

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289143

研究課題名(和文) 慣性力を考慮した弾塑性有限変形解析による断層生成・地震動発生シミュレーション

研究課題名(英文) Numerical simulation on formation of faults in ground and their induced irregular waves by elasto-plastic finite deformation analysis with inertial force

研究代表者

山田 正太郎 (Yamada, Shotaro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70346815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：慣性力を考慮した水～土連成有限変形解析コードを用いて、断層破壊をひずみの局所化を伴う進行性破壊現象として模擬した。初期に不均質性を与えた地盤では、地盤内に不規則な加速度応答が生じることを示した。また、横ずれ断層に伴い発生する表層地盤のリーデルせん断帯のシミュレーションに成功した。さらに、基盤の断層破壊や液状化を含む表層地盤の非線形加速度応答の表現能力を高めるために、新たな弾塑性構成式を提案した。

研究成果の概要(英文)：Faults were simulated as progressive failure phenomenon with strain localization by using a soil-water coupled finite deformation code with inertial force. In the cases with heterogeneity in ground, irregular acceleration responses were generated. Also, simulation of Riedel shear bands, which appears in subsurface ground accordance with strike-slip fault, were successfully simulated. Moreover, a new elasto-plastic constitutive model was proposed in order to enhance reproduction ability of fault of bedrock and non-linear acceleration response of subsurface ground.

研究分野：地盤工学

キーワード：断層 ひずみの局所化 進行性破壊 不規則波 弾塑性 有限変形 非線形

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災で多くの人命を奪った津波が巨大化した一因に海底活断層の存在があると言われていた。また 3.11 以降、原発の再稼働問題において、断層の存在が大きな注目を集めている。2016 年 4 月に熊本で活断層に起因する巨大な地震が発生したことにより、その注目度はさらに高まっている。

学術的に見ると、断層を対象とした研究は、予め断層の存在を与え、それが滑るか否かを判定するような摩擦問題としての取り扱いがほとんどである。我々の研究グループでは、以前より地盤の破壊問題をひずみの局所化現象として扱っており、このような方法で、断層の問題を扱うことに着目した。初めから破壊の形態を規定しないという点で前者の取り扱いと異なる。また、慣性力を考慮した解析手法を用いることで、支持力問題において、破壊時に地盤が加速度を応答を示すことに着目し、断層破壊により地震動に相当するような不規則な加速度運動を地盤内に発生させること、さらには、断層破壊により発生した地震動が表層地盤にどのような非線形応答を示すかシミュレーションすることを視野に研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、以下に示す項目を目的とした。

- (1) 岩盤もしくはプレートを模擬した弾塑性地盤に変形の局所化を伴う破壊現象を生じさせること、さらには、断層生成に伴い発生する振動を計算機の中に生じさせること。
- (2) 地盤を構成する各種要因が、断層破壊や発生する運動について調べること。
- (3) 岩盤の断層破壊に起因して生じる表層地盤の非線形応答をシミュレーションすること。
- (4) 岩盤の断層破壊や液状化を含む表層地盤の非線形応答を精緻にシミュレーションし得るように、構成式を高度化すること。

3. 研究の方法

- (1) 断層破壊および断層破壊に伴う不規則波の発生を模擬するために、我々の研究グループで開発した慣性力を考慮した水～土骨格連成有限変形解析コードを用いた。表層地盤の非線形応答のシミュレーションにあたっては同コードを用いて実施した。
- (2) 構成式の高度化にあたっては、地盤の材料特性を把握するための要素試験が重要となる。要素試験装置として、三軸試験装置、高圧三軸試験装置、中空ねじり試験装置に改良を加え、種々の地盤材料の力学特性を調べた。また、一様な変形場上で、高度化した構成式の性能を確認すべく、要素試験結果のシミュレーションを実施した。

4. 研究成果

(1) 断層破壊およびそれに伴う不規則波の生成シミュレーション

慣性力を考慮した水～土連成弾塑性有限変形解析コード GEOASIA を用いて、地盤の正断層および逆断層的破壊とそれに伴い発生する不規則波の生成シミュレーションを実施した。岩盤のように脆性を有する地盤に対し、僅かな材料的不均質性を持たせた上で、解析断面側面から水平に強制変位を与えたところ、ひずみの局所化を伴う進行性破壊現象として正断層もしくは逆断層的破壊が発生した(図 1)。この破壊は加速度的に進行し、それに伴って地盤内に振動が発生した(図 2)。この際、非破壊領域に蓄えられた弾性エネルギーが一気に解放されることを確認した。また、地盤に不均質性を与えたことに起因して、発生した振動は自然の地震波にも似た不規則性を有していた。さらに、破壊後も地盤に変位を与え続けると、ある程度周期的に破壊が繰り返されることを示した。

