

# 降雨で被災した鉄道盛土の安定性評価と運行再開可否判断手法

佐藤 武斗\* 松丸 貴樹\* 伊藤 壱記\*\* 尾崎 匠\*

Method for Determining Resumption of Train Service on Railway Embankment Damaged by Rainfall

Taketo SATO Takaki MATSUMARU Kazuki ITO Takumi OZAKI

Since the stability of railway embankments damaged by rainfall is not easily assessed, the need for temporary restoration is often determined by the inspector's experience, or the damaged embankment is simply restored to its original shape. As a result, there are cases where temporary restoration is carried out with excessive specifications for embankments that meet the performance requirements for train operation. This study proposes a method to evaluate the performance of damaged embankments or temporary restoration embankments in terms of stability and settlement during train operation, and to quickly determine the resumption of train operation on the damaged embankment.

キーワード：降雨，盛土，安定，累積沈下特性，復旧

## 1. はじめに

近年、大雨や短時間強雨の発生回数は増加傾向にあり、降雨により鉄道盛土が被災する事例が増加している。降雨量が運行規制値を超過した場合には、列車の運行を見合わせ、運行再開前に沿線の点検を実施する安全確認が行われる。その際に、盛土の被害が確認された場合には復旧の要否が検討され、軽微な被害であればシート等により防護が行われる。中規模以上の被害で、なおかつ早期の運行再開が必要な場合には、大型土のう等により盛土断面を修復する応急復旧が行われることが多い。このような運行再開および復旧の要否は、技術者の経験に基づき判断される場合が多く、検討の余地が残されている。

既往の研究では、被災盛土および応急復旧した盛土の性能を評価した検討はほとんど行われておらず、列車走行が可能な条件は明らかにされていない。そのため、本来は列車走行に対して性能を満足する被災盛土に応急復旧を行う場合や過剰な仕様で応急復旧が行われる場合が存在すると考えられる。

以上より、本研究では被災盛土および応急復旧した盛土を対象に、列車載荷時の盛土の安定および列車の繰返し載荷による累積沈下特性を各種実験により検討した。また、既往の安定解析手法による実験結果の再現解析を実施し、被災盛土の復旧の要否や応急復旧時の仕様を迅速に決定できる手法を提案した。

## 2. 降雨により被災した盛土の安定性評価

列車載荷時の安定性を評価するために、実物大盛土を用いた降雨・載荷実験<sup>1)</sup>を実施した。また、降雨時の鉄道盛土の安定性評価手法<sup>2) 3)</sup>により、実験結果の再現性を検証した。検証した安定性評価手法は、4章で実施する被災盛土の安定検討に活用する。

### 2.1 降雨・載荷実験の概要

降雨・載荷実験は鉄道総研が所有する大型降雨実験装置により実施した。実物大盛土の概要を図1に示す。実物大盛土は幅11.0m、奥行6.0m、高さ4.0mの在来線盛土を想定しており、のり面勾配1:1.5として、天端に道床バラストを厚さ0.70mで敷設した。盛土材料は、鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）<sup>2)</sup>（以下、設計標準とする）において施工性の良い材料（B群材料）に分類される稲城砂を用いて構築した。

