

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04957

研究課題名（和文）Peridynamicsを用いた進行性破壊予測の破壊力学的イノベーション

研究課題名（英文）Innovations in Progressive Failure Prediction Using Peridynamics from a Fracture Mechanics Perspective

研究代表者

新保 泰輝（Shimbo, Taiki）

石川工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：20572697

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、台風や地震による土砂災害が頻発激甚化しており、大きな社会問題となっている。土砂災害の予測対策には進行性破壊現象の解明が必要である。そこで、本研究では滑り面が亀裂であると捉え解析手法Peridynamics (PD)を用いて破壊力学の観点から進行性破壊の研究を行った。本研究では、PDを地盤工学に応用し、弾塑性解析や地震応答解析のコード開発、土質試験、再現解析を行った。粘性土の破壊形態や破壊靱性値を明らかにし、模擬地震外力のパラメータスタディにより、最大加速度や周波数による亀裂進展形状の変化を示した。本成果は土砂災害予測の精度向上に貢献し、地盤の破壊挙動理解にも有益である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地すべりなどの地盤破壊現象を解明するためには、物体が逐次分離していく進行的な破壊現象を扱う解析手法が必要である。しかし、亀裂の発生進展とその地盤の崩壊現象を同時に扱うことのできる手法は数多くない。本研究では亀裂進展解析手法Peridynamicsの地震応答解析や弾塑性解析への応用を行った。また、地盤の耐亀裂性能や地盤材料の破壊形態についても実験を通して明らかにしている。これらの実験結果の再現や再現された物理量を用いて地盤の亀裂発生から進展までを解析可能な手法の基礎が確立した。本手法を更に発展させることで地すべりの発生から崩壊までを扱える破壊力学的予測解析手法が確立し、土砂災害の軽減に繋がる。

研究成果の概要（英文）：Understanding progressive failure phenomena is necessary for predicting landslide disasters. In this study, progressive failure is investigated from the viewpoint of fracture mechanics by using peridynamics (PD), which assumes that the slip surface is a crack. In detail, PD has been applied to geotechnical engineering, and the development of codes for elasto-plastic analysis and seismic response analysis, soil tests, and reproduction analyses have been conducted. Failure modes and fracture toughness values of clayey soils were clarified, and parameter studies of simulated earthquake external forces showed changes in crack propagation shapes with maximum acceleration and frequency. The results contribute to improving the accuracy of landslide prediction and are useful for understanding the fracture behavior of soils.

研究分野：地盤工学

キーワード：亀裂進展解析 地震動 進行性破壊 数値解析 Peridynamics

1. 研究開始当初の背景

土砂災害の頻発・激甚化が懸念される中、土砂災害の発生予測対策は日本の土地利用に関する喫緊の課題である。物体が逐次分離して最終的に崩壊に至る『進行性破壊』の科学的解明を行い、土砂災害の予測精度を向上するためには、亀裂の進展を扱う破壊力学による考究が必要不可欠である。研究代表者はこれまで圧縮荷重下にある地盤の亀裂進展プロセスを解明するために研究を進めてきた。しかし①亀裂の自然発生が扱えない、②進展挙動を定める条件が必要、③亀裂面が接触しながら進展する非線形接触移動境界値問題の解が得られない等の問題により、圧縮荷重下の亀裂進展解析は行えず、亀裂進展プロセスの解明には至っていない。進行性破壊を明らかにするためには、地盤内に生じた亀裂が圧縮荷重下で接触しながら進展する問題を解き、亀裂進展形状と外力・地盤特性の関係を明らかにする必要がある(図-1)。

