

地震による斜面崩壊土石の高速・遠距離運動のメカニズム

陳 光斉¹・善 功企²

¹九州大学准教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

E-mail:chen@civil.kyushu-u.ac.jp

²九州大学教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

E-mail:zen@civil.kyushu-u.ac.jp

2008年四川省汶川県M s 8.0の大地震が観測史上例のない大規模土砂災害が誘発された。特に、崩壊土石が1000m以上の距離を移動した大規模崩壊が数多く発生し、甚大な被害を齎した。一方、日本の「土砂災害防止法」(平成13年から実施)では、土砂災害警戒区域が、急傾斜地の下端から最大50m以内、地滑り区域下端から最大250mの範囲内の区域と定められ、すべての土砂災害対策計画がそれに基づいて作成されていた。もしこのような地震が日本で発生したらどうなるかを回答するために、地震による崩壊土石の遠距離運動現象を解明することが重要である。そのために、本研究では先ず「多重加速モデル」を提案し、遠距離移動のメカニズムに関する理論根拠を構築した。それから、振動台による模型実験を行い、以下のことを明らかにした。1) 入力加速度が増加すると、水平到達距離が増加したことが確かめられた。地振動400galの場合、30°の斜面で常時の平均水平到達距離に比べ、最大で2.8倍、最小で1.6倍、平均で2.2倍の到達距離に増加した。2) 振動の土石への影響は最も大きいのは、落石の運動形態が変われ、跳躍や回転運動の形態の発生頻度が高くなる。したがって、崩壊土石の形状が水平到達距離に差を与える。3) 模型実験の場合、運動時間は2 s 以内で、あまり短いすぎであるので、高速・遠距離移動に与える影響は、水平速度より動摩擦低減が大きいと考えられる。さらに、実測地震波形を外力、エアークッション効果を境界条件として既存のDDAプログラムをさらに改良し、新しい動的な数値シミュレーション手法を開発した。改良したDDAプログラムを用いて、2008年四川大地震で起こった青川県東河口大規模斜面崩壊を数値シミュレーションし、崩壊土石の遠距離移動を再現確認した。

Key Words : Earthquake, landslide, long distance movement, DDA, shaking table, model test

1. はじめに

2008年5月12日中国四川省汶川県でM s 8.0の大地震が発生し、観測史上例のない大規模土砂災害が誘発された。航空写真などで確認された崩壊斜面は7136箇所であり、総計5万箇所以上の斜面崩壊が推定された。また、崩壊土石による天然ダムが多く造られ、大きな川だけでも34個の巨大なものが確認された。ダム上流の地域は水没などの3次災害が発生し、甚大な被害を齎した。天然ダムの決壊の恐れで、ダム下流の数百万人の住民が一時強制避難させたこともあった。四川大地震による死者・行方不明者数は87149人で、直接経済損失は8451億元(約13兆円)となった。損失の1/3は2次災害の土砂災害によるものと報告された(2008年9月4日に行った中国「国家汶川地震専門家委員会」記者会見資料より)。

なぜあれほどの土砂災害が発生したか、世界中の研究

者がこの地震による土砂災害における数多くの未解明現象に驚いた。特に、この地震による崩壊土石の高速・遠距離移動現象に関する調査研究を展開している。

本文は、まず、中国四川大地震に関する現場調査で得られた地震および土砂災害状況を紹介する。それから、崩壊土石の遠距離運動現象を解明するための「多重加速モデル」を提案し、遠距離移動のメカニズムに関する理論根拠を構築する。そして、振動台による斜面崩壊モデル実験を行い、地震動による崩壊土石の遠距離移動の条件を確認する。さらに、得られた貴重なデータ・知見や構築されたモデルと開発した不連続変形法DDA(Discontinuous Deformation Analysis)シミュレーション手法などを統合して、青川県東河口大規模斜面崩壊による土石遠距離移動事例をDDAシミュレーションで再現する。これらの研究を通して、崩壊土石の遠距離移動の地震条件と斜面条件を明らかにすることを目指す。

2. 崩壊土石の遠距離移動現象および被害状況

日本の「土砂災害防止法」（平成13年から実施）では、土砂災害警戒区域が、急傾斜地の下端から最大50m以内、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。すべての対策計画がそれに基づいて作成されていた。しかし、四川大地震では、崩壊土石の移動距離が1000mを越えたものが多く発生し、甚大な人命損失を齎した。