降雨・載荷実験では、時間雨量30mm/hrの降雨散水を断続的に与えて盛土の崩壊を促進し、盛土に一定の崩壊が発生後、降雨散水を停止して列車荷重に相当する大型

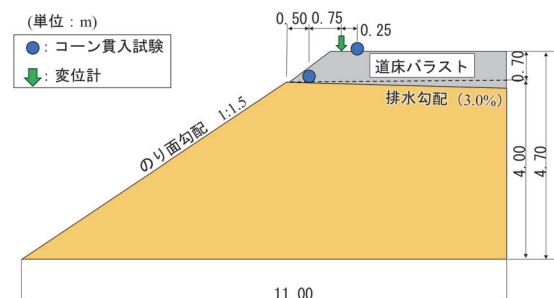


図1 実物大盛土の概要

\* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

\*\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

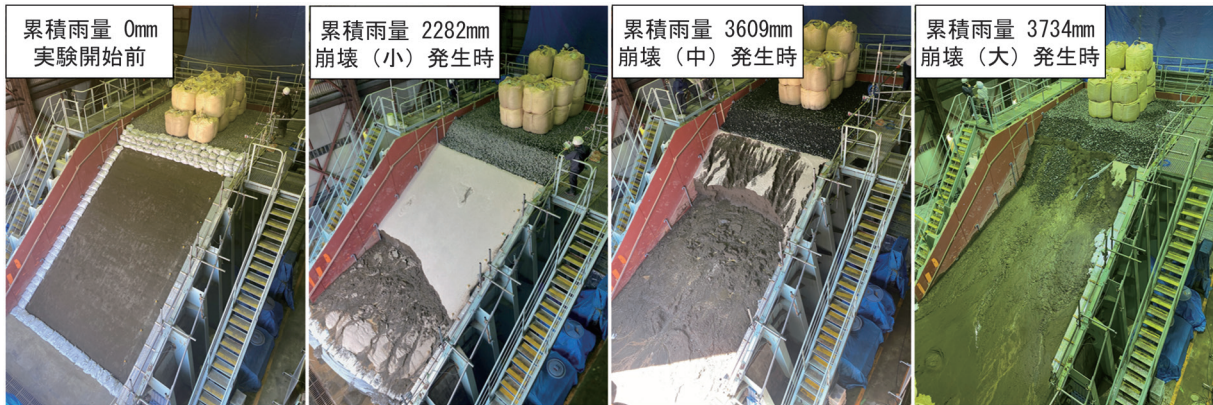


図2 各崩壊段階における載荷実験状況

土のうを載荷した。実験終了時の累積雨量は、3734mmであった。載荷実験後には、大型土のうを撤去し、所定の崩壊が発生するまで降雨散水を実施した。降雨による盛土の崩壊は、のり戻までの崩壊（崩壊（小））、のり面中腹までの崩壊（崩壊（中））、のり肩までの崩壊（崩壊（大））を対象とした。

## 2.2 列車載荷時における被災盛土の安定性

各崩壊段階における載荷実験状況を図2に、崩壊面のスケッチを図3に示す。図2に示す通り、各崩壊段階では列車荷重を模擬した大型土のうを載荷しても、外観から視認できる崩壊の進行は見られなかった。図3より、各崩壊段階で確認された崩壊範囲は、いずれも載荷実験における載荷端を起点とした45度線よりものり面側に位置していた。この45度線は設計標準における列車荷重の影響範囲である。列車荷重の影響範囲内には崩壊範囲が及んでいない条件で載荷実験を実施したことに相当する。

各崩壊段階において、支持力特性と相関のある換算N値の深度分布を評価することで、崩壊の進行に伴う支持力特性の変化について考察する。図1に示す位置で実施した簡易動的コーン貫入試験による換算N値の深度分布を図4に示す。図中には、図3に示した各崩壊段階の崩壊高さを併記した。崩壊（大）では崩壊範囲がのり肩まで及んだため、天端のみの実施とした。(a) のり肩で確認された崩壊（小）および崩壊（中）の換算N値は、降雨散水前と比較して盛土下部付近で低下が見られた。換算N値の低下は、各崩壊段階の崩壊高さより0.5m程度低い位置を起点に、それよりも下部の範囲で見られた。その一方で、(b) 天端では、このような換算N値の深度分布の変化は見られなかった。(a) のり肩で確認された換算N値の低下は、崩壊に伴う拘束圧の低下に起因すると推察されるが、天端では換算N値の低下がみられなかったことから、のり面の崩壊が天端直下の支持力特性

