

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>① 研究代表者</b>	氏 名 (ふりがな)	所 属	役 職	
	岡村 未対 (おかむら みつ)	愛媛大学大学院	教授	
<b>② 研究 テーマ</b>	名称	河川堤防の複合外力に対する総合的安全性点検のための解析手法と対策工法に関する技術研究開発		
	政策 領域	[分野] 河川技術分野	融合 技術	
		[公募課題] 河川堤防の安全対策に関する技術研究開発		
<b>③ 研究経費</b> (単位: 万円) <small>※端数切り捨て。</small>	平成 年度	平成 年度	平成 年度	総 合 計
	1, 646	1, 688	1, 646	4, 980
<b>④ 研究者氏名</b>				
氏 名	所 属 ・ 役 職 (※平成27年3月31日現在)			
渦岡 良介	徳島大学大学院・教授			
泉 典洋	北海道大学大学院・教授			
前田 健一	名古屋工業大学大学院・教授			
高橋 章浩	東京工業大学大学院・教授			
佐々木 哲也	土木研究所地質・地盤研究グループ・上席研究員			
新清 晃	応用地質株式会社エンジニアリング本部・部長			
<b>⑤ 研究の目的・目標</b>				
<p>円弧滑りやパイピング、基礎地盤の液状化に加えて、近年では新たな堤防の破壊メカニズムが明らかになっている。例えば、堤体内部の間隙空気圧上昇による堤体不安定化、水位上昇・下降の繰返し履歴による内部侵食の促進、地震時の堤体自体の液状化と地層構成の変形量への影響、地震動継続時間や繰返し回数、余震の影響、等である。</p> <p>本研究では、3年間の研究では次のことを目標とした。</p>				
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 現状の評価法では適切に考慮されていない上記要因の影響を、模型実験や現地調査により定量的に明らかにする。</li> <li>2. それらの影響を考慮し、外力の複合作用に対する堤防の応答を評価できるよう解析法を高度化するとともに、実務的な安全性評価手法の改良・開発を行う。</li> <li>3. 堤体内液状化の評価に必要な堤体土質と水位の簡便な調査法を開発・実用化する。</li> <li>4. 複合作用に対する既存対策工法の効果を検証すると共に、新たな対策工法を検討する。</li> </ol>				

## ⑥ 研究成果

### ■ 降雨・高水・越水による堤体の変形・破壊挙動

- 内部浸食が粒度分布形状に支配されるとともに、浸透履歴の影響を強く、高水位履歴によって土が劣化を受けることを明らかにした。砂質土の内部浸食性を、修正した曲率係数と粒度分布形状から簡単に評価する方法を提案した。また、内部浸食を受ける粒子径を平均配位数から予測できることを明らかにした。さらに、内部浸食に伴う土の変形・破壊挙動モデルを構築し、塑性変形として計算可能にするとともに、内部浸食による強度低下の予測方法も示した。

