

降雨による被災時と復旧後の盛土の挙動を再現する



松丸 貴樹
Takaki Matsumaru
構造物技術研究部
土構造研究室
エキスパートマネージャー



佐藤 武斗
Taketo Sato
構造物技術研究部
土構造研究室
主任研究員

はじめに

梅雨や台風、近年頻発する「ゲリラ豪雨」など降雨によって鉄道盛土が被害を受けることがあります。図1に示すように鉄道盛土が(a)のような降雨被害を受けると列車の運行が停止し、迅速な運行再開が求められる場合には(b)に示すような応急的な復旧を行って運行再開を行い、その後盛土を被災前と同形状に戻す復旧((c)本復旧)を行います。

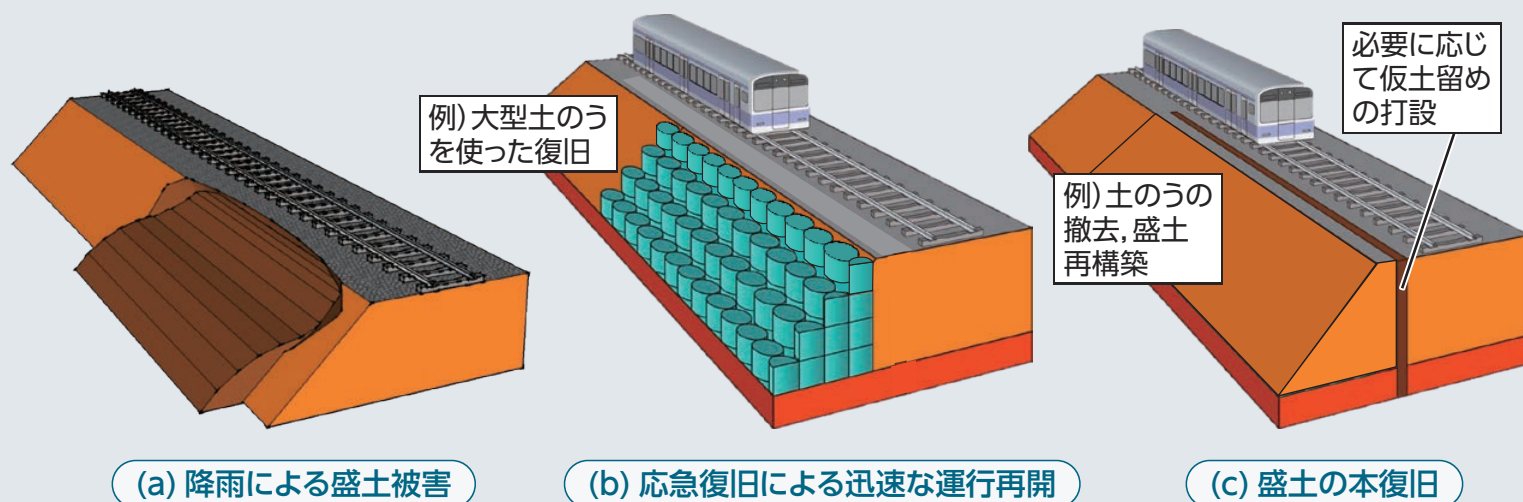
しかしながら、これまで降雨で部分的に崩壊した盛土が列車の走行が難しい状態であるか、あるいは応急復旧した盛土で列車の走行に問題

がないか、については明らかにされていませんでした。本稿では、実験および数値解析手法を用いて降雨で被災した盛土および復旧を行った盛土を再現する取組みを行い、これらの盛土が列車の運行に対してどの程度安定しているかを明らかにした研究開発を紹介します。

