

低サクション域における不飽和二戸しらすの繰返し載荷挙動

八戸工業高等専門学校 学生会員 ○平野 和也

八戸工業高等専門学校 正会員 清原 雄康

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の余震により、二戸しらすで構成された宅地盛土地盤が泥流状崩壊した。この被害では不飽和状態での液状化の可能性が指摘されている。そこで、不飽和二戸しらすの繰返し三軸圧縮試験を行い液状化強度曲線、FL値、基準化累積損失エネルギーにより液状化評価を行う。また、不飽和状態では表面張力によるサクションが発生するため、サクションや気泡の液状化抵抗性に対する影響を確認し、水分特性曲線により求められる間隙径分布から間隙構造の推察を行う。

2. 繰返し三軸圧縮試験

(1) 試料土の諸性質

試料土は崩壊した現場から採取した二戸しらすを用いた。試料土の ρ_s は $2.63(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 ρ_{dmax} は $1.566(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 ρ_{dmin} は $1.127(\text{g}/\text{cm}^3)$ であった。

(2) 試験方法

試験には繰返し三軸圧縮試験機を用い、上部に撥水性が高く水分が付着すると非排気となる PTFE メンブレンフィルター、下部には空気侵入圧 50kPa まで耐えられるセラミックディスクを設置し非排気、非排水条件を維持できるようにした。また、内セルを設置し内セル内の水位変動と軸変位から供試体の体積変化を測定した。供試体は相対密度 $Dr:65\%$ を目標とし、加水調整した試料土を $\phi 5 \times 10\text{cm}$ のモールドで 3 層 $\times$ 4 回で突き固め、供試体設置後、所定の飽和度となるように吸水させた。背圧を 0kPa、 σ'_c を 100kPa かけ B 値を確認し、 σ'_c で圧密後、繰返し載荷周波数を 0.1Hz に設定し、軸差応力 σ_d は飽和度 $Sr:80\%$ のケースで 40, 45, 50 kN/m²、 $Sr:70\%$ のケースで 50, 60, 70kN/m² と設定して液状化に至るまでの載荷回数、軸ひずみ、過剰間隙水圧の測定を行った。圧密前後の供試体性状、最大過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ と液状化回数を表 1 に示す。サクションを考慮した平均有効主応力は Bishop の有効応力式¹⁾ (1)を用い、平均主応力 p' は式(2)により求めた。

$$\sigma_i = (\sigma_1 - u_a) + \frac{Sr - Sr_r}{100 - Sr_r} (u_a - u_w) \quad (1) \quad p' = \frac{\sigma'_a + 2\sigma'_{r1}}{3} \quad (2)$$

ここに、 σ' :有効応力、 σ :全応力、 p' :平均有効主応力、 σ'_a :軸方向応力、 σ'_{r1} :側方向応力である。表 1 より、 $Sr:80\%$ 、100%のケースでは $\Delta u/\sigma'_c$ が液状化の基準である 0.95 に至っているが、 $Sr:70\%$ では 0.95 に至らなかった。

3. 液状化試験結果

試験結果の一例として $Sr:80\%$ の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ の繰返し回数に対する変化と応力履歴を図 1 に示す。時繰返し回数増加とともに $\Delta u/\sigma'_c$ は増加し、それに伴い p' が低下した。応力履歴は Bishop の式によりサクションを考慮したもの、考慮しないものを重ねて示されているがほぼ重なっており、 $Sr:80\%$ では有効平均主応力に対してサクションはあまり影響しないことが分かった。

液状化強度曲線を図 2 に示す。これより液状化回数 20 回での $\sigma_d/(2\sigma'_c)$ を比較すると $Sr:100\%$ では 0.14、 $Sr:80\%$ では 0.22 と、 $Sr:80\%$ では $Sr:100\%$ の約 1.5 倍の液状化強度が得られた。次に、式 (3)(4)から求められる FL 値を用いて、実際に崩壊した現場、地震を想定した液状化判定を行った。

$$FL = \frac{R}{L} \quad (3) \quad L = \frac{\alpha_{\text{max}}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_{v1}} \cdot (1 - 0.027z) \quad (4)$$

