

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏 名</b> (ふりがな)		<b>所 属</b>		<b>役 職</b>
	みずたに のりみ 水谷 法美		名古屋大学大学院工学研 究科社会基盤工学専攻		教授
<b>②研究 テーマ</b>	名称	津波来襲時の海岸堤防の被災メカニズム解明のための数値解析技術の開発			
	政策 領域	[分野] 海岸技術分野	融合 技術		
		[公募課題] 海岸保全施設の被災メカ ニズムに資する技術開発			
<b>③研究経費</b> (単位: 万円)	平成25年度	平成26年度			総 合 計
※端数切り捨て。	9 8 1	9 9 6			1, 9 7 7
<b>④研究者氏名</b>					
氏 名		所属・役職 (※平成27年3月31日現在)			
中村 友昭		名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 准教授			
小竹 康夫		東洋建設(株) 総合技術研究所鳴尾研究所 水工研究室長			
志田 芳樹		(株) 建設技術研究所 東京本部 水工部主幹			
今井 聡		(株) 建設技術研究所 東京本社 河川部海岸海洋室主幹			
<b>⑤研究の目的・目標</b>					
<p>本研究では、海岸堤防に作用する津波による外力を精度良く推定し、その外力の作用に伴う海岸堤防の安定性を適切に評価するために、津波・被覆工の挙動・洗掘等の地形変化・基礎地盤の応答の4者間の相互作用が解析できる数値計算モデルの構築を行い、海岸堤防等の強化に資する技術研究開発を行った。以上の目的を達成するために、研究開発期間1年目の昨年度に得た成果を踏まえて、研究開発期間2年目の本年度は以下の技術研究開発を実施した。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 被覆工を固定せず移動可能な状態とした水理実験を4ケース以上実施し、被覆工に作用する波圧の計測を行うとともに、地形変化の特徴の把握と被覆工の移動機構の解明を行った。また、開発した数値計算モデルの精度の評価を水理実験結果との比較により行った。</li> <li>2. 上記の水理実験は、実験装置の都合上、大きなスケールで実施できなかったことから、開発した数値計算モデルを国土技術政策総合研究所にて実施された縮尺1/2の水理実験にも適用し、より現地に近いスケールで数値計算モデルの精度の評価を行った。</li> <li>3. 開発した数値計算モデルを用いて、ケーススタディとして東日本大震災時に実際に被災した海岸堤防を対象に再現計算を10ケース以上実施した。また、被災メカニズムを踏まえて各海岸堤防ごとに必要となる対策を考案し、対策実施後を想定した数値実験を10ケース以上実施することにより、各対策工の有効性の検討を行った。</li> </ol>					

## ⑥研究成果

### (1) 高落差水路実験への適用

国土技術政策総合研究所にて実施された縮尺1/2の水力実験を対象に、開発した数値計算モデルの再現性を検証した。具体的には、被覆工および基礎工が水路壁に固定された条件で行われた津波越流時の堤体内の圧力変化に関する実験のうち、空気孔が設置されていない単純なケースを対象とした。

図-1に計算領域の概略図を示す。同図に示すように、移動床（中央粒径0.2 mm）の上に比高2.5 m、天端幅1.5 m、表法勾配2割、裏法勾配2割、被覆工の厚さ0.3 mの海岸堤防を設置し、その表法先および裏法尻には0.5 m角の基礎工、裏法尻の基礎工には長さ2.0 mの矢板を設置した。そして、表法先の基礎工の沖側面から1.612 m沖側での越流水深の最大値が1.0 mとなる流量を沖側境界から流入させた。

図-2に津波作用後の地形の比較を示す。同図より、裏法尻の基礎工のすぐ岸側と7.5 m <  $x$  < 10.0 mでの洗掘を若干過小評価しており、また研究開発期間1年目の場合と同様に最大洗掘深の発生位置が沖側に若干ずれているものの、最大洗掘深や洗掘範囲を含む洗掘の形状を概ね再現できていることが分かる。

図-3に地形変化の比較を示す。ここで、同図中の数字は水力実験における○印の各位置での洗掘時刻を表す。図-3より、裏法尻の基礎工近くの1.0 m <  $x$  < 4.0 mにおける洗掘の進展が若干遅いものの、 $t = 160$  sにかけて洗掘が進んでおり水力実験結果との対応が認められる。また、数値計算結果からは、 $t = 160$  s以降に洗掘の埋め戻りが生じたことも確認できる。

