

微視的特性と巨視的応答の関係に基づく不飽和砂の三軸圧縮試験条件の分類

京都大学大学院 正会員 ○木戸 隆之祐
京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

1. はじめに

道路や鉄道における盛土の強度を三軸圧縮試験で評価する場合、試験技術の簡便さ等の理由からその多くは飽和土を用いるが、不飽和土に比べせん断強度が低い傾向があるため、過度に安全側な評価となり得る。砂質盛土の場合は表層に比べ深部の方が低い含水比、つまり不飽和状態の傾向があることが示されている¹⁾。したがって、盛土の強度評価は不飽和土の三軸圧縮試験を行うのがより適切であり、その方法を確立するには不飽和土の強度特性、変形メカニズムを解明することが重要である。

本研究では、不飽和砂の三軸圧縮試験に X 線マイクロ CT を適用して土粒子・水・空気の微視構造変化を解明し、それらの巨視的応答とのリンクを調べてきた。本稿ではその関係に基づき、砂質盛土を例に、含水状態に応じた不飽和砂の三軸圧縮試験条件を分類した結果を示す。

2. 研究方法

本研究では、間隙水の微視的特性の解明、土構造物への使用に適した粒度の良い砂の強度評価を目的とし、珪砂 5 号と淀川堤防砂をそれぞれ用い、直径 35 mm、高さ 70 mm の不飽和砂三軸供試体を作製した。前者は水中落下法と水頭型吸引法を併用して相対密度 90%~95%とし、初期飽和度 50%と 60%を目標に 2 つずつ、計 4 つ作製した。一方、後者は締固め度 90%、最適含水比 13%程度になるよう湿潤締固め法で作製した後、Axis translation 法によって 10 kPa、30 kPa のサクシオンを負荷する供試体を 2 つずつ、計 4 つ準備した。三軸圧縮試験はひずみ速度 0.1%/min、拘束圧 50 kPa の下、排気-排水条件と排気-非排水条件で実施した。珪砂の実験中、せん断帯の発達による微視構造変化を X 線マイクロ CT で可視化し、三値化、morphology 解析、曲率解析を行い間隙水の連続性、液架橋（粒子間でメニスカスを呈する水）の数、間隙水の曲率を定量化した。解析の詳細は文献²⁾を参考にされたい。

3. 結果と考察

3.1. 珪砂と淀川砂の巨視的応答

いずれのケースもひずみ硬化した後、体積膨張を伴いひずみ軟化した。初期飽和度 60%の珪砂と初期サクシオン 10 kPa の淀川砂は、排水条件と非排水条件で同等のピーク応力を示すが、非排水条件の方が低い残留応力を示した。一方、初期飽和度 50%の珪砂と初期サクシオン 30 kPa の淀川砂は、ピーク応力も残留応力も非排水条件の方が排水条件に比べて低くなった。これらの巨視的応答は、珪砂（粒度が悪い）と淀川砂（粒度が良い）とで定性的に一致した。淀川砂の排水条件ではサクシオンが常に一定だったが、非排水試験ではせん断初期に急激にサクシオンが減少し、一度上昇した後、体積膨張する過程で徐々に減少する傾向が見られた。

3.2. 間隙水の微視的特性と巨視的応答とのリンク

Morphology 解析の結果、排水条件によらずせん断帯の発達に伴い液架橋の数は減少するが、「非排水条件の方がより多く減少する」ことがわかった。また、サクシオンの変化を表す物理量と仮定して定量化した間隙水の曲率は、排水条件ではほぼ一定であるが、「非排水条件では特にひずみ軟化過程において減少傾向を示す」ことがわかった。これらの排水・非排水条件における微視的特性の違いは、初期飽和度によらないものである。

初期飽和度が低い、つまり間隙水が不連続で懸垂水不飽和状態に対応するときは液架橋が多く存在するが、非排水条件では間隙水の曲率（サクシオン）が減少し液架橋もより多く減少するためせん断剛性、せん断強度が低下する。これにより、排水条件よりも非排水条件の方がピーク応力は低くなる。一方、初期飽和度が高い、つまり間隙水が連続で毛管不飽和状態に対応するときは液架橋が少なく、サクシオンは主として有効応力に寄与する。

キーワード 不飽和砂 三軸圧縮試験 液架橋 間隙水の曲率 強度評価 排水条件
連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-583 Tel: 075-383-3193

そのため、間隙水が不連続な場合に比べるとせん断剛性、せん断強度に対するサクシジョンの寄与が小さく、排水・非排水条件でそれらに差が生じないため、ピーク応力は同等となる。しかしせん断が進むと、非排水条件では上述した微視的現象が巨視的応答へ影響を及ぼし、残留応力が低下する。詳しくは文献³⁾を参考にされたい。

