

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360203

研究課題名(和文) 津波の押し波・引き波による地盤の不安定化と海洋構造物被災のメカニズム解明と対策

研究課題名(英文) Instability of caisson-type breakwater due to seepage and scouring of tsunami into rubble mound and seabed with earthquake, liquefaction and forward and backward waves

研究代表者

前田 健一 (MAEDA, Kenichi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50271648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円、(間接経費) 4,110,000円

研究成果の概要(和文)：防波堤等の防災の構造物は海底や大きな石を積み上げたマウンドなどの地盤で支えられていることから、津波の押し波や引き波が構造物に作用する圧力だけでなく、地盤に波が浸透することにも着目した。その結果、地盤がゆるんで弱くなる液状化が被害を大きくするとともに、いったん構造物を超えた波が再び海面に落ち込む越流によっても、地盤の表面に液状化が発生し、大きく削る洗掘が発生することを明らかにした。さらに、津波襲来前の地震動による液状化の影響を調べ、巨大地震では以上のような液状化の負の連鎖が被害を大きくすることを示すとともに、被害を減らすための対策方法について、地盤工学の立場から提案している。

研究成果の概要(英文)：Destabilization scenario of breakwater due to an earthquake and a tsunami was revealed. In the huge earthquake, after the large and long earthquake motion caused the liquefaction with increasing excessive pore water pressure, the breakwater was settled. The breakwater received tsunami force after the earthquake acted. The bearing capacity of the breakwater was loosed due to the decreased of the ground strength. Moreover we discussed on the performance of the breakwater by use numerical simulation result of tsunami inundation depth with damage level of the breakwater.

Scours on the seabed due to tsunami causing reduction in bearing capacity of structures were examined by open-channel flow, overflow and seepage flow in rubble mound. During water flow, the vertically upward hydraulic gradient along with excess pore water pressure was generated in the saturated ground. The liquefaction-like phenomenon was observed in the ground.

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：地盤防災

キーワード：津波 地震 複合災害 浸透破壊 支持力 液状化 洗掘 侵食

1. 研究開始当初の背景

北海道南西沖地震の被害調査で、防波堤直下の捨石マウンドや海底地盤に大変形が生じ、混成堤の安定性を低下させる可能性が指摘された。

また、東日本大震災では、津波により海岸構造物に甚大な被害が生じたため、海岸構造物の耐津波化に対し“粘り強い構造化”が課題として掲げられた。この課題に対して、まずは津波による被災メカニズムを把握する必要がある。さらに、地震-津波複合作用に対しても被災メカニズムの解明は急がれる。

2. 研究の目的

(1)本研究では、津波作用を受ける防波堤の滑動や転倒といった混成堤構造の不安定化現象に及ぼす捨石マウンドや海底地盤の変形・破壊の影響を評価することを目的とした。特に、津波による捨石マウンドや海底地盤への浸透とダイレイタンスに伴う過剰間隙水圧の変動が、剛性や支持力の低下をもたらす現象に着目した。

(2)また、越流による防波堤背後地盤の損傷、液状化による地震-津波の複合作用による防波堤の不安定化の機構について検討した。

3. 研究の方法

(1)32G 場における遠心模型実験

実験水路長、実物と同等の圧力レベルを確保するためにドラム型遠心载荷模型実験を実施した(実験装置概要は図-1)。

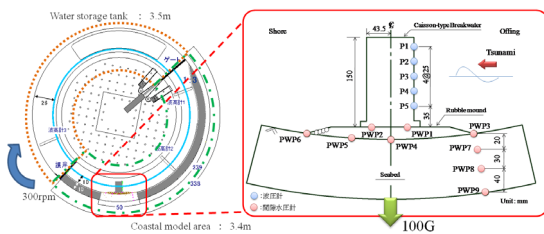


図-1 ドラム型遠心力载荷装置の平面概要図と混成堤模型の詳細寸法および計測機設置位置

ダムブレイクにより段波を発生させた。まず、防波堤に作用する波圧について、谷本らの式による結果と比較し、津波力を再現できていることを確認した。次に、実験画像の画像解析から、防波堤に作用する波圧の変化と防波堤の変位、地盤の変形・破壊現象を整理した(図-2)。段波圧の作用とともに防波堤が動くのを観察し(図中 A~B)、その時の防波堤の滑動、転倒に対する安全率 F_s を計算したところ設計基準 1.2 を下回った。また、防波堤直下から岸側の捨石マウンドおよび海底地盤にせん断変形が発生し、円弧状の変形領域を確認した。その領域の外接線を滑り線とし、水平波力を考慮した簡易ビショップ法により支持力解析を行うと、安全率 F_s が 0.9 まで低下した。さらに、持続波圧作用時において (B~E)、岸側の捨石マウンドおよび海

