

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420497

研究課題名(和文) 不連続面の破壊に関する動力学的研究

研究課題名(英文) Dynamic Study on the Fracture of Planes of Weakness

研究代表者

上西 幸司 (UENISHI, Koji)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60311776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：不連続面破壊の物理過程、なかんずく動力学のプロセスの詳細に関し、理論解析、数値計算、動的破壊実験の手法を複合的に組み合わせて追究するとともに、不連続面破壊に伴い発生しうる自然災害、構造物被害の定量的評価などを試みた。縦ずれ断層面上盤側と下盤側で観測される地震動が大きく異なる物理的根拠につき応用力学的手法も組み入れて考察し、その一端を解析的かつ実験的に明らかにしたことが研究成果の一例として挙げられる。

研究成果の概要(英文)：Physical processes of fracture of planes of weakness, especially the details of their dynamics, have been studied by combining analytical and numerical methods as well as dynamic fracture experiments. Also, quantitative aspects of natural disasters and structural failures that may be induced by fracture of planes of weakness have been evaluated. By introducing also an applied mechanics-based approach, as a result, possible physical ground behind the difference between the observed dip-slip seismic motion on the hanging wall and that on the footwall has been analytically and experimentally shown.

研究分野：破壊力学

キーワード：破壊力学 地盤工学 自然災害 地震 界面不安定現象 不連続面のすべり 斜面崩壊 トンネル崩落

### 1. 研究開始当初の背景

地質学的不連続面の力学的な不安定化は、地震や斜面崩壊などの甚大な災害をもたらしている現象に直結していると考えられているが、不連続面の動力学的特性については未だ解明されていない点が多い。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、不連続面の力学的不安定化の発生機構の解明及び不連続面破壊の影響の定量的評価に関する研究代表者自らの理論・実験研究を継続して発展させ、不連続面破壊の動力学に関わる諸現象の発生メカニズムを解明するとともに、不連続面の動的破壊に伴い起こりうる構造物や都市の被災危険度を評価することを主たる目的としている。

### 3. 研究の方法

研究初年度である平成 25 年度は、非接触レーザ変位計や光弾性実験装置、高速度デジタルビデオカメラなどの実験システムと理論解析を組み合わせ、脆性固体不連続面や斜面モデルの動的破壊の解析 (図 1) を進めたほか、破壊に伴い発生する波動と周囲の固体、流体との動的干渉について理論的検討 (図 2) を行った。

研究二年度目、最終年度の平成 26、27 年度は、本プロジェクトで構築、整備した動的破壊実験装置と数値解析システムを複合的に活用しつつ、統合的な破壊実験・解析を推進し、縦ずれ断層と横ずれ断層の動力学の根本的な相違点に関する考察を深めた。特に、縦ずれ断層面上盤側と下盤側で観測される地震動が大きく異なる物理的根拠について検討し、縦ずれ断層破壊時に生じると研究代表者自らが理論的に予想していた、震源から伝播し一旦地表面近くに到達した破壊 (のパルス) が地中に向かって逆戻りする現象をはじめて実験的に示した (図 3)。

### 4. 研究成果

第一に、不連続面破壊により発生し、実体波よりも小さい距離減衰で伝わる表面波が斜面に与える影響に関して、自らの数値解析予想 (図 1(a)) を裏付ける動的弾性実験を行った (図 1(b))。例として取り上げた仙台市の斜面は昭和 53 (1978) 年宮城県沖地震、平成 23 (2011) 年東北地方太平洋沖地震の両地震により同じ場所で破壊が生じており、従来

の想定にとられないような解析や対策が必要であると考えられる。

第二に、平成 7 (1995) 年兵庫県南部地震時に報告された、「海震」(地震時の船舶等の衝撃的縦揺れ) の発生機構について、固体一流体動的相互作用モデル (図 2)、非線形波動伝播モデルを用いて理論的に考察し、「海震」が起こりうる物理的な条件を定量的に評価した。

第三に、解析上の困難から研究が進んでなかったが平成 16 (2004) 年新潟県中越地震や平成 20 (2008) 年岩手・宮城内陸地震のように深刻な震災を引き起こしうる「縦ずれ断層地震」の破壊動力学を追究し、縦ずれ断層破壊時に断層面の上下 (上盤側と下盤側) で地震動の観測結果が大きく異なる物理的理由の一端を明らかにした (図 3)。