以上より、洗掘の進展が水力実験結果と比較して若干遅く、洗掘深を若干過小評価している箇所があるものの、開発したモデルの再現性を確認できた。

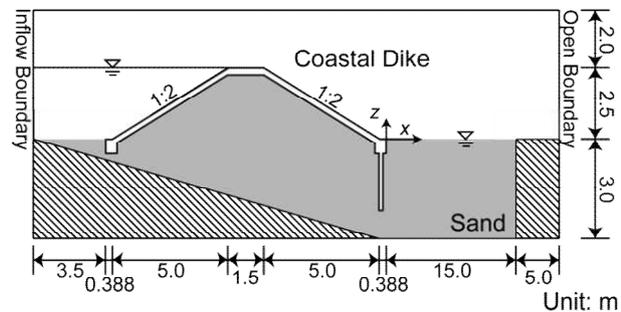


図-1 計算領域の概略図（国総研実施の水力実験）

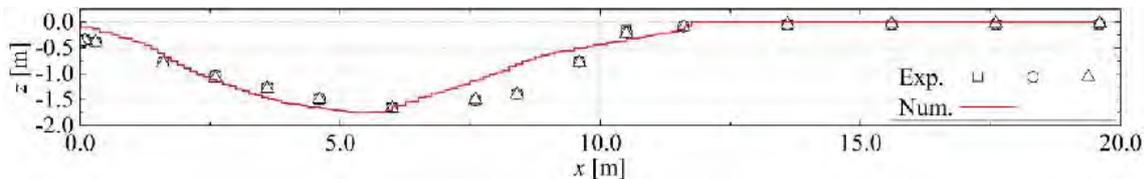


図-2 最終洗掘形状の比較

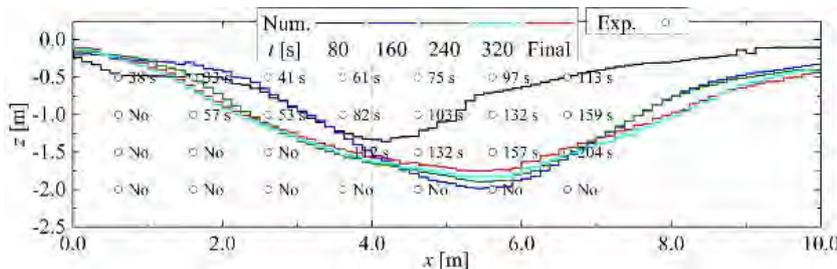


図-3 洗掘の発達状況の比較

### (2) 東日本大震災時に被災した海岸堤防への適用

東日本大震災時の津波により裏法尻に洗掘が確認された岩手県赤前海岸の海岸堤防を対象とした再現計算と、対策実施後を想定した数値実験を実施した。

計算領域の概略図を図-4に示す。同図に示すように、移動床上に岩手県赤前海岸モデル化した比高が6.63 m、裏法は現地と同じように階段状とした海岸堤防を設置した。堤防前面の水深は天端までの5.59 mとした。そして、表法尻での最大越流水深 $H_{max}$ が1, 2, 4 mとなるように沖側境界から与える流量 $Q$ を計算開始60秒後まで線形的に増加させ、600秒後

に  $Q = 0$  に戻るように  $Q$  を線形的に減少させた。また、現地地盤の中央粒径  $D_{50}$  と限界 Shields 数が与えられていないため、中央粒径  $D_{50}$  は 0.5, 1.0, 2.0 mm の 3 種類、限界 Shields 数は 0.05, 0.10 の 2 種類変化させた。

図-5 に  $H_{max} = 2$  m,  $D_{50} = 2.0$  mm, 限界 Shields 数 0.05 の条件における裏法尻付近の洗掘の発達状況を示す。また、同条件下での洗掘孔形状の時間変化を図-6 に示す。

