

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：18001

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760428

研究課題名(和文) 琉球石灰岩地盤のための高性能破壊力学シミュレータの開発～弾性から破壊まで～

研究課題名(英文) Development of high accurate fracture mechanics simulator for Ryukyu limestone

研究代表者

松原 仁 (MATSUBARA, Hitoshi)

琉球大学・工学部・助教

研究者番号：50414537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、琉球石灰岩の破壊力学的挙動の解明に資する、高性能破壊力学シミュレータを開発することを目的として、(1)実験的アプローチによる琉球石灰岩における材料学的パラメータの獲得、(2)琉球石灰岩中の微細粒子構造が考慮可能なシミュレーション手法の開発、(3)上記(1)、(2)をベースとした破壊力学シミュレータの開発、を実施した。

本研究の結果として、琉球石灰岩の破壊現象の解明に資する、ひとつの道具(破壊パラメータ取得に関する基礎実験データ、シミュレーション手法、解析結果等)を提供することができた。これらの成果は、国内外の雑誌・ジャーナルや国内・国際会議において発表することができた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is the development of high accurate fracture mechanics simulator for Ryukyu limestone under some complex external mechanical impacts. The development item or acquisition were as follows: (1) Obtained some material/mechanical parameters of Ryukyu limestone by some experimental approaches. (2) C-MultiMLS method (Multi-dimensional Moving Least Squares Method with Constraint condition) was applied to fracture mechanics, and a simulator with some mesoscopic-structures taken into consideration was developed. (3) Based on (1), the simulator of (2) was applied to an actual natural disaster problem.

Some domestic/international journal papers or conference proceedings were accepted in this study. This is one of the achievements of this study.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：琉球石灰岩 き裂ネットワークモデル 有限要素法 地すべり

1. 研究開始当初の背景

琉球列島は、亜熱帯海洋性気候の環境下であり、島弧をつくる島嶼の周辺には美しいサンゴ礁がひろがっている。琉球列島の地質もサンゴ礁の影響を強く受けており、サンゴ礁堆積物で構成された島が非常に多い。これらは現在の島嶼をとりまく「生きたサンゴ礁」ではなく、島そのものをつくる「過去のサンゴ礁堆積物」のことである。特に、第四期更新世に堆積したサンゴ礁堆積物は「琉球石灰岩」と呼ばれ、沖縄県における土地の30%に分布している。

琉球石灰岩には、大小様々な孔やき裂の分布が見られ、岩石自体の強度は、未固結部や微細なき裂、数mmの小さな孔から数十mにも至る巨大な空洞が多数存在していることに起因して、極めてばらつく特徴を有している。したがって、岩盤の破壊力学特性については、岩盤の含水状態、孔の大きさや形状等、不確定な要素が多いことから、未解明な部分が多く、岩盤工学分野においても活発な研究が行われている現状があった。しかしながら、その一方で、琉球石灰岩岩盤の崩落事故が頻繁に起こっているのも事実であった。

一方、琉球列島はユーラシアプレートとフィリピン海プレートとの境界のほぼ真上に位置していることに加え、北西側には沖縄舟状海盆(沖縄トラフ)が走っており、マグニチュード9以上の超巨大地震発生の可能性が懸念されている。これを裏付けるかのように、沖縄県においては、2010年2月、実に99年ぶりの観測となるマグニチュード7.2(気象庁)の大きな地震が発生している。ところが、琉球石灰岩等の多孔質岩盤における基礎の支持力安定性問題に関する研究事例はあるものの、岩石の地震動時における破壊挙動や振動耐力を扱った研究事例は極めて少なく、そのために本問題に対する基本的な知見の蓄積が欠如しているのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自然状態にある琉球石灰岩岩盤が地震外力のような力学的な外乱を受けた場合において、その破壊力学的挙動の解明に資する、高性能破壊力学シミュレータを開発することである。具体的には以下を目的とした。

