高速流体の作用に伴う間隙圧の変化に着目した洗掘現象の実験的考察

Experimental study on scouring with change in pore pressure due to high-speed fluid

伊藤 嘉¹, 今瀬 達也², 前田 健一³

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・博士前期課程・社会工学専攻

2 名古屋工業大学大学院・工学研究科・博士後期課程・社会工学専攻

3 名古屋工業大学大学院教授・工学研究科・E-mail:maeda.kenichi@nitech.ac.jp

概 要

津波による構造物周辺の洗掘現象は、支持力を低下させ、大規模な被害を発生させる.これまでの洗掘 現象に対する評価は、掃流力の概念を用いることが一般的である.しかし近年、掃流力に加え、地盤内の 応力変化により洗掘規模を一層拡大させることが指摘されている.そこで、本研究では、異なる地盤条件 下における地盤内の応力変化に着目し、開水路流れおよび越流に伴う洗掘に焦点を当てた水路実験により 洗掘のメカニズム解明を試みた.開水路流れによる洗掘実験では、飽和地盤において流体力が作用する際、 地盤表層では過剰間隙水圧が発生し、洗掘の進行を促すことがわかった.また、不飽和地盤では、間隙空 気が地盤外に噴出し、噴出孔が切欠となり洗堀が進行した.越流に伴う洗掘実験では、越流水塊による衝 撃力が洗掘規模に大きく起因した.また、衝撃力を受ける地盤下では過剰間隙水圧が発生し、液状化に似 た状態となり洗掘現象を助長させることがわかった.

キーワード:洗掘,津波,間隙圧,衝撃力

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し, 甚大な被害を発生させることが ある. 2011年3月に発生した東日本大震災においては, 海岸構造物周辺の地盤が洗掘されたことで,海岸構造物の 耐波機能が低下し,被害を発生・拡大した被災ケースが考 えられる.洗掘現象については、これまでに河川・海岸工 学分野において勢力的に研究が進められている.これまで の研究¹⁾²⁾では、流体力によって地盤表層へ作用するせん 断力と地盤表層の土粒子の有効重量との力学的つり合い 条件に着目した掃流力の概念や,渦の発生による土粒子の 浮遊現象に着目して洗掘現象のメカニズムを説明するこ とが一般的である.しかし,実際に被災した海岸構造物周 辺の地盤洗掘の規模を踏まえると, 地盤表層に着目した掃 流力の作用のみでは,洗掘現象を評価することができない と考える.近年の研究においては、例えば、津波のような 高速で作用する流体力の影響は,地盤表層のみではなく地 盤内部に応力変化を生じさせ,洗掘を助長させる影響も指 摘されている³⁾. さらに, 1993 年に発生した北海道南西沖 地震による津波被害報告4以降,津波による海岸構造物の 被災メカニズムを検討する上での重要な項目として,津波 カを受ける海岸構造物直下の捨石マウンドとそれを支持 する海底地盤の挙動が新たに挙げられている⁵⁶⁷⁷.このよ うな,津波,構造物に加えて,海底地盤や捨石マウンドの 力学的相互作用に着目した現象をより定量的に評価する ためには,海岸工学で得られている知見に,地盤工学にお ける知見を加え,新たに洗掘メカニズムを考える必要があ ると考える.

そこで本研究では、従来より考察されてきた掃流力の知 見に加えて、新たに地盤内部の応力変化に着目した移動河 床実験を実施した.実験では、水平堆積地盤に開水路流れ を作用させた洗掘実験(実験 1)、堰を越流した際の落下水 塊による堰背後地盤の洗掘実験(実験 2)、防波堤直下の捨 石マウンドを浸透する流体力による洗掘実験(実験 3)を実 施した.

2. 実験概要および実験装置

実験では、長さ 2.0m×幅 0.3m×深さ 0.3m のアクリル水 槽を用いた.水槽上流より 1.0m を起点に、長さ 0.5m×幅 0.3m×深さ0.1m の土槽区間を設置し、地盤を堆積させた. それ以外の区間は、不透水性の海底床とし、海底床区間の表 面には、海底面の摩擦を考慮して平均粒径 $D_{so}=0.17mm$ の豊 浦砂を付着させた.流体挙動は、2種類の水中ポンプ (1201/min 規格と1001/min 規格)を用いて循環流を形成した.実験時には, 小型間隙水圧計により地盤内部の間隙水圧の計測を行った. 各実験における間隙水圧計の設置位置および装置の概略図 は各章で詳細を示す.また,ビデオカメラ(29.97fps)を用いて 現象の撮影を行った.