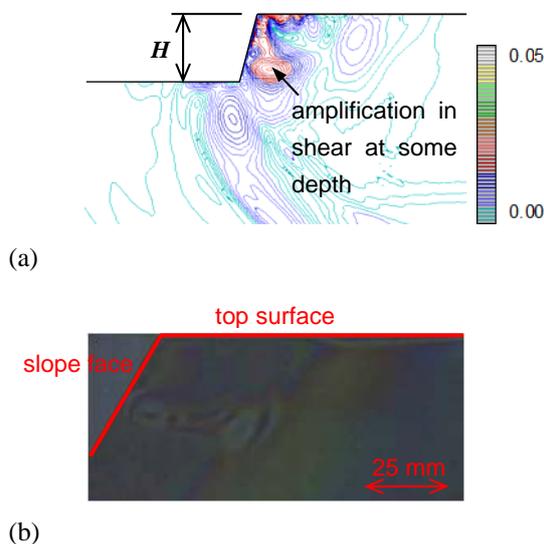


図 1 レイリー表面波と二次元斜面の動的干渉の典型的なようす (面内最大せん断応力の分布)。(a) 粒子法を用いた数値解析例 (波長が高さ  $H$  に等しく、ポアソン比が 0.25 の場合)、(b) 高速度デジタルビデオカメラおよびポリカーボネート板を用いた動的弾性実験の結果の例。

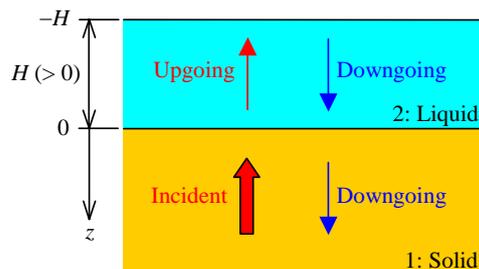


図 2 「海震」の発生機構を究明するために用いた、固体一流体動的干渉モデル。

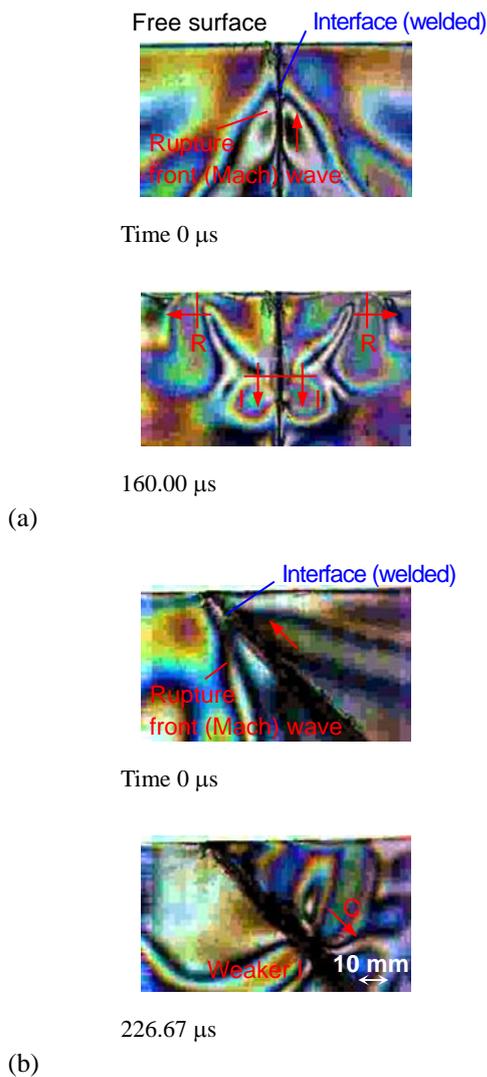


図 3 高速度デジタルビデオカメラおよびポリカーボネート板を使用した、二次元縦ずれ断層モデルの動的弾性破壊実験の結果例。(a) 傾斜角 90 度の場合。横波（せん断波）速度を超える、超せん断状態まで加速した破壊伝播に伴いマッハ波（衝撃波）が生じ、破壊が地表に到達した後は、地表面に沿って遠方へと伝わる表面波（R）と震源に向かい下方に逆戻りする界面波（I）が発生することが実験的にも示された。(b) 傾斜角 45 度の場合も同様にマッハ波（衝撃波）が生じるが、上盤側では表面波と逆戻り界面波が干渉して比較的強い（面内最大せん断応力の大きい）コーナー波（C）が生成され、構造物等にも影響を及ぼしうることがはじめて実験的にも確認された。下盤側には比較的弱い逆戻り界面波（I）のみが下方に伝わっていく。

以上に代表例を挙げた研究成果は、Seismological Society of Japan Fall Meeting（横浜・平成 25 年、新潟・平成 26 年、神戸・平成 27 年）、American Geophysical Union Fall

Meeting（米国・サンフランシスコ・平成 25 年および平成 27 年）、17th U.S. National Congress on Theoretical and Applied Mechanics（米国・East Lansing・平成 26 年）、International Society for Rock Mechanics International Symposium（札幌・平成 26 年）、43rd Symposium on Rock Mechanics（東京・平成 27 年）、European Geosciences Union General Assembly（オーストリア・ウィーン・平成 27 年）などの影響力の大きな国際会議などにおいて発表されているほか、「International Journal of Protective Structures」誌、Elsevier 社の発行する「Procedia Materials Sciences」誌、European Structural Integrity Society (ESIS) / Elsevier 社の雑誌「Engineering Failure Analysis」誌などにおいて論文が公表されている。