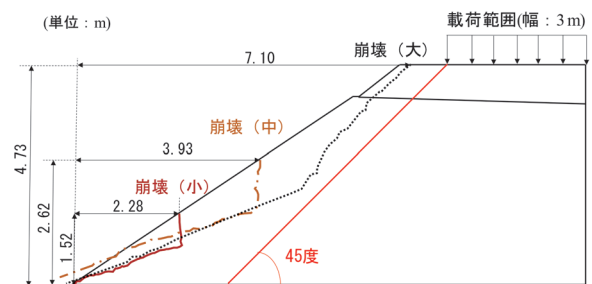


図3 崩壊面のスケッチ

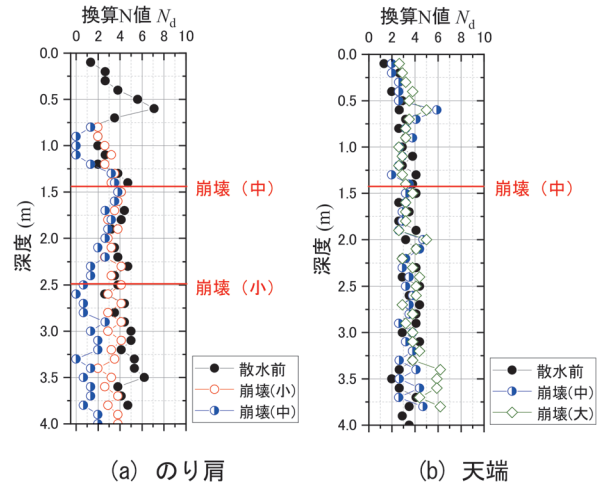


図4 換算N値の深度分布

に及ぼす影響は些少であったと考えられる。

降雨散水および載荷実験時ののり肩沈下量の時刻歴を図5に示す。図中には各崩壊段階で実施した載荷試験の荷重履歴を併記した。のり肩沈下量は、崩壊（小）発生時に3.1mmの沈下が発生しており、列車荷重相当の載荷により4.1mmまで沈下が進行する。その後の崩壊の進行および載荷試験により、6.1mmまで沈下が進行した。崩壊（大）においては、166.6kNを載荷した後は、荷重を増加させて236.6kNを載荷したが、沈下の進行は些少であった。

以上より、本実験で確認された崩壊規模の被災盛土は、列車相当の载荷に対して一定の安定性を有していることが確認できた。

### 2.3 安定解析による実験挙動の再現解析

鉄道盛土の降雨時の安定解析手法を用いて、盛土の崩壊範囲の再現性に関する検討を行った。安定解析では、飽和-不飽和浸透流解析により得られた飽和度分布および盛土内水位を考慮した解析モデルを使用し、円弧すべり安定解析<sup>2) 3)</sup>を実施した。

安定解析に使用した強度定数の一覧を表1に示す。ここに示す強度定数は、降雨・载荷実験で使用した稲城砂を対象に、飽和・不飽和三軸圧縮試験結果をもとに設定した。この強度定数は飽和度 80, 100% を閾値として設定しており、飽和-不飽和浸透流解析により評価した飽和度分布に各強度定数を適用することで、降雨浸透の影響を考慮した安定解析モデルを構築した。

安定解析に使用した粘着力の算定概要を図6に示す。不飽和状態の粘着力の算定にあたり、粘着力が安定解析結果に及ぼす影響が大きいことから、飽和状態と不飽和状態の内部摩擦角を近似的に等しいと扱うことで、不飽和状態の粘着力を小さく評価した。つまり、図中に示す通り、不飽和状態の内部摩擦角を飽和状態の内部摩擦角  $\phi_d$  と等しいと仮定した場合、得られる粘着力  $c$  は不飽和状態の内部摩擦角  $\phi_{net}$  が飽和状態よりも小さいと評価した場合の粘着力  $c_{net}$  よりも小さくなる。

円弧すべり安定解析では、盛土体のみを解析対象とし、道床バラストは分布荷重 (10.2kN/m<sup>2</sup>) として考慮した。载荷試験を模擬したケースでは、大型土のうを载荷した範囲に分布荷重 29.2kN/m<sup>2</sup> を考慮した。

安定解析結果の一例として、崩壊 (中) 発生時および崩壊 (中) ・载荷実験時の安定解析結果を図7に示す。図中に赤線および橙線で示すすべり面は照査値 1.0 を超過し、当該すべり面で崩壊に至ることを示す。(a) 崩壊 (中) 発生時では、崩壊 (小) の断面形状の考慮により実験で得られた崩壊形状と概ね整合するすべり面を再現した。

(b) 崩壊 (中) ・载荷実験時では、载荷範囲に照査値 1.0 を超過するすべり面が発生しており、実験で確認された载荷実験時において崩壊の進行が見られない挙動と異なる結果が得られた。この原因について、①盛土材料の強度評価法、②上载荷重の荷重分散の影響が挙げられる。①について、一般的には不飽和状態の内部摩擦角は飽和状態よりも若干小さく、粘着力が大きい傾向にあるが、本検討では飽和状態と不飽和状態で内部摩擦角が等しいと設定し、不飽和状態における粘着力を小さく評価した。これは解析結果に及ぼす影響が大きい粘着力を小さく評価することで、安全側の照査結果となるように配慮した

