

1. はじめに

現在地球上の約4分の1もの地域で気候変動に伴う土地劣化の問題に直面しており、土地劣化に対する対策は急務となっている。その対策として緑化が挙げられるが、土地劣化の顕在化している乾燥地を緑化するには適度な地盤内水分の確保が必要である。そこで本研究室では簡易で低コスト、かつ環境への負担が少ない水分確保の技術として、Self-watering system¹⁾の開発を行っている。このシステムにおいて、地下水を吸水するサクションドレイン部分は、間隙比が小さいほどその能力は高くなる傾向にある。 $[h=C/eD_{10}\{e: \text{間隙比}, D_{10}: 10\% \text{ 粒径}(\text{cm}), C=0.1\sim 0.5\text{cm}^2\}]$ ²⁾ そこで本文では2試料混合による最小間隙比への影響を調べ、Lade&Yamamuro (1998)の「砂の2粒子混合理論」³⁾を基礎に、最小間隙比が最小値を示す最充填混合率の予測法の検討を行った。

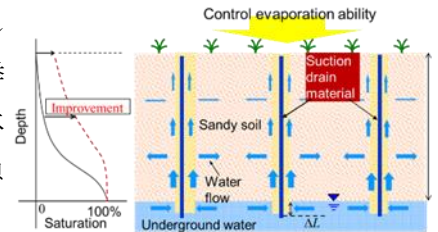


図1. Self-watering system

表1. 各試料の粒度特性

Soils	D10	D30	D50	D60	U _c	U _{c'}
K7	60	125	185	210	3.50	1.24
珪藻土	425	813	1043	1134	2.67	1.37
まさ土	4.78	165.3	393	573.6	120	9.97
FA	1.52	7.83	11.23	12.9	8.49	3.13
礫質土	1750	2333	2800	3000	1.71	1.04
砂質土	175	233	280	300	1.71	1.03
細粒土	17.5	23.3	28	30	1.71	1.03
礫質土#	100	450	950	1300	13.00	1.56
砂質土#	13	55	125	175	13.46	1.33
細粒土#	1.4	5.7	13.5	18.5	13.21	1.25

2. 様々な試料を用いた、最小・最大密度試験

2試料混合と最小間隙比の関係を調べるため、様々な試料を0～100%の任意の割合で混合し、最小・最大密度試験を行った。試験方法はJISA1224に基づくものとする。これと土粒子密度の値を用いて、間隙比を算出した。用いる試料の粒度特性を表1に示す。下部6試料はまさ土分級によって粒度調整を行い作成した試料である。均等係数の小さい試料について、粒径の小さい方から細粒土、砂質土、礫質土と称する。一方、均等係数の大きい試料における均等係数をそろえた試料について、粒径の小さい方から細粒土#、砂質土#、礫質土#とする。また球状の非活性細粒分（フライアッシュ: FA）をまさ土と、内部空隙をもつ珪藻土を珪砂7号（K7）と混合した試料でも同様の実験を行った。

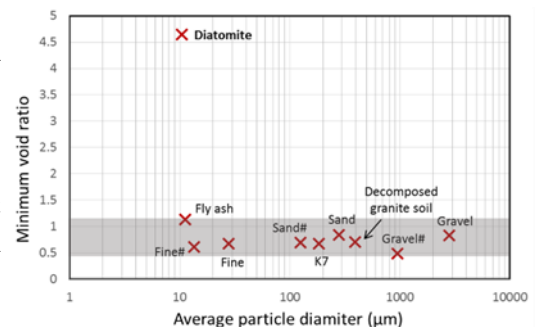


図2. D50-最小間隙比（非混合時）

3. 実験結果

図2に非混合時における各試料の平均粒径との最小間隙比の関係を示す。

この図より珪藻土以外の試料は、平均粒径の大きさに関わらずある一定の

エリア内の値を示すことが分かる。これに対し、珪藻土は内部空隙の影響から、他試料よりも4倍ほど高い間隙比をもつことが確認された。

次に、粒度調整した試料の混合において、混合率が最小間隙比に与える影響を図3に示す。これらより、試料の組み合わせによりピーク値の有無、またはその時の混合率が異なることが分かる。また図4に示したグラフより、まさ土-フライアッシュ混合では約20%でピーク値が見られたが、珪砂7号-珪藻土混合では、ピーク値は見られず、混合率0%で最小値を示すことが分かる。

