

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

水と空気が混在する 土の挙動を解明する

土構造物は他の構造物と異なり降雨の影響を受けるため、これまでに降雨災害や、降雨を引き金とした地震災害を多く受けてきました。これらの現象解明を行うためには、ミクロ的な視点で土を、土粒子とその間隙に水と空気が混在した「不飽和土」として捉え、その挙動を解明することが重要となります。本稿では、不飽和土の特徴に触れつつ、鉄道総研で進めてきた不飽和土を対象とした室内土質試験、ならびに降雨散水装置と振動台を併用した模型実験の概要や実験事例について紹介します。



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

不飽和土とは

土をミクロ的な視点で捉えると、土粒子と間隙に分けられ、間隙は水と空気の混合状態となっています。これを地盤工学の分野では図1に示すように、土粒子・間隙水・間隙空気から成る三相混合体として捉えることがあります。

地盤には地下水が存在し、地下水位より深い部分では一般に間隙が水で満たされています。このような土を飽和土と呼びます。

一方、地下水位より上方では間隙は完全に水で満たされることはなく、空気と水が混じった状態となっています。これを不飽和土と呼びます。

不飽和土は間隙内に空気が存在するため、飽和土にはない特徴があります。不飽和土の状態を表す指標として、「飽和度」と「サクシヨン」の2つがあります。飽和度は間隙に占める水の割合であり、飽和土では飽和度が100%となります。サクシヨンは、乾燥した不飽和土において土粒子が間隙水を吸い上げる力のことであり、間隙内の空気圧と水圧の差として算定されます。サクシヨンが大きいほど吸引力が発揮され、一般には飽和土に比べて不飽和土の方

が、またサクシヨンが大きいほど強度・変形特性が向上します。

この飽和度とサクシヨンの関係を示した水分特性曲線を図2に示します。両者は曲線関係を示し、土の種類によってこの形状も大きく変わります。また、間隙水が減る(排水)過程と、間隙水が増加する(吸水)過程では異なった経路を辿ります。また、この図の中では、下側に位置する青い曲線を通る土に比べ、上側の赤い曲線の土の方が水持ちが良い(保水性が良い)といえます。粘土のような粒径の小さな材料は保水性が良く、砂や礫など粒径の大きな材料は保水性が悪いことが一般的です。

これまでに飽和土の研究開発はかなり進められてきましたが、不飽和土に

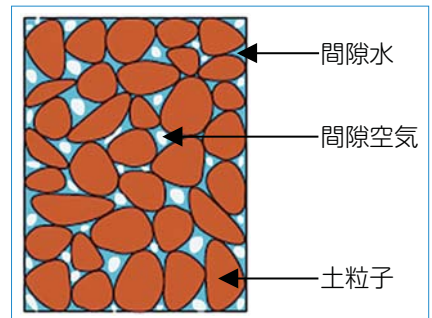


図1 土のミクロ的な捉え方

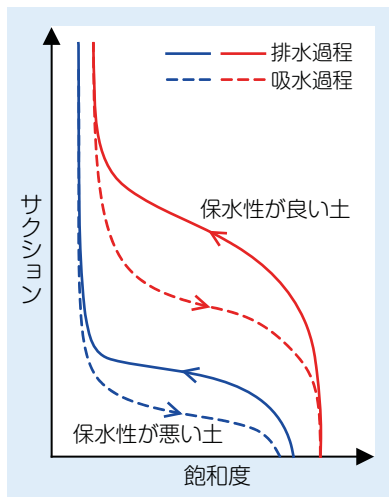


図2 飽和度とサクションの関係(水分特性曲線)

