

積雪寒冷地にある実斜面の動態観測とその評価

Field monitoring of road embankments in cold regions and its evaluation

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院

○学生員 福津 向基 (Koki Fukutsu)
正会員 川村 志麻 (Shima Kawamura)
正会員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、我が国では、地球温暖化に起因すると考えられるゲリラ豪雨や台風が多発し、斜面災害を引き起こしている。さらに、北海道のような積雪寒冷地では、凍結融解作用ならびに融雪水に起因した融雪期特有の土砂災害も発生している。

本研究では、降雨や融雪水の影響を受ける道路盛土の力学挙動を明らかにすることを目的とし、実斜面の動態観測を行っている。動態観測では、土壌水分と盛土内の地温の変化を土壌水分計(ADR タイプ)によって計測し、地下水位の変動を坑内水位計によって調査している。得られたデータに基づいて、盛土の安定性評価について考察している。また、室内降雨模型実験を実施し、斜面崩壊機構と土壌水分等との因果関係を明らかにしている。

2. 計測地点および計測機器の位置と対象斜面の状況

計測地点(A地点, B地点)は、北海道札幌市の一般国道230号中山峠にある道路盛土斜面である。その位置を図-1に示す。盛土高と勾配は、それぞれ約5mと約30度である。一般国道230号中山峠では、2012年5月²⁾と2013年4月²⁾に道路盛土の斜面崩壊が発生している。両災害ともに融雪期の短時間における降雨と融雪水が原因とされている。災害箇所の付近は地すべり地形が多く、今回対象とした2箇所の盛土斜面は、2012年と2013年で崩壊した斜面の近隣に位置する。なお、本研究では土質的に異なる2地点を選定した。

対象斜面では、降雨・融雪水の影響による盛土内の含水量と地温の変化を定量的に評価するため、土壌水分計(ADR タイプ)を写真-1に示すように埋設した。盛土内の土壌水分計センサーの設置位置(断面)を図-2に示す。各地点のセンサーは1m毎に深さ5mまで5個設置している。地下水位は坑内水位計により観測し、ここでは降雨と融雪に起因する変動の特徴を調査した。観測は2013年11月9日から開始し、データは1時間毎に収集している。

計器設置時のボーリング試料を用いて、物理・力学試験を行っている。粒度試験の結果より、深さ5mまではそれぞれ砂質系(A地点)とシルト系(B地点)の土試料で構成されていることが明らかにされた(図-3 参照)。それぞれの物理特性・力学特性を表-1に示す。表より、両地点の自然含水比 w_n は36.0%から42.7%にあり、液性指数 w_L が比較的高いことがわかる。力学試験では、A地点とB地点の一軸圧縮強さ q_u はそれぞれ95.2kN/m², 102.1kN/m² となり、同程度の値を示すことが明らかにされた。



図-1 国道230号における動態観測地点



写真-1 計測機器の設置状況

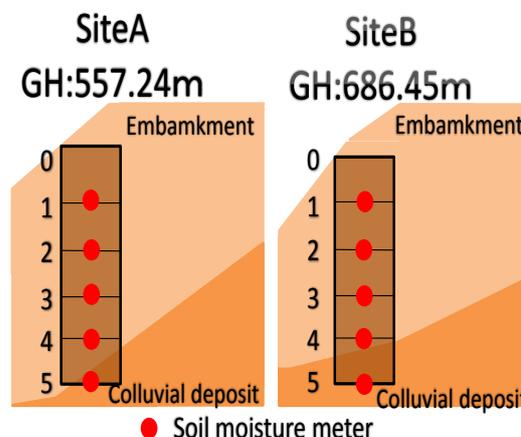


図-2 計器の設置位置と断面図：盛土(礫混じりシルト)、崖錐堆積物(礫混じりシルト)