堆積地盤には,豊浦砂と2種類の礫材 A,B の3種類を 用いた.粒径加積曲線を図1,平均粒径および透水係数を 表1に示す.実験において豊浦砂を用いる場合は,水中落 下法(飽和状態)および気中落下法(乾燥状態)により地盤を 作製した.密地盤を作成する際は,突き棒で突き固めて所 定の相対密度になるように管理した.

開水路流れによる水平堆積地盤の洗掘実験(実験1)

3.1 実験装置概要および実験ケース

実験 1 で用いた実験装置の概略図および間隙水圧計の 設置位置を図 2(a),(b)に示す.また,表 2 に実験ケースを 示す.実験では,豊浦砂および礫材 B を用い,豊浦砂に ついては相対密度(*Dr*=40,60,70%)と飽和度(*Sr*=0,17.7,10 0%)を変化させ,その影響を考察した.流体挙動は 120*l*/ min 規格の水中ポンプを用いて,外力を統一した.

3.2 無次元掃流力の算出

掃流力および限界掃流力を評価するため、ピトー管を用いて鉛直方向の流速分布を計測した.その結果を図 3(a) に示す.次に、無次元掃流力を算出するためPrandtl-Karman の対数分布則を用いて摩擦速度 *u**を算出した⁸.

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k} \tag{1}$$



ここに, к は Karman 定数(к=0.4), k は相当粗度(k=0.2),

表 1 実験に用いた地盤材料の平均粒径および透水係数

地盤材料	豊浦砂	礫材 A	礫材 B	
平均粒径 D ₅₀ (mm)	0.173	8.57	4.73	
透水係数(cm/s)	2.21E-02(緩) 1.48E-02(密)	4.22E-02	4.16E-02	

*A*_rは実験定数である. 横軸に *y*, 縦軸に *u* をとった片対 数グラフ(図 3(b))において, 計測結果が直線となる範囲に 式(1)を適用し *u**を求めた. 式(1)で算出した *u**を次式に代 入し, 無次元掃流力 *r**を算出した.

$$\tau^* = \frac{u^{*2}}{sgd} \tag{2}$$

ここに、*s* は水中比重(*s*=1.65), *g* は重力加速度, *d* は砂の平均粒径 *D*₅₀を用いることとした.



図 2 実験装置概略図(a),間隙水圧計の設置位置(b):(実験1)

表 2 実験ケース(実験1)

実験ケース Case1-(No.)	地盤材料	飽和度 Sr(%)	相対密度 Dr (%)
Case1-1	豊浦砂	100	40
Case1-2	豊浦砂	100	70
Case1-3	礫材 B	100	-
Case1-4	豊浦砂	17.7	60
Case1-5	豊浦砂	0	60



図 3 ピトー管を用いて計測した鉛直流速分布(a),縦軸に流速 u, 横軸に y をとった片対数グラフ(b)

さらに、土砂が移動を開始する無次元限界掃流力 τ_c *を岩 垣の式⁹を用いて計算し、無次元掃流力 τ *との比較を行っ た.その結果、豊浦砂では、 τ *=1.030> τ_c *=0.300 となり、 実験において洗堀が発生した.一方、礫材 B では、 τ *=0.002< τ_c *=0.050 となり、実験において洗掘は発生しな かった.よって次節からは、豊浦砂について考察する.

3.3 洗掘の様子

飽和状態で相対密度 Dr=40%(Case1-1)および Dr=70%(Case 1-2)の実験時の様子を図 4に示す.両者について,洗掘量に 大きな違いは見られないが,洗掘発生後,下流方向への洗掘 の進行速度は密な地盤(Case1-2)に比べて緩い地盤(Case1-1) の方が速いことを目視による観測で確認した.次に,津波が 陸上へ遡上した際を想定し,乾燥地盤に開水路流れが作用し た様子(Case1-5)を図 5に示す.実験開始直後は,堆積地盤内 部の間隙空気が地盤表層からの浸潤水に置換され,地盤表面 から噴き出すエアーブローが発生した.その噴出孔は洗掘を 発生・拡大させる切欠となった.その後,エアーブローは徐々 に減衰していき,実験開始より2分経過後にはほぼ終息した. 実験開始より3分経過後には、土槽内部に閉じ込められた空 気塊によって地盤内にクラックを発生させた.この現象を踏 まえると、津波が陸上へ遡上した際の洗掘現象には、流体力 の作用に加えて間隙空気の影響も考慮しなくてはならない ことがわかった.以上の結果は、掃流力の概念では説明がで きず、掃流力に加えて、洗掘現象に影響を与える別の要因に ついて検討する必要がある.そこで次節では、地盤内部の変 化に着目して考察する.ただし、本稿では、まず間隙水圧の みの影響に着目し、飽和状態における実験ケースについて考 察した.

