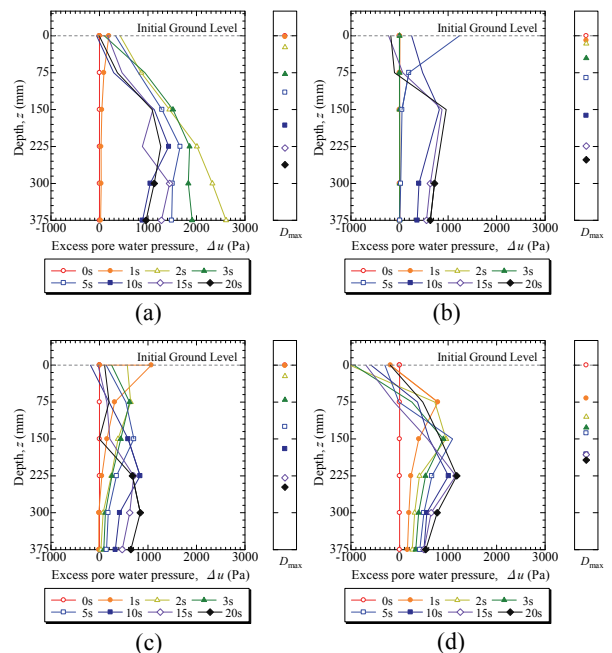


図-9 幅方向中央 $x=0\text{mm}$ の各地盤材料の水圧分布と時刻歴における最大洗掘深 (D_{max}): (a) 豊浦砂・緩, (b) 豊浦砂・密, (c) まさ土・緩, (d) 珪砂2号・緩

方向で水圧計の設置位置の目盛で記し，洗掘の進行により時刻歴で各位置の水圧計が地盤から露出した場合はドットを非表示にしている。各水圧分布の右側に時刻歴における最大洗掘深 D_{max} を示している。まず，豊浦砂・緩の場合，水圧分布で 1-2s の時に急激な水圧上昇がみられ，時刻歴の最大洗掘深からも 1-2s の洗掘の進行が加速的に上

がっていることから、洗掘の進行とともに地盤内の応力が上がることが考えられる。また、水圧は時間の経過で上昇と消散が繰り返されていることがわかり、この影響により、見かけの洗掘の進行よりも早い段階で深層地盤の支持力やせん断強度が低下する可能性がある。

密では緩のような著しい水圧の上昇はみられなかったが、時間経過に伴い、深さ $z=150\text{mm}$ 以降で徐々に水圧上昇していることが確認できた。これは洗掘の進行により地盤表層から計測器までの距離が短くなり、落下水塊の影響が出始めたことに起因していると考えられる。

水圧分布では勾配が大きくなるほど、深度方向の圧力上昇が大きいことがいえる。豊浦砂・緩、密の水圧分布より 2s の時の動水勾配を比較すると、緩の方が動水勾配が大きく、上向き浸透が発生していることが考えられる。洗掘の進行よりも先に地盤内部で液状化に似た状態を引き起こす可能性が考えられる。

まさ土では、水圧の深度分布では豊浦砂・密と同様、3s のとき表層で水圧が上昇した。また、深さ $z=375\text{mm}$ (CH20) まで洗掘には至っていないが、地盤内部では時間の経過とともに水圧が上昇していることがわかった。時間経過に伴い、深度方向に水圧上昇が移動し、10-20s で深さ $z=225\text{mm}$ で圧力が蓄積している。洗掘速度は 15s から減少しているが、20s における洗掘深よりも深いところで水圧の上昇がみられることから、洗掘の進行により圧力が伝播し、さらに見かけの洗掘到達よりも早く伝播している可能性がある。まさ土の水圧分布は豊浦砂・密に類似しているが、深度方向へいくほど時間経過に伴う水圧の挙動の変化は大きい。異なる粒径や透水の性質によって外力が与えられた時の堆積地盤の支持力やせん断強度の低下が懸念される。

