

地震と降雨の作用を受ける蛇籠擁壁の安定性に関する実験的研究

— 蛇籠擁壁の粘り強さの検証 —

Experimental Study on Stability of Gabion Retaining Wall

Under the Influence of Earthquake and Rainfall

— Verification of Tenacity of Gabion Retaining Wall —



防災科学技術研究所研究資料

- 第 393 号 地すべり地形分布図 第 59 集「伊豆諸島および小笠原諸島」10 葉(5 万分の 1)．2015 年 3 月発行
- 第 394 号 地すべり地形分布図 第 60 集「関東中央部」15 葉(5 万分の 1)．2015 年 3 月発行
- 第 395 号 水害統計全国版データベースの整備．発行予定
- 第 396 号 2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における災害情報の利活用に関するヒアリング調査 58pp. 2015 年 7 月発行
- 第 397 号 2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における建物被害に関する情報収集調査速報 16pp. 2015 年 9 月発行
- 第 398 号 長岡における積雪観測資料 (37) (2014/15 冬期) 29pp. 2015 年 11 月発行
- 第 399 号 東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良(付録 DVD) 253pp. 2015 年 12 月発行
- 第 400 号 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討(付録 DVD) 216pp. 2015 年 12 月発行
- 第 401 号 全国自治体の防災情報システム整備状況 47pp. 2015 年 12 月発行
- 第 402 号 新庄における気象と降積雪の観測(2014/15 年冬期) 47pp. 2016 年 2 月発行
- 第 403 号 地上写真による島海山南東斜面の雪渓の長期変動観測(1979～2015 年) 52pp. 2016 年 2 月発行
- 第 404 号 2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における地震の概要と建物被害に関する情報収集調査報告 54pp. 2016 年 3 月発行
- 第 405 号 土砂災害予測に関する研究会－現状の課題と新技術－プロシーディング 220pp. 2016 年 3 月発行
- 第 406 号 津波ハザード情報の利活用報告書 132pp. 2016 年 8 月発行
- 第 407 号 2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) における災害情報の利活用に関するインタビュー調査 –改訂版– 120pp. 2016 年 10 月発行
- 第 408 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2015/16 年冬期) 39pp. 2017 年 2 月発行
- 第 409 号 長岡における積雪観測資料 (38) (2015/16 冬期) 28pp. 2017 年 2 月発行
- 第 410 号 ため池堤体の耐震安全性に関する実験研究 –改修されたため池堤体の耐震性能検証– 87pp. 2017 年 2 月発行
- 第 411 号 土砂災害予測に関する研究会－熊本地震とその周辺－プロシーディング 231pp. 2017 年 3 月発行
- 第 412 号 衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面・地盤変動調査 –多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出– 107pp. 2017 年 9 月発行
- 第 413 号 熊本地震被災地域における地形・地盤情報の整備 –航空レーザ計測と地上観測調査に基づいた防災情報データベースの構築– 154pp. 2017 年 9 月発行
- 第 414 号 2017 年度全国市区町村への防災アンケート結果概要 69pp. 2017 年 12 月発行
- 第 415 号 全国を対象とした地震リスク評価手法の検討 450pp. 2018 年 3 月発行予定
- 第 416 号 メキシコ中部地震調査速報 28pp. 2018 年 1 月発行
- 第 417 号 長岡における積雪観測資料(39) (2016/17 冬期) 29pp. 2018 年 2 月発行
- 第 418 号 土砂災害予測に関する研究会 2017 年度プロシーディング 149pp. 2018 年 3 月発行
- 第 419 号 九州北部豪雨における情報支援活動に関するインタビュー調査 90pp. 2018 年 7 月発行
- 第 420 号 液状化地盤における飽和度確認手法に関する実験的研究 –不飽和化液状化対策模型地盤を用いた模型振動台実験– 62pp. 2018 年 8 月発行
- 第 421 号 新庄における気象と降積雪の観測(2016/17 年冬期) 45pp. 2018 年 11 月発行
- 第 422 号 2017 年度防災科研クライシスレスポンスサイト(NIED-CRS)の構築と運用 56pp. 2018 年 12 月発行
- 第 423 号 耐震性貯水槽の液状化対策効果に関する実験研究 –液状化による浮き上がり防止に関する排水性能の確認– 48pp. 2018 年 12 月発行
- 第 424 号 バイプロを用いた起振時過剰間隙水圧計測による原位置液状化強度の評価手法の検討－原位置液状化強度の評価に向けた土槽実験の試み– 52pp. 2019 年 1 月発行
- 第 425 号 ベントナイト系遮水シートの設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響 102pp. 2019 年 1 月発行
- 第 426 号 蛇籠を用いた耐震性道路擁壁の実大振動台実験および評価手法の開発－被災調査から現地への適用に至るまで – 114pp. 2019 年 2 月発行
- 第 427 号 津波シミュレータ TNS の開発 67pp. 2019 年 3 月発行
- 第 428 号 長岡における積雪観測資料(40) (2017/18 冬期) 29pp. 2019 年 2 月発行
- 第 429 号 配管系の弾塑性地震応答評価に対するベンチマーク解析 72pp. 2019 年 3 月発行
- 第 430 号 津波浸水の即時予測を目的とした津波シナリオバンクの構築 169pp. 2019 年 3 月発行
- 第 431 号 土砂災害予測に関する研究会 2018 年度プロシーディング 65pp. 2019 年 3 月発行
- 第 432 号 全国を概観するリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発 311pp. 2019 年 3 月発行
- 第 433 号 新庄における気象と降積雪の観測(2017/18 年冬期) 51pp. 2019 年 3 月発行

■ 表紙写真・・・降雨散水実験の様子(振動台上の土槽左側に降雨散水装置を設置)

防災科学技術研究所研究資料

- 第 434 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –南西レスキュー 30 における活動報告– 158pp. 2019 年 6 月発行
- 第 435 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –みちのく ALERT2018 における活動報告– 140pp. 2019 年 7 月発行
- 第 436 号 平成 30 年 7 月豪雨 (西日本豪雨) の被災自治体における災害情報システムの活用実態に関する調査 60pp. 2019 年 9 月発行
- 第 437 号 SIP4D 利活用システム技術仕様書・同解説 142pp. 2019 年 10 月発行
- 第 438 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –かもしか RESCUE2019 における活動報告– 46pp. 2019 年 12 月発行
- 第 439 号(1) 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価 第一部 本編 575pp. 付録編 514pp. 2020 年 4 月発行
- 第 440 号 蛇籠を用いた建造物の合理的な設計手法のための変形メカニズムに関する実験研究－蛇籠の理論体系構築に向けた基礎的研究－ 26pp. 2020 年 1 月発行
- 第 441 号 長岡における積雪観測資料(41) (2018/19 冬期) 25pp. 2020 年 3 月発行
- 第 442 号 新庄における気象と降積雪の観測(2018/19 年冬期) 47pp. 2020 年 2 月発行
- 第 443 号 クラウドファンディングを活用した研究事例 –ネパール組積造住宅の耐震補強実験を例として– 32pp. 2020 年 3 月発行
- 第 444 号 南海トラフで発生する地震・津波を対象とした広域リスク評価手法の検討 163pp. 2020 年 3 月発行
- 第 445 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み – 01TREX/ 南海レスキュー 01 における活動報告– 23pp. 2020 年 6 月発行
- 第 446 号 災害関連情報の効果的アーカイブ方法の検討 –都道府県の公式ホームページから発信される情報・資料を対象に– 81pp. 2020 年 7 月発行
- 第 447 号 土のう構造体を用いた道路盛土の新たな耐震補強工法に関する実大震動台実験 –地震災害後の道路の早期復旧と中長期的な維持に向けての検証– 68pp. 2020 年 7 月発行
- 第 448 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-2 橋脚) 震動破壊実験研究報告書 –主鉄筋段落としを有する RC 橋脚の耐震性に関する震動台実験– 46pp. 2020 年 8 月発行
- 第 449 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-6 橋脚) 震動破壊実験研究報告書–ポリプロピレンファイバーコンクリートを用いた高耐震性能橋脚の開発– 36pp. 2020 年 9 月発行
- 第 450 号 令和元年東日本台風(台風第 19 号)による各県の被害概要および受援設備の整理 85pp. 2020 年 9 月発行

－編集委員会－		防災科学技術研究所研究資料 第 451 号
(委員長)	下川 信也	
(委員)		令和 2 年 11 月 16 日発行
木村 武志	姫松 裕志	編集兼 国立研究開発法人
河合 伸一	三浦 伸也	発行者 防災科学技術研究所
山崎 文雄	平島 寛行	〒 305-0006
中村いずみ	川嶋 一浩	茨城県つくば市天王台 3－1
(事務局)		電話 (029)863-7635
三浦 伸也	前田佐知子	http://www.bosai.go.jp/
池田 千春		印刷所 前田印刷株式会社
(編集・校正)	樋山 信子	茨城県つくば市山中 152-4

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2020

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ (<http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/>) をご覧下さい。

地震と降雨の作用を受ける蛇籠擁壁の安定性に関する実験的研究
— 蛇籠擁壁の粘り強さの検証 —

中澤博志^{*1}・石澤友浩^{*2}・檀上 徹^{*2}・原 忠^{*3}・末次大輔^{*4}・西 剛整^{*5}・尾上修浩^{*2}

**Experimental Study on Stability of Gabion Retaining Wall
Under the Influence of Earthquake and Rainfall**
— Verification of Tenacity of Gabion Retaining Wall —

Hiroshi NAKAZAWA^{*1}, Tomohiro Ishizawa^{*2}, Toru DANJO^{*2}, Tadashi Hara^{*3},
Daisuke Suetsugu^{*4}, Tsuyoshi Nishi^{*5}, and Yasuhiro Onoue^{*2}

^{*1} *Earthquake Disaster Mitigation Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
nakazawa@bosai.go.jp*

^{*2} *Storm, Flood and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
ishizawa@bosai.go.jp, t.danjo@bosai.go.jp, onoue@bosai.go.jp*

^{*3} *Kochi University, Japan
haratd@bosai.ac.jp*

^{*4} *University of Miyazaki, Japan
suetsugu@cc.miyazaki-u.ac.jp*

^{*5} *Construction Project Consultants Inc., Japan
t_nishi@cpcinc.co.jp*

Abstract

In this study, based on the damage survey in Nepal, shake table tests and rainfall experiments using a typical gabion retaining wall model in Nepal and concrete retaining wall were conducted to investigate the influence on earthquake and rainfall. In the model test, the same two retaining wall models with slope model grounds behind the retaining wall models were constructed in rigid soil container. Then, the model tests containing shake table test after preceding rainfall and rainfall test after shaking were simultaneously performed to confirm difference of the damage aspects caused by these patterns. The same tendency on deformation mode of gabion retaining wall was confirmed regardless of the order by rainfall and earthquake. As for the collapse of the retaining wall, though the concrete retaining wall collapsed suddenly during shaking, the gabion retaining wall collapsed after shaking for a while in case of shake test after the preceding rainfall, and exhibited so-called tenacity.

Key words: Gabion, Retaining wall, Earthquake, Rainfall, Model test, Residual deformation

^{*1} 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門

^{*2} 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

^{*3} 高知大学

^{*4} 宮崎大学

^{*5} CPC

1. はじめに

2015年ネパール・ゴルカ地震では、中山間地域に多い蛇籠を用いた道路擁壁が高い屈撓性を発揮し、機能を維持した例も多数確認された^{1),2)}。蛇籠は高い屈撓性・透水性、材料入手、工期や運搬や撤去の容易さ、自然材料の活用等に優れ、国際的に土木工事に幅広く利用され様々な用途で展開が可能である。一方、蛇籠構造物はコンクリート構造物に比べ、設計法が明確でないため、既往の研究において、実大実験に基づく耐震性の検証を行い、ネパール現地向けの効果的な構造形式の提案を行った³⁾。しかし、集中豪雨などの自然災害の多いネパール国においては斜面崩壊が頻発しており、耐震性に加え、降雨の影響についても検討すべき課題と考えられる。

既往の研究では、115カ所の蛇籠構造物被害調査の分析結果⁴⁾、中詰め材の要素試験^{5),6)}や小型模型実験⁷⁾、そして、これらの知見に基づき、ネパール現地に多く存在する蛇籠を用いた道路擁壁の耐震性評価のための実大振動台実験の実施と数値解析による検証を行っている^{8),9)}。特に、実大振動台実験では、内寸高さ4.0m、幅3.1mおよび奥行き11.5mの箱型の土槽を用い、その中に、断面直交方向に3列の壁高3mのネパールで最も多いサイズの擁壁と背後地盤を造成した。加振は、漸増部2s、定常部4sおよび漸減部2sで構成される3Hzの正弦波を用い、加速度振幅を4段階に分けて加振を行った。蛇籠擁壁断面は、直立壁、階段状および蛇籠の数を増やした重力式の3ケースを対象とし、加振前後に3Dレーザー計測を行った。3Dレーザー計測による蛇籠擁壁の残留変形を比較すると、直立壁については、加振後に崩壊には至らなかったものの大きく前傾し、現地調査における幾つかの被害状況と類似した様相を示した。他2ケースについては変形が軽微であり、現地に適応可能な構造形式として有効な構造形式として提案され、また、試行くさび法を利用した設計手法構築の可能性も示された¹⁰⁾。

また、一連の研究結果がネパール国内で適正に活用されるよう、誤った知識の是正および本研究に基づく設計・施工手法の提案・周知が必要であると考え、ネパール国ダディン郡で蛇籠擁壁を試験施工し、設計・施工上の問題点を抽出した^{11),12)}。その過程で、蛇籠擁壁の耐震性能を向上させるノウハウを蛇籠設計・施工ガイドラインおよびTechnical Noteと

して書き記した^{13),14)}。さらに、蛇籠設計・施工ガイドラインが現場技術者等に周知されるよう、ワークショップの開催や施工指導の実施等、本研究結果がネパール国内で広く活用されるような取組を実施してきた。その後、設計の高度化のため、金網の性能についても引張試験と数値解析的アプローチにより強度発現メカニズムを検討し、最も汎用性の高い菱形と亀甲状金網について、形状と引張方向の違いによる変形・強度特性の違いを明らかにした¹⁵⁾。

これら一連の流れを振りかえって、冒頭に述べた蛇籠の屈撓性・透水性と集中豪雨に起因する斜面崩壊に対する検討はなされていないことから、耐震性に加え、降雨の影響についても検討すべき課題と考えた。特に、地震は突発事象であるが、降雨は雨期を有する地域柄、毎年抱える問題として、切実で重要な課題である。また、地震と降雨は発生頻度が違うことで、整備期間や整備水準もそれぞれ異なるため、両立が難しいものと考えられる。

そこで、本研究では、蛇籠擁壁とコンクリート擁壁を用い、降雨と振動を交互に作用させる模型実験を行い、構造形式の違いによる被害形態への影響を調べた。一連の実験から、蛇籠とコンクリートの構造形式の違い、また降雨と加振の作用の違いによって、擁壁の変形・変状傾向と最終的な崩壊に至る特徴について調べ、両者が複合化した際の起こり得る被害と蛇籠擁壁の性能についての基礎的なデータを取りまとめた。

1.1 研究の背景

ネパール国は面積約147,181km²の開発途上国で、その地形・地質は変化に富む。国土全体で地震や風水害のリスクが高く、斜面災害や軟弱層に起因した市街地の地盤沈下、液状化など様々な地盤工学的課題を抱えている。毎年のように訪れるモンスーンに由来する水害に加え、近年では、2015年4月25日に発生したネパール地震(M_w 7.3)により土木・建築構造物の多くが被災した¹⁶⁾。この際、地震や地震後の豪雨で道路閉塞が多発したアラニコ・ハイウェイを対象に、被害実態や土木構造物の損傷程度などを現地調査した結果、蛇籠構造物の主材料である河床礫が豊富であるため、安価で簡易な施工で対応できる利点を活かし、道路擁壁やガードレール、水制工等として、蛇籠が広く利用されていることがわかった¹⁷⁾。このような状況下において、蛇籠構造

物の強化は、安全・安心な暮らしを守るための近道であるといっても過言でないと考えられる。これまでの研究では、蛇籠擁壁に関する耐震性に重きを置いた研究を実施し設計・施工方法の提案を行い現地での試験施工へ結びつけたが、毎年の降雨の影響についても検討すべき課題であり、地震との複合化についても、現実的な問題であるものと考えられる。

特に、近年、様々な災害や地球環境問題に関し、地球温暖化に起因する気候変動や極端気象による各種災害が頻発している。この気候変動による災害の頻発化について、日本国内においても、行政や学術の場、あるいは国際的に議論されている^{18)・19)}。しかし、地盤防災分野における地球温暖化や気候変動に関する研究は、地盤工学に焦点を絞った内容より地球温暖化に伴う取り組みが多く²⁰⁾、メカニズムに関する研究成果は意外に少ない。

例えば、長期間に渡る地球温暖化関連事象としての降雨や豪雨は適応策として、非温暖化関連事象として突発的に起こる地震は性能設計によって対策が講じられるのが現状である。これらは複合作用の中でも、最も考えやすい組み合わせであるが、地震単独($a=1$)による被害と豪雨単独($b=1$)による被害の足し算が複合災害($a+b=2$)となり得るのであれば解決策の糸口はあるが、そうでない場合には、大きな課題となる。図1に示す様に、先行降雨による地盤の飽和度・地下水位上昇後に地震が作用した場合、せん断抵抗の減少に起因する円弧滑りが生じる可能性がある。逆に先行地震の場合、地盤内のせん断ひずみや微小なクラックにより、降雨浸透しやすい状態となり得る。これらは作用の順序が違うだけであるが、先行する外力による損傷レベルやメカニズムによって最終的な被害様相は異なるため、単なる単独事象同士の足し算、つまり、上述の $a+b=2$ の関係とはなり得ないことからその影響は未知数である。したがって、構造物の整備水準を合わせて対策することは困難であることから、まずは、基礎データの取得に重きをおいた実験研究が必要であると考えられる。

1.2 研究の目的

蛇籠は、一つ一つが独立した単体構造のため運搬・材料調達・施工が容易であり、中詰土と鉄線で構成される簡単な構造であるため、道路擁壁、砂防施設や河川護岸等の構造物を始めとし、法覆工、水制工、

床止め工および侵食防止などの地震や風水害に対する防災用の仮設材とする等、多種多様な用途で国内外における土木現場や農業土木分野に用いられている²¹⁾。

1.1において述べた2015年4月25日に起きたネパール・ゴルカ地震では、平地での道路盛土被害や山間地での斜面崩壊とそれに伴う道路擁壁の被害が確認された。蛇籠擁壁に軽微な変形は生じたものの崩壊に至らず、国内の震災でも同様な事例が見られており²²⁾、蛇籠擁壁はその屈撓性から地震による地盤変形に追随し崩壊を防ぐ面で有利な構造といえる。本研究では、降雨・地震の単独および複合作用に対する対策として、ミニチュア蛇籠を用いた模型擁壁を対象とした模型実験を行った。2015年ネパール・ゴルカ地震後における蛇籠擁壁調査では、写真1に示すように、剛なコンクリート擁壁の圧壊は確認された一方で、蛇籠擁壁が柔で粘り強い構造であることから破局的な破壊や損傷を防ぎ⁴⁾、その結果、道路機能を維持していた。また、この柔軟な変形メカニズムについて、実大規模振動台実験により、直立式の蛇籠擁壁に大変形が生じたが崩壊に至らず、地震に対する粘り強さを発揮していた²³⁾。

そこで、振動台上で試験が可能な降雨装置の製作を行い、1/5相当のコンクリートおよび蛇籠模型の両者による中型土槽を用いた模型実験を行った。外力の条件としては、降雨・地震の単独作用、および複合作用(先行降雨+地震, 先行地震+降雨)であり、これらに対する蛇籠擁壁の変形抵抗メカニズム評価と影響把握を行った。蛇籠擁壁の形式としては、ネパール地震調査で得られた大きな孕み出しや崩壊が顕著であった蛇籠擁壁を対象とした。なお、今回、

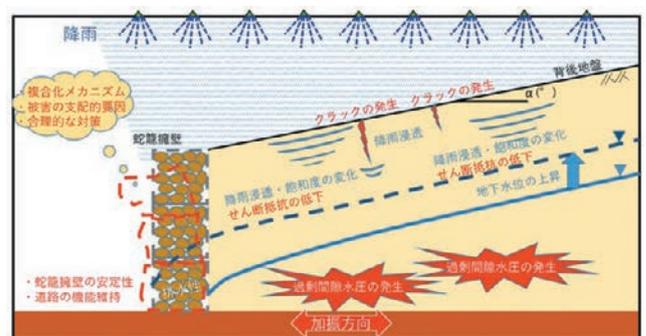


図1 降雨と地震の複合作用による蛇籠擁壁の変形概念
Fig. 1 Deformation concept of gabiion retaining wall due to combined action of rainfall and earthquake.



(a) 軽微な変形の蛇籠構造



(b) 圧壊したコンクリート製擁壁

写真1 ネパール・ゴルカ地震後の被害の様子¹⁶⁾

Photo 1 Damage after the Nepal-Gorkha earthquake.

中規模土槽による実験検討を行ったが、今後、図2に示す実大実験実施の足掛かりとしても視野に入れている。既往の研究では、蛇降雨装置の籠の中詰め材の変形特性、ミニチュア蛇籠を用いた蛇籠積層体の変形特性とその評価、実大模型実験による耐震性の検証と再現数値解析を行い、最終的に現地試験施工を通じ、耐震性蛇籠擁壁の開発と耐震性評価手法を提案している。ここで検討された知見は、ネパールにおいて蛇籠道路擁壁のガイドラインに集約され、既に配布されているが、更に安心・安全な蛇籠擁壁の普及を可能にするため今後、降雨に対する安定問題にも着手していくつもりである。

2. 既往の研究

蛇籠とは、竹材を円筒形に編み内部に玉石、割石などを充填して河川工事に使用したことから始まり、今日見るような垂鉛めっき鉄線構造のものに発展・成長した土木構造物である²⁴⁾。蛇籠の起源は紀元前361年～251年頃に中国四川省の都江堰の築堤に際して考案、使用されたと考えられており、特徴としては、高い屈撓性及び追随性、透水性、籠材の運搬や材料の収集が比較的容易なこと、工期が短いこと、そして自然材料を使用した場合の環境面への配慮等が挙げられる。写真2および写真3に示すように、蛇籠は年月ともに植物が自然に繁茂し、また、

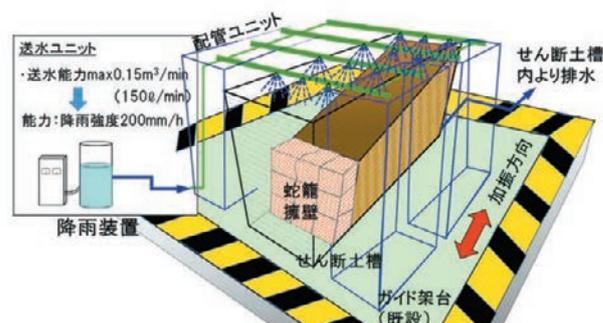


図2 大型実験の概念図

Fig. 2 Conceptual diagram of a large experiment.