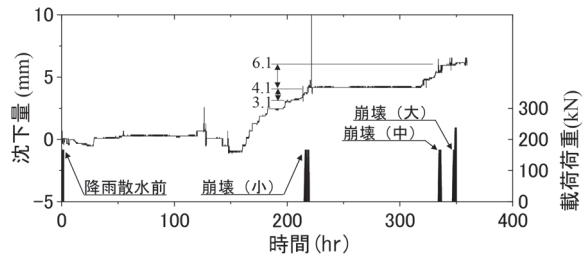


図5 のり肩の沈下量の時刻歴

表1 安定解析に使用した強度定数の一覧

飽和度 $S_r$ (%)	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (度)	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$S_r < 80$	17.3	36.1	6.5
$80 \leq S_r < 100$	18.2	36.1	2.4
$S_r = 100$	19.1	36.1	0.9

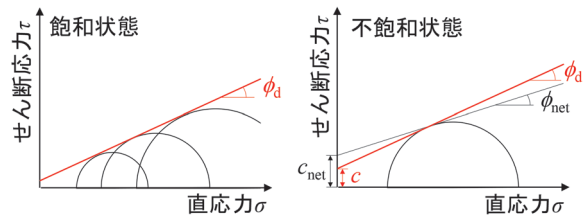
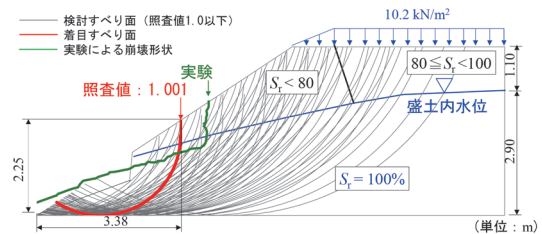
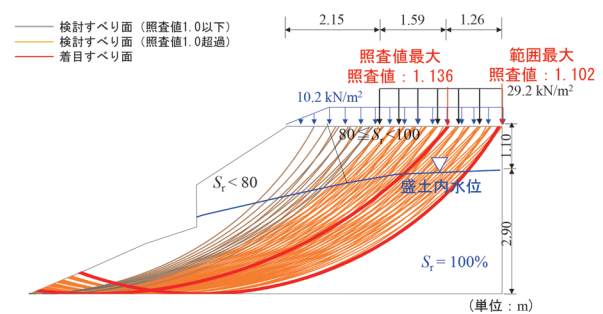


図6 安定解析に使用した粘着力の算定概要



(a) 崩壊 (中) 発生時



(b) 崩壊 (中) ・载荷実験時

図7 安定解析結果の一例

ためである。②について、上载荷重は地盤内では分散してすべり面に作用する応力は低下すると考えられるが、安定解析では盛土を剛体と仮定して荷重分散を考慮していない。そのため、上载荷重がすべり力に及ぼす影響が

大きいと考えられる。このような要因により、荷重時を対象とした解析結果は実験結果よりも安全側に評価したと考えられる。

### 3. 被災盛土・応急復旧盛土の累積沈下特性

本章では、被災盛土および応急復旧盛土を模擬した模型実験によって累積沈下特性を評価した結果を示す。また、得られた知見は、4章に示す被災盛土の安定に関するノモグラムの対象とする崩壊範囲の設定や大型土のうによる応急復旧の標準仕様の決定に活用する。

#### 3.1 被災盛土の崩壊範囲に応じた累積沈下特性

本試験では、のり面の崩壊を模擬した盛土模型を対象に、繰返し荷重試験を実施した。盛土模型の概要を図8に示す。盛土模型の縮尺は1/5であり、奥行方向の寸法は1.0m（まくらぎ7本）である。

荷重荷重に対する寸法効果は応力および地盤材料の強度を考慮すると3乗に比例することから、1/5縮尺に換算すると、1台車分の荷重荷重（160kN/軸×2軸）は $320\text{kN}/5^3=2.56\text{kN}$ となる。一方、盛土材に用いた稲城砂の土粒子間の粘着力（サクシオン）の影響については縮尺の影響を考慮できないため、寸法効果を考慮した荷重荷重でも変形量が小さくなるのが懸念された。そこで、縮尺を考慮した変形が生じるように、1/5盛土模型に対する静的線形弾性解析を実施し、まくらぎ変位が0.2mm程度（実寸で1.0mm程度）となる荷重7.68kNを模型試験に用いることとした<sup>4)</sup>。この目標変位について、既往の研究では列車通過時の路盤変位（弾性変形）が1.0mm程度以上になると軌道変位進みが増加する傾向<sup>5)</sup>を示すことから、崩壊した盛土模型に対する繰返し荷重試験であること、およびバラスト道床の弾性変形は相対的に小さく路盤変位とまくらぎ変位が近い値を示すことを考慮して、実寸でまくらぎ変位1.0mmを目標変位とした。

