

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656105

研究課題名（和文） 山地災害直後の緊急交通路を確保するための簡易防護構造の研究

研究課題名（英文） Simplified protective structure against debris flow for safe transportation in mountainous region.

研究代表者

東畑 郁生 (TOWHATA IKUO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：20155500

研究成果の概要（和文）：2004年の新潟県中越地震、2005年のパキスタン・カシミール地震、2008年の中国四川省の汶川地震など、世界各地で山間地が強烈な地震動に見舞われる災害が、21世紀に入ってから相次いだ。研究代表者らはこれらの災害地の被害実態調査を行い、地震動そのものが大きな被害を生んだことに加え、その後の救援や復旧などが本格化した段階で、地震動によって不安定化した山地斜面に崩落が相次ぎ、救援や復旧などの緊急交通が二次災害の危険にさらされることを実見した。同様の事態は、豪雨による斜面災害においても発生している。救援や復旧のために必要な運輸交通を継続・維持するためには、斜面崩壊から緊急道路交通を防護することが必要である。ただし、該当する交通が一般車両ではなく、緊急通行許可を得た特別車両に限られるので、通常ほどの安全性は要求されないはずである。そこで、緊急車両の安全を確保することを目的として、簡易で運搬可能な防護トンネルの研究を行った。研究の中心は、崩落する岩石や土砂の流れと防護構造物との間に生ずる衝突力である。実大構造物を用いた研究は不可能と言わざるを得ないので、代わりに模型斜面を製作し、土砂材料や量、斜面勾配、長さ、斜面表面の摩擦係数などをさまざまに変化させて、構造物に土砂流が衝突する時の圧力分布、時間変化、構造物に発生する断面力などを計測し、これらの間の経験的な相関式を導いた。想定した構造物は、擁壁とトンネルの二種である。さらに、土砂流が誘起する衝突力をエネルギーの観点から説明する力学モデルの構築も行った。さらに個別要素法解析プログラムを作成して土砂流の数値解析も行い、実現象を再現した。これらはいずれも、実物に比べてはるかに小さい模型実験結果を、実際の大規模な土砂流に適用するために必要な仕事であった。

研究成果の概要（英文）：Damage investigations that were conducted after such significant earthquakes in mountainous regions as the Niigata-Chuetsu earthquake in 2004, the Kashmir earthquake in Pakistan, 2005, and the 2008 Wenchuan earthquake in China demonstrated that problems were caused not only by the strong shaking and related phenomenon but also the post-earthquake instability of mountain slopes that were affected by the shaking. The latter means that slope failures during the period of emergency rescue and re-construction, road transportation at the bottom of unstable slopes is vulnerable to slope failures and is often stopped in particular during rain falls. To protect such important emergency activities from the slope problems, some structural measure was considered necessary. It was thought important further that the planned structure does not have to be so safe as normal structures in sloping ground because the road transportation to be protected is not of the ordinary type but are the emergency vehicles whose safety demand is not very high under special situations. Hence, the present research intended to investigate a simple and portable tunnel structure that mitigates the effects of debris flow on road transportation. The central aim was the evaluation of the impact force between debris flow and a protective structure. Because a study on a real-scale structure undergoing debris flow is impossible, a small-scale model study was made. By changing the amount of debris, debris types, the length of a slope, its gradient, and friction of the slope surface, tests were

repeated on the distribution of impact pressure, its time history, and bending moment in an affected structure. Accordingly, a regression analysis was made to obtain an empirical formula for those values. The concerned structures were a vertical retaining wall and a tunnel. In addition, an energy viewpoint was introduced to investigate in a more rational manner the mechanism of generation of significant impact force. Furthermore, a discrete element analysis was developed to numerically reproduce the impact phenomenon in a greater scale. These efforts were made to apply results from small-scale model tests to a greater proto type in the field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	0	1,500,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	480,000	3,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：斜面崩壊・土砂崩落・ロックシェッド・衝突圧・模型実験・DEM数値解析