その排水性から農業生産に資する施設としても利用され、環境と防災を両立するグリーンインフラとしての有用性は高く評価される場所である。

既往の一連の研究を図3に示し、以下に個別テーマについて簡単に紹介する。

2.1 ネパールにおける地震被害調査

ネパール国は14.7万km²と日本の4割弱程度の国土を有する内陸国であり、その約15%が標高4,000m以上の高地帯に分類されている。首都カトマンズは山地に囲まれた盆地地形で、軟弱な地盤が広がる一方、中山間地域は複雑かつ急峻な地形・地質で形成されているため、地震や降雨による落石や山腹崩壊、地すべりなどの斜面災害の発生が多いことで知られている^{25), 26)}。この国における自然災害



写真2 植物繁茂の例
Photo 2 Example of natural overgrowth of plants.



写真3 バナナ畑における蛇籠利用例
Photo 3 Example of utilization of gabion for a banana field.

は、5月～9月の雨期に生じるモンスーンによる降水や活発な地震活動が主である。実際に、1993年の集中豪雨では、連続降雨量830mmの降水により大規模な斜面災害や洪水災害が発生し、死者・行方不明者は2,000人以上となった²⁷⁾。また、2015年4月25日に発生したネパール・ゴルカ地震 ($M_w=7.8$) では土石流や斜面崩壊等により道路閉塞が多発し、復旧の遅れから孤立化が長期化し経済活動が停滞するなどの市民生活に大きな影響を与えた²⁸⁾。筆者らは、ネパール・ゴルカ地震で斜面災害が顕著に見られた中山間地域を対象とした予備的調査を発災約3カ月後の2015年7月に行った⁴⁾。その結果、もたれ式コンクリート擁壁の被災が顕著である一方、



図3 既往の研究
Fig. 3 Previous research.



写真4 背面からの土砂崩れに耐えた蛇籠道路擁壁の例³⁾
Photo 4 Example of a gabion road retaining wall that resisted landslides from the back slope.



写真5 基礎地盤の変形に追従した蛇籠道路擁壁の例³⁾
Photo 5 Example of a gabion road retaining wall that follows the deformation of the foundation ground.

写真4および写真5のような道路擁壁や河川護岸などに設置された蛇籠構造物の多くが強震に耐え、機能が維持されたことが確認された。

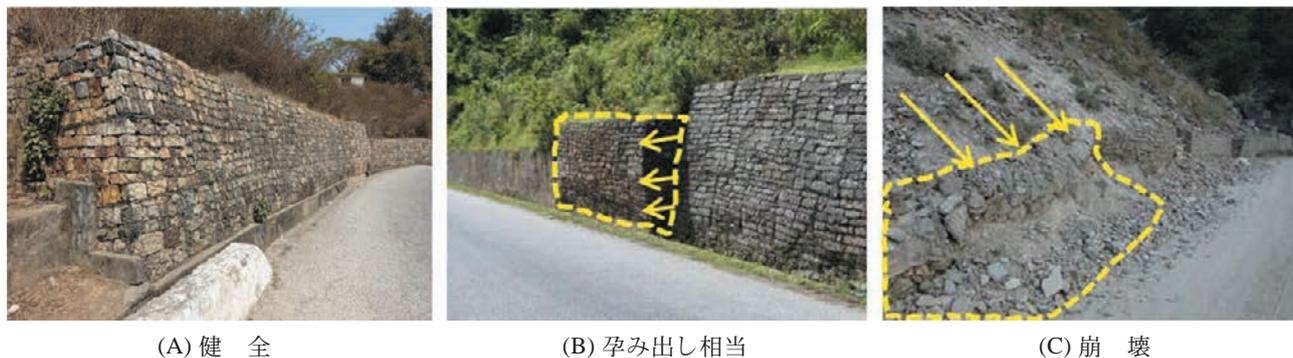


写真 6 被害状態の分類例³⁾
 Photo 6 Classification example of damage status.

道路擁壁を調査した範囲では、原ほか³⁾によって写真 6 に示すよう、A(健全)、B(孕み出し相当)および C(崩壊)に分類し、B や C と判定された道路擁壁の多くは地震により生じたことを現地住民の証言から確認している。特に、C に至るケースは、地すべりや落石を伴うような大規模な被災箇所に限られ、蛇籠が多積層で擁壁が高い場合、蛇籠の上載荷重の増加とともに籠枠の孕み出しが多く見られていた。

2.2 蛇籠の施工方法に関する調査

道路擁壁に関する現地調査から、籠枠の寸法や形状、中詰材の寸法は各現場による大きな差異は見られないが、製作方法や中詰材の調達方法は大きく異っていた。用いていた籠枠はある程度統一的な考え方により選定されるが、それ以外の細部については発注者、もしくは施工者の経験則や能力に依存している。中詰材の籠枠への投入は全て人力によるが、写真 7 に示すように、籠枠側面には 250 mm 前後にレンガ状に加工された扁平な岩塊を丁寧に隙間なく積層し、見栄えの良い均質な形状に仕上げるのに対し、蛇籠内部は我が国で採用される中詰材とほぼ同程度の粒径の玉石や加工によりできた岩塊の端材をランダムに投入していることを確認した。

2.3 中詰め材の要素試験

2.2 において、籠枠側面に扁平な岩塊とその内部に玉石や岩塊をランダムに投入して蛇籠構造が構成されていることが報告された。そこで、原ら^{6), 29)}は、内部の中詰め材が蛇籠単体の常時および地震時の力学特性を支配していることを想定し、蛇籠の安定性に与える影響を明らかにすることを目的に、圧密排水三軸圧縮 (CD) 試験と繰返し非排水三軸試験



写真 7 粒径の異なる中詰材の投入状況³⁾
 Photo 7 Introduction of filling materials with different particle sizes.

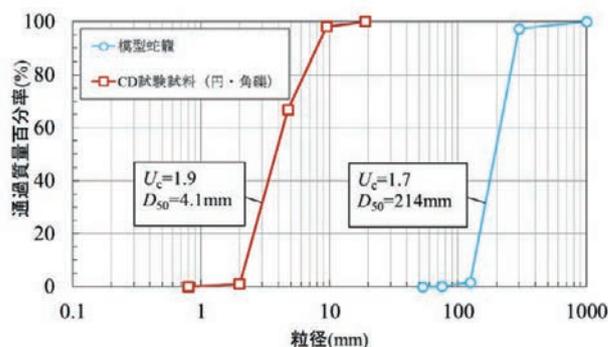


図 4 実大模型蛇籠の中詰材と各試料の粒径加積曲線
 Fig. 4 Grain size distribution curve of the filling material of real scale model gabion and each sample.

を行っている。使用した試料は、ネパール国で使用されている蛇籠中詰材の玉石と岩塊と類似の形状や硬度を有する角礫(茨城県筑波山産の碎石)と円礫(高知県仁淀川の河床砂礫)であり、図 4 に示す粒度に調整して用いている。一連の試験から得られた知見は、1) 粒度や相対密度 D_r がほぼ等しいにも拘わらず、円礫は正のダイレイタンスを、角礫は負の

ダイレイタンスーを示したこと、2) 円礫のせん断抵抗角は $\phi_d=46^\circ$ 、角礫 $\phi_d=44^\circ$ となり、両試料ともに $D_r=80\%$ 程度の密詰の豊浦標準砂よりもせん断抵抗角が大きいこと、および3) 円礫と角礫の力学特性が異なる要因は、円礫は粒度組成や相対密度が等しいが体積収縮可能な余裕空隙比 $e-e_{\min}$ が角礫の倍以上小さく、一方、角礫は粒子が破碎しやすく体積圧縮しやすいことなどが影響しているとしている。

加えて、中詰材の動的特性については、原ら³⁰⁾によって、動的変形特性試験(JGS 0542-2000)が行われている。図5～7に連続の試験結果を示すが、これらより得られた知見は、1) 粒度組成や相対密度がほぼ等しいにも関わらず、円礫の初期せん断剛性率は、角礫に比べ2倍程度大きく、また空隙比に依存すること、2) 試験試料は、異なる粒子形状を有する礫材料と類似の非線形特性を示したこと、および3) 試験試料は、角礫、円礫で類似のひずみ依存性を示し、異なる粒子形状による差は見られなかったことを確認した。

2.4 小型模型実験

末次ほか⁷⁾は、蛇籠擁壁の基本的な挙動を調べるための模型実験装置(図8)を作製し、変形抵抗に及ぼす中詰め材の形状、充填密度、蛇籠同士の緊結ならびに上載荷重の影響を調べている。使用した模型蛇籠の寸法は20 cm×20 cm×20 cmであり、蛇籠節点は緊結されている(写真8)。連続の実験に用いた中詰め材は、市販碎石(筑波産)の角礫と高知県奈半利川で採取した円礫であり、粒径は37 mm～19 mmであった。実験は、平面ひずみ状態で1列3段直立積みの模型蛇籠擁壁に、最上段蛇籠上面に剛板を介して鉛直方向に一定圧力を载荷させた状態で、中段の蛇籠背面に剛板(180 mm×180 mm)を介して水平方向に一定変位速度1.5 mm/minで载荷された。

写真9に中詰め材を密詰めにして蛇籠間を緊結したケース、密詰めで緊結無、および緩詰めで緊結有の3ケースにおける水平変位90 mm時の変形状況をそれぞれ示している。この研究では、蛇籠擁壁の水平抵抗に及ぼす中詰め材の形状、ならびに上載荷重の影響について調べられたが、1) 擁壁の変形量が小さいときの変形抵抗は角礫に比べて円礫の方が大きいこと、および2) 蛇籠同士の緊結は中詰め材の形状に関わらず変形抵抗を増加させる効果があることが確認された。

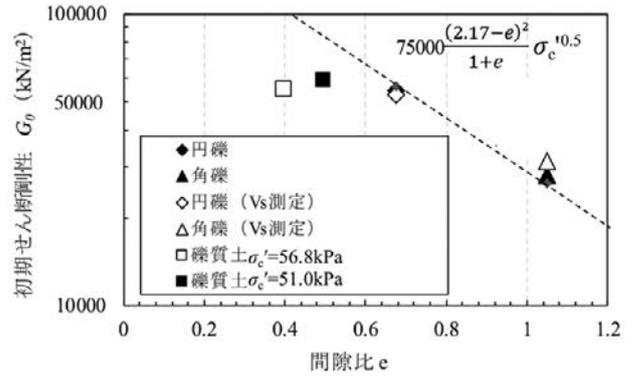


図5 初期せん断剛性 G_0 の比較^{31), 32)}

Fig. 5 Comparison of initial shear modulus G_0 .

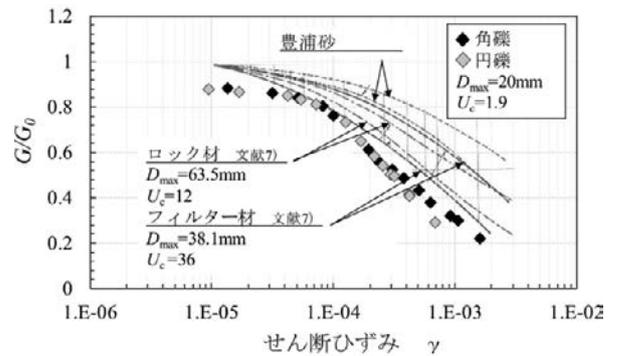


図6 G/G_0 - せん断ひずみ γ の関係³³⁾

Fig. 6 Relationship between G/G_0 and shear strain γ .

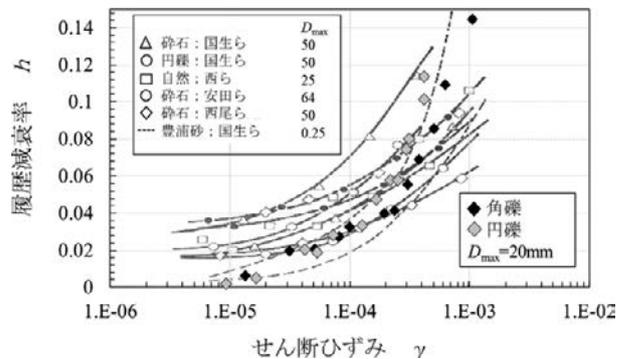


図7 減衰率 h - せん断ひずみ γ の関係³⁴⁾

Fig. 7 Relationship between damping factor h and shear strain γ .

加えて、中詰め材に市販の40 mふるいを通した碎石(宮崎県産砂岩)を用い、同様な模型実験が行われた。中詰め材の碎石は、既往の研究と同様に金網の大きさを考慮して37 mm～19 mmとした。この実験では、模型蛇籠で使用する金網の向きに焦点を当て、図9に示すように、菱形金網を構成する列線の方向を鉛直方向に組み合わせる条件を縦配置、

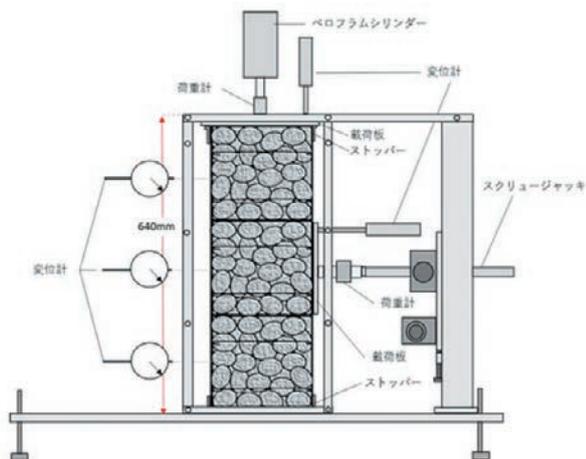


図 8 蛇籠模型の水平荷重実験装置⁷⁾
 Fig. 8 Lateral loading test apparatus of gabion model.

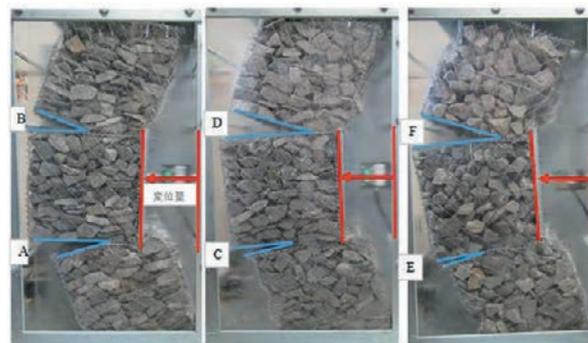


写真 8 使用した模型蛇籠
 Photo 8 Gabion model used in the tests.

および水平方向に組み合わせた条件を横配置として比較実験を行った。列線の配置方向が異なる 2 種類の蛇籠擁壁の水平荷重と水平変位の関係を図 10 に示す。水平荷重は、ロードセルで計測される水平力を蛇籠上面の面積 (20 cm×20 cm) で除した値である。縦配列条件の水平抵抗は横配置のそれよりも大きいことがわかる。この実験において、金網形状(列線の向き)が異なることで、金網の剛性が大きいほど擁壁の水平抵抗力が大きくなり、列線を縦配列にした金網の場合が大きな水平抵抗を示すことを確認した。なお、金網そのものの剛性に関する評価は、2.6 にて述べる。

2.5 実大振動台実験

実大模型実験は、蛇籠擁壁の耐震性能および地震時動的挙動を検証するために、Nakazawa *et al.*^{8), 17)} によって詳細に報告されている。この実験では、現地調査結果に基づき、図 11 に示すように、蛇籠単体サイズは、幅、高さおよび奥行きが概ね 100 cm のものを用いた 3 m の壁高の擁壁モデルによる実験が実施された。蛇籠金網については、ネパール



(a) 密詰め・緊結有 (b) 密詰め・緊結無 (c) 緩詰め・緊結有

写真 9 水平変位 90 mm の蛇籠模型の変形状況⁷⁾
 Photo 9 Deformation status of a gabion model at a horizontal displacement of 90 mm.

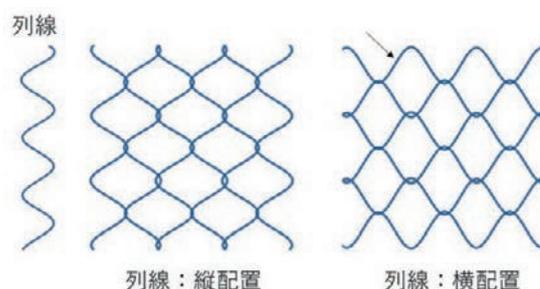


図 9 実験条件(金網の向き)³⁷⁾
 Fig. 9 Experimental conditions (direction of wire mesh).

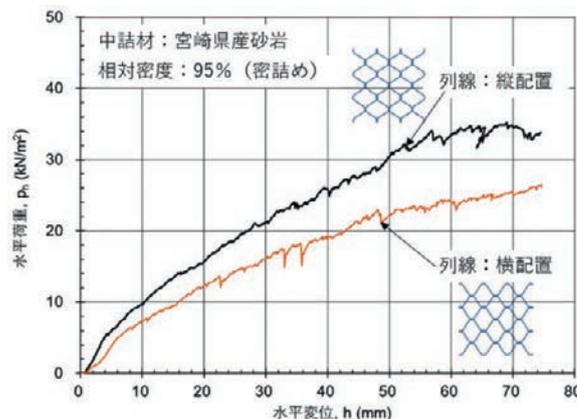


図 10 実験結果³⁷⁾
 Fig. 10 Experimental Result.

現地における製品の入手が困難であったため、日本で調達可能な日本工業規格 (JIS A 5513) の鉄筋径 $\phi 3.2$ mm, 網目が 13 cm の菱形状の垂鉛メッキ製品を用いた。なお、ネパールでは、鉄筋径が $\phi 3 \sim 5$ mm, 網目形状は亀甲状, 四角および菱形状の多様なものが確認されたが、網目サイズは、最小で 9 cm, 最大で 18 cm であった。一連の実験では、ネパールで多く見られた直立 3 段積み

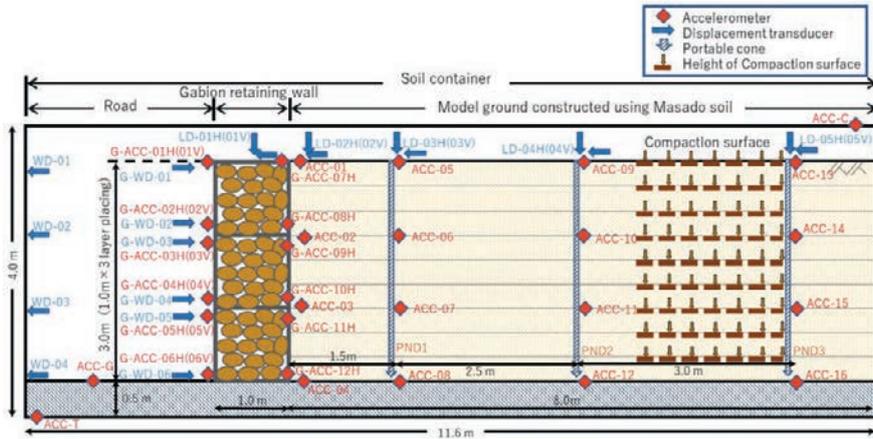


図 11 実大蛇籠擁壁実験の Case1 断面図⁸⁾
 Fig. 11 Cross section of Case 1 in full-scale gabion retaining wall experiment.

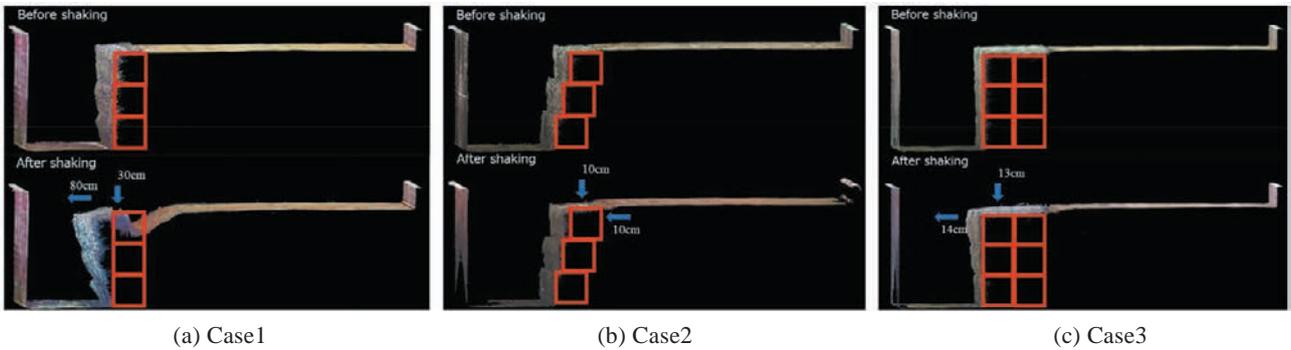


図 12 3D レーザー計測結果⁸⁾
 Fig. 12 Results of 3D territorial laser measurements.

よび新たに提案した構造形式の 2 ケースからなる 3 ケースの蛇籠擁壁を用いた実験 (Case1 ~ 3) が行われた⁸⁾。3D レーザー計測結果を図 12 に示すが、ネパールで最も多い構造形式である Case1 の擁壁の前傾が著しいことが分かる。そこで、3 段直立積みを対象とするケース (Case1) について図 13 に例示し、残留変形について述べる。加振は、3 Hz 正弦波の加速度振幅を 65, 132, 203 および 257 gal の 4 段階に調整して行われ、動的挙動としては、加振とともに擁壁の水平変位が累積し、背後地盤にクラックが生じる様子が確認されている。加振終了後の擁壁の前傾は特に、2 段目の蛇籠の変形が著しく、天端で約 80 cm の水平変位が生じ、これに伴い背後地盤の大きな崩壊が見られた。最終的には、18 度程度前傾したまま擁壁の倒壊は見られていない。このような擁壁の変状はネパールでも多く見られたものであり、倒壊に至らないのは、所謂粘り強さであるものが報告された。

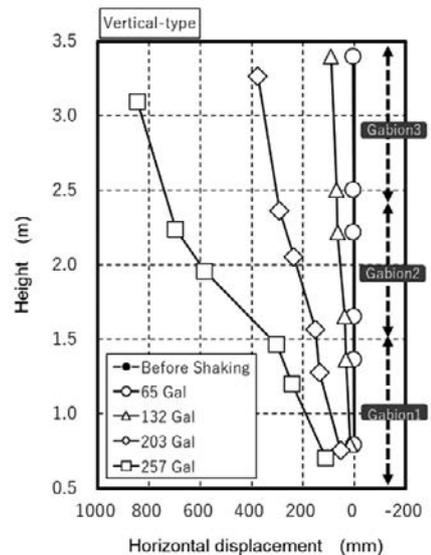


図 13 蛇籠擁壁前面の水平変位⁸⁾
 Fig. 13 Horizontal displacement of the front of the gabion retaining wall.

