様式Ｃ－１９

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２５年　５月 31 日現在

機関番号：１７１０２
研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2010～2012
課題番号：22310113
研究課題名（和文）　大地震によるトランポリン効果を考慮した崩壊土石の高速・遠距離運動に関する研究
研究課題名（英文）　Study on high speed and long run-out movement of earthquake induced landslides by considering earthquake trampoline effect

研究代表者
陳　光斉（CHEN GUANGQI）
九州大学・基幹教育院・教授
研究者番号：50293882

研究成果の概要（和文）：
本研究では、大地震による崩壊土石の高速・遠距離運動のメカニズムを解明し、崩壊土石の運動速度や到達距離などの運動特性を予測する実用的な数値シミュレーションプログラムを開発することを目的とした。高速・遠距離運動の要因として地震による地上物体のトランポリン運動に着目し、その発生メカニズムを「卓球効果」モデルで解明できた。また、「多重加速モデル」を提案し、トランポリン効果を考慮した崩壊土石の運動特性や到達距離を推定する3次元ＤＤＡ数値シミュレーションプログラムを開発することができた。さらに、地震による土砂災害連鎖モデルを確立し、新しい土砂災害リスクの評価手法を提案したので、大地震による予想外の甚大被害を低減することに貢献した。

研究成果の概要（英文）：
The purpose of this study is to clarify the mechanism of high speed and long run-out movement of earthquake induced landslide and to develop a practical numerical simulation program for predicating the movement behaviors. The primary factor causing high speed and long run-out was considered as trampoline effect of earthquake on the movement of an object on ground. A ping-pong model has been proposed for clarifying how and why trampoline occurs. Based on this physical model, a multiply acceleration numerical model has been proposed for explaining how the high speed and long run-out are induced. A practical DDA (Discontinuous Deformation Analysis) program has been developed successfully by incorporating the new model, which can be used for predicating or estimating landslide movement in detail. A new risk evaluation method has been proposed based on earthquake induced landslide disaster chain model. Thus, it is expected that the achievements in this study are useful and helpful in mitigating unexpected large loss and serious damages from earthquake induced landslides

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2010 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2011 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2012 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
総　計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野：複合新領域
科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学
キーワード：巨大地震、 高速、遠距離運動、トランポリン効果、多重加速モデル、数値シミュレーション、不連続変形法ＤＤＡ、土砂災害

１．研究開始当初の背景

2008 年四川大地震（Ｍｓ8.0）による斜面崩壊は５万個所に達し、観測史上例のない大規模土砂災害が引き起こされた。特に、崩壊土石の高速・遠距離（1000m 以上）の移動により、想定外のところで村や町が覆われ、天然ダムが形成されたので、その地震の総損失（死者・行方不明者数は 87149 人、直接経済損失は 8451 億元）の三分の一は土砂災害によるものと報告された。大地震による崩壊土石の高速・遠距離運動現象は専門家の注目の的となっている。

一方、日本では平成 13 年から「土砂災害防止法」が実行された。急傾斜地崩壊「警戒区域」は 50m以内、地滑り「警戒区域」は地滑り区域下端から最大 250m の範囲内の区域と定められている。従来の斜面災害リスクはこのように定められた到達距離に基づき評価されていた。しかし、四川大地震のような地震に対しては、既存の土砂災害リスク評価は明らかに不適当である。このような背景から、地震による土砂災害対策を推進するために、大地震による崩壊土石の高速・遠距離運動におけるメカニズムの解明や移動の速度と距離の予測が極めて重要である。

２．研究の目的

（１）高速・遠距離移動の要因として地震によるトランポリン現象が考えられる。その発生メカニズムを解明する。
（２）トランポリンの影響を考慮した地震による崩壊土石の運動モデルを確立する。
（３）新しい運動モデルに基づき地震による崩壊土石の運動を予測する数値シミュレーションプログラムを開発する。
（４）高速・遠距離を考慮した新しい土砂災害リスクの評価手法を確立する。