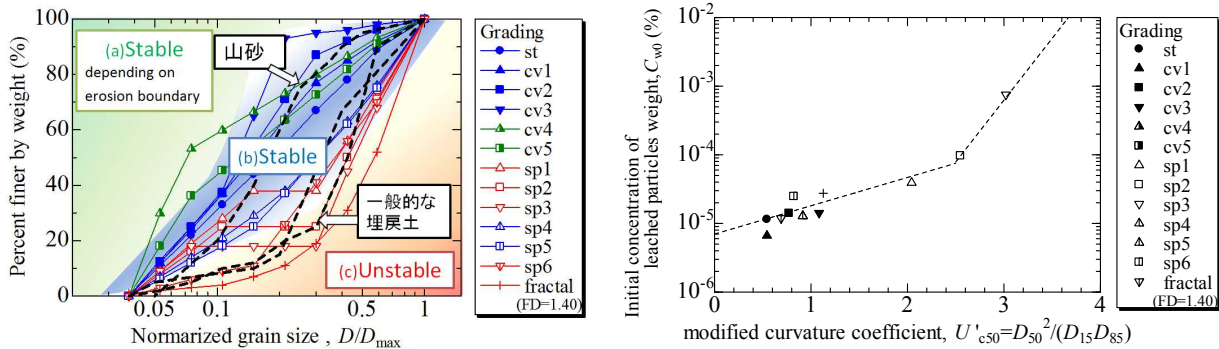


図 1 (左)粒径加積曲線の全体形状による内部浸食に対する安定性の判定基準, (右) 内部浸食速度の修正曲率係数による推定

- 豪雨および急激な河川水位上昇を受けた場合、間隙空気が噴出し、堤防を内部から劣化させるエアブロー現象の発生を明らかにした。模型実験と不安定性解析理論から、豊浦砂のような均等係数の小さな砂質土では、降雨強度が小さい場合には浸潤線は下から上に移動するが、豪雨時には表層から浸潤域が発達し、間隙空気を封じこめること、まさ土のように透水性係数 $10^{-3}\text{cm/s}$ 以下で均等係数が大きく細かな粒子が多いほど空気を封入すること、を明らかにし降雨浸透モードの発生条件を定量的に明らかにした。エアブローを考慮したシナリオベースの評価方法の考え方を従来の設計を用いて提案した。
- 高水が継続した際の、堤体漏水と基盤漏水の発生条件を検討した。特に、矢部川の決壊事例を中心に、従来は明らかになっていなかったパイピングの主要な発生、進展条件を明らかにした。基盤層の土質、層構造と被災形態の関係を整理し、従来の局所動水勾配だけでなく漏水速度を考慮した安全性評価方法を提案した。

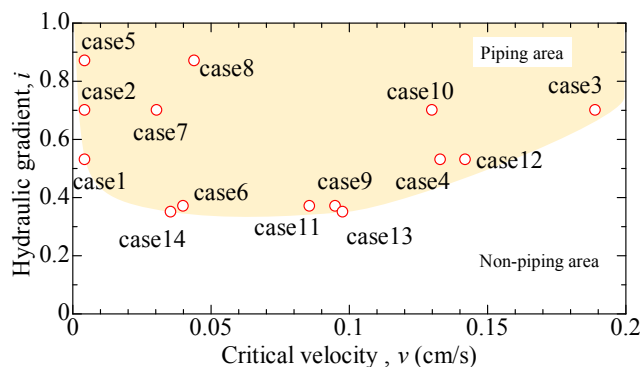


図 2 流速を考慮したパイピング条件: 透水性基盤に作用する平均動水勾配と平均的漏水流速

- 洗掘現象について、掃流力に加え地盤表層における開水路流れと地盤内浸透流の流速差や、越流水の衝突に起因する地盤内水圧変化が地盤を劣化させることを明らかにし、その評価式を提案した。
- 土-水-空気の三相連成において、豪雨浸透、高水位継続による、堤体漏水に起因するすべり破壊、透水性基盤のパイピング破壊（空洞化、閉塞、変形や流れの局所化、法の崩落、すべり破壊）、越流、洗掘までの一連の現象を連続的に表現可能な数値計算手法を提案した。

⑥研究成果 (つづき)

