

傾斜センサを用いた斜面崩壊監視における 崩壊時刻予測に与える要因の考察

応用地質株式会社 ○矢部 満, 根本 雅夫, 石川 貴規, 森川 倫人
防災科学技術研究所 酒井 直樹

1. はじめに

近年豪雨による土砂災害は、降雨量の増加も相まって、現代社会における人間生活へのインパクトは今後大きくなる可能性が高い。特に、土砂災害防止法で対象となっている3種類の土砂災害の一つ“急傾斜地の崩壊”は、他の災害に比べて対象箇所数が格段に多く、人口が集中した都市部にもその警戒区域が数多く分布していることから、今後その発生による影響拡大が懸念される。

この急傾斜地崩壊を各種センサにより早期検知し、崩壊発生前に安全な場所に退避する取り組みは、近年のIoT、デジタル通信技術の進展も手伝って加速している¹⁾。それらのうち傾斜センサはコンパクトさ、設置のしやすさから、利用例も増えている。一方で、現象が他の土砂災害に比べて急速に発生する斜面崩壊は、素因としての地形・地質の多様性、不均一性や誘因としての降雨の空間分布特性の影響を複雑に受け、退避の目安となる管理基準値設定を一律に扱うことは現状難しいとされてきた。この件に関する系統的な研究も現状少ないといえる。

本研究では、上述の課題を踏まえ、豪雨時の斜面の表層崩壊を対象とし、高分解能の傾斜センサを急傾斜地に適用するとともに、リアルタイム観測データに基づき、信頼性の高い崩壊時刻の予測手法の確立、管理基準値設定を最終目標とした。本報文では、その成果に影響を与える要因について、実物大盛土を利用した人工降雨実験により斜面崩壊を再現して得られた知見を報告する。

2. 実物大盛土による降雨実験について

豪雨による急傾斜地の崩壊を再現し、斜面に設置した傾斜センサによる測定データから、崩壊時刻予測や管理基準値設定に与える要因を把握するため、防災科学技術研究所が保有する大型降雨実験施設を利用した実物大盛土斜面を対象とした降雨実験を行った。図-1に実物大盛土の諸元と傾斜センサ設置状況を示す。また、図-2に実験で与えた降雨条件を示す。

傾斜センサを設置した盛土斜面勾配は1:1.2 (約40度)、その材質は、筑波山麓周辺で採取した砂混じりローム質土を主体した建設発生土の混合土である。盛土はバックホウによる盛り立て、転圧、法面整形で築造した。均質な築造を心掛けたが、厳密な締固め管理は行わなかった。盛土は、築造後約1年屋外に放置後に実験に供した。

適用した傾斜センサは、2軸の加速度センサ (傾斜分解能0.001度、測定範囲±30度) を長さ約1mのロッド先端

内に組み込んでいる。ロガー機能もセンサと同一箇所に組み込んでおり、深度0~1m付近の気温の影響を極力排除した平均的な斜面変動を傾斜量として把握できる。

傾斜センサ設置位置は、その位置が崩壊時刻予測に与える影響を確認するため、図-1に示す3測線上でそれぞれ法肩、法中央、法尻の3箇所、合計9箇所とした。また、測定間隔は1分毎とし、データ整理は10分毎で行った。

