

2004年新潟県中越地震で被災した鉄道盛土材料の不飽和繰返し三軸試験

不飽和土 繰返し三軸試験 サクシオン

複合技術研究所

正会員

○木口 峰夫

鉄道総合技術研究所

国際会員

松丸 貴樹

足利工業大学

国際会員

西村 友良

1. はじめに

2004年新潟県中越地震では、山間部の道路や鉄道盛土に地震被害が生じたが、直前の台風による降雨が盛土の地震被害の拡大につながったことが指摘されている(例えば<sup>1)</sup>)。この降雨が盛土の地震時挙動に与える影響を適切に評価するためには、盛土材料の広いサクシオン領域での不飽和状態の液状化抵抗特性を把握する必要がある。本研究では、この地震で被災が生じた鉄道盛土<sup>2)</sup>の材料を対象に、微細多孔質膜<sup>3)</sup>を用いた加圧膜法による非排気・非排水条件での不飽和繰返し三軸試験をひずみ制御および応力制御の下で行い、サクシオンの大きさが液状化抵抗特性に及ぼす影響の検討を行った。

2. 実験に用いた材料

試料は、2004年新潟県中越地震で被害が生じた上越線220k300mの鉄道盛土<sup>2)</sup>の材料を用いた。その物理特性は、土粒子の比重 $G_s=2.629$ 、50%粒径 $D_{50}=0.134\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=11.65$ 、細粒分含有率 $F_c=23.3\%$ である。土の締固め試験(A-c法)では、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.482\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt}=19.0\%$ であった。供試体は、乾燥密度が $\rho_d=1.290\text{g/cm}^3$ 、含水比が16%程度となるように、直径5cm、高さ10cmのモールド内での締固めにより作製した。この密度で作製した飽和土の繰返し三軸試験を行ったところ、両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に到達するときの液状化強度比は $R_{20}=0.248$ であった。また、この密度で作製した供試体を対象に微細多孔質膜を用いてサクシオンが0~20kPaの範囲で保水性試験を実施しており、その結果を図1に示す。定水位法による飽和透水試験も実施しており、透水係数は $k=7.51 \times 10^{-6}\text{m/s}$ であった。

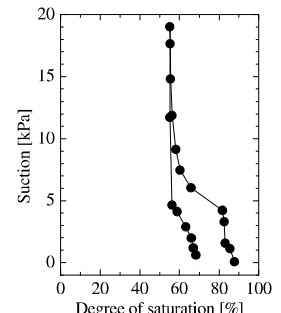


図1 水分特性曲線

3. ひずみ制御条件での不飽和繰返し三軸試験

3.1 不飽和三軸試験装置の概要

試験装置の概要を図2に示す。試験機の構成は、多孔質膜用ペダスタル、二重セル式三軸セル、圧力計、排水量ならびに体積変化測定用の差圧計、間隙水圧制御用EP・コンバム、二重管ビュレット等からなる。間隙水圧計・間隙空気圧計・セル圧計は、供試体下部の高さに合わせ三軸室の外部に設置した。排水量の変化に伴う間隙水圧の変動は、二重管ビュレット内に負圧を与えることにより水位変動分の水圧を制御した。負圧は、EPとコンバムにより与え、間隙水圧が常に0kPaを保つようにパソコンで自動制御した。

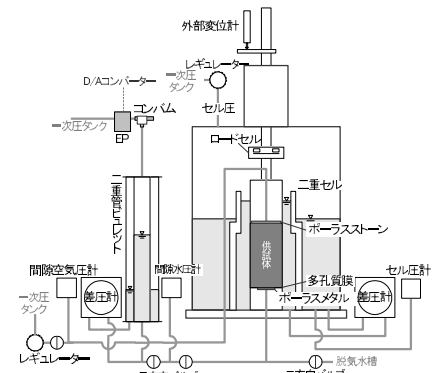


図2 不飽和三軸試験装置の概要

3.2 不飽和三軸試験の手順

本試験は、サクシオンの载荷履歴を様々に与え、不飽和繰返し三軸試験を4ケース行った。各ケースのサクシオン载荷履歴を表1に示す。CASE1は通水により見かけ上飽和とした上で、空気圧を増加させることでサクシオンを20kPa载荷した後に繰返し载荷を行った。CASE2・3ではCASE1と同様の手順で20kPaのサクシオンを载荷した後に、1kPaおよび4kPaのサクシオンに低下し、その後繰返し载荷を行った。CASE4ではサクシオンの载荷履歴を与えずに見かけ飽和状態で繰返し载荷を行った。非排気・非排水条件下の繰返し载荷は、図3に示すように軸ひずみ片振幅0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0%の三角波を各10波、ひずみ制御で与え、周波数は0.001Hzまたは0.0002Hzとした。基底応力は $\sigma_{net}=98\text{kPa}$ とした。

