

X線CTスキャンから得た締固め砂質土の空隙分布と飽和透水係数の相関

北見工業大学大学院 学生員 ○三鍋 佑季

北見工業大学 正会員 川尻 峻三, 川口 貴之

北見工業大学 正会員 中村 大, 山下 聡

1. はじめに

含水比を変化させた地盤材料を同一エネルギーで締固めた場合、乾燥密度 ρ_d が最も大きくなる含水比 w が存在することは、突き固め試験から得られる締固め曲線として知られている。ここで、締固めた地盤材料の飽和透水係数 k_{sat} に着目すると、同一締固めエネルギーで含水比を変化させて作製した供試体の k_{sat} は、最適含水比 w_{opt} よりもやや湿潤側の含水比で最小となることが知られている¹⁾。このことは、締固め時に不飽和状態で形成された空隙や間隙分布など、土の微視的構造による影響が飽和後にも残存していることを意味している。しかし、このような k_{sat} が含水比によって変化するメカニズムについて検討した研究例は意外に少ない。そこで本研究では、これらの現象の発現には供試体内の空隙分布といった微視的構造が関与していると考え、マイクロフォーカスX線CTスキャンから得られる供試体内の空隙分布と k_{sat} との相関について検討した。

2. 試料および供試体・試験条件

本研究に用いた試料は市販の珪砂（土粒子密度 $\rho_s = 2.641 \text{ g/cm}^3$ ）である。X線CTスキャンによって地盤材料の微視的構造を観察するためには大きな粒径にすることが望ましいが、粒径が大きすぎると後述する透水試験用の供試体作製が困難になる。そこで、本研究では図1に示す細粒分をやや含み、粒径も比較的大きい珪砂を用いた。

図2はJIS A 1210に規定されているA-a法で得られた締固め曲線である。透水試験とX線CTスキャンに用いた供試体は、図2の締固め曲線上A~F点での ρ_d , w となるように試料を調整し、透水試験供試体は5層、X線CTスキャン供試体は1層で締固めることによって作製した。なお、透水試験の供試体は、 k_{sat} を得るために24時間程度浸水させて飽和化させた。締固め方法は全断面ピストンとハンマーを用いて動的締固めとした。また、透水試験供試体のサイズは直径50mm、高さ51mmであり、X線CTスキャン供試体は直径18mm、高さ20mmである。本来、両試験は同一供試体で行うことが望ましいが、X線CTスキャンを行う際に透水試験供試体では供試体サイズが大きく、微視的構造を把握するために必要な解像度を得られなかったため、異なるサイズとした。なお、X線CTスキャンの撮影領域は供試体全体とし、ボクセルサイズは $0.02 \times 0.02 \times 0.02 \text{ mm}$ である。

空隙分布と k_{sat} の関連について検討するため、X線CTスキャンで得られた画像データをもとに解析ソフト（ExFact VR 2.0）を用いて供試体内の空隙分布の把握を行った。空隙部分と水および土部分の分離は以下の考え方でを行った。X線CTスキャンから得られたCT値のヒストグラムを空気と水・土からなる2つの正規分布で近似できるとし、それらが重なり合う点を閾値として2値化した。さらに、2値化した3次元再構成データに対してRegion Growing法を適用して空隙部の抽出を行った。なお、この方法によって算出した空隙量と作製した供試体