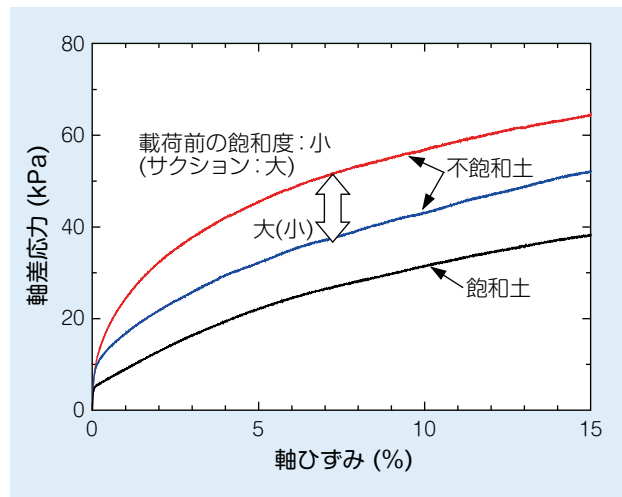


図4 不飽和土の三軸圧縮試験結果

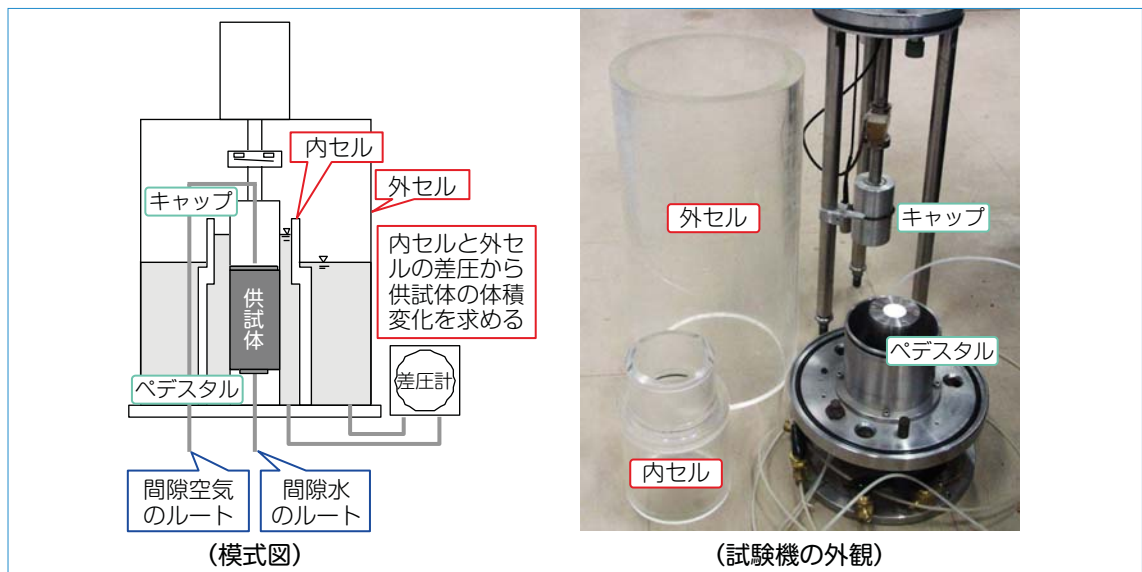


図3 不飽和土用三軸試験機の概要

についてはあまり取り扱われてきませんでした。これは、不飽和土では三相混合体としての取扱いが必要となり、広い範囲にわたって飽和度・サクションの影響を考える必要があるためです。しかしながら、降雨の影響、あるいは降雨と地震の両者の影響を受ける土構造物を扱う場合には、不飽和土の現象解明が不可欠となります。

不飽和土の力学特性を把握するための室内試験

土の力学特性を把握する試験として、三軸試験があります。不飽和土においても、この三軸試験を行います。図3は、鉄道総研で所有する不飽和土用の三軸試験装置の概略図です。飽和土の三軸試験とは異なる部分があ

りますが、ここではその特徴的な違いを2点紹介します。

1点目は、試験機が二重セル構造となっている点です。三軸試験では供試体の体積変化を捉えることが必要となるのですが、飽和土の場合は体積変化が供試体からの排水量と一致するため、この排水量を測定します。一方、不飽和土の場合は、試験中に水だけでなく空気も排出されるため、この方法では供試体の体積変化を測定することができません。このため、図のように試験機を二重セル構造として、内側のセル

