

斜面模型実験を対象とした大回転・接触挙動を含む動的崩壊シミュレーションモデルの妥当性確認

Validation of Dynamic Collapse Simulation Model Including Large Rotation and Contact Behavior for Slope Model Experiments

山田滉一郎¹⁾, 木村管杜²⁾, 山本佳士³⁾

Koichiro Yamada, Kanto Kimura and Yoshihito Yamamoto

1) 法政大学大学院 デザイン工学研究科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: koichiro.yamada.6x@stu.hosei.ac.jp)

2) 法政大学大学院 デザイン工学研究科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: kanto.kimura.9x@stu.hosei.ac.jp)

3) 博(工) 法政大学 デザイン工学部 教授 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: y.yamamoto@hosei.ac.jp)

In recent years, seismic stability evaluation of discontinuous rock slopes around critical structures such as nuclear power plants have been conducted, and it is important to consistently track the process of change from a continuum to a discontinuity to evaluate the dynamic behavior of rock slopes. In this study, the applicability of RBSM to the evaluation of seismic stability of rock slopes was investigated by using RBSM, which can dynamically reproduce geometric nonlinearity and contact behavior, and by conducting a replication analysis for a vibration test of a slope model that simulates an existing discontinuity in a rock mass. Analytical parameters were set up based on laboratory material tests, and the vibration steps and morphology leading to collapse were compared with those of the experiments. The results suggest that the RBSM can qualitatively reproduce the collapse morphology and onset time of a slope model.

Key Words : RBSM, Collapse simulation, shaking table test, rock slope

1. はじめに

ダム, 原子力発電所などの重要構造物は, 強度, 剛性が高く, 安定性に優れていることから, 岩盤上あるいは岩盤内部に建設されることが多い, これらの重要構造物そのものの耐震性は当然のことながら, 周辺地盤や隣接斜面についても地震時の安定性を評価することが不可欠である. 近年, 重要構造物周辺の不連続性岩盤斜面を対象として, すべり安全率だけでなく変形量も考慮した地震時の安定性評価に向けた検討[1][2][3]が進められており, 岩盤の斜面崩壊等による周辺構造物の影響評価を定量的に評価するためには, 数値解析手法によるシミュレーションが有用であると考えられる.

不連続性岩盤斜面を対象とした数値解析手法は, 主に等価連続体解析と不連続体解析手法の2つに大別され, 前者の例として有限要素法(FEM), 後者の例として個別要素法(DEM), 不連続変形法(DDA)などが挙げられる. FEMは, 不連続面の幾何特性, 力学特性を評価することができ, 不連続面の影響を考慮することが可能であるが, 亀裂進展やすべりなどの不連続挙動を追跡するのは困難である. 一方, DEM, DDAでは, 各ブロックが分離して剛体, 弾性体として運動するため, トップリングや落石のように岩塊が分離するような大変形の挙動を追跡することが可

能である. しかし, 正しい結果を得るためのパラメータの設定方法が困難であることや, 接触機構が点接触であり, 落石, 衝突問題には比較的優れているが, すべり線の進展等による斜面の不安定化の再現については不向きである. また, 破壊前の状態から, 破壊の進展, 破壊後の挙動を同一の理論に基づき定量的に再現可能な手法が確立されていないことが課題として挙げられる.

著者らは, 不連続体解析手法の一種であり, コンクリート材料の各種応力下における破壊の局所化挙動を再現可能な剛体バネモデル(RBSM)を開発している[4][5]. 一般にRBSMは, 微小回転の仮定に基づいているため, 材料レベルで破壊が局所化した後, 大変位・大回転を伴って部材あるいは構造システム全体で倒壊していく挙動の再現が困難であった. また, RBSMは初期のネットワークを参照し続けるため, 倒壊過程で破砕片同士が新たに接触をするような, 初期のネットワークを超えた要素同士の接触挙動の再現が困難であった. そこで著者らは, 幾何学的非線形性を考慮可能な3次元RBSMを開発し, さらに剛体要素(多面体要素)も接触判定用の球を配置し, 接触が判定された際に要素ネットワークを更新することで, 大変位・大回転が生じた後の接触, 衝突挙動を再現可能な手法を提案している[6][7]. さらに近年では, 同手法を動的問題へ拡