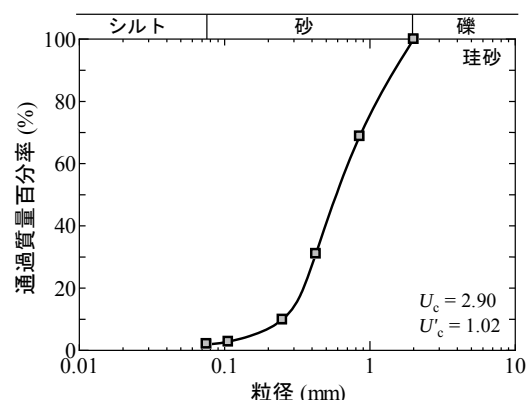


図1 試料の粒度分布

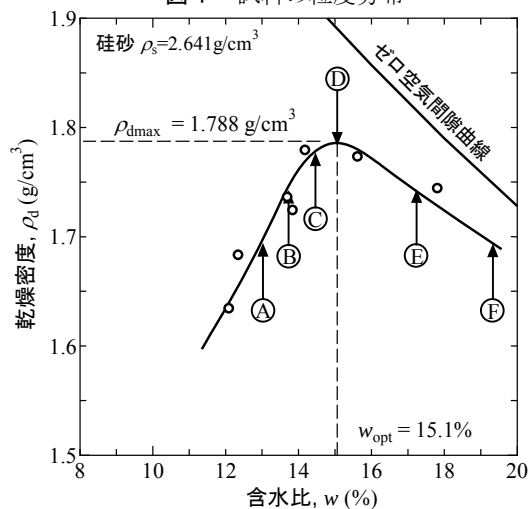


図2 締固め曲線および供試体条件

キーワード X線CTスキャン, 締固め, 透水性

連絡先 〒090-8507 北海道北見市公園町165番地 北見工業大学 TEL:0157-26-9487

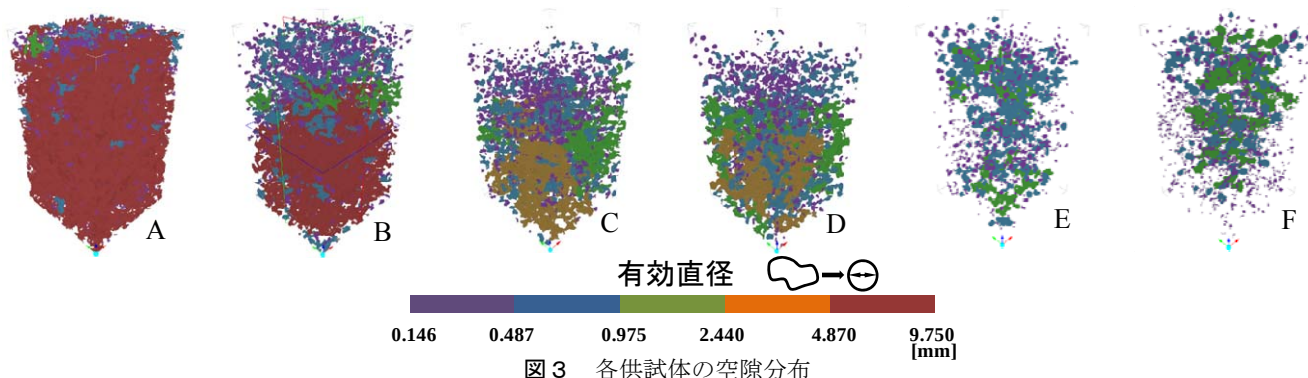


図3 各供試体の空隙分布

の空隙量がほぼ同程度となることを確認している。

3. 試験結果および考察

図3は上述の方法で得られた供試体 A~F の空隙分布である。なお、色の違いは複雑な形状を呈する空隙を球で置き換えた場合の直径(有効直径)に対応している。また、解析領域は CT スキャン領域中央部の $11 \times 11 \times 18 \text{ mm}$ である。 w_{opt} よりも乾燥側である A, B では、 w が低いため空隙量が多く、個々の空隙が連結されて解析結果では一つの大きな空隙(図中の赤色)となっている。 w_{opt} 付近にある C, D では、A, B と比較して連結していると考えられる空隙量は減少していることがわかる。 w_{opt} よりも湿潤側の含水比である E, F では、高含水比のため空隙量は少なくなることと、空隙の連結性が低下し、独立した空隙が形成されていることがわかる。

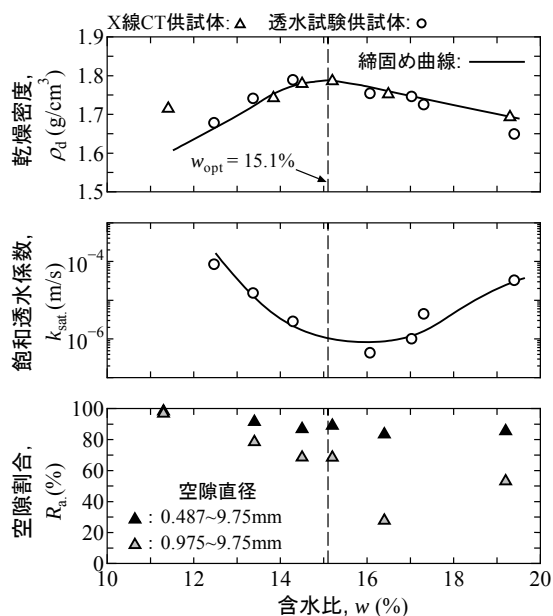
図4は図3の3次元再構成図から算出した空隙量と k_{sat} を含水比に対して整理したものである。地盤材料の透水性には比較的大きな間隙が寄与すると考え、各供試体の空隙量に関するパラメータとして新たに空隙割合 $R_a(\%)$ を定義し、図3中の有効直径 = $0.487 \sim 9.750 \text{ mm}$ と有効直径 = $0.975 \sim 9.750 \text{ mm}$ の空隙量をそれぞれ解析領域の体積で除した値とした。若干のバラつきはあるものの、 k_{sat} はこれまでの研究結果と同様に w_{opt} よりも湿潤側の $w = 15 \sim 16\%$ の間で最小値となっていることがわかる。次に、 R_a の変化に着目すると、 $0.487 \sim 9.750 \text{ mm}$, $0.975 \sim 9.750 \text{ mm}$ とともに $w = 16.5\%$ 程度で小さくなり、特に $0.975 \sim 9.750 \text{ mm}$ の R_a は大きく低下しており、 k_{sat} との強い相関が伺える。これは、ある直径を有する空隙の総量が k_{sat} の増減に関連していることを示唆する結果である。しかし、本研究では先述のように連結した空隙を一つの大きな空隙として捉えているといった問題もあるため、空隙の配位数等から連結性を推定するなど、透水試験結果をより詳細に検討する必要があると考えている。また、 k_{sat} の増減は図4に示した空隙部以外にある(締固め時点で存在している)間隙水の影響も受けていると考えられることから、今後は空隙・水・土粒子を分離した状態での解析を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、締固め時に形成された不飽和状態での空隙の大きさや分布が、飽和透水係数 k_{sat} の増減に関連していると考え、X線 CT スキャンから得られた3次元的な空隙分布と k_{sat} との相関について考察した。その結果、 k_{sat} は最適含水比よりもやや湿潤側で最小値を示した。また、締固め時の空隙の状況は、最適含水比よりも乾燥側では空隙の連結性が高く、湿潤側では空隙の連結性が低い独立した空隙となる傾向がわかった。さらに、ある直径を有する空隙の総量は、 k_{sat} と同様に最適含水比よりもやや湿潤側の含水比で最小値となったことから、 k_{sat} の増減には空隙量や空隙径に加えて、連結性が関連していると考えられる。

参考文献

- 1) 横浜 勝司, 三浦 清一, 松村 聡: 築堤材に用いられる砂質シルトの強度・透水性・せん断剛性に及ぼす締固め管理条件の影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.2, pp.422-432, 2012.

図4 k_{sat} , 空隙割合 ~ w 関係