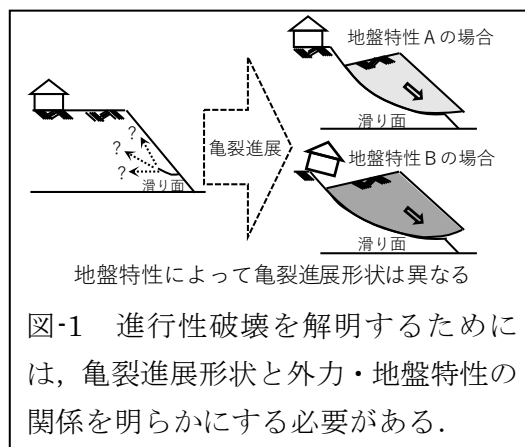


図-1 進行性破壊を解明するためには、亀裂進展形状と外力・地盤特性の関係を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本申請の目的は、亀裂進展解析手法 **Peridynamics¹⁾** (PD) にダイレイタンスー、接触摩擦条件、非排水条件を導入した新たな解析コードを開発し、実験再現解析やケーススタディを通して、亀裂進展形状と外力・地盤特性の関係を明らかにすることである。これにより、与えられた外力・地盤特性で、亀裂がどのように進展していくのかが明らかになり、進行性破壊の科学的解明に繋がると考える。

3. 研究の方法

(1) ダイレイタンスー、接触摩擦条件、非排水条件を導入した解析コードを開発する。

地盤の脆性破壊延性破壊の両者を考慮するために、PD にダイレイタンスーを導入する。本研究では **Drucker-Prager** 弾塑性モデルを用いてダイレイタンスーを導入する。接触摩擦条件については **Short-range force** を用いる。非排水条件はポアソン比によって体積変化を制限することで導入する。開発した解析コードの **Semi-Verification** として FEM での **Drucker-Prager** 弾塑性モデルの解析結果と比較を実施する²⁾。また、亀裂を有する問題の妥当性検証のために、経路独立 E 積分によるエネルギー解放率の評価や弾塑性モデルの解析結果検証用に **X-FEM** を用いた仕事変化率の解析結果をとりまとめる³⁾。

(2) 解析時間を短縮するために、グラフィックプロセッサユニット (GPU) を用いた解析コードの高速化を行う。

Peridynamics は瞬間的に生じる亀裂進展現象を扱うために解析時間間隔を小さくする必要がある。解析時間が長くなるため、単一の GPU では計算能力不足である。本研究ではまず解析コードを GPU 化し、次いで GPU を複数用いて解析コードを並列化し、高速化を図る。

(3) 一軸圧縮試験の再現解析を行い、本手法の地盤材料への適用性を明らかにする。

破壊面が明確かつ排水のない一軸圧縮試験を実施する。試験には破壊面が分かりやすい青粘土を用いた。締固め度を一定とした状態で含水比を変えた供試体を製作し、その

後に亀裂を供試体に挿入した形で試験を行い、その結果をとりまとめる⁴⁾。また、得られた試験結果を基に再現解析を行い、解析により得られた破壊形態を試験結果と比較する⁵⁾⁶⁾。これにより、解析コードの妥当性を明らかにする。

(4) 外力・地盤特性によるケーススタディを通して亀裂進展形状と外力・地盤特性の関係を明らかにする。

亀裂進展形状と外力地盤特性を明らかにするために、(3) で示した再現解析に加えて盛土形状のモデルに対して地震応答亀裂進展解析を行う⁸⁾。外力種類として模擬地震波の周波数、最大加速度を変えて解析を行った。これにより、外力や地盤特性と亀裂進展形状の関係を明らかにする。

4. 研究成果

(1) ダイレイタンスー、接触摩擦条件、非排水条件を導入した解析コードを開発する。

本研究では PD に対して Drukcer-Prager 弾塑性モデルによる弾塑性解析を導入することでダイレイタンスーを考慮した。また、汎用される Short-Range Force を用いて接触条件を導入した。弾塑性モデルの導入に関し、非局所理論での塑性乗数を求める際に、局所理論と非局所理論の違いがあったとしても、同一塑性負荷状態では同一の相当偏差塑性ひずみが生じると考え、繰り返し計算が必要であった非局所理論での塑性乗数を局所理論の手法を用いることで繰り返し計算なしに求める手法を提案した。提案手法の妥当性を示すために、繰り返し計算ありとなしで解析を実施した結果、同程度の精度で一致することがわかった(図-2)。また、繰り返し計算ありと提案手法では提案手法の方が平均で 1.2 倍程度の高速であることがわかった。一方、亀裂を有する問題の検証として PD のエネルギー解放率の評価と比較対象用の X-FEM を用いた弾塑性材料に対する仕事変化率の解析を実施している。

