

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

盛土内の水分量を考慮して耐震性を判断する

鉄道盛土の耐震診断を行う際には、試験方法の簡便さを重視して、土中の水分量を考慮せず、土の間隙を水で満たした状態で強度を評価するため、強度を過小に評価している可能性があります。そこで、盛土内の水分量を考慮した耐震診断手法を提案しました。また、降雨時における盛土の水分量の変化を計測しました。さらに、試算により提案法と従来法による補強仕様の比較を行い、盛土材料の水分量に応じた強度特性を考慮することで従来よりも補強材長を削減できることを確認しましたので、その内容について紹介します。

既設盛土の耐震診断の現状

近年、鉄道構造物では橋りょうや高架橋の耐震補強が行われており、土構造物においても耐震診断や耐震補強が着手されています。土構造物は復旧性に優れた構造物ですが、**図1**に示すとおり、在来線の鉄道構造物全体に占める割合が多く、一部の土構造物が被災した際には線区全体の機能を損なうおそれがあります。そのため、線区内の他構造物との耐震性のバランスを考慮して、土構造物の耐震補強が行われる場合があります。このような膨大な延長を有する土構造物に対して、耐震診断・耐震補強を効率的に進めるために、「鉄道土構造物の耐震診断の手引き(概略診断編)」¹⁾には、耐震診断・補強箇所を選定するための考え方が示されて

います。

既設盛土の多くは地下水位よりも高い位置に構築されており、土の間隙に水と空気が混在した状態にあります。この状態を実験室で再現し、耐震診断・補強設計で使用する強度を評価するためには、**図2**に示すような専用の試験装置²⁾が必要であり、多くの試験工程が必要です。この試験装置では土の間隙に水と空気が混在した状態の供試体を対象としているため、供試体の上部から空気圧を載荷可能な構造となっており、空気圧の制御・計測のために、間隙空気圧のルートと間隙空気圧計が設けられています。

図3に示すように、一般的に土中の水分量が増えると強度は低下する傾向にあり、土の間隙が水で満たされた状態の強度を使用する現行の耐震診断では盛土の強度を実際よりも過小に評価している可能性があります。また、近



佐藤 武斗
Taketo Sato
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
研究員
【専門分野】地盤工学



松丸 貴樹
Takaki Matsumaru
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
主任研究員
【専門分野】地盤工学



中島 進
Susumu Nakajima
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
主任研究員
【専門分野】地盤工学

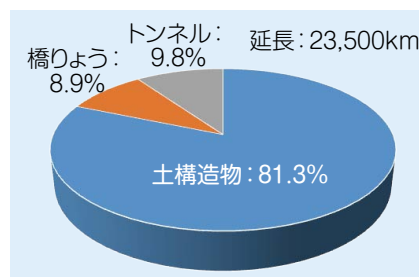


図1 在来線における鉄道構造物の比率 (JR)

土の飽和度

土の間隙の体積とその間隙中に占める水の体積の割合を飽和度と言い、土中の水分量を表す指標として使用されます。土の間隙が水で満たされた状態は、理論上飽和度 100%にあたります。

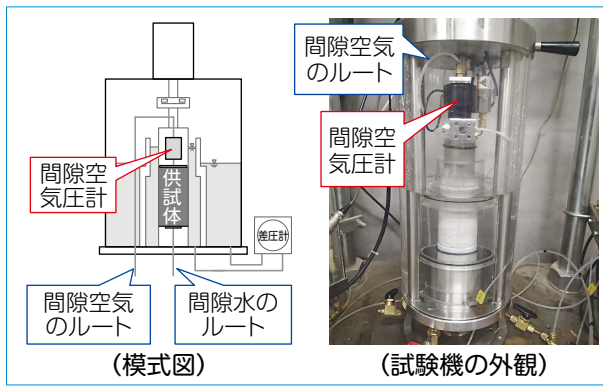


図2 土の水分状態に応じた強度を評価するための試験装置の例

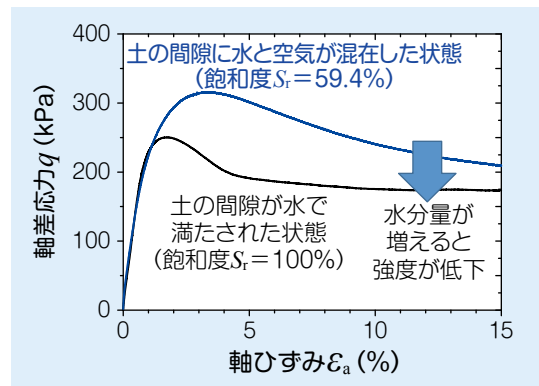


図3 土の水分量に応じた強度の変化 (軸差応力—軸ひずみ関係の例)

