

jh240006

広域高解像度に対応した亀裂進展解析手法による 地震時地盤破壊シミュレーション

新保泰輝（石川工業高等専門学校）

概要

本研究は、盛土や法面などの土構造物における地震時の破壊メカニズムを明らかにするために、粒子法的一种である Peridynamics (PD) に基づき解析する「地震応答亀裂進展解析法」の省メモリ化・高速化を施すと共に開発した解析手法を用いたシミュレーションを行った。本研究で GPU による並列計算による高速化倍率 6.3 倍 (8GPU) を達成し、アルゴリズムの精査および省メモリ化により、1GPU にて 1000 万粒子規模の解析を可能とした。更に改良した解析コードを用いて、令和 6 年能登半島地震により被災した実地形を対象としたシミュレーションを行い、観測された被害と一部整合する破壊形態を再現した。また、盛土形状による破壊形態の違いを明らかにするために法面勾配によるケーススタディを行い、入力模擬地震波が低周波であれば、緩勾配だと法面上部、急勾配だと法先付近から破壊する。高周波では法面勾配による変化は見られないことを示した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

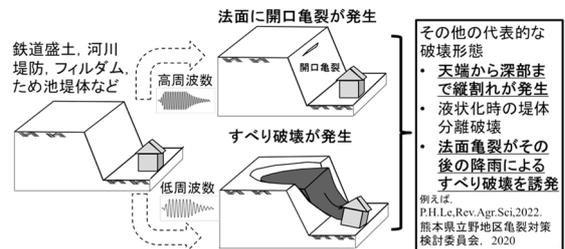
大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

新保泰輝 石川工業高等専門学校、環境都市工学科・准教授：研究総括，解析アルゴリズム開発，GPU プログラミング，解析データ作成
福元豊 岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域 准教授：解析開発実験の実施
河村知記 五大開発株式会社：マルチ GPU アルゴリズム開発
藤田達大 五大開発株式会社：解析理論連成アルゴリズム等開発
Duttine Antoine 株式会社複合技術研究所：盛土解析の精査検証

越野亮 石川工業高等専門学校，電子情報工学科・教授：計算アルゴリズム精査

参画学生：岡凌也，叶田知愛，新美景仁，長谷伶輝，中道琳，倉田涼雅，永原珠実：解析実施



2. 研究の目的と意義

近年，自然災害（豪雨，地震等）が毎年のように全国各地で発生し，国民の生命，財産に甚大な被害をもたらしている。代表者の所属機関も令和 6 年能登半島地震により甚大な

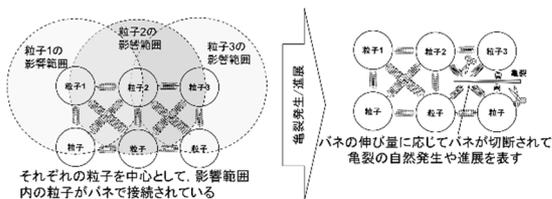


図-2 Peridynamics の概要

被害を受けた。持続可能な社会インフラの整備において、頻発し激甚化するこれらの災害への対応は急務である。しかし、激甚災害への対処にはインフラの強度を単に高めるだけでは物理的にもコスト的にも無理がある。そこである程度の破壊は許容し、破壊したとしても生命、財産に影響を与えないように破壊を制御するフェイルセーフ概念に基づく設計が期待される。しかし、特に地震時に生じる自然斜面や盛土（河川堤防や鉄道、道路、ため池堤体など土で出来た構造物）での地すべりや盛土崩壊現象（以後、地すべり等）については、どのような地震のときにどのような場所で破壊が生じるか？といった基本的な要因の解明も研究途上にある（図-1）。地震時に生じる地盤（岩石、砂、粘土など総称する用語）の破壊メカニズムが明らかにできれば解析ツールの入出力を活用した AI による地すべり等の高精度な破壊形態予測方法の確立や、フェイルセーフ概念に基づく低コストで合理的な対策手法が確立できる。そこで、著者らは S.A.Silling が開発した破壊を扱う力学である破壊力学を考慮した粒子型解析シミュレーション手法 Peridynamics (PD) (図-2) に対して地震工学や地盤工学を導入した「地震応答亀裂進展解析法」を開発し、地すべり等の破壊メカニズムの解明に取り組んでいる。地震応答亀裂進展解析法は地震が生じた際に土構造物にどの程度の揺れが生じて、その揺れによってどこから破壊が進行していくかを表す方法である。PD は粒子法の一つであり、実構造物を粒子の集合体として扱い、粒子同士がバネで接続しており、その