なお、地震に伴う「海震」の発生に関する非線形波動理論解析およびその成果に対し、平成 25 年 11 月にシンガポールで開催された International Conference on Shock and Impact Loads on Structures（構造物に作用する衝撃荷重に関する国際会議）にて「Highly Commendable Paper Award（優秀論文賞）」が与えられているのみならず、研究代表者の一連の研究成果に対して、平成 28 年 2 月に「日本学術振興会賞」が授与されている。本研究成果を基に、さらに不連続面破壊の力学、なかでも三次元空間における動力学や複雑性に関する研究を推進していく必要があると考えられる。

### 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 8 件）

[1] Uenishi, K., N. Shigeno, S. Sakaguchi, R. Yano, and K. Suzuki. (2016). Dynamic Impact-Induced Fracture Development in Ice Spheres. *Proceedings of the 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, 2 pages. (査読有、登載決定)

[2] Uenishi, K. (2015). Dynamic Dip-Slip Fault Rupture in a Layered Geological Medium: Broken Symmetry of Seismic Motion. *Engineering Failure Analysis*, **58**, pp.380-393, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.004. (査読有)

[3] Uenishi, K., T. Takahashi, and K. Fujimoto. (2015). On the Dynamics of Dip-Slip Fault Rupture Propagating at Supershear Speeds. *Proceedings of the 43rd Symposium on Rock Mechanics*, pp.48-53. (査読有)

[4] Uenishi, K., T. Takahashi, and K. Fujimoto. (2014). Fracture Dynamics of Shallow Dip-Slip Earthquakes. *Rock Mechanics for Global Issues - Natural Disasters, Environment and Energy* -, pp.715-723. ( 査読有 )

[5] Uenishi, K. (2014). Dynamic Interface Fracture in a Stratified Geological Medium Accompanied by Primary Fault Rupture Propagation. *Procedia Materials Sciences*, **3**, pp. 505-510, DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.084.( 査読有 )

[6] Uenishi, K., and S. Sakurai (2014). The Generation of Seaquakes and Its Impact on Floating Bodies. *International Journal of Protective Structures*, **5**, pp.207-218, DOI: 10.1260/2041-4196.5.2.207. ( 査読有 )

[7] Uenishi, K., and T. Takahashi (2014). Rayleigh Waves and Dynamic Tensile Cracking in Slopes. *Proceedings of the 17th U.S. National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, 2 pages. ( 査読有 )

[8] Uenishi, K., and S. Sakurai (2013). Seaquakes and Their Impact on Floating Structures. *Proceedings of the 10th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures*, pp.461-470. ( 査読有 )

[ 学会発表 ] ( 計 7 件 )

[1] Uenishi, K. (2015.12.14). Shallow Dip-Slip Fault Rupture: Origin of Asymmetric Seismic Motion. *American Geophysical Union 2015 Fall Meeting* (San Francisco, The United States of America).

[2] Uenishi, K., T. Takahashi, and K. Fujimoto (2015.10.27). Asymmetric Dynamic Fracture in a Symmetrically Stratified Medium: Numerical and Experimental Observations. *2015 Seismological Society of Japan Fall Meeting* ( 神戸国際会議場、兵庫県神戸市 ) .

[3] Uenishi, K. (2015.04.14). On the Rupture Dynamics of Shallow Dip-Slip Faulting in a Stratified Medium. *European Geosciences Union General Assembly 2015* (Vienna, Austria).

[4] Uenishi, K. (2014.11.25). Experimental Evidence of the Existence of a Corner Wave Generated by Shallow, Supershear Dip-Slip Fault Rupture. *2014 Seismological Society of Japan Fall Meeting* ( 朱鷺メッセ：新潟コンベンション

センター、新潟県新潟市 ) .

[5] Uenishi, K., and S. Sakurai (2013.12.09). On the Generation of Seaquakes and Their Connections with Earthquake Source Mechanisms. *American Geophysical Union 2013 Fall Meeting* (San Francisco, The United States of America).

[6] Uenishi, K., T. Takahashi, K. Yamagami, K. Akakabe, and K. Fujimoto (2013.10.08). Possible Dynamic Rupture Process of Shallow Dip-Slip Earthquakes: A Supplementary Experimental Study. *2013 Seismological Society of Japan Fall Meeting* ( 神奈川県民ホール、神奈川県横浜市 ) .

[7] 上西幸司 (2013.07.20). 「想定外」の地震被害：それでも「問題外」ですか？ 第174回神戸大学都市安全研究センターオープンゼミナール ( 神戸市役所、兵庫県神戸市 ) ( 招待講演 ) .

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

上西 幸司 ( UENISHI KOJI )

東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号：60311776

### (2) 研究分担者

(            )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

(            )

研究者番号：