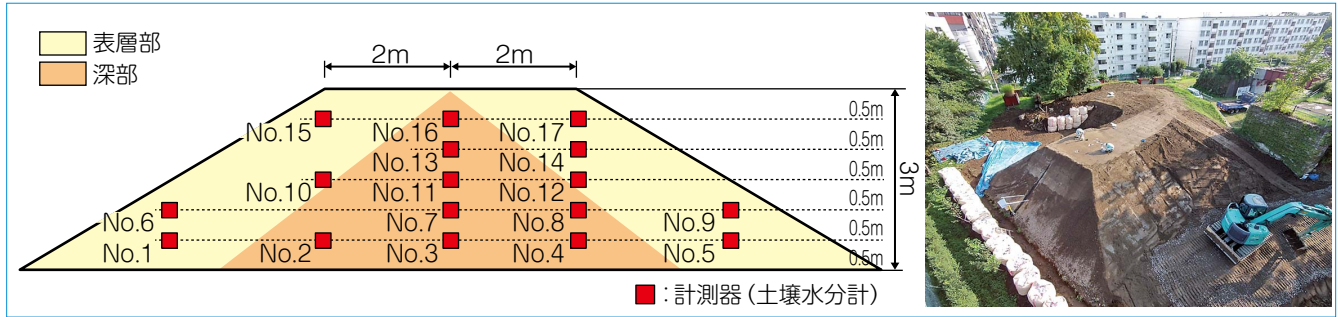


図4 試験盛土の断面図と計測器配置, 施工状況写真

年の試験技術の発展にともない、図2に示すような試験装置も広く普及しており、この試験技術を利用することにより、既設盛土の耐震診断・補強設計法の精度向上や補強仕様の低コスト化の余地があると考えられます。

ここでは、盛土内の水分量を測定した事例および盛土内の水分量を考慮した耐震診断手法を紹介します。

試験盛土による盛土内水分量の計測

盛土内の水分量は、降雨などにより変動することが考えられますが、降雨時にどのような分布となるかは、よくわかりません。そこで、図4に示す高さ3.0m、のり勾配1:1.5の試験盛土を構築し、盛土内の水分量の長期計測を行ったので紹介します。

強い降雨を記録した期間の飽和度の時刻歴を図5に示します。試験盛土の表層部 (No.12, No.17) では、盛土の飽和度が降雨にともない増加しているものの、深部 (No.7, No.11, No.13) では大きな変化が生じていないことを