バネが外力によって切断されることで破壊を表現する。粒子同士の計算は並列処理が可能なことから粒子法同様 GPU による演算に適した解析手法である。申請者らのこれまでの研究で CPU に対して 1 GPU にて 50 倍の高速化を達成している。また、2023 年度には 3 次元への拡張ならびに東京大学 情報基盤センターの Wisteria-A への対応を完了した。これにより、150 万粒子程度（30GiB 程度を使用）の解析を可能とし、地震波の周波数が盛土の破壊形態に与える影響を明らかにした。ただし、基礎的な形状のみの検討であり、破壊形態に大きく影響を与えると予想される地形形状と破壊形態の関係性は明らかにはできていない。さらに実地形スケールに対して数多くの地震波での解析を行い、この関係性を明らかにするためには少なくとも 1,000 万粒子以上(0.5 km×0.5 km×深さ 50m を 0.5 m 間隔に粒子配置)の解析をケース毎に並行に実施する必要がある。そのためには省メモリ化、マルチ GPU への対応、並行計算処理が必要となる。よって、本研究の目的と意義は以下の通りである。

目的 本研究では数値解析手法 PD の広域高解像度適用のための省メモリ化と現実装アルゴリズムの最適化を図ると共に並列 GPU への対応を行う。開発したコードを用いて、これまでに明らかにされていない地震時に生じる地すべりや盛土崩壊現象といった破壊メカニズムを解き明かす。

意義 本研究で開発する広域高解像度解析手法により、地震時に生じる地すべりや盛土崩壊現象の発生予測精度が向上し、フェイルセーフ概念に基づく破壊制御型の耐震設計法の確立に繋がる。もって、地盤災害による生命・財産への被害のない豊かな社会の実現を目指す。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義
東京大学 Wisteria-A を用いて実施した意義

は以下の通りである。

- 2023 年度に東京大学の Wisteria-A を用いた検討を行っており, 1GPU メモリ 30GiB 程度を使用した 150 万粒子程度の解析であったものが, 本研究を通して 1000 万点の解析が可能となった。
- 最大 8 機の高性能な GPU によるマルチ GPU コードの開発に繋がり, 結果, 8GPU でシングル GPU に比して 6.3 倍高速化がなされた。
- 解像度による解析結果の検証, 高解像度 DEM を用いた解析の可能性, さらには複数形状の盛土構造物に対する破壊形態の違いや破壊開始時間の違い等が明らかにでき, 破壊メカニズムへの理解が深まった。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要 該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

本研究では省メモリ化, アルゴリズムの最適化, マルチ GPU を用いることで演算性能をスケールアップすることを目標としている。すなわち, 広域高解像度の解析を可能とし, 地震災害に関わるケーススタディを行うために本研究では以下の 3 つの課題を実施した。課題 1 として PD のマルチ GPU 実装とその検証, 課題 2 として高解像度 DEM に対応した 1,000 万粒子超の解析実現, 課題 3 として広域高解像度地形による破壊シミュレーションを実施した。以下に課題ごとの研究成果を詳述する。

課題 1. 領域分割型 GPU 並列の検証と実施

本研究では, MPI+CUDA を用いてマルチ GPU 用 PD 解析コードを実装した。PD 計算アルゴリズムでは, 1 ステップごとに粒子間ののび量と変位量を, MPI 通信によりプロセス間で交換する必要がある。当初, シングル