- (1) 報告者が提案している高性能数値計算手法、「付帯条件付多次元移動最小自乗法」を破壊力学問題へ展開し、琉球石灰岩中の微細粒子構造が考慮可能なシミュレーション手法を開発する。
- (2) 琉球石灰岩の含水状態における強度特性について、コアリング試験体を利用して、乾燥強度と湿潤強度を実験にて測定し、琉球石灰岩の材料学的パラメータを獲得する。
- (3) 上記(2)で得られた力学パラメータを上記(1)のシミュレータに導入し、岩盤の破壊力学挙動について検討する。特に、過去に発生した災害の実測データを利用することで、本手法の妥当性を検討する。

そして、最終的には、琉球諸島地域における岩盤災害を予測するツールのひとつとして、地域に貢献できる技術を提供することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、(1)実験的なアプローチと(2)計算力学的なアプローチを併用した形で研究を進めた。以下に具体的な方法を記す。

(1) 実験的なアプローチ

沖縄島全域に渡って、第4紀琉球石灰岩および古生代石灰岩を採取し、それぞれの乾燥密度、一軸圧縮強さ、静弾性係数、ポアソン比等の基本的な材料物性を室内実験より獲得する。

(2) 計算力学的アプローチ

岩の微細構造(粒子)を考慮することができる節点ベースの離散き裂進展解析法を開発し、弾性領域から破壊領域に至るまでを高精度に解析できる数値解析ツールを開発する。岩の微細き裂状態、地下水の流れをモデル化し、解析できる数値解析ツールを開発する。

琉球諸島において、過去に発生した災害の実測データを利用することで、本シミュレータの妥当性を検討する。

なお、本研究で得られた成果は、計算力学や岩盤工学などに関する学術誌や国内外の学術会議にて積極的に公表することとした。

4. 研究成果

(1) 琉球石灰岩の乾燥・湿潤時における一軸圧縮強さの取得

本研究では、沖縄島の琉球石灰岩の乾燥・湿潤時における一軸圧縮強さを実験的に求めることを行った。図1(a)には乾燥時における、図1(b)には湿潤時における一軸圧縮強さ実験の様子を示した。なお、供試体のサイズは50×100mmとし、5つのサイトから採取した琉球石灰岩を用いた。

図2に各サイトから採取した琉球石灰岩の一軸圧縮強さ(乾燥/湿潤)を示す。同図より、サイトの違いによって強度にかなりのばらつきがあることが分かる。特に、サイトAとサイトBは古生代の石灰岩であるが、かなりのばらつきを確認することができる。また、乾燥状態と湿潤状態と比較すると、全てのサイトにおいて乾燥強度が湿潤強度よりも上回っていることがわかる。これ



(a) 乾燥時の様子

(b) 湿潤時の様子

図1 一軸強さ実験の様子

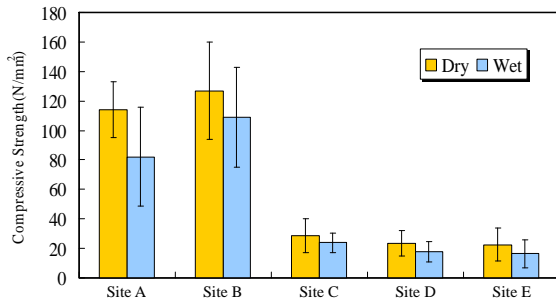


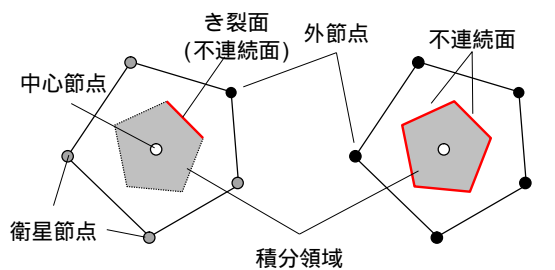
図2 各 Site における一軸圧縮強度

は、石灰岩中の微細ひび割れ形成時の表面エネルギーが液体の浸漬によって低下し、結果として巨視的な圧縮強度が低下したと考えられた。なお、本実験によって、琉球石灰岩の変形係数やポアソン比などの基礎的なデータをも獲得することができた。

(2) 岩盤の微細な粒状構造を考慮できる高性能破壊力学シミュレータの開発[江戸・松原・原, 2013]