3.4 地盤内部の応力変化

Case1-1 および Case1-2 の実験時に計測した間隙水圧の 時刻変化を図 6(a),(b)に示す.本稿では境界面の影響が極 めて小さいと考えられる土槽中央の間隙水圧計(CH5~C H9)で計測した結果を示す.流体力が作用すると,両実験 ケースともに,水位上昇による水圧上昇値(図 6 中の青破 線)に加え,過剰間隙水圧の発生を確認した.地盤表層部 にのみ過剰間隙水圧が発生する密地盤(Case1-2)と比べて



図 4 飽和堆積地盤に開水路流れが作用した際の様子: Case1-1(上), Case1-2(下)









緩い地盤(Casel-1)では土槽中層部(z=35mm)の地点まで過 剰間隙水圧が発生した.よって,掃流力の作用に加えて, この過剰間隙水圧の発生が堆積地盤の強度を低下させ,洗 掘現象を助長させるの一つの要因ではないかと考える.

4. 越流水塊の落下による堰背後地盤の洗掘実験(実 験 2)

4.1 実験装置概要および実験ケース

実験2で用いた実験装置の概略図および間隙水圧計の設置位置を図7(a),(b)に示す.また,実験ケースを表3に示す.本実験では,土槽上流部に h_{weir}=80mm の越流堰を設けて越流現象を再現した.また,水路最下流部に止水壁を設け、この止水壁の高さを変化させて,越流堰より下流部の水位を調整した.流体挙動には,実験1と同様に水中ポンプ(1201/min 規格)を使用して循環流を形成し,外力を統一した.実験では,越流堰より上流と下流の初期水位差を変化させ,水塊の落下高さの変化による影響を考察した.本稿では,初期水位差を Δh と定義した.地盤条件は,実験1と同様に豊浦砂および礫材Bを用いて,飽和度(Sr=0%,100%)および相対密度(Dr=40%,60%,70%)を変化させた.

4.2 洗掘の様子

(a) 飽和度の影響

Δh=80mm で地盤条件を変化させた Case2-1~Case2-3 を 図 8 に, *Δh*=20mm で地盤条件を変化させた Case2-7~Cas e2-9 を図 9 に示す.

Δh=80mm について,まず,豊浦砂の飽和度の違い(Case 2-1 と Case2-2)に着目すると,目視での観察する限りは水 平方向の洗掘の広がりに若干の違いが見られたが,鉛直方 向の最大洗掘深の進行にあまり違いは見られない.この結 果から,堆積地盤の飽和度の影響はほぼないといえる.次 に,豊浦砂と礫材の粒径の違い(Case2-1 と Case2-3)に着目



図 7 実験装置概略図(a),間隙水圧計の設置位置(b): (実験2)

表 3 実験ケース(実験2)

実験ケース	Δh	地盤材料	飽和度	相対密度
Case2-(No)	(mm)		Sr (%)	Dr (%)
Case2-1	80	豊浦砂	100	40
Case2-2	80	豊浦砂	0	60
Case2-3	80	礫材 B	100	-
Case2-4	40	豊浦砂	100	40
Case2-5	40	豊浦砂	100	70
Case2-6	40	礫材 B	100	-
Case2-7	20	豊浦砂	100	40
Case2-8	20	豊浦砂	100	70
Case2-9	20	礫材 B	100	-
Case2-10	0	豊浦砂	100	40
Case2-11	0	豊浦砂	100	70
Case2-12	0	礫材 B	100	-



図 8 Δh=80mm における実験の様子: Case2-1(左), Case2-2(中央), Case2-3(右)



図 9 *Δh*=20mm における実験の様子: Case2-7(左), Case2-8(中央), Case2-9(右)

すると,鉛直方向の最大洗掘深および水平方向の洗掘の広 がりに変化が見られた.この結果から,堆積地盤の粒径に ついて考慮する必要があり,土粒子個々に作用する流体力 と土粒子の有効重量のつり合いによる掃流力の概念が重 要となる.