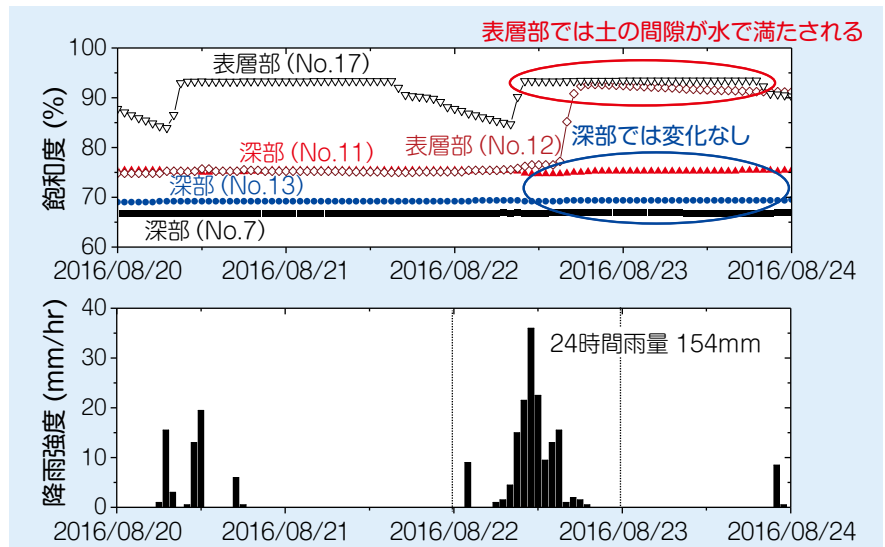


図5 試験盛土における飽和度と降雨強度の時刻歴

確認しました。つまり、盛土の表層部は降雨により、土の間隙がほぼ水で満たされた状態となりますが、盛土の深部では降雨前と変わらずに土の間隙に水と空気が混在しています。盛土の形状、地形・地質や考慮する降雨などの条件によっては、計測結果は変わるものと考えられますが、耐震診断時に盛土内の水分量に応じた強度を考慮できる場合があることを示唆しています。

降雨時の試験盛土の再現解析³⁾

降雨時の試験盛土内の水分量の変化を解析的に再現するために、浸透流解析を実施しました。浸透流解析は、降雨による浸透や地下水の流れなどの土中の水の流れを評価する手法です。本解析では、図6に示す試験盛土と支持地盤で構成される解析モデルを使用しました。解析モデルは、解析対象の寸法や境界の条件を表したものであり、