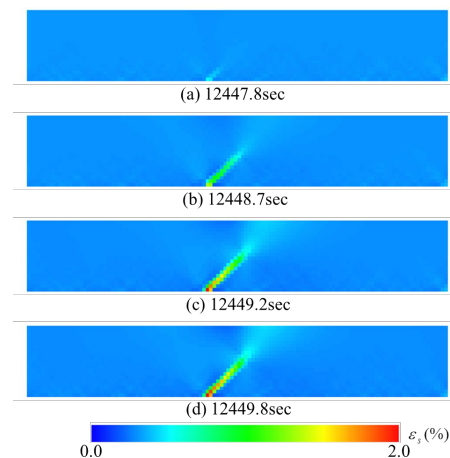


図 1 逆断層破壊の生成シミュレーション (せん断ひずみ分布：破壊部にフォーカス)

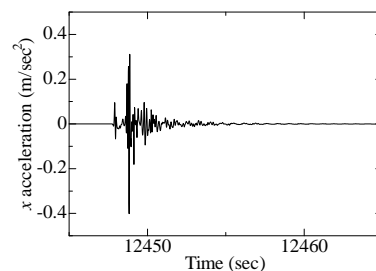


図 2 破壊に伴い生成された不規則波

(2) 地盤の各種要因が断層破壊および生成される不規則波に与える影響の把握

上記の断層破壊のシミュレーション解析の研究成果を基盤に、材料特性や不均質性の与え方、スケールの違いなどの諸要因が、逆断層的破壊が生じた際に発生する振動にどのような影響を与えるのか詳細に調べた。材料特性が与える影響について調べるために、破壊時の応力降下量を変化させたところ、応

力降下量が大きいほど、発生する加速度は大きく、破壊に伴う地盤振動は短周期化した。地盤が有する不均質性については、ばらつきが大きいほど、発生する加速度は小さくなったが、卓越振動数には明確な影響が現れなかった。断層破壊する地盤の下方に仮定する半無限弾性地盤の剛性の影響について調べるために、粘性境界のせん断波速度を変化させたところ、発生する加速度は小さくなったが、卓越振動数には明確な影響が現れなかった。前年度の研究では、破壊に伴い発生する地盤振動が非破壊部に蓄えられた弾性エネルギーの開放にあることを示した。非破壊部に蓄えられる弾性エネルギーを変化させることを目的に、解析領域の横幅を変化させてその影響について調べた。結果は、横幅を大きくすると破壊後の荷重低下量は小さくなったが、発生する加速度と加速度フーリエスペクトルには大きな変化が見られなかった。また、海底地盤など巨大な地盤を視野に解析を行った結果、スケールが大きいほど、発生する加速度は大きく破壊に伴う振動時間が長くなることが分かった。また、スケールの拡大に伴って、破壊に伴う地盤振動は長周期化した。

(3) 岩盤の断層破壊に起因して生じる表層地盤の非線形応答のシミュレーション

横ずれ断層の活動時は、断層上部の地盤内部で深部から地表に向かって枝分れしたフラワー構造や地表面でリーデルせん断帯などが付随発生することが知られている。澤田・上田らが実施した大変形解析にならひ、速度型運動方程式を忠実に時間積分して土の運動を求める弾塑性有限変形解析コード GEOASIA を用いて、横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生過程の再現を試みた。この結果、リーデルせん断帯が地表面の隆起を伴って生成すること(図3)、またこの生成には地盤に与える材料的な初期不整の影響が大きいことが明らかになった。また、地盤の模型寸法が大きくなるほど、より大きな拘束圧により正規圧密状態となって正のダイレイタンシーの効果が薄れ、せん断帯が出現しにくくなることがわかった。

