

四川省 red-bed 分布域における降雨による浅層斜面崩壊に関する理論解析と土槽モデル実験

国際委員

長谷川 信介

1. はじめに

この記事執筆するにあたり、今回初めて IAEG の Bulletin に触れた。ここ数年の Bulletin を見ただけでも実に多様な分野の論文が掲載されており、論文タイトルだけを眺めていても、なかなか面白い。まだ Bulletin を読んだことのない方は、タイトルだけでも眺めてはいかがであろうか。なお、現在 Bulletin は完全オンライン化がなされており、With Bulletin の国際会員になれば全ての Bulletin を Web 上で閲覧・ダウンロードが可能である。

さて、今回は、第 77 巻、2018. November に掲載された「Theoretical analysis and model test for rainfall-induced shallow landslides in the red-bed area of Sichuan」¹⁾を紹介する。近年、地球規模での気候変動により世界各地で災害が多発している。中国でも豪雨による斜面災害が多発しており、斜面災害に関する研究も数多く行われている。斜面崩壊の危険度評価では GIS を利用した地形情報・地質情報に基づく統計的なデータ処理が行われることが多い^{2),3),4)}。ただ、最近では極端に激しい豪雨が頻発しており、統計データに頼るだけでなく、斜面崩壊メカニズムの解明も必要と感じている。そこで、この問題に関する中国の研究者の取り組みを紹介する。本論文が中国における斜面崩壊メカニズム研究の最先端に位置づけられるか定かではないが、中国での斜面問題の取り組み状況を知る一助になることを期待する。

2. 論文要旨

この論文は、浅層斜面崩壊が多発する red-bed 地域の斜面の変形・崩壊の特性を究明することを目的に、土槽モデル実験及び数値解析を実施したものである。

red-bed 地域の斜面崩壊地で採取した土試料を用いて作製した人工斜面に人工降雨を降らせ、3D レーザースキャナーで斜面表面の変形を斜面内の計測センサで湿潤状態

(体積含水率、間隙水圧、サクシオン)を計測した。また、新たに開発した修正 Green-Ampt 浸透モデル^{5),6)}による数値解析を実施した。その結果、降雨による表面侵食、斜面への降雨浸透（なかでも引張クラックによるチャンネルに沿った浸透）が斜面崩壊に関連することがわかった。また、基盤岩上面に地下水水位が存在する場合、あるいはチャンネルに沿った浸透により急速に基盤岩上面に地下水水位が形成された場合には、降雨が地表から徐々に浸透する場合に比べて容易に斜面崩壊を引き起こすことが分かった。

3. red-bed 分布域の地形・地質

red-bed は主に大陸地域に特徴的に分布し、酸化鉄等により赤色を帯びた砂岩や泥岩からなる、主として古生界から中生界の堆積岩類である。アメリカのアリゾナ地方が有名である。

中国全土で広く red-bed は分布する (図-1)。特に南西部地域 (V)、四川盆地および周辺地域では中生界の red-bed が広く分布し、四川省が代表的である。北西部地域 (IV) では、その 1/4 が黄土に覆われており、しばしば黄土と

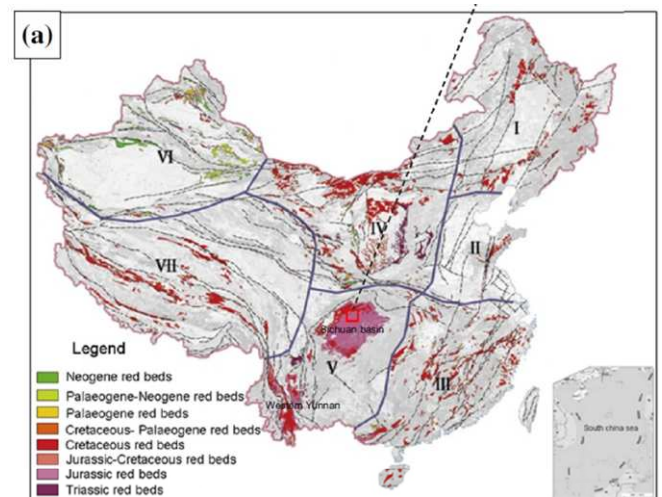


図-1 red-bed の分布域 (Wu, L. Z. et al, Fig. 1)

