鉄 道 総 研 報 告
特集：地震防災・耐震技術

不飽和土の強度特性を考慮した既設盛土の耐震診断法

佐藤　武斗*　　松丸　貴樹*　　中島　　進*
小湊　祐輝*　　山田　孝弘**　　藤原　雅仁***

Aseismic Diagnosis Method for Existing Embankments in Consideration of Shear Strength of Unsaturated Soils

Taketo SATO　　Takaki MATSUMARU　　Susumu NAKAJIMA
Yuki KOMINATO　　Takahiro YAMADA　　Masanori FUJIWARA

In the aseismic diagnosis for existing embankments there is a possibility that their seismic stability is underestimated, and the aseismic reinforcement is conducted excessively due to the design based on the shear strength of the saturated soil which results in evaluated on the safe side rather than the actual shear strength of the embankment. In this study, the aseismic diagnosis method in consideration of the shear strength of unsaturated soils is proposed, and the trial design for the aseismic reinforcement is performed to grasp the effectiveness of the method proposed. As a result, through a comparison between the conventional method and the method proposed, we confirmed that the aseismic reinforcement designed by the method proposed is more rational than that designed by the conventional method.

キーワード：不飽和土，耐震診断法，既設盛土，地盤材料試験，現地計測，安定解析

1．はじめに

近年，各鉄道事業者によって橋りょうや高架橋の耐震補強が優先的に行われてきたが，盛土は復旧性に優れていると考えられていたため，耐震診断・耐震補強事例は限定的であった。しかしながら，過去の地震被害では，盛土をはじめとした土構造物にも甚大な被害が発生し，長期にわたり鉄道の機能が停止する場合があることから，盛土の耐震性の評価や耐震補強が喫緊の課題となっている。既設の鉄道盛土は，その建設年代に応じて使用材料や施工方法など施工管理基準が大きく異なり，その耐震性も様々である。そのため，既設の鉄道盛土の耐震診断・補強を効率的に進める方法が求められている。

既設の鉄道盛土の耐震診断を行う際には，採取した盛土材料を用いて地盤材料試験を行い，その結果より強度に関する土質諸数値を設定することが一般的[1)]である。既設の鉄道盛土の含水状態は，降雨時の計測事例が少なく不明であったが，土の間隙に水と空気が混在した不飽和状態であると考えられる。しかしながら，実務的には盛土材料を飽和状態として地盤材料試験を実施し，その強度を評価することが多い。このことは，不飽和土を対象とした試験装置や試験技術が十分に整備されていなかったことや降雨時の盛土内部の含水状態が解明されていなかったため，地盤材料を不飽和状態よりもせん断強度が低い飽和状態として扱うことに起因する。

＊　　構造物技術研究部　基礎・土構造研究室
＊＊　　西日本旅客鉄道株式会社　大阪工事事務所
＊＊＊　西日本旅客鉄道株式会社　構造技術室

近年，地盤材料試験の技術が発達し，不飽和状態を考慮した地盤材料試験を行う装置・技術が整備されている。そのため，飽和状態ではなく不飽和状態で地盤材料試験を行い，耐震診断や補強設計に活用することで，既設の鉄道盛土の耐震性を適切に評価し，耐震補強の効率化を図ることができるものと考えられる。耐震補強設計における現行の設計法と提案法の補強仕様や経済性のイメージを図１に示す。既設の鉄道盛土の内部に強度の高い不飽和状態の領域が存在することで，すべり面がその表層に近い位置へ移動することが想定される。これにより耐震補強で必要となる地山補強材の打設長や数量が削減できる可能性がある。経済性については，提案法では不飽

