

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560458

研究課題名（和文）地震による大規模斜面崩壊のメカニズムの解明と対策工の提案

研究課題名（英文）Analyses on Mechanism of Large-scale Landslides due to Earthquakes and Proposal of their Countermeasures

研究代表者

鵜飼 恵三 (UGAI KEIZO)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60018827

研究成果の概要（和文）：地震により発生する大規模斜面崩壊のメカニズムを解明するために、現場調査、試料土の採取、不攪乱土の動的要素試験、模型実験、数値解析を行った。日本で良く見られる岩盤ではない斜面については、地震動の繰り返しせん断により斜面内の土のせん断強度が大幅に低下し、大規模な崩壊に至ることを解明した。中国の四川地震で数多く見られた風化した岩盤斜面の崩壊については、岩屑なだれと節理性岩盤斜面の崩壊に分類して、主に模型実験によりそれらのメカニズムの一部を解明することができた。

研究成果の概要（英文）： In order to clarify the mechanisms of large landslides due to earthquakes field investigation, soil sampling, dynamic element tests of undisturbed soils and rocks, model experiments and numerical analyses are carried out. The mechanism of soil slope failures which are often seen in Japan is found to be due to the abrupt reduction of soil shear strength by cyclic shear. The mechanism of weathered rock slope failures is found to be classified into rock avalanche and jointed rock slope failures. Some parts of their mechanism are clarified mainly by model tests.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：地震地すべり

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地すべり、地震、メカニズム、岩屑なだれ、数値解析、模型実験、不攪乱試料土

## 1. 研究開始当初の背景

これまで、地震時斜面崩壊の原因は、斜面を滑動させようとする慣性力であるとされてきた。申請者の研究から得た知見によれば、地下水位が存在する場合、繰り返し载荷による土の強度低下と過剰間隙水圧の上昇を考慮しなければ、中越地震時に発生した大規模斜

面崩壊の原因を説明することができないことがわかってきた。このような意味で、地震時斜面崩壊のメカニズムについて大幅な見直しが必要になっていた。特に、自然斜面の地震時崩壊については、地盤工学的手法に基づく詳細なメカニズム研究がなされていなかった。

## 2. 研究の目的

平成 20 年度から 3 年間の研究の目的は次のようである。①上述のメカニズムを、斜面崩壊現場でサンプリングした不攪乱試料の室内力学試験（静的・動的）、砂質斜面を対象にした振動実験、および全応力または有効応力に基づく動的 FEM 解析、から詳細に検証する。②地震時斜面崩壊を軽減するための対策工法を提案し、①に述べた実験手法と解析手法を用いて検証する。③繰返し载荷により地震後の斜面内に残留する過剰間隙水圧に着目した簡便な斜面安定解析法を提案する。

なお、研究開始直後の平成 20 年 5 月 12 日に中国四川省の山間地で大地震が発生し、大規模な岩盤崩壊が無数に発生し、多くの犠牲者を出した。これを受けて、中国での地震地すべりの調査研究を開始し、地震による岩盤斜面崩壊のメカニズムの解明を進めた。

## 3. 研究の方法

(1) 国内では、2004 年の新潟県中越地震により、旧山古志村と小千谷市で発生した大規模地すべりのうち、尼谷地、にげり、大場で発生したものを対象にしてメカニズム解明の研究を行った。研究の手順は、現場調査、崩壊現場の不攪乱試料土の採取、その動的要素試験（繰返し振動三軸試験、繰返し一面せん断試験）、数値解析によるメカニズムの検証へと至る流れである。小千谷市のにげり地すべりと 2007 年の新潟県中越沖地震で液状化により斜面上の家屋が被害を受けた刈羽村稲葉地区では、崩壊のメカニズムに加えて、対策工（杭と排水ボーリング）の効果を数値解析で評価する試みを行った。

