

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21360220

研究課題名（和文） 天然ダムの浸透・越流時の進行性破壊現象の解明とその予測

研究課題名（英文） Mechanism of progressive failure of landslide dam during seepage and overtopping

研究代表者

渦岡 良介 (UZUOKA RYOSUKE)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：40333306

研究成果の概要（和文）：

地震や豪雨による斜面崩壊によって発生した天然ダムによる河道閉塞を対象として、降雨や上流側の堰止湖の水位上昇に伴う浸透および越流に対する天然ダムの進行性破壊現象の解明を目的とする。現地調査、模型実験および数値解析の結果、天然ダム堤体の内部構造、堤体材料の外部侵食特性、堤体内部の内部侵食過程、浸透・越流時の天然ダムの安定性に与える指標などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Mechanism of progressive failure of landslide dam during seepage and overtopping was discussed through in-situ tests, model tests and numerical analyses. The results showed the internal structure of landslide dam, external erosion properties of dam material, internal erosion process of dam, stability index of dam during seepage and overtopping.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	11,100,000	3,330,000	14,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤防災、天然ダム、浸透、越流

1. 研究開始当初の背景

2004年新潟県中越地震、2008年四川（Wenchuan）地震、2008年岩手・宮城内陸地震などの山間地で発生した直下型地震では、河川沿いの斜面が崩壊し、大小様々な規模の天然ダムが発生した。天然ダムの発生により最も問題となるのは、河道閉塞によって発生する堰止湖の水が天然ダムの決壊により下流域に流出することである。天然ダムの形状や土質は、その発生源となる斜面崩壊地の岩質・土質や原河道の形状に依存する。原河道

の傾斜が比較的緩く、斜面崩壊の規模が河道の断面に対して比較的大きい場合は天然ダムが形成され、人工ダムと同様に天然ダム上流域での集水面積が広く、天然ダムの規模が大きいほど、貯水量の大きな堰止湖が形成される。このような天然ダムは、その全てが不安定で決壊の危険性が高いわけではなく、ダムの堤高や貯水量などを指標とした経験的な安定性評価手法が提案されている¹⁾が、その合理的な安定性評価手法は確立されていない。実際、2008年岩手・宮城内陸地震では大小合

わせて 30 箇所を超える天然ダムが発生した²⁾が、地震後の降雨に伴う堰止湖の水位上昇により決壊した天然ダムもあれば、越流はしたものの越流水路が自然河道となりその後は安定している天然ダムもある。

2. 研究の目的

様々な形状や土質構成をもつ天然ダムの浸透・越流に対する安定性を検討するには、地盤工学の知見の応用が必要である。図 1 に示すように浸透・越流に対して天然ダム内部の状態は刻々と変化し、その破壊域が徐々に拡大するような進行性破壊の性状を示す。したがって、河川堤防の浸透・越流予測³⁾にみられるように、天然ダムの安定性評価問題を土骨格・間隙水・間隙空気の間隙問題の初期値・境界値問題として捉え、不飽和土の物理・力学特性および越流水の水力特性を適切にモデル化した予測法を確立する必要がある。

本研究では、近年蓄積されつつある不飽和土の物理・力学特性に関する知見をベースに、天然ダムの進行性破壊現象を明らかにすることを目的として、現地調査、模型実験および数値解析を実施する。これらの結果に基づき、天然ダム堤体の内部構造、堤体材料の外部侵食特性、堤体内部の内部侵食過程、浸透・越流時の天然ダムの安定性に与える指標などを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 天然ダムの現地調査と堤体土の特性

2008 年岩手・宮城内陸地震で発生した湯ノ倉温泉地区の天然ダムを対象として、天然ダム堤体の原位置試験や攪乱試料を用いた土質試験を実施し、合理的な天然ダムの安定性評価手法構築のための基礎資料を得る。

湯ノ倉温泉地区の崩壊土は左岸斜面の山頂付近の溶結凝灰岩とその下の凝灰岩からなる。崩壊部の上端は標高 660m 付近であり、標高 370m 付近を流下する一迫川まで、最大で標高差 290m を流下したことになる。天然ダムを構成している土には $\phi 1\text{m}$ を越える巨レキや倒木も多くみられるものの、凝灰岩が風化あるいは破碎した土砂も含まれている。

