

阿蘇カルデラの湖成粘性土の動的変形特性

東京電機大学 正会員 石川 敬祐
 東京電機大学 名誉会員 安田 進
 東京電機大学大学院 学生会員 ○野村 勇斗

1. はじめに

2016 年熊本地震により、阿蘇カルデラ内では近年の地震被害では見られない帯状の陥没(グラーベン)が局所的に発生し、陥没区間に近接する家屋や道路、ライフラインに甚大な被害を与えた¹⁾。そこで、筆者達はこの陥没のメカニズムを解明するために様々な調査を行ってきている。これまでの研究により、元々カルデラ湖であった地域に陥没や亀裂といった地盤変状が集中していることがわかってきた²⁾。本研究では、元カルデラ湖である陥没箇所にて実施したボーリング調査において採取した乱れの少ない試料に対して、繰返しねじりせん断試験による湖成粘性土の動的変形特性について考察した。

2. 試験概要

乱れの少ない試料は、阿蘇市狩尾地区の県道 175 号線沿いの陥没箇所よりサンプリングされたものである。図 1 に当該地のボーリング柱状図を示す。本報では、G.L-26m 付近、G.L-33m 付近のシルト質粘土のサンプリング試料に対して、繰返しねじりせん断試験を行った。表 1 に物理特性、図 2 に粒径加積曲線を示す。どちらの試料も細粒分含有率 F_c が 95% 以上、自然含水比は 200% と高く、液性限界を上回っており、塑性指数は N.P. であった。また、湿潤密度は約 1.25g/cm^3 、間隙比が約 4.8 と非常に軟弱な粘性土の特徴を示すがせん断波速度は 140m/s と、採取試料のトリミング時の特徴として硬い、しっかりとした粘性土であった。

供試体は、トリミング法により、高さ 7cm、外径 7cm、内径 3cm の中空円筒形に成形した。そして、二酸化炭素と脱気水を用いて B 値 0.95 以上になるように飽和させ、原位置における平均有効主応力 (G.L-26m が拘束圧 $\sigma'_c=80\text{kN/m}^2$ 、G.L-33m が $\sigma'_c=95\text{kN/m}^2$) で等方圧密を行った。なお圧密時間は 3t 法により決定した。その後、広いひずみ範囲での動的変形特性が必要である為、繰返し载荷をせん断ひずみ $\gamma=10^{-5}\sim 10^{-2}$ まで段階的に荷重を大きくし、一段階につき非排水状態で繰返し回数 11 波载荷した。次の段階に移る時は一旦排水状態にし、過剰間隙水圧を消散させた。その後、再び非排水状態で载荷した。実験結果は各段階の繰返し回数 10 波目における応力ひずみ関係の履歴ループから等価せん断剛性率 G 、履歴減衰率 h を求めた。なお、载荷方法は応力制御で载荷速度を 0.1Hz とした。

3. 試験結果

各供試体の等価せん断剛性率 G 、履歴減衰率 h と片振幅せん断ひずみ γ に対してプロットしたものを図 2 に示す。 G は各供試体ともキーワード 湖成粘性土、動的変形特性、繰返しねじりせん断試験、せん断剛性、履歴減衰率

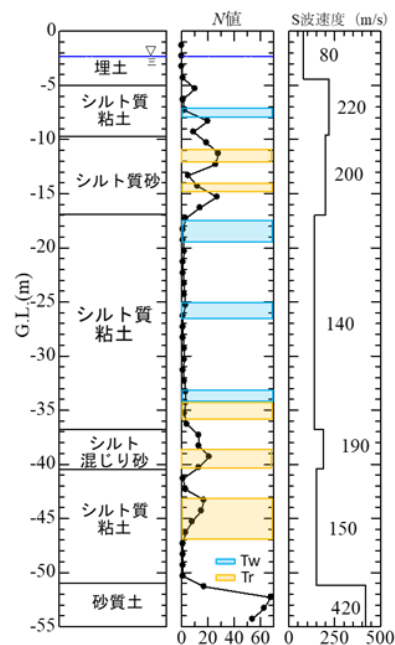


図 1 土質柱状図, N 値, V_s の深度分布図

表 1 物理特性

深度 (m)	自然含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm^3)	土粒子密度 (g/cm^3)	乾燥密度 (g/cm^3)	間隙比	細粒分含有率 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数
G.L.-26m	190.8	1.260	2.505	0.433	4.78	96.0	183.3	N.P.	N.P.
G.L.-33m	202.5	1.245	2.409	0.411	4.85	99.4	174.6	N.P.	N.P.