降雨によって崩壊した盛土と復旧を行った盛土の挙動を再現する

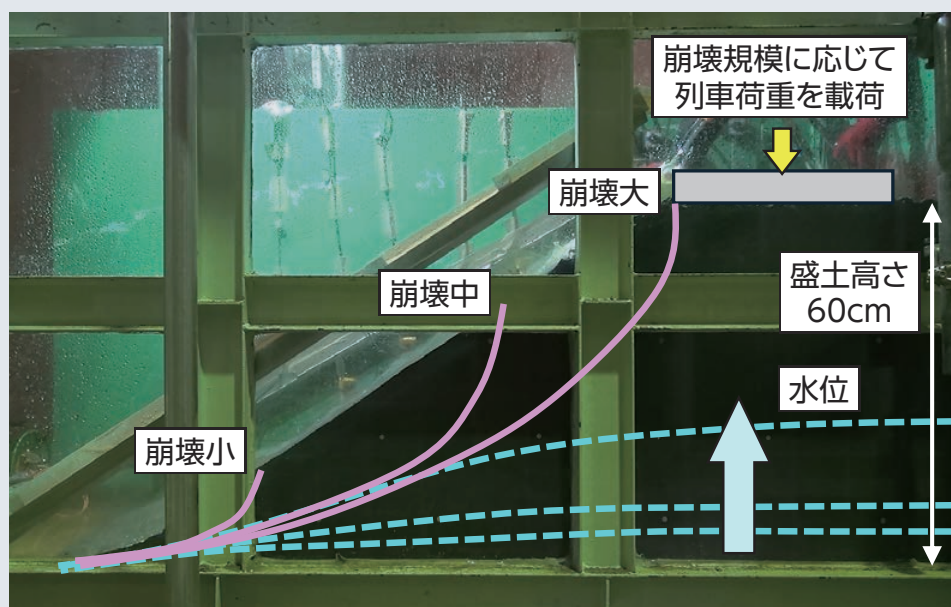
降雨時には降った雨が盛土内にしみ込み、盛土内を移動し、やがて盛土の下地盤や盛土外に排水されます。しかし、豪雨のような場合に

図1 降雨による鉄道盛土の被害と復旧による列車の運行再開

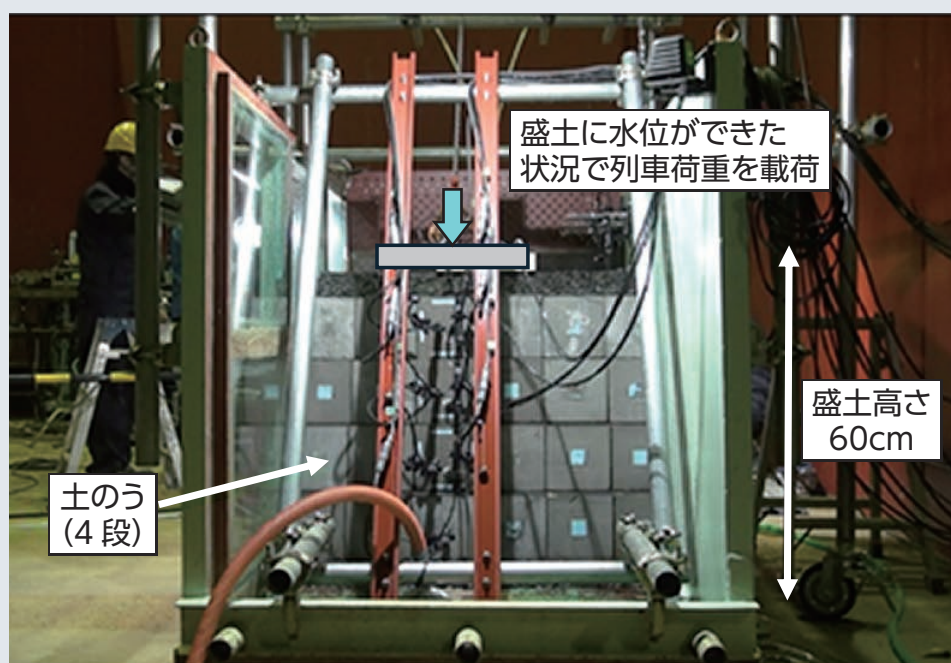


は、盛土の中に入る水の量が排水量を上回り、盛土内に水位が形成されます。このような盛土内の水の存在により浮力が作用することや土の強度が低下することで盛土の崩壊につながります。そこで、降雨で崩壊した盛土や復旧を行った盛土で列車走行が問題とならないかを、降雨を与えた盛土に列車荷重を載荷する試験により確認しました。ここでは小型模型による試験をいくつか実施し、その上で実物規模の試験を行っており、それぞれについて紹介します。

小型模型による試験¹⁾では、まず降雨での被災を再現する試験を行っており、その概要を図2(a)に示します。高さ60cmの盛土を構築し、上空から連続して降雨を与えます。盛土内に水位が形成され先端から崩壊が始まりますが、その崩壊の進展に応じて列車に相当する荷重を載荷し、盛土が安定するかを確認しました。いくつか条件を変えて試験を行ったところ、十分に締固め¹²⁾の行われていない緩い盛土で、降雨直後に列車荷重を載荷すると盛土に沈下が生じることがわかりました。次に、復旧を行った盛土についても同様