３．研究の方法

（１）四川地震による土砂災害の調査および資料収集を行い、崩壊土砂の高速・遠距離移動や天然ダムの発生状況を明らかにする。
（２）振動台実験や衝突理論による卓球効果に関する理論分析を行い、トランポリンの発生メカニズムを明らかにする。
（３）数値シミュレーション技術、ＧＩＳやリモートセンシング技術を活用して、崩壊土石の運動速度や到達距離を推定するプログラムを開発する。

４．研究成果
（１）地震によるトランポリン現象の発生メカニズムを明らかにした。

大地震による地面上の物体の極端な異常運動の原因の一つはトランポリン現象と関連されると考えられる。ここで、地面上の物体が地震で徐々に高くなる運動現象を「トランポリン現象」といい、スポーツでのトランポリンを「トランポリン運動」という。トランポリン現象のメカニズムはトランポリン運動のメカニズムとは異なり、それを解明するために、地盤振動に着目し、地面上の物体と地面の衝突で生じた「卓球効果」を取り入れ、トランポリン現象に関する新しいメカニズムの理論とモデルを構築した。それを用いて 2008 年岩手地震で史上初めて観測された 4000gal の地震波形をＤＤＡ数値シミュレーションで再現することができた。

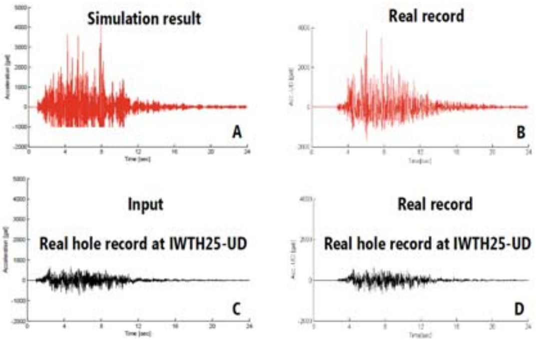

図１ＢとＤは一関西観測所の地面と地下の加速度計でそれぞれ記録された波形。Ａは地下の実測波形（ＣかＤ）を入力としてＤＤＡシミュレーションで得られた波形である。

（２）地震による崩壊土石の運動モデルを確立した。

地震によるトランポリン現象に基づき、崩壊土石の高速・遠距離移動メカニズムにおける「多重加速モデル」を提案し、理論根拠を構築した。「多重加速モデル」では、図２に示すように，地震波形をP-phaseと N-phaseに分ける．P-phaseは，波が斜面の外法線方向と一致する位相で、N-phaseは反対方向の波の位相である。P-phaseでは，斜面が土石を押しているので、土石が再加速されると考えられる.繰り返し再加速により、土石の水平運動速度が高くなり、跳躍や回転運動の発生可能性が高くなる。また、N-phaseでは，斜面が土石から離れるので、土石の動摩擦力が低下することが予想される。その結果、崩壊土石が遠くまで移動できる。

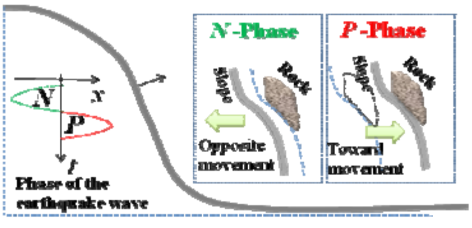

図2　地震波形をP-phaseとN-phaseに分けられる

崩壊土砂の到達距離は斜面の高さの影響を除くために，平均動摩擦角（視摩擦角φ）で評価される。平均動摩擦角は土石の運動エネルギー保存則により理論上に求められた。

（３）新しい崩壊土石の運動を予測する数値シミュレーションプログラムを開発した。

地震による崩壊土石の高速・遠距離の運動特性を考慮し、不連続変形法 DDA プログラムに多重加速モデルを取り入れ、新しい３次元 DDA シミュレーション技術を開発した。地震による崩壊土石の到達範囲・施設に対する衝撃力などを高精度で解析し、予測することが可能となった。

（４）新しい土砂災害リスク評価手法を提案した。

斜面災害リスクは、斜面崩壊の発生確率と崩壊による損失の積により定量的に評価される。従来の斜面崩壊による損失の推定においては、崩壊土石の衝撃や堆積などによる斜面周辺の施設の破壊・復旧における損失だけを評価し、斜面周辺に建物や道路などの施設がなければ、直接の損失が発生しないため、リスクがゼロに近いと評価されてきた。本研究は地震による災害連鎖に着目し、地震による土砂災害連鎖モデルを確立し（図３）、斜面周辺に何の施設がなくても、崩壊土石に起因する甚大な被害を引き起こす可能性は十分にあることを明らかにした。