 $\Delta h=20$ mm について、まず、相対密度の違い(Case2-7 と Case2-8)に着目すると、目視で観察する限りは洗掘現象に大きな変化は見られなかった.この結果から、堆積地盤の相対密度の影響はほぼないといえる.一方、前途した $\Delta h=80$ mm の場合と同様に、粒径の違い(Case2-7 と Case2-9)により洗掘現象に変化が見られた.

次に,初期水位差 *Δh* の変化に着目すると, *Δh* が大きい ほど,洗掘の規模も大きくなることがわかる.これは,越 流による水塊の落下エネルギーに起因すると考える.

以上の結果から, 越流による洗掘現象には堆積地盤の粒 径および水塊の落下エネルギーに起因して現象が異なる ことがわかった. そこで次項では, 粒径・水塊の落下エネ ルギーに着目した洗掘メカニズムの解明を試みる. 現象を 明確化するため本稿では, 飽和状態に焦点を絞って考察し た.

(b) 粒径および初期水位差が最大洗掘深に与える影響

前途に示した通り,粒径および初期水位差 *Ah* の変化が 洗掘現象に影響することがわかった.そこで,ある時刻の の最大鉛直洗掘深 *D*を計測し,落下エネルギーによる影響 を考察するため,初期水位差 *Ah* で除した無次元最大洗掘 深を求めた.図 10(a)に相対密度 *Dr*=40%の豊浦砂,図 10(b) に礫材 B の無次元洗掘深の時刻変化を示す.両材料におい て,初期の洗掘進行速度は,初期水位差 *Ah* と *h_{wei}/*2 の大 小関係による依存が大きく,その後は初期水位差 *Ah* が小 さくなるほど,洗掘速度が遅くなることがわかる.これは, 堰背後に水が存在することで,越流による水塊の落下エネ ルギーを吸収するクッションとなることに起因すると考 える.



図 10 無次元最大洗掘深の時刻変化:豊浦砂(a),礫材 B(b)

(c) 地盤内部の応力変化

土槽内部に設置した間隙水圧計(CH5)で計測した間隙水 圧の変動分 Δu の時刻変化の様子を図 11 に示す. 礫材 B を用いた場合には,設置したすべての間隙水圧計において 洗掘の有無に関係なく,同程度の水圧上昇が発生した. 一 方,豊浦砂を用いた場合は,実験初期に越流による水位上 昇分の水圧上昇が見られるが,洗堀が進行するにつれて過 剰間隙水圧が発生し,その後,洗掘により間隙水圧計が露 出する傾向が見られた.以上の結果から,堆積地盤の粒径 の違いにより,地盤内部の間隙水圧の上昇傾向に影響を与 えることがわかった.そこで,豊浦砂を用いた Case2-7 に



図 11 Case2-7, Case2-8 実験時におけるの間隙水圧変動(CH5)



図 12 Case2-4における土被り圧,有効土被り圧,間隙水圧の時刻変 化(左)と深度記号の定義(右)

ついて、実験時に撮影した画像をもとに一次元的に地盤の 土被り圧($\sigma=y_wh+y_{sat}$ ・ h_s :記号の定義は図 12 中参照)を 計測し、間隙水圧(u)との差をとった鉛直有効土被り圧 (σ)の変化について検証した(図 12(左)).実験開始 20 秒経 過後から過剰間隙水圧が発生し、49 秒経過時に有効土被り 圧(σ)がゼロとなり、液状化に似た状態になった後、68 秒 経過後に間隙水圧計が露出したことわかった.以上の結果 から、越流水塊の落下に起因する地盤表層への衝撃力の作 用に加えて、地盤内の有効土被り圧が減少し、堆積地盤が 液状化に似た状態となることで、土粒子が浮遊し洗掘され やすい状態となっている可能性がある.