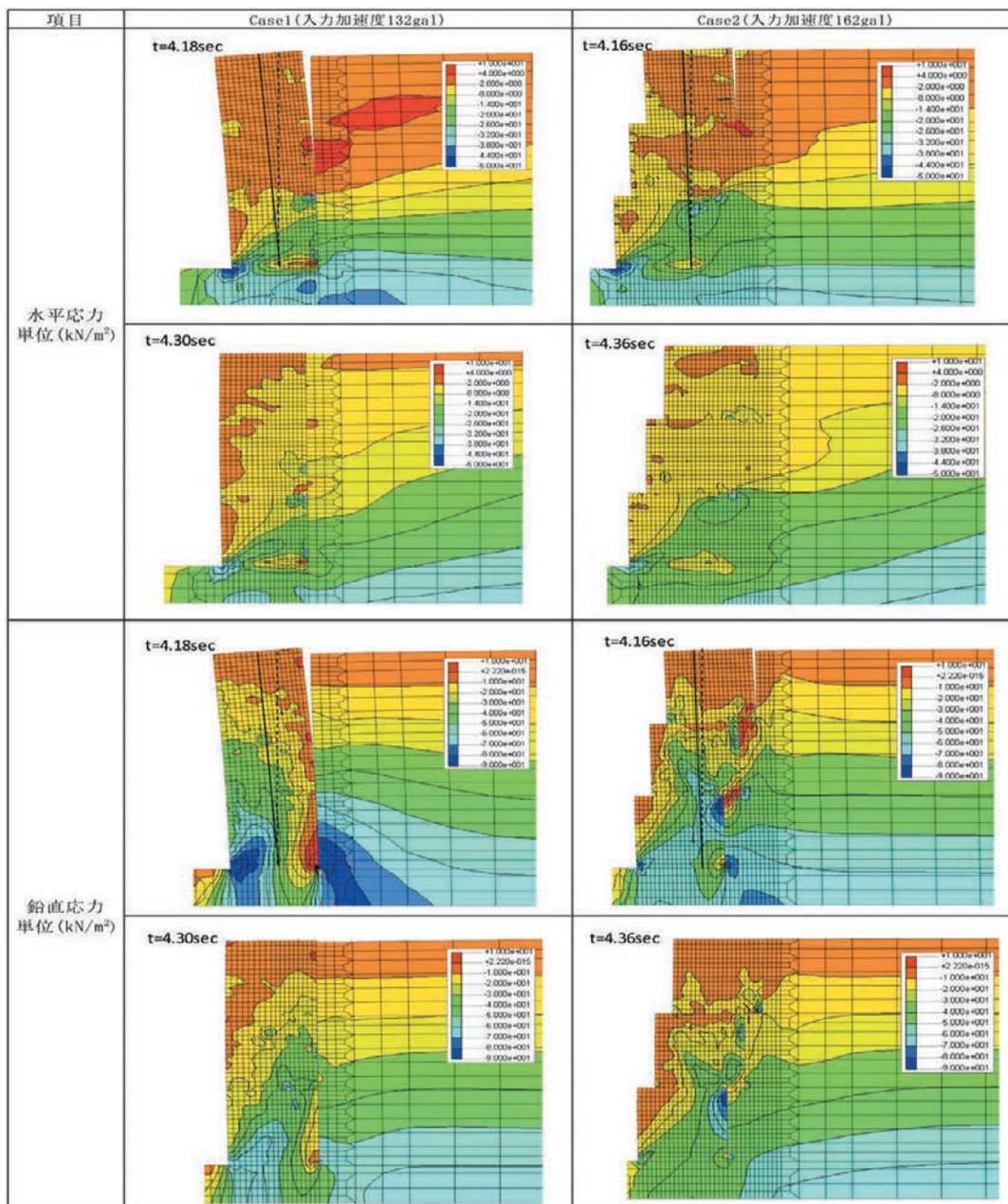


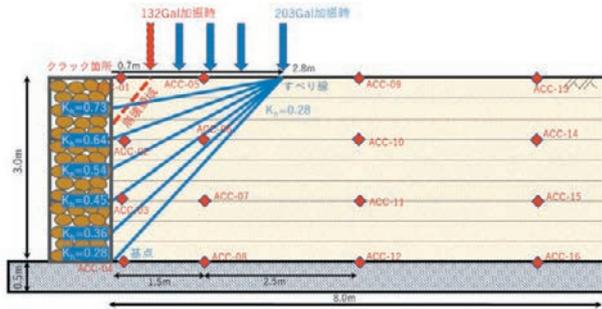
図 14 動的解析による変形モードと応力分布 (変形倍率 20 倍)¹⁷⁾

Fig. 14 Deformation mode and stress distribution by dynamic analysis (deformation magnification 20 times).

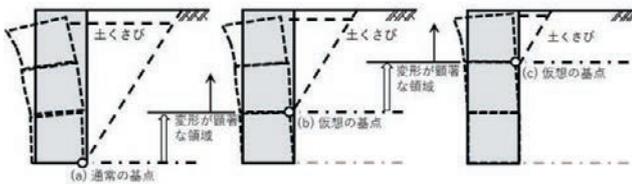
また、西ほかにより、Case1 と Case2 を対象とする有限要素法 (FEM) による静的解析および動的解析が行われている³⁵⁾。図 14 は、動的解析による変形モードと応力分布を解析事例として示している¹⁷⁾。

動的解析結果から、比較的大きな加振レベルでは蛇籠擁壁と背面地盤が衝突と開きを繰り返す現象が確認された。実験では背面地盤は乱され、発生した滑り面上の土砂が開きの発生した瞬間に両者の隙間に落とし込まれ、蛇籠擁壁の累積変位の増加が生じ

た現象を説明し得るものであるが、このような影響が少ない入力加速度レベルの小さい条件では、動的解析結果と実験結果は良い一致を示すことが報告されている。また、もたれ式の Case2 では、蛇籠擁壁近傍の背面地盤に局所的クラックが発生しやすくなる可能性があり蛇籠に若干の孕みが生じることは考えられるが、大きな前傾の発生等安定上の問題は Case1 に比較して発生しにくく、より耐震性に優れた構造形式として実験結果と一致している。



(a) 203 Gal 加振実験における推定すべり線分布



(b) 土くさびと基点高さの関係

図 15 蛇籠擁壁の変形と土くさびの関係¹⁰⁾

Fig. 15 Relationship between deformation of gabion retaining wall and soil wedge.

一方、設計上の課題として、擁壁設計に行う通常
の安定計算では擁壁を剛体として扱うため、現状で
は柔構造である蛇籠の特徴を反映する術がなく、利
点が活かされない課題が浮き彫りになった。そこで、
Nakazawa *et al.*¹⁰⁾は、上述の Case1 を対象に、実大
実験結果を参考とし、試行くさび法により推定され
た主動崩壊の範囲および水平震度 k_h の推定値と実
験結果との比較を行い蛇籠擁壁の設計手法確立に向
けた提案を行っている。図 15 に示す様に、試行く
さび法における推定すべり線の基点を浅くして検討
した結果、実験から得られた蛇籠擁壁の変形が著し
くなる深度と基点が概ね整合することを確認した。
これにより、試行くさびの基点を調整することで、
蛇籠擁壁の柔軟性を考慮した地震時安定性評価手法
の有用性を示唆していると考えられる。

2.6 金網の性能評価

Nakazawa *et al.*¹⁵⁾は、中詰め材を拘束する蛇籠金
網そのものの力学特性を把握するため、基本検討とし
て、金網網目形状が菱形タイプおよび亀甲タイプに
ついての引張特性の把握を行った。また、この結果
に基づき、次章において FEM による再現解析を行
い、金網の引張方向によって変形特性が異なること
を示している。



(a) 網目の列線が鉛直方向



(b) 網目の列線が水平方向

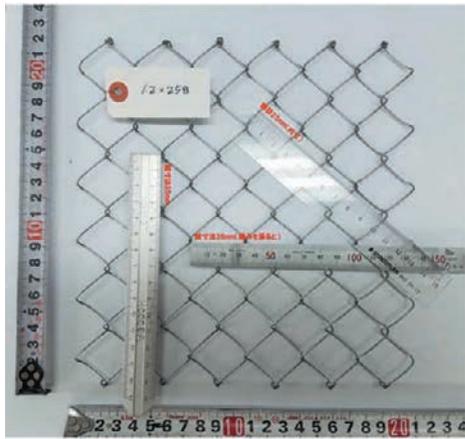
写真 10 蛇籠擁壁の試験施工の事例³⁷⁾

Photo 10 Example of test construction of gabion retaining wall.

図 15 に示すように、柔構造である蛇籠擁壁に曲
げ変形が生じた場合、背面側金網の引張抵抗により
前面への変形が拘束されるものと考えられるが、金
網形状やその変形・強度特性はまだ検討されてい
ない。亀甲型の金網を用いた試験施工事例³⁷⁾では、
写真 10 に示す通り、想定する擁壁の変形方向対
する金網の網目の方向も考慮されてはならず、支配
的要因となり得るかも不明である。そこで、日本国
内で主流の菱形金網と海外で良く用いられている亀
甲金網について、金網節点の折り返し形状や摩擦特
性を考慮し、写真 11 に示す菱形および亀甲の 2 種
類の網目形状の金網 (200 mm×200 mm) を用いた引張
試験を実施し、表 1 に示すケースで基本的な力学特
性と変形特性についての把握が試みられている。

引張試験に用いた試験体の線材は、線径 $\phi 1.2$ mm
の垂鉛メッキ鉄線とし、線材の引張り強さは、350
～ 380 N/mm²であった。図 16 に引張り力 T (kN) と
引張量との関係を示すが、いずれのケースも変位制御
による 40 mm/min を試験条件とした。

図 16 に各ケースの試験結果および写真 12 に試
験後の金網の変形の様子をそれぞれ示す。Case1 (a)
および (b) で実施した引張速度の影響については、
10 mm/min と 40 mm/min で違いは見られなかった



(a) 菱形金網



(b) 亀甲金網

写真 11 一連の引張試験に供した金網³⁷⁾
Photo 11 Wire mesh used for a series of tensile tests.

表 1 引張り試験ケース³⁷⁾
Table 1 Tension test cases

Case1 (a)	Case1 (b)	Case2 (a)	Case3 (b)
Lateral direction	Longitudinal direction	Lateral direction	Longitudinal direction
Rhombus shape steel wire mesh		Turtle shell steel wire mesh	

※●はボルト固定点

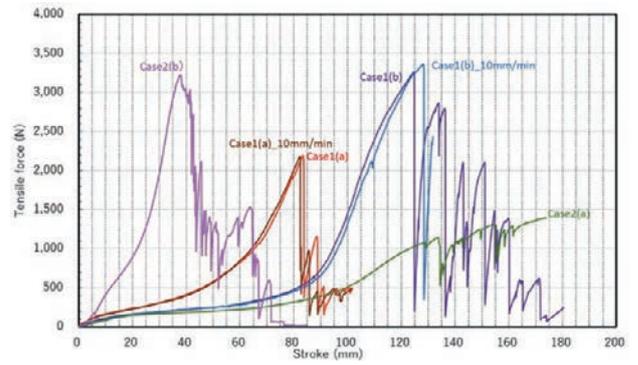


図 16 金網の引張試験結果³⁷⁾
Fig. 16 Results of wire mesh tensile tests.

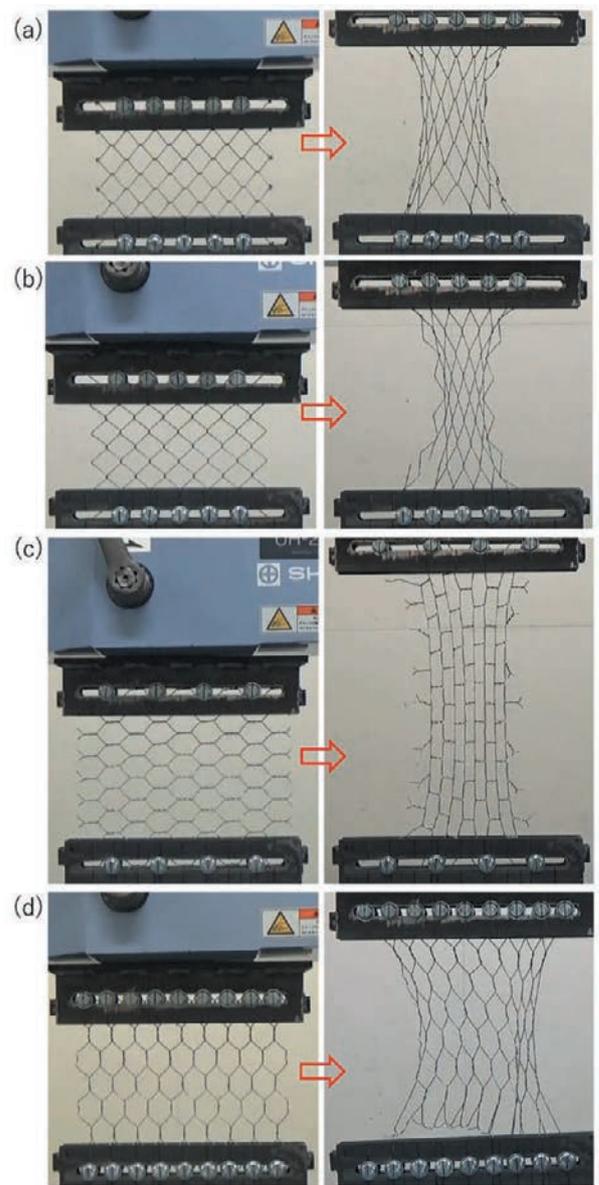


写真 12 引張試験前後の金網形状³⁷⁾
Photo 12 Wire mesh used for a series of tensile tests.

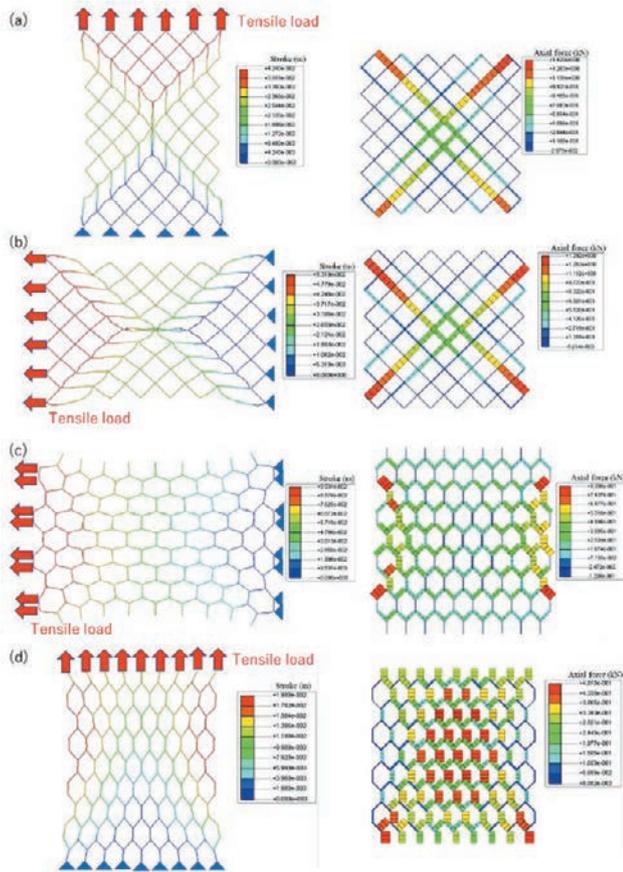


図 17 メッシュ図³⁷⁾
Fig. 17 Mesh diagram.

め、40 mm/min の引張速度による試験結果のみに着目する。一連の試験結果から、金網形状の違いに拘わらず、引張方向によって強度異方性を持ち、いずれも列線方向に強い挙動を示す引張特性を有することが報告されている。また、亀甲金網については、3 回巻いて構成されるねじり部の摩擦が引張に対し支配的要因となり、折れ点で引っ掛けるだけの菱形金網に比べ、異方性が強いことが確認される。

上記の引張試験結果を対象とした FEM による再現解析を行い、変形形状について試験結果との比較を通じ、FEM モデルの妥当性確認と改善点の整理が行われている。表 1 に示した試験ケースと同様に、メッシュ図を図 17、および試験結果と解析結果の比較を図 18 に示す。菱形および亀甲金網の一方、上記の引張試験結果を対象とした再現数値解析では、試験結果がいずれも引張抵抗を発揮するまでである程度の変位を要するため、初期の段階から剛性を有する線形解析との直接の比較は解釈が難しい。しかし、変位量と引張り力の関係において、試験で金網の緩みが

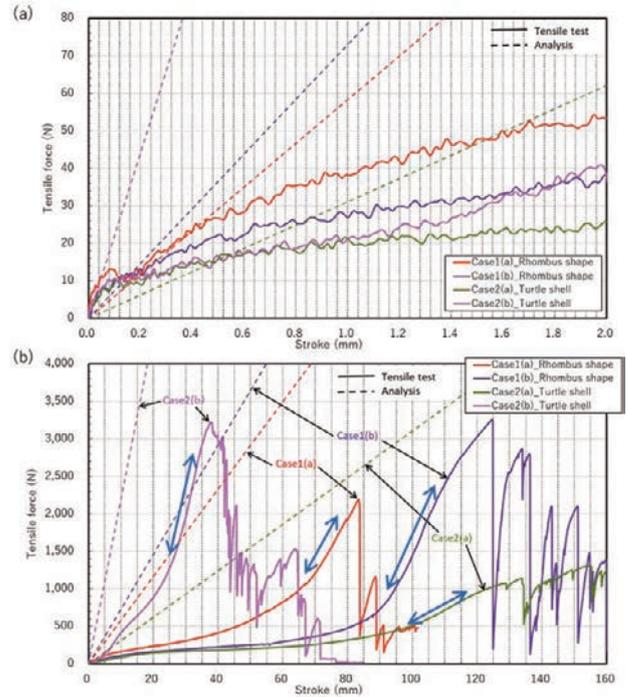
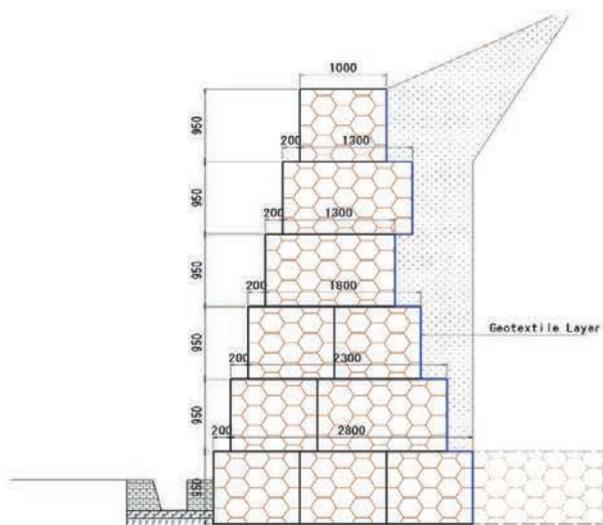


図 18 試験結果と解析結果の比較³⁷⁾
Fig. 18 Comparison of results between tests and analysis.

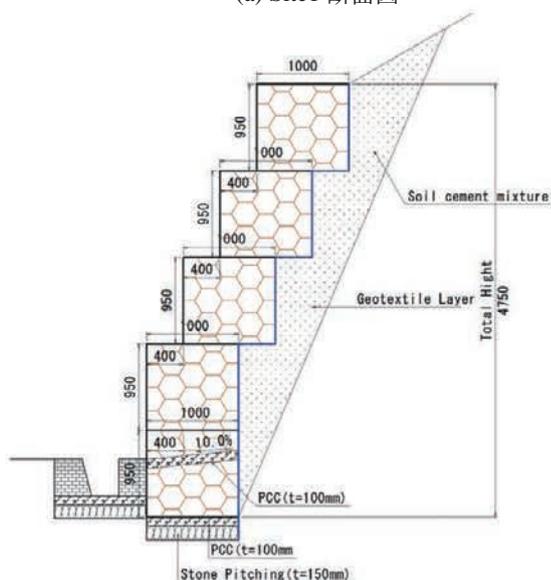
なくなり剛性が回復した弾性変形範囲については、試験と解析結果の整合が各ケースでとれており、金網が損傷や破断に至るまで、モデル化やシミュレーションが可能であることを示唆するものである。

2.7 ネパールにおける試験施工とモニタリング

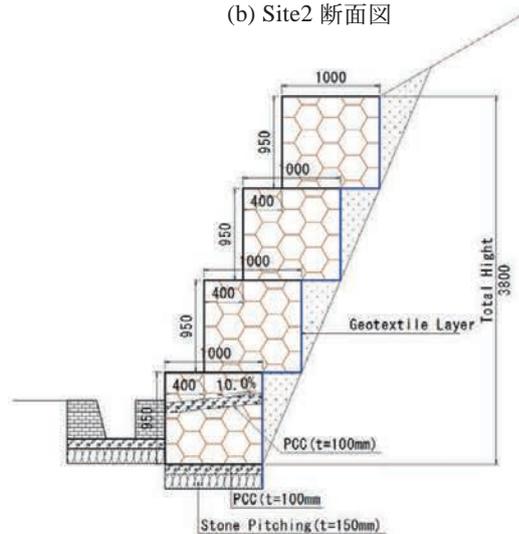
ネパール国はインド洋からのモンスーンによって雨季の 6 月～9 月に雨が集中している。過去には 1993 年の集中豪雨で連続降雨量が 830 mm に達し、大規模な斜面災害が発生した³⁸⁾。このような自然災害による斜面崩壊対策として、ネパール国では施工が容易で安価な蛇籠を用いた擁壁が広く普及している^{12), 39)}が、蛇籠の屈撓性や追随性、透水性などに留意した耐震設計法は明確に定められていない。原ほかはネパール国の施工方法に配慮した蛇籠擁壁の設置・施工マニュアルの提案⁴⁰⁾を目的に、首都 Katmandu に隣接する Dhading 郡 Khari 村の Khari-Dhading besi 道路沿いの地すべりが懸念される計 3 箇所に蛇籠擁壁を施工した。実施工された蛇籠構造物の構造は図 19 の通りであり積み方の異なる蛇籠を構築した。設置直後から孕み出し量を定期的に計測しており、モンスーンによる集中豪雨の際に降雨浸透を受ける蛇籠擁壁の変形量について報告されている。



(a) Site1 断面図



(b) Site2 断面図



(c) Site3 断面図

図 19 試験施工断面図¹¹⁾

Fig. 19 Cross section of test construction.

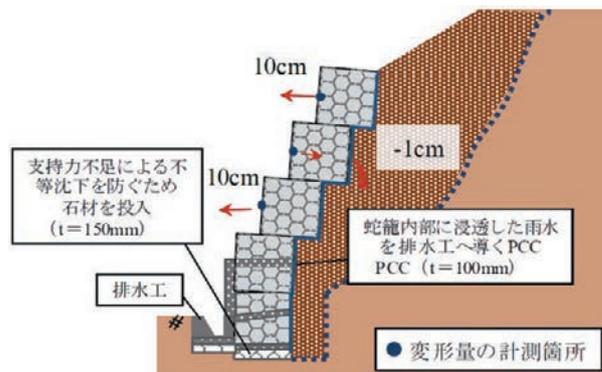


図 20 孕み出しのイメージ¹²⁾

Fig. 20 Image of local deformation.