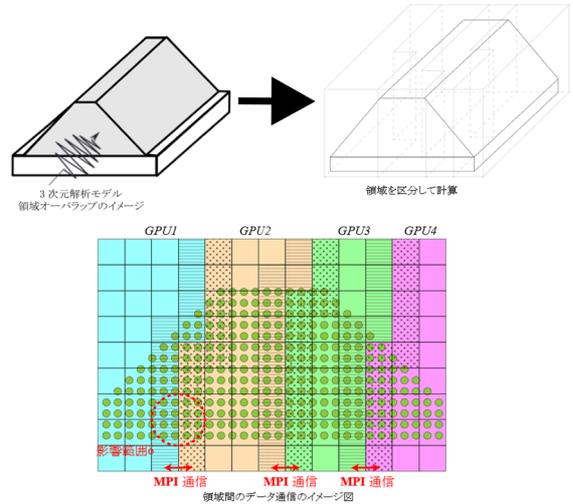


図-3 領域区分による GPU 並列

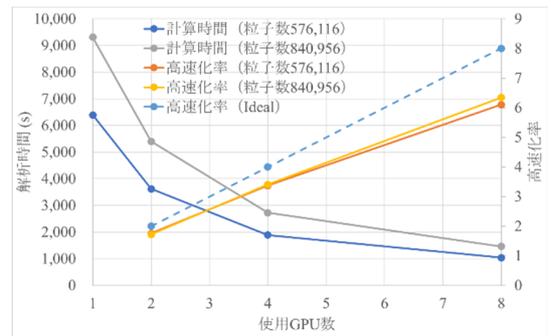


図-4 GPU 数と計算時間・高速化率

GPU コードの処理を素直にマルチ GPU 用コードに移行した際, 解析時間に関して, 1GPU 使用時に約 1298.25 秒, 8GPU 使用時に約 456 秒と 2.8 倍の高速化に留まった。

PD のマルチ GPU 化の課題は, 作用力の計算と接触条件の計算で粒子毎に 2 つの異なる近傍粒子リストが必要となることである。接触条件用リストは時事刻々更新する必要がある, 更新のための近傍粒子探索等の処理に多くの計算や MPI 通信が必要となる。また PD の計算では, 1 ステップあたり 2 回の MPI 通信が必要であり, 各 GPU の計算時間の不均一さが, MPI 通信の同期待ち時間増加を引き起こしていることも判明した。

上記の問題を解決, 軽減するため, 接触判定のための近傍粒子探索を行う範囲を限定することで, 効率化を図った。また各 GPU の担当する粒子数が均一になるように解析前

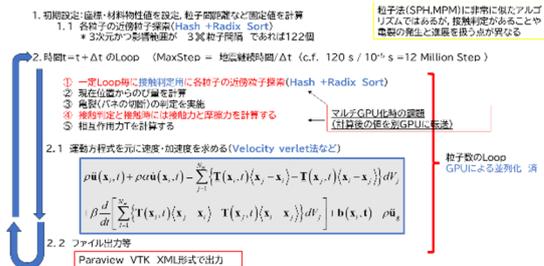


図-5 計算アルゴリズム概要

の初期処理で領域を分割した(図-3). 最終的にマルチ GPU を用いた際の PD 解析の高速化率は, 8GPU を使用時に 6.3 倍を達成した(図-4). したがって, 本研究課題を通して理想倍率に比して途中経過では 35%程度であったものが 78%まで上昇した. 以上より, 特に大規模計算時のメモリ使用量の制限を解決しながら, 高速に解析できる可能性を示した.

課題 2. 高解像度 DEM を用いたデータ構造調査とアルゴリズム最適化

課題 2 については広域高解像度な地形モデルとして, 0.5km² 程度の範囲で深さ 50m 程度までの解析を 1000 万粒子以上で行うことを目標としている. 研究開始当初は 150 万粒子程度 (30GiB 程度を使用) が 1GPU の限界であったことから, PD のデータ構造と計算アルゴリズムの整理を行った. 図-5 にアルゴリズムの概要を示す. データ構造と計算アルゴリズムのコンセプトとして, Wisteria-A の計算能力を考え, 計算可能なデータは計算することとし, 計算負荷が高くかつ一度の計算で良いものや計算不可能なもののみ GPU メモリを使用するものとした. 具体的には粒子数を N とし, その近傍粒子数を k (122 個) とすると, 体積積分時の補正係数のみ倍精度実数の kN 配列を 2 種類確保し, その他は近傍粒子リスト 2 種類を整数型の kN 配列で確保している. これら以外は粒子数 N 程度の倍精度実数や整数型配列の確保をしている. なお, すべての N 配列のメモリ量を総和しても整

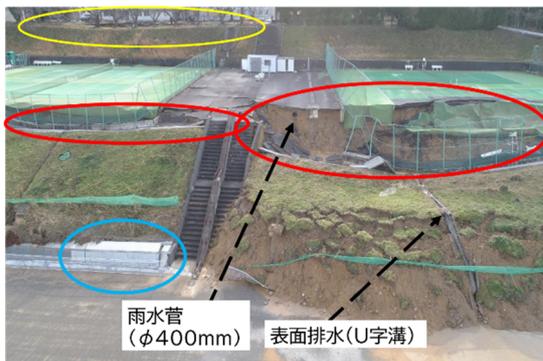


図-6 テニスコート法面崩壊 (令和6年1月11日撮影)