(a) 盛土の崩壊挙動の再現



(b) 応急復旧盛土の試験

図2 小型模型盛土を使った盛土の崩壊および復旧を模擬した試験

12) 土の締固め

盛土を構築する際に土の性質を改善するために、機械を用いた現場での転圧によって土の密度を増加させることを言います。締固めを十分に行っていない緩い土と比べて、締固めを行った密な土では、土の強さが増す、雨水の浸透を抑制できるなど、安定した盛土を構築することができます。

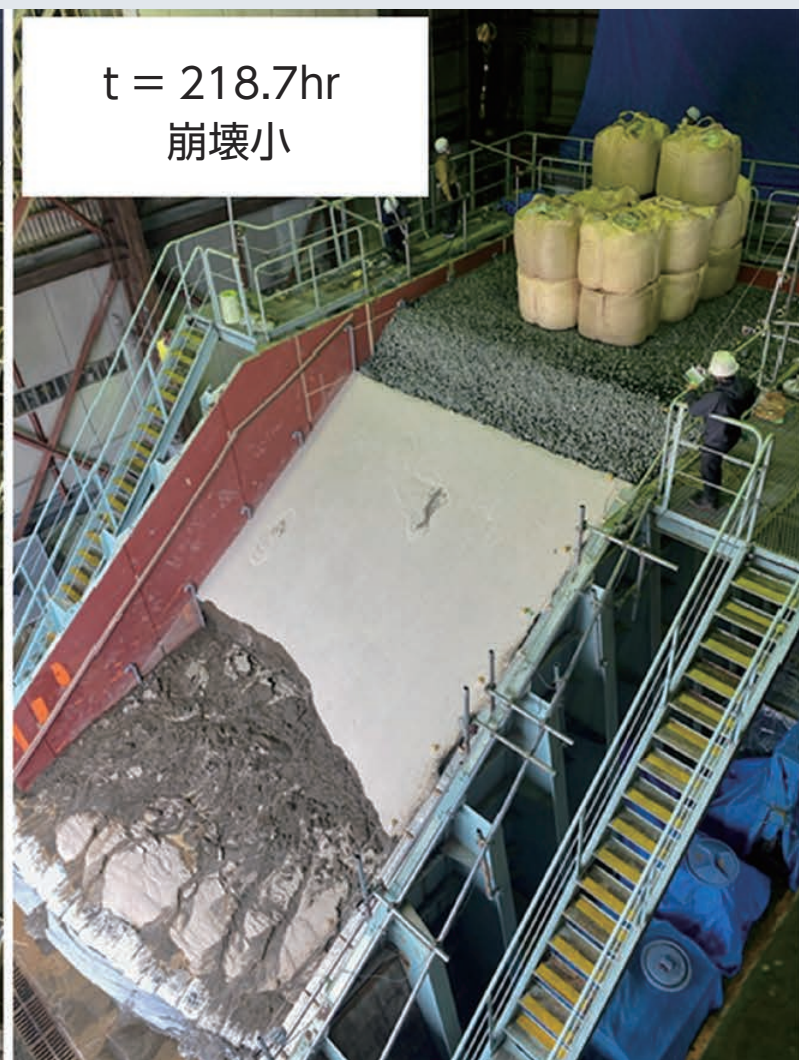


図3 実規模盛土の降雨散水による崩壊・载荷試験

の試験を行っており、その概要を(b)に示します。ここでは土のうで応急復旧を行った盛土を想定しています。この応急復旧盛土に上述の被災時の盛土と同規模の降雨を与えても盛土に変状は生じませんでした。また、さらに降雨を与え、盛土内の水位がさらに上昇した状況で列車荷重を载荷しましたが、沈下は生じず応急復旧を行った盛土が雨に対して強化されていることがわかりました。

これらの挙動はあくまで模型スケール規模での確認にとどまっています。そこで、実規模相当の盛土を使って同様の試験を行いました²⁾。盛土の高さは4mであり、最初の試験と同様に

崩壊の進展に応じて列車荷重を载荷しました。その状況を図3に示します。同一条件で実施した小型模型での試験と同様の挙動となることを確認しており、実物大での検証と、一連の小型模型での試験が妥当であったことが確認できました。