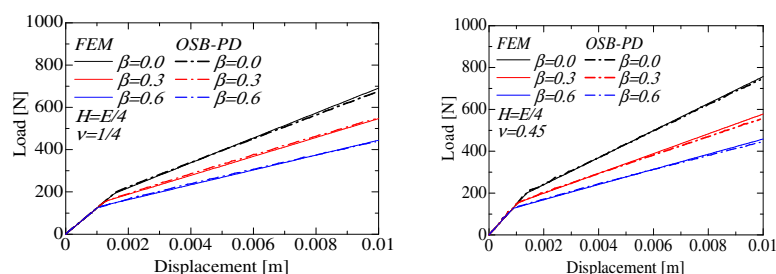


図-2 弾塑性解析における PD と FEM の比較 (荷重—荷重点変位)

(2) 解析時間を短縮するために、グラフィックプロセッサユニット (GPU) を用いた解析コードの高速化を行う。

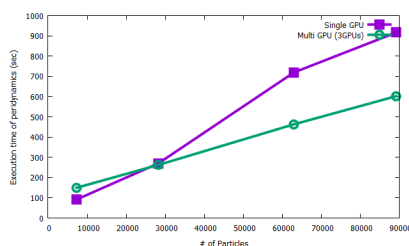


図-3 複数 GPU による実行時間比較

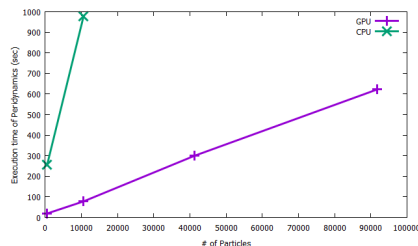


図-4 弾塑性解析での実行時間比較

本研究では GPU を用いた並列処理向けの PD 解析コードを開発した。その結果、CPU 実装に比較して 50 倍程度高速化がなされた。また、複数の GPU を用いた解析コードも

開発した。その結果、図-3 に示すように粒子数が多くなると 3GPU を利用することで 1GPU に対して最大で 1.5 倍程度の高速化がなされた。また、前節に示した弾塑性解析において CPU と GPU で粒子数を変化させた場合に実行時間の比較を行ったところ、図-4 示すように CPU では現実的な時間では終わらない解析が GPU では解析できるようになった。以上より、高速な PD の GPU 解析コードが開発できた。

(3) 一軸圧縮試験の再現解析を行い、本手法の地盤材料への適用性を明らかにする。

開発した解析コードの妥当性を検証するため、また、地盤の耐亀裂性能やその破壊形態を明らかにするために、締固め度を $D_c=90\%$ の一定とし、含水比 $w=18, 23, 28\%$ とした初期亀裂を有する締固め粘土の一軸圧縮試験を実施した。初期亀裂長さは「なし」「15 mm」「20 mm」とし、粘性土の破壊角 45 度に貫通亀裂を挿入した供試体に対して一軸圧縮試験をそれぞれ 10 本程度実施した。図-5 に試験前の供試体と載荷後の供試体の様子を示す。圧縮試験結果より、以下のことがわかった。初期亀裂があることで破壊に至る荷重が明確に低下した。変形係数はきわめて初期の変形のみを用いて求めるため、初期亀裂の影響が現れない事が分かった。また、図-6 に示す含水比と破壊靱性値（亀裂進展の基準）の関係式が得られた。さらに、含水比や初期亀裂長さによって破壊形態が異なり、5 種に分類できることがわかった。