本試験では崩壊を模擬した掘削範囲を変えて、6ケースの繰返し荷重試験を実施した。試験ケースに応じた盛土の掘削範囲を図9に示す。本検討では、同一の盛土模型を用いてケース番号順に試験を行ったため、case 2以降では前の試験の荷重履歴の影響を含んだ状態で評価している。各試験ケースの荷重回数は、case 1～5までは10万回とし、case 6はまくらぎの沈下量が大きく進んだことから2万回で荷重中止とした。

各ケースの最終荷重回数におけるまくらぎ沈下量とその変位振幅を図10に示す。なお、まくらぎ沈下量はケース毎に0mmにリセットしている。まくらぎ沈下量と変位振幅ともに、case 1～4まで大きな変化が見られなかったが、case 5, 6ではまくらぎ沈下量と変位振幅ともに

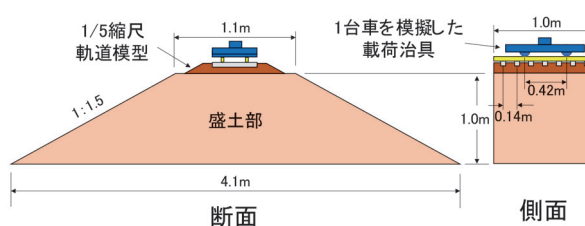


図8 繰返し荷重試験に用いた盛土模型の概要

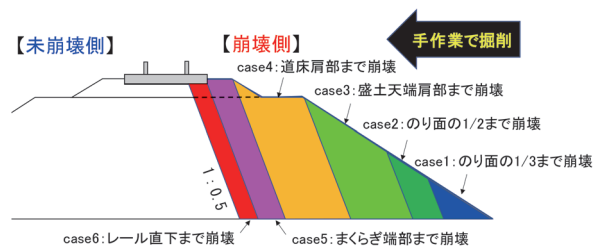


図9 試験ケースに応じた盛土の掘削範囲

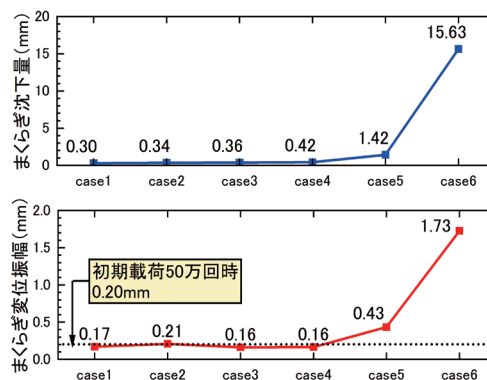


図10 各ケースのまくらぎ沈下量とまくらぎ変位振幅



図11 応急復旧した盛土模型の外観 (case 7)

顕著な増加が見られた。この結果より、道床肩部よりも軌道側に盛土の崩壊が及ばなければバラスト軌道の累積沈下量は極端に大きくならないことがわかった。

#### 3.2 大型土のうによる応急復旧盛土の累積沈下特性

大型土のうによる応急復旧盛土において、繰返し荷重に対する軌道沈下抑制効果を評価した。応急復旧した盛土模型の外観を図11に示す。本試験では、崩壊範囲の異なる2ケースの盛土に対して、大型土のうによる応急復旧を実施した場合を想定した。試験ケースは、case 7（盛土天端肩部までの崩壊）、case 8（まくらぎ端部ま

での崩壊)の応急復旧盛土である。大型土のうは、盛土模型と同様に1/5スケールで構築し、いずれのケースも大型土のうを2列配置した場合と撤去した場合について検討した。

崩壊側のまくらぎ端部の沈下量を図12に示す。

(a) case 7 (盛土天端肩部までの崩壊)では、土のうの設置の有無による沈下量に変化は見られなかった。その一方で、(b) case 8 (まくらぎ端部までの崩壊)では、土のうを撤去すると、まくらぎ沈下量が2倍程度まで増加した。

以上の結果より、まくらぎ端部まで盛土が崩壊しても大型土のうを用いた応急復旧を行うことで、盛土の崩壊領域が道床肩部まで達しない場合と同程度までバラスト軌道の累積沈下を抑制できることが確認された。