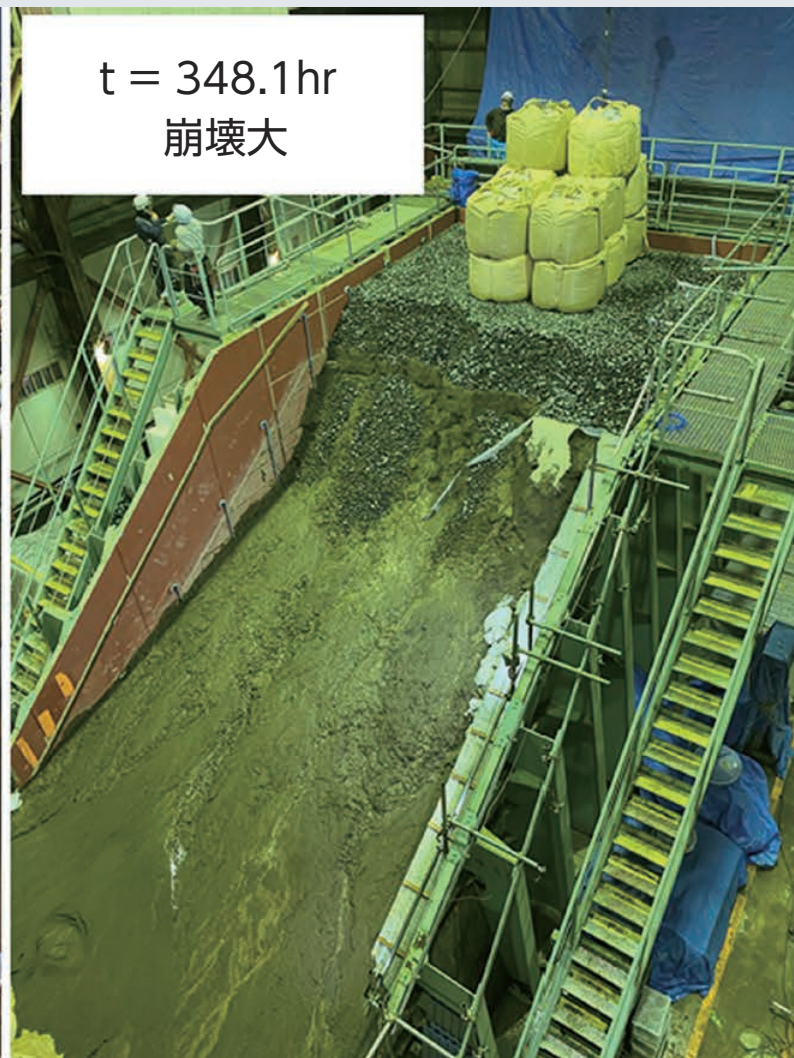
数値解析を用いた実験挙動の再現と 系統的な盛土の安定度評価

上記のような降雨によって崩壊を与える試験は現象の理解が容易である利点はあるものの、大がかりなものとなってしまいます。そこで、数値解析手法を用いた検討が有効となりま

t = 335.3hr
崩壊中



t = 348.1hr
崩壊大



す。以下では、数値解析手法を用いて、実験挙動の再現による手法の妥当性の検証と、実務への活用例について紹介します。

降雨による盛土の崩壊挙動の数値解析による表現には、図4(a)に示す円弧すべり法を用いました。盛土の崩壊を円弧すべり形状と見立て、すべり面に生じる滑動モーメント^②（図中の M_D ）と土が持つ強度などによって発揮される抵抗モーメント（ M_R ）との関係から、最も崩壊が生じやすいすべり面形状を探索し、その安定度を評価するものです。その際、降雨によって形成された盛土内の水位は、両モーメントのつり合いを算定する際に浮力として考慮されま

す。本手法を用いて、前述した実規模盛土の崩壊挙動の再現解析の結果を(b)に示します²⁾。図中に実線で示される多数の円弧すべり形状は、いずれも抵抗モーメントが滑動モーメントを上回り、盛土が安定している状態にあります。一方図中の赤で示した円弧すべり形状は、滑動モーメントが抵抗モーメントを上回るものであり、数値解析結果はこの形状で盛土に円弧すべりが生じることを意味しています。また、