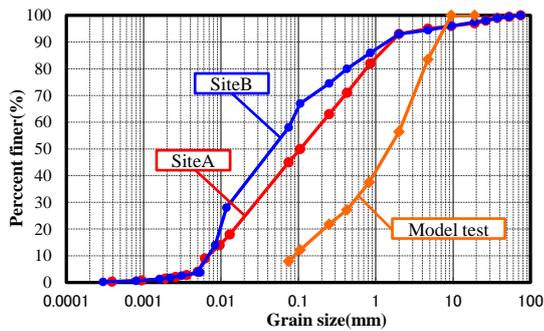


図-3 SiteA, SiteB と模型実験試料の粒径加積曲線

表-1 (a) A 地点, (b) B 地点の示標特性

| (a) | Depth (m) | ρ_s (g/cm ³) | W _N (%) | W _L (%) | W _P (%) | ρ_d in-situ (g/cm ³) |
|-----|-----------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | 1 | 2.677 | 36.03 | 85.90 | 54.88 | 1.728 |
| | 2 | 2.679 | 40.44 | 97.25 | 41.07 | 1.742 |
| | 3 | — | — | — | — | — |
| | 4 | 2.671 | 41.50 | 85.40 | 44.48 | 1.747 |
| | 5 | 2.694 | 42.65 | 106.40 | 70.56 | 1.751 |
| (b) | Depth (m) | ρ_s (g/cm ³) | W _N (%) | W _L (%) | W _P (%) | ρ_d in-situ (g/cm ³) |
| | 1 | 2.682 | 36.99 | 89.55 | 46.77 | 1.731 |
| | 2 | 2.702 | 38.20 | 88.60 | 47.47 | 1.738 |
| | 3 | — | — | — | — | — |
| | 4 | 2.716 | 41.41 | 89.20 | 53.29 | 1.752 |
| | 5 | 2.745 | 42.52 | 98.50 | 54.08 | 1.769 |

| | Consolidation yield stress, p_c (kN/m ²) | Permeability (Average), k (m/s) | Unconfined compressive strength, q_u (kN/m ²) |
|-----|--|-----------------------------------|---|
| (a) | 156.8 | 2.18×10^{-8} | 95.1 |
| (b) | 68 | 5.55×10^{-7} | 102.1 |

3. 観測結果と考察

図-4(a)は、今回対象とした盛土斜面付近の最高と最低気温（喜茂別観測所）、積雪（大二股観測所）の変化を示したものである。図より、現地調査の開始付近に積雪が始まり、積雪深がピークとなる3月中旬から急激に融雪が進んでいることが確認される。最終的に5月下旬になると積雪がゼロとなっている。

図-4(b)は、降水量の変化を示したものである。ここで言う換算降水量とは、雪面低下法を用いて融雪を降水と換算し、アメダスの降水（喜茂別観測所）との和で表したものである。図より、融雪期である5月中旬の降水量が高いことがわかる。これは融雪に敏感に反応したものであろう。

図-5(a), (b)は、A 地点と B 地点の地温、水温の変化を示したものである。ここで水温とは、地下水位以深の温度を示す。図より、浅層領域では気温との連動が大きいことがわかる。特に 1m の地温に着目すると、4月中旬における地温上昇が融雪時期とよく一致している。3m と 5m 地点においても気温・水温の上昇時期に違いは認められるものの、1m の挙動と同傾向を示す。A 地点と B 地点の 3m と 5m の比較では、A 地点の方が B 地点よりも上昇時期が早い。シルト系よりも砂質系の土試料の熱伝導率が小さいことが影響していると推測される。

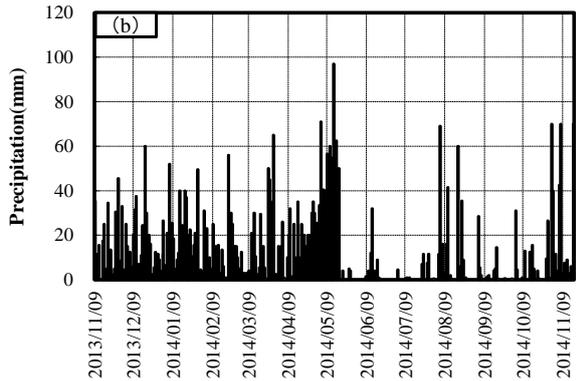
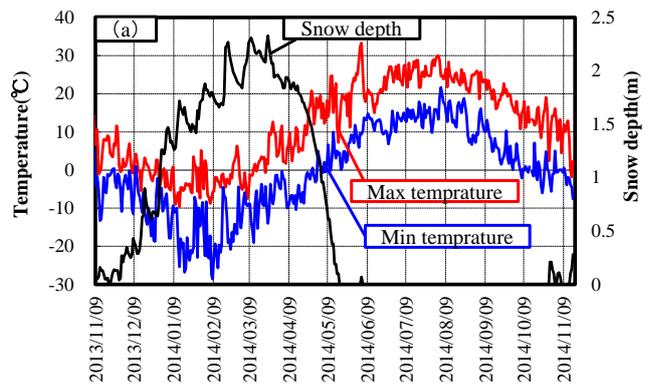


