

39. 断層崖斜面の形状と崩壊パターンに関するモデル実験

Analogue experiments of fault scarp geometry and patterns of slop failures

○山田泰広 (京都大学), 中桐寛仁 (同), 松岡俊文 (同)
Yasuhiro Yamada, Hiroto Nakagiri, Toshifumi Matsuoka

1. はじめに

斜面崩壊は、種々の素因により不安定化した斜面が降雨や地震動などを誘因として発生する自然現象である。本研究では、斜面崩壊の地質的な素因の一つとして逆断層活動に注目し、断層活動に伴って形成される断層崖斜面の形状とそこで観察される斜面崩壊パターンとの関係を、アナログモデル実験によって検討した。

2. 調査手法

本研究では、アナログモデル実験により斜面を再現し、実験過程を記録した画像をデジタル画像相関法 (Digital image correlation, DIC 法) によって処理することで詳細な運動像と歪像の解析を行った。

2.1. アナログモデル実験

アナログモデル実験では、Hubbert¹⁾の相似律で規定される条件に基づいた実験を行うことで、現象を物理的等価に縮小・再現することが可能である。最近の詳細な物性試験に基づく検討²⁾によって、砂やガラスビーズなどの乾燥粒状体を実験材料として用いることで、地質構造とその時系列変化を数時間程度・数 m スケールに縮小して再現・観察できることが確認されている。

本実験で使用した装置は、側面が透明アクリル製、それ以外の部材はジュラルミン製の箱状で、両側の壁が可動式である (図 1)。箱の初期サイズは、長さ 1m、奥行き 30cm、高さ 25cm である。まず十分剛性の高い部材で作成した基盤とそれを被覆する堆積層 (乾燥豊浦砂) を地質モデルとして設定した。砂層の初期厚さは 6cm で、空中落下法を用いて敷設した。基盤中にあらかじめ存在させておいた逆断層 (傾斜角 30 度) に強制変位を与え、この断層変位が砂層中に伝播し、モデル表面に達した際に形成された斜面 (断層崖) をモデルの上方と側方からそれぞれ観察した (図 1)。なお、今回の実験では変形を準静的とし、逆断層変位以外の影響が生じないように工夫した。

2.2. デジタル画像相関法 (DIC 法)

DIC 法では、ある時刻と次時刻に取得されたデジタル画像の輝度値パターンに対して共分散関数を用いて相関性を計算することで、画像上の対象物の変位場とその時系列変化を解析することが可能である (図 2)。この手法は流体挙動を解析する目的で使用されてきたが、固体変形に関する解析へも応用範囲が拡大している³⁾。

本実験では、モデル上方から 2 台、側方から 1 台、計 3 台のデジタルカメラを用いて実験過程を一定時間間隔で撮影した。この画像を解析することで、モデル表面に発達する斜面の 3 次元形状と斜面上に発生する崩壊の形態と発達過程、さらに断層活動との関連について詳細に観察した。

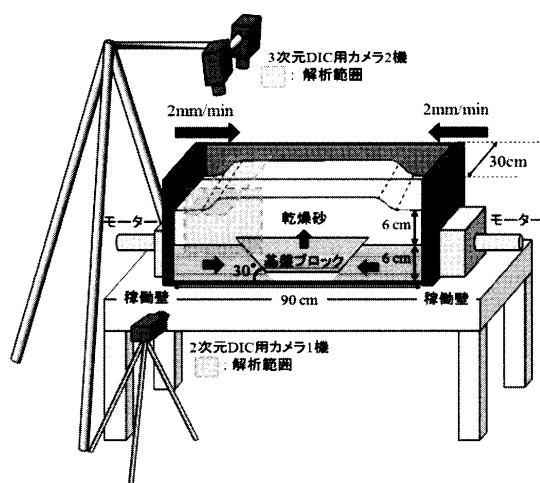


図 1 実験装置

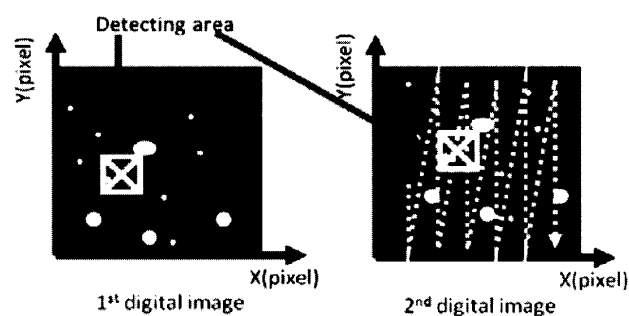


図 2 画像相関法の概念図

3. 結果と議論

実験結果を画像解析した結果、砂層中に形成された断層面の断面形態は浅部で緩傾斜化する「上に凸」の曲面形状を示すこと、この断層がモデル表面に形成させた斜面上で頻繁な崩壊現象が観察されること、一般にこの断層は斜面の下半部から下端部でモデル表面に達することなどが観察された (図 3)。この崩壊は、斜面下半部で高頻度に発生する小規模崩壊と斜面上端部で低頻度に発生する大規模崩壊の 2 種類に分類可能である (図 4)。