一例として、青川県東河口で起こった大規模な斜面崩壊は、崩壊土石が非常に遠距離移動し、二つ川を堰きとめ、天然湖が作られた（図-1）。崩壊斜面の頭部から本川までの距離は約2800mがある。

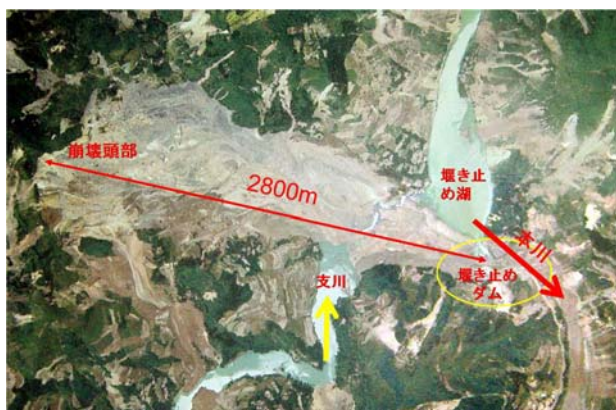


図-1 東河口大規模斜面崩壊による堰き止めダム（成都理工大学提供写真より加筆）



写真-1 地震前の東河口（撮影方向：図-1に堰き止めダムから崩壊斜面の方向。写真提供者：王功輝氏）

本川と支川周辺には4つの集落（写真-1）があったが、この大規模斜面崩壊によってその4つの集落が呑み込まれ、780名の方々が土石の下敷きになった（写真-2）。地元住民は写真-3の畑に堆積している土石（写真2）が地下から湧いてきたと信じ、後方の山の崩壊斜面から移動してきたという専門家の説明に対してとても信

じられないといった様子で首を振った。その理由は、地震直後に呑み込まれた集落の住民を救助しに行った人より、「堆積土石が熱すぎて踏まることができなかった」との証言があった。だから堆積土石が地下から湧いてきたと思われた。それは崩壊土石がいかに高速・遠距離移動したかを物語った。



写真-2 地震後の東河口（土石堆積の最大高さ：110m）

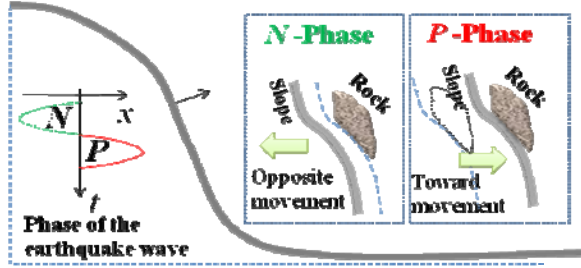


写真-3 東川口の畑（写真-1の下方中央部）

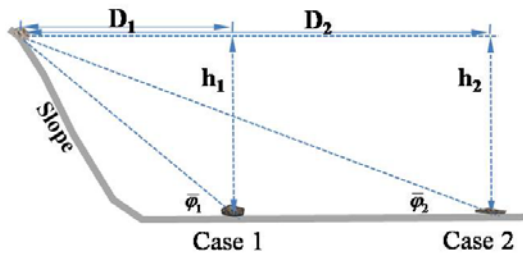
3. 多重加速モデル

なぜ地震による崩壊土石の高速・遠距離移動現象が発生するか、そのメカニズムを解明するために、本研究は初めて地震による崩壊土石運動の「多重加速モデル」を提案し、遠距離移動のメカニズムに関する理論根拠を構築する。「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ため、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ため、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。



図一2 地震波形をP-phaseとN-phaseに分けられる



図一3 視摩擦角による移動距離の表示 (Case1: 地震なし、Case2: 地震あり)

崩壊土砂の到達距離は斜面の高さの影響を除くために、図一3に示す平均動摩擦角（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る。地震動がない場合（Case1）は、崩壊土石の位置エネルギーは運動中の摩擦力による仕事に変換され、以下の方程式

$$mgh - \sum_i l_i mgk_i \tan \phi_{si} \cos \theta_i = 0 \quad (1)$$

より、平均動摩擦角 ϕ_1 が求められる。

$$\tan \bar{\phi}_1 = \frac{h_1}{D_1} = \sum_i w_i k_i \tan \phi_{si} \quad (2)$$