本研究では、砕屑性の堆積岩を対象に、粒子を多角形で近似し、岩石自体のき裂は各粒子の界面にて発生することを仮定とした節点ベースの離散き裂進展解析法を提案した。具体的には、弾性問題において高精度な解を得ることのできる Enriched Free Mesh Method (EFMM) と、任意の位置で高精度な関数を与えられる付帯条件付き多次元移動最小自乗法 (C-MultiMLS 法: Multi-dimensional Moving Least Squares Method with Constraint condition) を併用することで、固体の弾性状態から破壊に至る過程をロバストに解析できる新たな数値解析手法を提案した。

本手法では、図 3 に示しているように、き裂は EFMM の中心節点の周りにある積分領域の境界線にて表現する。そして、き裂が生じた後は、中心節点周りに多次元型移動最小自乗法を適用することで、き裂を考慮した剛性を作製することが可能となるのである。EFMM は弾性領域において、極めて高い精度を算出する手法であり、多次元型移動最小自乗法はき裂を含むような複雑領域に対してもロバストな剛性を作製することができることから、本提案手法によって弾性から破壊までを精度よく解析することが可能となる。



(a) き裂面が1つの場 (b) 周面が全てき裂面の

図3 き裂進展前後の中心節点と衛星節点

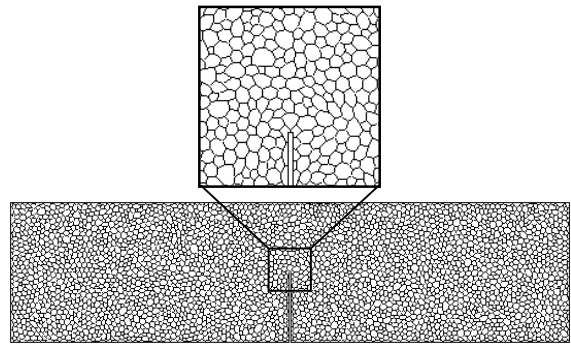


図4 3点曲げ試験の解析モデル

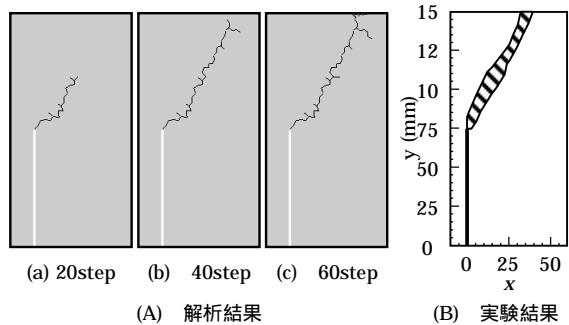


図5 切り欠部のき裂進展の様子

図 4 に中央切欠きを有する梁 (スパン長: 600mm, 梁せい: 150mm, 梁の厚さ: 50mm) の 3 点曲げ問題モデル, 図 5 に解析によって得られたき裂進展の様子を示した。図 5 より、梁中央の切欠き先端にき裂発生し、外力作用点方向に進展している様子が分かり、実験値とも良好な一致が見られる。したがって、本手法はき裂進展挙動を再現できる手法であることが分かる。

(3) 亀裂性岩盤の狭小領域を考慮した広大領域における物質移動シミュレータの開発[川瀬・江戸・松原, 2013]

本研究では、ボーリングコアの観察や露頭調査等から得られるデータを基に、狭小領域における浸透流解析の結果を考慮した広大領域の浸透流解析ができるシミュレータを開発した。具体的には、狭小領域において、図 6 に示すようなき裂ネットワークモデルと浸透理論を併用することで、狭小領域における水理学的特性を把握した。そして、狭小領域の水理学的特性を空間的に分布させることで、岩盤の不均質性を考慮した広大領域の浸透流解析を行い、狭小領域における水理学的特性の空間分布が、有限要素法にて定義される広大領域の水理学的特性に及ぼす影響を評価できる数値解析ツールを開発した。