Reprinted by permission from Springer Nature,
License Number 4534000016387.

red-bed の境界で斜面崩壊が発生する。東部地域 (I, II, III) では、白亜紀と古第三紀の小さな盆地で見られる。西部地域 (VI) は新生界の red-bed が分布する。青海チベット高原 (VII) では、海成の red-bed が主要な断層帯に沿って分布する。

南西部地域(V)の red-bed は泥岩と砂岩の互層であり⁷⁾、傾斜は 3~5° と緩い⁸⁾。ここは強いテクトニックな場に位置し、節理が発達する。豪雨による斜面崩壊が頻発し、“地すべりが発生しやすい地域”と呼ばれている^{9,10)}。2011 年の豪雨では 250.4mm/日の降雨が観測され、四川省南江県では数千箇所でも浅層斜面崩壊が発生した。研究対象地は四川盆地の北部に位置する。この地域では、斜面崩壊は基盤岩に沿って発生している。red-bed はジュラ紀の砂岩で構成され、傾斜は 15~22° である。その上位には層厚 1~5m の崖錐層が堆積している。降水量は年間 1150mm である。多くの斜面で地下水位は崖錐堆積物の中に存在する。

南江県の小規模浅層斜面崩壊の事例としてグーフエンピン (Gufenping) を取り上げる。斜面崩壊の末端部と滑落崖との比高差は 101m, 斜面長は 250m, 崩壊幅は 50~120m, 土塊の平均層厚は 7.5m, 土量は $5.81 \times 10^4 \text{ m}^3$ である。崖錐層はシルト・粘土で構成され、基盤は砂岩である (注: グーフエンピン斜面崩壊は、崩壊規模・崩壊深さから見て日本の浅層崩壊とはイメージが異なることに留意して欲しい)。

4. モデル斜面による実験

図-2 にモデル斜面を示す。グーフエンピン斜面崩壊地の土塊から採取した試料を使ってモデルを作成した。モデルの幅は 50 cm, 土質はシルト, 傾斜角は 30°, 層厚は 15 cm, 高さ 75 cm である。基盤へは浸透しない構造となっている。土槽内には深度を変えて 4 箇所にもサクション計 (S1~S4) と土壌水分計 (W1~W4) を設置し、基盤上の 4 箇所にも間隙水圧計 (P1~P4) を設置した。実験では 72 mm/時の人工降雨を 6 時間降らせ、1 分間隔で計測するとともに、分解能 1 mm の 3D スキャナーで斜面表面の変状を計測した。図-3 に 3D スキャナーによる斜面変状を示す。斜面崩壊は以下のように進展した。

- ・ 図-3(b)法尻部の侵食と局所的な崩壊。
- ・ 図-3(c)法肩部にクラックが発生。クラックは次第に深く・広くなる。法尻部では侵食が進む。

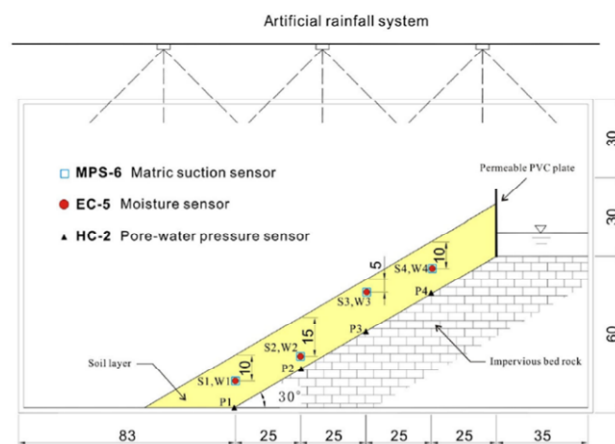


図-2 モデル斜面の模式図と計測センサの設置位置 (Wu, L. Z. et al, Fig. 3). Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4534000016387.