図-7 地震前の地形データ

数型で確保した kN の配列 1 つ分程度である. このようにメモリ確保を最小限とし, 粒子間変位などもすべて時間毎に計算することとした. その結果, GPU メモリ使用量は 83.4% 減(10,150,270 粒子で 237.5GiB から 39.5GiB) となった. これにより, 1GPU (40GiB) で 1,000 万粒子の解析が可能となり, 1,000 万粒子に対する目標は達成された. なお, 計算可能な箇所をメモリ保持しないことによる解析速度低下については, 作用力の計算アルゴリズムを変更したことで概ね修正前と同等程度に収まっている. 更に, 全解析時間では, これまで上記した PD の補正係数計算には CPU 計算で得られたデータを利用していたが, 本研究を通して CPU 依存の解析コードを全て GPU 化した. これに伴い CPU 側のメモリも最低限となった. 更に CPU コードの計算に 30 分から 1 時間必要だったものが 1~2 分程度の処理になり, 全解析時間は短くなった.

課題 3. 広域高解像度地形による破壊シミュレーション

(1) 石川高専法面崩壊再現の試み

課題 2 にて改良した解析コードを用いて実際に令和 6 年能登半島地震で被災した石川高専地内の法面 (図-6) の再現および 2.2 に詳述する盛土に係る検討を行った。計画当初は能登半島の 1mDEM を用いる予定であったが、令和 5 年に図-7 に示す石川高専地内のレーザーキャナのデータがあったことから、これを利用した。本データは Leica RTC360 を用いて取得した高密度点群データである (図-7)。本データは石川高専全域で取得されているため、法面が崩壊したテニスコート付近のデータに加工した。その後、点群処理ソフトウェア Cloud Compare を用いて解析範囲を定めた後、50 cm×50 cm 間隔の Digital elevation model (DEM) データを生成した。この DEM データが解析に用いる地表面となる。大まかに樹木を削除した後、残った樹木等を排除するためにローカル標高 18m 以上の DEM データがある場合には 18m と固定した。一方、解析を行うためには地表以下をモデル化する必要がある。本研究では簡易に 1 層のみとして、解析標高を最低標高 (-5m) から地表面まで 50cm 間隔で点を生成した。標高が 50cm で割り切れない場合には切り捨て処理を行い、標高 50cm 毎のデータになるよう修正した。これは粒子間隔を等間隔とする PD の定式化を用いたからである。さらに地震応答解析を実施するためにはモデル端に壁と最低標高以深には床が必要となる。これらは解析モデルが側方向に移動しないことや重力で落下していかないようにするために必要となる。これらの条件で制作したモデルを図-8 に示す。本モデルの粒子数は 5,362,763 点、粒子間隔 0.5m である。点群データの保存等を含め、単純計算で GPU メモリを 20 GB 程度使用する。解析に用いた

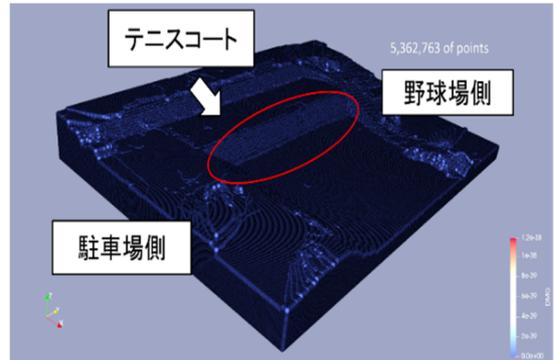


図-8 計算用のモデル

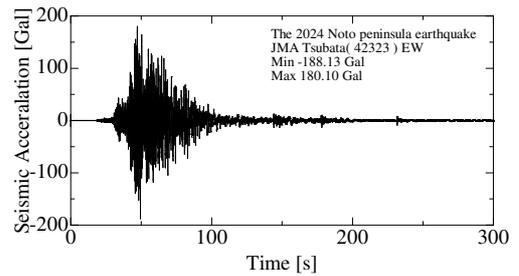


図-9 JMA 津幡観測波形 (能登半島地震)

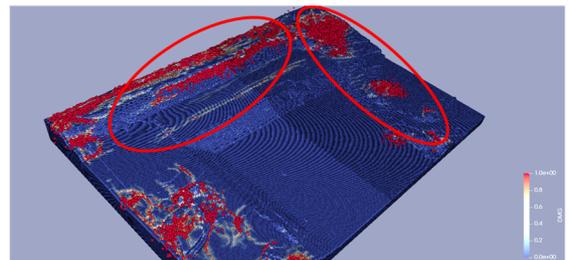


図-10 俯瞰図 (7s)