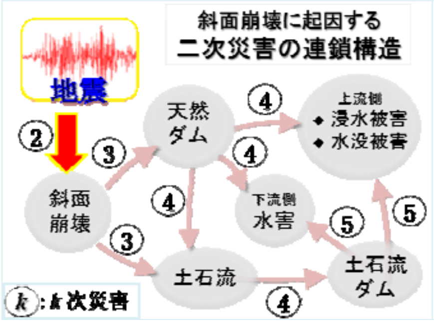

図3　地震による土砂災害連鎖モデル

リスクのＥＴＡとしては、大地震による崩壊土石の遠距離移動により河川がせき止められ、天然ダムが形成される。そして、天然ダムの湛水による上流側の浸水・水没被害、天然ダム崩壊による下流側の洪水や土石流等の被害を引き起こす。また、地震後の長期間においては、堆積した崩壊土石が豪雨時に運搬され、甚大な土石流災害をもたらす。

新しいリスクの評価および防災対策システム（図４）の構築のために、地震による天然ダムのハザードマップの作成手法および地震後崩壊土石を材料源とした土石流の発生や氾濫影響範囲などの予測手法を開発した。

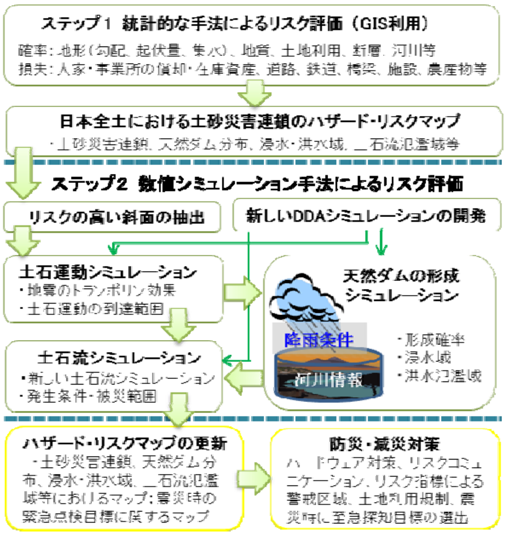

図４　地震による土砂災害連鎖リスク評価および防災対策システム

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　59 件）

① G. Chen, Y. Wu, Z. Jiang, et al., Characteristics of seismogenic model of Mw9.0 earthquake in Tohoku, Japan reflected by GPS data, Chinese Journal of Geophysics, 査読有, Vol. 56, No. 3, 2013, 848-856

② Y. Zhang, G. Chen, L. Zheng, Y. Li, and X. Zhuang, Effects of geometries on three-dimensional slope stability, Canadian Geotechnical Journal, 査読有, Vol. 50, No. 3, 2013, 233-249

③ G. Chen , L. Zheng, Y. Zhang and J. Wu, Numerical Simulation in Rockfall Analysis: A close comparison of 2-D and 3-D DDA, Rock Mechanics and Rock Engineering, 査読有, Vol. 43, No. 3, 2013, 527-541

④ G. Chen, Z. Jiang and Y. Wu, A new approach for numerical manifold method, IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing, 査読有, Vol. 23-24, 2012, 23-34

⑤ Y. Li, G. Chen, C. Tang, G. Zhou and L. Zheng, Rainfall and earthquake induced landslides susceptibility assessment using GIS and artificial neural network, Natural Hazards and Earth System Sciences, 査読有, Vol. 12, 2012, 2719-2729

⑥ Y. Wu, G. Chen, Z. Jiang, L. Zhang and X. Liu, The algorithm of simplex

integration in three-dimension and its characteristic analysis, International Journal of Advancements in Computing Technology, 査読有, Vol. 4, No. 10, 2012, 246-256

⑦ Y.Zhang, G. Chen, J. Wu, L. Zheng and X.Zhuang, Numerical simulation of seismic slope stability analysis based on tension-shear failure mechanism, Geotechnical Engineering, 査読有, Vol. 43, 2012, 18-28