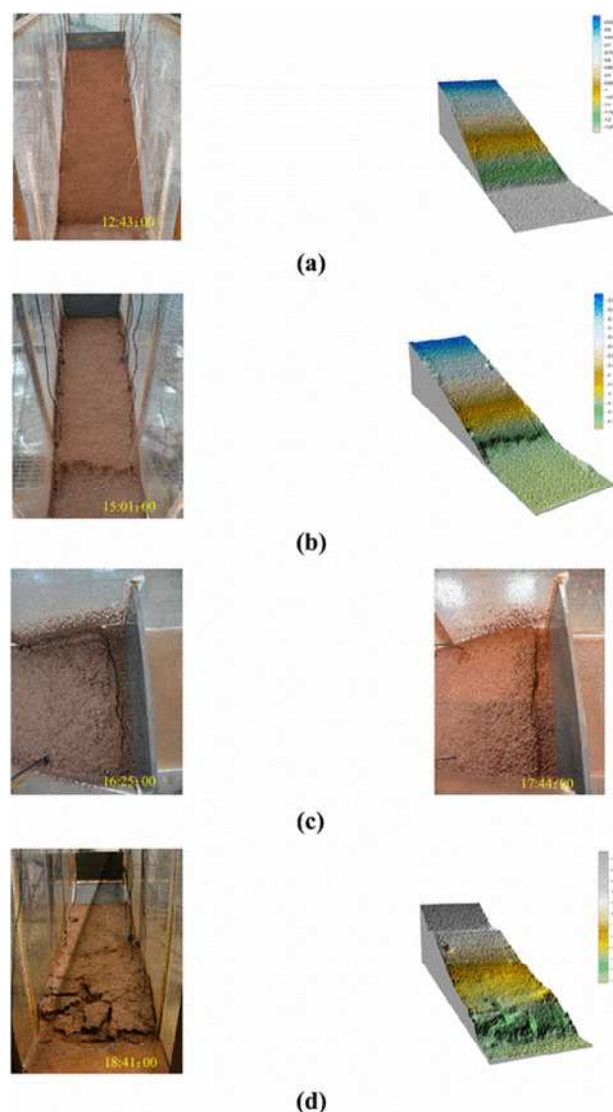


図-3 崩壊の進展。(a) 初期状態, (b) 法尻の侵食と局所崩落, (c) 法肩の引張クラック, (d) 崩壊 (Wu, L. Z. et al, Fig. 9). Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4534000016387.

- ・ 図-3(d)崩壊. 累積雨量の増加とともに地下水位が上昇, 斜面浅部の飽和度が上昇. 基盤面においてすべり破壊が発生. 法尻は隆起し数多くの引張クラックが発生.

5. 降雨浸透解析

Wetting front (浸潤前線) が各センサに到達した時間と Green-Ampt 浸透モデルによる計算結果の比較を行った. なお, S4 の計測データは法尻に位置し引張クラックの影響を受けていると考えられるため検討から除外した. 表-1 に計算結果と観測値の比較を示す. 両者は良く一致している. このことから, red-bed 地域における斜面における降雨浸透の研究に, 今回のモデルパラメータを使うことができると考えられる.

表-1 Wetting Front の到達時間: 観測値と計算値の比較¹⁾

センサ	深さ (cm)	Wetting Front の到達時間		乖離 (分)
		計算値	観測値	
S3	5	26.6	25	1.6
S1	10	106.2	105	1.2
S2	15	238.9	233	5.9

6. 浅層斜面崩壊モデル解析による考察

グーフエンピンが位置する南江県の red-bed 地域における浅層斜面崩壊は, その多くが層厚 1~5m, すべり面の傾斜は 10~30° である. そこで, 無限斜面の解析モデルでは, すべり面の傾斜角を 20°, red-bed 層厚を 5m として検討を行った. その他の解析パラメータは室内試験結果等により設定した. 数値解析の結果は以下の通りである.

- ・ 基盤岩との境界がすべり面となる場合において, 基盤岩上面に地下水位がある場合には, Wetting front が 1.82m のとき崩壊が発生する. このとき, red-bed 層内の安全率は 1.56 であり red-bed 層内では崩壊は発生しない.
- ・ 基盤岩との境界がすべり面となる場合において基盤岩上面に地下水位がない場合には, 崩壊は発生しない.
- ・ 基盤岩上面に地下水位がない条件で Wetting front で崩壊が発生する場合 には, Wetting front が 4.32m で崩壊が発生する.