観測結果によると、Case1における雨季前(2018年6月)と雨季後(2018年10月)では、常時作用に伴う初期変形が見られるが、最上段に最大で8cmの変形が生じていたことが報告された。Case2における雨季前(2018年6月)と雨季中(2018年8月)、雨季後(2018年10月)の比較では、雨季に伴う変形量は、最上段で4cmであり、Case1と比較して段数が少なく、下段側に加わる鉛直荷重が小さいこと、後方に400mmセットバックして施工することにより、変形が生じにくい状態であったと考えられている。したがって、降雨浸透に対する影響は小さいが、変形については、中詰材の詰め方や蛇籠の積み方の違いなどの構造的な要因が支配的であることが示唆されている。

その後も、全てのサイトで擁壁が設置された2018年6月から約1年半が経過した2019年10月まで定期的に計測が継続され、図20に示すイメージのように、Case2では変形の進行が確認されている。原因としては、背後埋め戻し土が緩詰めである箇所に生じる蛇籠の転倒と、上段の鉛直荷重が加わる支持地盤の圧縮力により、支持地盤の破壊を伴う滑動の可能性が示唆されている。このことから、常時作用による安定性の観点で、段積み構造は自然地盤の安定性を確保できていない場合や、過掘りにより背後地盤の密度が緩い状態になると、蛇籠自体の転倒と支持地盤への圧縮力により、滑動の危険性が高くなることが明らかとなった。一方、背後地盤の安定性が、豪雨が生じる環境においても確保できる場合、滑動の危険性は低く、転倒しにくい構造であることが示唆された。

2.8 ネパールにおける成果の普及

ネパールにおける一連の活動は、高知大が獲得した「JICA 草の根技術協力事業(地域活性化特別枠) “ネパールにおける防災と環境を両立させる現地適応型蛇籠技術普及事業(2016-2018)”」⁴⁰⁾を通じて現地適応への取り組みがなされたものである。2.7 に示した試験施工は、実際の計画・設計・施工にあたり、現地の NGO やローカルコントラクターが主体となって実施し、写真 13 に示す通り、主要な施工段階における実地指導を著者らの一部の研究チームが行うことにより、設計・施工上の問題点を共有した。また、一連の研究活動で得た知見は、数回のワークショップを計画している。写真 14 に示すように、2018 年 10 月から定期的にワークショップを既に開催し、現地技術者の視点からの意見を聴取してきている。最終的には、写真 15 に示す蛇籠設計・施工マニュアルを作成し、現地の道路管理者や専門技術者を対象に、高知大学から配布された。

3. 実験の準備

降雨・地震の単独作用、および複合作用(先行降雨+地震、先行地震+降雨)に対する蛇籠擁壁の変形抵抗メカニズム評価と影響把握を行うため、まず、振動台上で試験が可能な降雨装置の製作を行った。本章では、実験に必要な装置・材料等の説明を行う。また、実験に先立ち、降雨装置の性能を検証するための予備実験を実施したので、その状況を含め報告する。

3.1 実験装置

本実験で降雨および地震を再現するために使用した主要な装置として、土槽、降雨散水装置および振動台の概要を以下に示す。

3.1.1 土槽

写真 16 (a) に実験に用いた土槽の外観を示す。土槽の内寸は、上述の通り長さ 4 m、幅 1 m および高さ 1.5 m で中仕切り版 1 枚が設置されている。底板には排水溝が設置され、模型地盤への給排水が可能な構造となっている。また、土槽側面中央部はアクリル板となっており、限定的ではあるが内部の様子が確認可能な構造である。振動台へは、土槽を固定治具およびねじを用い、振動台のねじ穴へ締結・固定する構造となっている。



写真 13 実地指導の様子¹⁷⁾

Photo 13 Atmosphere of practical guidance.



写真 14 ワークショップの様子¹⁷⁾

Photo 14 A state of the workshop.



写真 15 ガイドラインとテクニカルノート

Photo 15 A state of the workshop.

3.1.2 降雨散水装置

写真 16 (b) 降雨散水装置の外観、図 21 に構造図をそれぞれ示す。本装置は、実験で使用した土槽の外寸である幅 1.3 m、長さ 4.3 m および高さ 1.7 m を跨ぐ構造であり、降雨範囲内(1 m×1.8 m)に均一な降雨が実現可能な構造である。散水機構は逆 U 字ノズル式で降雨針を用いており、降雨針 500 本をモー



写真 16 実験装置
Photo 16 Experimental devices.

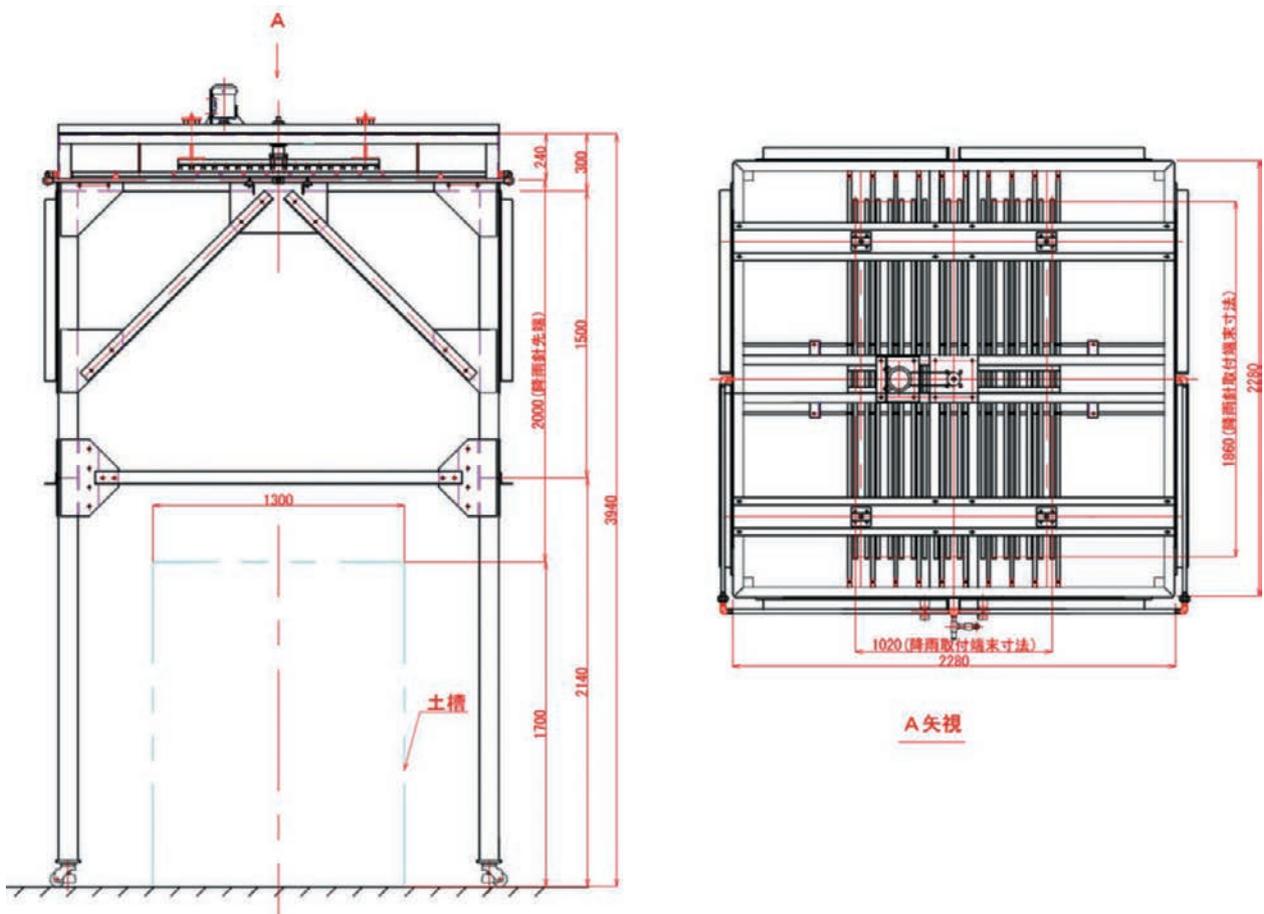


図 21 降雨散水装置
Fig. 21 Watering sprinkler for reproducing rainfall.

ターで同時に振動させることにより均一な降雨を土槽上 2.0 m の高さから発生させることが出来る。また、雨滴径を $\phi 1.7 \sim 3.0$ mm の範囲で可変とし、かつ降雨強度は 10 ~ 80 mm/h までの制御が可能となっている。

3.1.3 振動台

写真 16 (c) に実験時の振動台の状況写真を示す。振動台は、14.5 m×15.0 m (搭載可能エリアは

12.5 m×12.5 m) のテーブルサイズを有している。搭載重量は最大で 4,900 kN であり、加振能力として 4,900 kN 搭載時に約 0.5 G (490 Gal), 2,450 kN 搭載時に 0.8 G (784 Gal) の加速度、またストロークは ± 22 cm の仕様であり、今回の実験条件を十分に満たす能力を有している。なお、写真中に加振方向を示しているが、加振実験時には降雨散水装置は撤去した状態で実験が行われている。

3.2 材料

試験体の概要については後に述べるが、模型実験では、擁壁模型に蛇籠、コンクリートブロック、および背後地盤にまさ土が用いられた。蛇籠については、写真17(a)に示す高さ $H=20\text{ cm}$ 、幅 $W=20\text{ cm}$ および長さ $L=20\text{ cm}$ のサイズのミニチュア蛇籠網に7号細礫 ($\phi 2.5 \sim 5.0\text{ mm}$) を中詰め材として用いた。コンクリートブロックは、写真17(b)に示す $H=20\text{ cm}$ 、 $W=20\text{ cm}$ および $L=15\text{ cm}$ のサイズの市販のコンクリートブロックであるため 2.3 t/m^3 の密度である。模型地盤に用いたまさ土の物理的性質および粒径加積曲線を表2および図22にそれぞれ示す。その特徴は、構成土質の殆どが礫分と砂分である ϕ 材であり、模型地盤造成時の施工管理に用いる最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.884 g/cm^3 であった。

3.3 予備実験

本実験に先立ち、蛇籠擁壁模型を用いた降雨実験の事例を述べる。

本予備実験は、2018年9月に、出来上がった降雨散水装置の性能を調べることも兼ね実施したものであり、写真18に示すように、本報告と同じ鋼製土槽を屋外に設置して実施した。図23に実験断面の模式図を示すが、土槽内に設置するされた模型は、本実験と同様なコンクリート擁壁と蛇籠擁壁であり、材料として、背後地盤のまさ土、蛇籠擁壁の材料として、蛇籠網 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ を9個、中詰め材を 0.2 m^3 程度、また、コンクリート擁壁を模したモデルには、幅 $20\text{ cm} \times$ 高さ $20\text{ cm} \times$ 厚さ 10 cm のコンクリートブロックを16個積み上げコンクリート用ボンドで固定した。擁壁背後地盤の造成は、基礎地盤についてはまさ土を撒き出した後、締固め度 D_c が90%相当の密度に締固め、背後斜面については、図23に示した点線の通り、法面勾配1:2に沿って3層に分けてまさ土を巻き出し、 $D_c=80\%$ 程度に調整しながら締め固めた。



(a) 蛇籠モデル (一辺 20 cm)



(b) コンクリートブロック

写真17 擁壁の材料

Photo 17 Atmosphere of practical guidance.

表2 まさ土の物理・力学的性質

Table 2 Physical and mechanical properties of Masado soil.

土粒子の密度 ρ_d	g/cm^3	2.634
粒度組成	礫分	%
	砂分	%
	シルト分	%
	粘土分	mm
最大粒径 D_{max}	mm	19.0
均等係数 U_c		14.726
50%粒径 D_{50}	mm	1.299
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm^3	1.884
最適含水比 w_{opt}	%	11.60
塑性指数 I_p		NP~4.5
三軸CD試験	c	kN/m^2
	ϕ	°

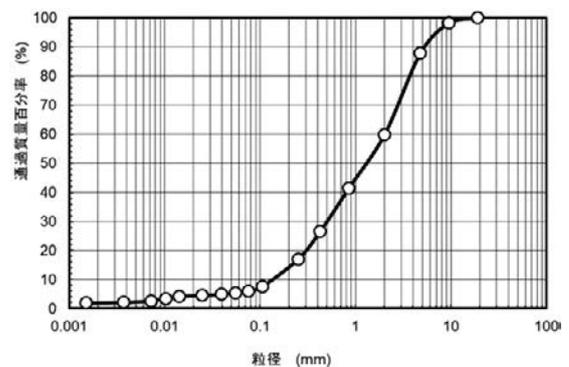


図22 粒径加積曲線

Fig. 22 Grain size distribution curve.

設置したセンサは、間隙水圧計，土壌水分計，水位計，土圧系計および変位計である。また，降雨散水前後で簡易軽量動的コーン貫入試験を実施し，模型斜面内の降雨浸透に伴う物性の変化の状況を確認した。

表 3 に実験時のメモ，図 24 に時刻歴データを示す。降雨散水は，コンクリート擁壁と蛇籠擁壁を別々に実施しており，降雨については，時間雨量に換算して，最大で 80 ~ 100 mm/h で散水した。この条件では，写真 19 に示すように，法面に浸食が認められた。計測結果の概要は，両者ともに，降雨散水に伴

い擁壁の変位や背後地盤から受ける土圧の変化もないことが確認できる。土壌水分計については，コンクリート擁壁背後の浅層で，SW8，10 および 12 の順に擁壁に近い程，浸透が早く，飽和度が上昇する傾向が示されている。一方，蛇籠擁壁では，SW6，



写真 18 実験の様子
Photo 18 State of the experiment.

表 3 実験スケジュールとメモ
Table 3 Observational device.

■コンクリート擁壁	雨量の検定	記事
13:07 散水開始		
13:10 雨量計測	70秒0.5mm	
13:16 雨量計移動		
13:59 雨量計測	70秒0.5mm	コンクリート擁壁の側面を雨水流下。
14:23 雨量計測	30秒0.5mm	法面に雨水が溜まる。
14:48 雨量計測	18秒0.5mm	
14:51 散水一時停止		変位計固定杭が外れ変位計を再設置。
14:56 散水開始		
雨量計測	18秒0.5mm	水位計の反応はないが，排水弁からわずかに雨水が出ている。
15:04 土槽非排水へ		
15:17 実験終了		
■蛇籠擁壁	雨量の検定	記事
15:33 散水開始		
15:38 雨量計測	60秒0.5mm	蛇籠からの排水のため，湿潤線の低下が途中で止まる。
15:50 雨量変更 調整へ		
15:55 雨量計測	18秒0.5mm	
16:16		降雨強度の上昇に伴い，湿潤線が低下するが，蛇籠からの排水により浸潤線の移動がストップ。水位計の反応なし。
16:27 土槽非排水へ		
16:40 変位計の異常値確認		浸水の影響あり。
16:44 実験終了		

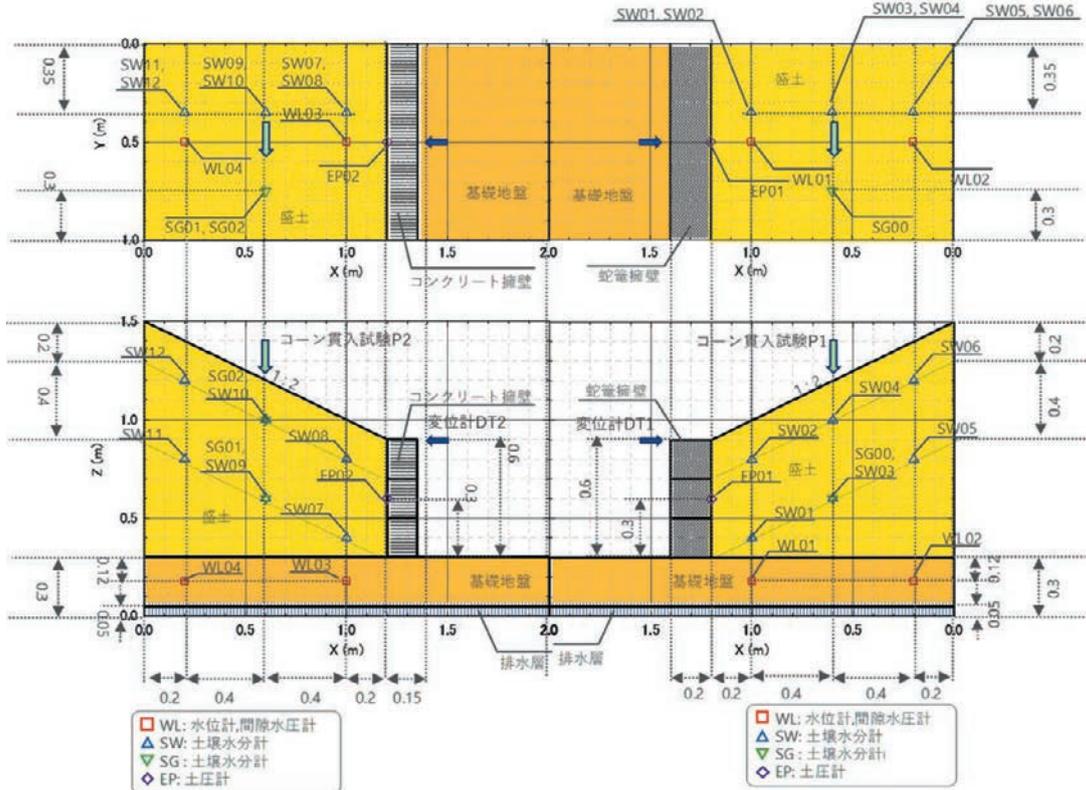


図 23 実験断面
Fig. 23 Experimental cross section.

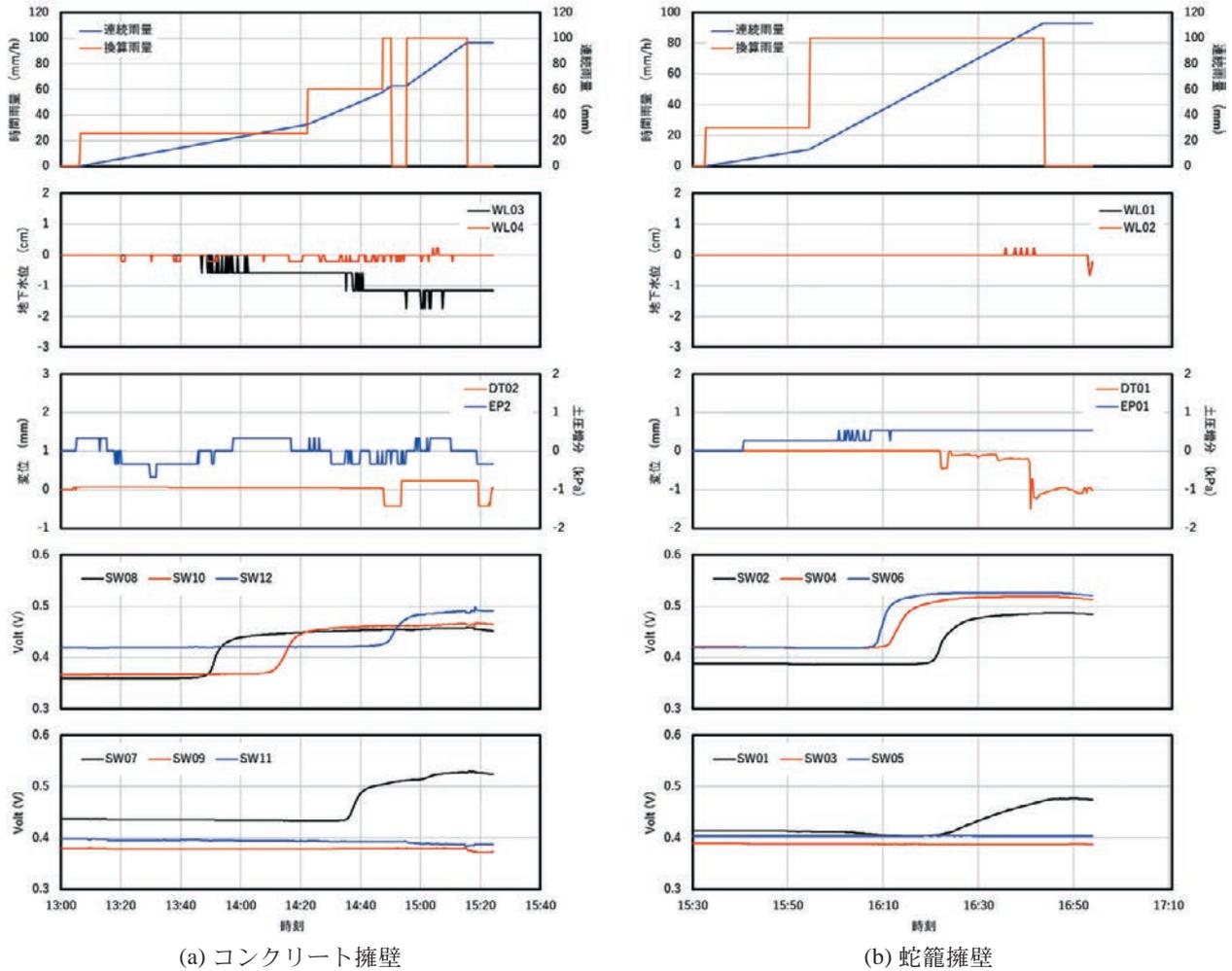


図 24 計測結果
Fig. 24 Measurement results.



写真 19 法面の浸食
Photo 19 Slope surface erosion.