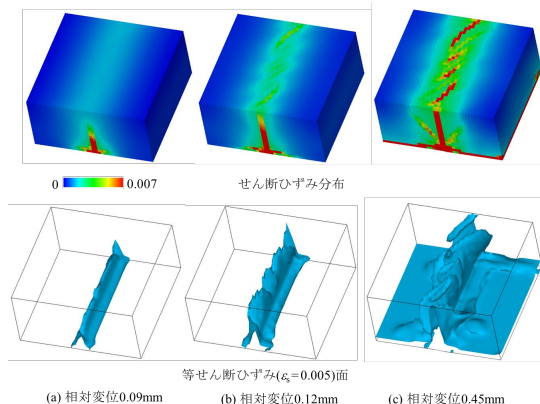


図3 リーデルせん断帯のシミュレーション

断層破壊がもたらす表層地盤の代表的な非線形応答として液状化現象を挙げ、(4)で述べる高度化された複合負荷弾塑性構成式を GEOASIA に搭載し、シミュレーションを行った。その結果、粘土地盤内で生じる加速度の増幅現象や砂質土が液状化したことで生じる加速度の非伝播現象、さらにはサイクリックモビリティが生じることで起きるとされるスパイク現象などの表現に成功した(図4)。

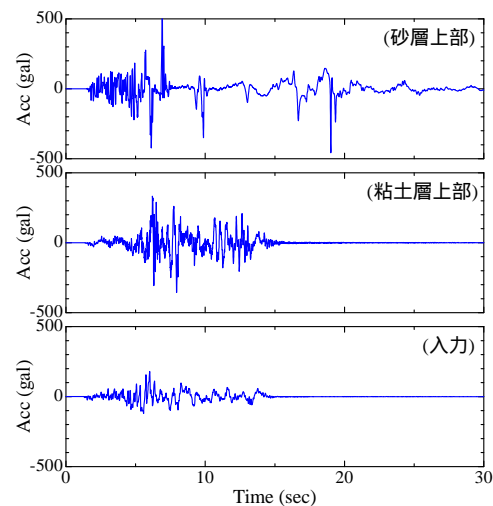


図4 液状化を受けた地盤の加速度応答のシミュレーション

(4) 岩盤の断層破壊や液状化を含む表層地盤の非線形応答を精緻にシミュレーションするための構成式を高度化

二つの観点から構成式の高度化を行った。一つは、岩盤の脆性的な挙動を模擬するためにセメント固化処理度を対象に実験を行った。セメンテーション効果を骨格構造概念に基づく弾塑性構成式 SYS Cam-clay model に取り入れるための手法を新たに提案した。拡張のポイントは、(1)各負荷面の平行移動、(2)塑性変形に伴う平行移動の解消、(3)修正応力の適用である。提案する構成式により、セメント改良土の要素試験結果のシミュレーションを実施し、拡張されたモデルが高い再現能力を有していることを示した。

もう一つの高度化は、サイクリックモビリティに代表される繰返し負荷を受けた際の土の弾塑性挙動を精緻に表現するための方法として、SYS Cam-clay model と非関連 DP model が同時に負荷状態を示し得る複合負荷弾塑性構成式を提案した。主に砂質土を対象に複雑な応力履歴を与えた実験を実施し、それを再現することで、その性能の高さを示した(図5)。

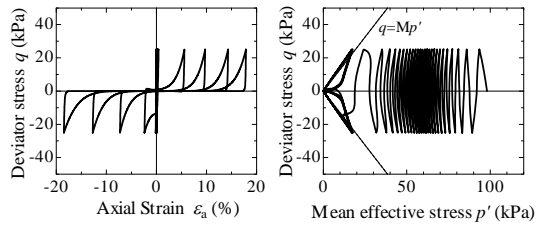


図5 複合負荷弾塑性構成式による液状化学挙動のシミュレーション

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

野田利弘, 山田正太郎, 豊田智大, 浅岡 颯 (2015): 横ずれ断層に伴う表層地盤のリーデルせん断帯の形成に及ぼす材料的初期不整の影響, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 71, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 18), I_463-I_474. (査読有)

山田正太郎, 野田利弘, 浅岡 颯 (2015): 慣性力を考慮した弾塑性有限変形解析による正断層・逆断層の破壊とそれにもなる波動生成シミュレーション, 断層変位評価に関するシンポジウム論文集, pp. 45-50. (査読無)

野田利弘, 山田正太郎, 豊田智大, 浅岡 颯 (2015): 横ずれ断層活動時におけるフラワー構造を伴うリーデルせん断帯発生の数値解析, 断層変位評価に関するシンポジウム論文集, pp. 39-44. (査読無)

野田利弘, 中野正樹, 山田正太郎, 中井健太郎, 高稲敏浩, 浅岡 颯: 地盤解析コード GEOASIA を用いた地盤・土構造物の地震応答解析, 地盤工学会誌, Vol. 63, No. 10, pp. 16-19. (査読無)

[学会発表](計 15 件)

Asaoka, A., Sawada, Y. and Yamada, S.: Riedel shear band formation with flower structures that develop at the surface ground on a strike slip fault, Proc. of 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 2, No. 20, pp. 751-754, Fukuoka International Congress Center, Dec, 9-13, 2015.