図-5(a) に示すように、裏法面上を流下した流れの方向は裏法尻に達した後もほとんど変化せず、底面に沿って流れている。この流れにより、底面をえぐるように侵食が進んだ (図-6)。その後、 $x = 7$  m 付近の水面が大きく盛り上がり、沖側に向かって碎波が生じた。それに伴って裏法尻周辺の地盤表面付近に時計回りの渦が形成され (図-5(b))、その影響を受けて侵食の進行が一時的に収まった (図-6)。しかし、時間が経過するにつれ渦が裏法尻付近に小さく見られる程度になり (図-5(c))、跳水の下側に潜り込む底面に沿った流れ (潜り流れと呼ぶ) によって洗掘が岸側に拡大した (図-6)。その後、裏法尻付近に生じていた時計回りの渦が再び発達した (図-5(d))。これに起因して、洗掘孔の岸側では侵食が、裏法尻付近では若干の堆積が生じた (図-6)。そして、図-5(d) で見られた時計回りの渦が同図(e) に示すようにさらに発達し、岸側に大きく広がった。このとき、洗掘孔の岸側の侵食が一気に進むとともに、洗掘によって生じた浮遊砂が時計回りの渦によって洗掘孔の沖側に輸送され、裏法尻付近では洗掘孔の埋め戻しが生じた (図-6)。その後、前の過程で埋め戻された裏法尻付近が図-5(a) と同様に裏法面上を流下してきた流れによって若干侵食された (図-5(f))。そして、 $t = 560$  s 後以降は地形変化をもたらす流速は生じておらず、洗掘の発達は終了した (図-5(g))。

図-7 に  $H_{max} = 4$  m,  $D_{50} = 2.0$  mm, 限界 Shields 数 0.10 の条件における裏法尻付近の洗掘発達状況を示す。また、同条件下での洗掘孔形状の時間変化を図-8 に示す。図-7(a) に示すように、図-5 の場合と同様に、裏法面上を流下してきた流れの方向は裏法尻に達した後もほとんど変化せず、この流れにより底面をえぐるように侵食が進んだ (図-8)。また、このときの洗掘孔の幅および洗掘深は、 $H_{max}$  が大きい影響を受けて図-5 のほぼ同時刻と比較して大きいことが分かる。その後、 $x = 17$  m 付近の水面が盛り上がり、沖側に向かって碎波が生

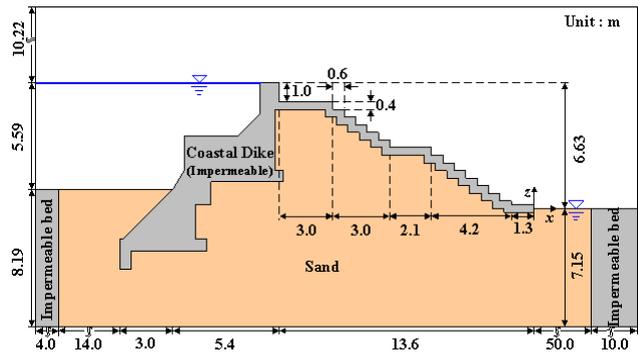


図-4 計算領域の概略図 (赤前海岸)