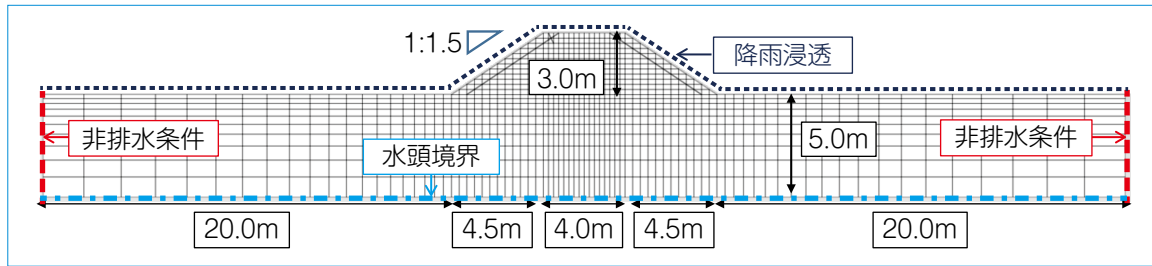


図6 計測結果の再現に使用した解析モデル

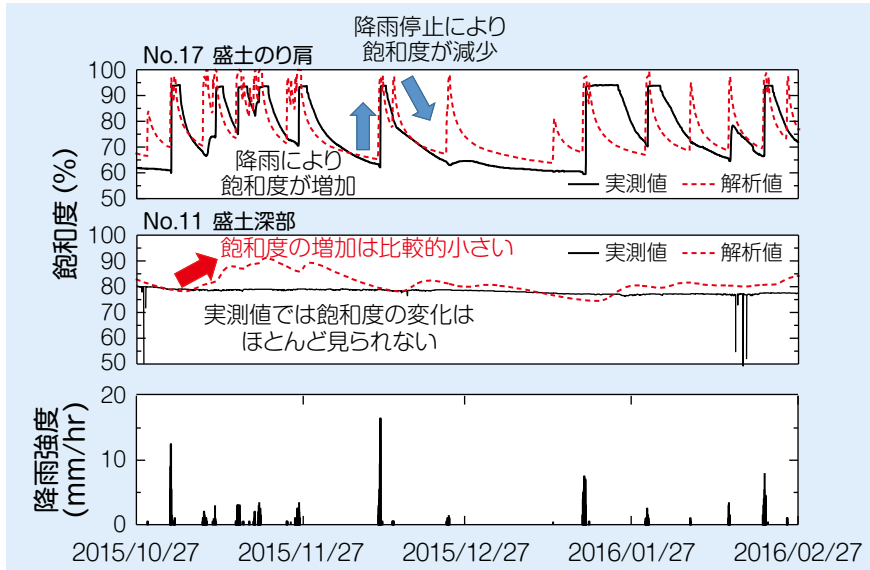


図7 従来法と提案法による補強仕様の比較

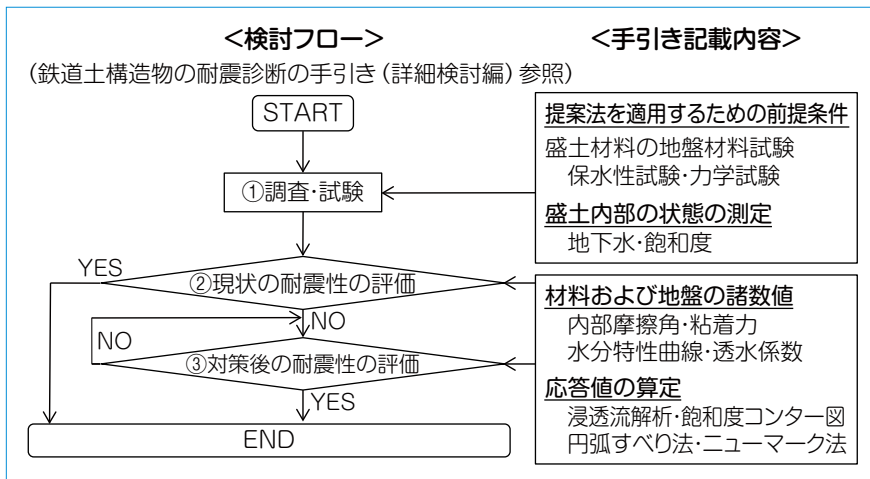


図8 提案法による検討フロー

寸法は試験盛土に合わせて設定しています。考慮する降雨作用は、図7に示す降雨強度を図6の盛土ののり面、天端および支持地盤の地表面に与えています。解析モデルの境界条件については、支持地盤の左右端は、水の流れが生じない非排水条件としました。実測では盛土内に水位が確認されなかった

ことから、支持地盤の下端に水位を固定する水頭境界を設定しました。

対象とした約4ヶ月間における計測値と解析値による飽和度の時刻歴を図7に示します。図4に示す盛土のり肩No.17の位置では、計測値では降雨によって飽和度が増加しており、降雨が停止すると飽和度が低下しています。

解析値は、計測値の挙動をおおむね再現できています。その一方で、試験盛土の深部に位置するNo.11では、計測値においては飽和度の増加はほとんど見られませんでした。解析においても、飽和度の増加は比較的小さく、計測値と同様の傾向が得られていることを確認しました。

以上より、降雨時の盛土の浸透挙動は浸透流解析によりおおむね再現可能であり、耐震診断において既設盛土の内部の水分量を評価する際に、浸透流解析を活用することが有効です。

盛土内の水分量を考慮した耐震診断・耐震補強設計

「鉄道土構造物の耐震診断の手引き(詳細検討編)」⁴⁾には、既設の鉄道盛土の耐震診断・補強設計の検討フローが示されています。この検討フローに沿って耐震診断・補強設計を行う中で、盛土内の水分量に応じた強度を用いることができるように手引き(案)を作成しました。その概要を図8に示します。手引きでは、提案する耐震診断・耐震補強設計を適用するための前提条件の記載、耐震診断・耐震補強設計で行うべき調査・試験の方法や設計で設定する事柄について示しています。耐震診断・補強設計の中では、一般に土構造物の供用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動(L1地震動)に対する安全性の照査、および構造物の設計耐用期間内に発生する確率は低いが非常に強い地震動(L2地震動)に対する復旧性の検討を行います。今回の提案

法の適用を対象としているのはL2地震動に対する復旧性の検討のみとしました。

提案する耐震診断法を行う際には、盛土の飽和度分布が必要ですが、飽和度分布の設定には、盛土の降雨時の安定を検討する際に使用する飽和度コンター⁵⁾を利用する方法があります。この方法は、盛土材料および支持地盤の分類、のり面工の有無、路盤の情報があれば作成できるため、簡易的に決定することが可能です。盛土の断面が複雑な場合には、前章で紹介した浸透流解析から算定する必要があります。

提案法の適用条件

提案する耐震診断・耐震補強設計法は、盛土内に水位が形成されないことを前提としています。そのため、支持地盤が砂質土で地下水位が低く、盛土が水平な地盤上に構築されている場合に適用してよいものとしました。これは支持地盤が粘性土の場合や地下水位が高い場合には、降雨時に地下水位が盛土内に形成される場合があるためです。また、傾斜した地盤上の盛土は、地下水が集まりやすいため、水平地盤上の盛土のみとしました。なお、盛土ののり面にのり面工が施工されている場合には、降雨が浸透しにくいいため、盛土内の水分量の増加が抑制されると考えられます。そのため、提案する盛土内の水分量を考慮した耐震診断・耐震補強設計が有効であるものと考えられます。