張し、地震あるいは衝撃作用下の破壊、倒壊挙動の再現が可能になる手法を開発している[8][9]。以上の手法は、数値解析技術の現状では再現が困難な、岩盤斜面の、連続体の状態から破壊の進展に伴う不連続体への移行過程、不連続体となった後の接触・衝突挙動を一気通貫で再現できる可能性がある。ただし、実現象と比較した提案手法の妥当性確認は十分できていない。

本研究では、岩盤斜面の崩壊挙動の再現を目的として、著者らが提案している、大回転・接触挙動を考慮可能なRBSMの妥当性確認の過程を示す。具体的には、金属六角棒で不連続性岩盤を模擬した斜面模型加振実験[10][11]を対象として、提案手法を用いて再現解析を実施し、斜面模型の崩壊形態、崩壊開始時刻の比較を実施した。

2. 提案手法の概要

(1) 大回転・接触挙動を考慮したRBSM

本研究では、Voronoi分割によるランダム多面体要素を用い、さらに大変位・大回転挙動を再現できるよう拡張した3次元剛体バネモデル(RBSM)により模型材料の金属六角棒をモデル化した。RBSMとは、Kawai[12]により提案された離散体解析手法の一つであり、対象を剛体要素とバネの集合体としてモデル化し、要素間に分布するバネのエネルギーを評価することにより、対象の力学的挙動を追跡する手法である。バネに非線形性を導入することでひび割れ、すべり等の不連続挙動を簡便に表現することが出来る。図-1に示すように、3次元RBSMでは、剛体要素内の代表点に並進3、回転3の計6自由度を設定し、要素内に剛体変位関数を仮定する。一般的なRBSMでは、要素の剛体変位関数に、微小回転の仮定に基づく回転マトリクスを用いているが、本研究では、RBSMと低減積分ティモシェンコはり要素の等価性に注目して新たに開発した、幾何学的非線形性を考慮した手法を用いた[6][7]。

図-2に提案手法の概要を示す。提案手法では、2つの剛体要素間の力学モデルとして、Voronoi面を断面に持つ、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した低減積分ティモシェンコはり要素を仮定する。ここで、Voronoi分割の性質上、Voronoi面は2つの母点を結ぶ線分の垂直二等分面になる。Toi[13]は、RBSMの積分点位置が2つの剛体要素の自由度設定点のちょうど中間の断面に位置している場合、その要素剛性マトリクスは、同様にはり軸中央断面に1点の積分点を持つ低減積分ティモシェンコはり要素の要素剛性マトリクスと、完全に一致することを明らかにしている。すなわち、断面をVoronoi面とし、Voronoi母点を節点とする、低減積分ティモシェンコ梁要素のネットワークからなる構造は、要素配列にVoronoi分割を適用し、Voronoi母点を自由度設定点としたRBSMと、微小変形の仮定の下では完全に一致する。すなわち、2つの剛体要素間の力学モデルとして低減積分ティモシェンコはり要素を仮定すれば、微小変形領域においては、従来の微小回転の仮定に基づくRBSMと等価となり、さらに、有限回転を

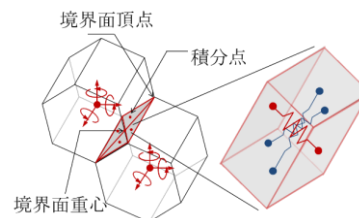


図-1 RBSMの概要

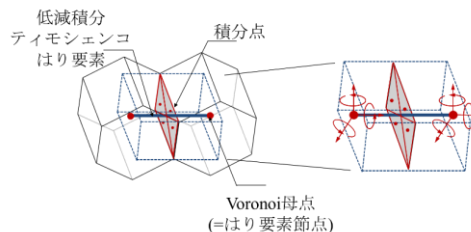


図-2 提案モデルの概念図

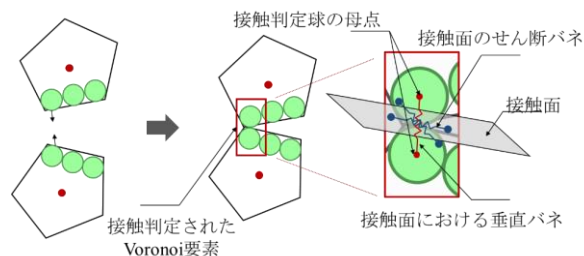


図-3 接触解析の概要

含む幾何学的非線形性を考慮することで、大変位・大回転挙動の再現が可能となる。RBSMと等価な低減積分ティモシェンコはり要素によって離散化した運動方程式の時間積分法については、Newmark- β 法を用いた[14][15]。