底地盤で噴石・墳砂が生じた。その際、岸側のマウンドや地盤内では、動水勾配が顕著に上昇し、浸透破壊の危険度が高い状態が継続した(図-3)。

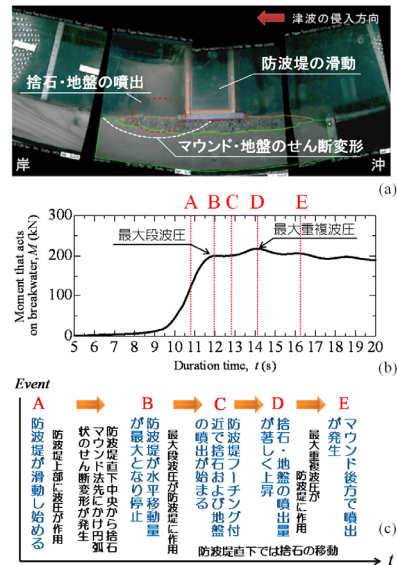


図-2 遠心模型実験における現象の整理：(a)津波力によって発生した現象とその箇所、(b), (c)防波堤に作用したモーメント力の経時変化に基づいた現象のまとめ

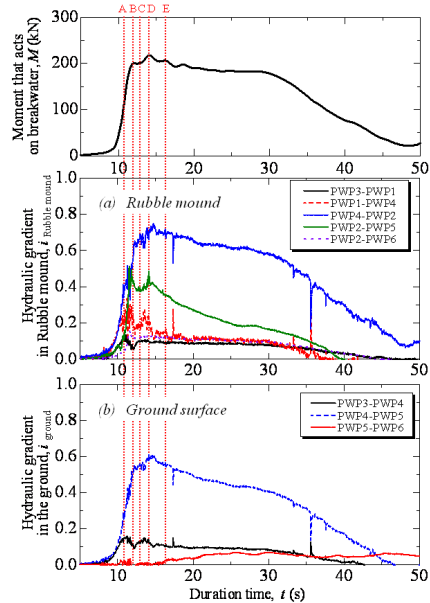


図-3 遠心模型実験による津波浸透流をうける捨石マウンドと地盤の評価：(a)捨石マウンド内、(b)地盤内の動水勾配変化

(2)数値解析手法の提案：粒子法 SPH 法

数値解析では、複雑な水の流れと地盤の相互作用や地盤の破壊・大変形を解くため、粒子法で連続体解析の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用い、土・水・構造物連成解析手法の開発を行った(図-4, 5, 6)。また、海岸工学分野で広く用いられている数値波動水路も活用した。

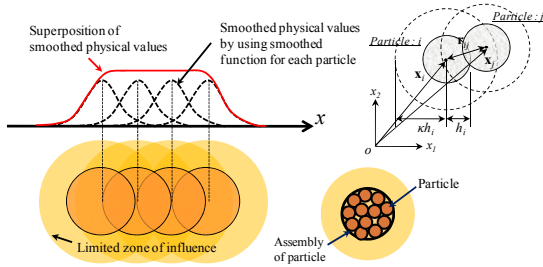


図-4 SPH法による平滑化関数を用いた空間物理場の表現

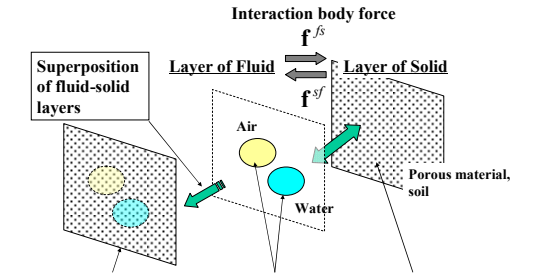


図5 SPH法による土-水-空気の連成の表現

$$\text{Total volume fraction: } 1 = (\text{Volume fraction: } n) + (\text{Volume fraction: } 1-n)$$