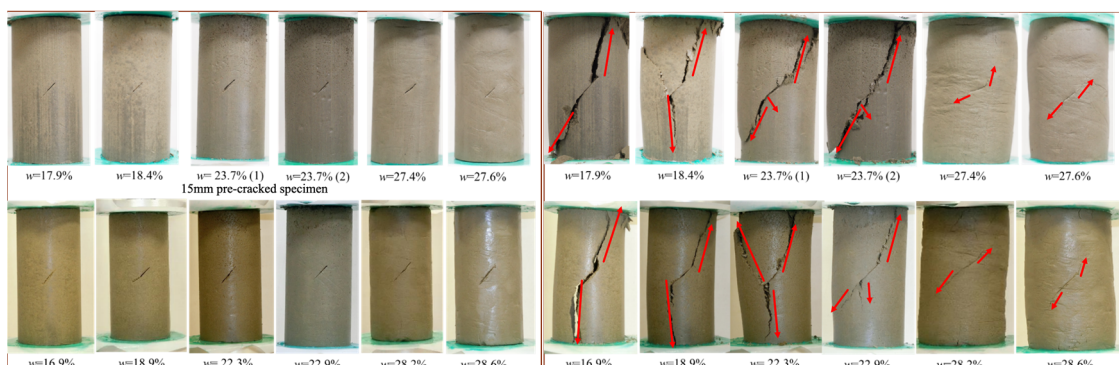


図-5 試験前の供試体と破壊後の供試体の様子

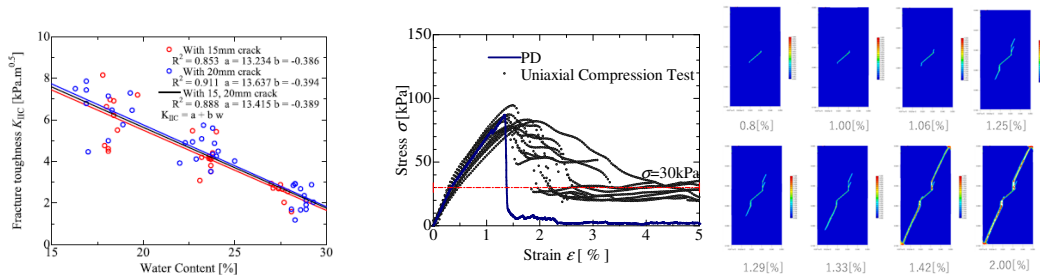


図-6 含水比と破壊靱性値の関係 図-7 応力ひずみ曲線 図-8 亀裂進展結果

これらの破壊形態や物理量を基に弾性 PD と弾塑性 PD を用いた再現解析を行った。図-7 に含水比 $w=18\%$ の軸差応力-軸ひずみ関係とその再現結果を示す。図-7 に示すように PD の結果は試験結果を平均した曲線となっており、ピーク応力までは定性的に良い一致を示している。また、図-8 に亀裂進展形状を示す。図-5 ($w=18\% \pm 2\%$) の試験結果と同様に初期亀裂から進展を開始し、その後、荷重軸に対して逸れる Outward ウィング亀裂形状が得られており、破壊形態についても一定の再現性があることが分かった。

(4) 外力・地盤特性によるケーススタディを通して亀裂進展形状と外力・地盤特性の関係を明らかにする。

本研究では地震応答解析が可能な PD コードを開発した¹⁾。その後、汎用される FEM

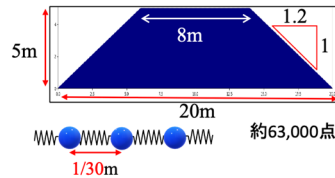


図-9 盛土モデル

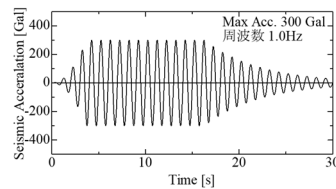
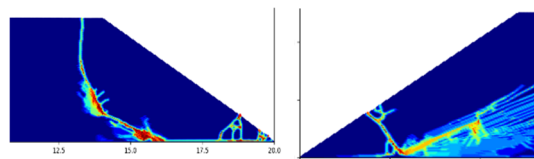