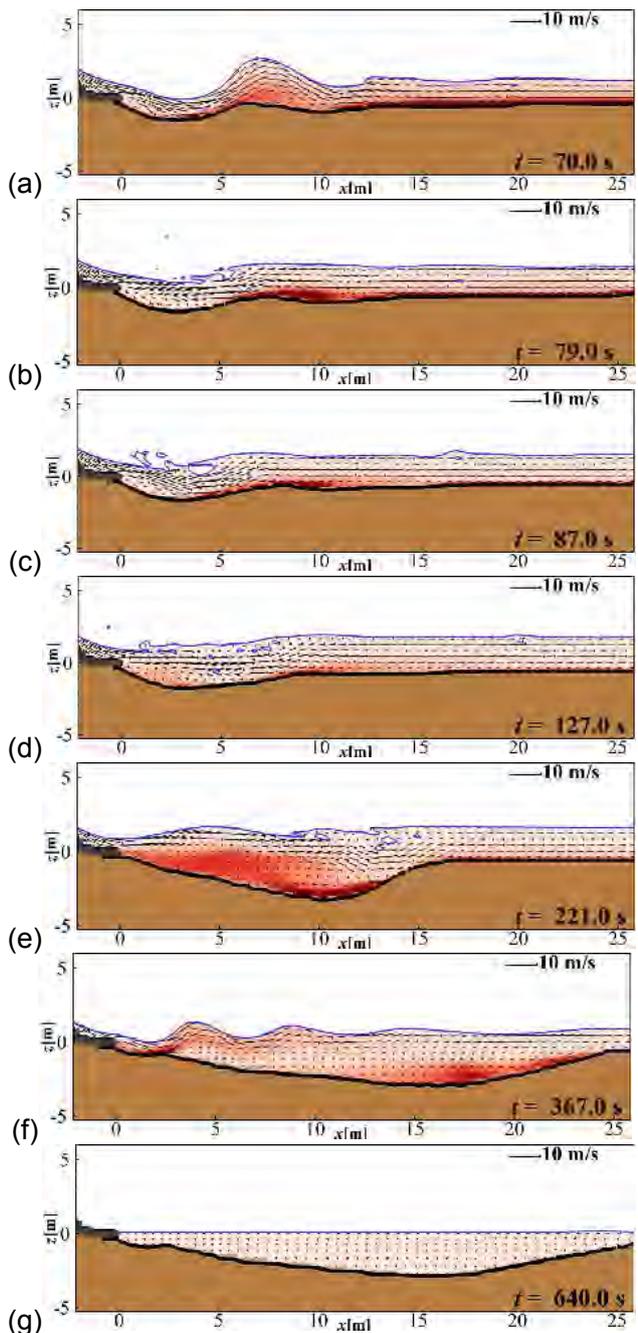


図-5 海岸堤防岸側の流動場の様子 ( $H_{max} = 2$  m)

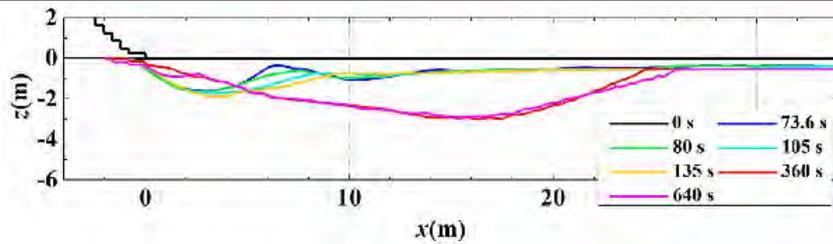


図-6 洗掘の発達状況 ( $H_{max} = 2$  m)

じた。それに伴って、裏法尻周辺の地盤表面付近に時計回りの渦が形成された (図-7(b))。そのため、侵食の発達が一時的に小さくなった (図-8)。しかし、時間が経過するにつれ渦が裏法尻付近に小さく見られる程度になり (図-7(c))、図-8に示すように潜り流れにより侵食が生じた。その後、越流水の流速が小さくなった影響を受けて、裏法尻付近に生じていた時計回りの渦が発達した (図-7(d))。このとき、洗掘が岸側に若干拡大したものの、洗掘深はあまり変化しなかった (図-8)。そして、 $t = 590$  s後以降は地形変化をもたらす流速は生じておらず、洗掘の発達は終了した (図-7(e))。

以上より、洗掘深と洗掘幅をともに増加させる効果がある潜り流れと、洗掘孔を岸側に拡大させる効果のある時計回りの渦の存在を確認した。また、時計回りの渦には堤体付近の洗掘を深くさせる効果は見られなかったため、潜り流れの時間を短くし時計回りの渦を早めに生じさせることが堤体の安定にとって好ましいと考えられることが分かった。

続いて、図-7, 8に示した $H_{max} = 4$  m,  $D_{50} = 2.0$  mm, 限界Shields数0.10の条件を対象に、対策工として裏法保護工、袋詰玉石、腰掛け部より上側または下側のパラペット (幅0.6 m, 高さ1.2 m)、落堀、二線堤の効果を検証した。ここで、裏法保護工は堤体裏法の一番下の段を10 m延長して設定した。袋詰玉石は、直径1.9 m, 高さ0.4 m, 中詰材の中央粒径 $D_{50} = 200$  mmの2 tの強化型フィルターユニットを海岸堤防背後の地盤表面にx軸方向に5個程度、z軸方向に3~4層設置した状況を想定して設定した。落堀の大きさは、図-8に示した津波作用後の洗掘孔形状を基に設定した。二線堤は、高さ3 m, 天端幅5 m, 勾配1/2とし、裏法尻から14 m離れた位置に設置した。