### 1. 研究開始当初の背景

2004年の中越地震以来、2007年のパキスタン北部の大地震、2008年の中国ぶん川地震など、山間部における地震災害が連続して発生し、いずれも救援活動が交通路の途絶によって困難を極める状況を、現場で観察してきた。そして、斜面の劣化により、救援活動が終了後も長期にわたって引き続き交通路が斜面崩落の危険にさらされるため、復興活動も困難な状況の下で継続されるということの問題を認識した。この状況はぶん川地震の被害地域において特に深刻であり、地震後2年経過してもなお、斜面の崩落が収まっていなかった。そのような状況において、一般交通を防護できるほどの安全性は望めないとしても、特別な許可を得て通行する緊急車両・復興資材の運搬車両だけでも防護できる、簡易で運搬可能なトンネル型の防護装置の開発の必要を認識した。

### 2. 研究の目的

防護構造の設計にあたっては、斜面から崩落する土砂流れの衝突力を見積もる必要がある。しかし、衝突力を正確に（安全側の過大評価ではなく）見積もる方法が無かった。しかも、実現象を再現する研究は困難ないしは不可能と言わざるを得ないため、模型実験を実施することとした。実験においては、構造物の耐久性に密接な関連のある力学的諸量、すなわち模型構造物が被る衝撃力の時刻歴、曲げモーメントやせん断力などを測定した。

### 3. 研究の方法

模型斜面を製作した。この斜面はヒンジ構造によって勾配をさまざまに変化させられるほか、斜面の上部に土砂を溜め、扉を一瞬に開くことによって、土砂の崩落を引き起こした。そして斜面勾配に加えて崩落距離、崩落土砂量、土砂の粒度などを変えることによって衝撃の度合いを変化させ、構造物に発生する衝撃力その他の力学諸量との間で、パラメトリックスタディを実施した。斜面の下部には擁壁模型またはトンネル模型を設置し、圧縮力とせん断力の両方を計測できる二成分ロードセルを分散設置することにより、土砂流が衝突する時の動的圧力やせん断力の分布を計測した。また、構造物に生ずる曲げモーメントの時刻歴も記録した。

小規模は模型実験の成果だけでは、実大スケールの構造物の挙動を予測することはできない。そこで、回帰分析、エネルギーを考慮した力学的な分析、そして粒子DEM解析の三通りの方法で、実験結果を実物スケールに拡張する試みを行った。

### 4. 研究成果

模型斜面上を流動・崩落する土砂の流れを高速ビデオ撮影して観察した。それによると、流れの構造は、崩落前半と後半とで異なっている。前半では、崩落の速度がいまだに遅いので、土砂の挙動は静的なせん断破壊メカニズムで支配されている。すなわち土砂粒子の集合には攪乱が少なく、土砂もマスがせん断変形して運動を始めるのである。しかし崩落

速度が増加するにつれて個々の粒子の運動も激しく、かつ粒子間の速度変動も著しくなり、その結果、土砂マス内部の物質移動が激しくなってくる。マスとしても当初のまとまりを維持することはできず、流れの前方へ飛び出す高速粒子が出現したり、大型粒子が上方へ移動したりする。

次に衝撃力の時刻歴を見ると、構造物の形態によらず、まずピークの力が発生し、その後低下して残留力の水準に至る。これは、崩落土砂の先頭部分が構造物に衝突する時点で、最初のピーク力が発生する。しかしこの衝突土砂が構造物の前面に堆積すると、その後崩落・到着する後続土砂から構造物を防護する緩衝材のような役割を果たすようになる。この緩衝作用は、堆積土砂の重量および土砂と斜面との間の摩擦係数に依存するところが大きい。

次に、衝撃力や作用位置などに関する予測方法を研究した。これは、小型模型実験の結果だけでは、実物大スケールの現象の予測ができないからである。第一に取り組んだのは、上述したパラメトリックスタディの結果の回帰分析である、斜面勾配、崩落距離、斜面表面の摩擦係数、崩落土砂量、土砂粒子の寸法などの諸量の重要度をも評価しながら、経験的な回帰式を導いた。実験パラメータと衝撃力などとの間の相関を計算することにより、パラメータ間の重要度の違いも評価した。このような回帰式を直接実物大スケールに適用することにより、実構造物の外力評価が可能である。ただし研究としてはやや物足りないものがあつた。