⑧ T. Nian, R. Huang, S. Wan and G. Chen, Three-dimensional strength reduction finite element analysis of slopes: geometric effects, Canadian Geotechnical Journal, 査読有, Vol. 49, No. 5, 2012, 574-588

⑨ Y. Li, G. Chen, C. Tang, L. Zheng and Y. Zhang, An approach from earthquake-induced landslides identification to numerical simulation of debris flow, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 査読有, Vol. 72, No. 2, 2012, 69-83

⑩ L. Zheng, G. Chen, K. Zen and K. Kasama, Numerical validation of multiplex acceleration model for earthquake induced landslides, Geomechanics and Engineering, 査読有, Vol. 4, No.1, 2012, 39-53

〔学会発表〕(計 53 件)

① Y. Zhang, G. Chen, L. Zheng and Y. Li, Numerical analysis of the largest landslide induced by the Wenchuan earthquake, May 12, 2008 using DDA, International Symposium on Earthquake-induced Landslides, November 7-9, 2012, Kiryu, Japan

② G. Chen, Y. Li, Y. Zhang and J. Wu, The disaster chain of earthquake induced landslides, Proceedings of International Symposium on Earthquake-induced Landslides, November 7-9, 2012, Kiryu, Japan

③ L. Zheng, G. Chen, K. Kasama, Y. Li and Y. Zhang, Rockfall simulation with consideration of multi-blocks using 3D DDA and its application to countermeasures, 7th Asian Rock Mechanics Symposium, October 15-19, 2012, Seoul, Korea

④ Y. Li, G. Chen, C. Tang and L. Zheng, Automatic detection of landslides induced by the Wenchuan earthquake and subsequent rainstorm, 46th U.S. Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, June 24-27, 2012, Chicago, Illinois, USA

⑤ G. Chen, L. Zheng and Z. Jiang, Comparison of 2D and 3D DDA in rockfall analysis, 46th U.S Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, June 24-27, 2012, Chicago, Illinois, USA

⑥ Y. Li, G. Chen, C. Tang and L. Zheng, A debris flow and its risk analysis related to the 2008 Wenchuan earthquake, GEOMAT2011, Geotechnique, Construction, Materials & Environment, November 21-23, 2011, Mie, Japan

⑦ Y. Zhang, G. Chen, K. Zen and K. Kasama, High-speed starting mechanism of rock avalanches induced by earthquake, International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011), November 7 - 9, 2011, Perth, Australia

⑧ G. Chen, Z. Jiang and Y. Wu, Numerical manifold method with fixed mesh, 45th U.S. Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, June 26-29, 2011, San Francisco, California, USA

⑨ G. Chen, K. Zen, L. Zheng and Y. Tsusue, Assessing validity of landslide preventive structure by DDA simulations, 45th U.S. Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, June 26-29, 2011, San Francisco, California, USA

⑩ G. Chen, K. Zen, L. Zheng and Z. Jiang, A new model for long-distance movement of earthquake induced landslide, 44th U.S. Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, June 26-30, 2010, Salt Lake City, Utah, USA

〔図書〕(計 2 件)

① G. Chen, N. Yokoya, Y. Kitazono and N. Aramaki, Touka Shobo, The New Technology Frontier: Advanced Preventive Measures against Landslides, ISBN 978-488-757-158-7, 2012, 277

② G. Chen, Y. Li, Y. Zhang and J. Wu, InTech - Open Access Publisher, Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning: Chapter 18 Earthquake induced a chain disasters, ISBN 979-953-307-681-1, 2012, 33

〔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

６．研究組織
(1)研究代表者
陳　光斉（CHEN GUANGQI）
九州大学・基幹教育院・教授
研究者番号：50293882

(2)研究分担者
善 功企（ZEN KOUKI）(H22-H23)
九州大学・工学研究院・教授
研究者番号：50304754

周 国雲（ZHOU GUOYUN）
西日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：50322293

笠間 清伸(KASMA KIYONOBU)
九州大学・工学研究院・准教授
研究者番号：10315111

(3)連携研究者
（　　　）

研究者番号：