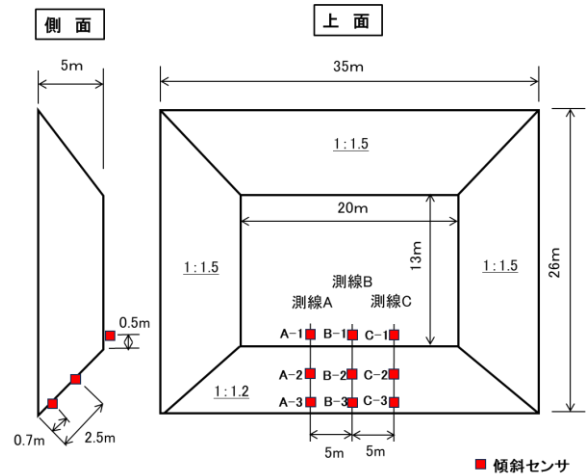


図-1 実物大盛土の諸元と傾斜センサ設置位置

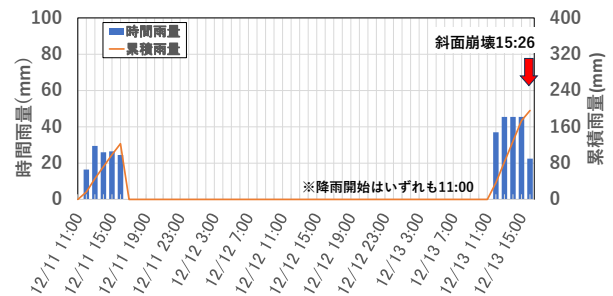


図-2 実験で与えた降雨条件

3. 実験結果について

図-2に示すように、降雨条件は、事前降雨 (時間雨量25~30mm、累積雨量124mm) の後、1日間を空けて本降雨 (時間雨量約50mm) をとした。斜面崩壊は、本降雨開始後4時間26分後、累積雨量195mm (土壌雨量指数196) に達した時点で発生した。図-3は、斜面正面から見た崩壊状況のスケッチ図である。斜面中央 (測線 B) から斜面右 (測線 C) 側にかけては概ね均一にすべり破壊が起きており、崩壊側部の非崩壊部分との境界が明確となっている。一方で斜面左 (測線 A) 側は、崩壊側部の非崩壊部分との境界が明確ではないことが分かる。

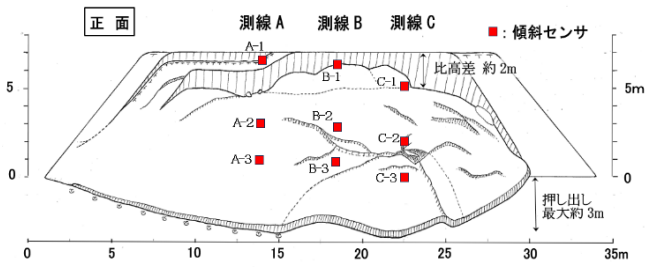


図-3 崩壊後の斜面スケッチ図

図-4は、3測線の法肩、法中央、法尻に設置した傾斜センサの累積傾斜角（斜面方向）の経時変化図である。グラフでプラス方向の変化は法尻方向の変位モード、マイナスはその逆で法肩方向に転倒するような変位モードを示している。いずれの経時変化も土のクリープ的な挙動を示している。ここで特徴的なのは、崩壊が比較的均一なすべりとして現れている測線 B および C では、法中央のセンサが法肩方向の変位モード、法肩と法尻は崩壊直前までは法尻方向の変位モードであることである。一方、非崩壊部分との境界が明瞭でない測線 A については、3箇所のデータはいずれも転倒モードであった。この崩壊の不均一性やセンサ設置位置がどのように崩壊時刻予測に影響するかを次章で考察する。