4 および 2 の順に降雨浸透のタイミングが早くなっており、コンクリート擁壁と逆の傾向になっていることがわかる。写真 20 に、降雨散水前、実験中および終了後の様子を示す。写真では明白にはわからないが、両者ともに、地中へ浸透しない雨水は表面

流となり法面を流下していることから、この逆転傾向は擁壁の排水性に起因するものと考えられる。すなわち、排水しないコンクリート擁壁背後は雨水が溜まりやすく飽和度が上昇しやすいこと、一方、蛇籠擁壁は全面排水のため、表面流の殆どを排水するためである。なお、写真 20 (b) の 15:21 に撮影された蛇籠を見ると、背後地盤の浸透域に対し、蛇籠内の浸透域が広く、表面流を排水していたものと推察される。

図 25 は降雨散水前後の簡易軽量動的貫入試験結果を示している。簡易軽量動的コーン貫入試験は、盛土や埋土などの締固め地盤の評価に多く利用されている調査手法であり、狭隘地での実施が可能で、ハンマーによる任意の打撃力でロッドとその先端に接続した先端コーンを地盤に打ち込み、その時の 1 打撃毎の動的貫入抵抗値 q_d を求めることが出来るため、空間分解能が高いデータを取得できる⁴¹⁾。

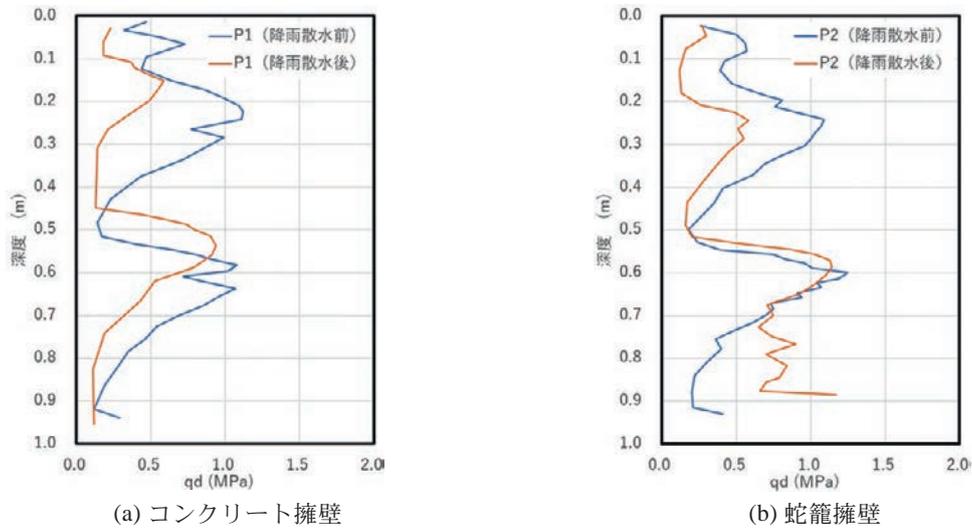


(a) コンクリートブロック蛇籠モデル(一辺 20 cm)

(b) 蛇籠モデル(写真を反転)

写真 20 擁壁の様子

Photo 20 State of retaining wall.



(a) コンクリート擁壁

(b) 蛇籠擁壁

図 25 模型地盤調査結果

Fig. 25 Model ground investigation results.

当該試験の方法については、後述する。両者ともに、調査地点の GL-40 cm の範囲に実験後の q_d の低下が見られる。これは、降雨浸透によるせん断抵抗の低下であると考えられる。

また、別途、降雨散水装置の性能を試すため、屋外ヤードの観測用蛇籠¹⁷⁾に装置をセットし実験を実施している。観測用蛇籠施工直後の様子を写真 21

に示す。実験自体は写真 22 に示す状況で行われた。写真 23 に 50 mm/hr 程度による降雨散水時の様子を示しているが、蛇籠の中詰め材の同じ部位を雨水が流下している状況が観察された。背後地盤がある場合には、蛇籠擁壁は全面排水となるが、降雨のような上部からの水の流入は、常に同じ経路をたどっている様子が確認できた。



(a) 北面

(b) 東面

写真 21 完成時の様子

Photo 21 State at the time of completion.



写真 22 実験時の様子

Photo 22 State at the experiment.



(a) 北面



(b) 南面

写真 23 雨水の流路(矢印が観察された流れ)

Photo 23 Rainwater flow paths (flow where the arrows were observed).

4. 振動台による降雨・振動実験

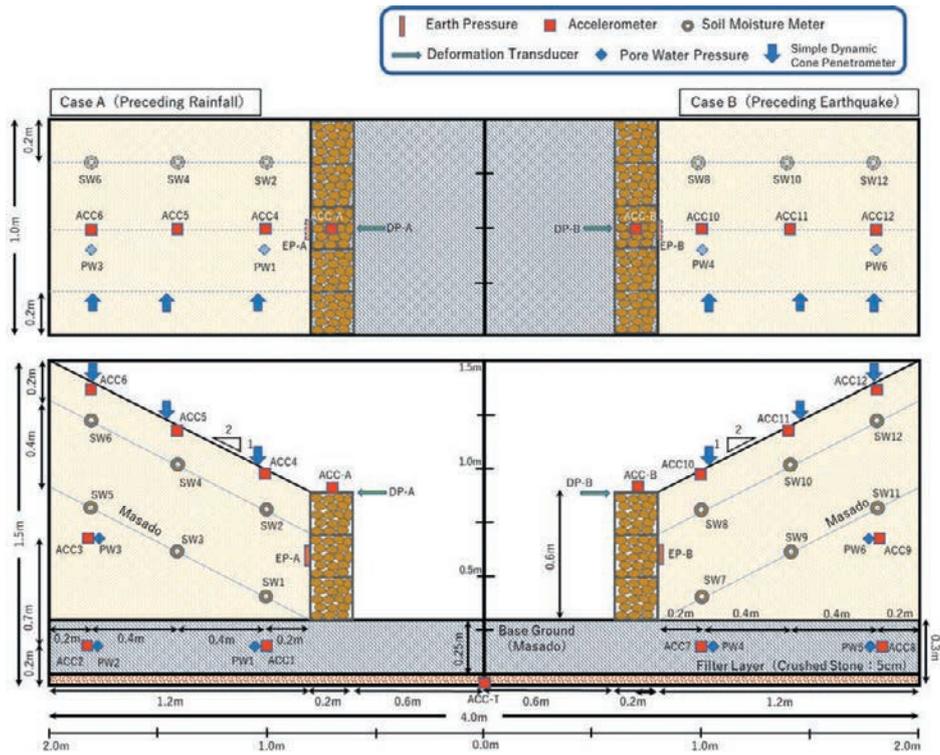
蛇籠は設計・施工から維持管理まで経験的な知見を反映する部分が多いのが現状である。原ほか³⁾は2015年のネパール・ゴルカ地震調査を行い、蛇籠擁壁は地震による変状は生じるが、屈撓性が発揮され倒壊に至るケースは少ないことを示したが、一方、蛇籠擁壁の施工は経験則に基づく場合が多いため、設置後の孕み出しや蛇籠背面の不織布の有無で土砂流出や変形性に違いがみられた。施工箇所は集中豪雨が生じる場所も多く、蛇籠擁壁は耐震性に加え頻発する豪雨に対する抵抗性が求められることから、蛇籠擁壁背面に配置される不織布の有無で降雨時の蛇籠擁壁と背後地盤で生じ得る現象を比較するための模型実験を実施している⁴²⁾。この実験では、豪雨時に生じる背後地盤の変状や地盤内の水頭の時変化、擁壁に生じる変位に着目し、1)不織布を蛇籠擁壁背面に配置することで、土砂流出を抑制し、背後地盤の変状を防止すること、2)蛇籠擁壁の排水性は不織布に依存するが、蛇籠内に土砂が流入すると排水性が低下すること、および3)不織布は降雨時

の蛇籠擁壁の上段と下段の変位差を抑制し、降雨時の擁壁の転倒を防止する知見が得られている。

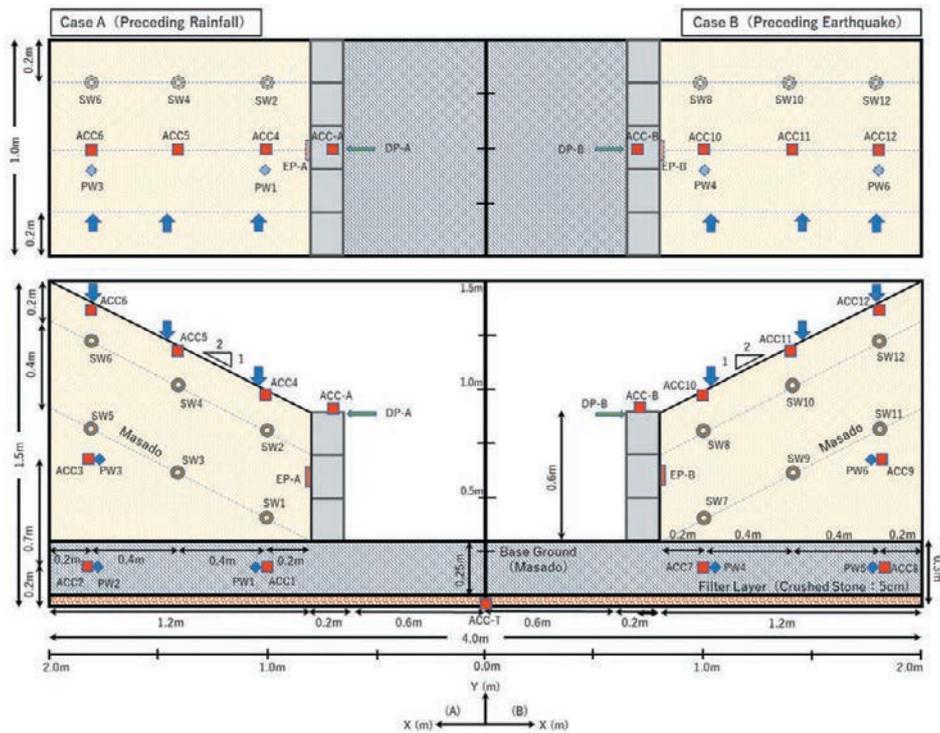
通常、降雨と地震に対する蛇籠擁壁の安定性の検討は別個にならざるを得ないことから、これらの外的要因が複合化された場合には、それぞれの被災要因や対策レベルの評価が困難である。本研究では直立式に焦点を当てた蛇籠擁壁を対象に、降雨を加えた振動台実験を実施した。蛇籠擁壁の柔構造としての特徴に対し、剛な構造物としてコンクリート擁壁についても同様な模型実験を実施した。なお、本実験では、降雨と地震の作用とそれらの順序、擁壁の剛性と排水性に着目しており、蛇籠擁壁背面に不織布は設けずに実験を実施した。一連の模型実験から、蛇籠・コンクリート両構造形式に降雨・地震の両外的要因が作用した後の残留変形の比較を行った。

4.1 実験概要および方法

試験体の概要を図26および表4に示す。長さ4 m、幅1 mおよび高さ1.5 mの土槽内に、高さ $H=60$ cmの蛇籠あるいはコンクリート擁壁模型を構築し、擁壁背後に2:1の勾配となるよう、まさ土を



(a) 蛇籠擁壁



(b) コンクリート擁壁

図 26 実験断面および平面図
Fig. 26 Experimental cross section and plan view.

表4 実験ケースおよび試験体の概要

Table 4 Outline of experimental cases and test models.

構造	ケース	擁壁の材料	擁壁ブロックのサイズ	擁壁材料の密度(t/m ³)	背後地盤材料	湿潤密度(t/m ³)	w _c (%)
蛇籠擁壁	A (先行降雨)	ミニチュア蛇籠網・中詰め石 (7号細礫2.5~)	H20cm×W20cm×L20cm×12個	1.73	まさ土	1.568	8.87
	B (先行地震)			1.84		1.572	8.87
コンクリート擁壁	A (先行降雨)	コンクリート	H20cm×W20cm×L15cm×15個	2.30		1.577	5.89
	B (先行地震)			2.30		1.573	5.89

表5 実験スケジュール

Table 5 Experiment schedule.

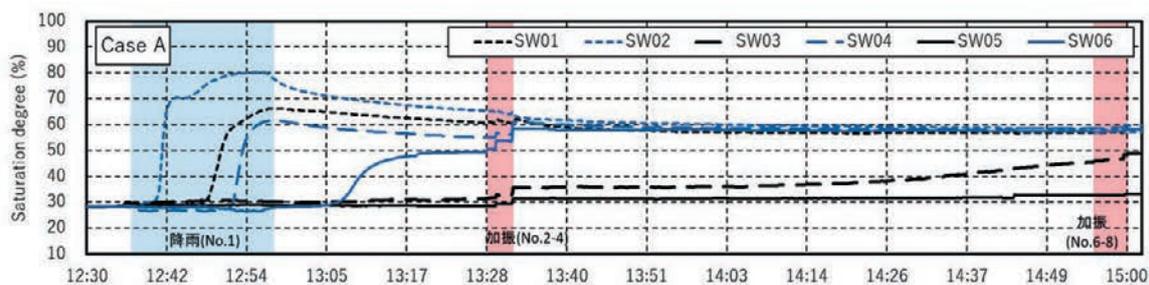
No.	蛇籠擁壁				コンクリート擁壁			
	時刻	外因		現象	時刻	外因		現象
		Case A	Case B			Case A	Case B	
1	12:36	降雨 10mm/h (20 minutes)	—	やや表面浸食が発生	11:30	降雨 10mm/h (20 minutes)	—	やや表面浸食が発生
2	13:28	正弦波加振	133.6 Gal	変化なし	13:38	正弦波加振	134.0 Gal	両ケースともに僅かな沈下が発生
3	13:30	正弦波加振	259.4 Gal	Case Aの蛇籠擁壁に傾斜が生じたが、Case Bには変化なし	14:03	正弦波加振	263.9 Gal	両ケースともに変形が発生
4	13:32	正弦波加振	405.2 Gal	加振により両ケース共に蛇籠の傾斜が進行。加振終了後、32sでCase Aの蛇籠擁壁がゆっくりと倒壊	14:05	正弦波加振	401.7 Gal	Case Aの擁壁が倒壊、Case Bの擁壁に約13度の傾斜が発生
5	14:00	—	降雨 10mm/h (20 minutes)	やや表面浸食が発生	14:37	—	降雨 10mm/h (20 minutes)	散水後、Case Bの擁壁の傾斜が約16度に進行
6	14:56	正弦波加振	138.2 Gal	変化なし	15:49	正弦波加振	133.2 Gal	加振毎に変形は進行するが、Case Bの擁壁は倒壊に至らない
7	14:57	正弦波加振	266.8 Gal	Case Bで蛇籠が倒壊	15:50	正弦波加振	263.9 Gal	
8	15:00	正弦波加振	404.5 Gal	変化なし	15:51	正弦波加振	404.3 Gal	
9	—	—	—	—	15:57	正弦波加振	715.4 Gal	

水平に20 cm 撒きだし転圧することにより密度調整しながら2断面造成した。なお、擁壁モデルの構築にあたり、蛇籠擁壁については、写真17(a)に示した高さ $H=20$ cm、幅 $W=20$ cm および長さ $L=20$ cm のサイズのミニチュア蛇籠網に7号細礫($\phi 2.5 \sim 5.0$ mm)を中詰め材として用い、蛇籠間を緊結しながら土槽内3段に積み上げ、高さ60 cmの擁壁を構築した。一方、コンクリート擁壁は、写真17(b)に示した $H=20$ cm、 $W=20$ cm および $L=15$ cm のサイズの市販のコンクリートブロックをボンドで接着しながら積み上げ擁壁モデルを構築した。模型地盤造成時の施工管理は締固め度 D_c が75~80%程度となるように調整した。

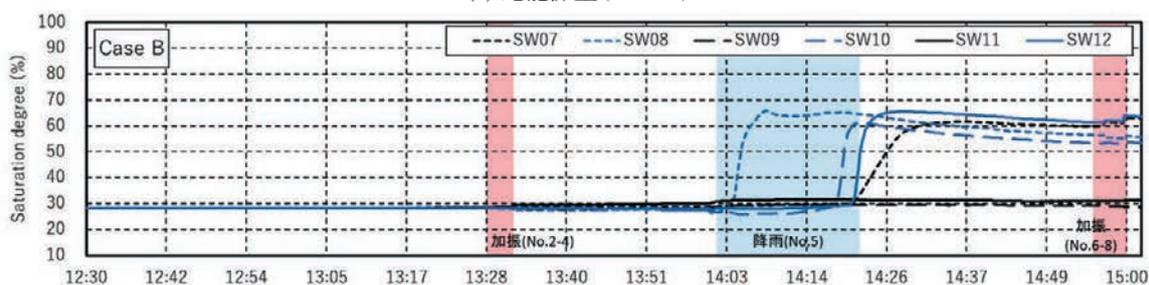
実験ケースおよび降雨と加振実験の順序について表5に示す。蛇籠およびコンクリート擁壁共に、それぞれ外的要因の順序を変え、Case Aは先行降雨(No.1)後に地震が作用する想定(No.2~4)、一方、Case Bは逆に先行地震後(No.2~4)に降雨となる想定(No.5)で実験を実施し、最終的に順序は異なるが、降雨と加振の履歴を受けた状態で加振実験(No.6~9)を実施した。

降雨については、先行、後行に拘わらず、背後斜面の表面浸食を極力避ける意図で降雨強度を10 mm/hに設定し、20分程度の散水を実施した。加振時の動的挙動を観測するため、本実験の加振で用いた入力波は、5 Hzの正弦波とし、2実験断面が土槽中央を境に対象としていることから、漸増部2 s、定常部4 s および漸減部2 sで構成される計8 sの波を用いた。加振段階は、振動台への入力目標として、振幅を100 Gal、200 Gal および300 Galとし、表5におけるCase Aの先行降雨後に実施した3段階の加振(表中のNo.2~4)の振動台の最大加速度応答値は、結果的に133.6 Gal、259.4 Gal および405.2 Galとなった。

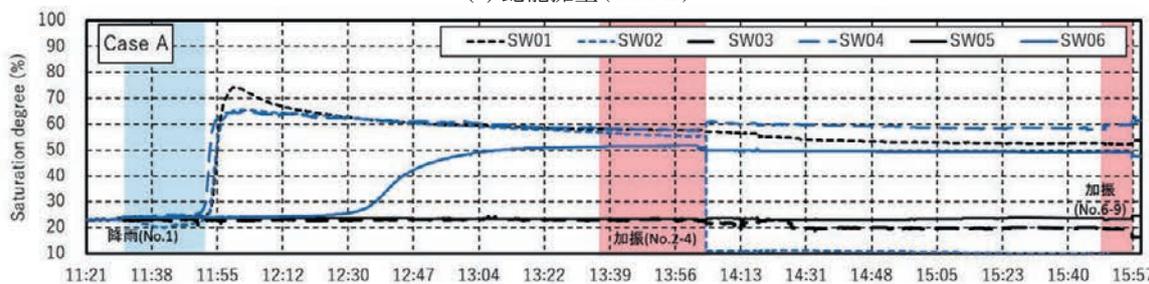
図26に示しているが、降雨散水時の計測項目は降雨浸透による堤体内の水分特性を把握するための土壌水分計(SW)、一方、加振時には、加速度計(ACC)と変位計(DP)により動的応答特性を把握した。参考として、間隙水圧計(PW)によるデータも計測し、降雨浸透による影響の把握を試みた。一連の実験終了後には、擁壁と背後斜面の残留変形を確認した。



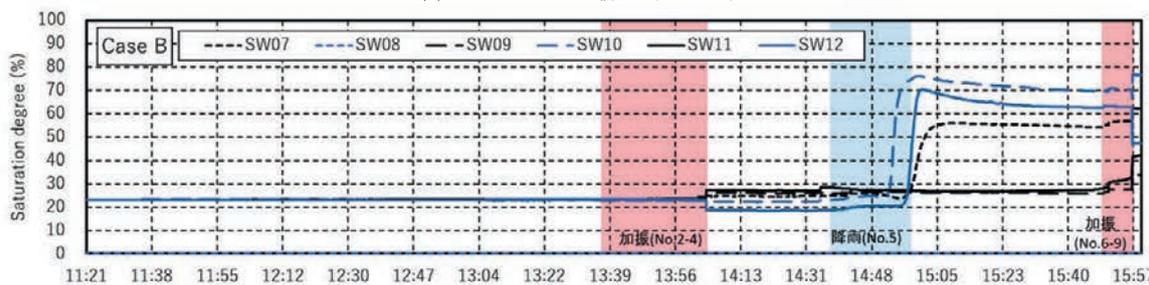
(a) 蛇籠擁壁 (Case A)



(b) 蛇籠擁壁 (Case B)



(c) コンクリート擁壁 (Case A)



(d) コンクリート擁壁 (Case B)

図 27 飽和度の時刻歴と各イベントのタイミング

Fig. 27 Time histories of saturation degree and timing of each event.

4.2 実験結果

4.2.1 降雨浸透の影響

表 5 に示した実験全体のスケジュールに基づき、土壌水分計の計測結果から推定した飽和度 S_r の時刻歴と、降雨および加振実験のイベントのタイミングについて図 27 に示す。

図 27 に示す S_r は、土壌水分計の電圧値から推定した値であり、誘電率から土壌水分を測定する誘電率土壌水分センサの計測電圧値 V_{SW} を用いて推定されている。まず、土壌水分センサの計測電圧値 V_{SW}

から体積含水率 θ_{SW} を次式より換算した。

$$\theta_{SW} = a(V_{SW})^2 + b(V_{SW}) + c \quad (1)$$

なお、係数 a 、 b および c は、マサ土の乾燥密度が $\rho_d = 1.600 \text{ g/cm}^3$ で実施したキャリブレーション値 (印加電圧 2.5 V, $a = 6.621 \times 10^{-5}$, $b = 1.089 \times 10^{-1}$, $c = -4.490 \times 10^{-1}$) を用いた。次に、各地点の土壌水分センサの感度が僅かに異なることから補正する必要がある。ここでは、式 (2) に示すように、実験前 (背後地盤造成直後) の体積含水率 θ_{sw} と、造成時の含水比

w_0 と乾燥密度 ρ_{d0} から求めた体積含水率 θ_{sw0} が一致すると仮定し、初期含水比 w_0 と実験前の体積含水率から求めた含水比 w_{sw} から補正含水比 w_1 を求め、補正体積含水率 θ_{sw1} を算出した。

$$w_{sw} = \theta_{sw} / \rho_{d0} \quad (2a)$$

$$w_1 = w_0 - w_{sw} \quad (2b)$$

$$\theta_{sw1} = w_1 \times \rho_{d0} \quad (2c)$$

最後に、上記の補正体積含水率 θ_{sw1} と土粒子密度 ρ_s から推定飽和度 S_r を次式で求めた。

$$S_r = \theta_{sw1} \left(1 + \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_{d0}} - 1} \right) \quad (3)$$

土壤水分計による計測は、基本的に加振時に 5 s、その他では 15 s 間隔で行われており、加振時の詳細な S_r の変化は捉えていないが、降雨実験時には、構造形式と外的要因の順序の違いによる浸透特性の相違が良く現れている。なお、(d)におけるコンクリート擁壁の SW8 は欠測となった。

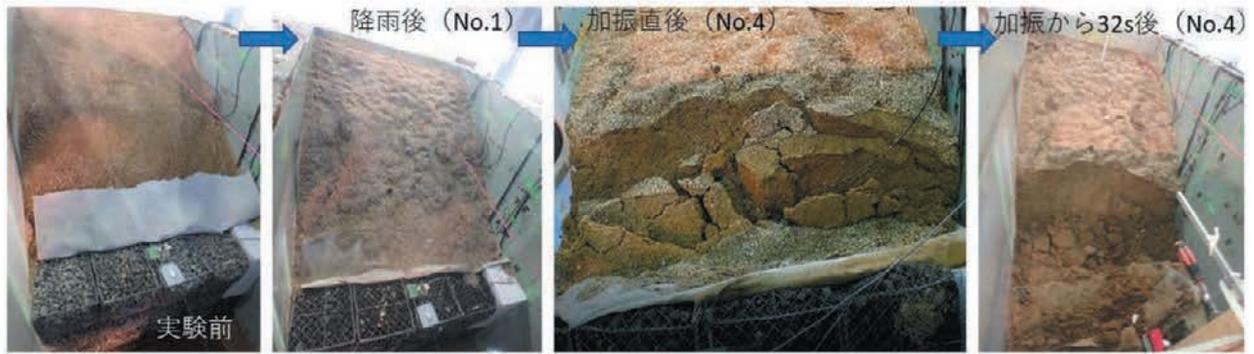
各ケースにおける降雨実験時の浸透特性を比較すると、蛇籠擁壁については、Case A (表 5 における No.1) では、背後斜面表層と蛇籠擁壁背後において、SW1, SW2 および SW4 の順、また、Case B (表 5 における No.5) については SW8, SW10 および SW12 の順で S_r の上昇が見られている。一方、コンクリート擁壁については、降雨散水の終了直前から S_r に変化が見られ、Case A (表 5 における No.1) では SW1 および SW4、Case B (表 5 における No.1) では SW10 が降雨散水中に S_r が増加し、次いで SW12 および SW7 の順に増加が確認された。