珪砂 2 号・緩の場合、深さ $z=225\text{mm}$ に設置した水圧計が最も高く応答している。また、洗掘の進行で 10s において CH1, 5, 9 の水圧計が露出していることから、洗掘の進行により落下水塊の到達距離が短くなり、水圧上昇の要因となったと考えられる。時刻歴の最大洗掘深より 10s から水圧の上昇はほぼ収束しており、時刻歴の最大洗掘深においても 10-20s の洗掘速度が急激に減少していることから、最大洗掘深の到達と水圧上昇の収束がほぼ同等であると思われる。

4. 結言

本研究では、津波の作用による地盤の洗掘の進行と地盤内部の応力変化に着目した洗掘現象のメカニズムについて検討してきた。特に、地盤内部に発生する過剰間隙水圧の変動が洗掘現象に及ぼす影響を検討した。

津波が海岸構造物を越波する際の背後地盤の洗掘について着目した。越流水塊を模擬した実験装置を開発し、実験規模を大きく且つ外力の単純化をはかることで越流洗掘の現象解明を試みた。まず、地盤の有無で実験を行い水圧挙動を比較した結果、ジェット流直下において地盤が無い場合水圧の変動はあまり見られなかった。一方、地盤が

有る場合、見かけの洗掘の進行の違いに対して、異なる地盤材料や相対密度で地盤内の水圧の変動が大きく異なることがわかった。この結果から、間隙水圧により液状化に近い現象が発生し洗掘を助長していることが明らかとなった。本実験から、この過剰間隙水圧の発生は透水性や試料の等方圧縮、せん断による変形を及ぼす剛性に起因していると考えられる。また、地盤材料や条件の違いで異なる特徴的な波形の発生がみられ、これらはある基本波形に則していると考えられる。地盤条件を考慮した落下水塊による洗掘メカニズムを解明することで支持地盤の適切な材料選択や新たな対策工法を打ち出せると考えられ、今後の津波による洗掘現象のメカニズムを解明する手がかりになると思われる。

本実験の結果から、洗掘の進行や地盤内応力変動を踏まえると、越流洗掘においては粒径が大きく透水係数が高い珪砂 2 号が相対密度に起因することなく有効な地盤材料であると思われる。しかし、既往の研究⁷⁾では、ケーソンと支持地盤の間にある捨石マウンドより浸透破壊や支持力低下などの複合的な破壊が発生することも分かっており、津波作用を受ける防波堤の機能を確保するには複合的な視点からの機能評価と補強技術の選択が必要と考えられ、今後の課題とする。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究 (B)23360203 および研究スタート支援 26889035、特別研究員奨励金(24・9200) の助成を受けており、深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高橋重雄他：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No.1231, pp.1-200, 2011.
- 2) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(Ⅰ) 限界掃流力の流体力学的研究、土木学会論文集、第 41 号、pp. 1-21, 1956.
- 3) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文集、第 206 号、pp. 59-69, 1972.
- 4) 今瀬達也、前田健一、伊藤嘉、三宅達夫、鶴ヶ崎和博、澤田豊、角田紘子：間隙圧の変化に着目した開水路流れ及び越流による洗掘メカニズムの実験的考察、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol. 68, No. 2, pp. 1_836-1_840, 2012.
- 5) 松田達也、前田健一、三宅達夫、宮本順司、角田紘子、鶴ヶ崎和博：土粒子-土要素レベルに着目したジェット流に伴う地盤洗掘の実験的考察、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.70, No.2, 1_1041-1045, 2014.
- 6) 国土交通省東北地方整備局港湾空港部 HP：第 3 回 東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会 資料 3, 2011.
- 7) 久泉友二、前田健一、今瀬達也、伊藤嘉：透水性が異なる二層地盤における洗掘メカニズムの外力要因分析、第 49 回地盤工学研究発表会、pp.909-910, 2014.