の水位変化から供試体の体積変化を測定する工夫を行っています。

2点目は、不飽和土を対象とする場合には、間隙の空気圧と水圧を独立に制御・測定する必要があります。そこで、供試体の下面(ペDESTAL側)には間隙水のルート进行、供試体の上面(キャップ側)には間隙空気のルートを設けています。

この試験機を用いて、不飽和土の三軸圧縮試験を行いました。試験により得られた軸差応力と軸ひずみの関係を図4に示します¹⁾。この試験では、降

軸ひずみと軸差応力

三軸試験では、水平方向の応力を一定に保ちながら、鉛直方向に荷重を行います。試験結果は、軸方向のひずみ(軸ひずみ)と、鉛直方向と水平方向の応力差である軸差応力の関係として整理することが多く、軸差応力の大きさが土の強度を表し、軸ひずみの増加量に対する軸差応力の増加量が土の剛性(変形特性)を表すこととなります。

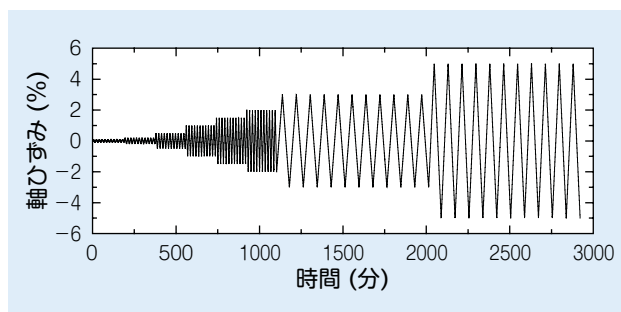


図5 繰返し載荷での軸ひずみの時刻歴

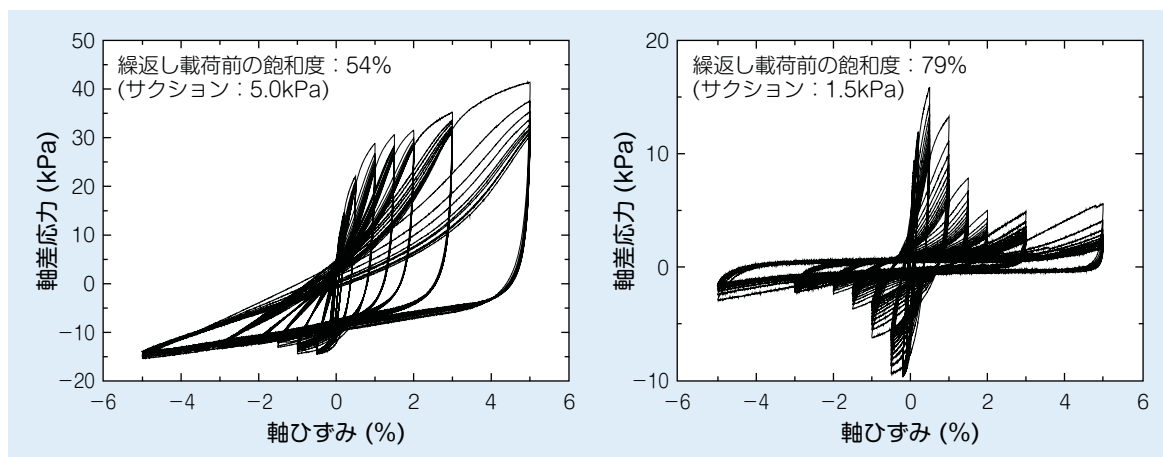


図6 不飽和土の繰返し三軸試験結果

雨が浸透し十分時間が経過した盛土の状況をイメージして、試験中の間隙水圧と間隙空気圧が一定(すなわちサクシオンが一定)となる条件のもと、軸ひずみの速度一定として行いました。載荷前の飽和度が小さいほど(サクシオンが大きいほど)、発揮される軸差応力が大きく、また不飽和土では飽和土と比較して大きな強度・変形特性を示すことがわかります。

また、降雨の影響を受けた盛土の地震時の挙動を解明するためには、不飽和土の繰返し載荷に対する強度・変形特性を把握する必要があります。そこで、不飽和土の繰返し載荷試験を行いました²⁾。この試験では、極めて短時間の間に地震動のような繰返し荷重が作用することをイメージし、繰返し載荷中に供試体の内部から間隙水・間隙空気移動できない条件のもとで実施しました。繰返し載荷は、図5に示すよ