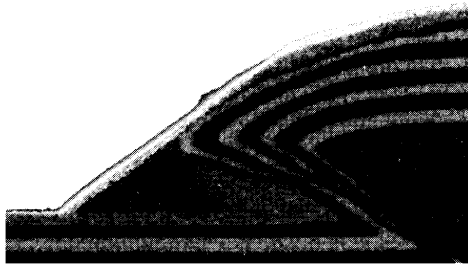


図3 側面から見たモデル実験結果



図4 大規模斜面崩壊（左側）と小規模崩壊（右側）

崩壊の場所と規模を詳細に解析した結果、小規模崩壊が連続した後に大規模崩壊へ進展する現象が観察された。小規模崩壊は断層活動によって直接的に引き起こされるせん断変形に伴うものと考えられるが、この斜面下半部での頻繁な崩壊によって斜面上半部が不安定化することで、斜面全体を覆う大規模崩壊が誘発されると考えられる⁴⁾。また、斜面崩壊はその規模に係らず一般に側方へ移動する傾向が認められた。この原因は、斜面崩壊の発生によってその両側が不安定化し、すぐ近傍で次の斜面崩壊が引き起こされるためであろう。なお断層が上に凸の曲面形状を持つ場合には、この断層変位に伴って上盤に小規模な伸張応力場が発生する⁵⁾ことから、この応力場に伴う微小正断層が大規模崩壊の頂部位置を規定している可能性がある。

また、モデル上方から撮影した画像ペアを用いてモデル表面の三次元起伏を計測し、斜面傾斜角を計算した結果、斜面の下端部と上端部に急傾斜角が存在することが分かった（図5）。下端部のものは断層変位に伴う急傾斜化であり、実験の当初から顕著である。一方、上端部のものは大規模崩壊の頂部に相当し、ある程度断層が変位した後に顕在化することが読み取れた。

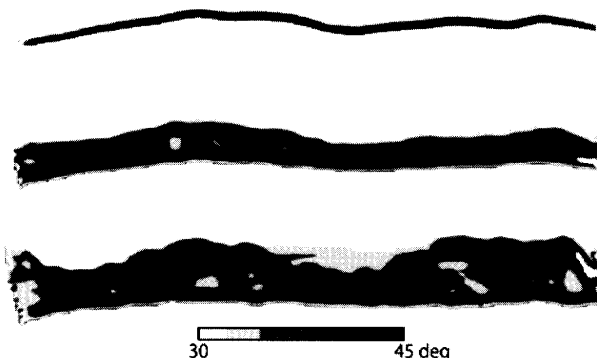


図5 斜面の成長過程における傾斜角分布

今回の実験では奥行き方向に一樣に強制変位を断層に与えているが、崩壊現象は斜面に均一に発生するわけではなく、連鎖反動的な崩壊発生や、大規模崩壊の前兆的な小規模崩壊などが観察された。このことから、斜面崩壊堆積物は複雑な三次元分布を持つ可能性が予想され、単一露頭や単一ボーリング調査などでの観察からは正確な崩壊現象の履歴を評価できない可能性を示唆している。

本検討では、断層変位による斜面の高傾斜化に伴う崩壊現象が再現された。これは崩壊メカニズムの検討としては単純なものであるが、様々なパターンが観察できた点は興味深い。今回は実験材料を完全乾燥状態で実施したことから、間隙流体が単一である海底地すべり現象への応用が可能であるが、内部摩擦や水中密度、間隙流体の圧力や粘性などの点で実際の海底堆積物とは条件が異なる点に注意が必要である。

4. まとめ

単純なモデル実験の結果、斜面崩壊には断層活動に伴う小規模崩壊とそれによって励起される大規模崩壊の2種類が存在すること、大規模崩壊の形成場所には規則性が認められること、斜面の微細地形から断層の位置や活動性などを推定できることなどが明らかになった。これらを用いることにより、大規模斜面崩壊の危険性を評価できる可能性が示唆される。

文献

- 1) Hubbert, M.K. (1937): Theory of Scale Models as Applied to the Study of Geologic Structures, Bulletin of the geological society of America, 48, pp.1459-1520.
- 2) Lohrmann, J., et al. (2003): The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges, Journal of Structural Geology, v. 25, no. 10, pp. 1691-1711.
- 3) Adam, J., et al. (2005): Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques, Journal of Structural Geology, v. 27, pp. 283-301.
- 4) Yamada, Y., et al. (2010): Submarine landslides at subduction margins: Insights from physical models. Tectonophysics, 484, pp. 156-167.
- 5) Yamada, Y., McClay, K. (2004): 3-D Analog Modeling of Inversion Thrust Structures. In: McClay, K.R. (Ed.), Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems. AAPG Memoir, 82, pp.276-301.