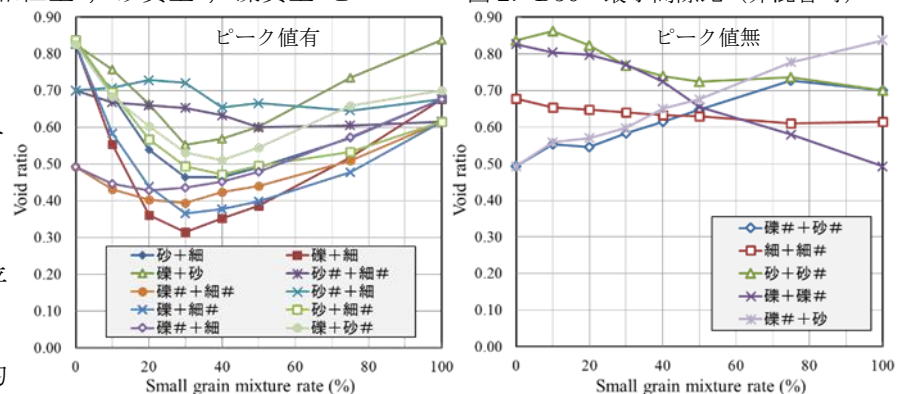


図3. 小粒子混合率が最小間隙比に与える影響（粒度調整試料）

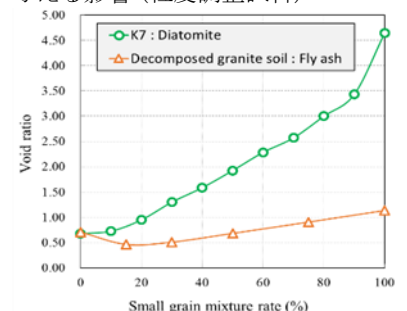


図4. FA, 珪藻土混合

4. 砂の2粒子混合理論による最充填混合率予測

小粒子混合率%による間隙比の理論的な変化を図5に示す。混合率0%の点で、大粒子は初期間隙比 e_1 の構造を形成する。それから小粒子が2番目の図のように初期構造の内部に散りばめられ、全体の体積が変化することなく、質量が増加する。これにより、全体の間隙比の減少と同時に混合率は増加する。間隙比は初期構造内の間隙が、小粒子とその間隙 e_2 によって完全に満たされた時に最小に達する。点Bつまり最充填点での小粒子混合率および間隙比は、大小粒子それぞれの初期最小間隙比(e_1, e_2)・初期最小間隙率(n_1, n_2)の値と式1, 2を用いることで計算できる。

$$\% \text{ fines} = \frac{W_{\text{fines}}}{W_{\text{total}}} \cdot 100 = \frac{n_1 \cdot \frac{n_2}{e_2}}{n_1 + n_1 \cdot \frac{n_2}{e_2}} \cdot 100 \quad (1) \quad e_{\text{tot}} = \frac{V_{\text{voids}}}{V_{\text{solids}}} = \frac{n_1 \cdot n_2}{e_1 + n_1 \cdot \frac{n_2}{e_2}} \quad (2)$$

5. 理論値と実測値の比較

本文ではこの理論を実際の土試料に適用することで、①均一粒径でない、様々な粒径をもつ試料への適応性②礫質～粘土質の土への適応性、を調べた。図6はこの理論より計算した最充填混合率の理論値と実測値の比較を表すグラフである。横軸に理論値、縦軸に実測値をとっている。この図より、理論値と実測値はおおよそ等しい値を示した。したがって、この理論は最充填混合率に関しては、①実際の土②礫質～粘土質の土にも適用可能だと考えられる。しかし礫+礫#等の同試料の組み合わせに関しては適応されないという結果が得られた。また、最小間隙比の比較に関しては(図7)、全試料において理論値は最小間隙比を過小評価する傾向が見られた。したがって、この理論を用いて間隙比を算出するのには適していない。