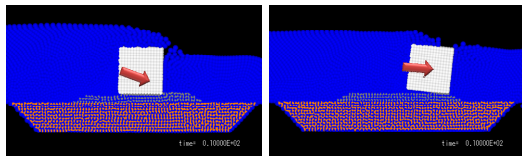


図-6 粒子法による防波堤被災の解析事例

(3) 洗掘に関する模型実験

図-7, 8 のような水平地盤に水平に流れを与える洗掘実験を飽和・不飽和条件で行った。また越流時の洗掘事例を図-9 のように行っている。さらに、構造物、透水係数の異なる層（マウンド、支持地盤）の影響についても調べた（図-10）。水圧計による過剰間隙水圧分布も調べている。

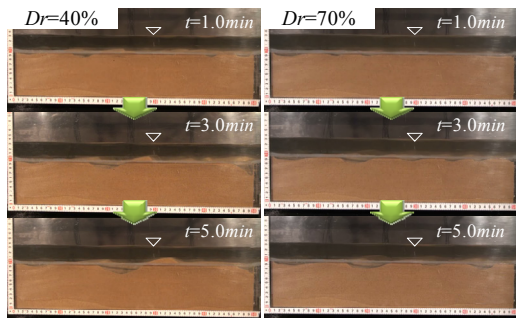


図-7 飽和地盤における洗掘の様子(実験 I)

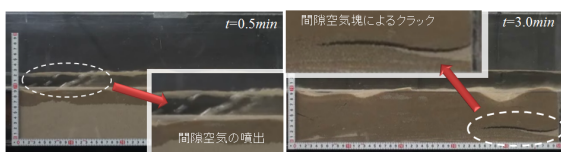


図-8 不飽和地盤における洗掘(実験 I)

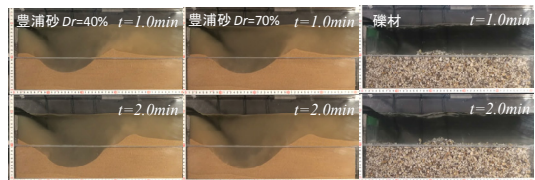
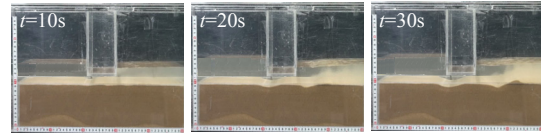
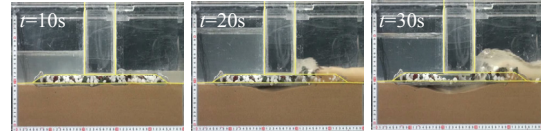


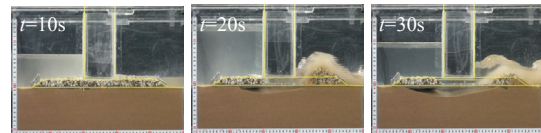
図-9 越流による洗掘現象の様子(実験 II)



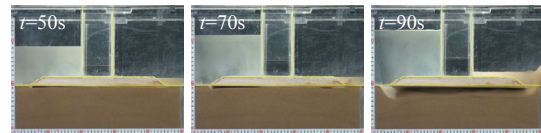
(a) Case1 : マウンドなし条件の洗掘進展



(b) Case2 : Gravel-A条件の洗掘進展



(c) Case3 : Gravel-B条件の洗掘進展



(d) Case4 : 不透水条件の洗掘進展

図-10 構造物周りの洗掘実験の様子

4. 研究成果

(1) 遠心力模型実験と数値解析による観察

遠心力載荷模型実験手法と津波一構造一 地盤の粒子法 (SPH 法) による連成解析手法を開発している。津波力を受ける混成堤は、衝撃的段波圧が作用する初期段階において防波堤構造の滑動、転倒に対する安全率が低下し、変位することが確認された。これに連動してマウンドや地盤の変形、支持力低下することが分かった。さらに、持続波圧が防波堤に作用するとともに、浸透作用によって後方岸側のマウンド・海底地盤内の動水勾配が高くなり、噴砂が発生することが明らかになった。以上の結果から、混成堤の安定性を考える際には、作用する波力の大きさや継続時間、防波堤自体の波力による不安定化と捨石マウンドおよび海底地盤内の浸透作用に伴うせん断破壊および支持力低下による不安定化を考える必要がある。