図-4 観測結果：(a) 気温、積雪、(b) 換算降水量

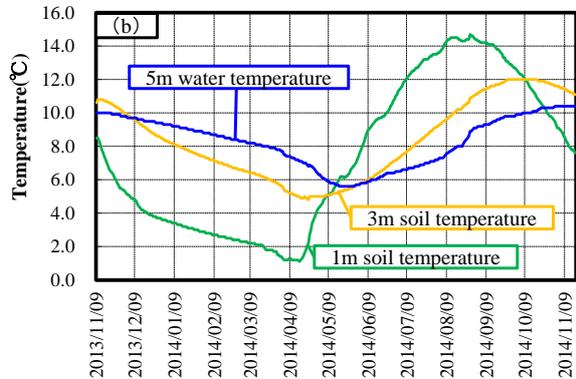
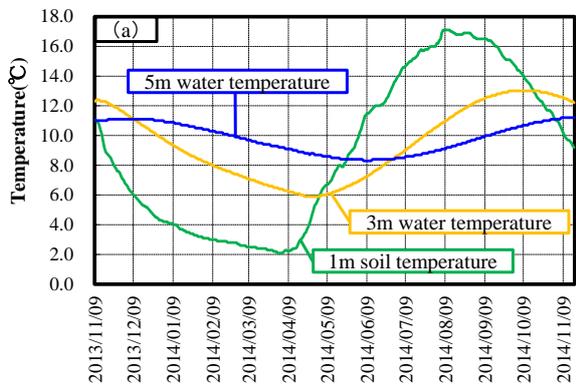


図-5 地温と水温の変化：(a) A 地点, (b) B 地点

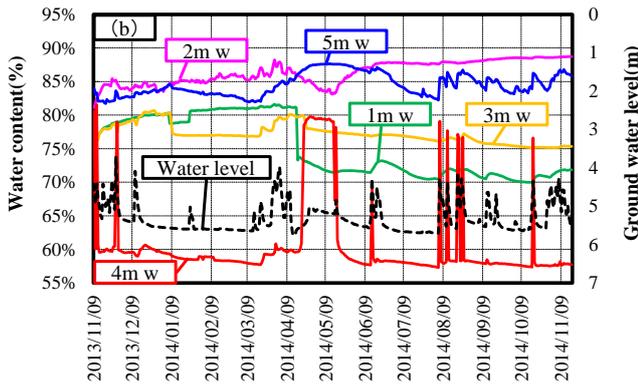
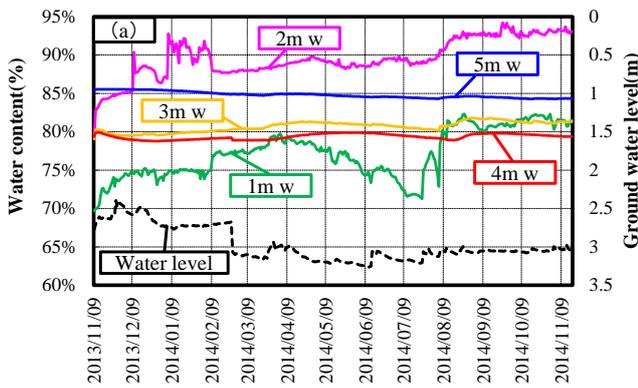


図-6 含水比と地下水位の変化：(a) A地点，(b) B地点

図-6(a)，(b)は、両地点の含水比，地下水位の変化を示したものである。以下にそれらの特徴を示す。

A地点では、3m，4m，5mの含水比は地下水位以深にあるため、その変動はほとんどない。一方、1m，2mの含水比は降水，融雪の影響を敏感に受けている。例えば3月中旬では、融雪水と考えられる影響で1m，2mの含水比が上昇し、また、その影響により地下水位も3月下旬に上昇している。一方、夏期(7月下旬)では、降水の影響による含水比の上昇が確認される。融雪期との挙動の比較では、夏期の方が、浅層領域(1m，2m)の含水比の増加率が高い傾向にある。これは、融雪期では積雪下部層が一部不透水層の役割を果たし、降水の地盤内への流入を妨げていることが予想される。今後、積雪下部層の状況確認は必要ではあるものの、このように季節によって地盤内への浸透パターンが異なることに注意が必要である。なお、2月末に地下水位が急減している理由は、計測付近で排水ボーリング工を設置したためであり、その対策効果が表れたものである。

B地点では、地下水位が低いため、全ての地点で降水，融雪の影響を受け易い。融雪期の3月中旬では、いずれの含水比も上昇している。特に4m，5mに着目すると、地下水位上昇ピーク後に、3m以浅の含水比が融雪の影響を受けている。これは盛土が透水性の低いシルト系の土試料で構成されているため、地盤への浸透に時間を要することが原因と考えられる。夏期(8月上旬)になると、いずれの含水比も地下水と共に、降雨の影響が現れているが、A地点と比べて反応は遅れているようである。このことも土質の違いが影響していることを示したもので