また、地振動がある場合（Case2）は、斜面の振動により崩壊土石がエネルギーを得るので、（1）式は以下のようなになる。

$$mgh + \sum_j \frac{1}{2} m v_{ej}^2 - \sum_i l_i mgk_i^* \tan \phi_{si} \cos \theta_i = 0 \quad (3)$$

（3）式より、平均動摩擦角 ϕ_2 が求められる。

$$\tan \bar{\phi}_2 = \frac{h_2}{D_2} = \sum_i w_i k_i^* \tan \phi_{si} - \sum_j \frac{v_{ej}^2}{2gD_2} \quad (4)$$

ここで、複雑斜面における土石の運動経路が分割され、一つ経路段（ i 段）においては直線の簡単斜面と見なしている。 D は土石の始点から終点までの水平距離、 h は土石の始点から終点までの鉛直高さである。また、 $w_i = D_i/D$ とし、将区間の重みとなる。地震動から得ら

れる速度 $v_{ej} = \int_{t_j}^{t_j+\Delta t} f(t)dt$ となり、積分区間はP-phase

で土石が斜面と接触している時間 Δt （図一3の赤い区間）である。

注目すべきことは、（3）式の動摩擦係数が（1）式と異なっている。理由としては、崩壊土石の空中運動時間や回転などの運動形態は地震動がある場合とない場合は異なるので、摩擦力の低減効果も異なると考えられる。

4. 振動台による模型実験

地震動による崩壊土石の到達距離の増加状況と増加条件を把握するために、振動台による落石の模型実験を行った。模型斜面は、1800mm(横幅)×3000mm(縦幅)の板で作製し、斜面角度は30°と35°で実験を行った。実験で用いた落石はそれぞれの形状が有する4種類ある。各落石において、0gal(常時)、200galおよび400gal(3Hzの正弦波)の3種類で実験を行った。各ケースにおいて、同じ条件で10回繰り返し実験を実行した。

35°の斜面において実験結果は表一1に示す。比較し易いために、移動距離は地震がない時の移動平均値で無次元化されている。 D_{200}/D_0 は200galの地震動、 D_{400}/D_0 は400galの地震動を施した場合の移動距離である。いずれの落石においては、最大、最小および平均移動距離の無次元値が示されている。

表一1 振動台模型実験の結果

Shape	Case	Moving distance	
		D_{200}/D_0	D_{400}/D_0
	minimum	1.2	2.0
	average	1.9	2.2
	maximum	2.3	2.7
	minimum	1.2	2.4
	average	1.9	2.9
	maximum	2.4	3.4
	minimum	0.9	1.0
	average	1.1	1.4
	maximum	1.4	1.7
	minimum	1.0	1.6
	average	1.1	2.2
	maximum	1.3	2.8

表一1 によって以下のことが確認される。1) 地震による落石の運動距離が長くなり、最大で3.4倍となっている。地震は崩壊土石の運動距離にかなりの影響があることが確認された。2) 400galの入力振動による移動距離は200galの入力振動による移動距離より大きい。

移動距離は地震動の強さに比例していることが確認された。3) 落石形状によって水平到達距離が異なった。形状5の落石は地震の影響が一番小さい、形状4は地震の影響が一番大きいである。それは、地震動による落石の運動形態が変わるので、形状4の落石は形状5より回転し易いと観察された。ただし、今回の模型実験では、斜面長さが十分ではなく、振動時間が短いので、振動から得られた水平速度があまり小さくで、この部分の検討はできなかった。

5. 数値シミュレーション

本研究で用いた不連続変形法DDA¹⁾は斜面の地盤特性、不連続面特性、外力（豪雨・地震）を考慮でき、斜面の大変形や崩壊土石の剛体運動（並行、回転）などを計算できる力学的解析手法である。著者らが既にDDAの実用ソフトウェアを開発し、実際にいろいろなケースの斜面崩壊シミュレーションを行った。本研究は、実測地震波形を外力、エアークション効果を境界条件として既存のDDAプログラムをさらに改良し、新しい動的な数値シミュレーション手法を開発する。改良したDDAプログラムを用いて、2008年四川大地震で起こった青川県東河口大規模斜面崩壊を数値シミュレーションし、崩壊土石の遠距離移動を再現確認した。図-4は崩壊断面図であり、図-5はDDAシミュレーションにより崩壊土石の移動状況を示している。1000galの地震動によりかなりの遠距離移動が確認された。