また、従来のRBSMは個別要素法(DEM)のように接触判定は実施せず初期のネットワークを参照し続けるが、提案手法では、以下のように要素ネットワークを更新する。

要素ネットワークを更新する際には、その前段階として、まず、多面体要素同士の接触判定を実施する。提案手法では、簡単に多面体要素を球要素で近似する方法を適用した。球体要素でのモデル化には、Matsushimaら[16]が提案している動的最適化法を適用し、複数の球形要素でVoronoi多面体の形状を近似し接触判定を実施した。動的最適化法の詳細は参考文献[16]に詳しいので参照されたい。著者ら[7]は従来、接触球の初期配置として、Voronoi頂点、Voronoi辺中点、Voronoi面重心近傍の内部の点を設定していたが、本研究では対象が2次元の問題であることと、接触時の計算負荷効率化のため、六角柱において、頂点の数が4つのVoronoi面重心近傍の内部の点、六角柱の高さ方向におけるVoronoi面中点に設定し、Voronoi頂点、頂点の数が6つのVoronoi面には接触判定球を配置しないように設定した。

図-3に接触解析の概要を示す。各剛体要素内に配置された接触判定球は、剛体要素と共に並進および回転移動する。時間ステップごとに接触判定球を用いて初期のネットワークとは異なる要素との接触判定を実施し、新た

に接触と判定された場合には、その接触判定球の母点間を結ぶ軸方向に垂直バネを1個配置し、その法線方向に面(以下接触面)を作成し、接触面上にせん断バネを2個配置する。そこで、RBSMにおける評価指標を新たに作成した垂直バネおよびせん断バネに導入し、接触力を評価する仮想仕事式を立式する。接触面におけるバネの構成モデルは(2)において示した構成モデルと同様のもの使用し、応力および内力計算を実施した。上記の手順に基づき接触判定を時間ステップ毎に実施することにより、初期の要素ネットワークを超えた破壊・崩壊挙動を再現した。

(2) 解析に使用するバネの構成モデル

RBSMにおける要素間バネの応力-ひずみ関係には、著者ら[4]が提案する非線形構成モデルを用いた。同モデルはコンクリートを表現する構成モデルとして、微小変形を仮定したRBSMで妥当性、有用性を確認している。同モデルの材料パラメータは計15個存在し、従来、標準的な円柱供試体の一軸引張、一軸圧縮、静水圧圧縮および三軸圧縮試験を対象にキャリブレーション解析して得られたパラメータを使用していた。本研究では、次章に示すように、不連続性岩盤を模擬した金属六角棒供試体における室内要素材料試験を対象にキャリブレーション解析を実施することにより材料パラメータを同定した。

表-1, 2に本研究で使用した材料パラメータを示す。材料パラメータ同定の流れとして、2要素でのせん断試験を対象とした再現解析により解析結果に直結する各種パラメータを大掴みに設定し、六角棒要素を巨視的にとらえた一面せん断試験や三軸圧縮試験を対象に再現解析を実施することによりパラメータの改良を図った。次章では、表-1, 2のパラメータを使用した各種試験の再現解析結果を示す。

3. 室内要素材料試験[10]の再現解析

ここでは、材料パラメータ同定にあたり対象とした室内要素材料試験の再現解析について説明する。

図-4に試験の概要図を示す。対象とした実験は、一面せん断試験(シリーズC-2)、一面せん断試験(シリーズD-3)、三軸圧縮試験(シリーズE-1)であり、シリーズC-2では六角棒2本1対、シリーズD-3では六角棒24本2段、シリーズE-1では六角棒10本31段で試験を実施している。各試験の位

置づけとして、C-2では六角棒の境界面の力学特性の取得、D-3では六角棒群が形成する境界面の力学特性の取得、E-1では六角棒により構成されるマスに対する力学特性の取得を目的としている。材料試験の詳細については、参考文献[10]を参照されたい。