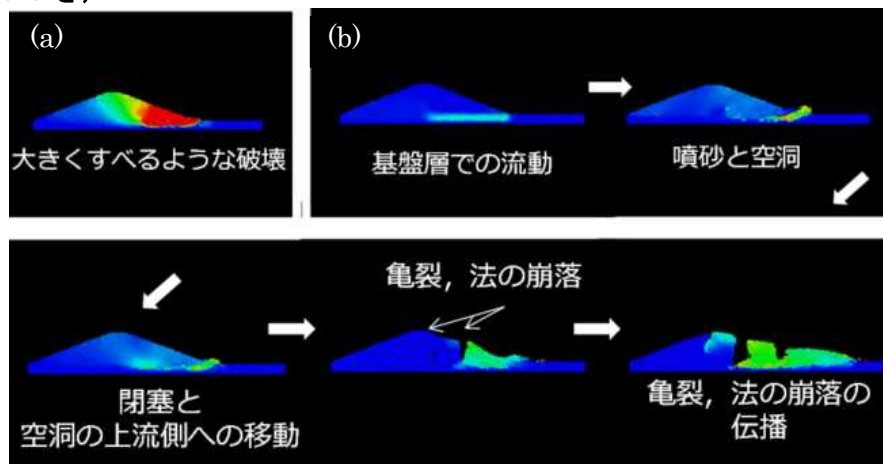


図 3 基盤漏水事例において堤体強度特性が異なる場合の破壊挙動；(a)堤体の粘着力が小さい場合、(b)堤体の粘着力が大きい場合

■堤体内液状化破壊メカニズム

- 堤体内液状化とそれによる堤防被災メカニズムを、遠心模型実験によって調べた。基礎地盤の圧密沈下は盛土の変形を引き起こし、盛土中央の底部付近の土は密度の低下を起し水平応力も低下するため、液状化強度が低下し、基礎地盤の圧密沈下量が大きいほど密度低下への影響は顕著であることがわかった。これにより、通常は土被り圧が小さな法尻が液状化しやすいところ、天端直下が先に液状化する場合があります、被災現場で見られる異なった被災パターンが現れることを明らかにした。

■堤体内液状化判定法

- 2011 年東北太平洋沖地震で堤体内液状化によって被災した堤防、及びその周辺の無被災の堤防について、道路橋示方書の液状化判定法は過度に安全側の結果を与える。これは、比較的薄い堤体内飽和層からは地震中の短時間内にもある程度の排水が生じるためと考えられる。比較的薄い砂層の地震中の排水による液状化強度増加の評価法を確立し、排水の影響を考慮した液状化判定を構築した。
- また、2011 年東北太平洋沖地震により被災した東北地整管内の堤防を分析し、堤防天端沈下量の上限值を簡易に予測する方法を検討した。

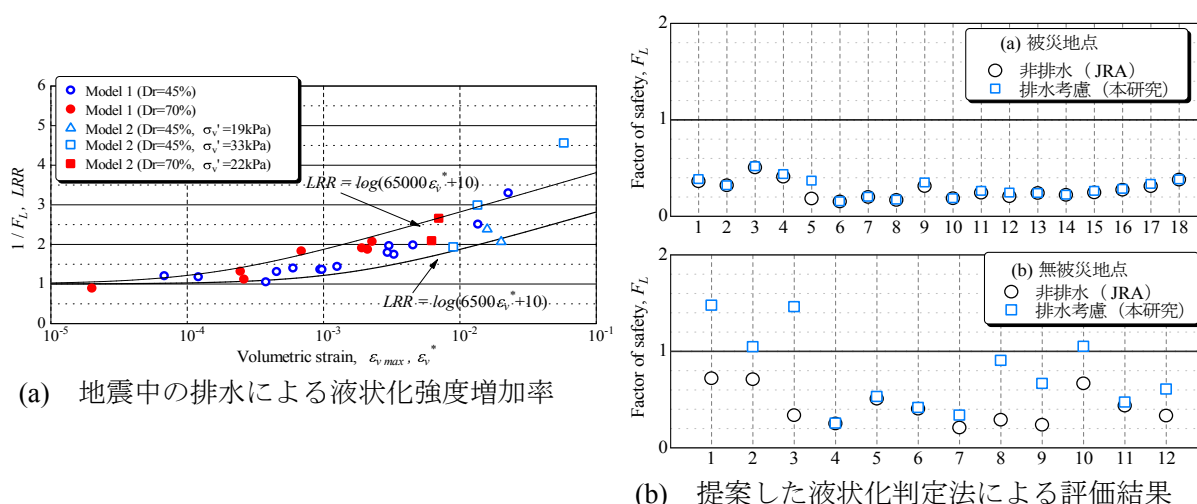


図 4 排水を考慮した液状化判定法

■堤防の地震時沈下量評価法

- 基礎地盤及び堤体内液状化による堤防の沈下挙動を統一的に精度良く評価するため、不飽和土の弾塑性構成式を組み込むなど改良を行った解析法を構築した。これを用い、実堤防事例や模型実験の