5. 構造物直下の浸透力による洗掘実験(実験3)

5.1 実験装置概要および実験ケース

本実験で用いる実験装置の概略図および間隙水圧計の 設置位置を図 13(a),(b)に示す.また、実験ケースを表 4 に 示す.土槽上部には捨石マウンドおよび防波堤を模擬した 混成堤模型を設置した.捨石マウンド内を浸透する流体力 による洗掘現象に焦点を絞るため,越流は許さず,防波堤 模型と捨石マウンドは固定した.捨石マウンドの高さは 20mmとした.また,水路最下流部に止水壁を設け,この 止水壁の高さを変化させることで,実験初期の水位を調整 した.流体挙動は水中ポンプ(1001/min 規格)を用いて循環 流を作用させた.実験では,堆積地盤の条件の変化および



凶 15 夫被表面恢安凶(a), 间隙小庄 可过 0.1 关款	义	13	実験装置概要図(a)	.間隙水圧計設置位置(b):(実験 3
---------------------------------	---	----	------------	-------------	----------

字殿な、フ(字殿)

± 4

衣 + 天歌 / 八(天歌3)					
実験ケース Case3-(No)	初期水位 (mm)	地盤材料 (土槽)	相対密度 Dr (%)	捨石マウンド 材料	
Case3-1	80	豊浦砂	40	礫材 A	
Case3-2	80	豊浦砂	40	礫材 B	
Case3-3	80	礫材 B	-	礫材 B	
Case3-4	20	豊浦砂	40	礫材 A	
Case3-5	20	豊浦砂	40	礫材 B	
Case3-6	20	礫材 B	-	礫材 B	

マーウンドの始後、如期を位む亦化させて、その影響な

捨石マウンドの粒径,初期水位を変化させて,その影響を 考察した.

5.2 洗掘の様子

海底地盤に Dr=40%の豊浦砂, 捨石マウンドを礫材 B で 作製し, 初期水位を 80mm と 20mm に変化させた Case3-2 と Case3-5 の実験の様子を図 14 および図 15 に示す. 実験 時に防波堤を隔てて上流と下流で生じた水位差を本稿で は, $\Delta\eta$ と定義した. この水位差 $\Delta\eta$ による流下方向への水 の流れは, 堆積地盤に比べて透水性の高い捨石マウンドへ 浸透すると考えられる.

初期水位を 80mm とした Case3-2 では,実験開始より 15 秒経過後に Δη が 50mm となり,防波堤模型より下流へ豊 浦砂が噴砂した.これと同時に,防波堤模型上流側の地盤 表層部に洗掘の発生が見られた.この洗掘は,上流から下



図 14 実験の様子: Case3-2



図 15 実験の様子: Case3-5

流へ流下する際,主として捨石マウンドを通過する流体が 捨石マウンド内の流下能力を上回ることで,透水性が捨石 マウンドより低い海底地盤へと浸透しようとする際に生 じる掃流作用および浸透作用によるものと考える.その後, 時間の経過とともに水位差 Δη は大きくなり,同時に洗掘 が大きく拡大した.実験開始より 30 秒経過後に,水位差 Δη は 80mm で最大となり,防波堤模型より下流側の捨石マウ ンドの噴石,変形が見られた.この噴石,変形が切欠とな り,捨石マウンドに流動が生じた.また,初期水位を 20mm とした Case3-5 においても Case3-2 と同様な洗掘の発生, 拡大の様子が見られたが,地盤表層の洗掘の拡大する速度 は Case3-2 と比べて速いことがわかる.さらに,実験開始 から 45 秒経過後の地盤表層の洗掘の様子を比較すると, 上流方向への洗掘規模に大きな変化が見られた.

以上の現象を踏まえると、防波堤模型より上流側の地盤 洗掘の発生および防波堤模型直下の捨石マウンドの流動 現象は *A*ηの大小関係による影響が大きく、一般的な浸透 破壊に似た現象であることがわかった.しかし、地盤表層 の洗掘の速度および規模については、初期水位の違いによ る水位変化に起因して現象が異なることがわかった.この 水位変化が水の流れに与える影響に着目する必要がある. さらには、前途に示したような、高速で作用する流体力に 起因した地盤内部の応力変化が洗掘現象に与える影響も 無視できないと考える.そこで今後は、この洗掘規模の違 いを説明するため、地盤内部の応力変化に着目した洗掘メ カニズムの解明を試みる.

6. 結言

移動河床水路を用いた高速流体による地盤洗掘メカニ ズムの解明を試みた.実験の結果,以下の結論を得た.