ここに、 R :繰返し応力比 (0.22)、 L :地震時応力比、 α_{max} :最大加速度 (179gal)、 g :重力加速度 (981cm/s²)、 σ_v :全上載荷重 (86kN/m²)、 σ'_{v1} :有効上載荷重 (49kN/m²)、 z :液状化検定深度 (5m)とする。FL値を算出したところ0.79と

表 1 供試体性状

設定軸差応力 $\sigma'_d(\text{kN}/\text{m}^2)$	供試体作製時				圧密後			繰返し時	
	相対密度 $Dr(\%)$	間隙比 e	飽和度 $Sr(\%)$	B 値	相対密度 $Dr(\%)$	間隙比 e	飽和度 $Sr(\%)$	最大 $\Delta u/\sigma'_c$	液状化回数
30	59.9	0.942	100	0.980	77.3	0.828	100	0.974	35.3
40	61.8	0.929	78.6	0.329	76.0	0.837	81.9	0.986	28.2
45	63.6	0.918	78.2	0.250	73.5	0.853	77.8	0.979	18.1
50	60.5	0.938	82.2	0.336	82.2	0.854	82.4	0.976	10.1
50	67.2	0.894	73.3	0.174	73.3	0.839	74.3	0.905	-
60	69.3	0.880	74.1	0.192	74.1	0.831	73.6	0.915	-
70	63.2	0.920	71.9	0.196	71.9	0.864	72.3	0.826	-

キーワード 不飽和土、二戸しらす、液状化、三軸圧縮試験、損失エネルギー、水分特性曲線

連絡先 〒039-1104 青森県八戸市田面木上野平 16-1 八戸工業高等専門学校清原研究室 TEL 0178-27-7234

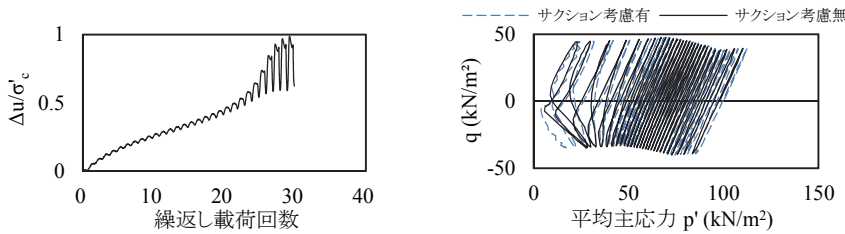


図1 液状化強度試験結果の一例

1を下回り、この条件では液状化するという判定となった。このことから、液状化強度曲線での比較では液状化抵抗性が上がったが、Sr:80%程度でも容易に液状化すると考えられる。次に、液状化していないSr:70%のケースを含めて、応力経路に関わらず統一的に比較することができるエネルギーベースでの結果の整理を行い比較した。式(5)により基準化累積損失エネルギーを算出する。

$$\Delta W = \sum \sigma_{di} \cdot \Delta \varepsilon_i \quad (5)$$

ここに、 ΔW :損失エネルギー、 σ_{di} :軸差応力、 ε_i :軸ひずみである。载荷サイクルの ΔW を求め、圧密圧力 σ'_c で除して無次元化し累積したものを基準化累積損失エネルギー W/σ'_c とする。 $\Delta u/\sigma'_c$ と W/σ'_c の関係を図3に示す。図3より飽和度が低下するほど $\Delta u/\sigma'_c$ の上昇が緩やかになっている。両振幅ひずみDAが5%となる平均 W/σ'_c に着目すると、Sr:100%で0.034、Sr:80%で0.038、Sr:70%で0.141であった。DA:5%となるまでの W/σ'_c はSr:100%と比較するとSr:80%が約1.1倍、Sr:70%で約4.2倍のエネルギーを必要とし、飽和度が低下するほど液状化しにくくなっていると言える。

4. 間隙径の推察

繰返し载荷時のある間隙比(e :0.78, 0.8, 0.82)でのサクシオン ψ 、体積含水率 θ を van Genuchten 式²⁾(6)へフィッティングさせ水分特性曲線を求めた。

$$Se = \{1 + (-\alpha\psi)^{n_{VG}}\}^{-(1-1/n_{VG})} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