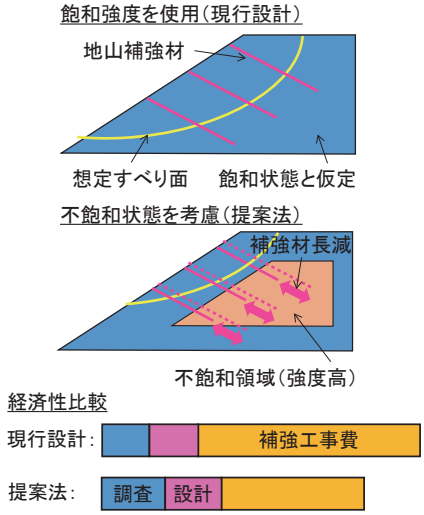


図１　耐震補強設計における現行の設計法と提案法の補強仕様や経済性のイメージ

和土の強度特性を把握するための調査等に要する費用は増加するものの，補強材長や数量の削減による工事費の削減が見込まれるため，全体の費用低減が期待される。提案法を適用するために，対象とする盛土材料の不飽和状態の強度が飽和状態に比べて増加することや，降雨時においても既設の鉄道盛土の内部で不飽和状態が維持されることを確認する必要がある。

そこで本研究では，不飽和土の三軸圧縮試験により盛土材料の不飽和状態における強度評価を行うとともに，既設の鉄道盛土における土壌水分量の長期計測を実施し，その内部の含水状態を把握した。さらに，不飽和土の強度特性を考慮した既設の鉄道盛土の耐震診断・補強設計法を提案し，提案法と従来法から得られた補強仕様の比較を実施した。

2．不飽和土の三軸圧縮試験による盛土材料の強度評価

2.1　試験条件

鉄道盛土に使用された盛土材料の不飽和状態における強度特性を把握することを目的に，不飽和土の三軸圧縮試験を実施した。実験に使用した不飽和土の三軸試験機の模式図を図 2 に示す。試験装置は二重セル式圧力室，多孔質膜とポーラスメタルから構成されるペデスタル，二重管ビュレット，載荷キャップ等から構成される。試験方法は，①供試体の飽和化，②等方圧密・サクション載荷による飽和度調整，③せん断過程の三段階に分けられる。

①では，所定の含水比および乾燥密度で作成した供試体を二重セル式三軸室に設置後，セル圧 20kPa のもと，供試体下部から脱気水の通水を行い供試体の飽和化を行った。②では，基底応力を 49kPa とした載荷条件下で，供試体上部より所定の空気圧の載荷を行い，供試体の飽和度を目標飽和度となる様に排水過程で調整した。③では，排気・排水条件の下，載荷速度を 0.05%/min とし，軸ひずみ 15% まで単調載荷を行った。

本試験には，鉄道盛土の建設に用いられた地盤材料を用いており，それぞれ土構造標準[2)] に示される土質 1 ～ 3 に分類される地盤材料である。各試料の細粒分含有率と乾燥密度，目標飽和度を表 1 に示す。各供試体は，締固め密度比 D_c が 90% となる様に乾燥密度を設定した。また，不飽和土の三軸圧縮試験は，各目標飽和度につき 1 供試体ずつ実施した。

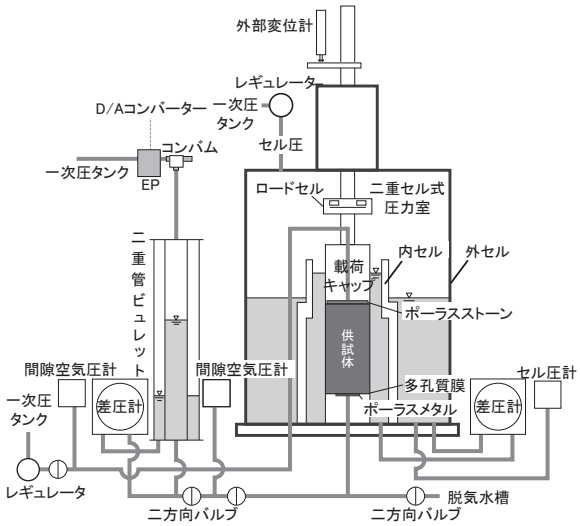
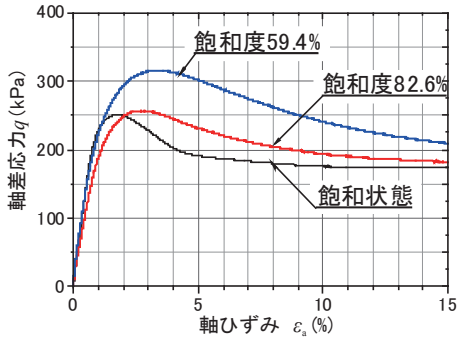