(2) 越流・浸透による防波堤背後地盤の動水勾配変動

越流・浸透による防波堤背後地盤への影響を考察するため、津波が作用した際の鉛直上向き動水勾配の変動を算出した。動水勾配は、各間隙水圧抽出箇所におけるピエゾ水頭を抽出箇所間距離で除して求めた。越流時の海底地盤内の動水勾配コンター図を図-11 に示す。ここで、正は上向き勾配を意味している。

越流がない場合 (Case1) は、背後地盤の動水勾配の上昇が見られないが、越流がある場合 (Case2) は、防波堤直下から捨石マウンド法先に至る地盤表層付近で動水勾配が 1.0 まで上昇することがわかる。この結果は前途に示した洗掘実験と同様に地盤内部の水圧の上昇したことに起因して発生したものである。

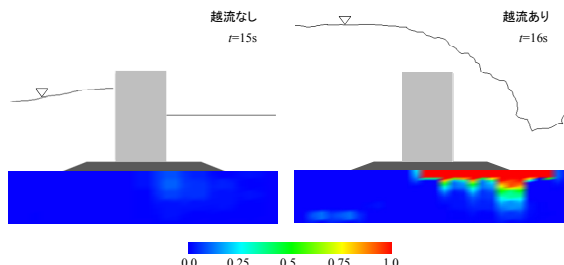


図-11 混成堤周りの流れによる地盤内の導水勾配：(左) 越流なし，(右) 越流あり

(3) 浸透による防波堤背後地盤の剛性低下と防波堤の支持力不安定化：押し波と引き波

港湾設計指に従い、簡易ビショップ法を用いて、防波堤の支持力に対する安定性余裕度を検討した。ここで、余裕度とは滑動変形に対する支持力強度から津波外力を引いたものとなり、通常的安全率はそれらを除したものとなる。また、支持力強度に関しては、地盤スライス内の過剰間隙水圧の上昇による地盤の強度低下を考慮するため、地盤の有効重量から過剰間隙水圧分 (EPWP) を引いた。図-12 に前出の Case2 における支持力安定性に関する余裕度の経時変化を示す。黒実線が通常の波力のみを考慮したもの、赤点線は波力に加えて越流・浸透による地盤剛性低下を考慮したもの、青一点鎖線は波力に加えて浸透による地盤剛性低下を考慮したものである。重複波圧が作用する $t=9.2s$ (1st Phase) では、波力のみ依存して余裕度が低下した。それ以降の継続波圧が作用した際 (2nd Phase) では、地盤の強度低下の影響で、支持力に対する余裕度が一段と低下した。支持力安定性の低減に及ぼす影響を分析するため、各要因による支持力余裕度を全要因による支持力余裕度で除した比率を計算した (表-1)。この結果、特に 2nd Phase において、地盤強度低下による支持力安定性の低減が約 30% となり、うち越流による衝撃力の影響が 22.73%、浸透による透水力の影響が 7.22% であることがわかった。このことから、越流水塊のみではなく、支持地盤を回り込む浸透の影響も無視できないことがわかった。

(4) 地震-液状化-津波の複合災害メカニズムとその対策

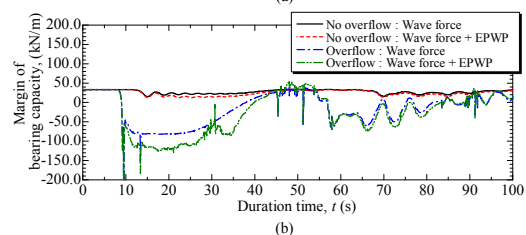
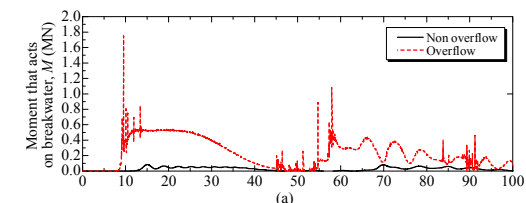
① 典型的な防波堤断面を対象に地震-津波の複合外力に対する安定性を検討した。発生した過剰間隙水圧は地盤条件により消散に時間を有し、地盤剛性の回復に時間を要することがわかった (図-13)。それに伴って地震時に防波堤天端が約 0.75~1.2m 程度沈下