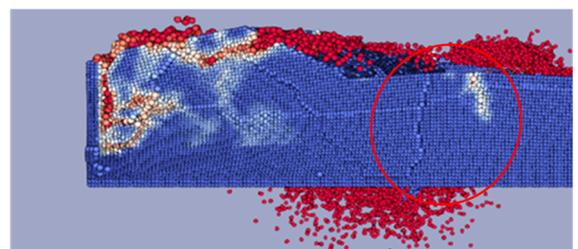


図-11 断面図 (7s)

地震波形は図-9 に示す石川高専から直線距離で 1 km 程度離れた JMA 津幡の観測地震波を用いた。材料は線形等方弾性体とし、モデル全体を均一な材料として扱う。解析に用いた密度、ヤング率は地震後に実施された標準貫入試験や土質試験結果を用いた。密度は 1,788 kg/m³、ヤング率は標準貫入試験の N 値

を用いて 2800N の推定式から 1.75MPa とした。ポアソン比は 1/4 とした。モデル端の壁には盛土材と同様の物性値を与えている。解析時間間隔は 10^{-3} s とした。また、破壊靱性値をキャリブレーションパラメータとした。なお、自重解析は 5s とした。解析結果例を図-10 に示す。図中赤色は損傷が大きい箇所であり、亀裂が生じたと考えられる箇所である。青色は損傷なしの状態である。全体的にテニスコート背面の寄宿舍側の境界に大きな亀裂が生じ、寄宿舍法面の法肩に亀裂が入っている。これに伴って、テニスコート付近にも亀裂が形成されているのが分かる。また、町道の被災箇所と似た箇所に損傷領域が見られた。図-11 にモデル中の断面図を示す。図に示すように、左側の壁に向かった破壊が生じており、これに引きずられる形でテニスコートの中央付近に亀裂が生じている。この点は実際の破壊形態とは異なる。

高密度点群から生成したモデルの課題として以下が挙げられる。(1)本解析には高密度点群から得られた地表面のデータのみを用いており、地表面以深の地層の違いを考慮していない。(2)レーザースキャナのデータは高密度ではあるが、樹木や建物を含むことや微細な地形の違いによって解析上は無視できない小さな段差が生じる。これによって非現実的な加速度が生じる。以上に示すように、一部、実際の被災箇所と同様の場所に破壊を生じる結果を得た。ただし、法面崩壊の再現には課題を残す結果となった。今後は地層構成を考慮した解析モデルを用いて更なる破壊再現を実施し、PD の妥当性を示す。

(2) 盛土形状の破壊形態に係る検討

これまでに盛土がどのような地震波を受けた際に、どのような破壊形態で盛土が崩壊するかについて検討を行ってきた。その結果、地震波の周波数が低い場合にはせん断破壊（すべり破壊）が先行し、高周波が盛土に到達する場合には法面や天端の亀裂が先行し

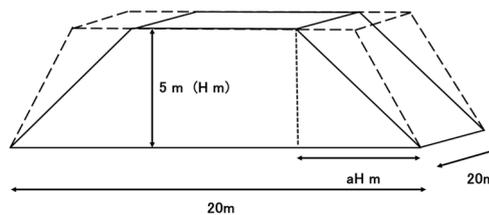


図-12 解析モデルの概要図

表-1 解析ケース一覧

ケース名	法勾配	θ	粒子数
1.0H	1 : 1.0	45°	1,708,992
1.2H	1 : 1.2	39.806°	1,611,702
1.4H	1 : 1.4	35.538°	1,507,788
1.6H	1 : 1.6	32.005°	1,401,390
1.8H	1 : 1.8	29.005°	1,296,648
2.0H	1 : 2.0	26.565°	1,180,935