## ⑥研究成果（つづき）

堤防断面を対象として数値解析による地震時変形量の再現解析を行うことにより、解析法の妥当性を検証した。

- 堤防には天端を中心とするくさび形の領域が形成される破壊メカニズムが再現できた。このメカニズムでは、法面下部では液状化には至っていないものの、法面下で大きなせん断変形が生じることで堤防天端の沈下が発生していることがわかった。また、地震前の基礎地盤の変形が大きい場合、堤体下部では拘束圧が通常の自重解析から算定される値よりも小さくなり、これが破壊メカニズムや沈下量に影響することを明らかにした。

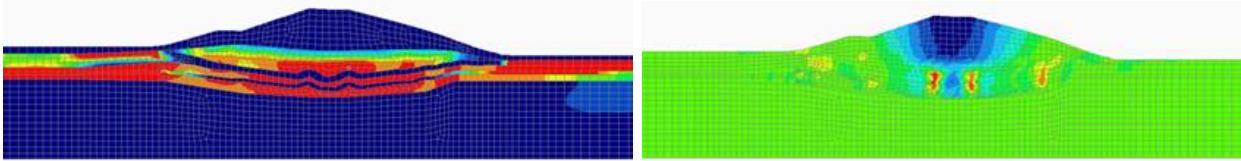


図 5 解析結果：(左)地震後の過剰間隙水圧分布，(右)地震後の鉛直変位分布で、現場で見られた天端のみ陥没する被災モードが再現できている

- 実務では無視されることが多い薄い不連続な粘土シーム層が堤防の地震時沈下挙動について遠心模型実験および数値解析によって調べた。難透水層が水平方向に不連続に介在する砂質土層では、局所的な浸透流が発生し、難透水層直下や、難透水層分断箇所直上の砂質土層内で、大きな過剰間隙水圧やせん断ひずみが発生し、基礎地盤の側方への変形を促進するため、特に継続時間や繰り返し回数が長い地震や余震で堤防の沈下量が大きくなることがわかった。またシーム層の深度や不連続の位置により天端沈下量や変形モードが異なることを明らかにした。

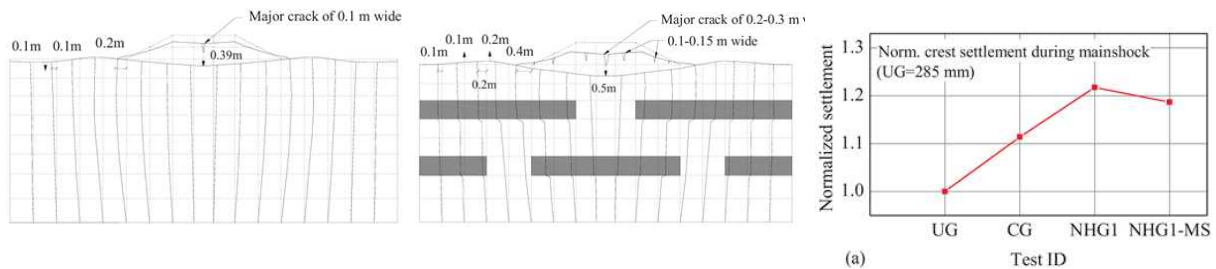


図 6 薄い不連続粘土シームが地震時沈下量に及ぼす影響：(左)一様な液状化地盤，(中)不連続粘土シームを含む液状化地盤，(c)不連続粘土シームの存在による沈下量の増加

## ■堤体内水位の原位置調査法

- 堤体内の液状化判定には堤体内の水位測定が必要である。そこで効率よく P 波を発生する装置と屈折波を利用した地下深度の特定法を開発し、地表面下 7m 程度の深度までの地下水位を精度良く特定する方法を確立した。この方法は、現地作業時間が数時間以内であり、大幅な時間短縮も達成した。また、比抵抗コーンによる方法も併せて開発した。
- P 波コーンおよび比抵抗コーンを用いた堤体内水位の特定法のマニュアルを作成した。