(2) 国外では、2008 年の四川地震時に発生した大規模岩盤斜面崩壊のうち、彭州市龍門山鎮謝家店の岩屑なだれのメカニズムの解明を、大型模型と小型模型を用いて実験的に試みた。また節理、層理、亀裂の発達した岩盤斜面で崩壊が多いことから、規則的な節理をもつ岩盤斜面の振動崩壊実験を試みた。インドネシアでも 2009 年に地震により同様な岩屑なだれが発生していたことから、現地調査を行った。地震による岩盤斜面の崩壊プロセスを動画ソフトによりシミュレーションして、画像化することに成功した。地質専門家や現地の住民の証言を取り入れて改良を行った。このような動画があると、メカニズムを視覚的に認識することができる。また、同様な災害に対応した避難誘導の方法を住民に提示することが可能になる。

## 4. 研究成果

(1) 小千谷市にげり地区において、深さ 5m ~ 13.7m の砂れき混じり粘土質シルト層から

7つの深度において不攪乱土を採取して、繰返し非排水せん断試験などの力学試験を行った。この結果、すべり面付近の地層の液状化強度比は、0.35-0.4程度と高いことがわかった。土質試験結果をゆるい砂地盤の液状化構成モデル（PZ-Sandモデル）に適用した。同モデルを用いた動的弾塑性FEMソフト（フォーラム8社のUWLC。群馬大学で開発されたもの）による解析結果は、一部の地層が地震中に急激に強度を失って上部土塊の長距離移動を招いた状況を精度良く再現するものであり、解析手法の有効性が確認された。



写真：小千谷市にげり地区で発生した地震地すべり

このように、一部の地層における地震中の過剰間隙水圧の上昇が斜面崩壊の主因と考えられる場合には、ゆるい砂の液状化挙動を念頭に構築された構成モデルに基づく動的有効応力解析を採用できることが確認された。また液状化強度比が高い粘土質シルト層であっても、大地震時には液状化を起こしうることがわかった。またこの地すべりに排水工を想定して同じFEMソフトにより解析を行い、対策工の有効性を定量的に評価することができた。

(2) 2007年に発生した中越沖地震時に、新潟県刈羽村稲葉地区の砂丘下端の家屋が液状化による被害を受けた。現場から採取された不攪乱試料を用いて繰返し非排水三軸試験を実施し、上述のソフトを使用して有効応力型の動的弾塑性FEM解析を行った。無対策のため被害が甚大であった家屋と、十分な対策がなされていたため被害が軽微であった2箇所について解析を行い、現象を精度よく再現することに成功した。これにより、液状化解析ソフトを用いて、液状化による家屋被害の有無を検証できることがわかった。

(3) 旧山古志村尼谷地地区（斜面は主に泥岩から構成される）において発生した地震時大規模地すべりのメカニズムを解明するために、斜面中央部のすべり面付近から不攪乱土を採取して繰返し非排水三軸試験などの力学試験を行った。この結果、液状化強度比は0.4程度と高いが、大地震時には強度低下により地すべりを起こしうることが、簡易な斜面安

定計算法により判明した。泥岩斜面においても大地震時には強度低下により深い大規模地すべりを起こしうることを、初めて明らかにした。

(4) 旧栃尾市大場地区で発生した地震時大規模地滑りのメカニズムを解明するために、斜面中央部のすべり面付近から不攪乱土を採取して繰り返し非排水三軸試験などの力学試験を行った。この地すべりは、深いすべり面に沿ってその上部土塊が剛体的にすべったものであり、すべり面付近に存在する砂質土が液状化して崩壊の引き金となったと推測されていた。詳細な土質試験の結果、すべり面付近は砂質泥岩から構成されており、液状化強度比は0.4程度と高いが、大地震時には強度低下により大規模地すべりが起こりうる事が判明した。このメカニズムは上記の尼谷地すべりと同じである。