写真 24 に擁壁背後斜面の変状の様子を示す。(a)～(d)はいずれも写真下の手前側に擁壁がある。先行降雨の作用を受ける蛇籠擁壁 Case A では、降雨による若干の表面浸食の影響が確認できる。その後の加振によって、擁壁の前傾と共に背後斜面に著しい変状が生じた。また、加振終了から 32 s 後にゆっくりとした動きで擁壁が完全に倒壊に至る様子が確認できた。一方、外的要因の順序が逆である Case B では、先行して実施した加振によって、擁壁の前傾と擁壁の近傍で背後斜面に滑り破壊が生じたが、その後の降雨による変状の大きな進行は認められなかった。次にコンクリート擁壁を見ると、Case A における先行降雨では、蛇籠擁壁と同様に、若干の表

面浸食を確認した。その後の加振によって、背後斜面の滑り破壊と共に擁壁が倒壊した。Case B では、先行加振によって、背後斜面浅層における滑り破壊と擁壁に約 13 度の前傾が認められ、その後の降雨によって擁壁の前傾が若干進行し、約 16 度の傾斜が確認できたが倒壊には至らなかった。

上述の実験時の各イベントについて、図 27 と対比して考えると、蛇籠擁壁の Case A での先行降雨時には、背後斜面の浸透よりも、蛇籠擁壁内を伝わる雨水が卓越し、擁壁背後深部の SW1 における S_r の上昇が早まった可能性がある。一方、Case B では、先行地震により生じた背後斜面の滑り破壊部に雨水が浸透することで SW8 が早期の反応を示し、 S_r の急上昇に繋がったものと考えられる。コンクリート擁壁においては、Case A と Case B で唯一降雨散水中に SW10 における S_r が上昇したが、これは、先行して実施した加振によって、SW10 付近に滑り線が発生しており、その後の降雨浸透がしやすい条件になっていたものと推察される。

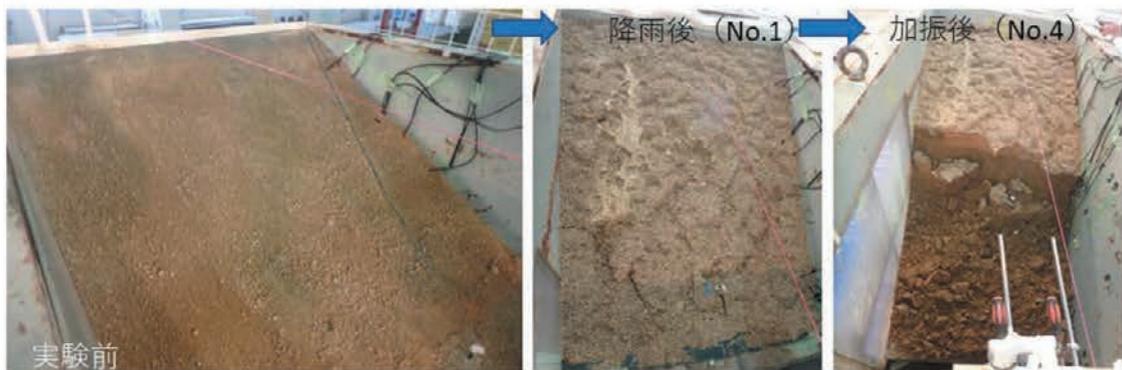
図 28 に各ケースにおける降雨前、降雨散水終了時および終了から 10 分後の S_r のコンターを示す。蛇籠擁壁とコンクリート擁壁モデル背後斜面における加振前の平均 S_r (初期値) は、それぞれ 28.3%、23.1% であった。なお、コンクリート擁壁 Case B については、欠測の SW8 を除いている。蛇籠擁壁に関しては、加振履歴の無い Case A で蛇籠自体の透水性が非常に高いことから、擁壁背後と背後斜面表層に沿った範囲で高飽和度領域が形成されている。Case B については、先行加振によって、背後斜面にクラックと滑り破壊が生じ降雨浸透しやすい条件となっており、背後斜面に沿った高飽和度領域が形成されたものと考えられる。一方、コンクリート擁壁については、Case A は降雨散水中に背後斜面内の S_r に殆ど変化が見られなかったが、終了から 10 分後にはコンクリート擁壁背面から背後斜面表層付近に沿って、高飽和度領域が形成されている様子がわかる。降雨散水中に、降雨浸透ではなく、表面流が生じていた影響も考えられるが、明確な理由は不明である。Case B については、SW8 が欠測ではあるものの、蛇籠擁壁 Case B に比べ背後斜面の滑り破壊領域が大きいことから、斜面表層全域に沿った高飽和度領域が形成されたものと考えられる。



(a) 蛇籠擁壁 (Case A)



(b) 蛇籠擁壁 (Case B)



(c) コンクリート擁壁 (Case A)



(d) コンクリート擁壁 (Case B)

写真 24 各イベントにおける試験体の状況
Photo 24 Status of test models at each event.

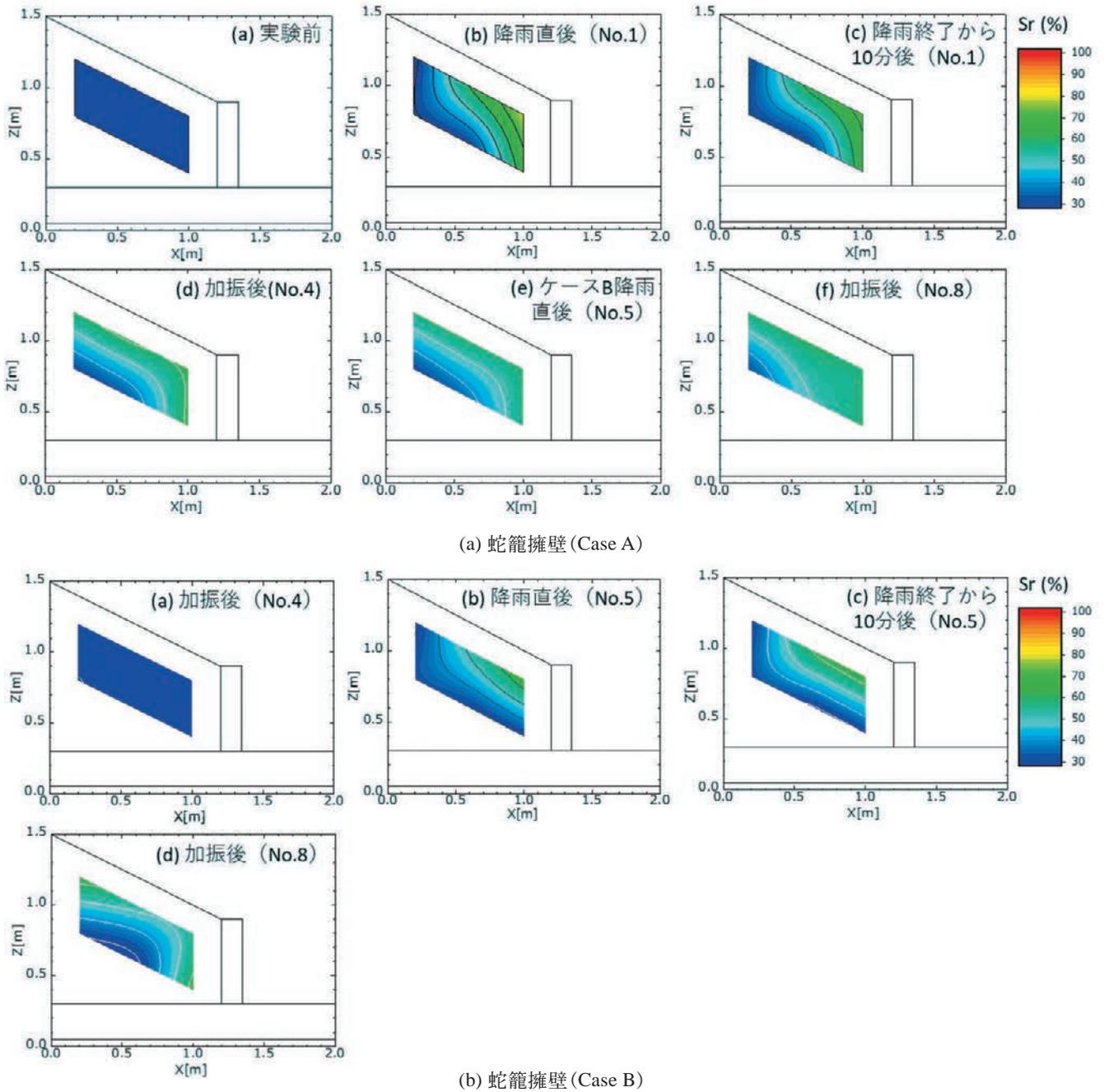


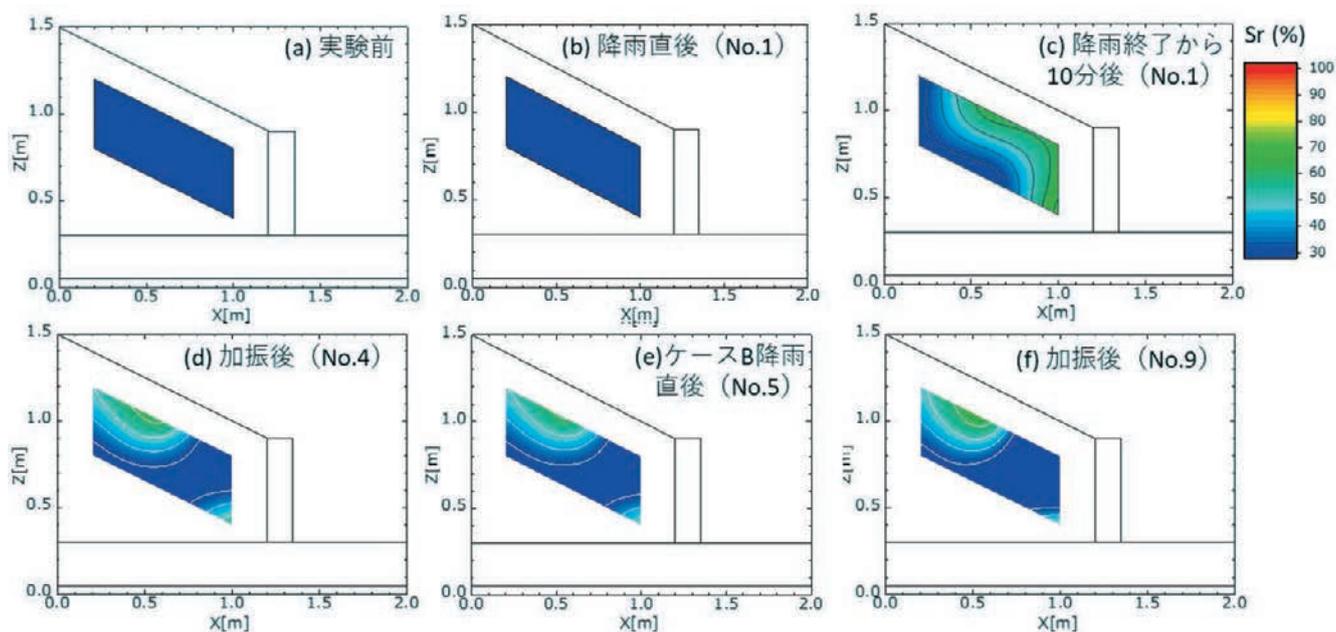
図 28(1) 降雨前後の飽和度分布
 Fig. 28(1) Distributions of saturation degree before and after rainfall.

4.2.2 加振時動的挙動

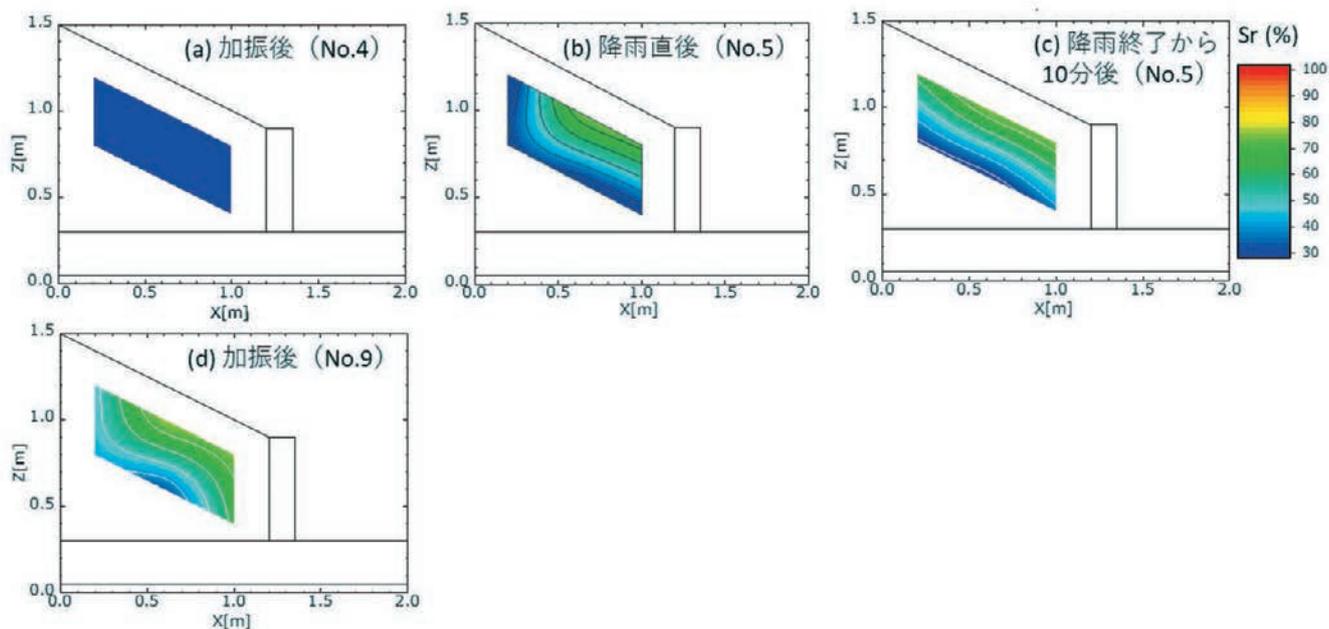
加振時に関するデータとして、図 29 に時刻歴データ一式を示す。なお、表 5 に示した順における状況については、写真 24 に既に示されている。ここでは、降雨の履歴の有無による比較として、表 5 に示す No.4 の加振実験結果を再度まとめ、図 30 に示す。図に示す(a)は蛇籠擁壁、および(b)はコンクリート擁壁における Case A (降雨の履歴有) と B (降

雨の履歴無)の時刻歴を重ねたものである。対象としたセンサは、擁壁天端で計測した水平変位 DP-A, B, 加速度では擁壁天端に設置した ACC-A, B, また背後斜面では ACC-4 と 10 および 5 と 11 の対である。

(a) に示す蛇籠擁壁天端の水平変位の時刻歴を見ると、Case A と B の両ケース共に、ほぼ同様な加振時挙動を示している。また、応答加速度の時刻歴



(c) コンクリート擁壁(Case A)

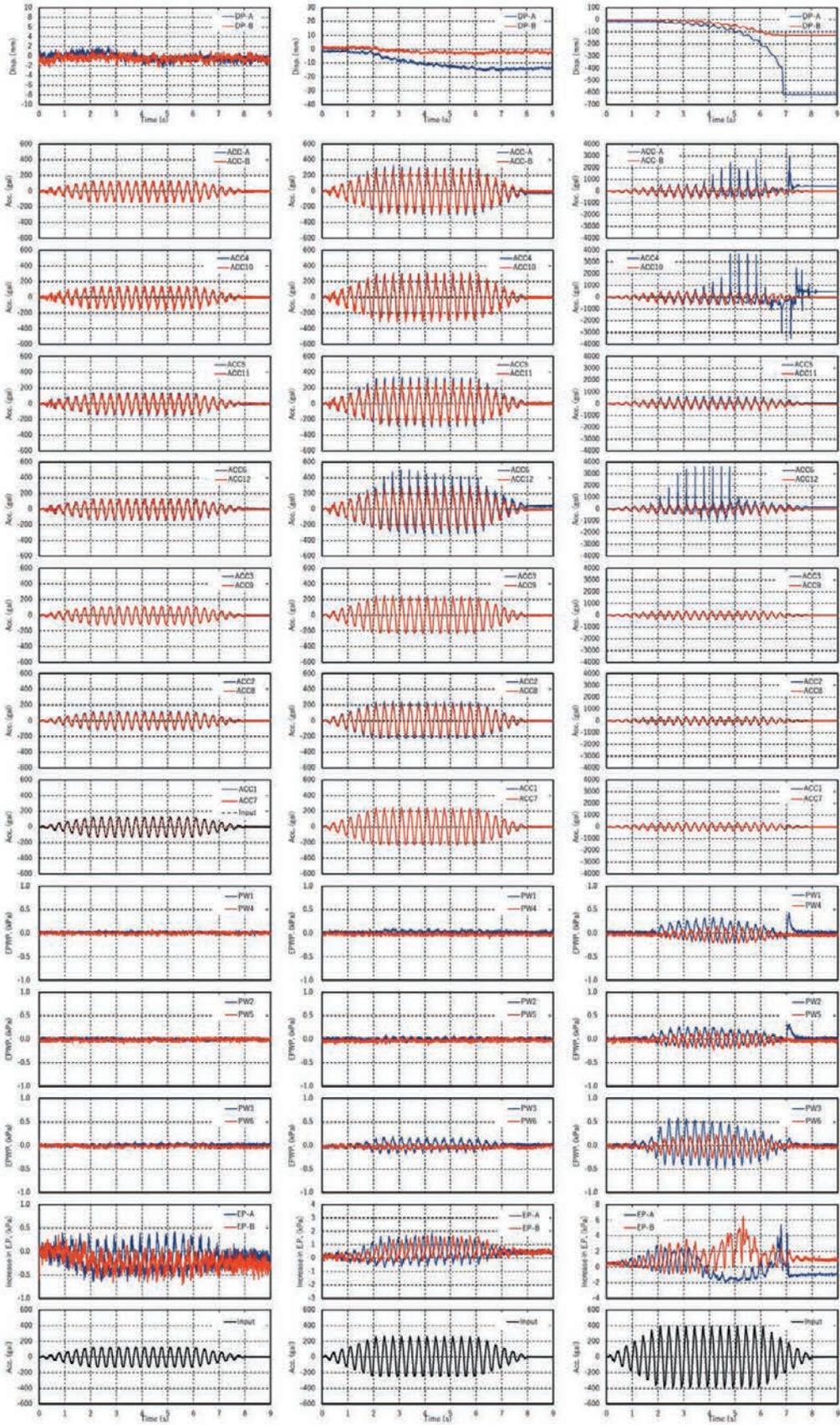


(d) コンクリート擁壁(Case B)

図 28(2) 降雨前後の飽和度分布
 Fig. 28(2) Distributions of saturation degree before and after rainfall.

を見ると、ACC-4 と 10 では、加速度応答にスパイク状の成分と乱れが確認されるが、背後斜面全体としては、ほぼ同様な応答加速度の傾向を示している。擁壁天端の ACC-A と B においてもほぼ同様な応答加速度の傾向が見られるが、蛇籠擁壁の前傾の影響で、加振終了時の加速度に残留値が認められる。なお、Case A については、加振後には、擁壁に大きな変状が生じていたものの自立した状態を保ってお

り、この段階では、背後地盤の破壊モードは Case B と比較的類似していたと考えられる。しかし、Case A では、加振後から 32 s 後に、ゆっくりとした擁壁の倒壊が確認されており、降雨浸透による背後斜面の滑り破壊領域の土塊の重量が増加したことが大きな理由であるものと推察される。(b) に示すコンクリート擁壁の計測結果を見ると、天端の水平変位に関しては、加振に伴い Case A の水平変位が累積し

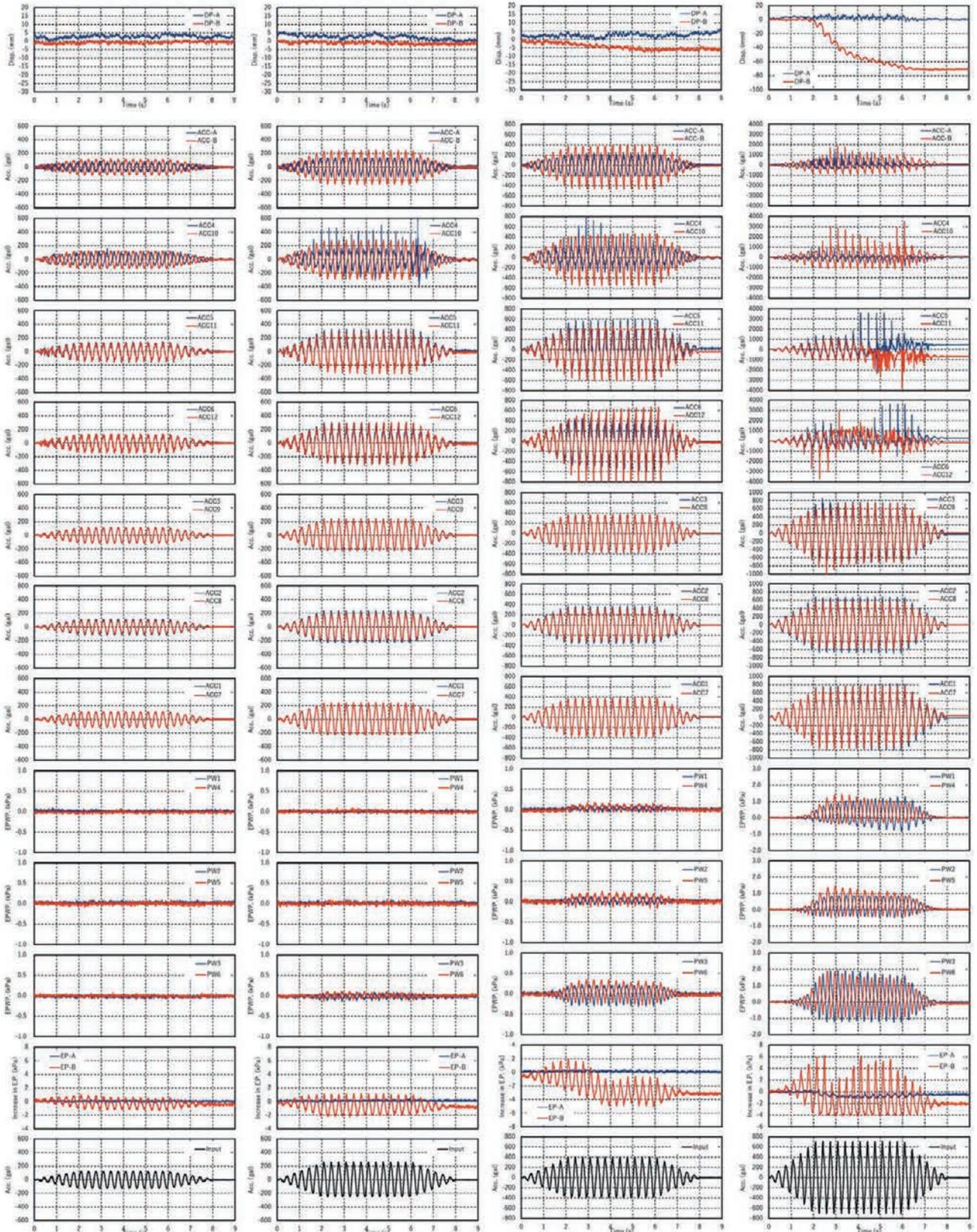


(a) 134.0 Gal

(b) 263.9 Gal

(c) 401.7 Gal

図 29(1) コンクリート擁壁試験結果(No.2-4)
 Fig. 29(1) Concrete retaining wall test results (No.2-4).