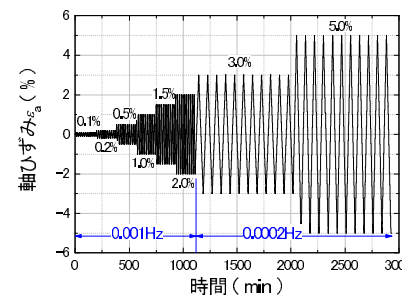


図3 繰返し载荷パターン

3.3 実験結果および考察

各ケースの過剰間隙空気圧比・過剰間隙水圧比の時刻歴を図4・図5に示す。与えたサクシオンが小さい程、両者の上昇量は小さくなった。サクシオン载荷履歴なしのCASE4は過剰間隙水圧比が0.95を上回り液状化状態となっていると考えられる。その他のケースではCASE4と比べ過剰間隙水圧比・空気圧比ともに上昇量は小さく、サクシオンが1kPaと極めて小さなCASE3においても、液状化には至っていない。

次に、CASE1~3のサクシオンの経時変化を図6に

表1 試験ケースごとのサクシオン载荷履歴

試験ケース	飽和過程		$u_a$ (kPa)	排水過程		吸水過程	
	$u_w$ (kPa)	$\sigma_r$ (kPa)		$u_w$ (kPa)	$\sigma_{net}$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_{net}$ (kPa)
CASE1	6	20	20	*0→5	-	*0→5	
CASE2			0	98	4	0	98
CASE3					1		
CASE4					-		

\*CASE1: 非排気・非排水状態にしたところ、5kPaの間隙水圧が残存。実質のサクシオンは15kPaとして繰返し载荷を実施。

Unsaturated triaxial test materials obtained from railway embankment damaged by 2004 Nigata-ken Chuetsu earthquake

Mineo KIGUCHI(Integrated Geotechnology Institute), Takaki MATSUMARU(Railway Technical Research Institute) and Tomoyoshi NISHIMURA(Ashikaga Institute of Technology)

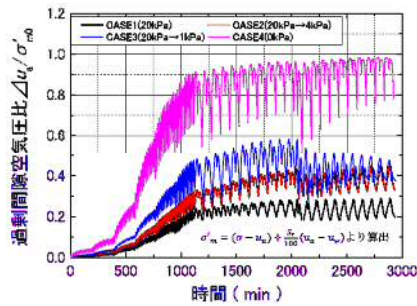


図4 過剰間隙空気圧比の時刻歴

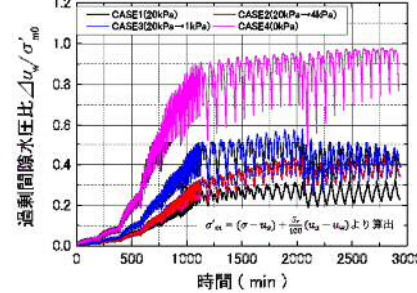


図5 過剰間隙水圧比の時刻歴

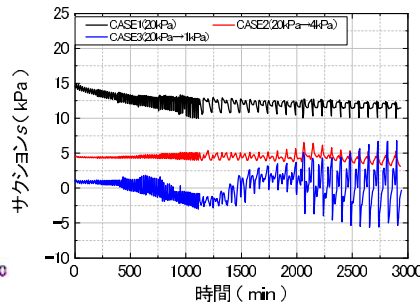


図6 サクションの時刻歴

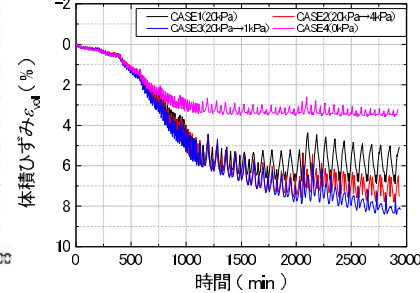


図7 体積ひずみの時刻歴

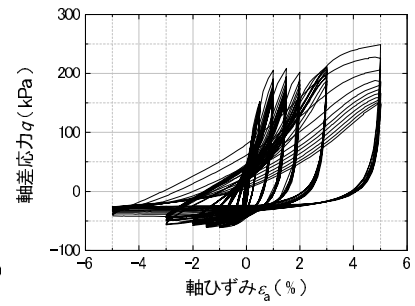


図8 応力～ひずみ関係 (CASE3)

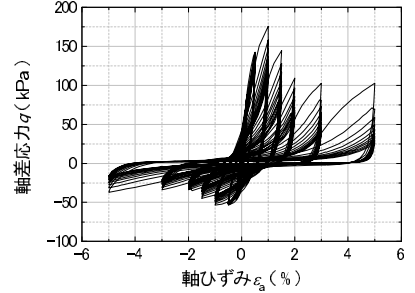


図9 応力～ひずみ関係 (CASE4)