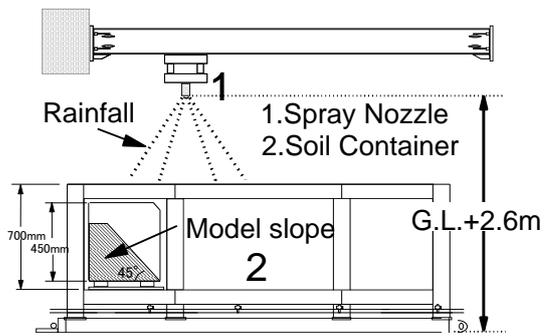


図-7 本研究で用いた試験装置

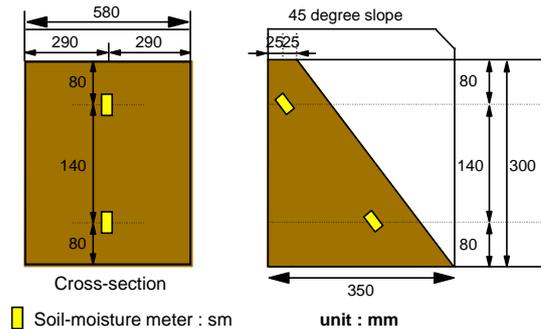


図-8 斜面形状・計器配置図

表-2 試験ケース

| | case1 | case2 | case3 |
|--|-------|-------|-------|
| Angle of inclination, $\alpha(^{\circ})$ | 45 | | |
| Initial water content, $w_0(\%)$ | 25.44 | | |
| Dry density, $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 1.16 | | |
| Intensity of rainfall, $R(\text{mm}/\text{h})$ | 60 | 80 | 100 |

であろう。以上のことから、気象の変化に伴う地盤内の土中水分の変動の特徴を適切に把握することは、斜面の安定性を評価する上では重要であることが示された。

3. 試験概要

ここでは、2013年中山峠土砂災害対策工²⁾の施工時に採取した試料を用いて、降雨強度の違いが斜面崩壊に及ぼす影響を明らかにした。

試験装置の全体図を図-7に示す。模型土槽の内寸法は幅2,000mm，高さ700mm，奥行き600mmである。前面には厚さ20mmの強化ガラスが設置され、人工降雨にともなう斜面の変形挙動が観察できるようになっている。降雨はG.L.+2.6mに設置されたスプレーノズルから水を噴霧させることにより再現されており、降雨強度Rは60~100mm/hである。なお、グリース塗布などによる土槽側面の摩擦除去は行っていない。用いた試料の粒径加積曲線を図-3に示す。本試験では、採取付近の斜面と同程度の乾燥密度($\rho_d = 1.16\text{g}/\text{cm}^3$)になるように締固めて、模型斜面を作製している(密度の変動は5%以内)。また、飽和度の違いが崩壊挙動に及ぼす影響を極力小さくするために、初期飽和度 S_{r0} の変動は約5%以内を目標としている。ここでは、飽和度がピークを示

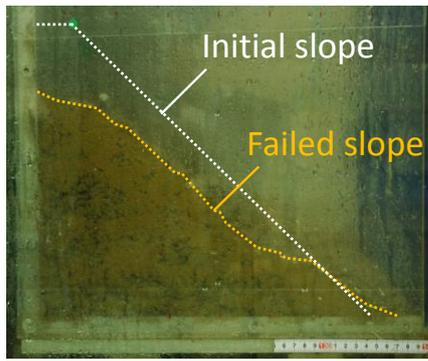


図-9 崩壊前後の斜面形状の変化

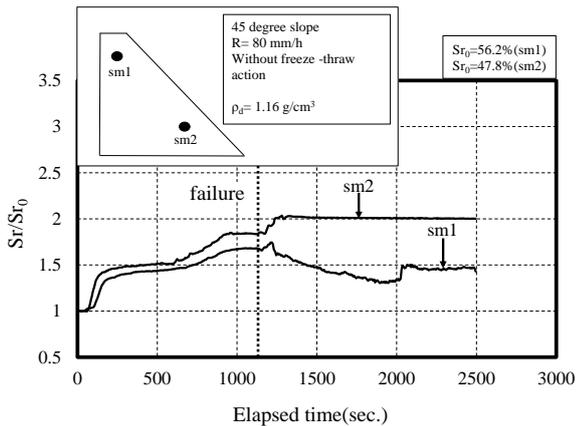


図-10 降雨模型実験における飽和度の変化

した時にせん断ひずみが 4~6%発生したことから、この時点をも斜面崩壊と定義している。降雨による浸透水は底部に設置したポンプにより強制排水されており、浸透力による崩壊現象が研究の対象となる。なお、斜面形状・計器配置図及び試験ケースを図-8と表-2に示す。