図-10 模擬地震波形

解析コードから得られた応答加速度と比較することでその精度が妥当であることを示した⁷⁾。その後、地震応答亀裂進展解析を通して亀裂進展形状と外力との関係性を明らかにするためにケーススタディを実施した。解析には図-9 に示す盛土モデルを用いた。また、入力地震波は図-10 に示す正弦波に対して振幅包絡線を重ね合わせた模擬地震波である。解析ケースは模擬地震波形の振動数を 1Hz とし、地震波形の最大加速度を 280Gal から 400Gal まで 10Gal ごとに解析を実施したケース 1 と最大加速度を 300Gal とし振動数を 0.5Hz, 1.0Hz - 5.0Hz としたケース 2 の 2 ケースを実施した。300Gal で 1Hz の亀裂進展後の破壊形態を図-11(a)に示す。底面から発生した亀裂が天端に向かって円弧上に進展しているのが見て取れる。330Gal から 400Gal では亀裂は図-11 (b)に示すような法面から亀裂が生じた。すなわち、最大加速度が低い場合に破壊するとすべり破壊を生じ、高い場合には法面から亀裂が進展する。また、ケース 2 の結果より、振動数が高いと法面から亀裂を生じ、振動数が低いとすべり破壊を生じる可能性を示唆する結果を得た。