(5) 2008年5月に中国四川地震のとき発生した岩屑なだれについて、大型の模型実験を行った。この実験結果の分析と考察を行った。実験の結果、堆積した土砂と岩石は堆積部Ⅰと堆積部Ⅱに分類された。堆積部Ⅰでは土砂や岩石が少し山なりになって連続的に堆積しており、一方堆積部Ⅱでは土砂はほとんど見られず、岩石のみから構成され、岩石はバラバラに散乱して不連続であった。堆積部Ⅰの重心の移動速度と移動距離を予測するために、力のつりあいとエネルギーに基づく簡単な式を導いた。この式の計算値を上部急斜面における土砂先頭部の移動速度に関するビデオ計測結果と比較したところ、両者の傾向と値は概ね一致した。堆積部Ⅱの角石大の最大到達距離とその分布は、それらを独立に落下させた結果とほぼ同じになった。これより後者の落石実験結果から堆積部Ⅱの角石大の最大到達距離とその分布を予測しうる可能性が示唆された。この大型模型実験では、長距離に及ぶ到達距離のメカニズムを解明することができなかった。そのため、小型模型実験装置を作成し、パラメータ値を変えた多数の試験を行った。この結果、到達距離と斜面下部の勾配との間に密接な関係があり、この勾配を急にすることで長い到達距離を再現できることを証明した。



写真：高さ5.7mの大型岩屑なだれ実験装置

(6) インドネシアジャワ島西部で発生した岩屑なだれの崩壊前の状況、崩壊のプロセス、崩壊後の状況を時系列的に3次元ヴァーチャルリアリティ (3D-VR) として表現することに成功した。これがあるとメカニズムの解明や事後対策法を考えるのに有効であり、住民説明にも使用できることを示した。

#### 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 6件)

①鶴飼恵三 他5名、岩屑なだれのメカニズムに関する基礎的研究、日本地すべり学会誌、48-11、2011、pp. 12-22 (査読有)

②F.Cai、K.Ugai、A subgrade reaction solution for piles to stabilize landslides、Geotechnique 61、No.2、2011、pp.143-151 (査読有)

③A.Wakai、K.Ugai 他3名、Numerical modeling of an earthquake-induced landslide considering the strain-softening characteristics at the bedding plane、Soils and Foundations、50-4、2010、pp. 533-545 (査読有)

④K.Ugai 他7名、Laboratory flume static and dynamic experiment for rock avalanche、Geotechnical Special Publication、ASCE、No. 201、2010、pp.278-287 (査読有)

⑤山田正雄、鶴飼恵三、汶川地震による映秀鎮地区の道路のり面構造物の損壊調査、日本地すべり学会誌、46-1、2009、pp.54-59 (査読有)

⑥山田正雄、鶴飼恵三 他3名、岩塊の接触形態を考慮した3次元個別要素法による岩盤斜面崩落シミュレーション、土木学会論文集、Vol. 65、No. 2、2009、pp.480-491 (査読有)

〔学会発表〕(計 6件)

①蔡飛、鶴飼恵三 他5名、地すべり対策工の動的有効応力解析、第49回日本地すべり学会研究発表会、2010.7.7、沖縄県市町村自治会館 ホール (沖縄県那覇市) (査読無)

②K.Ugai 他2名、Investigations for landslide disasters induced by Tasikmalaya Earthquake in Indonesia、第49回日本地すべり学会研究発表会、2010.7.7、沖縄県市町村自治会館 ホール (沖縄県那覇市) (査読無)

③蔡飛、鶴飼恵三 他4名、中越沖地震時における液状化による家屋被害の事例解析、降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム、2009.10.29、地

盤工学会（東京）（査読無）

④Wakai, A., Ugai, K., Onoue, A., Kuroda, S. and Higuchi, K., Finite element simulation for earthquake-induced landslide based on strain-softening characteristics of weathered rocks, Proc. Int. Symp. on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, 2009. 5. 25, 京都国際会議場（京都）（査読有）

⑤Ugai, K., Wakai, A., Onoue, A., Kuroda, S. and Higuchi, K., Mechanism and analysis of large and long-distance sliding slope failures due to the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake, Proc. 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2008. 10. 5, (Goa, India) （査読有）

⑥K. Ugai, Q. Yang, Z. Su, F. Cai and M. Yamada, Recent landslide disasters induced by earthquakes: 5<sup>th</sup> International Conference on Landslides, slope stability and the safety of infrastructures, 2008. 7. 15, (Kualarumpur, Malaysia) （査読有）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鵜飼 恵三 (UGAI KEIZO)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60018827