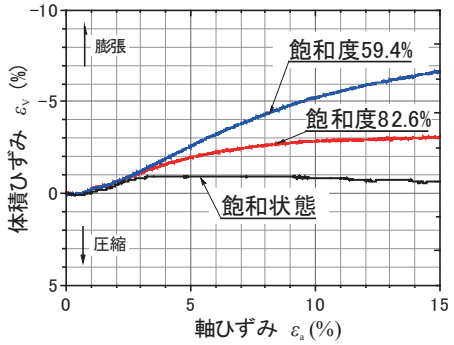
図 2　不飽和三軸試験機の模式図

表 1　使用材料の細粒分含有率，乾燥密度，目標飽和度

	土質区分	細粒分含有率 F_c (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	目標飽和度 S_r (%)
試料 A	土質 1	5	1.848	80, 60
試料 B	土質 2	4	1.694	80, 60
試料 C	土質 3	16	1.890	70, 50
試料 D	土質 3	31	1.394	80, 60
試料 E	土質 3	23	1.292	80, 60, 50



(a) 軸ひずみ—軸差応力関係



(b) 軸ひずみ—体積ひずみ関係

図 3　試料 A の不飽和土の三軸圧縮試験結果

2.2　試験結果

代表試料である試料 A の（a）軸ひずみ～軸差応力関係および（b）軸ひずみ～体積ひずみ関係を図 3 に示す。(a) において，ピーク時および軸ひずみ 15% 時の軸差応力は，飽和度の低下に伴い大きくなっており，その強度が増加していることを示す。(b) については，飽和度が下がるにつれて間隙空気の割合が大きくなり，せん断