#### 4. 降雨で被災した盛土の運行再開判断手法

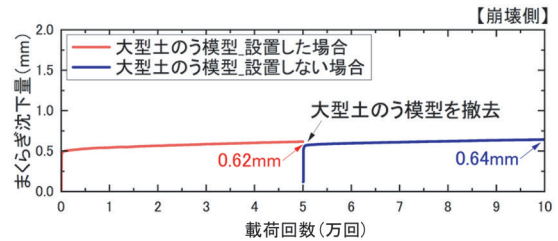
本章では、被災盛土の安定に関するノモグラム、大型土のうを用いた応急復旧の標準仕様について検討し、それらを活用した列車の運行再開判断手法を提案する。

##### 4.1 被災盛土の安定に関するノモグラム

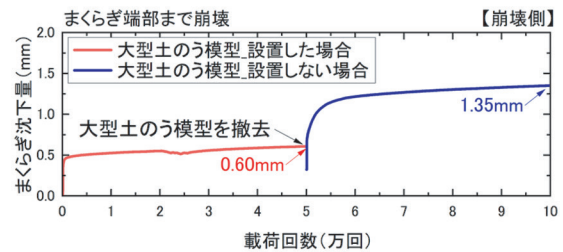
本検討では、列車荷重載荷時を対象に2章で検証した安定解析法を用いており、崩壊形状や盛土内水位等の現場条件を変えて被災盛土の安定性を評価した。検討結果は、図13に示すのり面方向の崩壊距離とのり長の割合である崩壊距離比および崩壊角の関係により、列車載荷時に盛土が安定を満足する範囲を整理した。本検討では、3章で確認されたのり肩までの崩壊規模であれば、列車走行に伴う軌道の累積沈下が生じないことを踏まえて、のり肩までの崩壊範囲を対象とした。

列車載荷時の被災盛土の安定に関するノモグラムを図

14に示す。図中のプロットは安定解析を実施した条件であり、円弧すべり危険度が1.0以下で安定を満足する条件を緑で、円弧すべり危険度が1.0を超過し、安定を満足しない条件を赤で示した。また、照査結果をもとに、安定を満足する領域、満足しない領域を区分した。なお、



(a) case7 盛土天端肩部までの崩壊に対する応急復旧



(b) case8 まくらぎ端部までの崩壊に対する応急復旧

図12 大型土のうによる応急復旧の沈下抑制効果

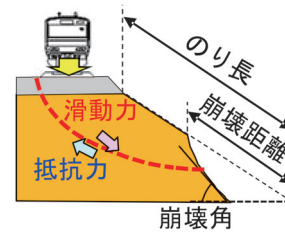


図13 ノモグラムに使用した指標の概要

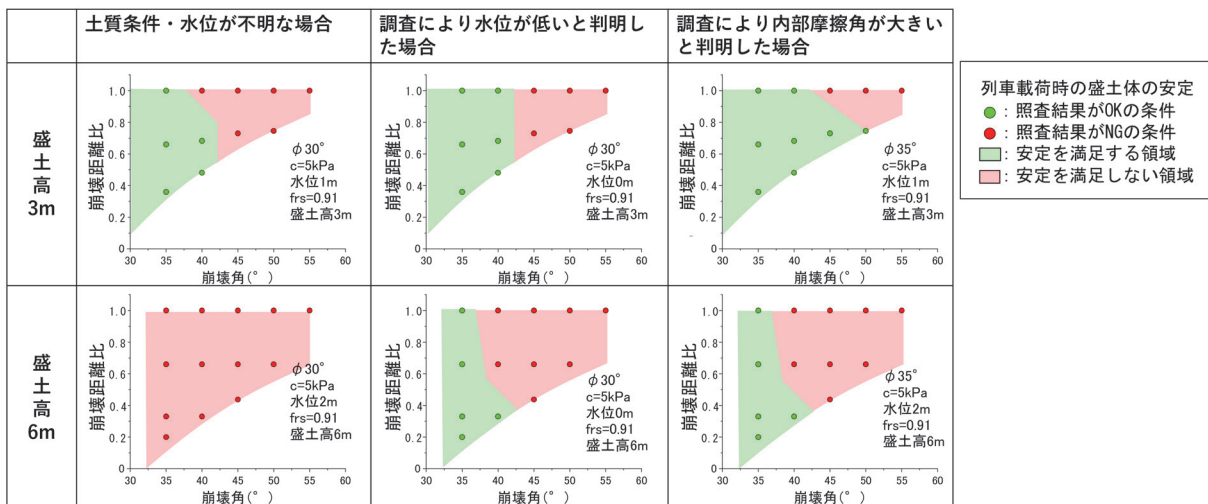


図14 列車載荷時の被災盛土の安定に関するノモグラム

安定解析にあたって、盛土材料の強度に関する土質諸数値には、設計標準<sup>2)</sup>で土質3に分類される既設盛土材料の地盤材料試験結果をもとに、比較的安全側となる内部摩擦角 $\phi=30$ 度、粘着力 $c=5\text{kPa}$ を用いた。円弧すべり抵抗係数 $f_{rs}$ は当該構造物が仮設構造物であり、徐行運行することを勘案して $f_{rs}=0.91$ とした。