うな軸ひずみ振幅が載荷時間と共に増加していくように与えました。

図6は、繰返し載荷前の飽和度が54%および79%(サクシオンでは5.0kPaおよび1.5kPa)の場合の繰返し三軸試験の結果(軸差応力と軸ひずみ関係)です。飽和度が54%の場合には、軸ひずみの増加とともに大きな軸差応力が発揮されており、供試体が繰返し載荷に対してねばり強い挙動を示しています。一方、飽和度が79%の場合には、軸ひずみの増加とともに、軸差応力も低下していき、最終的には飽和土でも見られるような液化状態となることが確認されました。

降雨と地震の両者を考慮した 模型実験

次に、模型盛土を対象に、降雨散水と加振を与える実験技術について紹介します。

降雨散水の影響を受けた盛土の地震時挙動を把握するには、模型盛土を作って降雨散水を与え、加振を行うことで、挙動を解明することができます。しかし、実験を行うためには散水・加振の両機能を備えた装置が必要となることから容易ではありません。

鉄道総研では、図7に示すような降雨散水機能付きの振動台を有しています。振動台は図中矢印方向の加振ができ、正弦波だけでなく地震記録などに基づく不規則波を用いることができます。一方、散水装置は、土槽のはるか上空にある天井に設置された3箇所散水ノズルから与えられる構造となっており、模型盛土には霧状の雨滴として降り注ぎます。時間雨量20～120mm/hの散水を与えることができます。本装置を用いることで、模型盛土への降雨散水と加振を連続的に行うことが可能となっています。