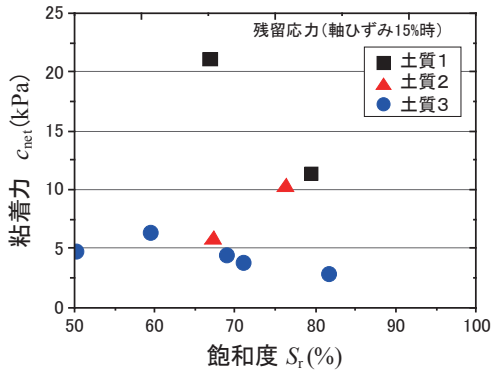


図４　飽和度－粘着力関係

図５　ボーリング孔を利用した土壌水分計の埋設方法

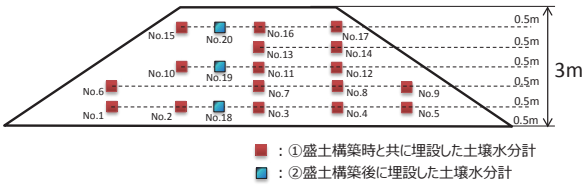


図６　試験盛土における土壌水分計の埋設位置

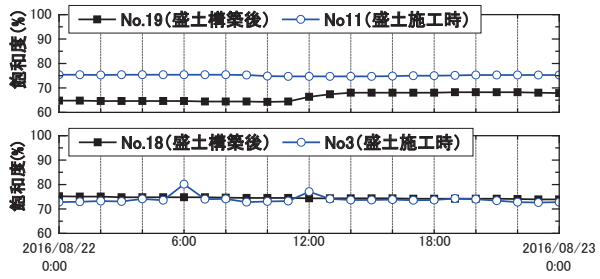


図７　経験最大降雨時における
土壌水分計の計測結果の比較

時の体積膨張が大きくなることが確認された。

不飽和状態では，土粒子間に作用するサクションによりみかけの粘着力が増加し，飽和状態よりも強度増加が期待される。そこで，一連の不飽和土の三軸圧縮試験の結果を整理して，各試験結果の粘着力を算定した。本検討では，飽和状態の粘着力が 0kPa であるとして内部摩擦角を算定し，算定した飽和状態の内部摩擦角と不飽和状態の内部摩擦角は等しいものと仮定して，不飽和状態における粘着力を算定した。図 4 に得られた飽和度と粘着力の関係を示す。飽和度に対する粘着力は地盤材料によって違いがあるが，大きいものでは粘着力が 20kPa 以上に達する場合があることが確認された。どのような地盤材料が不飽和状態時に大きな粘着力を発揮するかは，不明であるため，今後の検討課題とする。

３．降雨時の既設の鉄道盛土の浸透挙動の解明

3.1　試験盛土における計測手法の妥当性の検証

3.1.1　試験盛土の概要

既設の鉄道盛土における土壌水分量の計測は，計測器の埋設に際して掘削および埋戻しを伴うため，計測箇所の近傍が乱されて，周囲の密度や浸透特性と異なることが懸念される。そこで，土壌水分量の計測手法の妥当性を検証するために，試験盛土の構築と土壌水分計測を実施した。試験盛土は高さ 3.0m，のり勾配 1：1.5 とし，細粒分質礫質砂：SFG，土質 3 に分類される地盤材料を用いる。試験盛土の構築にあたっては，締固め密度比が D_c=90%（性能ランクⅡ，Ⅲ[2)] 相当）となるように 4t コンバインドローラーおよびバケット容量 0.28m^3 のバックホウを用いて仕上がり厚 50cm となるように転圧した。

土壌水分計測には誘電率土壌水分計（EC-5；DECAGON 社製）を使用し，試験盛土の構築時には各層に埋設した。さらに，既設の鉄道盛土での掘削を伴う計測器の埋設を想定し，試験盛土の構築半年後に，ボーリング孔を利用して土壌水分計の埋設を行った。図 5 に示すように，盛土材料を用いて試験盛土と同等の密度で製作した供試体の内部に土壌水分計を埋設し，ボーリング孔内に埋設する方法を考案した。計測箇所以外の埋戻しは投入土量と高さで密度管理を行い，試験盛土の乾燥密度と同等の密度で施工した。土壌水分計の配置図を図 6 に示す。土壌水分計は，試験盛土の構築時に 17 個，試験盛土の構築後に 3 個埋設した。

3.1.2　試験盛土の計測結果

最も降雨強度が高かった期間における上記の方法で計測した盛土深部での計測結果の比較を図 7 に示す。ここでは，試験盛土の構築後の密度変化がないものと仮定して，土壌水分計より得られた体積含水率を飽和度に換算している。同図に示す通り，試験盛土構築時に埋設した土壌水分計と構築後に埋設した土壌水分計の計測結果は概ね同一の挙動を示している。以上から，ボーリング孔を利用して土中に土壌水分計を埋設した場合であっても，降雨による盛土内の飽和度の変化を適切に評価できることを確認した。

試験盛土における降雨時の浸透挙動を把握するために，最も降雨強度が高かった期間（2016 年 8 月 22 日 0 時をスタートとする）における降雨強度と飽和度の時刻歴を図 8 に示す。同図に示すように，試験盛土の比較的浅い領域（No.12，No.17）では降雨に伴って飽和度が