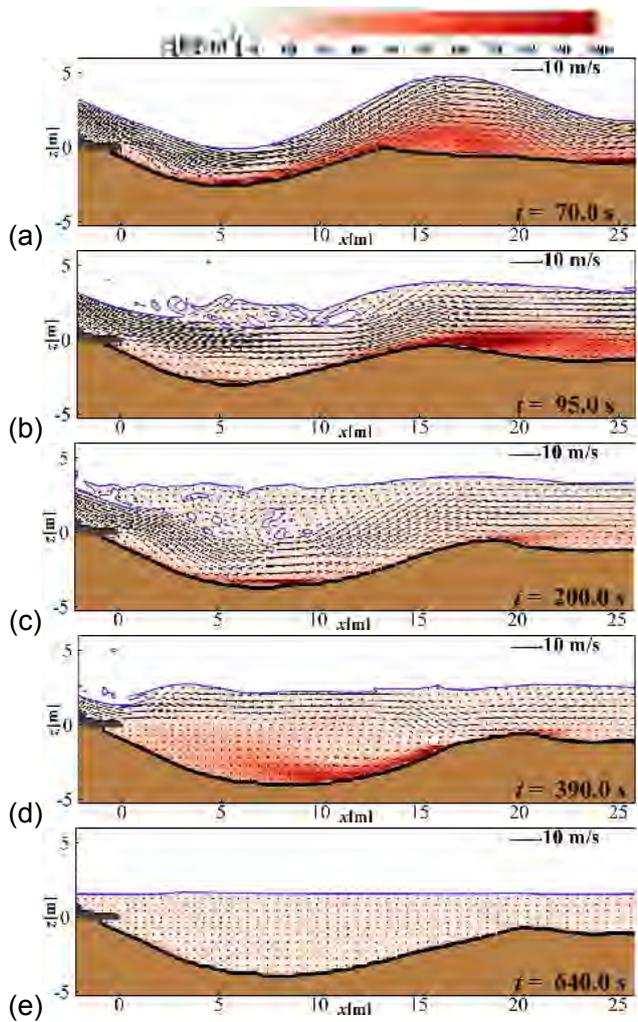


図-7 海岸堤防岸側の流動場の様子 ( $H_{max} = 4$  m)

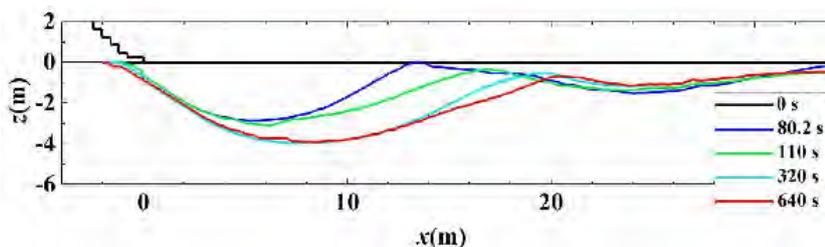


図-8 洗掘の発達状況 ( $H_{max} = 4$  m)

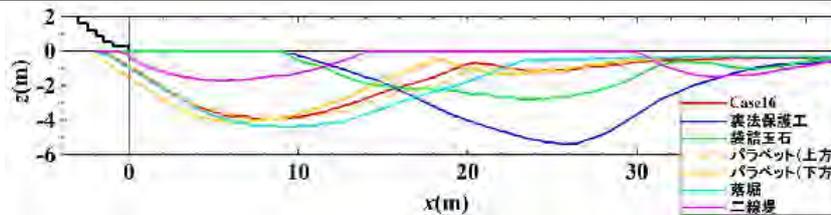


図-9 対策実施時の最終洗掘形状 ( $H_{max} = 4$  m)

各対策工実施時の津波作用後の洗掘孔形状を図-9に示す。同図より、裏法保護工や袋詰玉石を設置した場合には、洗掘が堤体から離れたところに生じるため、堤体本体が被災するまでの時間を延ばす効果が期待できることが分かる。また、対策工近傍の洗掘孔の傾きは未対策時よりも緩やかになっている。これは、図-10に例示するように砕波後すぐに時計回りの渦が発達したためである。さらに、袋詰玉石を設置した場合には、裏法保護工を設置した場合よりも最大洗掘深や洗掘幅が小さくなっており、堤体本体が被災するまでの時間をさらに延ばすことができると考えられる。落堀を設置した場合には、最大洗掘深と洗掘幅は未対策時と比較して大きくなっているものの、地形変化量は大幅に抑えられることが分かる。二線堤を設置した場合には、最大洗掘深と洗掘幅が大幅に抑えられることが分かる。その一方で、パラペットを設置した場合には、未対策時と比較して洗掘孔形状に大きな差は生じなかった。