し、さらに時間の経過とともに沈下量が増加した。地震後 90 分に津波外力を作用させて、防波堤の支持力に対する余裕度を計算した。地震動による過剰間隙水圧と津波浸透による支持地盤の強度低下を考慮した場合、津波波力を受けやすい混成堤では支持力破壊する可能性があることがわかった (図-14)。地震による液状化、浸透による液状化、洗掘による液状化の負の連鎖が生じた場合に、被害が甚大になることが示された。

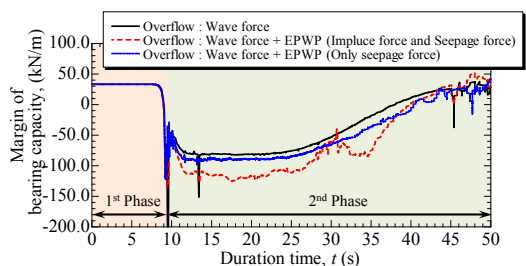
② 混成堤の被災シナリオ (無被害, 2m 垂直沈下, 5m 水平移動, 大破) に応じた背後地の津波浸水深さを考察すると (図-15, 16)、無被害, 水平移動, 垂直沈下, 大破の順に増えた (図-17)。詳細な性能評価が行えるための一つの考え方と道具の準備ができた。

(5) 対策工法の提案

既存の地盤改良・補強技術、それらの組み合わせで、効果的な対策が可能であることを示すとともに、破壊制御の重要性を指摘した。



(a) 防波堤に作用する単位奥行当りのモーメント，(b) 支持力に対する余裕度



(c) 要因の詳細検討

図 12 防波堤の支持力に対する余裕度の時刻変化：押し波と引き波を含む

表 1 防波堤の支持力低下に与える要因分析例

Phase	1 st Phase ($t=9.2s$)	2 nd Phase ($t=20.0s$)
水平波力	93.36 %	70.03 %
衝撃力 (越流水塊)	1.38%	22.73%
透水力 (浸透流)	5.25%	7.22%