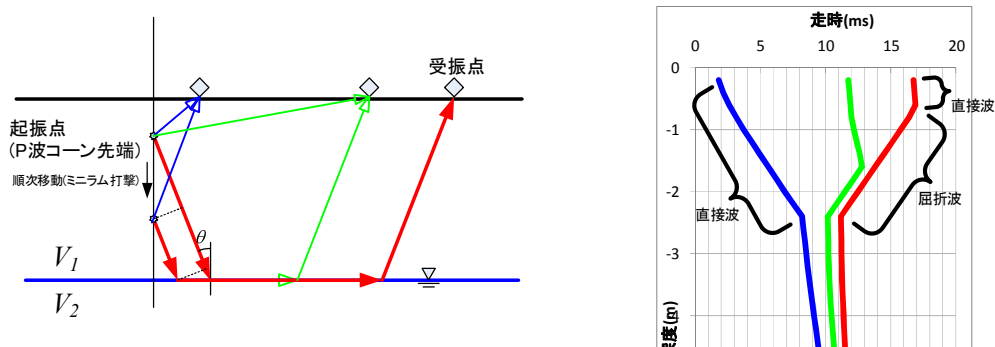


図 7 P 波コーンによる原位置調査法：(左)直接波と屈折波の到達経路と(右)走時

## ⑥ 研究成果（つづき）

### ■ 降雨・高水・越水に対して有効な対策工法の検討

- ・法尻にドレーン工を設置した単一の浸透対策工では、従来から言われているように、河川水位上昇に伴う浸透に対して、ドレーン部からの排水により堤体内の水位が低下する効果が確認された。また、降雨時においても、ドレーン工を併用することで、堤内側法尻部の間隙水圧を減少させ、さらに浸潤化を遅らせる効果が見られた。一方で、堤外と堤内で計測される排水流量が異なっており、この結果から堤外側に降った雨が堤内側に引き寄せられるような浸透が発生していると思われる。浸透水の集中は土粒子の移動を招き得るので、目詰まりなどドレーンの機能や堤体土の劣化の検討が必要と考えられる。
- ・ドレーンと通気防水シートとの複合型堤防の場合、通気防水シートのみ比べて堤体内に入った浸透水を速やかに排水し、堤防内水位の増加を抑えるため、堤体の変状モードを制御しやすく、ねばり強くすることが可能と考えられる。

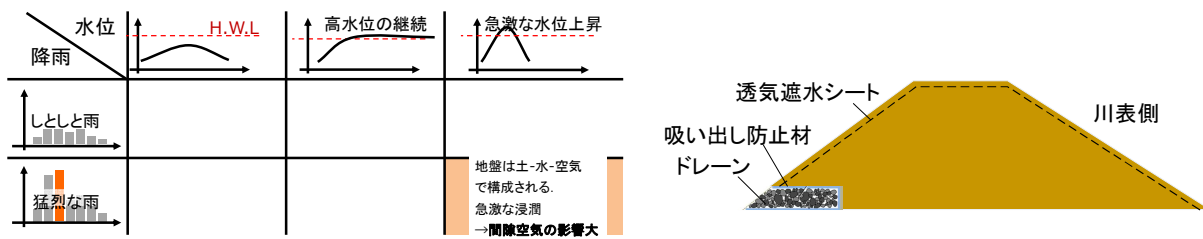


図 8 降雨と外水の複合作用に効果的な対策工

### ■ 堤体内液状化に対して有効な対策工法の検討

- ・押え盛土工およびドレーン工を組み合わせることで、堤体の液状化に伴う法尻の水平変位を抑え、天端の沈下量および天端の縦断クラックが抑制されることを確認した。対策工の寸法と対策効果の間には明確な関係が認められ、対策工が堤体に与える水平抵抗力を適切に設定することにより堤体の沈下量や変形量を制御できることを明らかにした。
- ・ドレーン工を設置したとしても、ドレーン工から数m離れると液状化が生じており、法尻にドレーン工を設置するだけで堤体内での液状化の発生を抑制するのは難しい。ドレーン工はあくまでも法尻の安定化によって堤体の変形抑制に寄与すると考えられる。法尻の対策工によって堤体の全体的な変形が抑制され、天端沈下は低減されるものの、押え盛土工の天端付近やドレーン工の上部の堤体には局所的に縦断クラックが発生した。このような縦断クラックの発生を抑制するためには、法尻対策に加えて十分な締固めを行う等の対策を併せて講じる必要がある。