以上のことから, 基盤岩上面に地下水位がある場合に,

もっとも早く崩壊が発生することがわかる (数値については, 原著を参照して欲しい).

7. 結論

土槽モデル実験と数値解析により, 四川省の red-bed 地域では, 降雨による浅層斜面崩壊は以下のように発生することがわかった.

- ・ 不飽和層において, 降雨浸透により飽和度が上昇し, サクションが失われる結果, 土の強度が低下する. 土槽モデル実験の結果によると, 降雨時の表面流による侵食に関連して斜面の変形が生じる. 斜面の変形は時間とともに拡大する. 崩壊の過程は, 法尻における侵食と局所的な崩壊, 法尻における引張クラックの形成, 浅層崩壊の 3 段階で進展する.
- ・ 引張クラックなどによる斜面への優先的な降雨浸透が生じるチャンネルがなく, 初期の地下水位が非常に低い (基盤岩上面に地下水位がない) 場合には, red-bed 層内において Wetting front に沿って崩壊が発生する. 一方, 基盤岩上面に地下水位がある場合には, red-bed 層内ではなく基盤岩上面がすべり面となって崩壊する.

8. おわりに

この論文は, red-bed 分布地域において発生する斜面崩壊の多くが崖錐堆積物と基盤岩との境界で発生する原因について, 土槽モデル実験と数値解析で明らかにしたものである. ただ, グーフエンピンの斜面崩壊は日本で言う“地すべり”に相当し, 土槽モデルや数値解析では, いわゆる日本で言う浅層崩壊を扱っており, 発生している事象が異なるのではないかという疑問を少々感じる.

さて, 日本では斜面崩壊に関する研究は古くから数多く行われている. 本論文の参考文献を見ると, そのほとんどが 2000 年以降の中国の研究者によるものであり, この種の研究は中国ではあまり行われてこなかったのかもしれない. 本論文を読んで, 日本の研究が滞っているというより, 日本の発信力が滞っていると私には感じられた. 本稿を読んでいただいた読者はどのような感想を持たれたであろうか.

参考文献

- 1) Wu, L. Z., Zhang, L. M., Zhou, Y., Xu, Q., Liu, G.G., and Bai, L.Y. (2018): Theoretical analysis and model test for rainfall-induced shallow landslides in the

- red-bed area of Sichuan, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), pp.1343-1353.
- 2) Ismail, E. H., Rogers, J. D., Ahmed, M. F., Usery, E. L., and Abdelsalm, M. G. (2018): Landslide susceptibility mapping of Blue Nile and Tekeze River Basins using oblique rainfall-aspect rasters, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), pp.1311-1329.
 - 3) Qiu, H., Cui, P., Regmi, A. D., Hu, S., Zhang, Y., and He, Y. (2018): Landslide distribution and size versus relative relief (Shaanxi Province, China), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), pp.1331-1342.
 - 4) Zhao, H., Tian, W., Li, J., and Ma, B. (2018): Hazard zoning of trunk highway slope disasters: a case study in northern Shaanxi, China, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), pp.1355-1364.
 - 5) Green, W. H. and Ampt, G. A. (1911): Studies on soil physics, Part I. The flow of air and water through soils, *Journal of Agricultural Science*, 4, pp.11-24.
 - 6) 長谷川周一 (2007) : 古典を読む : W.H.Green and G.A. Ampt 著「土壌物理に関する研究 第1部 土壌中の空気と水の流れ」, 土壌の物理性, 105, pp.111-115
 - 7) Zhang, M., Yin, Y., Huang, B. L. (2015): Mechanisms of rainfall-induced landslides in gently inclined red beds in the eastern Sichuan Basin, SW China. *Landslides*, 12(5), pp.973-983
 - 8) Fan, X. M., Xu, Q., Zhang, Z. Y., Meng D. S., and Tang R. (2009): The genetic mechanism of a translational landslide. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 68(4), pp.231-244.
 - 9) Jian, W. X., Wang, Z. J., and Yin, K. L. (2009): Mechanism of the Anlesi landslide in the Three Gorges Reservoir, China, *Engineering Geology*, 153, pp.105-113.
 - 10) Huang, R. Q. (2012): Mechanisms of large-scale landslides in China. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 71(1), pp.161-170.