熊本地方に堆積する火山灰質土の繰返し強度変形特性および液状化発生基準の検討

九州工業大学大学院　学生会員　○七條　隆
九州工業大学　非会員　柿内　伶香
九州工業大学大学院　正会員　永瀬　英生　廣岡　明彦

1.はじめに

2016 年熊本地震では、熊本平野において広範囲に液状化被害が生じた。これらの液状化した地盤は火山灰質土を含んでおり、火山灰質土が液状化被害を甚大化した可能性がある。既往の研究で、液状化等の被災地から採取した不撹乱試料の物理的性質および繰返し強度変形特性についての知見を得たところ、湖成層を含む阿蘇市の一部の試料と秋津町の一部の試料では完全な液状化状態に至らず繰返し軟化を生じたという結果を得た。両者に共通した特徴は細粒分を多く含むことである。従来の液状化発生基準（両振幅せん断ひずみ DA=7.5%）に達した時点で、過剰間隙水圧比が 1.0 を下回っていたことから、完全な液状化に至らないと判断したが、過剰間隙水圧比は液状化発生基準に達した後も上昇していた。このことから、不撹乱のシルトおよび粘土、火山灰質土などの特殊土において液状化発生基準は従来の両振幅せん断ひずみ DA=7.5%では不正確な可能性がある。

本研究では、熊本地震により液状化等の地盤災害が発生したところから種々の不撹乱試料を採取し、物理的性質を確認し、液状化特性と変形特性について知見を得ることに加え、液状化発生基準を従来の両振幅せん断ひずみ DA=7.5%よりも大きい DA=15%に設定し、新基準でのせん断ひずみ、過剰間隙水圧、せん断剛性などの特性を従来の基準でのそれらの値と比較検討を行う。そして、不撹乱のシルト、粘土や火山灰質土などの特殊土において新たな液状化発生基準を提案することを目的とし、事例的研究を行った。

2.試料および実験方法

試料には、阿蘇市で採取した 3 深度の不撹乱試料と熊本市秋津町で採取した 3 深度の不撹乱試料を用いた。阿蘇市で採取した不撹乱試料のうち深度が小さいものから阿蘇砂質土 A、阿蘇砂質土 B、阿蘇砂質土 C と呼称した。阿蘇砂質土 B は粘性土であるが、本研究では既往の研究に沿って阿蘇砂質土 B と呼称したままにする。秋津町で採取した不撹乱試料のうち深度が小さいものから秋津砂質土 A、秋津砂質土 B、秋津砂質土 C と呼称した。試料の粒径加積曲線を図 1 に、物理的性質を表 1 に示す。

表 1　物理的性質

	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p	細粒分含有率 FC (%)
阿蘇砂質土A (G.L. -11.30m~ -12.25m)	2.984	NP	NP	—	21.3
阿蘇砂質土B (G.L. -19.00m~ -20.35m)	2.374	71.5	60.1	11.5	82.8
阿蘇砂質土C (G.L. -44.90m~ -45.90m)	2.448	77.6	66.6	11.0	44.1
秋津砂質土A (G.L. -5.20m~ -6.10m)	2.782	36.1	30.2	5.9	35.3
秋津砂質土B (G.L. -6.10m~ -6.75m)	2.701	23.6	23.2	0.4	8.6
秋津砂質土C (G.L. -6.75m~ -7.20m)	2.763	20.7	20.6	0.1	5.8

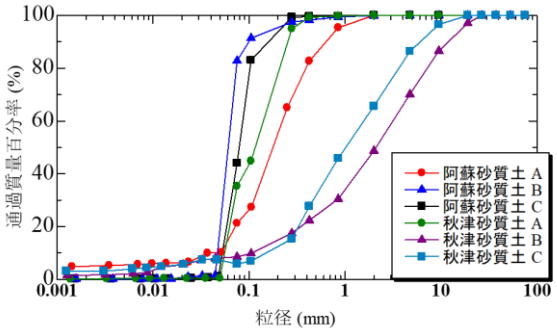

図 1　粒径加積曲線

本研究では、繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いて実験を行った。供試体は外径 7cm、内径 3cm、高さ 7cm の中空円筒形とした。次に間隙圧係数 B 値が 0.95 以上となるまで脱気水で通水して供試体を飽和させ、試料ごとに原位置での有効拘束圧を算出し、過圧密状態にならないよう、試験時に有効拘束圧を設定して等方圧密を行った。その後、非排水状態で 0.1Hz の正弦波形を用いて繰返し載荷試験を行った。液状化または繰返し軟化時の強度を繰返し強度と称し、繰返し強度を求める際の判断基準として、従来の両振幅せん断ひずみ DA=7.5%と新たに DA=15%のときとした。この際の試験条件は、繰返し回数が 20 回のときのせん断応力比を繰返し強度比 R_{L20} (F_L=1.0) とし，それより大きい応力比 (F_L＜1.0)，小さい応力比（F_L＞1.0）でそれぞれ 20 回載荷し F_L の値（液状化または繰返し軟化の程度）に応じたせん断剛性の低下度合いを求めている。なお，F_L については以降において「液状化安全率 F_L」と表示することとする。