列車荷重載荷時を対象に土質条件・水位が不明な場合を例にとると、盛土高さ3mでは崩壊角が小さい場合に列車運行再開時の安定を満足する領域が見られ、応急復旧なしで列車の運行再開が可能となる。一方、盛土高さ6mでは、いずれの崩壊距離比および崩壊角の組合せでも安定を満足せず、応急復旧が必要となる。

現地調査等により盛土情報が取得でき、水位が低いと判断される場合や盛土材料の強度を大きく評価できる場合には、土質条件・水位が不明な場合に比べて安定を満足する領域が拡大し、応急復旧を不要とした列車の運行再開に期待できる。

#### 4.2 被災盛土の応急復旧の標準仕様

応急復旧が必要となる場合に、復旧仕様を簡易に設定するために、大型土のうの配置に関する検討を実施した。本検討では、大型土のうを用いた応急復旧盛土が列車載荷時に作用する土圧に対して、滑動・転倒破壊に対する安定<sup>6)7)</sup>を満足する大型土のうの配置について検討した。

大型土のうによる応急復旧の標準仕様を図15に示す。盛土高さを変えて、土質条件・盛土内水位の情報の有無に応じた6ケースについて検討を実施した。土質条件・水位が不明な場合には、盛土材料の内部摩擦角を30度とし、盛土内水位は盛土高さの1/3とした。盛土材料の粘着力は考慮しないこととし、盛土内水位の影響は、土のうに作用する水圧として考慮した。調査や試験

を行って現地の状況が良好と判断される場合には、実態に合わせて応急復旧の標準仕様を検討した。例えば、水位が低いと判明した場合には盛土内水位を考慮せず、内部摩擦角が大きいと判明した場合には、盛土材料の内部摩擦角 $\phi=35$ 度として安定検討を実施した。安定検討では滑動に対する許容安全率を1.1とし、土のうに作用する土圧と土のうの自重に起因した土のう底面の摩擦抵抗の比較により照査した。転倒に対しては土のうに作用する土圧と土のうの自重の合力の作用位置で照査しており、土のう底面の中央位置から底面幅の1/3の範囲を許容される偏心量とした。

土質条件・水位が不明な場合に注目すると、いずれの盛土高さにおいても土圧・水圧に起因した滑動に対する安全率を確保する必要があるため、最下段の土のうの数を高さ3mで3列、高さ6mでは4列とする必要がある。一方、盛土内水位がない場合は水圧が土のうに作用しなくなるため、高さ3mの復旧盛土では大型土のうの配置が土質条件・水位が不明な場合と変わらないものの、高さ6mの場合は1列分土のうを削減できることがわかる。また、盛土材料の内部摩擦角が大きく、内部摩擦角 $\phi=35$ 度とした場合は、土のうに作用する土圧が全体として低減されるため、特に高さ6mの盛土では上から3~4段目の土のうの数を2列から1列に削減できる結果となっている。

