

遠心模型実験に用いるセルロースエーテル水溶液が豊浦砂の特性に与える影響

大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○忠野 祐介
 大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 宇野 浩樹, 立石 章

1. 目的

1/N スケールの動的遠心模型実験では、振動と透水の2つの時間に関する相似則を満足させるため、水のN倍の粘性係数を持つ流体を用いて土を飽和させる場合が多い。前記の相似則を満足し、かつ地盤物性への影響が少ないという動的遠心模型実験への適合条件を満たす流体として、粒径がそろった砂に対しては、シリコンオイルやセルロースエーテル水溶液が広く用いられてきた。しかし、上記粘性流体で飽和した砂の透水特性についての検討は数件あるものの^{例へば, 1), 2)}、動的特性について詳細には検討されていないと言える。

そこで、水および分子量を変えた2種のセルロースエーテル水溶液で飽和させた豊浦砂を用いて、三軸透水試験および非排水繰返し三軸試験を行い、水での結果および著者らが中間土で行った同様の実験内容での結果³⁾と比較することにより、セルロースエーテル水溶液が豊浦砂の特性に与える影響について検討した。なお、本研究は、中間土を用いた動的遠心模型実験のための予備検討として行った要素実験結果³⁾を補足する位置付けとして行った。

2. 試料と粘性流体

本研究で用いた豊浦砂は、 $\rho_s = 2.643 \text{ g/cm}^3$, $e_{\max} = 0.978$, $e_{\min} = 0.589$ の物性を有するものを用いた。セルロースエーテルとしてヒドロキシプロピルメチルセルロース(以下、HPMC)を選択し、高分子量のHPMC4000(以下、H-CE)、低分子量のHPMC50(以下、L-CE)の2種類を用いた。両者ともにS社製⁴⁾である。粘性係数 μ は、液温20℃の2%溶液で、H-CEは4000mPa・s、L-CEは50mPa・sである。HPMC溶液は、両者とも液温20℃において動粘性係数 ν が50cSt(=mm²/s)になるよう溶液の濃度を調整し、十分に脱気したものを用いた。

3. 試験方法

供試体は直径5cm、高さ10cmの円筒形であり、圧密後の相対密度が $D_r = 60\%$ (間隙比 $e_c = 0.745$)になるよう空中落下法で作製した。供試体の飽和は、有効拘束圧 $\sigma'_c = 29.4 \text{ kPa}$ の等方応力状態において二重負圧法により実施し、B値が0.95以上であることを確認した。その後、 $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$ で等方圧密を行った。圧密終了後、動水勾配を変えて三軸透水試験⁵⁾を行った。透水試験終了後に1時間程度等方圧状態 $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$ で静置し、繰返しせん断を行った。粘性流体を用いているため、透水係数が小さくなることを考慮して載荷周波数は $f = 0.01 \text{ Hz}$ に設定し、正弦波形で載荷した。

4. 試験結果と考察

図1に動水勾配と透水係数の関係を示す。L-CEは動水勾配の増加に伴い透水係数が若干増加する傾向があるが、他の流体では、動水勾配によらず概ね一定の透水係数が得られた。表1に三軸透水試験結果を示す。表1の平均透水係数 k_{av} は、各動水勾配で計測された透水係数を平均したものであり、透水係数比 k_{av-w}/k_{av} は各間隙流体の平均透水係数と水の平均透水係数の比を表している。理論上、水のN倍の粘性を有する流体を通水した場合、透水係数は水の1/N倍になり、透水係数比と動粘性係数の水に対する比率が一致する。低分子量のL-CEではこの関係を

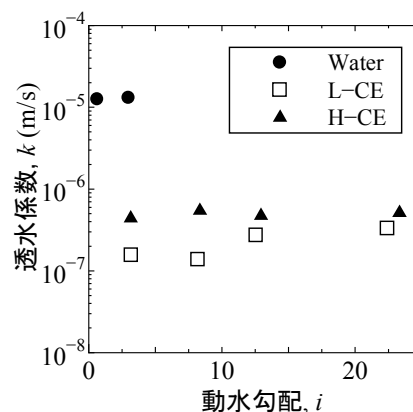


図1 動水勾配と透水係数の関係

表1 三軸透水試験結果

	Water	L-CE	H-CE
間隙比 e	0.748	0.755	0.754
動水勾配 i	0.64 ~ 2.99	3.20 ~ 22.43	3.15 ~ 23.23
平均透水係数 k_{av} (m/s)	1.28×10^{-5}	2.23×10^{-7}	4.93×10^{-7}
透水係数比 k_{av-w} / k_{av}	1.0	57.4	26.0
動粘性係数 ν (cSt)	1.0	49.0	42.0

平均透水係数と水の平均透水係数の比を表している。理論上、水のN倍の粘性を有する流体を通水した場合、透水係数は水の1/N倍になり、透水係数比と動粘性係数の水に対する比率が一致する。低分子量のL-CEではこの関係を

キーワード 粘性流体, 豊浦砂, 液状化, 透水係数, 非排水繰返し三軸試験

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL:045-814-7217

概ね満たしているが、高分子量の H-CE は理論上の透水係数より大きい透水係数が得られた。著者らが行った中間土での同様の実験³⁾でも、H-CE は理論上の透水係数より大きい値を示す結果が得られており、土中の細粒分や間隙の大きさ、動水勾配によらず、H-CE は透水係数が大きくなりやすく、土の透水係数に対して HPMC の分子量が影響することが分かった。