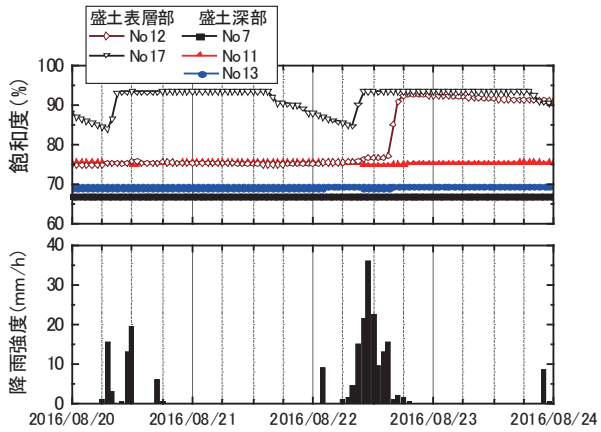


図８　経験最大降雨時における試験盛土の計測結果

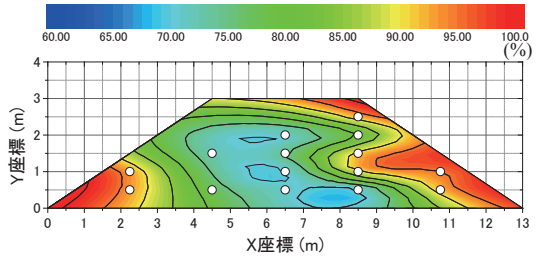


図９　経験最大降雨時における試験盛土の飽和度分布

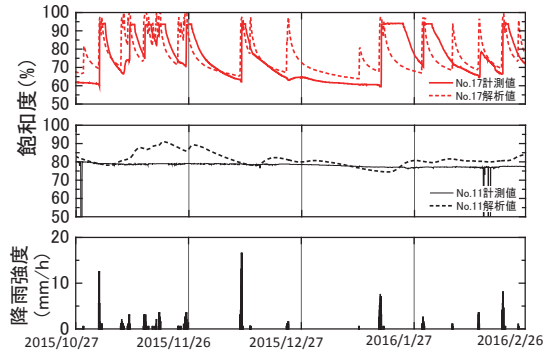


図 10　計測値と解析値による飽和度の時刻歴

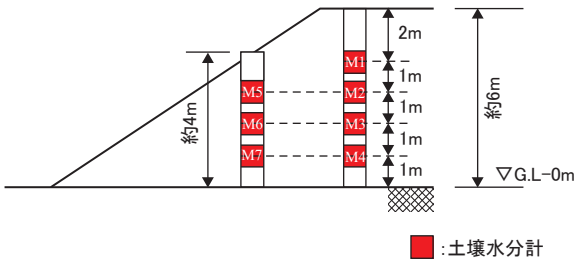


図 11　既設の鉄道盛土の計測断面

変動しているものの，深部（No.7，No.11，No.13）では顕著な変化は生じていないことが確認できた。降雨強度が最大となった時刻における試験盛土の飽和度分布を図 9 に示す。試験盛土の表層では，降雨により飽和状態に達しているが，試験盛土の深部では，飽和度が約 70% 程度と比較的低いことが確認された。試験盛土のように，のり面工が施工されていない盛土であっても，降雨時にはその深部に不飽和状態の領域が存在することが示唆された。

3.1.3　試験盛土の解析結果

降雨時の試験盛土の浸透挙動を数値解析により再現することを目的に，飽和―不飽和浸透流解析を実施した。解析モデルや解析条件については文献3)を参照されたい。

試験盛土の構築後 2 ヵ月～ 6 ヵ月における計測値と解析値による飽和度の時刻歴を図 10 に示す。盛土のり肩の No.17 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くが，この挙動が解析によってもよく再現できている。一方，試験盛土の深部に位置する No.11 では，飽和度の増加が小さく，数値解析においても同様の傾向が得られている。

以上より，数値解析により降雨時の盛土の浸透挙動は再現可能であり，耐震診断において既設の鉄道盛土の内部の不飽和状態を評価する際に，飽和―不飽和浸透流解析を活用することが可能である。

3.2　既設の鉄道盛土における土壌水分計測[4)]