3.繰返し載荷試験における時刻歴および繰返し強度比

繰返し載荷試験の経時変化から DA=7.5%に達した後も過剰間隙水圧比の上昇が見られ、DA=15%でほぼ上限に達していた。また、DA=15%に達した後にせん断応力比の減少傾向が顕著に見られた。以上のことから、液状化発生基準は従来の両振幅せん断ひずみ DA=7.5%よりも両振幅せん断ひずみ DA=15%としたほうが液状化発生を正確に評価している可能性が高い。

繰返し応力比 R と両振幅 DA=7.5%に達するまでの繰返し回数 Nc の関係を図 2 に示す。以上の結果から、阿蘇砂質土 A と C の R_{L20} はほとんど変わらない値となった。秋津砂質土 A は液状化の強さは中位程度となり、秋津砂質土 B は他の試料よりも比較的大きいものとなっている。これは、シルトを含む土は水を含むと粘着力が発生し繰返し強度が大きくなる傾向があることや、塑性をわずかに示す砂質土であることから、粘着力が発揮されたことで R_{L20} が大きくなったことが考えられる。秋津砂質土 C の R_{L20} は他の試料と比べて明らかに小さい値を示している。ただし、秋津砂質土 C は試料が不足したため 2 点のみの結果となっている。

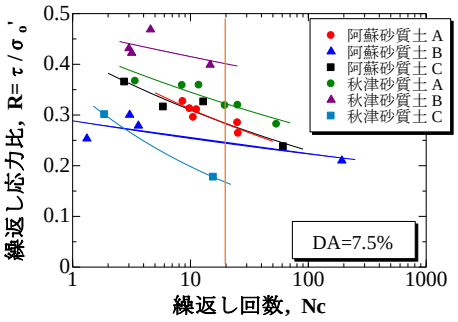

図 2　繰返し応力比と繰返し回数の関係

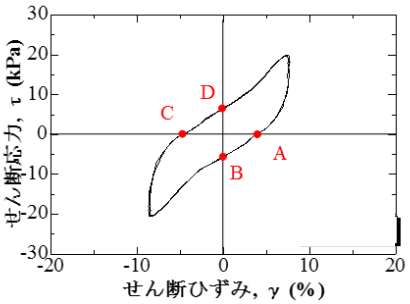

図 3　繰返し載荷の最終サイクルにおけるせん断応力ーせん断ひずみ関係によるヒステリシス曲線

4.繰返し載荷後の変形特性

繰返し載荷において最もせん断剛性が低下するところを評価する考えで繰返し載荷の最終サイクルにおける接線せん断剛性を求めた。図 3 は繰返し載荷の最終サイクルにおけるヒステリシス曲線を示したものである。ここでは，この図に示す点 A～D における接線を求め，それらの最小値をせん断剛性 G_l と定義した。この方法で試験結果を整理して得られた剛性低下率 $G_l/G_{0,i}$ の値を液状化安全率 F_L に対してプロットしたものを図 4 に示す。この結果から、阿蘇砂質土 A は F_L に対する剛性低下が比較的緩やかであることが分かる。阿蘇砂質土 B、C は F_L に対する剛性低下が顕著である。これは湖成層が持つ通常は硬いが大きな地震の揺れで堆積した成分が壊れると水分が出て急激に軟らかくなる性質により、大きな振動を与えると急激に軟化したためと考えられる。このことからも液状化発生基準を従来よりも大きくすることで、液状化後の変形特性もより正確に評価できる可能性がある。秋津砂質土 C は F_L ＝0.775 と F_L ＝0.457 の $G_l/G_{0,i}$ を比較すると、後者のほうが 1 オーダー程度小さくなっている。

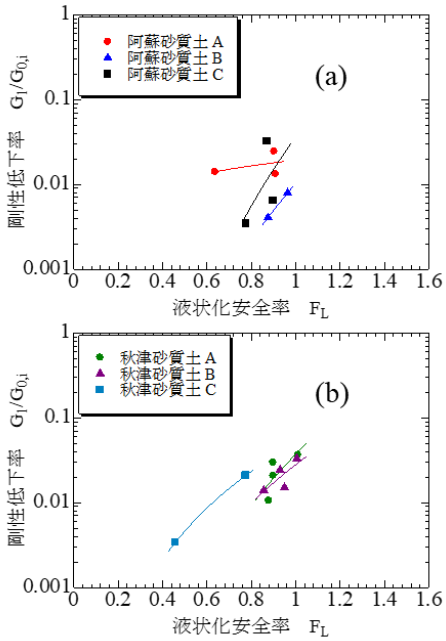

図 4　剛性低下率 $G_l/G_{0,i}$ と液状化安全率 F_L の関係

5.結論

本研究により得られた結果は以下のとおりである。

1) 液状化発生基準は従来の両振幅せん断ひずみ DA=7.5%よりも両振幅せん断ひずみ DA=15%としたほうが液状化発生を正確に評価している可能性が高い。

2) 秋津砂質土 C の繰返し強度比は比較的小さく、剛性低下も顕著であったことから、秋津砂質土 C が液状化被害に大きな影響を与えた可能性がある。

参考文献

1) 永瀬英生 他：Cyclic Strength and Deformation Characteristics of Volcanic Ash Soils Deposited in Kumamoto District，地盤工学会九州支部 70 周年記念フォーラム, pp.45-50, 2019.