図2に、非排水繰返し三軸試験より得られた両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ における液状化強度曲線を示す。水と L-CE の液状化強度曲線は概ね一致しているが、H-CE は水より小さい液状化強度が得られた。中間土で行った同様の実験³⁾では、L-CE、H-CE とともに水より液状化強度が大きく、その程度は高分子量の H-CE の方が顕著であった。

図3に、 $\sigma_d/2\sigma'_c=0.20$ 付近の有効応力経路を示す。図2の液状化強度曲線では、L-CE の方が水に近いに関わらず、1周期目までの有効応力経路は、H-CE の方が水に近い挙動を示している。一方、全ての間隙流体で伸張から圧縮への軸差応力の反転時に、有効応力が急減しており、特に HPMC 溶液ではその減少量が大きい。ここで、有効応力急減点の応力比を $(q/p')_r$ と定義すると、HPMC 溶液の $(q/p')_r$ は相対的に小さい。図では示していないが、 $\sigma_d/2\sigma'_c=0.15$ 付近の有効応力経路で比較した場合でも同様の傾向を示していることから、HPMC 溶液で飽和した豊浦砂では $(q/p')_r$ が相対的に小さくなり、大きな負のダイレイタンスが発生し有効応力が急減する。ちなみに、同一の試験条件の下で行った中間土ではこのような現象が生じておらず、母材となる土の透水性や保水性、間隙流体の界面張力や土粒子への吸着性がこの現象の原因として挙げられる。一方、正弦波で載荷周波数が $f=0.01\text{Hz}$ と遅く、大きな軸差応力が作用する時間が長いことも有効応力が急減した原因の一つと考えられる。安田・曾我⁶⁾によると、正弦波で載荷周波数 $f=0.05\text{Hz} \sim 1.0\text{Hz}$ の範囲内では、水で飽和した豊浦砂の非排水三軸特性に対する周波数の影響はほとんどないと結論付けており、今後載荷周波数や載荷波形を変えた同様の実験を行い、その影響度合いを調べる予定である。

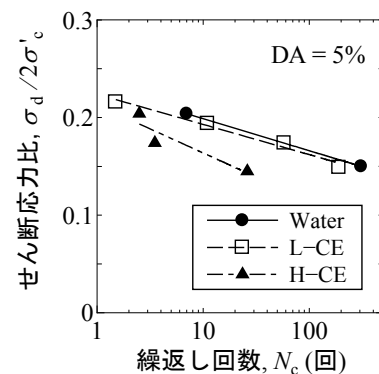


図2 液状化強度曲線

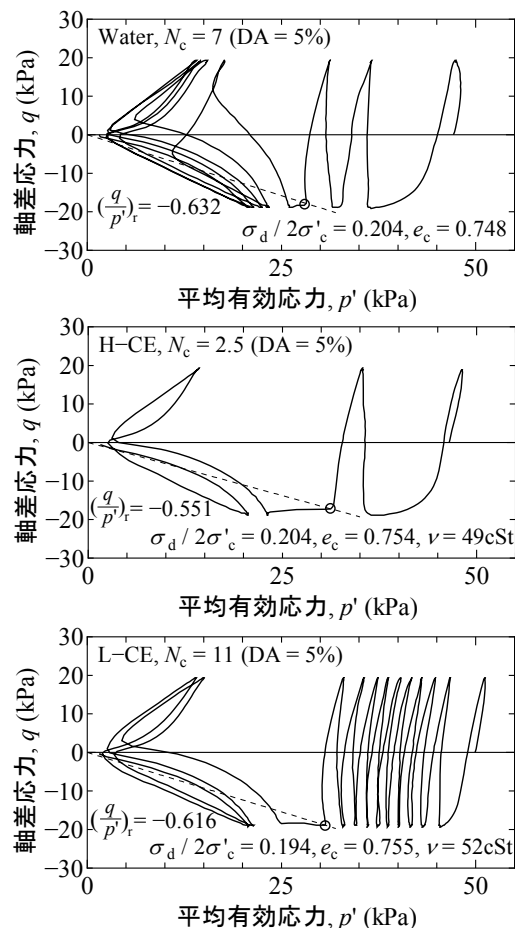


図3 $\sigma_d/2\sigma'_c=0.20$ 付近の有効応力経

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- ・ HPMC 溶液で飽和した土の透水係数は、土の粒度分布によらず高分子量の HPMC 溶液では動粘性係数と透水係数の関係を満足しない。
- ・ HPMC 溶液で飽和した豊浦砂は、有効応力急減点の応力比 $(q/p')_r$ が相対的に小さくなり、大きな負のダイレイタンスが発生し有効応力が急激に減少する。この現象については、正弦波で載荷周波数が遅いことが原因の一つと考えられるため、今後載荷波形や載荷周波数を変えた実験で調査する予定である。

参考文献

- 1) Dewoolkar, M. M. et al. : A substitute pore fluid for seismic centrifuge modeling, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.22, No.3, 196-210, 1999.
- 2) 田中満ほか: 遠心力載荷装置による液状化模型実験手法の基礎的研究 (その1 遠心力場における間隙流体の透水特性), 大成建設技術研究所報第27号, pp.419-424, 1994.
- 3) 忠野祐介ほか: 遠心模型実験に用いる間隙流体が中間土の特性に与える影響について, 土木学会第71回年次学術講演会, 311-312, 2016.
- 4) 信越化学工業: メトロゾカカタログ, 2013.
- 5) Fukushima, S. and Ishii, T. : An experimental study of the influence of confining pressure on permeability coefficients of filldamcore material, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.32-46, 1986.
- 6) 安田進, 曾我誠: 液状化特性に与える振動数等の影響, 第19回土質工学研究発表会, pp.549-550, 1984.