地盤表層に作用する開水路流れにより飽和地盤内部に 過剰間隙水圧が発生し,洗掘現象を助長させることがわか った.この傾向は緩い地盤ほど顕著であった.乾燥地盤で は、浸潤水と間隙空気が置換する過程において、地盤内の 間隙空気が地盤表層へと噴出するエアーブロー現象を確 認した.さらに、急激な水の浸透によって、地盤表層から の置換を妨げられた間隙空気は空気塊となり地盤内部に 亀裂を生じさせた.この現象を踏まえると、陸域では不飽 和地盤である可能性が高いため、陸上における洗掘では空 気の影響も考慮する必要がある.

越流による背後地盤の洗掘現象は、水塊の落下高さおよ び背後地盤の粒径の違いが鉛直洗掘深に大きく影響を与 えることがわかった.また、落下水塊による背後地盤への 衝撃力は、地盤直下に過剰間隙水圧を発生させ、液状化に 似た状態となることがわかった.これにより、地盤強度を 低下させ、洗掘を助長させると考える.

構造物直下の捨石マウンド,海底地盤内に生じる浸透力 による洗掘現象は,堆積地盤に比べて透水性の高い捨石マ ウンドを浸透する流体力によって,堆積地盤が洗掘される ことを確認した.捨石マウンドにおいても,流体力の作用 による噴石が切欠となり,捨石マウンドが変形や流動に至 る現象を確認した.以上より,高速で作用する流体力に起 因する洗掘現象は,これまでに考察されてきた掃流力の作 用に加えて,地盤内部に応力変化を生じさせ,洗掘現象を 助長する可能性あることを示すとともに,今後検討する必 要性があることがわかった.

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B)23360203 と基盤研究(B)21360222 の助成を受けたもの である.ここに記して深謝の意を表します.

参考文献

- 7) 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
- 2) 野口賢二・佐藤愼司・田中茂信(1997):津波遡上による護岸

越波および前面洗掘の大規模模型実験、海岸工学論文集,第
44巻, pp.296-300.1997

- 三宅達夫,澤田豊,角田紘子,鶴ヶ崎和博,前田健一,今瀬 達也:遠心力場における津波による洗掘の相似則に関する一 考察(その2),第46回地盤工学研究発表会講演要旨集, pp2012-2014,2011
- 4) 稲富隆昌,上部達生,井合進,風間基樹,山崎浩之,松永康 男,関口信一郎,水野雄三,藤本義則:1993年北海道南西沖 地震による港湾施設被害報告,港湾技研資料,No.0791,1994
- 5) 三宅達夫,角田紘子,前田健一,坂井宏隆,今瀬達也:津波 の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤へ の適用,海洋開発論文集,第25巻,pp.87-92.,2009
- 6) 今瀬達也,前田健一,三宅達夫,鶴ヶ崎和博,澤田豊,角田 紘子:津波力を受ける捨石マウンドー海底地盤の透水現象に 着目した海岸構造物の安定性,土木学会論文集,A2(応用力 学), Vol. 67,No.1,pp. 133-144,2011
- 7) 今瀬達也,前田健一,三宅達夫,鶴ヶ崎和博,澤田豊,角田

紘子: 捨石マウンドー海底地盤への津波浸透による混成堤の 不安定化, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 67, No 2, pp. I_551-I_555., 2011

- 高橋智幸,黒川貴博,藤田将孝,島田広昭:津波による土砂 移動の粒径依存性に関する水理実験,土木学会論文集 B2(海 岸工学)Vol.67,No.2,I_231-I_235,2011
- 9) 岩垣雄一:限界掃流力に関する基礎的実験(I)限界掃流力の 流体力学的研究,土木学会論文集,第41号,pp1-21,1956
- 10) 高橋重雄,戸田和彦,菊池喜昭,菅野高弘,栗山善昭,山崎浩之,長尾毅,下迫健一郎,根木貴史,菅野甚活,富田孝史,河合弘泰,中川康之,野津厚,岡本修,鈴木高二朗,森川嘉之,有川太郎,岩波光保,水谷崇亮,小濱英司,山路徹,熊谷兼太郎,辰巳大介,鷲崎誠,泉山拓也,関克己,廉慶善,竹信正寛,加島寛章,伴野雅之,福永勇介,作中淳一郎,渡邉祐二:2011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,港空研資料,No.1231.201