次に、この最小間隙比の理論値と実測値の差の原因を検討する。図7のグラフより理論線(赤破線)から離れた試料ほど、混合試料間の粒度特性が近いことが示唆される。そこで今回、2試料間の平均粒径の比と理論値－実測値の差の相関を表すことで、これらの関係性を考察した。(図8) この図より、平均粒径比が大きくなるにつれて、理論値と実測値の差は小さくなるのが分かる。言い換えると、この2粒子混合理論は混合試料サイズが離れるほど、間隙比予測の精度は高くなると考えられる。またこの差と平均粒径比には相関があることから、この平均粒径比のパラメータを用いることで、より高精度の予測ができると考えられる。

6. まとめ

本論文では2試料混合時における最小間隙比の評価と最充填混合率予測法の検討を行った。結論を以下に示す。1) 非混合時の間隙比は $D_{50}=13.5\sim 2800$, $U_c=1.71\sim 120$ の範囲の粒度分布に関わらず、ある領域内での値をとるが、内部空隙をもつ試料だけは4倍程度高い値を示した。2) 2試料混合時、選定試料によって

間隙比変化のピーク値の有無、またその時の混合率は異なる。3) 砂の2粒子混合理論は最充填混合率に関しては、①均一粒径でない様々な粒径をもつ試料混合への適応性②礫質～(粒度特性的に)粘土質の土への適応性があると考えられる。しかし、間隙比予測に関しては過小評価する傾向がみられた。4) 2粒子混合理論は混合試料サイズが離れるほど、間隙比予測の精度は高くなる。今後は平均粒径比を考慮すると、予測精度を高められると考えられる。

謝辞：本研究の一部は九州大学・玄海町菓草PJ、科研・基盤研究A(No. 22246064 代表者：安福規之)、九州電力株式会社 の支援を得て行われたものである。

【参考文献】：1) Noriyuki Yasufuku, Qian Liu, Zentaro Furukawa (2012): A Geotechnical Challenge for Combating Desertification – Application of Self-Watering System in Unsaturated Arid Ground-, JS-Seoul 2012, 7-23. 2) 地盤工学会「地下水入門」編集委員会 (1997) : 地下水入門, 地盤工学会, 32-36. 3) Poul V. Lade, Carl D. Liggio, Jr. and Jerry A. Yamamuro (1998) : Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand, American Society for Testing and Materials.

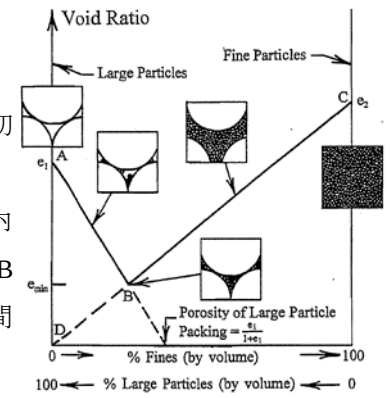


図5. 2粒子混合理論

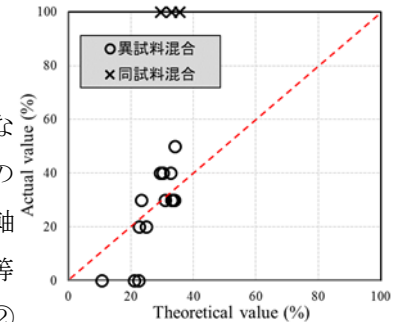


図6. 理論値－実測値(混合率)

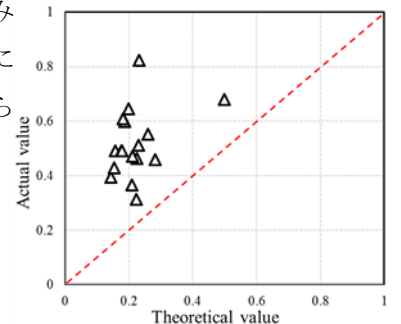


図7. 理論値－実測値(間隙比)

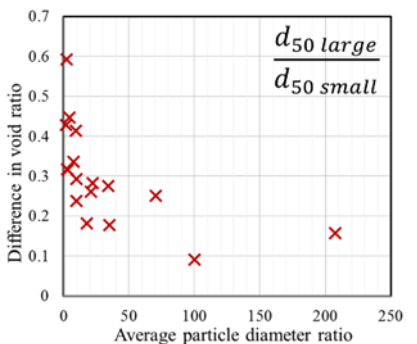


図8. 平均粒径比が理論値－実測値の差に与える影響