(a) 133.2 Gal

(b) 263.9 Gal

(c) 404.3 Gal

(d) 715.4 Gal

図 29(2) コンクリート擁壁試験結果(No.6-9)
 Fig. 29(2) Concrete retaining wall test results (No.6-9).

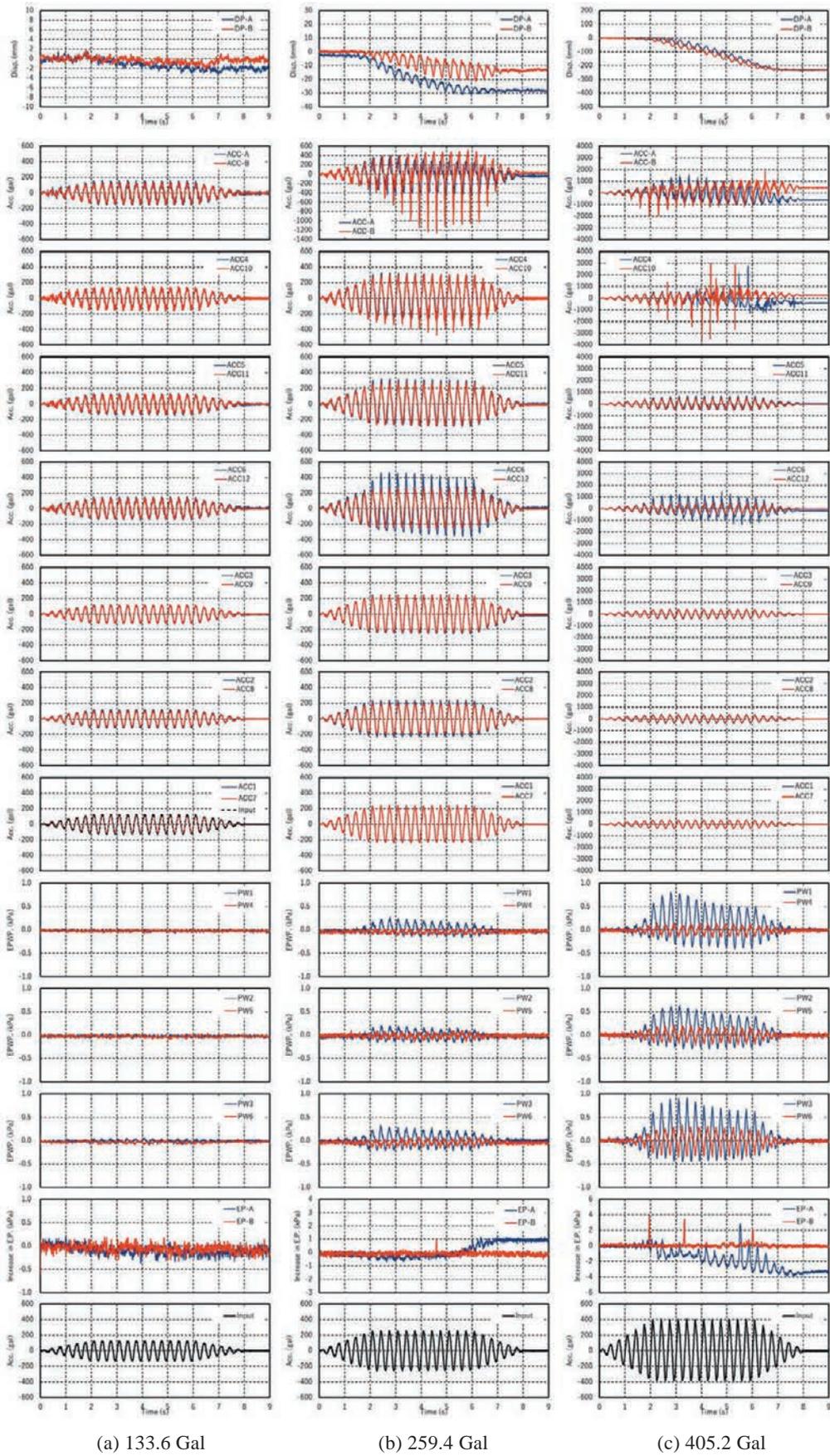
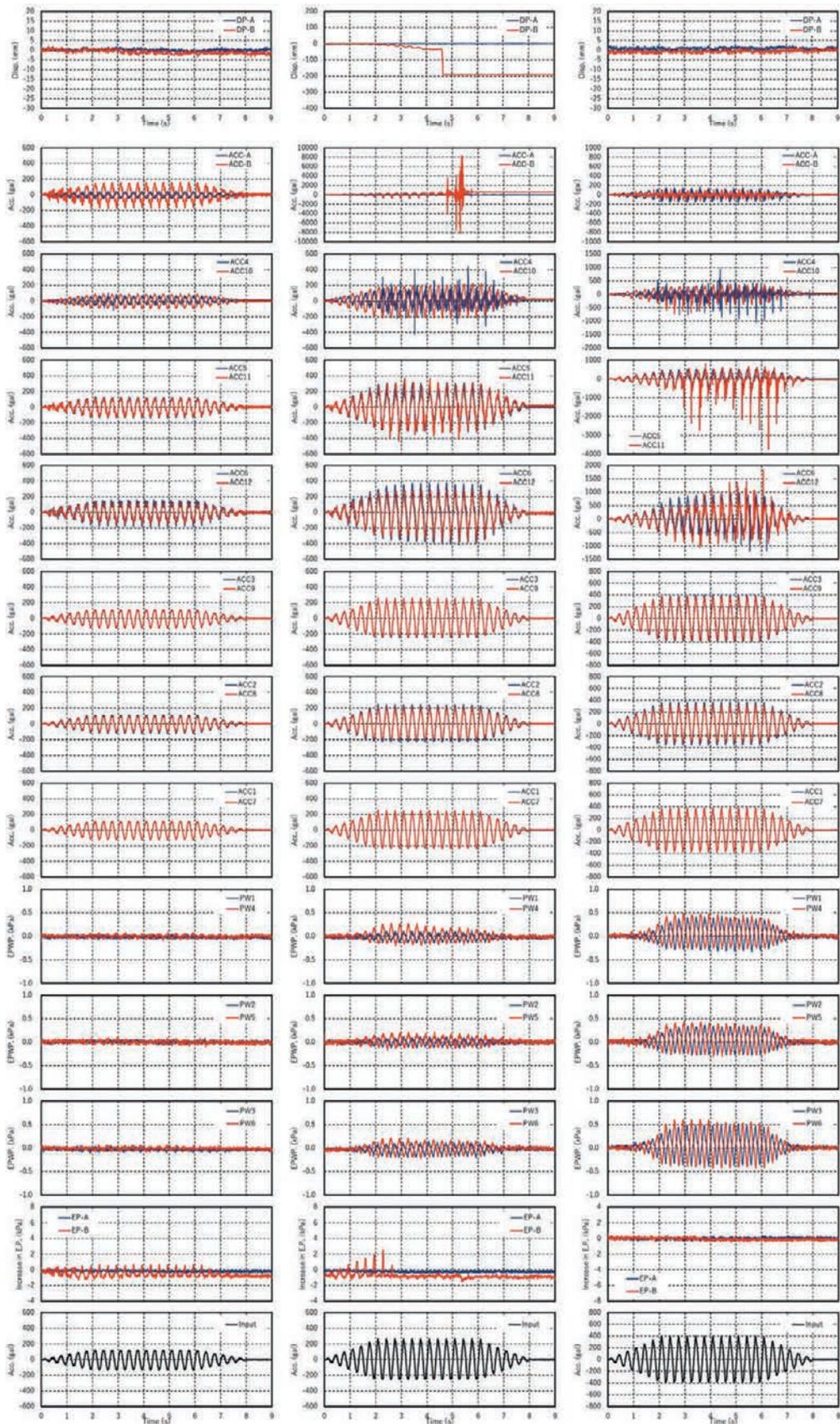


図 29(3) 蛇籠擁壁試験結果(No.2-4)
 Fig. 29(3) Gabion retaining wall test results (No.2-4).



(a) 138.2 Gal

(b) 268.8 Gal

(c) 404.5 Gal

図 29(4) 蛇籠擁壁試験結果(No.6-8)

Fig. 29(4) Gabion retaining wall test results (No.6-8).

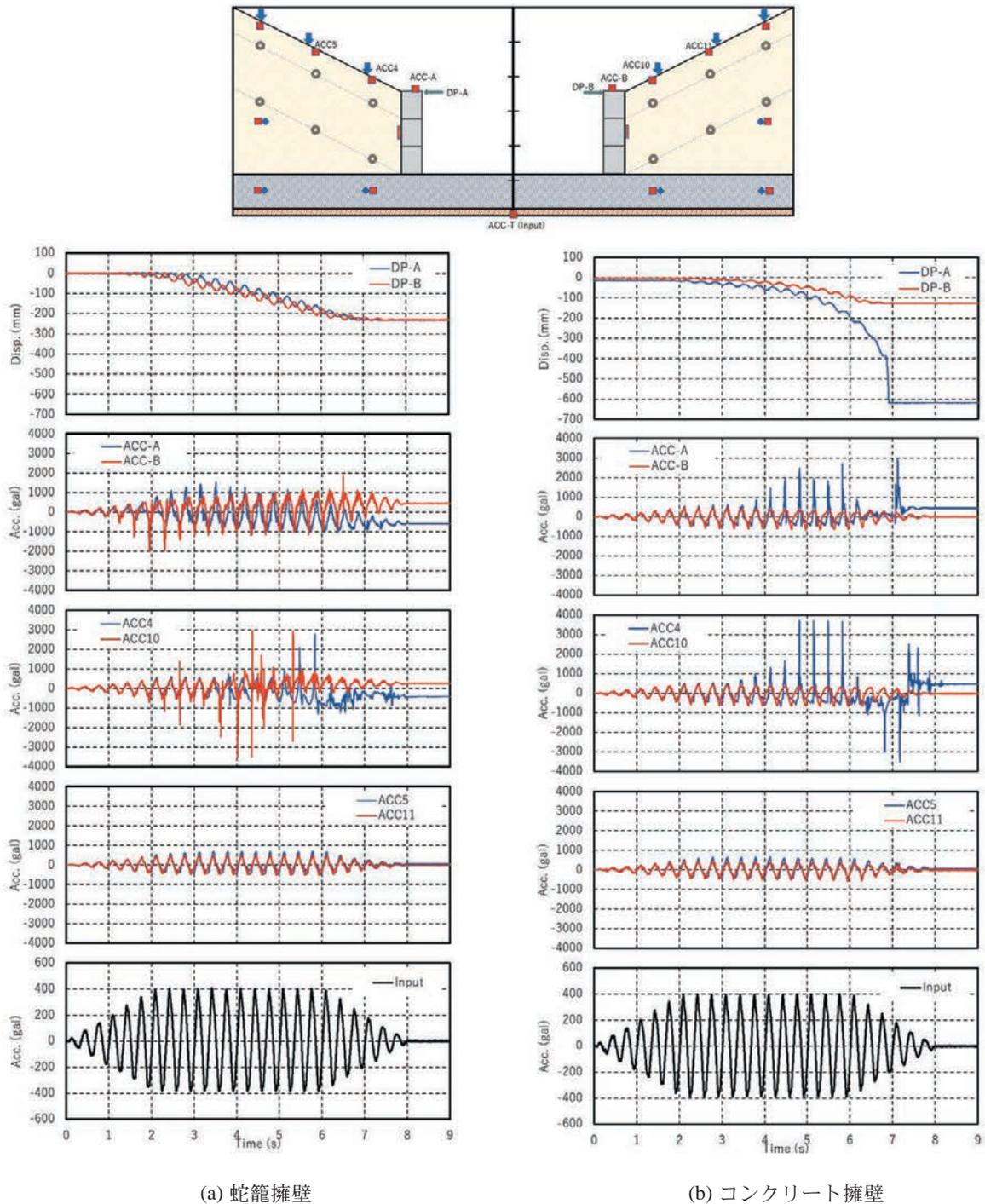
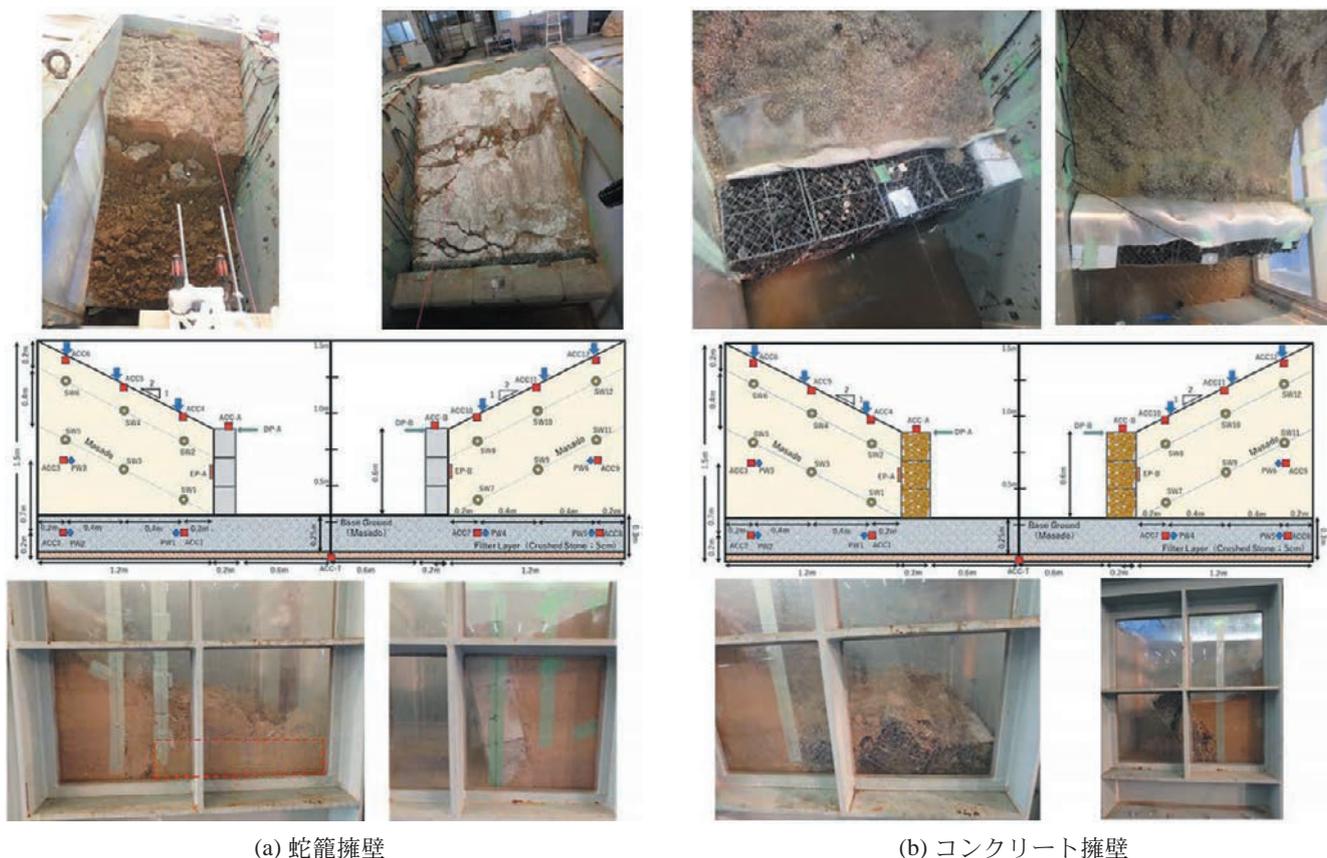


図 30 加振時時刻歴データ(表 5 の No.4)

Fig. 30 Time history data of shake test (No. 4 in Table 5).

顕著となり、加振中の擁壁の転倒に繋がった様子が示されている。応答加速度の時刻歴データを見ると、Case A においてスパイク状の波形が見られているものの、全体としては、Case A と B の両ケースは同様な動的挙動を示していたと考えられる。以上より、外的要因として降雨と加振の順序が異なることで、

擁壁と背後斜面の応答加速度特性としては大きくは変わらないものの、擁壁の変形挙動には差異が見られること、背後斜面の変状やクラックあるいは滑り破壊によって降雨浸透特性が異なること、また、蛇籠製およびコンクリート製の違いだけでも、擁壁の転倒のタイミングが異なる様子が認められた。



(a) 蛇籠擁壁

(b) コンクリート擁壁

図 31 加振実験後の様子
Fig. 31 Situation after shaking.

4.3 残留変形

図 31 に、各実験における終了後の残留変形の様子を示す。コンクリート擁壁の場合、先行降雨を受けた Case A の背後斜面に深層崩壊、一方、先行地震を受けた Case B で浅層滑りの様相を呈しており擁壁も倒壊を免れている様子がわかる。蛇籠擁壁では、Case A において擁壁の倒壊が見られ、Case B では、前傾が著しいものの、倒壊は免れる結果となった。しかし、いずれのケースも、コンクリート擁壁に比べ、擁壁の近傍で背後斜面の変状が著しい様子が分かる。

図 32 に、各実験フェイズと終了後に測定した擁壁-模型斜面の残留変形形状を示す。蛇籠とコンクリート擁壁における Case A および B の両ケースにおける変形図を示している。Case B については、図 26 に示した断面図に対し変形を反転表示し、全ケースの比較が可能となるようにまとめた。

蛇籠擁壁において、先行降雨を受けた Case A は、その後の加振実験後にゆっくりと擁壁が倒壊し、背後斜面も崩壊に至った。一方、先行加振を行った

Case B では、加振によって擁壁に顕著な変状が生じ、その後の降雨によって更に変形が進んだものの、最終的に実施した 404.5 Gal による加振に対しては倒壊は免れている様子を確認できた。コンクリート擁壁についても、Case A において、先行降雨後の加振によって、擁壁が倒壊に至り、先行加振を行った Case B では、前傾は著しくなったものの、最終的な 700 Gal 超の加振条件に対し倒壊に至らなかった。ただし、擁壁自体は各加振ケースによって前傾が累積していったが、同時にねじれも生じたため、表 5 の No.4 による最終加振ケースでは、境界条件の影響も含まれている。

上記より、地震と降雨の順序が異なるだけでも、同一構造形式の擁壁の残留変形に大きな差が生じ、先行降雨後の加振による影響の方が大きかった。この場合における蛇籠擁壁にはたわみが生じ、かつ背後斜面の滑り破壊が擁壁近傍で生じること、一方、コンクリート擁壁ではその前傾に伴い、背後斜面の浅層部分が全体的に沈下や滑りといった変状が生じていることが確認できた。

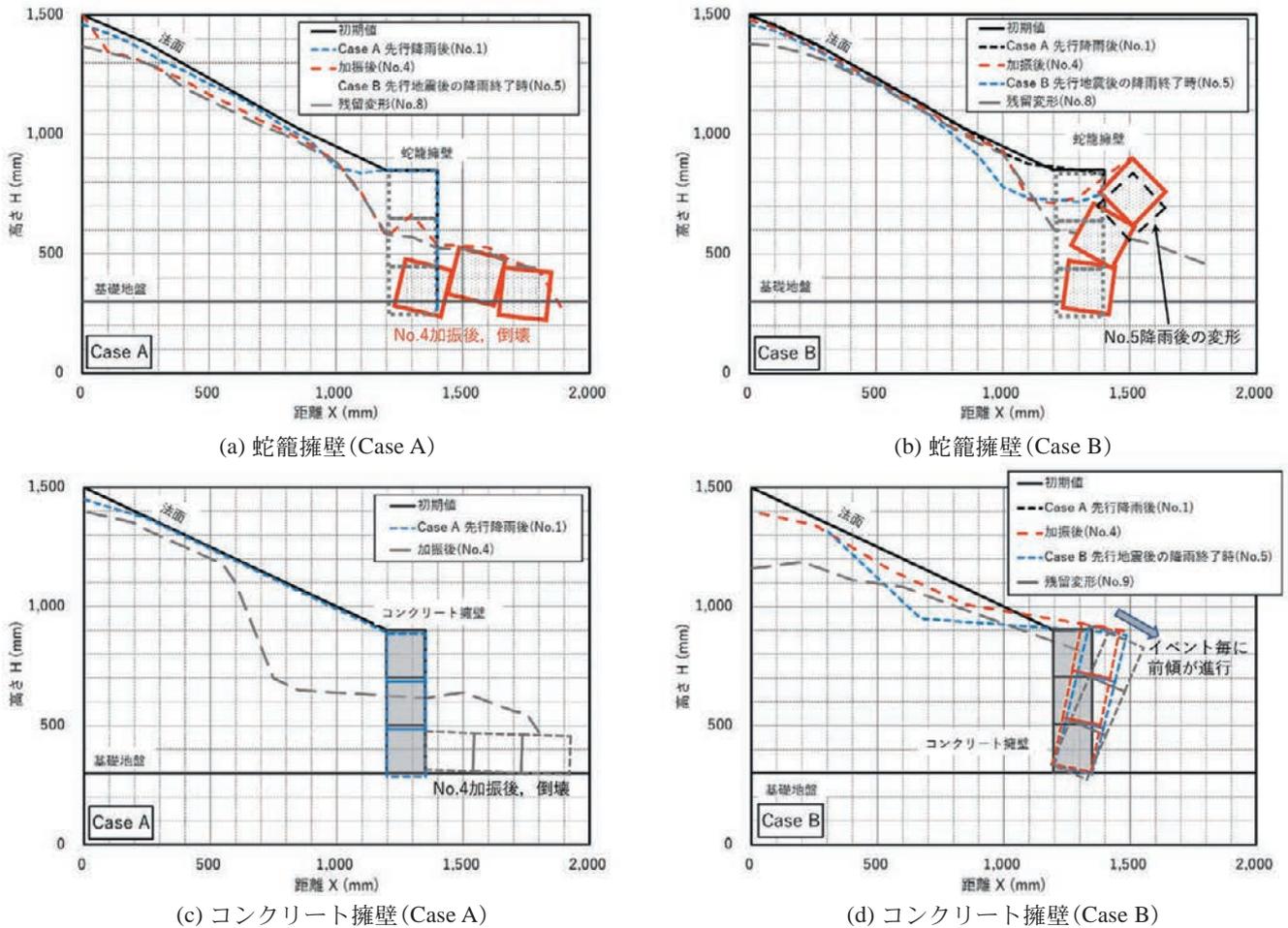


図 32 試験体の変形形状
Fig. 32 Deformation shapes of test models.

