

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

大成建設 正会員 ○忠野 祐介
大成建設 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、震動と透水の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（以下、SO）やセルロースエーテル水溶液（以下、CE溶液）が広く用いられてきた。

本報では、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、中間土に対して、水、SO、分子量が異なるCE溶液2種の計4種の粘性流体を用いた要素実験を行い、間隙流体の違いが中間土の透水、圧密特性、液状化強度に与える影響について検討した。

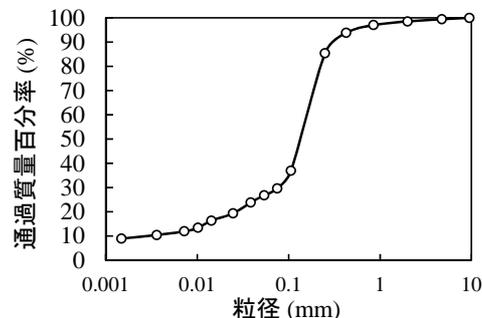


図1 粒径加積曲線

表1 中間土の物性一覧

項目	結果
自然含水比 w_n	26.8 %
土粒子密度 ρ_s	2.666 g/cm ³
液性限界 w_L	N.P
塑性限界 w_P	N.P
最大間隙比 e_{max}	1.541
最小間隙比 e_{min}	0.863

2. 試料と粘性流体

試料は、浦安市内で掘削により採取した攪乱試料の2mmふるい通過分である。図1に粒径加積曲線を示し、表1に試料の物性一覧を示す。表1の最小間隙比は、安田ら¹⁾の方法により求めた。

SOはS社製で、液温25℃において、動粘性係数 $\nu = 50\text{cSt} (= 50\text{mm}^2/\text{s})$ の粘性流体を用いた。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を選択し、分子量が異なる2種類を用いた。分子量が多いHPMC4000（以下、H-CE）、分子量が少ないHPMC50（以下、L-CE）を用いた。両者ともにS社製である。液温20℃の2%溶液で、H-CEは4000mPa・s、L-CEは50mPa・sになる。CE溶液は、両者とも動粘性係数 $\nu = 50\text{cSt}$ になるよう濃度を調整して用いた。なお、L-CEは非排水繰返し三軸試験でのみ使用した。

3. 試験方法

等方圧縮膨潤試験、三軸透水試験：本検討では、全ての試験を三軸試験機で行った。供試体は直径5cm、高さ10cmの円筒形である。供試体はドライタンピング法で作製した。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。等方圧縮膨潤試験では、 $\sigma'_c = 196\text{kPa}$ まで段階的に等方圧縮を行い、 $\sigma'_c = 29.4\text{kPa}$ まで段階的に等方除荷を行った。三軸透水試験²⁾は、圧密試験と併せて行い、所定の载荷段階において複数回三軸透水試験を実施し、その平均値を透水係数とした。

非排水繰返し三軸試験：二重負圧法による飽和過程まで、上記と同様である。その後、 $\sigma'_c = 49\text{kPa}$ で等方圧密を行った。初期密度は水で飽和した供試体の圧密後の間隙比が1.0程度になるよう調整し、全ての試験で初期密度を揃えた。ただし、後述するが、SOで飽和した供試体は圧密量が小さかったため、所定の間隙比が得られるよう σ'_c を245.3kPaまで増加させた。せん断時の载荷周波数は $f = 0.01\text{Hz}$ とした。

4. 試験結果

表2に試験結果の一覧を示し、図2に透水試験結果を示す。水のN倍の動粘性係数の間隙流体を用いた場合、理論上の透水係数は1/Nになる。SOは概ねその関係を満足するが、H-CEはその関係を満足しない。既往の研究^{例えば4)}によれば、粘性流体を用いた重力場での透水試験では、動粘性係数以外の特性（例えば、吸着性や表面張力）の違いが透水係数に影響するとされており、今後、遠心場での透水試験を視野に検討を行う必要があると思われる。

キーワード 粘性流体, 中間土, 液状化, 圧密, 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:045-814-7236

表 2 試験結果一覧

間隙液		Water	SO	H-CE
等方圧縮膨潤	動粘性係数 (cSt) ^{*1} ν	1.0	50	53
	圧縮指数 λ	0.097	0.050	0.095
	膨潤指数 κ	0.007	0.006	0.006
	透水係数 (m/s) ^{*2} k	8.63×10^{-6}	1.84×10^{-7}	3.41×10^{-7}
非排水繰返し三軸	圧密後間隙比 e	0.988 ~ 0.993	0.965 ~ 1.002	1.005 ~ 1.015
	動粘性係数 (cSt) ^{*1} ν	1.0	50	48~52
	液状化強度 R_{L20}	0.190	0.204	0.228