旧地形と地震後のレーザープロファイラ (LP) から得られた DEM より推定した天然ダムの縦断面図を図 2 に示す。

天然ダム堤体内の崩壊土の堆積状況を把握するため、2009 年 10 月に機械ボーリング、現場透水試験、孔内水平載荷試験、PS 検層および表面波・電気探査を含む原位置試験を実施した。ボーリングおよび表面波・電気探査の調査位置を図 3(a) に示す。ボーリング調査位置は天然ダムを侵食してできた現在の河道の左岸側の成形された斜面に位置しており、地震前の地形図 3(b) に示すように概ね旧河道上に位置しており、孔口標高は 395m である。

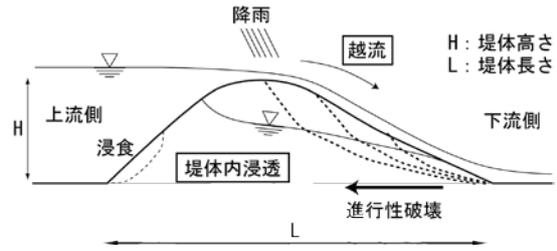


図 1 天然ダムにおける浸透・越流現象



図 2 湯ノ倉温泉地区の天然ダムの縦断面

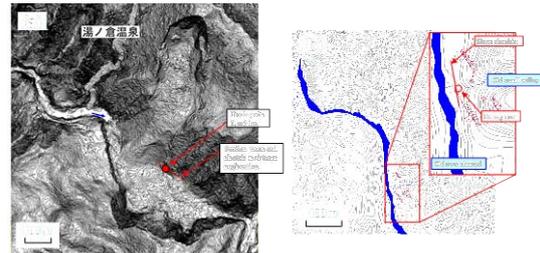
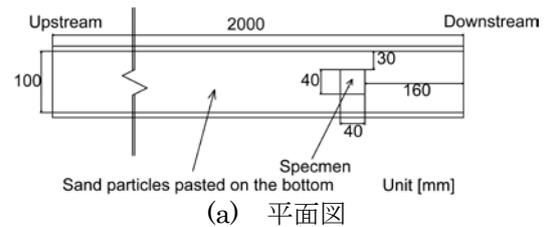
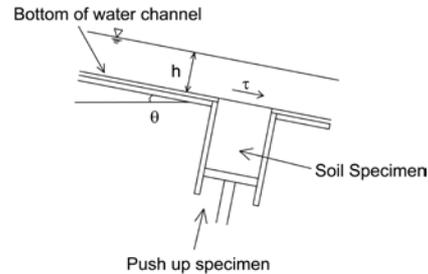


図 3 原位置試験の調査位置



(a) 平面図



(b) 供試体部分の側面図

図 4 外部侵食実験の実験装置

(2) 堤体材料の外部侵食実験

天然ダム堤体材料の耐侵食性を調べるため湯ノ倉温泉地区の堤体試料を用いて開水路侵食実験を実施した。実験パラメータは作用せん断応力 (水路勾配)、供試体の締固めエネルギー、水浸の有無である。

この実験の装置は天然ダム法面の越流による侵食を模擬した実験装置であり、Fujisawa⁴⁾の装置を参考に作成した。水路の平面図および供試体部分の詳細図を図 4 に示す。

水路に取り付けた試料容器に、自然含水比の状態の試料を 5 層に分けて入れ、100g の錘

を付けた突き棒を高さ 60cm から落下させて突き固めた。実験では 2 ケースの締固めエネルギーを考慮し、各層の締固め回数は 18、36 回とした。また、実験では侵食前の水浸の有無もパラメータとした。

供試体作成後、水路勾配を設定し、下流のタンクから上流タンクに水を送り、水を循環させた。水路勾配を変えることにより供試体に作用するせん断応力を変化させた。この際、実験装置を循環する水の温度（実験中は概ね 19℃）、供試体の乾燥密度、水深、水路の勾配および流量を計測した。供試体の侵食の進行にあわせて、供試体の表面と水路床の高さが一致するように削られた分だけ試料を押し出した。その際、押し出しに要した時間 Δt (s) あたりの供試体の侵食深さ Δz (cm) を測定した。

(3) 天然ダム内部侵食過程の数値解析

図 2 に示した湯ノ倉温泉地区の天然ダム縦断面を対象として、内部侵食過程の数値解析を実施した。解析には既往の多孔質体理論に基づく土・水・空気連成解析コード³⁾に内部侵食モデルを導入した手法を用いた。ここでは、内部侵食現象を土粒子からなる土骨格と間隙水との質量交換とみなして、侵食による土骨格の質量変化は細粒分のみを生じ、その変化が Darcy 流速などに依存すると仮定して、内部侵食の構成式を定式化した。

図 2 に示す縦断面を対象として有限要素モデルを作成した。堤体構成材料の物理特性および浸透特性は現場試料の室内試験結果を基に設定した。堤体構成材料の侵食特性は前述の侵食実験のシミュレーションで用いた値を参考に短期間で侵食による細粒分含有率の減少が再現される値を用いた。

静的自重解析で地盤の初期間隙水圧・初期間隙空気圧を算出した後、堰止湖水位の上昇を再現した浸透解析を行った。堰止湖水位は実際に観測された水位の変動を参考にしている。間隙水圧の境界条件は各時刻に対応する全水頭を上流側の側方境界に与えた。下流側の側方境界では全水頭は 0 m で固定した。また、土骨格の境界条件として堤体底面および大気要素の全ての節点（堤体と接する節点は除く）で鉛直・水平方向を固定した。さらに、間隙空気圧の境界条件として堤体表面で一定の空気圧（大気圧）を与えた。

(4) 堤体模型の遠心力場での浸透・越流実験

本実験では図 5 のように実験土槽内にコンクリート製の土台を設置し、実際に天然ダムが形成される地点のような谷の半断面を再現した。コンクリートの土台を設置した実験土槽に木製の板を傾斜角 45° で設置し、試料をその斜面に落下させて堤体模型を作製した。試料として天然ダム堤体材料に粒度に近い真

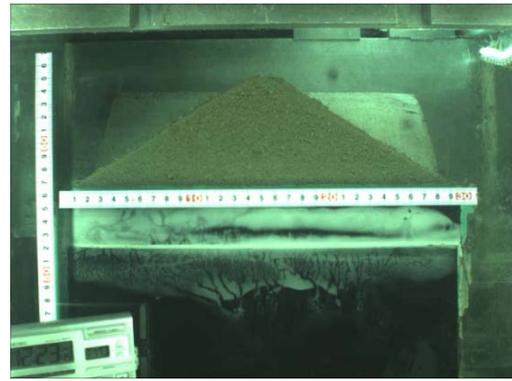


図 5 遠心力場における堤体模型

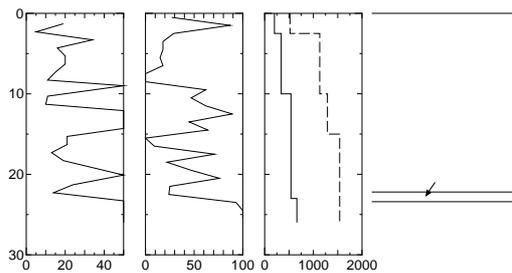


図 6 N 値、岩塊比率、弾性波速度

砂土を用いた。ここでは目標堤高 80mm で、水位上昇速度が 10mm/s (CASE1) および 0.5mm/s (CASE2) について説明する。実験はすべてのケースで遠心載荷装置を用いて 50g 場で行った。実験中の水位調整は貯水タンクに接続したレギュレーターによりタンク内の空気圧を調整して行い、水位上昇に伴う浸透・侵食の様子を土槽正面と下流側上部に設置した 2 台のカメラにより観察した。

4. 研究成果

(1) 天然ダムの現地調査と堤体土の特性

標準貫入試験による N 値、岩塊比率および PS 検層による弾性波速度の深度分布を図 6 に示す。ここに、岩塊比率は 1m のボーリングコアに占めるくり抜かれた岩塊の比率を示している。深度約 22m で旧河床堆積物が現れており、それより浅が崩壊土で構成されている。崩壊土の主体はシルト混じりの砂礫であり、崩壊の過程で細粒化した凝灰岩が含まれていると思われる。この結果より、天然ダム堤体は岩塊だけでなく砂やシルトから構成されており、特に表層 8m 程度の範囲では岩塊が少なく、N 値や S 波速度も比較的小さくなっている。これより深い深度では岩塊の比率が高くなり、岩塊と土砂の混合体となっているが岩塊の間を構成している崩壊土は深い部分でも締固まっておらず、比較的緩い状態で堆積している可能性がある。

ボーリング孔周辺で実施した表面波探査お

よび電気探査の結果を図7に示す。一般に低い比抵抗値は低透水性・細粒土と判断できる。深度10mまでは表面波速度が遅く、比抵抗値も低いことから、表層10m程度は比較的剛性が低い細粒土と判断でき、図6に示したN値や弾性波速度の深度分布と調和的である。

一般に土石流が流れ下る際には流れの先端付近に岩塊が集中し、細粒土が岩塊の後ろを追って流下する。このため、左岸斜面の小規模な沢や一迫川の河床では先に到達した岩塊が主体となり、その上部では後で到達した細粒土が堆積したと考えられる。また、2008年10月24日の大規模侵食により堤体の天端高さが15m程度低くなり、堰止湖の水位が10m程度低下した。今回のボーリング一点のみでは正確な比較はできないが、表層の土砂分の多い比較的緩い層が主に侵食され、岩塊の多い天然ダムの底部は侵食されずに残った可能性がある。

採取試料の粒径加積曲線を図8に示す。試料によってシルト・砂・礫分のばらつきがあるが、S2は砂混じり細粒分質礫、S4およびS5は細粒分質礫質砂に分類できる。また、S4およびS5は塑性図による分類ではMH（高液性限界のシルト）となっており、非塑性材料ではない。このため、S1およびS2に示すように透水係数は $2.3 \times 10^{-8} \sim 7.6 \times 10^{-6}$ m/sであり、現場透水試験結果と比較すると2オーダー以上小さい値となっている。天然ダム堤体では湧水箇所もみられることから、浸透によって岩塊の間の細粒土が流出した水みちが形成されている可能性がある。

(2) 堤体材料の外部侵食実験

侵食率とせん断応力の関係を図9に示す。ここで侵食率は $E = (1-n)\Delta z / \Delta t$ で定義した。ここに、 n は供試体の間隙率である。図中の曲線は侵食の経験式による近似曲線である。これらの結果より、締め固めエネルギーが大きくなるほど、限界せん断応力は大きくなり、作用せん断応力に対する侵食率の増加率が減少すること、水浸によりわずかに限界せん断応力が小さくなる傾向がみられるが、侵食率に与える影響は大きくないことがわかる。

(3) 天然ダムの内部侵食過程の数値解析

天然ダム堤体内における細粒分含有率の分布を図10に示す。侵食による堤体内での細粒分含有率の減少が表現できていることがわかる。また、解析結果より侵食は上流側小段法尻部で特に顕著に発生し、そこを起点として下流側へと進行していくことが確認できる。このため天然ダム堤体内部に上流側から下流側にかけて細粒分含有率の小さい（間隙率の大きい）領域が連続して形成された。この領域は透水係数が大きく水が通過しやすいため、天然ダム堤体内で水が優先して流れる水みち

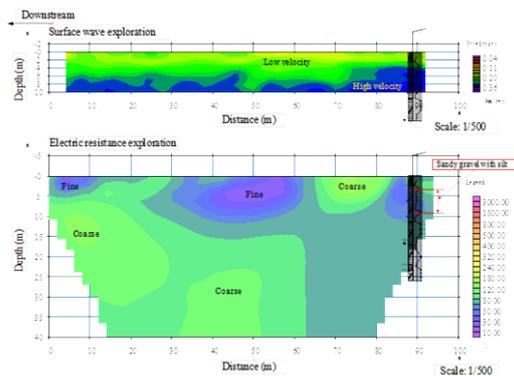


図7 表面波速度および比抵抗の分布

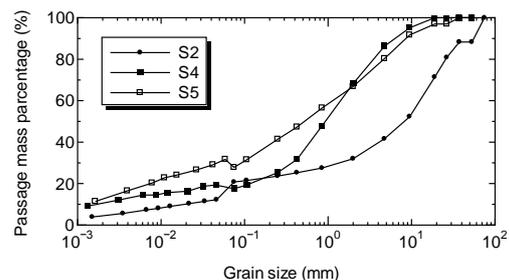


図8 堤体土の粒径加積曲線

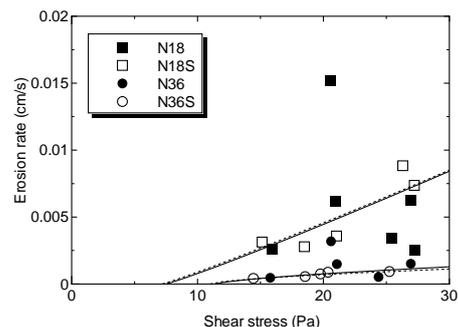


図9 外部侵食実験による侵食率とせん断応力の関係

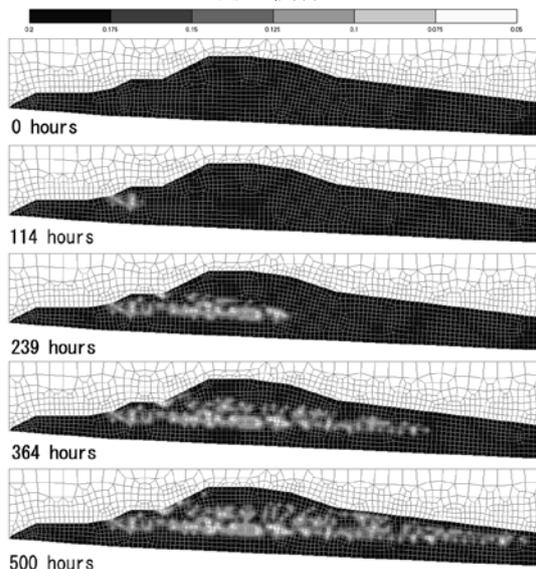


図10 細粒分含有率分布の時間変化

となる可能性が高いと予測できる。

(4) 堤体模型の遠心力場での浸透・越流実験

図 11 に CASE1、2 の水位上昇に伴う浸潤面の変化を示す。図には上流側の水位が 10mm 上昇するごとの浸潤面を描いている。図 12 に CASE1、2 の越流侵食による堤体の形状変化を示す。CASE1 と CASE2 の越流 1 秒後堤体形状を比較すると、CASE1 では堤頂部付近から下流側法面の表層が崩壊しているのに対して CASE2 では比較的深く侵食されていることが分かる。これは水位上昇速度の違いが影響していると考えられる。水位上昇速度が速い CASE1 では図に示すように越流に至った時点で浸潤面は下流側法面には達していない。これに対して水位上昇速度が遅い CASE2 では図に示すように越流に至った時点で下流側の法尻付近まで浸透が進んでいる。この結果、CASE2 の方が下流側法尻付近での侵食が大きくなり、それに伴って堤体上部も大きく崩壊したと考えられる。

また、これらの実験ケースについて、堤体高さ、堤体体積、貯水量で整理した結果、既往の安定性評価指標 (DBI)⁵⁾ で定性的には堤体の破壊を説明できる結果となった。

(5) まとめ

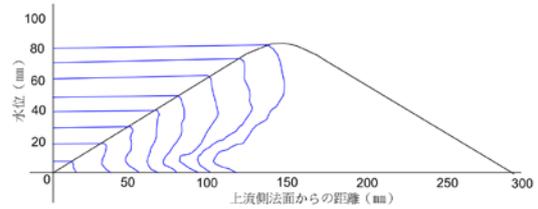
天然ダムの現地調査、模型実験および数値解析の結果、天然ダム堤体の内部構造、堤体材料の外部侵食特性、堤体内部の内部侵食過程、浸透・越流時の天然ダムの安定性に与える指標などを明らかにした。

今後の課題として、以下を検討する必要がある。

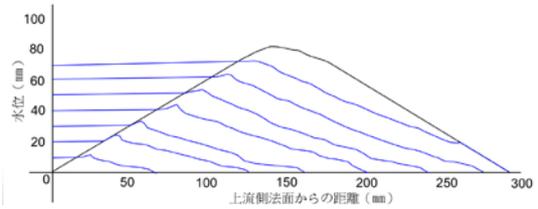
- ① 天然ダムの内部構造に関するデータを引き続き蓄積する必要がある。
- ② 実験データに基づき外部侵食も考慮した解析手法を構築する必要がある。
- ③ 浸透・越流時の堤体模型の遠心実験データを蓄積し、安定性評価指標の確立を図る必要がある。

参考文献

- 1) 田端茂清、水山高久、井上公夫著：天然ダムと水害、古今書院、2002。
- 2) 平成 20 年岩手・宮城内陸地震 4 学協会東北合同調査委員会：平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震災害調査報告、2009。
- 3) Uzuoka, R., Kazama, M. and Sento, N. : Soil-water-air coupled analysis on seepage and overtopping behavior of river levee, 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hong Kong, 2011.
- 4) Fujisawa, K., Kobayashi, A. and Yamamoto, K. : Erosion rate of compacted

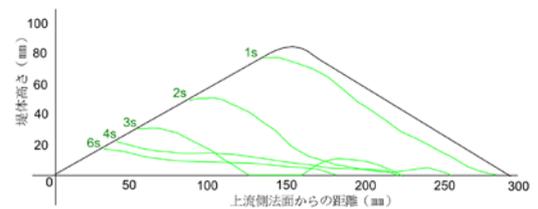


(a) CASE1

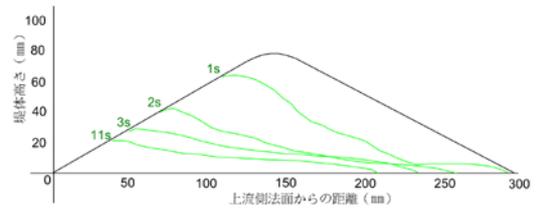


(b) CASE2

図 11 水位上昇に伴う浸潤面の変化



(a) CASE1



(b) CASE2

図 12 越流侵食による堤体形状の変化

soils for embankment, Doboku Gakkai Ronbunshuu C, 2009, Vol. 64, pp. 403-410.

- 5) Ermini, L. and Casagli, N. : Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index, Earth Surf. Process. Landforms, 28, 31-47, 2003

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 2 件)

- ① Kazama, M., Kataoka, S. and Uzuoka, R., Volcanic mountain area disaster caused by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake of 2008, Japan, Soils and Foundations, 査読有, 52(1), 2012, 168-184, 10.1016/j.sandf.2012.01.003

- ② 渦岡良介、仙頭紀明、森友宏、風間基樹、2008年岩手・宮城内陸地震で発生した湯ノ倉温泉地区の天然ダム堤体の地盤工学的特性、日本地震工学会論文集、査読有、11、2011、80-93、10.5610/jaee.11.5_80

〔学会発表〕(計10件)

- ① 木内将太、様々な粒度分布を有する粒状体の浸透破壊実験、平成24年度土木学会技術研究発表会、2013.3.9、東北大学(宮城県)
- ② 西尾竜文、遠心力場における模型堤体の浸透・越流による進行性破壊現象、地盤工学会四国支部平成24年度技術研究発表会講演概要集、2012.11.16、内子自治センター(愛媛県)
- ③ Uzuoka, R., Hydro-mechanical analysis of internal erosion with mass exchange between solid and water, 6th International Conference on Scour and Erosion, 2012.8.27, ENSAM (France)
- ④ 西尾竜文、堤体模型の重力場と遠心場における浸透・越流破壊の比較、第47回地盤工学研究発表会、2012.7.14、八戸工業大学(青森県)
- ⑤ 大山一輝、模型堤体を用いた重力場・遠心場での浸透・越流破壊実験、平成24年度土木学会四国支部技術研究発表会、2012.5.18、高知工科大学(高知県)
- ⑥ 村西昇、天然ダム越流時の侵食破壊模型実験、平成23年度土木学会東北支部技術研究発表会、2012.3.3、秋田大学(秋田県)
- ⑦ 一山智弘、内部侵食を考慮した天然ダムの浸透解析、第46回地盤工学研究発表会、2011.7.5、神戸国際会議場(兵庫県)
- ⑧ 岸浩樹、締固めエネルギーと水浸に着目した天然ダムの侵食に関する実験的検討、平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会、2011.3.5、東北工業大学(宮城県)
- ⑨ Uzuoka, R., Geotechnical properties of landslide dams induced by the Iwate-Miyagi Nairiki earthquake in 2008, 5th International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering, 2011.1.11, Santiago Sheraton Hotel (Chile)
- ⑩ 大谷喜樹、天然ダムの構成地盤材料の浸食率の測定、平成21年度土木学会東北支部技術研究発表会、2010.3.6、日本大学(福島県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渦岡 良介 (UZUOKA RYOSUKE)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授
研究者番号：40333306

(2) 研究分担者
仙頭 紀明 (SENTO NORIAKI)
日本大学・工学部・准教授
研究者番号：40333835

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者
一山 智弘 (ICHIYAMA TOMOHIRO)
東北大学・大学院・博士前期課程

西尾 竜文 (NISHIO TATSUFUMI)
徳島大学・大学院・博士前期課程

大山 一輝 (OYAMA KAZUKI)
徳島大学・大学院・博士前期課程

山田 裕明 (YAMADA HIROAKI)
徳島大学・大学院・博士前期課程

大谷 喜樹 (OTANI YOSHIKI)
日本大学・工学部・4年生

村西 昇 (MURANISHI NOBORU)
日本大学・工学部・4年生

岸 浩樹 (KISHI HIROKI)
日本大学・工学部・4年生

木内 将太 (KIUCHI SHOTA)
日本大学・工学部・4年生