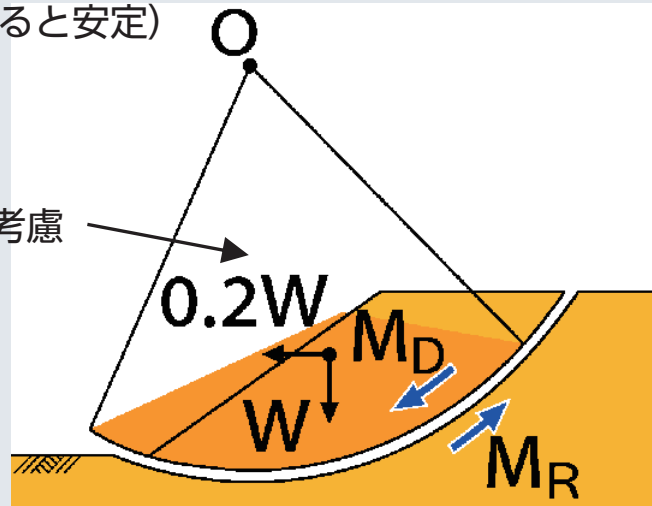
② モーメント

物体に加わった力が回転を生じさせる能力を示す量で、回転軸から力の作用点までの距離（腕の長さ）と力の大きさの積で計算されます。

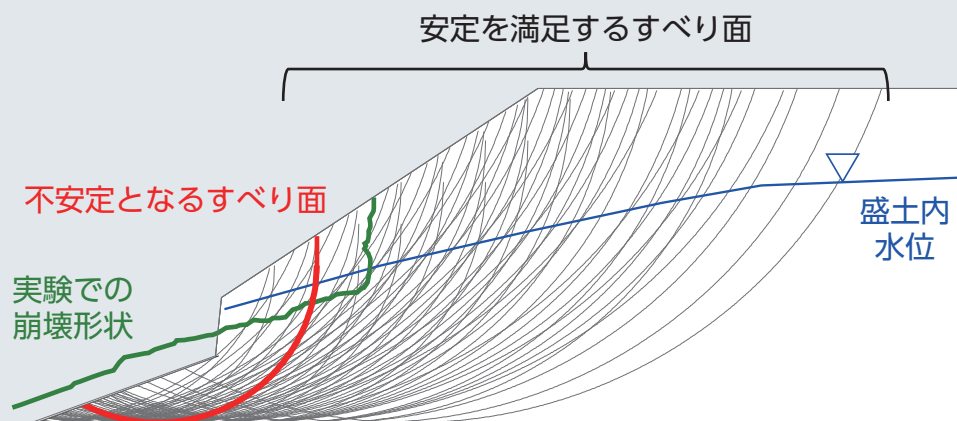
盛土の安定度 (1を下回ると安定)

$$\frac{M_D}{M_R} \leq 1.0$$

※地震時に考慮



(a)円弧すべり法の概念



(b)実規模盛土の降雨散水・载荷試験の再現解析結果

図4 円弧すべり法の概念と実規模盛土の降雨実験の再現解析

このすべり面形状は実験での盛土の崩壊形状とも類似しています。この結果から、円弧すべり法により実験での盛土の安定度ならびに崩壊形状を評価できることを確認しました。

そこで、本手法を用いて、部分的に崩壊が生じた盛土の安定度を容易に判断できる手法を構築しました。その評価方法と算定結果を図5に示します。まず、降雨による盛土の部分崩壊形状を(a)図のように「崩壊角」と「崩壊広さ」を使って設定し、この形状で列車荷重が載荷された状態の盛土の安定度を円弧すべり法によって評価します。この計算を崩壊角と崩壊広さを変えな

がら行い、それぞれの計算で盛土の安定度が満足されるものを緑色のプロット、満足されないものを赤色のプロットとして(b)に示すように整理しました。緑のプロットの範囲は列車荷重が載荷されても盛土の安定が満足されるものであり、軽微な盛土の崩壊であれば列車の運行再開に支障がないことを示しています。一方、赤のプロットの範囲は列車の運行再開に支障があり、何らかの復旧を行わないと列車の運行再開が難しい状況であることを示しています。このように、数値解析手法を活用して事前に作成した指標を用いることで、詳細な検討を行うこと