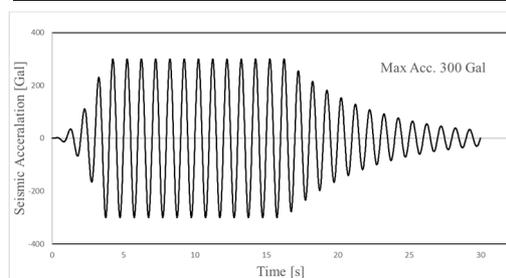


図-13 模擬地震波形（1Hz）

て生じる破壊形態を得ている。また、複数の地震波形による検討からスペクトルの大きい周波数が破壊形態に対して支配的になる可能性が示唆される結果を得ている。しかし、解析に用いた盛土は同一の法面勾配であるため、一般的な結論を導くには不十分である。そこで盛土の法面勾配による破壊形態の違いを明らかにするために、数値解析を用いた法面勾配に係るパラメータスタディを実施し、どの法面勾配に対してどのような破壊が生じるかを検討した。盛土材は青粘土に対して含水比 18%、締固め度 90% で実施した一軸圧縮試験の結果を用いる。密度 1.761 kg/m³、ヤング率 8.5 MPa、破壊時の破壊靱性値 $K_{IIc}=6.204 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ であり、ポアソン比は 1/4 とした。また、図-12 に解析モデルの概要図を示す。高さ 5m、下幅 20m、奥行 20m、上底を変えて法面勾配を変化させた 6 つのモ