(a) 300 Gal of 6.7 sec (b) 340 Gal of 4.7 s

図-11 破壊モード

<引用文献>

1. [Taiki Shimbo](#), Ryota Itto, Koutaro Inaba, Kouichi Araki, Naoto Watanabe, Seismic response analysis for ordinary state-based peridynamics in a linear isotropic elastic material, Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling, Vol. 2, pp. 185-204, 2020.
2. [Taiki Shimbo](#), Tomoki Kawamura, Yutaka Fukumoto, Implementation of the Drucker-Prager model for Ordinary State-Based Peridynamics using a Local plastic multiplier, USNCCM, 2021.
4. [Taiki Shimbo](#), Chisato Shinzo, Ukyo Uchii, Ryota Itto, Yutaka Fukumoto, Effect of water contents and initial crack lengths on mechanical properties and failure modes of pre-cracked compacted clay under uniaxial compression, Engineering Geology, Vol. 301, pp. 106593-106593, 2022.
6. Chisato Shinzo, [Taiki Shimbo](#), Yutaka Fukumoto, Crack propagation analysis of compacted clays with various water contents using Peridynamics, STI-GIGAKU, 2022.
7. Ryota Itto, Hiroki Kubo, [Taiki Shimbo](#), Semi-verification of seismic-response analysis for an embankment using peridynamics, Compsafe2020, 2020.
8. [Taiki Shimbo](#), Tomoki Kawamura, Ukyo Uchii, Yutaka Fukumoto, Crack Propagation Analysis in Embankments during Earthquakes using Ordinary State-based Peridynamics, WCCM-APCOM, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shimbo Taiki, Shinzo Chisato, Uchii Ukyo, Itto Ryota, Fukumoto Yutaka	4. 巻 301
2. 論文標題 Effect of water contents and initial crack lengths on mechanical properties and failure modes of pre-cracked compacted clay under uniaxial compression	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 106593 ~ 106593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enggeo.2022.106593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimbo Taiki, Itto Ryota, Inaba Koutaro, Araki Kouichi, Watanabe Naoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Seismic Response Analysis for Ordinary State-Based Peridynamics in a Linear Isotropic Elastic Material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42102-020-00029-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 新蔵千沙都, 内井右京, 一藤亮太, 新保泰輝, 福元豊
2. 発表標題 初期亀裂を有する青粘土の破壊形態に関する含水比の影響
3. 学会等名 令和3年度第76回土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浜本真汐, 福森雄基, 新保泰輝, 福元豊
2. 発表標題 E積分を用いた折れ曲がり瞬間後の仕事変化率のX-FEM解析
3. 学会等名 令和3年度第76回土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内井右京, 河村知記, 新保泰輝, 福元豊
2. 発表標題 Peridynamicsによる引張破壊を考慮した盛土の亀裂進展解析
3. 学会等名 令和3年度第76回土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新保 泰輝, 新蔵 千沙都, 河村 知記, 福元 豊
2. 発表標題 弾塑性Peridynamicsを用いた亀裂を有する締固め粘土の再現解析
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新保 泰輝, Muhammad Khairullah Bin Adlan, 河村 知記, 福元 豊
2. 発表標題 Peridynamicsによる入力地震波特性に着目した盛土の亀裂進展解析
3. 学会等名 第25回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taiki Shimbo, Tomoki Kawamura, Ukyo Uchii, Yutaka Fukumoto
2. 発表標題 Crack Propagation Analysis in Embankments during Earthquakes using Ordinary State-based Peridynamics
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内井右京, 河村知記, 新保泰輝, 福元豊
2. 発表標題 Peridynamicsを用いた地震時の盛土の亀裂進展解析
3. 学会等名 第1回JGS北陸支部ユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浜本真汐, 福森雄基, 新保泰輝, 福元豊
2. 発表標題 仕事変化率を用いた亀裂進展方向に関する基礎的検討
3. 学会等名 第1回JGS北陸支部ユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新蔵千沙都, 内井右京, 一藤亮太, 新保泰輝, 福元豊
2. 発表標題 初期亀裂を有する粘性土の一軸圧縮試験結果に及ぼす含水比の影響
3. 学会等名 第1回JGS北陸支部ユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Itto, Hiroki Kubo, Taiki Shimbo
2. 発表標題 Semi-verification of seismic-response analysis for an embankment using peridynamics
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiki Shimbo, Tomoki Kawamura, Yutaka Fukumoto
2. 発表標題 Implementation of the Drucker-Prager model for Ordinary State-Based Peridynamics using a Local plastic multiplier
3. 学会等名 16th U.S. National Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki fukumori, Taiki Shimbo, Yutaka Fukumoto
2. 発表標題 Work difference rate of soils in the Drucker-Prager model using X-FEM
3. 学会等名 The 5th STI-Gigaku 2020 International Conference on "Science of Technology Innovation" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Itto, Tomoyuki Sawa, Daisuke Hanazawa, Taiki Shimbo, Yutaka Fukumoto
2. 発表標題 Inverse analysis of uniaxial compression tests on clays with a crack
3. 学会等名 The 5th STI-Gigaku 2020 International Conference on "Science of Technology Innovation" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新蔵 千沙都, 内井 右京, 一藤 亮太, 新保 泰輝, 福元 豊
2. 発表標題 青粘土の亀裂を挿入した供試体の作製方法とその一軸圧縮試験
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内井 右京, 一藤 亮太, 新保 泰輝, 福元 豊, 荒木 光一
2. 発表標題 Peridynamics を用いた自重解析への質量比例減衰の影響
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 一藤 亮太, 澤 知行, 花沢 大輔, 新保 泰輝, 福元 豊
2. 発表標題 Peridynamics を用いた亀裂を有する粘性土の一軸圧縮シミュレーション
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新保泰輝, 河村知記, 福元 豊
2. 発表標題 Peridynamicsへのローカルな塑性乗数を用いたDrucker-Prager弾塑性モデルの実装
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 一藤亮太, 新保泰輝, 荒木光一, 渡邊直人
2. 発表標題 Ordinary State-Based Peridynamicsを用いた地震応答解析手法の開発
3. 学会等名 第74回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chisato Shinzo, Taiki Shimbo, Yutaka Fukumoto
2. 発表標題 Crack propagation analysis of compacted clays with various water contents using Peridynamics
3. 学会等名 The 7th International Conference on "Science of Technology Innovation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新保 泰輝, 岡 凌也, 福元 豊
2. 発表標題 3D プリント製円柱/角柱供試体を用いた初期亀裂を有する供試体の破壊形態に関する研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡 凌也, 新保泰輝, 河村知記, 福元豊
2. 発表標題 Peridynamicsによる3Dプリント砂型供試体の圧縮試験の再現解析
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 叶田 知愛, 新保 泰輝, 河村 知記, 福元 豊
2. 発表標題 Peridynamicsによる3次元地震応答亀裂進展解析手法の開発
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田 達大, 新保 泰輝
2. 発表標題 微分演算子形式のペリダイナミックスを用いたE積分の評価
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会 第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------