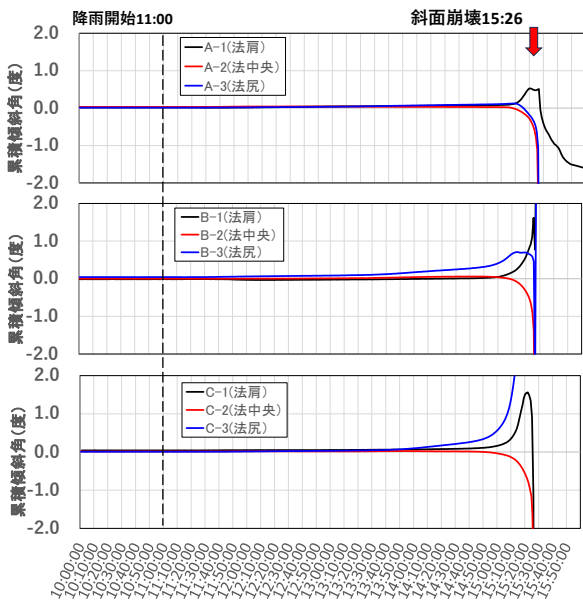


図-4 各測線の傾斜センサの累積傾斜角経時変化

4. センサ設置箇所が崩壊時刻予測に与える影響について

菅原²⁾は、国内外の傾斜センサのデータを整理し、傾斜角速度から斜面安定度の判定基準を提唱している。このうち、「嚴重警戒、崩壊覚悟」から「緊急避難」への対応レベルの判定基準の値を 10^{-2} rad/day ($\approx 0.02^\circ$ /hour)としている。一方、瀬古³⁾も同じ観点で整理した結果を踏まえ、「警戒・応急対策・通行止検討」から「嚴重警戒・通行止」への判定基準値を 0.1° /hourとしている。両者の対応内容と基準値は必ずしも一致するものではないが、

センサ設置位置の崩壊時刻予測に与える影響を確認するための“尺度”として、本研究では2つの値を便宜的に利用した。そして、各尺度に対する観測値超過時刻から崩壊発生時刻までを“崩壊余裕時間”として整理した。整理結果を表-1に示す。

表-1 センサ設置位置と崩壊余裕時間

傾斜角速度の超過尺度	超過時刻/崩壊余裕時間(分)※崩壊時刻15:26					
	測線A		測線B		測線C	
	A-1(法肩)		B-1(法肩)		C-1(法肩)	
0.02° /hour	12:20	186	11:50	216	14:10	76
0.1° /hour	15:10	16	15:00	26	14:50	36
	A-2(法中央)		B-2(法中央)		C-2(法中央)	
0.02° /hour	11:50	216	13:30	116	13:40	106
0.1° /hour	15:10	16	15:00	26	15:00	26
	A-3(法尻)		B-3(法尻)		C-3(法尻)	
0.02° /hour	13:00	146	11:40	226	12:00	206
0.1° /hour	15:20	6	13:50	96	14:00	86

センサ設置位置と2つの尺度による余裕時間を比較した結果、すべりが一様でなかった測線 A を除き、法尻が他の場所に比べて各尺度に対する観測値超過が早期発現しやすい。このことは、斜面法尻で傾斜観測を行えば、崩壊に対して比較的余裕を持った警戒避難行動が可能になることを示唆するといえる。一方、設置位置毎で異なる変位モードに応じ崩壊余裕時間の違いはあるが、 0.02° /hour 超過後の余裕時間は最短でも C-1 (法肩) の76分であり、この時を起点とした警戒避難行動は時間的に十分可能であるといえる。この場合、今回使用した高分解能の傾斜センサの使用に限るが、警戒避難行動の端緒としての崩壊前兆現象の判定基準値 $=0.02^\circ$ /hour は妥当な数字であるといえる。菅原²⁾は傾斜角速度値からの崩壊余裕時間の定式化も行っており、この式からの崩壊時刻予測も期待できる。しかし、一連の妥当性評価は、センサ設置位置や降雨条件などの他要因の影響確認など、今後の課題といえる。

5. まとめ

本報文では、センサ設置位置が崩壊時刻予測に与える影響について、実物大盛土斜面の降雨実験結果より、崩壊余裕時間の比較により調べた結果を示した。今後、本関連技術を防災目的に広く社会実装していくために、自然斜面についても同じ観点で調べたい。

《引用・参考文献》

- 傾斜センサーによる斜面監視モニタリングのマーケット開拓コンソーシアム (2023) : 全地連 新マーケット創出・提案型事業 傾斜センサーによる斜面監視モニタリングのマーケット開拓 報告書。
- 菅原紀明 (2000) : 地表面傾斜計を用いた岩盤斜面の安定度評価法の提案, 応用地質技術年報 No. 20.
- 瀬古一郎 (2015) : 斜面災害防止のための早期警報システムの開発と運用, 東京大学博士論文。