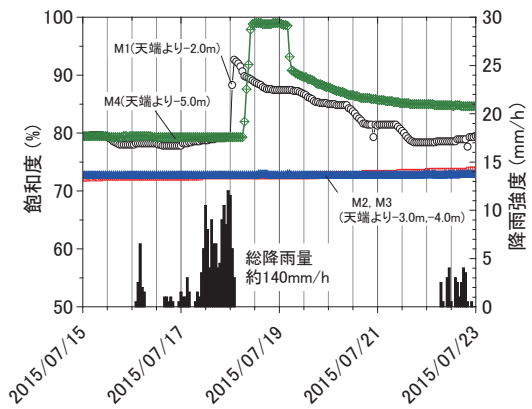
3.2.1　既設の鉄道盛土の概要

単線区間の鉄道盛土を対象に，含水状態の計測を実施した。既設の鉄道盛土の計測断面を図 11 に示す。鉄道盛土の形状は，高さ 6.0m，のり勾配 1：1.5 程度であり，盛土材料は土質 3 に分類される細粒分質砂（SF）である。鉄道盛土ののり面には植生が繁茂しており，降雨浸透を防止するのり面工は施工されていない。また，支持地盤は，砂質粘土で構成されている。土壌水分計の埋設は，ボーリング孔を利用して 3.1.1 で示した方法と同様に行い，のり肩とのり面の 2 測線，7 箇所（M1 ～ M7）に土壌水分計を埋設した。

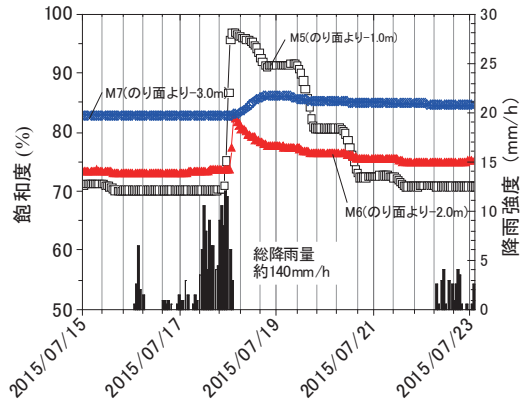
3.2.2　既設の鉄道盛土での計測結果

図 12 に経験最大降雨時（最大降雨強度 17.5mm/hr，総降雨量 140mm 程度）における飽和度の時刻歴を示す。(a) に示す盛土天端の測線では，M1 および M4 での飽和度増加が大きいものの，M2 および M3 での飽和度の変化はほとんど見られず，降雨の影響が小さいことが確認された。M1 では地表面からの浸透に，M4 では対象とした鉄道盛土が砂質粘土地盤上に構築されていたため，鉄道盛土の底面と支持地盤の境界に浸透水が滞留したためと考えられる。鉄道盛土の中心部に埋設された M2 および M3 では，降雨による飽和度の影響は見られずに概ね 75% の飽和度を一定に保っていた。(b) に示す盛土のり面の測線の計測結果では，のり面に近い箇所から順に飽和度が増加しており，いずれの測点においても降雨浸透が確認された。