示す。初期のサクシオンが20kPaと大きなCASE1は、载荷初期からサクシオンの低下が見られるが、4kPaのCASE2では低下傾向は見られなかった。サクシオン1kPaを与えたCASE3では、サクシオンが負の値を示している。このケースでは、前述のように液状化状態とはなっていないが、これは基底応力が維持されていることに起因すると思われる。

体積ひずみの時刻歴を図7に示す。体積ひずみは、全てのケースで圧縮を示している。CASE1～3とCASE4は、概ね750分頃から体積ひずみに違いが生じているが、これはCASE4の载荷ではこの時点で液状化状態に至ることで増加が停止したと思われる。この傾向は、他の細粒分を含む不飽和砂を対象とした繰返し三軸試験においても確認されている<sup>4)</sup>。

また、CASE3 (サクシオン1kPa) とCASE4 (0kPa) の軸差応力～軸ひずみ関係を図8・9に示す。CASE4 (図9) は、軸ひずみの増加とともに軸差応力が低下していくが、CASE3 (図8) では、体積の圧縮 (収縮) による影響で増加し続ける傾向を示した。両ケースの繰返し载荷前のサクシオンの大きさの違いは小さいものの、飽和度がCASE3では67.6%であったのに対してCASE4では89.8%と高く、飽和度の違いも液状化の発生に影響しているものと考えられる。

#### 4. 応力制御での不飽和繰返し三軸試験

**4.1 不飽和三軸試験装置の概要と試験条件** CASE3の供試体を対象に、応力制御での不飽和繰返し三軸試験を行い、液状化状態に至るかの検討を行った。試験に用いた装置の詳細は文献5)に示すが、この試験では可能な限り管路中の空気量が少なくなるように間隙空気圧計を三軸室内に設置している。繰返し载荷は、応力制御で飽和土の繰返し非排水三軸試験と同様に0.1Hzの正弦波により行った。基底応力は25kPaとし、応力振幅を10kPa (応力比 $R=0.20$ ) と20kPa (応力比 $R=0.40$ ) の2ケースの载荷を行った。

**4.2 実験結果および考察** 応力比 $R=0.2$ の場合は、繰返し载荷による間隙水圧の上昇や軸ひずみの増加がほとんどなかった。その後の応力比 $R=0.4$ での载荷での応力～ひずみ関係図を図10に示す。繰返し载荷に伴って軸ひずみが増加し、液状化状態に至ることを確認した。この応力比で $DA=5\%$ に到達するのに必要な繰返し回数15回であった。飽和土の繰返し三軸試験では $DA=5\%$ に達する繰返し回数は例えば $R=0.26$ のときに10回であることから、飽和土と比べると液状化強度がかなり大きいことがわかる。

#### 5. まとめ

新潟県中越地震で被災した鉄道盛土の材料を対象として、不飽和状態での繰返し三軸試験を実施した。ひずみ制御の試験では繰返し载荷前のサクシオンが1kPaよりも大きなケースでは液状化に至ることはなく、サクシオン1kPaの供試体に対する応力制御の载荷では液状化に至るケースもあったが、液状化抵抗は飽和土と比べるとかなり大きいことを確認した。

謝辞: 試料の採取に際しては東日本旅客鉄道 (株) の皆川一四氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献 1) (社) 地盤工学会: 道路・鉄道土工構造物および造成盛土, 新潟県中越地震災害調査委員会報告書, pp.143-293, 2007. 2) 森島啓行, 猿谷賢三, 相沢文也: 在来線鉄道の土構造物間における被害と復旧, 基礎工, Vol.33, No.10, pp.78-83, 2005. 3) Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: Micro-porous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, Geotechnical Testing Journal, Vol.35, No.1 2012. 4) 木口峰夫, 松丸貴樹, 西村友良: サクション履歴を与えた細粒分を含む砂質土の不飽和繰返し三軸試験, 第68回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門Ⅲ, pp.199-200, 2013. 5) Nishimura, T.: Evaluation of effective stress of an unsaturated soil under cyclic loading, Proceedings of International Symposium on Earthquake-induced Landslides, Kiryu, pp.535-544, 2012.

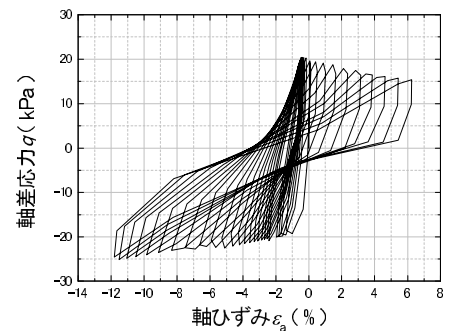


図10 応力～ひずみ関係