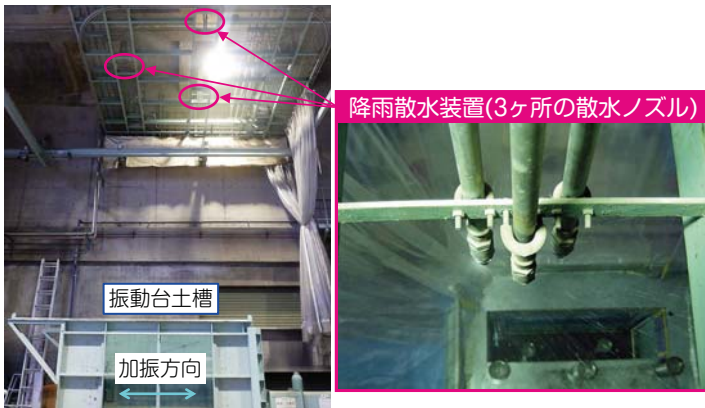


図7 降雨散水装置付き振動台

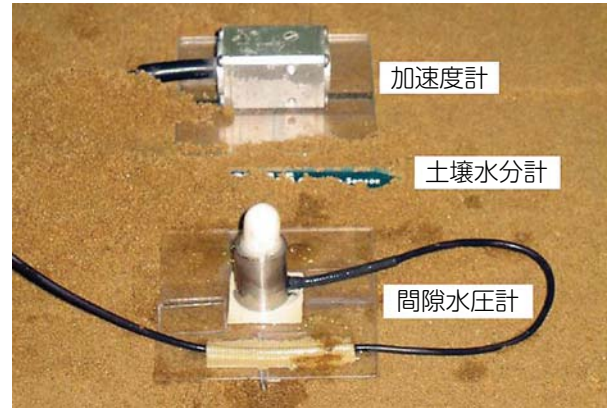


図8 計測器の設置状況

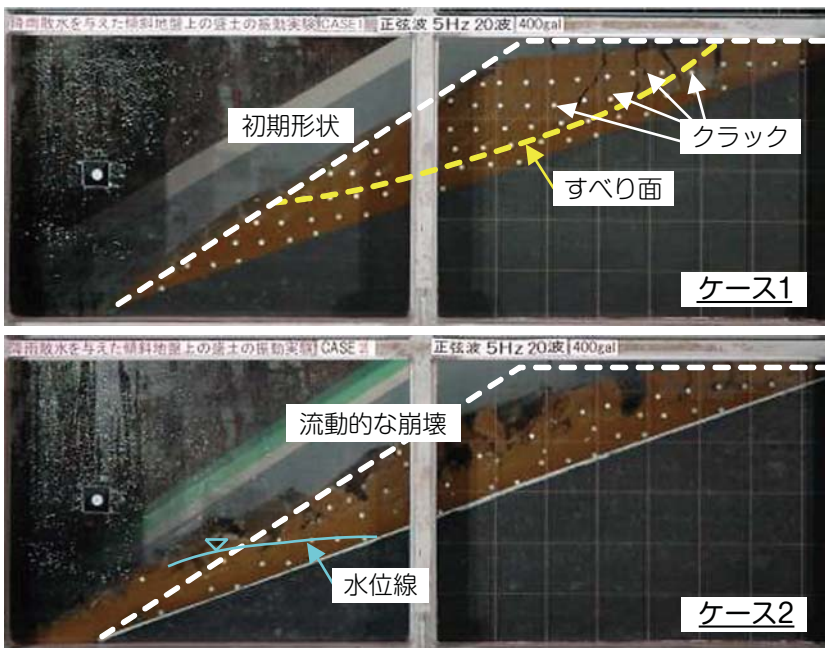


図9 加振終了時の盛土の状況

次に、具体的な実験事例を紹介し
ます³⁾。モデルは20度の傾斜角を有する
地盤上に、のり面勾配が1:1.5であ
る盛土を構築しました。盛土内に水位
は形成されず盛土内の含水状態だけ
が変化する場合(ケース1)と、盛土内に
水位が形成される場合(ケース2)の2
ケースの実験を行いました。

実験の際の計測器の設置状況を図8
に示します。通常の振動台実験で用い
る加速度計や変位計に加えて、この実
験では土壌水分計や間隙水圧計も設置
しています。具体的には、土壌水分計
は加振前の飽和度を、間隙水圧計はサ
クションの変化に寄与する間隙水圧の

計測を行います。

実験は、時間雨量20mm/h程度の
降雨散水を盛土に与え、盛土内の含水
量の上昇を確認した後に、正弦波によ
る加振を行いました。

加振終了時の盛土の変形状況を図9
に示します。散水時間は両ケースで異
なるものの、盛土内での飽和度の上昇
はほぼ同等でした。ただし、ケース2
では盛土ののり先を中心に水位線が形
成されていることがわかりました。

ケース1の加振では、盛土に円弧形
状のすべりが生じたものの、大きな変
形は生じませんでした。一方、ケース
2では、盛土が原形を留めることなく、

流動的な崩壊に至りました。加振中の
加速度計や間隙水圧計の挙動を確認す
ると、ケース2では加振中に液状化に
至っていることがわかりました。ケー
ス1ではそのようなことにはならず、
三軸試験の項で述べた不飽和土の粘り
強さが発揮されたものと考えられます。

おわりに

飽和土に比べて不飽和土を扱う実験
は難易度が高いですが、装置や計測技
術に工夫を重ねることで、その挙動が
解明されつつあります。解析技術につ
いても同様のことが言えます。

今後も、実験と解析の両面のアプ
ローチによって不飽和土の挙動解明を
進め、土構造物の耐降雨・耐震性向上
につながる研究開発を進めていく所存
です。[RRR]

文献

- 1) 木口峰夫, 松丸貴樹, 西村友良: サクシオン载荷履歴を与えた砂質土の不飽和三軸試験, 第48回地盤工学研究発表会, 2013
- 2) 木口峰夫, 松丸貴樹, 西村友良: サクシオン载荷履歴を与えた細粒分を含む砂質土の不飽和繰返し三軸試験, 第68回土木学会年次学術講演会, 2013
- 3) 松丸貴樹, 須賀基晃, 渦岡良介: 降雨の影響を受けた傾斜地盤上の盛土の振動台実験-(その2) 盛土崩壊機構の解明-, 第67回土木学会年次学術講演会, 2012