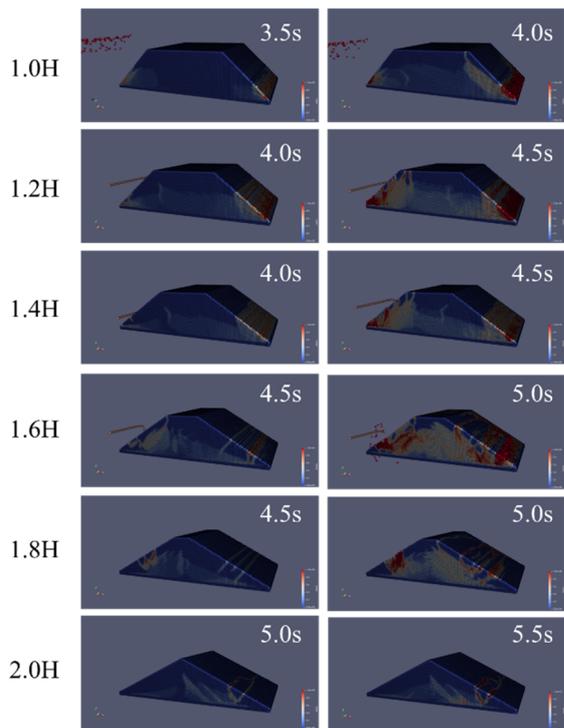


図-14 1Hz の亀裂進展状況

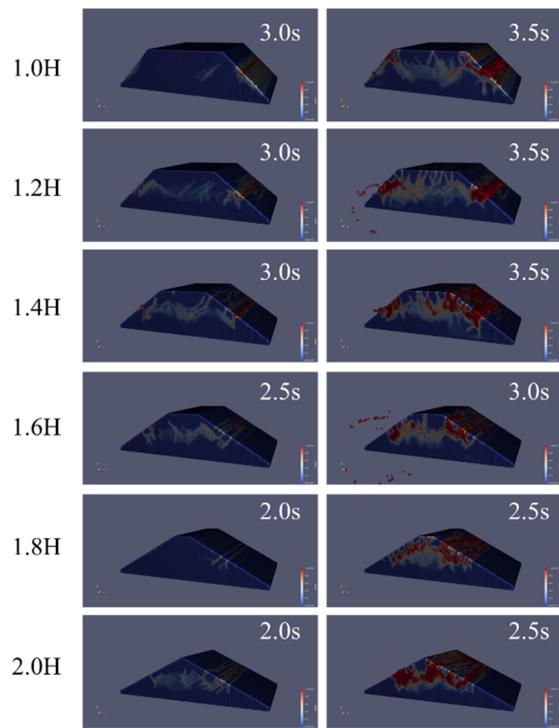


図-16 3Hz の亀裂進展状況

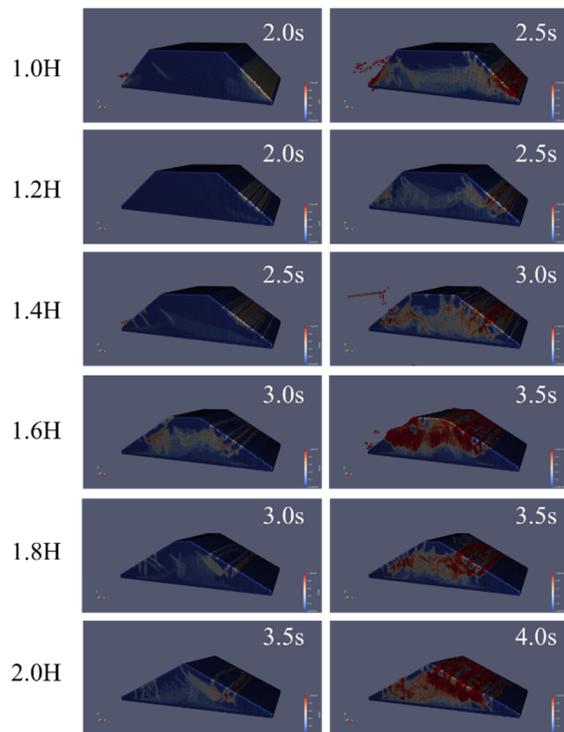


図-15 2Hz の亀裂進展状況

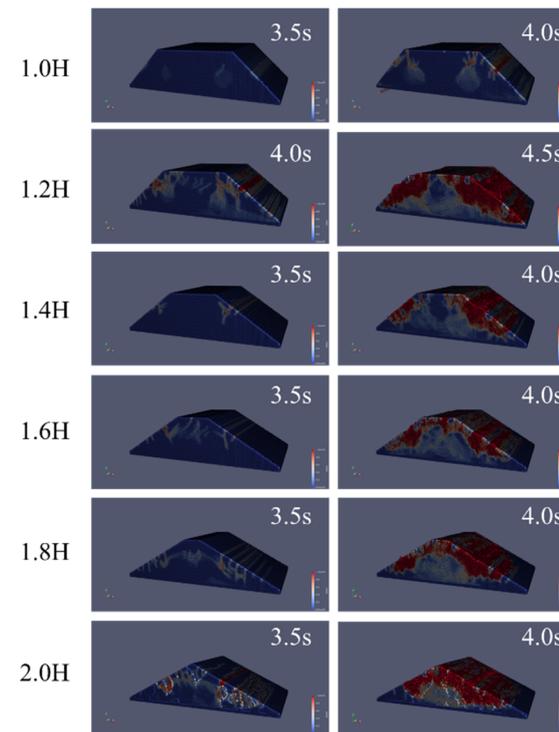


図-17 4Hz の亀裂進展状況

デルを用いる。解析に用いた法面勾配，粒子数を表-2 に示す。表-1 の法面勾配は 1:1.0 から 1:2.0 まで 0.2 ずつ 6 ケースを設定した。最大傾斜は 45° ，最も緩い傾斜は 26.6° 程度である。粒子間隔はすべて 0.1m である。ま

た，図-12 のモデルに対して，奥行き方向の変位が発生しないようにモデルの前後に鉛直方向のみ変形可能な壁を設置した。また，解析モデルの底面には粒子が落下しないように床を設置し，変位を固定して解析を行った。