以上より，既設の鉄道盛土においても 3.1.2 項に示した試験盛土と同様に，盛土の深部では降雨浸透が見られず，不飽和状態であることを確認した。



(a) 盛土天端の測線



(b) 盛土のり面の測線

図 12　経験最大降雨時の既設の鉄道盛土の計測結果

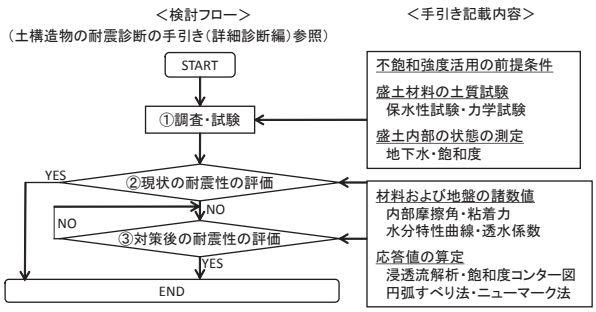


図 13　提案手法の手引きの概要

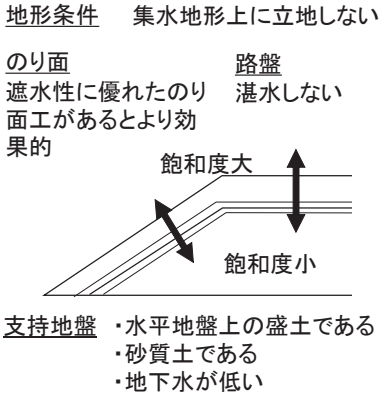


図 14　提案法の前提条件の概要

4．不飽和土の強度特性を用いた耐震診断・補強設計法

4.1　提案する耐震診断法の概要

「土構造物の耐震診断の手引き（詳細診断編）」[1] には，既設の鉄道盛土の耐震診断・補強設計の検討フローに基づいた実施方法が示されている。この検討フローに基づいて，提案する不飽和状態の強度特性を考慮した耐震診断・補強設計が実施できるように手引きを整備した。その概要を図 13 に示す。手引きでは，不飽和状態を考慮できる前提条件の記載や，診断・補強設計で不飽和状態を考慮するために行うべき調査・試験の方法や，設計で設定する事柄について示している。

4.1.1　提案法の前提条件

耐震診断・補強設計の中では一般に L1 地震動に対する安全性の照査（安定照査）および L2 地震動に対する復旧性の検討（変形量照査）を行うが，今回の提案法を適用できるのは後者のみとした。これは，設計時に L1 地震動に対する安全性を確保していれば，L2 地震動による作用に対しても安定を保持でき，さらに過大な変形が生じない場合があるためである。そのため，L1 地震動を対象にした安全性の照査においては従来通り，飽和状態の強度を用いて安定の検討を行い，最低限これを満足する補強仕様とすることが規定される。

図 14 に提案法の前提条件の概要を示す。地盤条件については，対象とする盛土は水平地盤上に構築されており，かつ支持地盤が砂質土で地下水位が低い場合を前提としている。これは支持地盤が粘性土である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まで上昇する可能性があることを考慮したものである。また，傾斜地盤上の盛土は地下水が集まりやすいため，水平地盤での適用を前提とした。路盤については，盛土内に路盤が構築されておらず，湛水しないことを前提とした。なお，盛土ののり面については，のり面工が施工されていると遮水性が向上し，盛土内部の不飽和土の領域が拡大するため，不飽和土の強度特性を用いる利点が得られやすいものと考えられる。

4.1.2　盛土内部の不飽和領域の評価

盛土内部の不飽和状態を L2 地震時の変形解析で考慮するには，ニューマーク法による変形計算において，解析モデル内に不飽和状態の領域を設定し，飽和度の大きさに応じた粘着力を設定する。盛土内部の飽和度分布は，盛土形状が比較的単純であれば土構造標準[2] に示される飽和度ゾーニング図を用いてよい。盛土形状が複雑である場合やより合理化を図りたい場合には，飽和－不飽和浸透流解析により盛土内部の飽和度分布を求める。用いる降雨作用は，土構造標準に示される地域ごとの降雨作用ⅠもしくはⅡとし，砂質土盛土の場合には短期型降

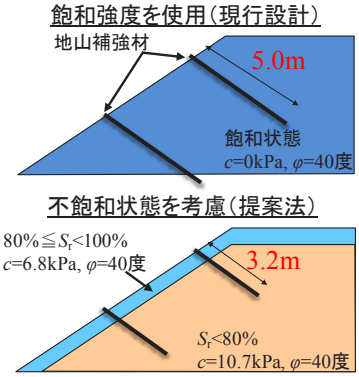


図 15　試設計による現行設計法と提案法の補強仕様

雨パターンを用いるとよい。盛土材料の飽和透水係数や水分特性曲線はそれぞれ室内透水試験（定水位法・変水位法）や保水性試験を行って得ることが望ましいが，実施が難しい場合には土構造標準[2]に示す土質毎の透水係数や水分特性曲線を参考に定めるとよい。また，支持地盤の地下水位計測等を実施し，4.1.1 で示した前提条件を満足することを確認することが望ましい。