Yamada, S., and Noda, T.: Proposal of a new double hardening elasto-plastic constitutive model of soil skeleton based on integration of associated and non-associated flow rules, Proc. of 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 2, No. 10, pp. 430-434, Fukuoka

International Congress Center, Dec, 9-13, 2015.

野田利弘, 山田正太郎, 豊田智大, 浅岡 颯: 横ずれ断層に伴う地表面のリーデルせん断帯の有限変形解析, 第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.76-83, 金沢大学, 2015 年 5 月 16-17 日.

山田正太郎, 中野正樹, 野田利弘, 酒井崇之: セメント改良土の力学挙動の再現に向けた SYS Cam-clay model の拡張, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 671-672, 北海道科学大学, 2015 年 9 月 1-4 日.

福和彩果, 中野正樹, 山田正太郎, 酒井崇之, 岡野雄馬: セメント改良した高含水比粘性土の力学挙動に関する実験的研究, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 673-674, 北海道科学大学, 2015 年 9 月 1-4 日.

岡野雄馬, 中野正樹, 野田利弘, 山田正太郎, 酒井崇之, 福和彩果: 拡張した SYS Cam-clay model によるセメント改良土の力学挙動の再現, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, 北海道科学大学, pp. 675-676, 2015 年 9 月 1-4 日.

山岡大祐, 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡 颯: 地盤の逆断層型破壊に伴う地震動的不規則波生成の有限変形シミュレーション, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1903-1904, 北海道科学大学, 2015 年 9 月 1-4 日.

豊田智大, 野田利弘, 山田正太郎, 浅岡 颯: 横ずれ断層に伴う地表面のリーデルせん断帯の発生に及ぼす材料的初期不整の影響, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 2013-2014, 北海道科学大学, 2015 年 9 月 1-4 日.

山田正太郎, 野田利弘, 浅岡 颯: 弾塑性有限変形解析による断層の破壊に伴う不規則波生成シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会概要集, S-SS25-21, 幕張メッセ, 2015 年 5 月 22-26 日.

川合裕太, 野田利弘, 山田正太郎, 浅岡 颯, 澤田義弘: 横ずれ断層に伴うフラワー構造を伴うリーデルせん断帯生成の数値シミュレーション, 第 69 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 741-742, 大阪大学, 2014 年 9 月 10-12 日.

山田正太郎, 野田利弘, 中野正樹, 中井健太郎, 浅岡 颯: 複合負荷状態を有する二重硬化弾塑性構成式の提案, 第 49 回地盤工

学研究発表会講演概要集, pp. 409-410, 北九州国際会議場, 2014年7月15-17日.

岡田麻希, 山田正太郎, 野田利弘: 二重硬化弾塑性構成式による砂の排水/非排水せん断挙動の再現, 第49回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 411-412, 北九州国際会議場, 2014年7月15-17日.

水野元陽, 山田正太郎, 野田利弘: 二重硬化弾塑性構成式による応力履歴を受けた砂のせん断挙動の再現, 第49回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 413-414, 北九州国際会議場, 2014年7月15-17日.

野田利弘, 山田正太郎, 浅岡顕, 川合裕太: 横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2014年大会概要集, SSS31-08, パシフィコ横浜, 2014年4月28日-5月2日.

Yamada, S. and Noda, T.: Simulation of Delayed Failure in Naturally Deposited Clay Ground by Soil-water Coupled Finite Deformation Analysis Taking Inertial Forces into Consideration, Proceedings of 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.841-844, Paris (France), Sep. 2-6, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 正太郎 (Yamada Shotaro)
名古屋大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号: 70346815

(2) 研究分担者

浅岡 顕 (Asaoka Akira)
公益財団法人地震予知総合研究振興会・地震防災調査研究部・副主席主任研究員
研究者番号: 50093175

(3) 連携研究者

野田 利弘 (Noda Toshihiro)
名古屋大学・減災連携研究センター・教授
研究者番号: 80262872