5. まとめ

今回、2015年ネパール・ゴルカ地震以来、現地調査、実大実験、室内模型実験、要素試験、金網の材料試験等を経て、現地での試験施工に至るまでの一連の研究成果の取りまとめを行った。そして、昨近、極大化しつつある降雨に対する効果や地震との複合化に対する蛇籠擁壁の特徴を把握するための実験を実施した。実験では、蛇籠擁壁とコンクリート擁壁モデルを用い、地震と降雨による外的要因による作用の順序の違いによる降雨浸透特性、加振時動的特性および残留変形を確認した。一連の実験から、以下の項目を確認できた。

- 1) 降雨と加振の順序により擁壁の変状傾向が異なることを確認した。構造形式問わず、先行降雨後の加振によって擁壁が倒壊したのに対し、先行加振後の降雨では、擁壁は倒壊に至らなかった。
- 2) 先行加振による影響については、背後斜面によっ

て生じたクラックや滑り破壊によって、その後、降雨浸透しやすい条件となり得ることが確認できた。

- 3) 蛇籠擁壁は、降雨と加振による作用の順序に拘わらず、前傾やたわみを生じ同じ変形モードを示した。また、背後斜面の変状は滑り破壊等が擁壁近傍で生じており、コンクリート擁壁では背後斜面全体的な沈下や浅層における崩壊等が主であった。
- 4) 擁壁の倒壊は、蛇籠擁壁については、先行降雨後の加振によって、加振後しばらくたってから倒壊し、所謂、粘り強さを発揮した。

6. 今後に向けて

現在、今回の実験結果に対し、数値解析的なアプローチを始めている。詳細は別途の機会とさせていただきますが、ここではその概要を一部示し、課題とし

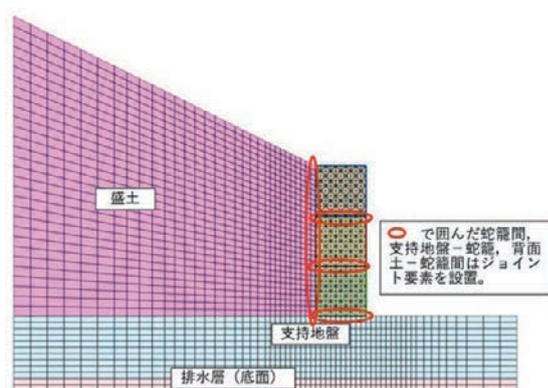
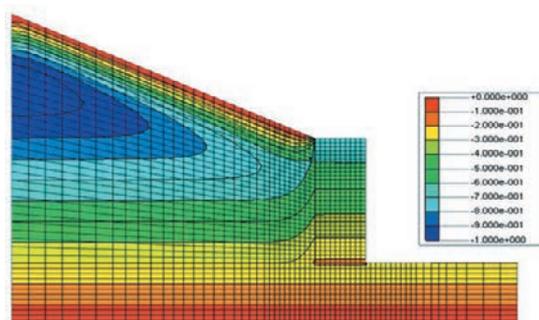
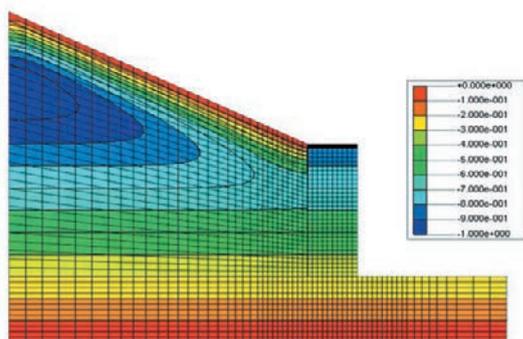


図 33 析メッシュ
Fig. 33 Monitoring results.



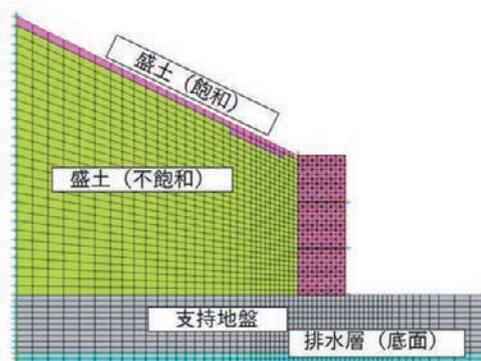
(a) 蛇籠擁壁



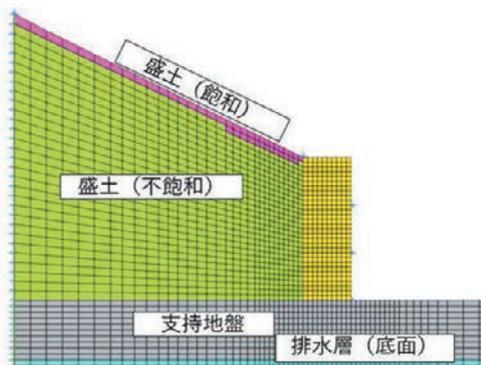
(b) コンクリート擁壁

図 34 透流解析結果
Fig. 34 Results of FEM groundwater analysis.

て提示しておく。蛇籠擁壁のモデルを例として、解析メッシュを図 33 に示す。蛇籠は中詰め材を菱形の金網で囲ったモデルとし、上下の蛇籠間、蛇籠と背面土、蛇籠と支持地盤間にはジョイント要素を設け、これらの間にすべりや剥離が生じるモデルを考慮した。コンクリート擁壁では、当該モデルから菱形金網を除去し、上下蛇籠間のジョイントを除き、これらを MPC 接合した条件で解析を施行した。先行降雨による浸透流解析を行い、その後、地震応答解析への引き継ぎを行っているが、最初に行う浸透流解析の材料物性値は、「河川堤防の構造検



(a) 蛇籠擁壁



(b) コンクリート擁壁

図 35 動的解析における材料区分図
Fig. 35 Material classification in dynamic analysis.

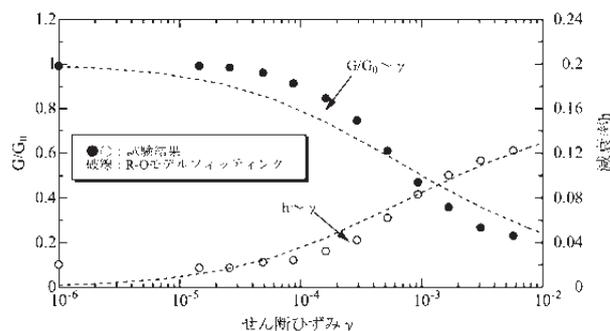


図 36 地盤材料の非線形特性
Fig. 36 Non-linear characteristics of ground material.

討の手引き」⁴³⁾に示される粘性土(盛土, 支持地盤)および砂礫(排水層)を参考とした。浸透流解析では、降雨 10 mm/h を 1 時間作用させたが、図 34 に蛇籠擁壁とコンクリート擁壁に対する降雨開始から 1 時間後の圧力水頭分布をそれぞれ示す。

次に、図 34 に基づき飽和・不飽和領域を設定し、地震応答解析モデルを作製した。図 35 にそれぞれの材料区分を示す。背後斜面および支持地盤に用いた地盤材料の非線形特性と解析に用いた地震動加速度波形を図 36 および図 37 にそれぞれ示す。背後斜面材料については、表層の飽和層に対し、液状化特

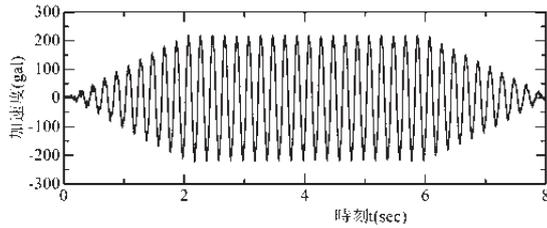


図 37 入力加速度波形
Fig. 37 Input acceleration waveform.

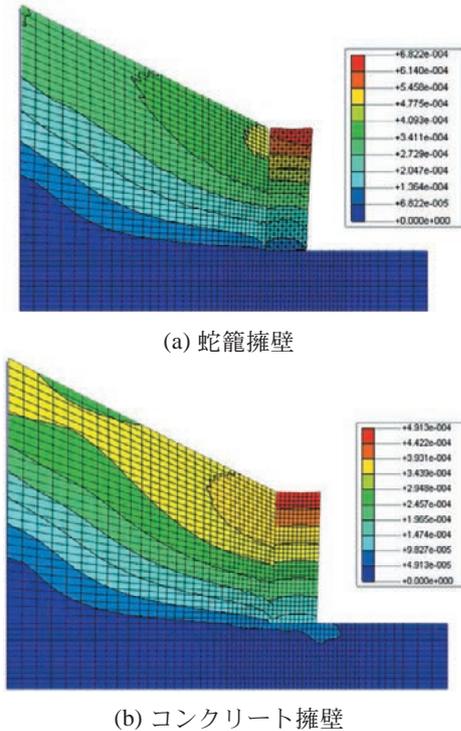


図 38 最大変形図(変形倍率 50 倍)
Fig. 38 Maximum deformation diagram
(deformation magnification 50 times).

性を考慮した。

以上が、現状で考えている降雨後の地震応答解析の手順である。解析結果として最大変形図を図 38 に示すが、実験で見られたような擁壁構造の変形傾向の違いまでの評価に至っていないのが現状である。ここで示した事例は、先行降雨後の地震のケースにあたるが、降雨時の表層の雨水の浸透率、降雨浸透域の飽和度液状化の可能性を含めた動的特性の評価が考えられる。一方、先行の地震の場合にはクラック等の損傷があった場合に降雨浸透特性が異なる場合がある。また、蛇籠擁壁については大きな透水性を有することから、これらの評価が課題と考えており、まずは、今回報告した実験結果の詳細な分析から進めていく予定である。

謝辞

本資料のまとめにあたり、既往の研究成果は、基盤研究 B(海外学術調査, 16H05746), 基盤研究 B(一般, 16H04413), 大畑財団 2018・2019 年度研究助成, および高知大が獲得した JICA 草の根技術協力事業(地域活性化特別枠)によるもの成果を中心にまとめられた。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 原忠・栗林健太郎・西剛整・末次大輔・Suman Manandhar・中澤博志・櫻庭拓也・假屋隆文・河内佑己・ハザリカ・ヘマータ(2016): 2015 年ネパール・ゴルカ地震における蛇籠構造物に関する被害調査(その 1 調査概要), 第 51 回地盤工学研究発表会, 1661-1662.
- 2) 栗林健太郎・西剛整・張浩・Pawan Kumar Bhattarai・原忠・末次大輔・中澤博志(2016): 2015 年ネパール・ゴルカ地震における蛇籠構造物に関する蛇籠構造物に関する被害調査(その 4 蛇籠中詰め材の施工方法), 第 51 回地盤工学研究発表会, 1663-1664.
- 3) 原忠・中澤博志・末次大輔・栗林健太郎・西剛整・田所佑理佳・三好克明・張浩(2018): 2015 年ネパール・ゴルカ地震における蛇籠被害の実態調査と耐震性向上に向けた具体策の検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.74, No.4, I_586-597.
- 4) 中澤博志・原忠・末次大輔・栗林健太郎・西剛整・張浩・Pawan Kumar Bhattarai(2016): 2015 年ネパール・ゴルカ地震における蛇籠構造物に関する被害調査(その 2 蛇籠実態調査), 第 51 回地盤工学研究発表会, 1659-1660.
- 5) 末次大輔・原忠・中澤博志・栗林健太郎・品川大地・西剛整・張浩(2016): 2015 年ネパール・ゴルカ地震における蛇籠構造物に関する被害調査(その 3 蛇籠中詰め材の物理的性質), 第 51 回地盤工学研究発表会, 1661-1662.
- 6) 原忠・田所佑理佳・末次大輔・松尾光流・中澤博志・西剛整・栗林健太郎・三好克明(2017): 蛇籠擁壁の耐震性評価手法の検討(その 1) — 中詰め材の要素試験 —, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 481-482.
- 7) 末次大輔・原忠・中澤博志・田所佑理佳・栗林

- 健太郎・西剛整(2018): 蛇籠擁壁の室内試験による耐震性評価(その2) - 模型蛇籠擁壁の水平載荷実験 -, 第53地盤工学研究発表会, 1797-1798.
- 8) Nakazawa, H., Hara, T., Suetsugu, D., Nishi, T., Kuribayashi, K., Miyoshi, K., and Shimomura, S. (2018): Experimental Evaluation on Earthquake-Resistance of Road Retaining Wall Using Gabion, *Journal of Disaster Research*, Vol.13, No.5, 897-916.
- 9) Nishi, T., Hara, T., Nakazawa, H., and Suetsugu, D. (2019): Evaluation of Numerical Analysis for Earthquake Resistance of Retaining Wall Using Gabions, *EPI International Journal of Engineering*, Vol.2, No.2, 116-126.
- 10) Nakazawa, H., Usukura, K., Hara, T., Suetsugu, D., Kuribayashi, K., Nishi, T., Kimura, S., and Shimomura, S. (2019) : Problems in Earthquake Resistance Evaluation of Gabion Retaining Wall Based on Shake Table Test with Full-Scale Model, *Journal of Disaster Research*, Vol.14, No.9, 1154-1169.
- 11) Kimura, S., Hara, T., Suetsugu, D., Nakazawa, H., Nishi, T., Shimomura, S., Shibahara, R., and Kuribayashi, K. (2018): An issue of seismic structure and construction regarding gabion wall in rural area of Nepal, *Proc. of 7th Asia Conference on Earthquake Engineering*, No.0151, 1-10.
- 12) 原忠・柴原隆・西剛整・中澤博志・木村瞬・末次大輔・下村昭司・西村義幸(2020): ネパール国における蛇籠擁壁の安定性評価, 第54回地盤工学研究発表会, 23-10-2-04.
- 13) Hara, T., Shimomura, S., Nishimura, Y., Kuribayashi, K., Kimura, S., Nishi, T., Nakazawa, H., Suetsugu, D., and Miyoshi, K. (2019): Gabion Plan/Design/Construction Manual (First Edition)(FEDERAL DEMOCRATIC REPUBLIC OF NEPAL, Proposal Organization: Yusuhara Town and Executing Organization: Kochi University), Project for Penetration in Nepal of local Adaptation-Based Gabion Techniques for Both Disaster Management and Environment Protection, JICA Partnership Program, March 2019, 32p.
- 14) Hara, T., Shimomura, S., Nishimura, Y., Kuribayashi, K., Kimura, S., Nishi, T., Nakazawa, H., Suetsugu, D., Miyoshi, K., and Hao, Z. (2019): Gabion Plan/Design/Construction Technical Note, 73p.
- 15) Nakazawa, H., Nishi, T., Kurihara, H., Suetsugu, D., Hara, T. (2019): Basic Study on Deformation Evaluation of Steel Wire Mesh for Rational Gabion Structure Design, *EPI International Journal of Engineering*, Vol.2, No.2, 109-115.
- 16) Nakazawa, H., Manandhar, S., Hara, T., Suetsugu, D., Kuribayashi, K., Nishi, T., Sakuraba, T., Kariya, T., Kochi, Y., and Hazarika, H. (2015): Report on damages caused by the 2015 Nepal Gorkha Earthquake, *JAEE International Symposium on Earthquake Engineering*, 2-36.
- 17) 中澤博志・原忠・末次大輔・西剛整・栗林健太郎・張浩・ハザリカ・ヘマンタ・三好克明・下村昭司・木村瞬・白倉和也・柴原隆・田端憲太郎(2019): 蛇籠を用いた耐震性道路擁壁の実大振動台実験および評価手法の開発 - 被災調査から現地への適用に至るまで -, 防災科学技術研究所研究資料第426号, 114pp.
- 18) 環境省(2014): 「日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について(お知らせ)」, 気象庁報道発表資料.
- 19) IPCC 第5次評価報告書第1作業部会報告書, 2013.
- 20) 地盤災害リスクマネジメントと気候変動適応の融合に関する研究委員会(2016): 地盤災害リスクマネジメントと気候変動適応の融合に関する研究報告書, 88pp.
- 21) 農業農村整備情報総合センター(ARIC): 農業農村整備民間技術情報データベース(NNTD), <https://www.nn-techinfo.jp/>, 2020.9.21 閲覧.
- 22) Kokusho, T., Ishizawa, T., and Hara, T. (2004): Slope failures during the 2004 Niigataken Chuetsu earthquake in Japan, *Earthquake geotechnical case histories for performance-based design*, 47-70.
- 23) 中澤博志・原忠・末次大輔・栗林健太郎・西剛整・三好克明・田所佑理佳・白倉和也(2018): 蛇籠を用いた道路擁壁の耐震性評価に関する実大規模振動台実験, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, Vol.74, No.4, I_441-451.

- 24) 全国防災協会(1963):蛇籠の知識, 日本河川協会.
- 25) Water and Energy Commission Secretariat, HMG. Nepal (1987): Erosional sedimentation in Nepal Himalaya-An assessment of river processes, Kefford Press, Singapore, 10-11.
- 26) Yagi, H., Maruo, Y., Saijo, K., and Nakamura, S. (1990): The Sept. 1988. Large landslide in the vicinity of MCT, Darbang, Nepal, 地すべり, Vol.100, 45-49.
- 27) 吉松弘行・山田孝・大井英臣(1983):ネパールの1993年集中豪雨による土砂災害, 新砂防, Vol.46, No.4, 58-62.
- 28) 檜垣大助・八木浩司・若井明彦(2015):2015年ネパールゴルカ地震による土砂災害発生状況, (公社)日本地すべり学会緊急調査団報告書, 1-11.
- 29) 原忠・田所佑理佳・末次大輔・中澤博志・西剛整・栗林健太郎(2018):蛇籠擁壁の室内試験による耐震性評価(その1)ー中詰材のせん断特性ー, 第53地盤工学研究発表会, 1795-1796.
- 30) 原忠・柴原隆・末次大輔・中澤博志・西剛整・栗林健太郎(2019):粒子形状の異なる蛇籠中詰材の変形特性, 地盤工学会四国支部令和元年技術研究発表会, 57-58.
- 31) Seed, H. B. and Idriss, I. M (1970): Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Report of Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC70-10, University of California.
- 32) 田中幸久・工藤康二・吉田保夫・片岡哲之・國生剛治(1988):砂礫地盤の力学的特性に関する研究ー凍結サンプリングによる不攪乱試料の力学的特性とその簡易評価法ー, 電力中央研究所・研究報告, U88021.
- 33) 境野典夫・安田成夫・松本徳久(1986):ロックフィル材料の動的変形特性試験, 第21回土質工学研究発表会講演集, 515-516.
- 34) 土木学会編(1989):動的解析と耐震設計(第1巻)地震動・動的物性, 技報堂出版, 170pp.
- 35) 西剛整・中澤博志・臼倉和也・原忠・末次大輔・三好克明・下村昭司・栗林健太郎・木村瞬・柴原隆(2018):蛇籠擁壁の耐震性に関する実大実験および安定性評価(その3)ー解析的評価ー, 土木学会第73回年次学術講演会, 693-694.
- 36) 西剛整・原忠・柴原隆・中澤博志・末次大輔(2018):蛇籠擁壁の耐震性に関する実大実験の解析的評価, 平成30年度地盤工学会四国支部技術研究発表会, 講演概要集, 19-20.
- 37) 中澤博志・栗原裕之・末次大輔・原忠(2020):蛇籠を用いた構造物の合理的な設計手法のための変形メカニズムに関する実験研究, 公益財団法人大畑財団平成30年度研究助成報告書, 10pp, <http://www.itec-c.co.jp/ohata-zaidan/report.html>.
- 38) 吉松弘行・山田孝・大井英臣(1993):ネパールの1993年7月集中豪雨による土砂災害, 砂防学会誌(新砂防), Vol.46, No.4, 58-62.
- 39) 原忠・柴原隆・西剛整・中澤博志・木村瞬・末次大輔・下村昭司・西村義幸(2018):ネパール国における耐震性の向上に着目した蛇籠擁壁施工に関する基礎的調査, 平成30年度地盤工学会四国支部技術研究発表会, 講演概要集, 17-18.
- 40) 独立研究開発法人国際協力機構:地域活性化特別梓草の根技術協力事業概要「ネパールにおける防災と環境を両立させる現地適応型蛇籠技術普及事業(高知大学)」, https://www.jica.go.jp/partner/kusanone/country/ku57pq00001nf92v-att/nep_02_t.pdf, 2020.9.21 閲覧.
- 41) Langton, D.D. (1999): The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. Ground Engineering, September, 33-36.
- 42) 原忠・林伸二郎・柴原隆・西剛整・下村昭司(2020):人工降雨実験による蛇籠擁壁の浸透性能と変形特性, 第55回地盤工学研究発表会, 21-8-5-01.
- 43) 一般財団法人国土技術研究センター(2012):河川堤防の構造検討の手引き(改訂版) 平成24年2月.

(2020年9月23日原稿受付,
2020年9月23日原稿受理)

要 旨

2015 年ネパール・ゴルカ地震では、中山間地域に多い蛇籠を用いた道路擁壁が高い屈撓性を発揮し、機能を維持した例も多数確認された。蛇籠は高い屈撓性・透水性、材料入手、工期や運搬や撤去の容易さ、自然材料の活用等に優れ、国際的に土木工事に幅広く利用され様々な用途で展開が可能である。一方、蛇籠構造物はコンクリート構造物に比べ、設計法が明確でないため、既往の研究において、実大実験に基づく耐震性の検証を行い、ネパール現地向けの効果的な構造形式の提案を行った。しかし、集中豪雨などの自然災害の多いネパール国においては斜面崩壊が頻発しており、耐震性に加え、降雨の影響についても検討すべき課題と考えられる。そこで、本研究では、蛇籠擁壁とコンクリート擁壁を用い、降雨と振動を交互に作用させる模型実験を行い、構造形式の違いによる被害形態への影響を調べた。一連の実験から、蛇籠とコンクリートの構造形式の違い、また降雨と加振の作用の違いによって、擁壁の変形・変状傾向と最終的な崩壊に至る特徴について調べ報告する。

キーワード：蛇籠，擁壁，地震，降雨，模型実験，残留変形