4.2　提案法と従来法の比較[5]

不飽和土の強度特性を考慮した耐震診断を行った際に，従来の耐震診断法と比較して，補強仕様にどの程度の優位性が生じるか確認することを目的に，ニューマーク法による試計算を実施した。

4.2.1　計算条件

検討断面は，高さ 6.0m，のり勾配 1:1.5 の盛土を対象とした。試計算においては，復旧性における L2 地震時の盛土体の残留変形量を照査項目とし，盛土は性能ランクⅡであるとして残留変位の設計限界値を 200mm とした。考慮する地震作用は，G2 地盤における土構造照査波[6]とし，残留変形量が 200mm 以下を満足するように地山補強材（改良径 400mm，定着剤強度 3000kN/m^2，設置角度 35°）による補強を行うものとした。

検討ケースは，従来法と提案法に基づく 2 ケースである。従来法は盛土全面を飽和状態（S_r=100%）として扱っており，地震作用のみを考慮している。提案法では，降雨作用Ⅱの飽和度コンター図[2]を用いて盛土内の飽和度分布を設定し，地盤材料試験より得られた強度に関する土質諸数値を使用し，ニューマーク法による安定解析を実施した。

4.2.2　計算結果

図 15 に検討ケースにおける要求性能を満たす補強仕様の比較を示す。従来法は，飽和状態の土質諸数値のみを使用しているため，提案法に比べて設計限界値を満たす補強材長が長くなっており，5.0m の地山補強材が 2 段必要である。その一方で，提案法における補強仕様は，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た。すなわち，従来法と比較して提案法では 1.8m の補強材長を削減することができ，工事費の削減に大きく貢献できる可能性がある。

5．おわりに

既設の鉄道盛土の耐震診断および補強設計の高度化を図ることを目的に，地盤材料試験による盛土材料の不飽和強度特性の評価，降雨時の試験盛土や既設の鉄道盛土の含水状態の計測を実施した。それらの結果より，不飽和土の強度特性を考慮した耐震診断手法を提案し，試計算を実施した。以下に，得られた知見について述べる。

(1) 鉄道盛土材料を対象に実施した不飽和土の三軸圧縮試験より，飽和状態と比べると不飽和状態では発揮される強度が増加することを確認した。また，不飽和状態における粘着力は，地盤材料によって異なることを確認した。

(2) 試験盛土や既設の鉄道盛土を対象に土壌水分量の計測を実施した。その結果，盛土の表層では降雨時に飽和度の顕著な増加が確認されたが，盛土内部では顕著な飽和度増加が確認されず，不飽和状態が維持されることを確認した。

(3) 不飽和状態を考慮した既設の鉄道盛土の耐震診断・補強設計手法を提案し，従来法と提案法による試計算を実施した。その結果，従来法と比べ，提案法では地山補強材長を低減できることを確認した。

文　献

1）鉄道技術推進センター編：土構造物の耐震診断の手引き（詳細診断編），鉄道総合技術研究所，2016
2）丸善：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物，平成 25 年改編），2007
3）小湊祐輝，松丸貴樹，佐藤武斗，中島進，鈴木丙午，山田孝弘，藤原雅仁：長期的な盛土内部の含水状態変動に関する考察，土木学会第 72 回年次学術講演会，2017（投稿中）
4）小湊祐輝, 中島進, 島田貴文, 佐藤武斗, 山田孝弘, 藤原雅仁: 不飽和強度特性を使用した盛土耐震補強設計の技術課題整理，第 51 回地盤工学研究発表会発表概要集，pp.685-686, 2016
5）藤原雅仁, 山田孝弘, 中島進, 島田貴史, 長尾洋太, 佐藤武斗: 不飽和強度特性を使用した盛土の耐震補強設計に関する検討，第 51 回地盤工学研究発表会発表概要集，pp.687-688, 2016
6）丸善：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），2012