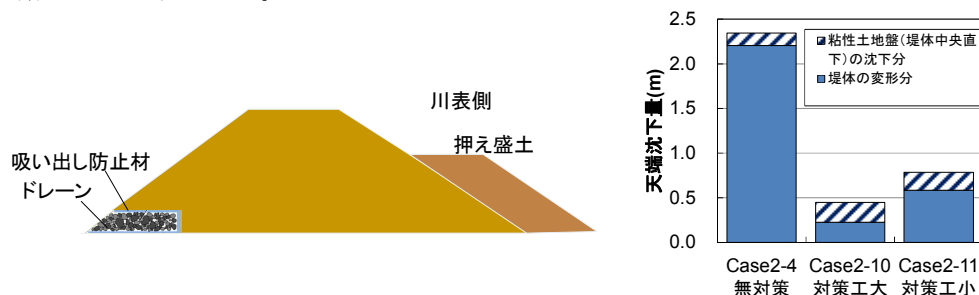


図 9 堤体内液状化および地盤浅部液状化に効果的な対策工

## ⑦研究成果の発表状況

### ・これまでに発表した代表的な論文

- 齊藤啓, 前田健一, 榊尾孝之, 松田達也: 豪雨と急激な水位上昇が作用する堤防の透気遮水シートおよびドレーンによる補強効果, ジオシンセティクス論文集第29巻, 115-120, 2014.
- 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 (2014) No. 2 p. I\_1041-I\_1045.
- Zhang W. and Maeda, K.: Numerical simulations of slope and levee failure under heavy rainfall using the three-phase SPH model, 土木学会論文集A2, Vol.70, No.2, I\_483-I\_494, 2014.
- 前田健一, 近藤明彦: 粒度分布形状に起因する内部浸食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.70, No.2, I\_507-I\_517, 2014.
- Zhang, W. and Maeda, K.: The model test and SPH simulations for slope and levee failure under heavy rainfall considering the coupling of soil, water and air, Soil Behavior and Geomechanics, ASCE, GSP 236, 538-547, 2014.
- K.Maeda and A. Kondo: Micro and macro modeling of ground depression due to internal erosion, ASCE, Soil Behavior and Geomechanics, GSP236, pp.445-455, 2014.
- Maharjan, M. & Takahashi, A.: Liquefaction-induced deformation of earthen embankments on non-homogeneous soil deposits under sequential ground motions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 66, 113-124, 2014.
- Uzuoka, R. and Semba, K.: Numerical analysis of liquefaction in a river levee on soft cohesive ground, Journal of Disaster Research, 7(6), 711-717, 2013.
- 泉 典洋, 前田健一: 浸透層内におけるRayleigh-Taylor不安定, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 69, No.2, p.I\_545-I\_551, 2014.
- Mitsu Okamura, Shuji Tamamura and Rikuto Yamamoto: Seismic stability of embankment subjected to pre-deformation due to foundation consolidation. Soils and Foundations, 53(1), 11-22, 2013.