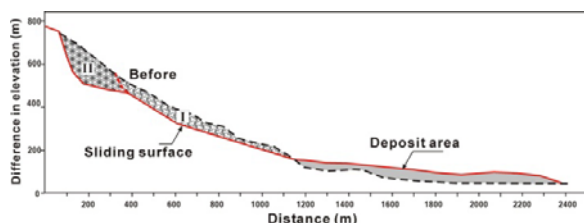


図-4 東河口崩壊斜面および堆積域断面図

5. 終りに

地震による崩壊土石の遠距離運動現象を解明するために、「多重加速モデル」を提案した。遠距離移動のメカニズムに関する理論根拠を構築した。振動台模型実験により、以下のことを明らかにした。

- 1) 地震は崩壊土石の運動距離にかなりの影響があることが確認された。また、入力加速度が増加すると、水平到達距離が増加したことが確かめられた。
- 2) 振動の土石への影響は最も大きいのは、落石の運動形態が変われ、跳躍や回転運動の形態の発生頻

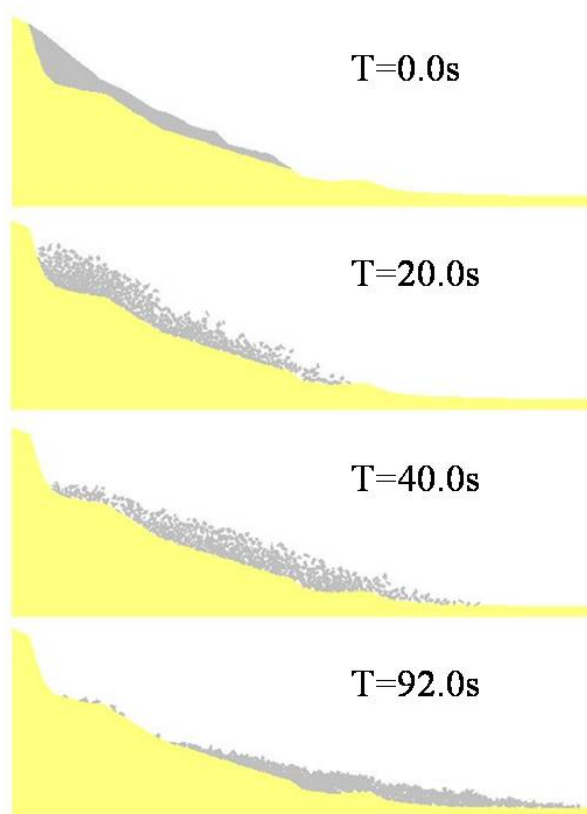


図-5 DDAシミュレーションの一例

度が高くなる。したがって、崩壊土石の形状が水平到達距離に差を与える。

- 3) 模型実験の場合、運動時間は2s以内で、あまり短いすぎであるので、高速・遠距離移動に与える影響は、水平速度より動摩擦低減が大きいと考えられる。

実測地震波形を外力、エアークション効果を境界条件として既存のDDAプログラムをさらに改良し、新しい動的な数値シミュレーション手法を開発した。改良したDDAプログラムを用いて、2008年四川大地震で起こった青川県東河口大規模斜面崩壊を数値シミュレーションし、崩壊土石の遠距離移動を再現確認した。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究（B）（代表者：陳光齊、課題番号：19310124）および環境省の地球環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-4(プロジェクトリーダー：三村信男)による成果の一部である。ここに感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) Shi, G. and Goodman.: Discontinuous deformation analysis, Proceedings of the 25th U. S. Symposium on Rock Mechanics. Evanston: AIME, pp.269-277, 1984.

MECHANISM OF HIGH SPEED & LONG-DISTANCE MOVEMENT OF THE DEBRIS FROM LANDSLIDE INDUCED BY EARTHQUAKE

Guangqi CHEN and Kouki ZEN

It is very important to understand the mechanism of high speed & long-distance movement of the debris from earthquake induced landslides so as to estimate the real Dangerous Area. In this study, we present a new model called Multiplex Acceleration Model for understanding the mechanism, and carry out model test by shaking table and numerical simulation to verify the new model. We have originally presented the multiplex acceleration model, which has been verified successfully by both laboratory model test and DDA numerical simulation. Up to 3.4 times of movement distance is observed for a 400gal earthquake comparing to no earthquake case. The movement distances are different from shape to shape because the earthquake vibration causes the rotation or flying motion easily contrary to the sliding motion in the case of no earthquake. The Donghekou landslide has been successfully simulated by the extended DDA.