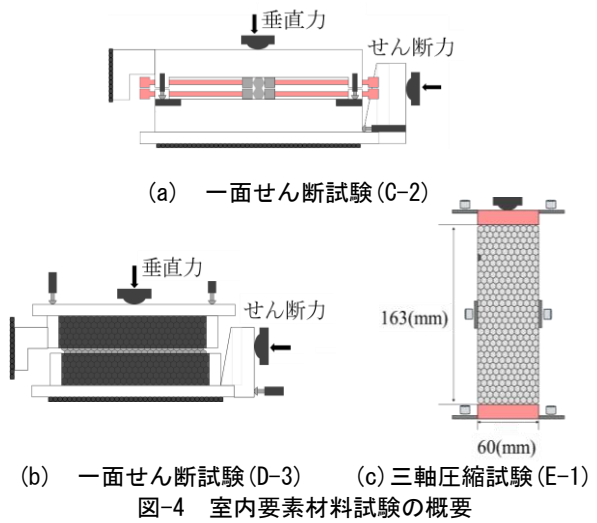


図-4 室内要素材料試験の概要

図-5に各種材料試験の再現解析により得られた解析結果を示す。図-5(a)は一面せん断試験(C-2)、(b)は一面せん断試験(D-3)、(c)は三軸圧縮試験(E-1)の解析結果である。同図より、同定した材料パラメータを使用することにより、一面せん断試験(C-2, D-3)、三軸圧縮試験(E-1)ともに妥当な精度で再現できていることが確認できる。

4. 斜面模型加振実験[11]の再現解析

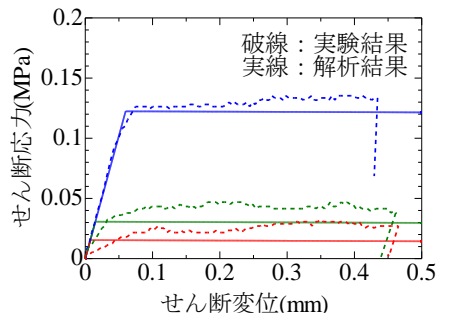
図-6に解析モデルを示す。斜面模型高さは150mm, 300mmの2種類で、材料試験の解析で用いた六角棒要素を使用した。実験条件の再現のため、斜面模型右端において土層壁を模擬した壁要素を作製した。境界条件については、斜面模型の最下段を全方向固定とし、壁要素についても全方向固定とした。斜面模型右端と壁要素については特に固定等は施さず分離可能であり、実験条件を再現している。金属六角棒の密度等については、実験で使用され

表-1 垂直バネの材料パラメータ

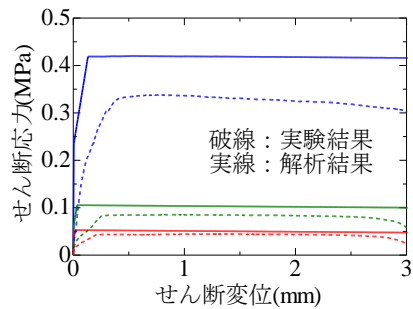
弾性係数	引張領域		圧縮領域			
E (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	gf (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	ε_{c2}	α_{c1}	α_{c2}
1.224×10^{-3}	1.0×10^{-4}	3.241×10^{-2}	50.0	-0.015	0.15	0.25

表-2 せん断バネの材料パラメータ

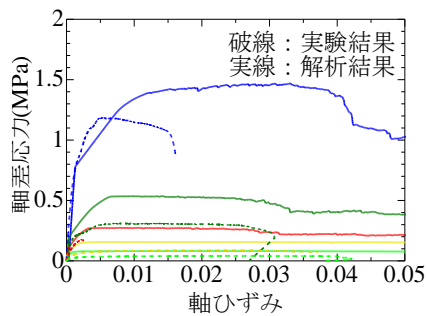
弾性係数	破壊基準			軟化挙動			
$\eta=G/E$ (N/mm ²)	c (N/mm ²)	ϕ (degree)	σ_b (N/mm ²)	β_o	β_{max}	χ	κ
0.01	1.0×10^{-4}	17	1.0	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}	-0.3



(a) 一面せん断試験 (C-2)



(b) 一面せん断試験 (D-3)



(c) 三軸圧縮試験 (E-1)

図-5 各種材料試験の解析結果

ているステンレス材料(SUS304)の一般的な値を使用し、壁要素についても同様に設定した。

斜面模型高さ、周波数による解析結果への影響を検討するため、高さ150mmにおいては周波数10Hz、50Hzの2種類の周波数の加速度を使用し、高さ300mmでは周波数50Hzの入力加速度のみを使用し解析を実施した。図-7に解析において使用した入力加速度を示す。この加速度は、実験において、斜面模型が崩壊した加速度であり、高さ150mmでは、周波数10Hzにおいて、法肩から破壊が発生し、周波数50Hzでは、法先が膨らみ破壊が発生することが確認されている。また、高さ300mm、周波数50Hzでは、法先が膨らみ破壊が発生することが確認されている。