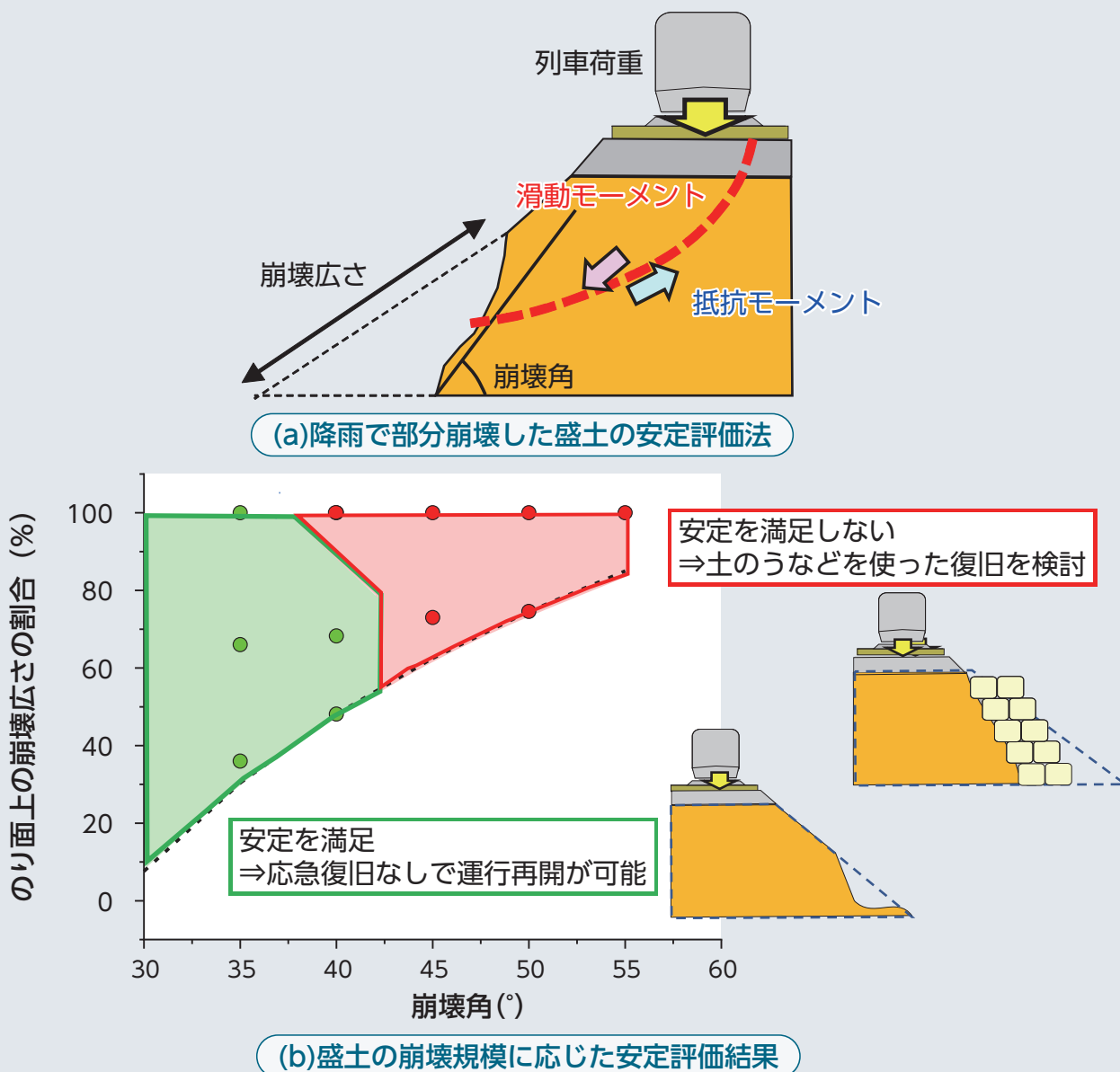


図5 降雨で部分崩壊した盛土の安定評価

なく降雨で被災した盛土の応急復旧の可否を判断することができます。

おわりに

本稿では、降雨による被災時および復旧後の盛土の挙動を明らかにすることを目的として、実験および数値解析手法によりその挙動を再現した取り組みを紹介しました。両手法を用いることで現象を明らかにするだけでなく、実際の災害時の復旧の可否の判断も可能なものとなりました。今後もこのように実験、数値解析を活用することで現象の解明を行うとともに、実用に

供する成果物の創出にも展開し、鉄道路構造物の安全性の評価や復旧技術の開発等に貢献してまいります。

なお、本記事で紹介した成果の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて得られたものです。RRR

文 献

- 1) 松丸貴樹, 佐藤武斗, 伊藤孝記, 阿部慶太: 土のうで応急復旧を行った盛土の列車荷重載荷に対する安定および沈下検討, ジオシンセティックス論文集, Vol.38, pp.114-121, 2023
- 2) 佐藤武斗, 杉山健太, 阿部慶太, 笠原康平, 松丸貴樹, 富田佳孝: 実物大鉄道盛土の降雨・載荷実験による崩壊規模に応じた安定性評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.19, No.1, pp.101-105, 2024