本選定表を用いることで現地の状況に応じた応急復旧が可能となり、更に従来の復旧と比較して土のうの数を削減することができる。

#### 4.3 運行再開判断手法

列車の運行再開判断手法を図16に示す。本手法では、盛土の高さおよび崩壊形状に応じて図14に示したノモ

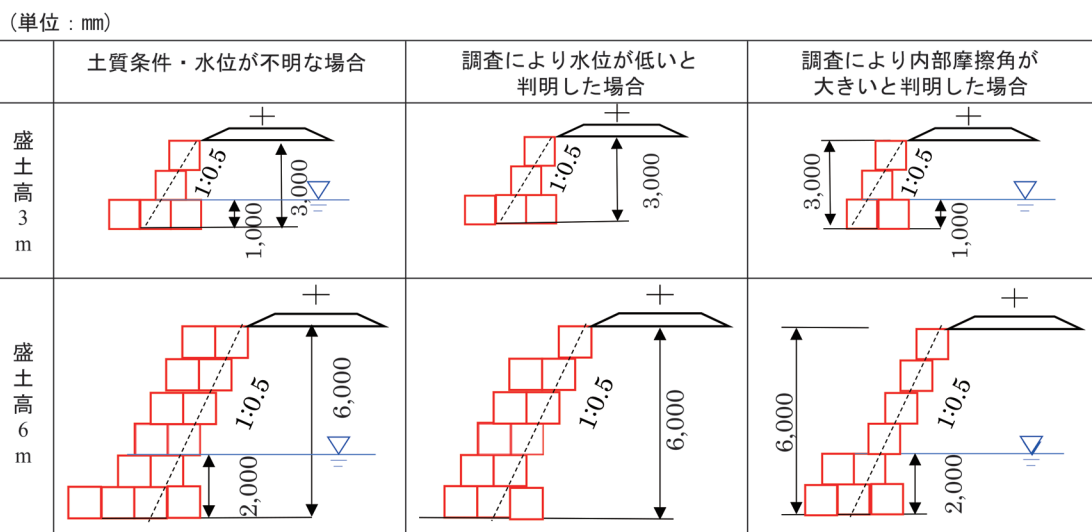


図 15 大型土のうによる応急復旧の標準仕様

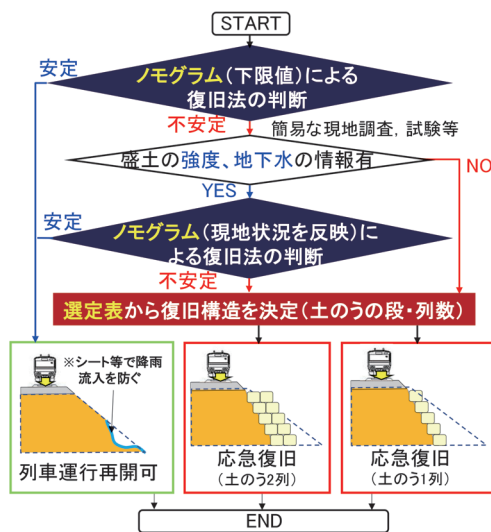


図 16 被災盛土の運行再開判断手法

グラムを用いて、被災盛土が列車載荷時の安定性を評価する。この際に、土質条件・水位が不明な場合を対象に実施し、安定を満足しない場合には、盛土の情報が取得可能か検討する。盛土内水位や盛土材料の強度等の情報が取得できる場合には現地の状況に応じたノモグラムを使用することで、実情に応じた応急復旧の要否を判断することができる。応急復旧が必要となる場合には、図 15 に示した標準仕様をもとに、応急復旧仕様を迅速に決定することができる。

なお、本提案手法は早期の運行再開を行うことを目的としており、運行再開時には徐行とすること、降雨時の運行規制値を通常よりも低減して運用することが必要である。降雨停止後の盛土内の飽和度や水位は時間の経過に伴い低下すると考えられるが、飽和度や水位が高い場合には大きな沈下が発生する可能性があることに留意する必要がある。

## 5. まとめ

本稿では、被災盛土や応急復旧した盛土を対象に、崩壊形状に応じた安定性や列車走行を想定した繰返し載荷に対する累積沈下特性を明らかにするとともに、応急復旧の要否を判断できるノモグラムおよび応急復旧の標準仕様を活用した運行再開判断手法を提案した。本手法の活用により、降雨で被災した盛土の復旧の要否を迅速に判断することが期待される。

今後は応急復旧のみならず、本復旧の進め方や応急復旧を経ない迅速な復旧方法についても検討を行い、「被災盛土の復旧マニュアル」として取りまとめる予定である。なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

## 文 献

- 1) 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.101-115, 2024
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物)平成 25 年改編, 丸善出版, 2013
- 3) 小島謙一, 館山勝: 盛土堤体における降雨浸透の解析手法, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.39-44, 2005
- 4) 伊藤壺記, 松丸貴樹: 1/5 縮尺模型載荷試験による盛土崩壊範囲とバラスト軌道の沈下量の関係, 第 59 回地盤工学研究発表会講演概要集, Vol.59, No.23-11-2-05, 2024
- 5) 関根悦夫, 村本勝巳: 営業線路盤の支持力特性に課する研究, 鉄道総研報告, Vol.9, No.7, pp.19-24, 1995
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(土留め構造物), 丸善出版, 2012
- 7) 土木研究センター: 「耐候性大型土のう積層工法」設計施工マニュアル [改定版], 2017