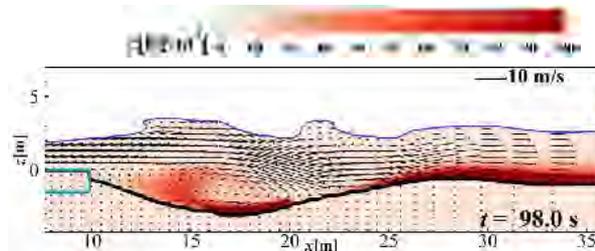


図-10 袋詰玉石（青枠部）設置時の流動場の様子 ( $H_{max} = 4$  m)

### (3) 主要な成果

以上の技術研究開発に加えて、被覆工を固定せず移動可能な状態とした縮尺1/40の水理実験を実施するとともに、水理実験結果との比較により開発した数値計算モデルの再現性を検証した。その結果、得られた主要な成果を以下にまとめる。

1. 開発した数値計算モデルを縮尺の異なる以下の4つの水理実験に適用し、水位変動、津波作用時の洗掘の進展、津波作用後の地形、被覆工上面での圧力変動、めくれが生じやすい状態にある被覆工の位置とその時刻の観点から同モデルの妥当性を確認し、堤防新設時の設計や既設堤防の補強の検討に適用できることを示した。
  - ・国土技術政策総合研究所にて実施された縮尺1/2および1/25の水理実験
  - ・名古屋大学にて実施した縮尺1/40の水理実験
  - ・東洋建設にて実施した縮尺1/100の水理実験
2. 洗掘を進行させる要因として、洗掘深と洗掘幅をともに増加させる効果のある潜り流れと、洗掘孔を岸側に拡大させる効果のある時計回りの渦の存在を確認した。また、時計回りの渦には堤体付近の洗掘を深くさせる効果は見られなかったため、潜り流れの時間を短くし時計回りの渦を早めに生じさせることが堤体の安定にとって好ましいと考えられることを示した。
3. 裏法保護工や袋詰玉石を設置すると早い段階での時計回りの渦の発達により堤体付近の洗掘深を抑えることができるため、また二線堤や落堀を設置すると越流水の流速の低減により潜り流れの影響を抑えられるために、裏法保護工、袋詰玉石、二線堤、落堀は洗掘対策として効果的であることを示した。
4. 越流の規模が小さい場合、越流水深が増加する際に裏法肩の被覆工のめくれが生じやすい状態にあることを確認した。一方、越流の規模が大きい場合、越流水深が増加する際には裏法尻の被覆工のめくれが生じやすい状態になっており、越流水深が減少する際には裏法肩の被覆工のめくれが生じやすい状態にあることを確認した。被覆工のめくれ対策として、越流の規模が小さい場合、天端の空気孔や堤体内部の二重矢板の設置によって被覆工の安定性が向上するものの、越流の規模が大きい場合にはその効果が確認できなかった。以上より、めくれが生じやすい状態にある被覆工の位置とその時刻や、被覆工のめくれ対策の効果は越流の規模の影響を受けることから、想定する津波の規模に応じた検討を行うことの重要性を示した。

## ⑦研究成果の発表状況

### 論文

- [1] Nakamura, T. and Mizutani, N. (2013): Sediment transport calculation considering laminar and turbulent resistance forces caused by infiltration/exfiltration and its application to tsunami-induced local scouring, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, Vol. 136, No. 1, pp. 011105-1-011105-9.
- [2] 中村友昭, 根笹裕太, 水谷法美 (2014) : 津波の作用と洗掘の発生に伴う陸上構造物の移動とその対策法に関する研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I\_331-I\_336.
- [3] 中村友昭, 水谷法美 (2014) : 海岸堤防を越流する津波と裏法尻の洗掘に関する数値解析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I\_516-I\_521.
- [4] 中村友昭, 根笹裕太, 小竹康夫, 水谷法美 (2014) : 海岸堤防を越流する津波による洗掘の発生機構と被覆工の安定性に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I\_501-I\_505.
- [5] 中村友昭, 根笹裕太, 水谷法美 (2014) : 津波の越流に対する海岸堤防の対策法の有効性に関する数値解析, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I\_956-I\_960.
- [6] Nakamura, T. and Mizutani, N. (2014): Sediment transport calculation considering unresolved scales of turbulence and its application to local scouring due to tsunami run-up, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, ISOPE, Vol. 24, No. 4, pp. 269-277.