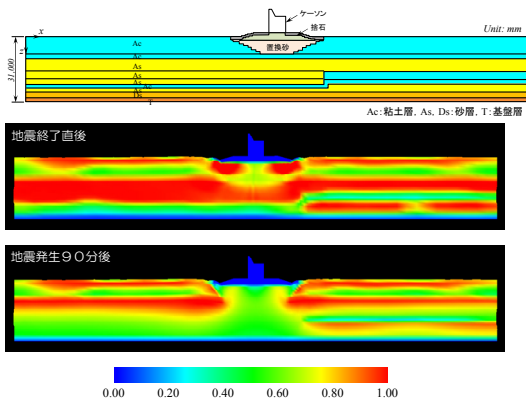


図-13 防波堤の地震終了直後および地震発生90分後の過剰間隙水圧比

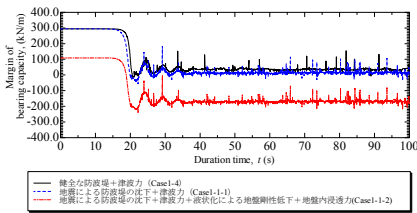


図-14 地震-液状化-津波の複合作用を受けた場合の支持力余裕度の変化

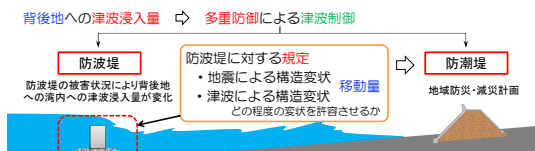


図 15 多重防御を踏まえたうえでの防波堤の性能規定概要

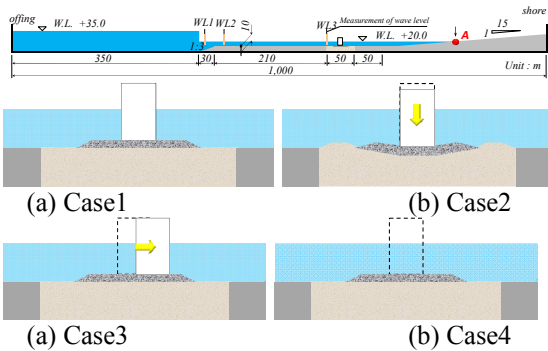


図 16 混成堤の被災シナリオ：(a)，無被害（健全）：Case1；(b)，2m鉛直沈下：Case2；(c)，5m水平移動：Case3；(b)，滑落（大破）：Case4

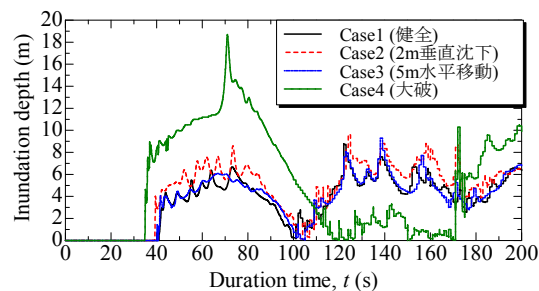


図-17 水陸境界 A 地点における津波浸水深さの経時変化

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 12 件)

- ① 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-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, Vol.67, No.1, pp.133-144, 2011. 10.
- ② 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-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, Vol.67, No.2, pp.551-555, 2011.11.
- ③ 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 澤田豊, 角田紘子, 鶴ヶ崎和博: 遠心模型実験および SPH 法による津波が作用する海岸構造物の被害予測技術開発, (論文), 地盤工学会誌, Vol.60, No.3, pp.12-14, 2012.
- ④ 前田健一・柴田賢・馬場干児・小林剛・榊尾孝之・尾畑功: 模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と数値解析, 河川技術論文集, Vol.18, pp.305-310, 2012.6.
- ⑤ 小林剛, 前田健一, 柴田賢: 不飽和堤防の急速浸潤化に伴う間隙空気挙動と比抵抗モニタリングによる可視化, 河川技術論文集, Vol.18, pp.293-298, 2012.6.
- ⑥ 森河由紀弘, 包小華, 前田健一, 今瀬達也, 張鋒: 余震による再液状化を考慮した液状化評価の重要性, 地盤工学ジャーナル Vol.7, No.2, 389-397, 2012.6
- ⑦ 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, Vol.68, No.2, pp.836-840, 2012.11.
- ⑧ 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 澤田豊, 鶴ヶ崎和博, 角田紘子, 張鋒: 地震および越流による地盤損傷を考慮した津波力を受ける混成堤の支持力破壊検討, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.866-870, 2012.11.
- ⑨ 前田健一, 今瀬達也, 伊藤嘉, 齊藤啓: 内部侵食による土の不安定化を考慮した河川堤防の浸透破壊解析法の提案, 河川技術論文集, Vol.19, pp.39-44, 2013.6.
- ⑩ 小林剛, 前田健一, 齊藤啓, 伊藤嘉, 阿部知之: 河川堤防材料の浸潤挙動に及ぼす降雨強度及び浸潤速度の影響とモニタリング手法の比較, 河川技術論文集, Vol.19, pp.69-74, 2013.6.
- ⑪ 今瀬達也, 前田健一, 伊藤嘉, 後藤麻衣, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 角田紘子: 捨石マウンド-支持地盤の透水性の違いに着目した混成堤下の津波洗掘プロセス, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, 1031-1035, 2013.11.

- ⑫ 前田健一, 杉井俊夫, 榊尾孝之, 小林剛, 白田文昭, 黒田英伸, 柴田賢, 齊藤啓: 実河川堤防における豪雨対策としての透気遮水シートの設置効果, 国際ジオンセティックス学会日本支部, ジオンセティックス論文集, 第28巻, pp.31-36, 2013.