ここに、 Se :有効飽和度、 ψ :サクシオン、 α 、 n_{VG} :VGパラメータ、 θ_r :残留体積含水率、 θ_s :飽和体積含水率、 e :間隙比である。载荷時と等方圧密時($e=0.76$)の水分特性曲線を図4に示す。これより、間隙比が小さいほどサクシオンが高くなる傾向にある。各水分特性曲線より得られる毛管上昇高さから土粒子間隙を、毛管と仮定し間隙構造の把握を試みる。 $\theta_r \sim \theta_s$ を分割し各区間の平均の間隙半径 R_j 、毛管本数 n を式(7)(8)(9)で求める。

$$\Delta \theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{N} \quad (7) \quad R_j = -\frac{2T_s}{\rho_w g h_j} \quad (8) \quad n = \frac{\Delta \theta}{\pi R_j^2} \quad (9)$$

ここに、 N :体積含水率の分割数(=10)、 R_j :間隙半径、 T_s :水の表面張力、 ρ_w :水の密度、 g :重力加速度、 h_j :分割J番目の毛管上昇高さ、 n :本数である。図5に間隙比と平均間隙半径の関係を示す。繰返し载荷中は間隙比が低下するほど間隙径が小さくなる傾向がある。しかし、载荷時 $e=0.78$ の場合と比較して、等方圧密時 $e=0.76$ の場合は間隙径が大きくなっており、繰返し载荷時とは傾向が異なる。等方圧密時は土粒子構造を保ったまま間隙が収縮するが、繰返し時はせん断による負のダイレタンシーにより土粒子構造がずれ間隙が顕著に縮小することが推察される。このことから、間隙径の低下にはせん断の影響が大きいと考えられる。

5 まとめ

液状化強度曲線より Sr:80%では Sr:100%の約 1.5 倍の液状化抵抗性であったが、FL 値で液状化したという判定となった。基準化累積損失エネルギーによる比較では、Sr が低下するほど液状化しにくくなることが分かった。水分特性曲線から間隙径分布を求めたところ、間隙径の低下に対してせん断による負のダイレタンシーの影響が大きいことが推察された。

参考文献：1) 社団法人地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価，pp.93, 2005. 2)社団法人地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価，pp.35-41, 2005. 3)清原雄康，佐々木裕貴：東北地方太平洋沖地震において泥流状崩壊をもたらした二戸しらすの液状化強度特性，平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，III-53, 2013.

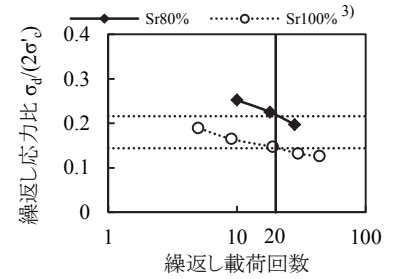


図2 液状化強度曲線

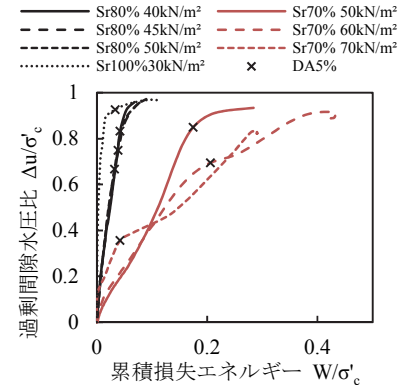
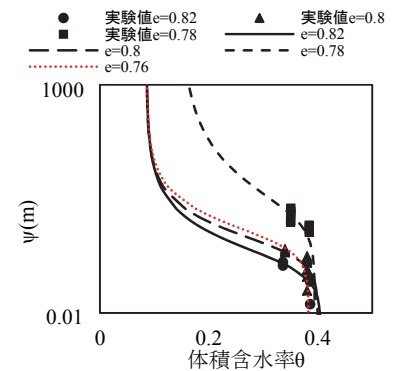

図3 W/σ'_c に対する $\Delta u/\sigma'_c$ の関係


図4 水分特性曲線

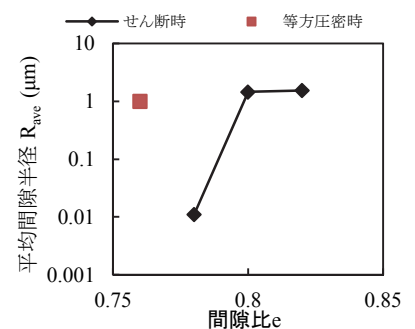


図5 平均間隙半径と間隙比との関係