図-8に、斜面模型加振実験および解析により得られた崩壊時のスナップショットを示す。実験で観測された崩壊モードと解析における法面の変形図を比較すると、崩壊形態、崩壊開始時間共に実験と対応した結果が示されていることが確認できた。

5. 結論

本研究では、不連続性岩盤斜面を模擬した金属六角棒

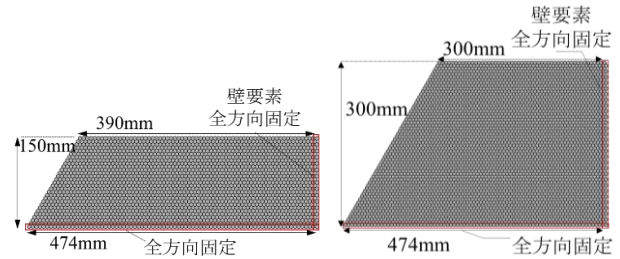


図-6 斜面模型加振実験の解析モデル

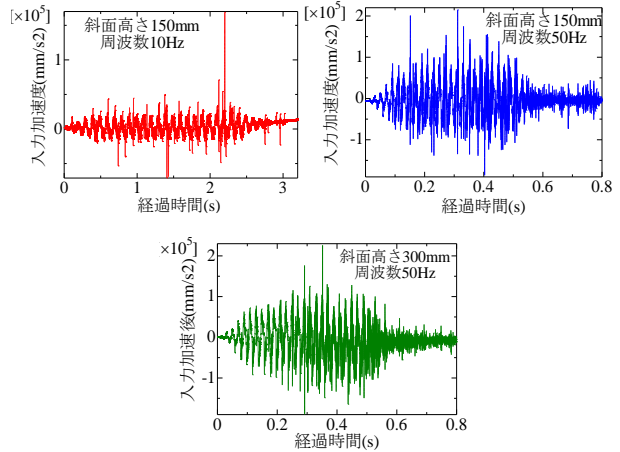
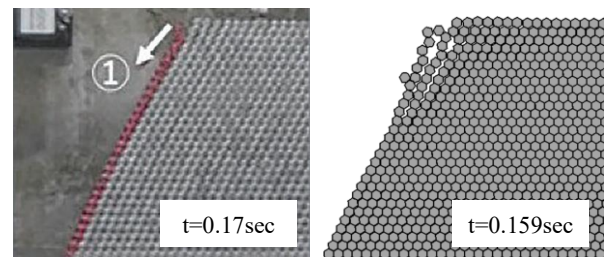
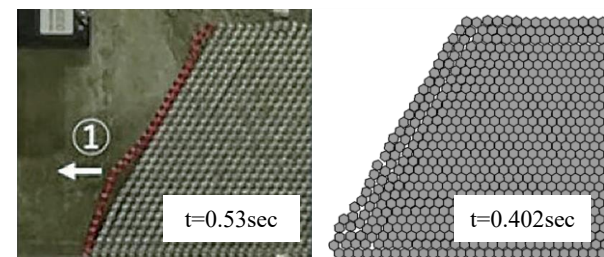


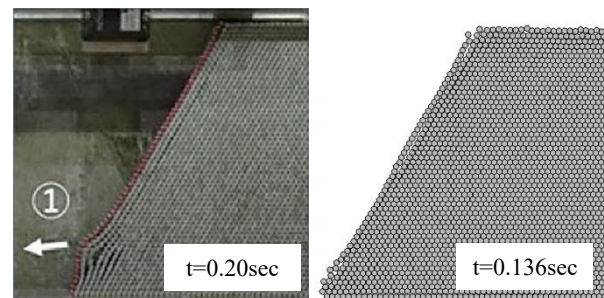
図-7 解析に使用する入力加速度



(a) 斜面高さ 150mm, 周波数 10Hz



(b) 斜面高さ 150mm, 周波数 50Hz



(c) 斜面高さ 300mm, 周波数 50Hz

図-8 実験結果[17]と解析結果の比較

による斜面模型加振実験を対象とした再現解析による、提案手法の妥当性確認を実施した。その結果、室内材料試験については、コンクリート構成モデルの材料パラメータを、要素材料試験を対象に再キャリブレーションすることにより、実験結果を概ね妥当な精度で再現可能であることが確認できた、斜面模型の加振実験では、斜面模型高さ、周波数の違いにより、崩壊形態や崩壊開始時間が変化する挙動までを概ね再現可能であることが分かった。