4. 試験結果と考察

図-9は、降雨強度 $R=80\text{mm/h}$ の時の崩壊前後の斜面形状を示している。降雨の浸透にともない表層崩壊が発生している。なお、降雨強度の違いによる崩壊形状に大きな差は無かった。

この時の飽和度の変化を図-10に示す。なお、飽和度は試験開始時の初期値 Sr_0 によって正規化して示している。図より、最終的に斜面内の含水量が増加し、崩壊に至ったことがわかる。このことから、今回の模型実験における崩壊現象は降雨量の増加に起因する斜面内の含水量増加によって発生したと言える。

図-11に降雨強度と崩壊時間の関係を示す。図中には崩壊時の含水比 w_f を併記している。図より、崩壊時間は、降雨強度が高いほど早い傾向にあることがわかる。特に、降雨強度 100mm/h のケースは顕著である。このことから、降雨強度の違いが斜面の安定性に及ぼす影響は大であることが示された。また、試験条件の違いに関わらず、崩壊時含水比は一定値を示している。過去の一連の研究^{3),4)}では、崩壊時含水比と初期含水比との関係に基づいた簡易斜面安定性評価法を提示している。本試

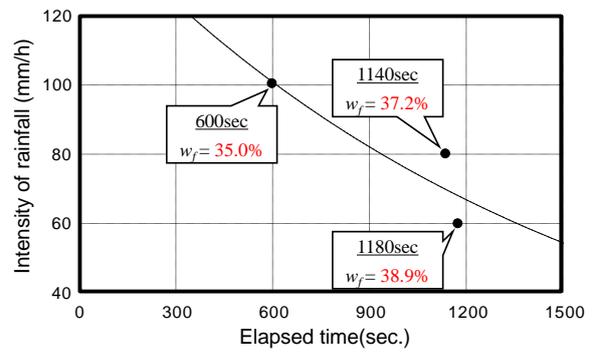


図-11 降雨強度と崩壊時間の関係

験においても崩壊時含水比に違いが現れないことから、この値を基準値とすれば安定性評価が議論できる可能性がある。よって、今後、さらなる検討は必要であるが、含水比のような土壌水分量の継時的な把握は、斜面の安定性を評価する上で有用な情報を与えると言える。

5. 結論

現地計測を通して、土壌水分量と気温、地温、地下水位の変化の関連性を提示した。さらに、室内模型実験の実施により、斜面崩壊と土壌水分量の因果関係を把握した。得られた結果は以下のである。

- (1) 斜面内の土壌水分量は、気温、降雨量、融雪量の変化に敏感に反応している。また、その特徴は盛土を構成する土質によって異なる。
- (2) 降雨模型実験では、斜面の崩壊時間は降雨強度が高いほど早く崩壊する傾向にある。また、崩壊時の土壌水分量(含水比)は降雨強度の違いに関わらず、一定値を示す。

謝辞

本研究を進めるに当たり、北海道開発局札幌開発建設部札幌道路事務所より、計測計器の設置およびデータ収集の協力をはじめ、土試料の提供を頂いた。また、平成26年度河川整備基金(助成番号 25-1151-001)の助成を受けた。さらに、本研究の実験及び解析に近藤雅大君(室蘭工業大学卒業生)、栗原章成君(室蘭工業大学)、三上啓太君(室蘭工業大学)の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 工藤明日香：一般国道230号(中山峠)における斜面災害と復旧対策，地盤工学会誌，Vol.61 No.3，pp.30-31，2013。
- 2) 西村聡志，尾留川晴好，蛭澤秀則：一般国道230号一応急&本復旧対策の工事報告一，北海道開発技術研究発表会，第57回，2014。
- 3) 海谷宣弘，川村志麻，三浦清一：積雪寒冷地にある実斜面の動態観測と安定性評価，地盤工学会北海道支部技術報告集，第53号，pp.157-166，2013。
- 4) S. Kawamura and S. Miura: Rainfall-induced failures of volcanic slopes subjected to freezing and thawing, Soils and Foundations, Vol.53, No.3, pp. 443-461, 2013。