図 7 に本手法によって得られた岩盤内部の流速分布を示す。同図(a)に示すように、領域内部に流速が卓越している箇所が線状に分布している様子を確認することができる。また、同図(b)においても、流速が一部卓越している箇所が見られる。このような局所的に卓越した流速は、実岩盤において浸透流が集中する箇所、すなわち、みずみちとなり得る箇所であることが考えられた。

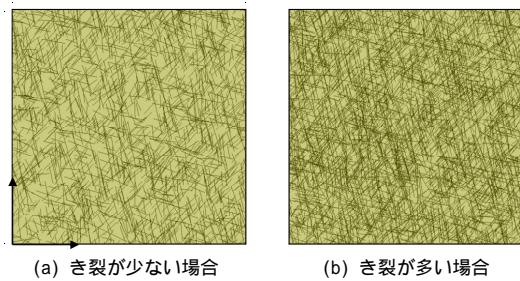


図6 き裂ネットワークモデルの例

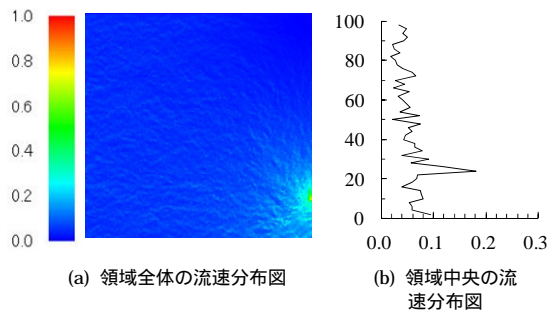


図7 提案手法によって得られた領域の流速分布

以上のように、本研究では、岩盤内部における潜在き裂の観測データに基づいた狭小領域モデルを拡大領域に展開可能な手法を開発し、岩盤内部における浸透流解析を実施することができた。

(4) Material Point Method による実岩盤崩落現象の再現

本研究では、2006年6月10日に沖縄県中頭郡北中城村で発生した大規模な地すべりに Material Point Method (MPM) を適用した。本地すべりは、移動層の斜面長が 237m、最大鉛直深度が 15.8m と大規模な斜面崩壊であり、沖縄県においては大規模かつ特異的な斜面崩壊現象であった。また、基盤部には断層が走っており、上部と下部の2つのすべり面を有しているという地質学的特徴を有している。

図8に内部摩擦角が12度と25度の場合における地すべりシミュレーションの結果を示す。内部摩擦角が12度の場合には大規模な地すべり崩壊が発生した。一方、内部摩擦角が25度の場合には地すべりは発生しなかった。これは、実環境においても同様な傾向が報告されており、本結果が妥当であることが分かる。

図9には、時間と地すべり塊の先端が移動した距離(Runout Distance: RD)との関係を示した。現地における実測のRD値は110mとの報告がなされており、渡嘉敷らの結果よりも早い段階で地すべり挙動が安定しているという違いは見られるものの、定性的には、高い精度を有していることが分かる。

このことから、本研究では実際の岩盤崩壊挙動の再現シミュレーションにおいても良好な結果を得ることができたと考えられる。

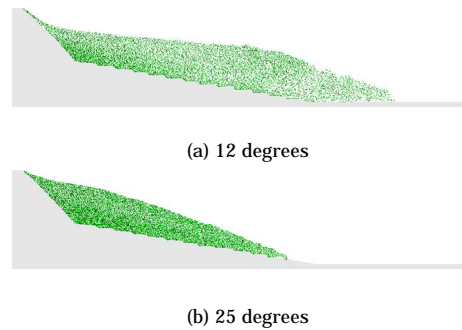


図8 内部摩擦角の違いによる崩壊挙動の変化

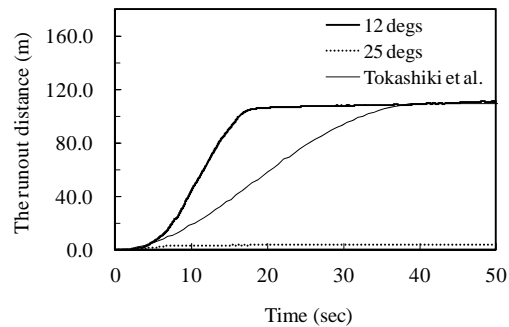


図9 RDの実測値、渡嘉敷らの計算結果との比較

上記(1)から(4)に示した結果より、本研究では、琉球石灰岩の破壊現象の解明に資する、破壊パラメータ取得に関する基礎実験データと、ひとつの道具(シミュレーション手法、解析結果など)を提供することができたと考えている。なお、これらの成果は、国内外の学術誌や国内・国際会議において発表されている(一部、投稿中の論文有り)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, き裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した拡大領域における物質移動シミュレーション, 土木学会論文集 C(地圏工学), 査読有, Vol. 69, No.3, 2013, 367-377