一方で、室内材料試験の解析結果において、一部では実験結果との剥離が見受けられた。また、加振実験解析においては、斜面模型の崩壊過程の再現性については十分検証できていない。今後の課題として、全ての条件下における要素試験の結果を定量的に再現可能な構成モデルを開発すること、および斜面模型の崩壊過程を含む詳細な再現性の検証を実施することが挙げられる。

また、対象とした実験では、2つの斜面模型のサイズ、2つの加振条件の計4種類の条件に対して、各9回の加振実験を実施している。今後は、対象とする実験の範囲を広げるとともに、ASMEV&V標準[18]に基づいた不確かさの定量化を含む妥当性確認に向けた検討を実施する予定である。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、基礎地盤コンサルタンツ株式会社、河村精一氏には、多大なご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 石丸真, 河合正: 遠心力模型斜面実験による岩盤斜面の地震時安定性評価に関する基礎検討, 土木学会論文集C, Vol. 67, No. 1, pp. 36-49, 2011.
- [2] 足立光, 岩田直樹, 清田亮二, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦: 不連続面を有する岩盤斜面の地震時安定性に関する実験的および解析的検討, 第14回岩の力学国内シンポジウム講演集, No. 054, 2017.
- [3] 石丸真, 岡田哲実, 中村大使, 河合正, 風間基樹: 軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時滑り安定性評価への適用, 土木学会論文集C, Vol. 73, No. 1, pp. 23-38, 2017.
- [4] 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集E, Vol. 64, No. 4, pp. 612-630, 2008.
- [5] Yamamoto, Y., Nakamura, H., Kuroda, I. and Furuya, N.: Crack propagation analysis of reinforced concrete wall under cyclic loading using RBSM, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 8, Issue7, pp. 780-792, 2014.
- [6] 伊佐治優, 山本佳士, 中村光, 三浦泰人: 破壊の局所化および大回転変位を伴うRC構造物の倒壊シミュレーションのための新しい離散体解析手法の開発, 計算工学講演会論文集, Vol. 22, 2017.
- [7] 菊池綾嶺, 中村互, 山本佳士: 接触挙動を考慮したRBSMによるコンクリート構造のひび割れ進展・倒壊シミュレーション, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 15, pp. 13-17, 2023.
- [8] 菊池綾嶺, 山本佳士: 幾何学的非線形性を考慮したRBSMによる動的応答シミュレーション, 計算工学講演会論文集, Vol. 28, 2023.
- [9] 木村管杜, 山本佳士: 大回転・接触挙動を考慮したRBSMによる動的応答シミュレーション: 応用力学シンポジウム講演概要集, Vol. 27, 2024.
- [10] 岡田哲実, 納谷朋広, 和仁雅明, 大塚康範: 不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層の斜面模型の動的挙動評価(1)ー研究の取り組み方法と材料の室内試験ー, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp. 387-392, 2021.
- [11] 納谷朋広, 岡田哲実: 不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層の斜面模型の動的挙動評価(2)ー斜面模型の加振実験ー, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp. 393-398, 2021.
- [12] Kawai, T.: New discrete models and their application to seismic response analysis of structures. Nuclear Engineering and Design, 48, pp. 207-229, 1978
- [13] Toi, Y.: Shifted Integration technique in One-Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 31, pp. 1537-1552, 1991.
- [14] 磯部大吾郎: はり要素で解く構造動力学, 丸善出版, 2020.
- [15] 久田俊明, 野口裕久: 復刊 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善出版, 2020.
- [16] Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete element modeling for irregularly-shaped sand grains. Proc. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, pp. 239-246, 2002.
- [17] 亀村勝美: 岩盤構造物の性能評価における課題ー不連続性岩盤斜面の動的安定性評価の現状と課題ー, 深田地質研究所年報, No. 24, pp. 139-151, 2023.
- [18] ASME: Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME Standard V&V 10-2019, 2020.