*1: 室温(およそ20°C)での値, *2: 間隙比 $e=1.042$ での透水係数

図3に圧密試験結果を示す。CE溶液はH-CEのみ実施したが、試験中にB値が低下し、試験を中断したため途中までのデータである。水とH-CEは圧縮指数がおおよそ等しく、SOは圧縮指数がそれらの1/2程度であることが分かった。間隙液の極性が小さいと、細粒分の土粒子表面に働く van del Waals 力が低下し、土の圧縮性が小さくなるとされている(例えば⁵⁾)。H-CEは低濃度で水に溶解させていることから極性は水と変わらず、圧縮性が水と同等であり、SOは無極性の流体のため土の圧縮性が小さくなったと推察する。

図4に液状化強度曲線を示す。SO、CE溶液ともに液状化強度曲線が水と一致しない結果が得られた。H-CEと水の液状化強度曲線は、ほぼ同じ傾きであるが、液状化強度 R_{L20} が水より大きくなった。また、分子量が小さいL-CEを用いると、多少、水に近い側に移動した。CE溶液は粘土やセメント等の微細粒子表面に吸着し⁶⁾、分子量が多くなるほど、溶液の非ニュートン性が顕著に現れる³⁾。よって、今回用いた試料に含まれる細粒分との相互作用や、CE溶液自体のレオロジー特性により液状化強度が増加したと推察される。一方、SOは低応力比域で繰返し载荷回数が増加し、液状化強度曲線の勾配が水よりも小さくなった。Oka et al. (1999)⁷⁾によれば、圧縮指数が小さいと、繰返しせん断に伴って正規圧密領域と過圧密領域の境界面が拡大しやすくなる。そのため、1サイクル当たりの水圧上昇量が小さくなり、DA = 5%に至る繰返し载荷回数が増加したと考えられる。

5. まとめ

本検討で得られた知見より、中間土を用いた遠心模型実験での間隙流体の選定方法について以下にまとめる。

- ・分子量が多いCE溶液を用いる場合、圧密特性は水と同等であるが、透水特性が相似則を満足しない可能性がある。また、細粒分と高分子との相互作用やCE溶液自体のレオロジー特性により、水と比較して液状化強度が増加する。さらに、この特性はCE溶液の分子量に相関があると思われるため、CE溶液の選定には注意を要する。
- ・SOを用いる場合、SOが無極性であることによる圧密特性、ならびにそれに起因する液状化特性が水と異なることに留意すべきである。さらに、不飽和領域を模型地盤で再現する場合には、SOの特性として表面張力が水の1/3程度であることに配慮しなければならない。

今後は、同様の試料に対して他の粘性流体を用いた要素実験を行い、中間土を用いた動的遠心模型に適した間隙流体の検討を行う。

参考文献

1) 安田進ほか：細粒分を多く含む砂に対する最大・最小密度試験結果，地盤工学会関東支部発表会，pp.139-141，2014. 2) Fukushima, S. and Ishii, T.: An experimental study of the influence of confining pressure on permeability coefficients of filldaCEore material, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.32-46, 1986. 3) 信越化学工業：メトローズカタログ，2013. 4) 田中満ほか：遠心力载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. 5) Chen, J. et al.: Pore Fluid Properties and Compressibility of Kaolinite, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 126, No.9, pp.798-807, 2000. 6) Chang, S.-H. et al.: The adsorption of water-soluble polymers on mica, talc, limestone, and various clay minerals, *Colloids and Surfaces*, 59, pp.59-70, 1991. 7) Oka, F. et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus. *Geotechnique* 49 (5), pp.661-680, 1999.

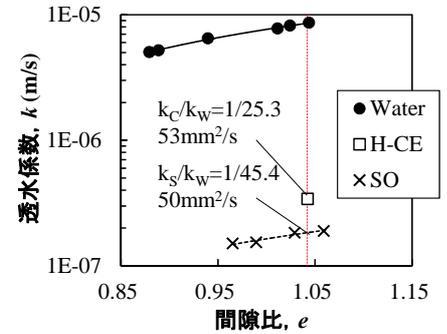


図2 間隙比と透水係数の関係

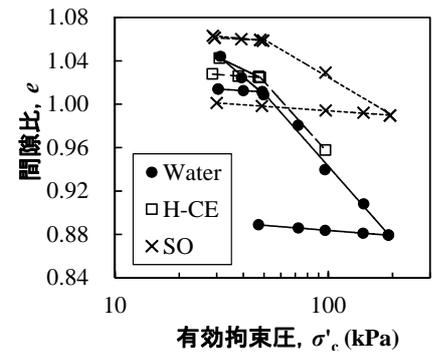


図3 等方圧縮膨潤特性

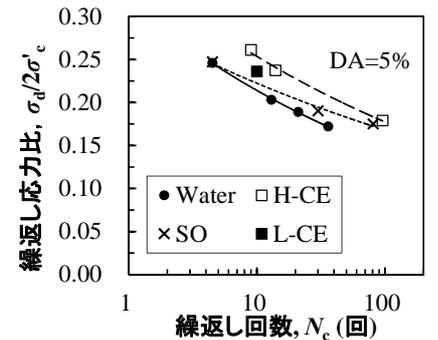


図4 液状化強度曲線