提案法と従来法による補強仕様の比較⁶⁾

盛土内の水分量を考慮した補強設計を行った場合に、従来法と比較して、補強仕様がどの程度削減可能か確認することを目的に、試算を実施しました。検討断面は、**図9**に示すような高さ6.0m、のり勾配1:1.5の片

断面の盛土を対象としました。試算においては、在来線に使用される盛土を想定して、L2地震時に生じる変形量が200mm以内となるように、補強設計を行います。検討ケースは、従来法と提案法に基づく2ケースです。従来法では盛土の全面を間隙が水で満たされた状態(飽和度 $S_r = 100\%$)として扱っています。提案法では、非常に大きな降雨を対象にした際の盛土内の水分量の分布⁵⁾を用いて、盛土内の飽和度分布を設定しました。

図9に検討ケースにおける補強仕様の比較図を示します。従来法では、土の間隙が水で満たされているため、提案法に比べて土の強度が低く、変形量を200mm以内に収めるための地山補強材長が5.0m必要です。その一方で、提案法における地山補強材長は、3.2mの地山補強材が従来法と同じ配置間隔、段数で必要となる結果を得ました。つまり、従来法と比較して提案法では1.8mの補強材長を削減でき、工事費の削減に貢献できると考えられます。

おわりに

近年の盛土の耐震診断および耐震補強の実施にともない、耐震補強で行う地山補強材の補強材長が過度に長くなる場合があります。ここでは、試験盛土による盛土内の水分量の計測により、降雨時においても盛土の深部は土の間隙が水と空気が混在した状態であることを把握した事例を紹介しました。また、降雨時の試験盛土の再現解析により、計測した降雨時の盛土内の水分量の変化を表現できることを紹介しました。さらに、盛土内の水分量を考慮した耐震診断・耐震補強設計法を提案し、提案法と従来法による補強仕様の比較

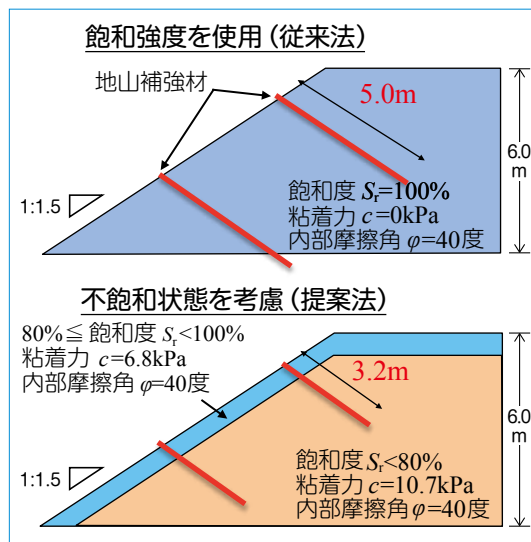


図9 従来法と提案法による補強仕様の比較図

から補強材長が削減できる場合があることを確認しました。これは地盤材料が水分量に応じて強度が変化することに起因しますが、地盤材料によっては水分量が変わっても強度が大きく変わらない場合もあります。今後は、提案する耐震補強法の適用が有効である地盤材料を簡易的に判別する手法を構築することにより、利便性の高い耐震補強法へと発展させていく予定です。[RRR]

文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道土構造物の耐震診断の手引き（概略診断編），2016
- 2) 松丸貴樹：水と空気が混在する土の挙動を解明する，RRR，Vol.70，No.8，pp.20-23，2013
- 3) 小湊祐輝，松丸貴樹，佐藤武斗，中島進，鈴木丙午，平井孝明，藤原雅仁，濱田吉貞：試験盛土による長期的な含水状態変動の計測と浸透流解析，土木学会第72回年次学術講演会，Vol.72，No.Ⅲ-087，pp.173-174，2017
- 4) 鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター：鉄道土構造物の耐震診断の手引き（詳細検討編），2016
- 5) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物（平成25年改訂），丸善出版，2013
- 6) 佐藤武斗，松丸貴樹，中島進，小湊祐輝，山田孝弘，藤原雅仁：不飽和土の強度特性を考慮した既設盛土の耐震診断法，鉄道総研報告，Vol.31，No.7，pp.23-28，2017