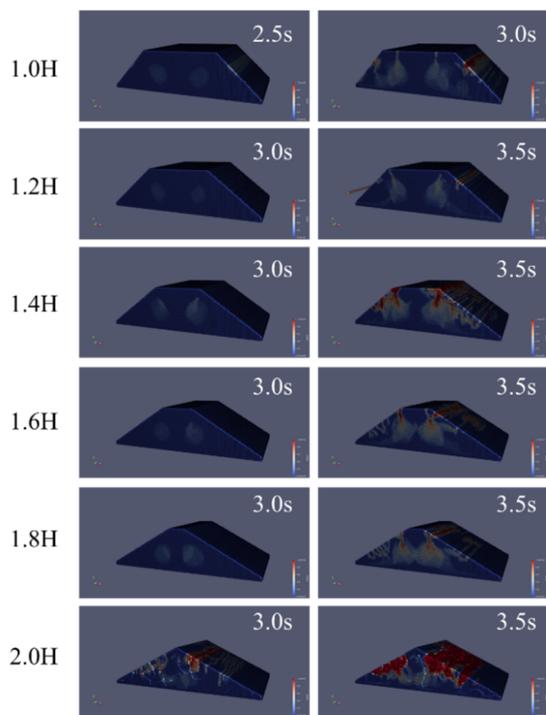


図-18 5Hz の亀裂進展状況

解析に用いた模擬地震波形 (300 Gal = cm/s², 1Hz から 5Hz) のうち 1Hz のものを図-13 に示す。模擬地震波形は振幅包絡線と正弦波をかけたものであり、包絡線パラメータは等価震源距離 10 km, マグニチュード 7 である。解析手順として、まず、自重解析を実施する。重力加速度による振動が収束するまで解析を継続し、その後、モデル底面から地震波を入力して亀裂進展解析を行う。解析時間間隔 Δt は自重解析時では 10^{-3} s とし、地震応答解析時では 10^{-4} s とした。図-14 から図-18 に 1Hz から 5Hz の範囲で実施した模擬地震波を使用した解析における亀裂進展結果を示す。図中それぞれ左側が亀裂進展開始後、明確に亀裂が確認できる時間の解析結果であり、右側がその 0.5 秒後である。以後、説明のために「損傷領域」、「亀裂」、「すべり」という表現を用いる。損傷領域はダメージが 1 に満たない領域を示し、亀裂は損傷領域が線状に連なっている場合やダメージが 1 となり亀裂と考えられる場合とする。また、すべりとは亀裂が連なって円弧状あるいは曲線状にある

場合とする。図-14 の緩勾配である 1.6H から 2.0H をみると、法面のほぼ中央から亀裂が形成される。一方、1.0H から 1.4H の急勾配をみると法先付近に損傷領域が生じている。0.5 秒後の結果を見ると、1.8H や 2.0H では法面に生じた亀裂が進行している様子が見取れる。それ以上の勾配ではすべりが生じている。図-15 の 2Hz においても、1.6H から 2.0H の緩勾配では法面のほぼ中央から上部にかけて亀裂が生じ、これが進行してすべりに至るケースが見受けられる。図-16 の緩勾配である 1.8H では法面の上部から亀裂を生じるが、1.2H の急勾配では中央部分に損傷領域が生じ、これが発達した。また、勾配に関係なく断面上部に損傷領域が発生しており、これが発達して全体的に崩壊に至っている。図-17 の 4Hz では勾配に関わらず、中央から上部にかけて亀裂が生じた。なお、1.0H では断面上部に 2 つの損傷領域が見られた。この損傷領域は 5Hz に多くみられる。図-18 の 5Hz では図左では勾配に関係なく断面中央に損傷領域が発生し、0.5 秒後には天端付近からこの損傷領域に接続する亀裂が確認された。別途実施した FEM による地震応答解析結果から、5Hz の場合にはこの損傷領域で高いひずみが生じていることが分かっている。一方で 1Hz では法尻でのひずみが卓越する。したがって、地震動の周波数によるひずみの違いがこの領域を損傷させたといえる。その他、解像度による破壊形態の違い[6]や詳細については別報[11]にて報告する。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本研究にて、課題 1, 課題 2, 課題 3 を実施した。

課題 1 は最終的に出力なしでの高速化率は 8GPU を使用したとき、6.3 倍であった。当初は FEM との連携する方針であったが、FEM との連携は接続領域での不整合や精度の Verification がさらに必要なことから、3 次元

大規模解析への転用はできていない。そこでマルチ GPU での検討を主とすることになった。その結果、途中経過では理想倍率の 35% であったものが 8 コアで 6.3 倍となり、理想倍率に対して 78% に達したことから、理想倍率を 100% の達成とすると 78% の結果といえる。したがって、課題 1 は 78% の達成率と判断する。

課題 2 に対しては 1000 万粒子を達成目標としており、1GPU にてメモリ量がこの値を達成でき、さらにマルチ GPU によるメモリ分散が可能となったために、達成率は 100% といえる。

課題 3 については実地形形状の高解像度解析を実施した。ただし、前章にて述べたように力学的な課題が見られる結果となっている。また、形状効果による破壊過程の違いの検証および解像度の違いによる検証を行っている。加えて解析手法の Validation も実施している。当初予定に比しても解析数および成果は十分に得られたと考える。ただし、実地形形状の破壊形態に係る再現精度を勘案し、達成率は 80% と判断する。

今後の展望として、これまでは簡易な材料モデルや構造格子粒子による解析であるため、地盤らしい材料特性や微細地形形状が破壊形態に与える影響は明らかにできていない。この関係性を明らかにするためには非構造格子粒子への対応と弾塑性モデル（土のねばりを表す非線形材料モデル）を用いた広域高解像度な計算を実施する必要がある。そこで、2025 年度共同研究ではこれらに対応する解析コード開発すると共に非線形計算アルゴリズムの最適化、非構造格子の検証やマルチ GPU 計算の最適化を行う。開発したコードを用いて広域かつ微細地形も高解像度に表現可能なコードにて地震応答亀裂進展解析を実施する。