[学会発表] (計20件)

- ① Kenichi MAEDA, David Muir WOOD and Akihiko KONDO: Micro and macro modeling of internal erosion and scouring with fine particle dynamics, 6th International conference on Scour and Erosion, Paris, 2012.
- ② Tatsuya IMASE, Kenichi MAEDA, Michio MIYAKE, Yutaka SAWADA, Hiroko SUMIDA and Kazuhiro TSURUGASAKI: Destabilization of a caisson-type breakwater by scouring and seepage failure of the seabed due to a tsunami, 6th International conference on Scour and Erosion, Paris, 2012.
- ③ T. Imase, K. Maeda, M., Miyake, Y. Sawada, H. Sumida & K. Tsurugasaki: Instability of caisson-type breakwater due to seepage and scouring of tsunami into rubble mound and seabed, New Frontiers in Computational Geotechnics, IWS-Takayama, 2012.
- ④ K. Maeda, S. Shibata, W. Zhang, K. Baba, T. Masuo and T. Imase: Laying effect of Breathable - Water Proof Sheet on River Dike considering Heavy Rain and Air Bubble, New Frontiers in Computational Geotechnics, IWS-Takayama, 2012.
- ⑤ T. Imase, K. Maeda, Y. Ito and M. Goto: Multi-phase mechanics and multi-scale interactions among soil-water-gas in tsunami disaster, Powder & Grains 2013, 2013.
- ⑥ 前田健一: 細粒分の流出に伴う粒状体の粒子骨格構造変化とマクロ変形のモデリング, 第55回日本学術会議材料工学連合講演会, 2011.10.
- ⑦ 今瀬達也: SPH法を用いた捨石マウンドー海底地盤内部の浸透作用が及ぼす混成堤の津波被災要因, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.7.
- ⑧ 今瀬達也: 津波による捨石マウンドー海底地盤への押し波・引き波浸透が及ぼす混成堤の不安定化, 土木学会平成23年度全国大会第66回年次学術講演会, 2011.9.
- ⑨ 前田健一: 地盤ー流体の連成作用の見直しの必要性和地震ー津波の複合作用に対する沿岸構造の減災性能評価に関する考察, 地盤工学会関東支部, 2012.5.
- ⑩ 今瀬達也: 混成堤の津波被害の形態および規模を考慮した対策効果の検討, 第48回地盤工学研究発表会, 2013.7.
- ⑪ 後藤麻衣: 津波による掃流力及び地盤内浸透力に起因する防波堤下の洗掘現象, 第48回地盤工学研究発表会, 2013.7.
- ⑫ 澤田豊: 津波に対する防波堤頭部基礎捨石マウンドの安定性の検討, 第48回地盤工学研究発表会, 2013.7.
- ⑬ 今瀬達也: 地震・津波の複合外力による混成堤の進行性破壊, 2013.7.
- ⑭ 今瀬達也: 越流・浸透による支持地盤破壊プロセスに起因した混成堤の津波被害検討, 土木学会平成24年度全国大会第68回年次学術講演会, 2013.9.
- ⑮ 後藤麻衣: 異なる捨石マウンド幅上のケーソン式防波堤に施工したグラウンドアンカーの津波補強効果, 土木学会平成24年度全国大会第68回年次学術講演会, 2013.9.
- ⑯ 伊藤嘉: 間隙空気の挙動に着目した開水路流れによる不飽和地盤の洗掘現象, 土木学会平成24年度全国大会第68回年次学術講演会, 2013.9.
- ⑰ 前田健一: 地震ー津波による防波堤被害と背後地への津波流入に関する検討, 地盤工学会特別シンポジウムー東日本大震災を乗り越えてー, 2014.5.
- ⑱ 今瀬達也: マルチスケールおよびマルチフェイズに着目した洗掘とそれに起因する混成堤の津波被害検討, 地盤工学会特別シンポジウムー東日本大震災を乗り越えてー, 2014.5.

[図書] (計1件)

- ① 分担執筆, 地盤工学会, 「地盤工学における性能設計入門 (入門シリーズ 38)」, 2012

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
なし
- 取得状況 (計0件)
なし

[その他]

ホームページ等
<http://www.maeda-lab.org/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
前田 健一 (MAEDA Kenichi)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50271648
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし