

豪雨～高潮～地震による複合災害を模擬した遠心模型実験

大 塚 悠 大 *¹ 平 田 昌 史 *¹
丸 山 憲 治 *¹ 石 黒 健 *¹

要 旨

異なる自然災害が連続的に発生する複合災害では、先発災害の影響により単独の災害よりも広範囲で甚大な被害が生じる。このような複合災害による被害を効率的・効果的に低減・抑制するためには、複合災害による地盤被害を実験的、解析的に評価できる手法の確立が必要となる。著者らは、豪雨～高潮～地震を模擬した遠心模型実験を実施し、複合災害による相乗的な影響の再現を試みた。これまでは、台風や豪雨、高潮、地震といった単独の自然災害に対する実験は行われてきたが、これらの自然災害が連続的に生じるような複合災害に対しての検討は十分実施されていなかった。今回の実験は、振動台の上に水位制御装置と降雨装置を積載することで、豪雨、高潮、地震の自然災害を連続的に模型地盤に作用させるという新たな試みである。この結果、各災害の相乗効果により被害が拡大する様子が確認され、遠心載荷装置内で複合災害による地盤挙動の検討が可能となった。

キーワード 複合災害／豪雨／高潮／地震／遠心模型実験

目 次

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1. はじめに | 3. 複合災害を模擬した遠心模型実験 |
| 2. 遠心模型実験に用いる各種装置 | 4. おわりに |

THE CENTRIFUGAL MODEL EXPERIMENT OF THE COMPOUND DISASTER CAUSED BY HEAVY RAIN - HIGH TIDE - EARTHQUAKE

Yudai OHTSUKA Masafumi HIRATA
Kenji MARUYAMA Takeshi ISHIGURO

Synopsis:

In complex disasters, where different natural disasters occur consecutively, the impact of the preceding disaster causes more widespread and severe damage than a single disaster. To efficiently and effectively mitigate and control damage from such complex disasters, it is necessary to establish a method for experimentally and analytically evaluating ground damage caused by complex disasters. The authors conducted a centrifuge model experiment simulating heavy rain, storm surges, and earthquakes to attempt to reproduce the synergistic effects of complex disasters. Previous experiments have been conducted on individual natural disasters, such as typhoons, heavy rain, storm surges, and earthquakes, but there has been insufficient research into complex disasters in which these natural disasters occur consecutively. This experiment was a new attempt to apply the natural disasters of heavy rain, storm surges, and earthquakes consecutively to a model ground by placing a water level control device and a rainfall device on a shaking table. The results confirmed that damage was exacerbated by the synergistic effects of each disaster, making it possible to examine ground behavior due to complex disasters within the centrifuge loading device.

* 1 本店 ICI 総合センター ICI テクノロジーセンター 地盤グループ

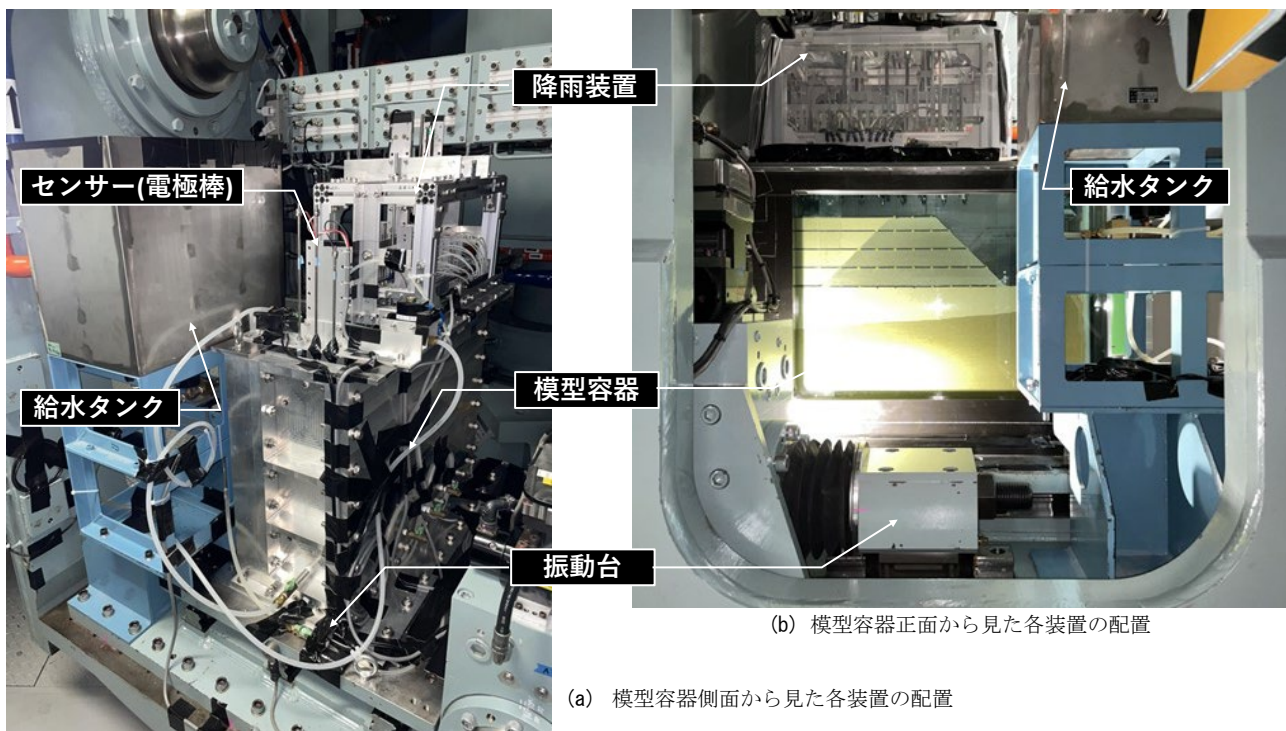


写真-1 遠心载荷装置に配置した各試験装置の状況

1. はじめに

令和6年元日に生じた能登半島地震の被災地において、同年9月に記録的な豪雨災害が発生した。地震からの復旧・復興途上であった被災地では、この記録的豪雨により広範囲で甚大な被害が生じた。この事例のように、異なる自然災害が連続的に発生する複合災害では、先発災害の影響により単独の災害よりも広範囲で甚大な被害が生じることになる。国土交通省では、このような複合災害の頻度が増加すると予測している¹⁾ため、複合災害による被害を効率的・効果的に低減・抑制する対策等が今後必要になると考えられる。なお、効率的・効果的な対策等を検討するためには、被災エリア全体のリスクの把握や安全度評価の検討が必要であり、このような検討を行うためには、複合災害による地盤被害を実験的・解析的に評価できる手法の確立が求められる。

このような背景から、著者らは豪雨～高潮～地震を模擬した遠心模型実験²⁾を実施し、複合災害による相乗的な影響の再現を試みた。既往の研究では、台風や豪雨等による土砂災害³⁾⁴⁾、高潮等による越流や洪水⁵⁾⁶⁾、地震による液状化⁷⁾⁸⁾、といった単独の自然災害に対する実験は行われてきたが、これらの自然災害が連続的に生じるような複合災害については十分な検討が実施されていない。今回の実験では、振動台の上に水位制御装置と降雨装置を積載することで、豪雨～高潮～地震の自然災害を連続的に模型地盤に作用させる。各装置を遠心载荷装置のプラットフォームに効率的に積載するための配置や、各装置が地震動を受けることによる影響の低減などの工夫を凝らした実験を行った。本報告では、遠心模型実験に使

用した複合災害を再現するための実験装置と、複合災害を模擬した遠心模型実験の結果について紹介する。

2. 遠心模型実験に用いる各種装置

著者らは、これまで遠心载荷装置を用いて豪雨や高潮、地震の自然災害に対する単独の実験を行っている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。しかしながら、これらの自然災害を同時あるいは連続的に作用させる実験については行っていない。これは、自然災害を模擬する降雨装置（豪雨を再現）、水位制御装置（高潮を再現）、振動台（地震を再現）が、それぞれ単独での使用を前提に作製されているためであり、同時あるいは連続して使用した際の各種装置への影響が懸念されるためである。また、遠心载荷装置のプラットフォーム上の限られたスペース内に、模型地盤を含めたこれらの装置をすべて配置することが必要であるため、各種装置の配置等にも工夫が必要となってくる。今回実施する実験では、これら装置の配置や相互作用を確認し、不具合が生じないかのチェックを含む内容となっている。

写真-1は、遠心载荷装置のプラットフォームに配置した模型地盤と各種装置である。この写真-1で示した各種装置の中で、最も大きい装置は振動台である。このため、振動台の位置はプラットフォームのセンター位置に固定で、移動することは出来ない。ちなみにこの振動台は、最大積載量0.5t、最大加振力20Gであり、振動台の上に模型容器を載せ、専用ソフトで作成した地震波形を油圧制御で再現する装置である。

写真-1に示すように、模型容器の上には豪雨を再現するための降雨装置が固定されている。この降雨装置は、

友岡らの装置¹²⁾を参考に、平均粒子径 $20\sim 30\mu\text{m}$ の微霧を発生することが可能な2流体ノズル（いけうち製：SCBIMV）を用いており、この2流体ノズルを50mmピッチで8個、奥行方向に2列の計16個設置している。なお、遠心場では装置自体を回転させることに起因するコリオリ力が働くため、実験前にキャリブレーションを実施し、地盤全体に極力均等に散布できるように調整している。なお、この降雨装置は模型地盤の容器に直接固定しているため、地震動を载荷する際には装置自体にも地震動による負荷が作用するため、その影響が懸念される。

また写真-1に示すように、模型容器の前には、水位制御装置の給水タンクを配置している。水位制御装置は、この給水タンクから模型容器内へ水を供給する装置であり、余分な水については模型容器背面に設置したタンクに排水される。模型容器内に設置したセンサー（電極棒）により電子弁を制御することで、水位制御が可能な装置である。なお、給水タンクの架台が模型容器前面にあるため、模型地盤右端の一部でCCDカメラに映らない箇所が生じている。今回の実験では、検討対象である堤体が十分見えているため特に問題とはなっていないが、今後は視野を遮らないよう給水タンクの架台を工夫することも必要である。

3. 複合災害を模擬した遠心模型実験

3.1 遠心模型実験の概要

図-1に、実験に用いた模型地盤の概略図を示す。模型地盤は幅650mm、奥行200mmであり、下部の基盤部と上部の堤防および埋土部から構成されている。基盤部は、基礎地盤層40mm、非液状化層200mm、サンドマット層20mmで構成され、すべて豊浦珪砂を用いて相対密度 $D_r=87\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.608\text{Mg/m}^3$ として作製した。上部の堤防部は、珪砂7号と木節粘土を重量比で8:2の割合で配合し、初期含水比を5%に調整した中間土を使用した。この中間土を、乾燥密度 $\rho_d=1.460\text{Mg/m}^3$ となるように締め固めて堤防部を作製している。堤防部の形状は、高さ150mm、斜面勾配1:1である。堤防部背面の埋土部は、地震動により液状化を発生させることを目的に、豊浦珪砂を相対密度 $D_r=51\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.503\text{Mg/m}^3$ の緩い地盤となるように空中落下により作製した。作製した模型地盤を写真-2に示す。なお、実験では遠心加速度を40Gとしており、実スケールに換算する¹³⁾と堤防の高さは6mになる。また、今回の実験では地震動による液状化についても再現するため、降雨や高潮で用いる間隙水にも、遠心加速度40Gを考慮し調整した粘性流体を使用している。

実験では、模型地盤に降雨、高潮、地震の順序で作用させた。今回が初めての実験ということもあり、降雨装置や水位制御装置の作動に加振の影響が出ないよう、地震動の载荷を最後にしている。まず、実験では最初に初期水位（L.W.L.）の状態 で降雨を2分間発生させる。ここ

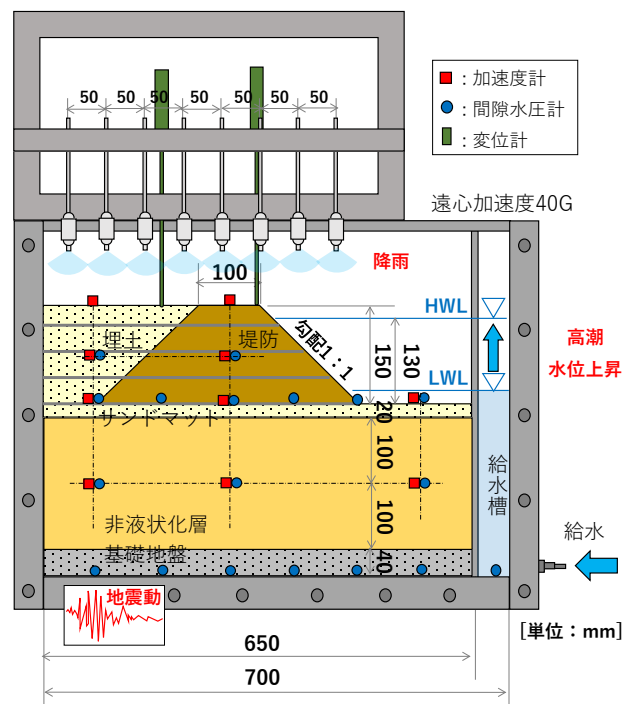


図-1 模型地盤の概略図

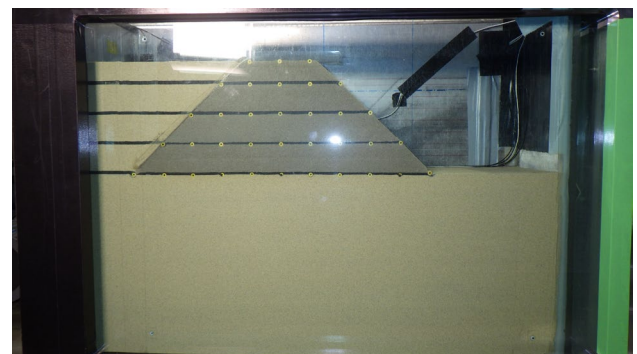


写真-2 作製した模型地盤

では、降雨にも粘性流体を使用しているため、実験時の降雨強度は模型スケールと実スケールは一致し、共に128mm/hである。次に、高潮を模擬した水位上昇を発生させる。この高潮については、上流域の豪雨による増水が時間遅れを伴って下流域に影響を与える様子を再現するため、降雨終了から1分後に水位上昇を始め、堤防部天端から20mm下となる水位（H.W.L.）で一定に保ち、堤防内に浸透させている。この高潮による水位上昇がほぼ落ち着いたところで、地震を模擬した加振を行う。加振については、神戸波（気象庁により公開されている平成7年兵庫県南部地震にて観測された強震波形の加速度波形）を0.5倍した波形を用いている。

実験中は、図-1に示したように基礎地盤や堤防、埋土部分に設置した加速度計や間隙水圧計、天端に設置した変位計により、各種計測を行っている。また、模型容器前面からはCCDカメラと高速度カメラにより、堤防や埋土部分の変形についても観察している。



写真-3 CCD カメラで撮影した模型地盤の経時変化画像

3.2 実験結果

写真-3 は、CCD カメラで撮影した模型地盤の経時変化画像である。写真-3(b)に示した降雨開始 2 分後の画像を見ると、降雨により堤防天端や斜面部分から雨水が浸透していることがわかる。その後、高潮を想定した水位上昇を行うと堤防内に浸透した水が、埋土部内にも浸透し水位が上昇している様子が伺える。実験では、この状態の地盤に対して地震動を载荷している。加振直後の写真-3(e)の画像を見ると、堤防天端に複数のクラックが発生していることが見て取れる。さらにこの状態で放置すると、写真-3(f)に示したように堤防の斜面が時間遅れですべり崩壊していることがわかる。

図-2 は、降雨～高潮過程における堤防天端法肩および埋土天端の沈下量である。この図を見ると、降雨により堤防法肩で沈下が生じているが、降雨期間が短いため沈

下量は比較的小さい。その後、高潮を発生させると、堤防天端法肩だけではなく埋土天端にも沈下が生じていることがわかる。図-3 は、降雨～高潮過程における間隙水圧計の観測結果から、堤防および埋土内の水位分布を求めたグラフである。この図に示すように、降雨時にはほとんど水位上昇は見られないが、高潮により堤防および埋土の水位が上昇してく様子が見て取れ、写真-3 に示した画像ともほぼ一致している。以上のように、降雨や高潮の影響で堤防および埋土天端に沈下が生じ、高潮により水位も上昇していることから、堤防や埋土の地盤強度が低下していると考えられる。このような状態で地震が発生すると、その被害は通常時よりも大きくなることが予測される。

図-4 は、地震過程における加振時の入力加速度である。先に述べたように、今回の実験では神戸波を模擬した波

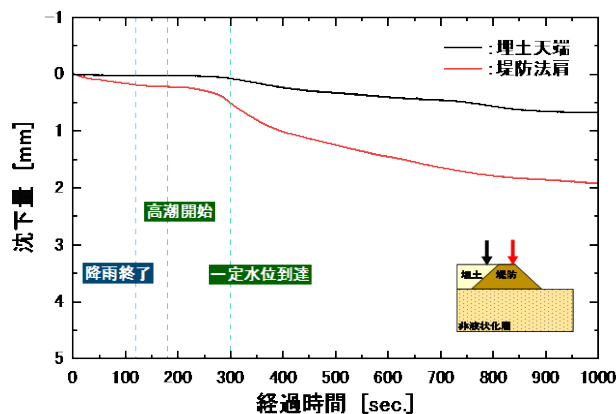


図-2 降雨～高潮過程における沈下量変化

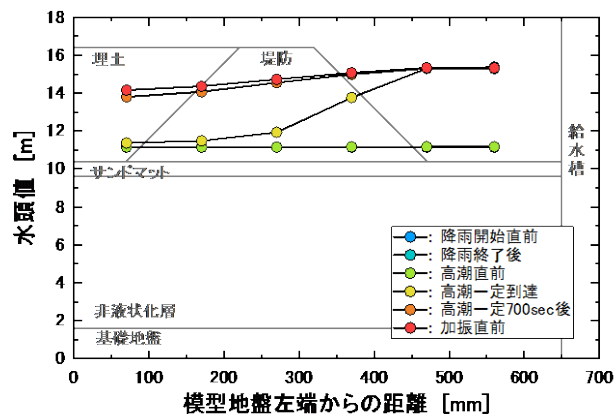


図-3 降雨～高潮過程における堤防内水位

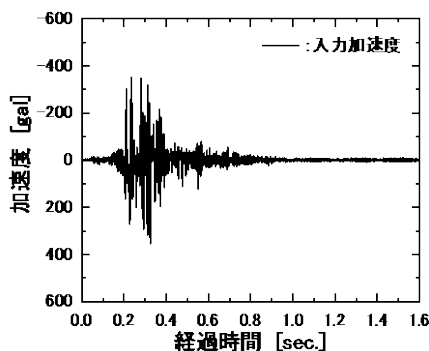


図-4 地震過程の入力加速度

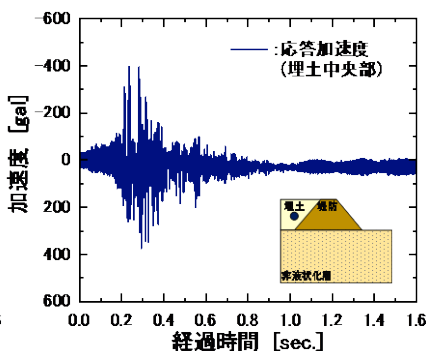


図-5 地震過程の応答加速度

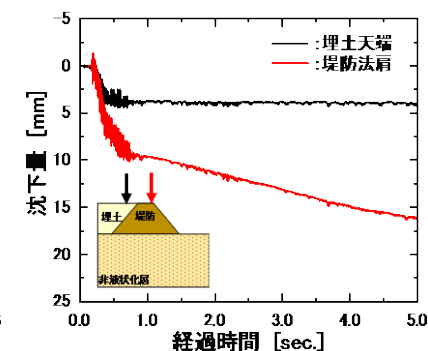
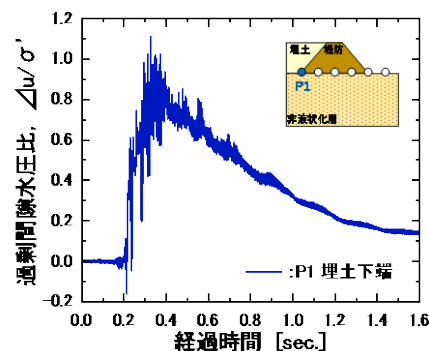
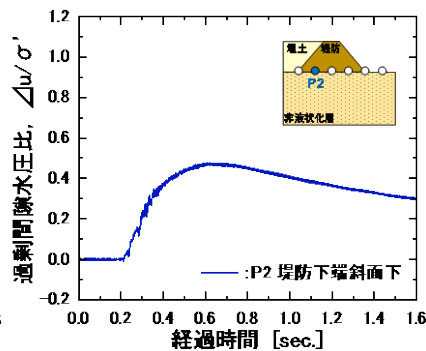


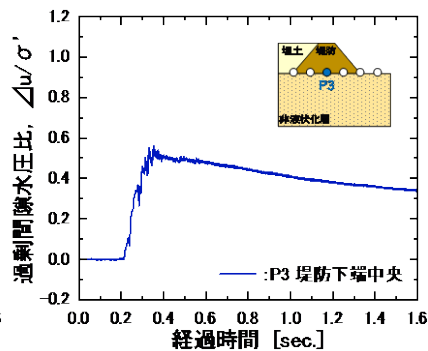
図-6 地震過程における沈下量変化



(a) 埋土下端 (P1)



(b) 堤防下端斜面下 (P2)



(c) 堤防下端中央 (P3)

図-7 地震過程における過剰間隙水圧比の変化

形を与えている。図-5 は、この入力加速度に対する応答加速度であり、ここでは埋土中央部の結果を代表として記載している。この図に示すように、埋土中央部では加速度の増幅がわずかである。図-6 は、加振時における堤防および埋土の沈下量である。堤防天端法肩の沈下量を見ると、加振中に大きな沈下が生じた後も時間経過に伴い徐々に沈下が増加しており、写真-3(f)に示したように最終的に堤防斜面がすべり崩壊に至っている。

図-7 は、地盤内の設置した間隙水圧計の計測結果から、過剰間隙水圧比を求めたグラフである。図-7(a)の埋土下端を見ると、加振 0.3 秒後で過剰間隙水圧比が 1.0 に近い値となっており、埋土下部では地盤は液状化していたと考えられる。また、図-7(b)及び(c)の堤防下端を見ると、どちらも過剰間隙水圧比は 0.5 程度まで上昇しており、液状化までは至らないものの比較的大きな過剰間隙水圧が

発生していることがわかる。このような加振時の埋土や堤防の過剰間隙水圧比の発生は、高潮による水位上昇が原因であり、地盤強度の低下を招く要因になる。特に今回の実験では、加振により埋土下部が液状化することで、堤防への土圧が増加し外側に押し出されるように変位している。これは、堤防内の水位上昇による強度低下と合わせて堤防斜面のすべり崩壊の要因となっており、複合災害による相乗的な被害の拡大を本実験で再現できたと考えている。

4. おわりに

本報告では、豪雨～高潮～地震の複合災害を模擬した遠心模型実験の実験装置とその実験結果について紹介した。今回の実験により、各種装置に改良の余地が残るものの、遠心力場において豪雨と高潮、地震といった自然

災害を地盤に対して連続的に作用させることが出来るようになった。また、これにより複合災害により生じる相乗的な被害状況などを検討可能な実験手段を得ることが出来たと考えている。

複合災害では能登半島の事例の様に地震後に豪雨災害が生じるケース、豪雨と地震が同時発生するケース、東日本大震災の様な地震後に津波が生じるケースなど、様々なケースが想定される。今回の実験では、降雨装置や水位制御装置の作動に加振の影響が出ないよう、地震動の載荷を最後にしているが、今後はこれら実際の被災ケースを対象とした実験を実施していく計画である。なお、遠心模型実験のみですべてのケースに対応することや、実現場の被害状況を再現する事は困難である。このため、これらの複合災害に対応した解析手法が必要になる。今後は、本報告で述べた遠心模型実験と合わせて複合災害に対応する解析技術¹⁴⁾についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) 災害に強い首都「東京」形成ビジョン“第5回災害に強い首都「東京」の形成に向けた連絡会議”，国土交通省, 2025.
https://www.mlit.go.jp/river/shinnigikai_blog/renrakukaigi/dai05kai/, (参照 2025-8-24)
- 2) 丸山憲治, 石黒健, 平田昌史, 大塚悠大: 降雨～高潮～地震動連動発生時における堤防の挙動に関する遠心載荷実験, 第 80 回土木学会年次学術講演会講演集, III-243, 2025.
- 3) 小林睦, 廣岡明彦, 松井みゆき: 豪雨時の斜面崩壊メカニズムに関する遠心力場散水シミュレーション, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.33-38, 2008.
- 4) 丸山憲治, 大塚悠大, 石黒健, 平田昌史, 大木拓哉, 赤木寛一, 小西真治: 降雨装置を用いた盛土斜面安定性に関する遠心模型実験, 第 59 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.23-13-4-03, 2024.
- 5) 森洋: 遠心模型実験による河川堤防を対象とした浸透破壊の実験的考察, 農業土木学会全国大会講演要旨集 2006, pp.844-845, 2006.
- 6) 高橋英紀, 森川嘉之, 森信人, 安田誠宏: 越流と浸透の複合作用を受けた三面張り堤防の遠心力場での破壊実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.1, pp.42-51, 2015.
- 7) 飛田哲男, 井合進, 上田恭平: 地震時における盛土の挙動に関する遠心模型実験と解析, 地震工学研究発表会報告集, 28(0), 37(1-5), 2005.
- 8) 石丸真, 河合正: 流れ盤斜面の地震時崩壊挙動に関する遠心力模型実験, 土木学会地震工学論文集, 29(0), pp.1113-1116, 2007.
- 9) 石黒健, 丸山憲治, 平田昌史, 薛天樂, 天野慎一: ジオテキスタイルにより補強された高盛土の築堤時変形挙動 (その 2) ～遠心載荷実験および動的 DEM 解析によるジオテキスタイル補強効果の確認～, 第 57 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.21-7-2-03, 2022.
- 10) 丸山憲治, 大塚悠大, 石黒健, 平田昌史: 豪雨時の盛土斜面安定性に関する遠心模型実験, 第 58 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.11-7-3-01, 2023.
- 11) 丸山憲治, 大塚悠大, 石黒健, 平田昌史, 赤木寛一, 大木拓哉, 小西真治: 降雨装置を用いた盛土斜面安定性に関する遠心模型実験, 第 59 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.23-13-4-03, 2024.
- 12) 友岡亮太郎, 伊藤和也, 田中剛, 末政直晃, 野中隆博, 田中卓也, 笹原克夫: 遠心場降雨発生システムを用いた斜面崩壊挙動の把握とその対策工に関する遠心模型実験, 土木学会論文集 C, Vol.78, No.1, pp.14-31, 2022.
- 13) 岡村未対, 竹村次郎, 上野勝利: 講座「遠心模型実験－実験技術と実務への適用－」2.遠心模型の相似則, 実験技術－利点と限界, 土と基礎, Vol.52, No.10, pp.37-44, 2004.
- 14) 高田祐希, 佐々木智大: 降雨と地震の重畳作用を考慮した盛土の応答解析, 第 60 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.24-5-4-02, 2025.