3.3. 不飽和土の強度評価方法の分類

佐藤ら 1)の結果によれば、既設砂質盛土の表層は深部に比べて高い飽和度にある。これと本研究で示した不飽和砂の微視的特性と巨視的応答との関係を考慮すると、三軸圧縮試験による不飽和砂質盛土の強度評価方法は、図 1 のように分類できる。盛土表層のように比較的飽和度が高い場合、間隙水は連続のため不飽和土の強度は排水・非排水の両条件においてほぼ同等となるため、排気-排水試験および排気-排水試験が適用可能である。一方、盛土深部は表層に比べ飽和度が低く液架橋が多く分布すると考えられる。この場合、ピーク応力は非排水条件の方が低くなるため、せん断中に過剰間隙水圧が発生しない透水性の良い砂であれば排水試験、過剰間隙水圧の発生によるサクシジョン減少が想定される透水性の悪い砂であれば非排水条件を行うような分類が適切と考えられる。

4. まとめ

せん断中の不飽和砂の微視的特性と巨視的応答の関係を明らかにした上で、不飽和土の強度評価方法の分類を試みた。初期飽和度によって不飽和砂の巨視的応答が異なるため、砂質盛土を例にとると、表層や深部の飽和度分布、透水性の違いに着目して排水・非排水条件を選択することが重要である。今後は、初期相対密度の低い不飽和砂や、非排気-非排水条件を対象に検討を行っていく。

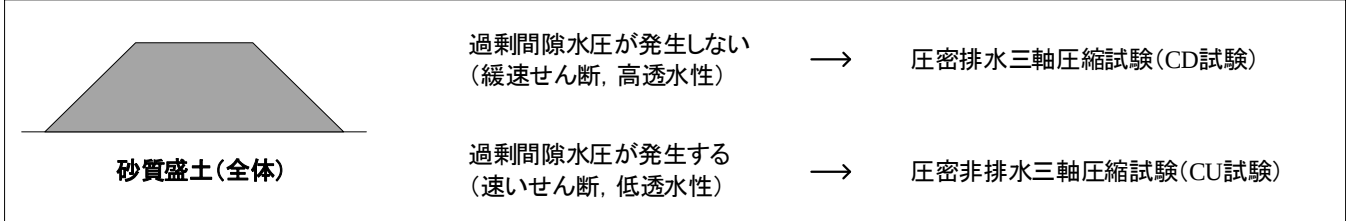
参考文献

1) 佐藤武斗, 松丸貴樹, 中島 進, 小湊祐樹, 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, 鉄道総研報告特集: 地震防災・耐震技術, Vol.31, No.7, pp.23-28, 2017.

2) 木戸隆之祐, 肥後陽介, 高村福志: 三軸圧縮下の不飽和砂の進行的なせん断帯発達過程における間隙水の微視的特性, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.73, No.2, pp.233-247, 2017.

3) 木戸隆之祐, 肥後陽介, 福島陽: 三軸圧縮下における不飽和砂の軸差応力へ及ぼす微視的特性の影響の解釈, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019-7.

(a) 飽和土を対象とする従来の強度評価方法



(b) 不飽和土を対象とする強度評価方法

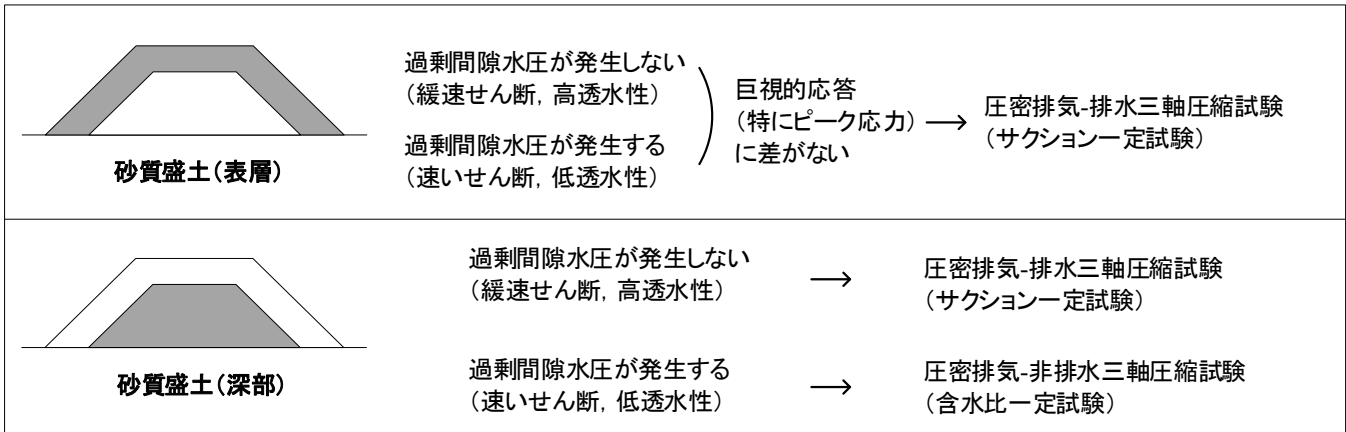


図 1 不飽和土を対象とする三軸圧縮試験による強度評価方法の分類