### 研究発表

- [1] Nakamura, T. and Mizutani, N. (2014): Development of fluid-sediment-seabed interaction model and its application, *Proc., 34th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, No. 34, E93.
- [2] 中村友昭, 根笹裕太, 小竹康夫, 水谷法美 (2014) : 津波の越流による海岸堤防周辺の局所洗掘現象に関する一考察, 混相流シンポジウム2014, B151, 2 p.
- [3] 中村友昭, 根笹裕太, 小竹康夫, 水谷法美 (2014) : 海岸堤防を越流した津波による裏法尻の洗掘と堤体内部の圧力変動に関する一考察, 土木学会第69回年次学術講演会, II-030, pp. 59-60.
- [4] 日比野加奈, 趙 容桓, 中村友昭, 水谷法美, 小竹康夫 (2015) : 東北地方太平洋沖地震津波による海岸堤防裏法尻の洗掘に関する数値解析, 平成26年度土木学会中部支部, II-1, pp. 71-72.
- [5] 峯浦 亮, 中村友昭, 水谷法美 (2015) : 津波越流による海岸堤防被覆ブロックの被災に関する一考察, 平成26年度土木学会中部支部, II-2, pp. 73-74.

## ⑧研究成果の社会への情報発信

学会での公表による関係者への成果の周知に加え, 水谷は津波防災関連の講演会などで積極的に紹介した。また, 水谷と中村は建設技術フェア2014 in中部 (下記URL参照) にて開発した数値計算モデルの公開を行った。

<http://www.kgfair-chubu.com/>

## ⑨表彰、受領歴

- [1] 優秀研究発表賞 (中村友昭), 平成25年度土木学会中部支部研究発表会, 津波の越流による海岸堤防背後の洗掘の再現計算について, 2014年5月12日。

## ⑩研究の今後の課題・展望等

本技術研究開発では、開発した数値計算モデルの妥当性を縮尺1/2～1/100の水理実験への適用を通じて検証した上で、東日本大震災時に実際に被災した赤前海岸、金浜海岸（岩手県）、名取海岸、岩沼海岸（宮城県）の4つの海岸堤防を対象とした数値実験と、それらの海岸堤防の被災前の断面を対象に対策工の効果を検討する数値実験を実施し、現地への適用可能性を示した。ただし、堤防新設時の設計時や既設堤防の補強検討時に実際に適用した実績はないことから、今後、実務への適用に尽力するとともに、その適用を通じて数値計算モデルの高度化、使い勝手の良さの向上等、改良を進める必要がある。また、被覆工下面での圧力変動、地盤内部の間隙水圧変動、基礎工すぐ岸側での洗掘深については再現性が十分とは言えないことから、盛土内部の不飽和状態を考慮できるようにする等の数値計算モデルの高度化を行うとともに、現地への適用時には得られるデータが限られているため、モデル使用時の設定値の基準について検討が不可欠である。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

共同研究者の東洋建設・小竹と建設技術研究所・今井および志田と協働し、水谷と中村は本技術研究開発の成果を官・民に積極的に紹介し、その成果の普及に努める。具体的な河川砂防行政への反映の実績はまだないものの、今後はメンバーの関連企業や業務上関係の深い企業を中心に成果の普及に努める。その際、水谷と中村は、国の機関や自治体の地震・津波対策関連委員会等において可能な範囲で関係者に成果の紹介を積極的に行い、粘り強い海岸堤防の実現に向けて本技術研究開発の成果の普及に努める。また、小竹と今井および志田は、業務の中でクライアント等へ積極的に紹介し、実務への展開を積極的に行う。そして、以上を通じて得たフィードバックを基に開発した数値計算モデルの精度、汎用性、使い勝手の良さをさらに向上させるとともに、河川砂防行政を始めとした実務への反映に尽力する。