DOI: 10.2208/jscejge.69.367

江戸孝昭, 松原仁, 原久夫: 粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価, 土木学会論文集 C(地圏工学), 査読有, Vol.69, No.1, 2013, 31-45

DOI: 10.2208/jscejge.69.31

Kohei Sakihara, Hitoshi Matsubara, Taka-aki Edo and Genki Yagawa, Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems, Engineering Structures, 査読有, Vol. 47, 2013, 45-53

DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.010

Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao

Hara, Kita-Uebaru Landslide Analysis by using Material Point Method (MPM), Proceedings of the 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, 査読有, 2013, 127-130

ISBN: 978-4-904777-17-6

Hitoshi Matsubara, Takaaki Edo and Hisao Hara, Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM, Proceedings of the 4th international conference on computational methods, 査読有, 2012

松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, 岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析, 日本計算工学論文集, 査読有, 2012, No.20120017

JOI: jscs/2012.20120017

松原仁, 原久夫, 風化サンゴ骨格の破壊強度とその性状: 微細孔と孔内液圧の影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), 査読有, Vol. 68, No. 4, 2012, 610-620

DOI: 10.2208/jscejge.68.610

[学会発表](計10件)

Hitoshi Matsubara, Numerical Study on the Forming Mechanism of Honeycomb weathering of Rock, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), Singapore, December 2013.

Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, High-accuracy Material Point Method based on the Moving Least Squares Method, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), Singapore, December 2013.

江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, Material Point Method (MPM)におけるエネルギー変動問題とその抑制法, 土木学会第68回年次学術講演概要集, 233-234, 千葉, 2013.9.

広瀬孝三郎, 松原仁, 島尻粘土における乾燥き裂パターンに関する実験研究, 土木学会第68回年次学術講演概要集, 463-464, 千葉, 2013.9.

Hitoshi Matsubara, Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM (Invited), KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, 227-231, Kanazawa, September 2012.

Hitoshi Matsubara, Taka-aki Edo, Ryuji Shioya and Genki Yagawa, Large-scale simulation for fracture pattern of brittle porous media in Compression, Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), San Paulo, July 2012.

Kohei Sakihara, Hitoshi Matsubara, Ryuji Shioya and Genki Yagawa, An application of Multi-dimensional moving least squares method to 3D crack analysis, Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), San Paulo, July 2012.

広瀬孝三郎, 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, き裂ネットワークモデルを用いたき裂性岩盤における物質移動シミュレーション, 土木学会第67回年次学術講演概要集, 353-354, 名古屋, 2012.9.

江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, 脆性材料のき裂進展シミュレーション: 先在き裂と破壊プロセスの関連性, 土木学会第67回年次学術講演概要集, 339-340, 名古屋, 2012.9.

江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, 脆性材料における高精度離散き裂進展シミュレータの開発, 平成23年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 525-526, 福岡, 2012.3.

[図書](計2件)

Kenichi Sato, Hiroki Hiyama, Kiyoshi Omine, Yasuhiro Hayashi and Hitoshi Matsubara, Proceedings of the International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, Bunshin Printing, 2013.

ISBN: 978-4-904777-17-6

松原仁他(分担執筆), やわらかい南の学と思想 琉球大学への知の誘い 第5巻(知の源泉), 分担執筆, 沖縄タイムス社, 2013, 362-373

ISBN: 978-4-87127-208-7

6. 研究組織

研究代表者

松原 仁 (MATSUBARA, Hitoshi)

琉球大学・工学部・助教

研究者番号: 50414537