そこで次に、現象の分析にエネルギーの視点を持ち込み、より原理的な解釈を試みた。考慮したエネルギーは、崩落土砂が初期（崩落前）に持っていた位置エネルギー、崩落過程で斜面との間の摩擦によって消散させる摩擦エネルギー、構造物との衝突直前に保持している運動エネルギー（流動速度は高速ビデオ撮影から判読）である。そしてこれらのエネルギー間の関係を考察しつつ、構造物前面に堆積している土砂緩衝材と斜面との間の摩擦抵抗をさらに加味することによって、構造物に作用する衝撃力が説明できることを示した。

これらの試みに加え、崩落土砂の運動を直接解析することをも目指して、個別要素解析（DEM）プログラムを作成した。この手法は計算に時間を要することが欠点であるものの、粒子集合体の運動を直接解析する、という意味で、実現象にやや近いという長所も備えている。通常のDEM解析では粒子を円盤で近似しているが、それでは粒子の回転を拘束することが不十分であり、実現象と比べて軟弱な土砂しか模擬していないことになる、と考えられた。しかし粒子の形状を不規則

（たとえば楕円）にした既往の研究によれば、粒子同士の接触判定に膨大な計算ロードが生じ、計算時間が長くなって実用性を阻害してしまう。そこで本研究では円盤粒子4個を剛なバネで結合して角張った粒子を模擬することにした。基本計算は円盤粒子について行われるため、アルゴリズムに変更を必要としないことが、長所である。このようにして作成した解析プログラムで流動土砂の衝突現象を計算したところ、実現象と大きく違う点が見出された。それは、衝突力の時間変動が極めて著しく、極端な場合、力がゼロになる瞬間が何度も起こる、という状況であった。これは二次元DEMの限界とも言える事柄であり、本来なら三次元現象である衝突では、奥行き方向に粒子衝突の時間差があるため、合計した「土砂流の衝撃力」には時間変動が緩和され、ゼロになることが無い。そこで計算手法の改良が必要となったが、三次元DEMでは計算時間が数週間にもなることが予想され、研究上も実用上も不適切と判断した。代わりとして、2.5次元DEMという方法を考案した。これは、崩落前の粒子堆積を計算機上で生成する時、粒子の位置や寸法などの決定に乱数を導入し、わずかに仕様の異なる崩落解析を10回程度行って結果を平均することにより、実現象の三次元的変動を、二次元解析で再現しようとしたものである。計算結果において、前述のような極端な時間変動は解消された。

以上をまとめると、本研究は、大地震や豪雨などによって不安定化した山間の被災地において、救援や復興に従事する陸上交通を二次災害的斜面崩壊から護ることを目的として、簡易な防護構造の研究を行ったものである。特に防護構造物に作用する衝撃的な土砂流荷重に焦点を絞り、模型実験によって衝撃力の測定を行った。そして実験結果を用いて、回帰分析、エネルギー考察、DEM数値解析の三通りの方法で衝撃力の予測を試みたものである。これらの成果は今後、災害地の復興支援に役立てていきたい。

## 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1件）

Jiang, Y.-J. and Towhata, I. (2012) Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI 10.1007/s00603-012-0293-3.

〔学会発表〕（計4件）

Towhata, I. and Jiang, Y.-J. (2009) Geotechnical aspects of 2008 Wenchuan earthquake, China, *Earthquake Geotechnical*

Engineering Satellite Conference, XVIIth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria.

Towhata, I. and Jiang, Y.-J. (2010) Geotechnical Aspects of 2008 Wenchuan earthquake, China, Chapter 8, Advances in Earthquake Geotechnical Engineering, Ed. M.A. Sakr and A. Ansal, Springer, pp. 67-89.

Towhata, I. and Jiang, Y.-J. (2011) Dynamic impact of dry granular flow on retaining wall — regression formula for calculation of critical impact force, Proc. 3rd Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Semarang, Indonesia.

Jiang, Y.-J. and Towhata, I. (2010) Dynamic impact of dry granular flow on retaining wall — one linear relation between critical impact force and initial potential energy, 4th Japan-Taiwan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall, Sendai.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

東畑 郁生 (TOWHATA IKUO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 : 20155500

### (2) 研究分担者

内村 太郎 (UCHIMURA TARO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号 : 60292885

山田 卓 (YAMADA SUGURU)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号 : 70451789