### ・国際会議、学会等における発表状況

- Maeda, K. and Matsuda, T.: Geoengineering Computing for Ductility against Multiple-Consecutive External Actions, Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, , 99.386-389, 2014.4.13-16.
- K. Maeda, A. Kondo & D. Muir Wood: Micro and macro modeling of internal erosion, International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, IS- Cambridge 2014, 2014.9.1-4.
- W. Zhang & K. Maeda: SPH simulations for slope and levee failure under heavy rainfall considering the effect of air phase, 14th IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics), pp.1465-1470, 2014.
- T. Imase, K. Maeda & Y. Ito: Scour of the sandy soil with dynamic interactions among soil-water-gas due to tsunami, 14th IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics), pp.1517-1522, 2014.
- K. Maeda & A. Kondo: Instability modelling caused by internal erosion with changing grading, 14th IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics), pp.1505-1510, 2014.
- Maharjan, M. & Takahashi, A., Numerical analysis on effects of non-homogeneity in the liquefaction-induced deformation of embankments, Proceedings of International Symposium Geohazards: Science, Engineering and Management, Kathmandu, Nepal, Paper ID: EQ-01, 14-26, 2014.
- Ziotopoulou, K., Maharjan, M., Boulanger, R.W., Beaty, M.H., Armstrong, R.J. & Takahashi, A., Constitutive modeling of liquefaction effects in sloping ground, Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, USA, Paper ID: 1159, 2014.
- Maharjan, M. & Takahashi, A., Numerical simulation of liquefaction-induced deformation of embankments on non-homogeneous foundation, Proceedings of the 8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, 1141-1146, 2014.
- Ikami, Y., Shimokawa, T. and Uzuoka, R.: Centrifuge Modeling for Moisture and Stress Conditions in an Embankment with Deformation of Foundation Ground, 5th KGS -JGS Geotechnical Engineering Workshop, Seoul, 434-439, 2013.
- Uzuoka, R. and Ikami, Y.: Dynamic Analyses of Deformed Embankments due to Foundation Consolidation, The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, Sendai, 2014.
- Ikami, Y., Shimokawa, T., Uzuoka, R.: Centrifuge modeling and finite element analysis for moisture and stress conditions in an embankment with deformation of foundation ground, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics - Proceedings of the 14th Int. Conference of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, IACMAG 2014, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (Eds.), Kyoto, 1049-1054, 2014.
- 岡村未対・林秀太朗: 薄い砂層の液状化判定法に関する研究, 第14回地震工学シンポジウム, pp. 2427-2436, 2014.
- M. Okamura and S. Hayashi: Damage to river levees by the 2011 Off the Pacific Coast Tohoku earthquake and prediction of liquefaction in levees, Geotechnics for Catastrophic Flooding Events, Taylor & Francis Group, pp. 57- 67, 2014.

### ・企業とのタイアップ状況

- 堤体内地下水水位の原位置調査法については、応用地質株式会社と意見交換を行っている。
- 透気遮水シートの開発については、太陽工業株式会社と意見交換を行っている。
- 新たな液状化対策工法の開発については、ゼネコン、地盤調査会社、鉄鋼協会と意見交換を行っている。

## ⑧研究成果の社会への情報発信

なし

## ⑨表彰、受領歴

Best Student Award : Seismic response of non-homogeneous soil deposits: centrifuge modeling, 第7回アジア地域若手地盤工学会議, M.Maharjan, A.Takahashi.

平成24年度地盤工学会中部支部支部賞（論文賞）：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, 伊藤嘉, 前田健一

## ⑩研究の今後の課題・展望等

豪雨浸透, 高水継続に対する堤防の応答をより正確に知るためには, 本研究で得られた結果を基に, 外力特性と地盤特性を一体とした三次元的破壊形態と発生, 発達条件の検討, パイピング, すべり, 法面の崩落などの複合的な破壊の把握, パイピングの発展による透水性基盤の浸食速度と外力波形のダイナミックな相互作用と破壊程度の予測を詳細に行う必要がある。また, 上記の知見の蓄積と同時に高密度・リアルタイムでの堤体変状把握や漏水特性の把握の方法やシステムの開発と, それらの蓄積による早期変状予測と内部構造の推定方法の開発によって, 飛躍的に河川堤防管理の質が向上する可能性があると考えられる。

堤防の耐震性については, 堤体直下に存在する液状化層の強度分布により破壊メカニズムが異なることが明らかとなった。対策工の設計では, 破壊メカニズムに応じた対策工の選択と, 対策効果を適切に評価できる手法が必要である。種々の地盤条件に対応できるよう対策工法の種類を増やし設計法を開発し, また実務的な変形評価方法を開発することで, より効果的な耐震対策が実現できるものと考えられる。

現在の解析技術では, 堤体の変形予測精度は必ずしも高くないため, 今後も継続して改良する努力が必要である。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究で開発された以下の技術は以下の指針やマニュアルに取り入れられる見込みである。

「河川堤防耐震性能照査指針」

- ・堤体内液状化判定法
- ・耐震点検の1次スクリーニング法（簡易地震時沈下量評価法）

「河川堤防耐震対策設計施工マニュアル」

- ・堤体内液状化への耐震対策工法