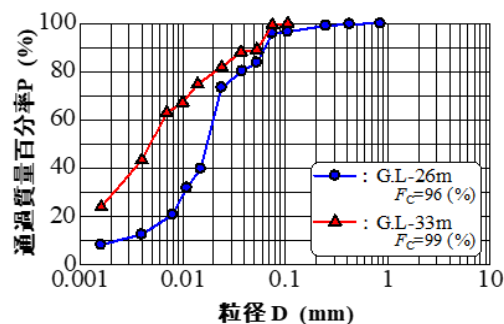


図 2 粒径加積曲線

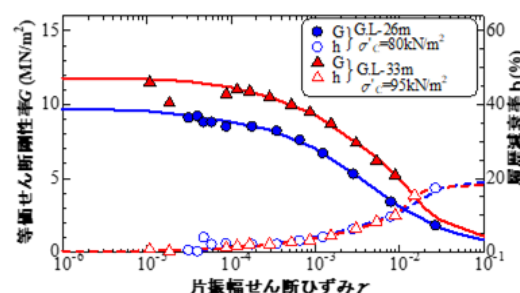


図 3 湖成粘性土の G , h - γ の関

連絡先 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 TEL 049-296-2911

に $\gamma = 10^{-4}$ 程度から低下し始めた。また、 σ_c が大きい G.L-33m の湖成粘性土の方が G は大きくなり、この湖成粘性土層は拘束圧に依存して等価せん断剛性が変化することがわかる。履歴減衰率 h については $\gamma = 10^{-4}$ 以下の時はほぼ減衰性能を有しておらず、 $\gamma = 10^{-4}$ 程度から γ の増加に伴い h は大きくなっており、 G のような拘束圧の影響は顕著に見られない。図 3 から片振幅せん断ひずみ $\gamma = 10^{-6}$ の時の等価せん断剛性率 G を読み取り、初期せん断剛性 G_0 とした。G.L-26m が 9.7MN/m^2 、G.L-33m が 11.7MN/m^2 となった。 G_0 は間隙比と拘束圧との間には一般に次の関係式があり、国生らの不攪乱試料に対する沖積粘性土の経験式³⁾を以下に示す。

$$G = A \cdot F(e) \cdot (\sigma_c)^n \quad (\text{※} A=141, F(e)=(7.32-e)^2/(1+e), n=0.6) \cdots \text{式}(1)$$

この式より求めた G_0 は G.L-26m が 2.1MN/m^2 、G.L-33m が 2.3MN/m^2 となり実験値の G_0 よりも小さい値を示し、当該地の湖成粘性土は沖積粘性土と比べてみても非常に初期剛性が大きい特徴がある。図 4 と図 5 は G を実験値の G_0 で正規化したせん断剛性比 G/G_0 、履歴減衰率 h と片振幅せん断ひずみ γ との関係を既往の研究結果⁴⁾⁵⁾と比較したものである。 G/G_0 について一般的な粘性土と同様に、湖成粘性土では $\gamma = 10^{-4}$ 程度から低下傾向が見られるが、さらに γ が大きくなると、湖成粘性土の曲線は一般的な粘性土より G/G_0 の低下が少なく、泥炭の挙動に近い値となった。 $\gamma = 10^{-2}$ に達した際、一般的な粘性土では最小で 0.18 となったが、湖成粘性土では 0.3~0.4 程度であった。このことから一般的な粘性土に対して、せん断履歴を受けた際のせん断剛性は大きいがいよりせん断履歴を受けるとせん断剛性の低下が著しい特徴がある。 h についても同様な特徴であり、 $\gamma = 10^{-2}$ 時には湖成粘性土は急激に上がり、砂質土に近い履歴減衰を示す結果となった。

4. PS 検層と室内実験の比較

PS 検層の試験結果より G.L-26m、G.L-33m 付近の原位置におけるせん断波速度 V_s が 140m/s であった。そのデータから $G_{OF} (= \rho V_s^2)$ を求め、繰返しねじりせん断試験結果 G_{OL} と比較し、既往の研究結果⁶⁾と重ねたものが図 6 である。これより、湖成粘性土において G_{OL} が G_{OF} より 0.5 倍小さい値を示しており、軟らかい粘性土とは異なる傾向であり、洪積粘性土より G_{OF} は小さく、 G_{OL}/G_{OF} については類似していた。この原因として、サンプリングや運搬時の影響に加えて湖成粘性土には珪素や火山灰を含んでいることや被圧していることなども影響していると考えられる。

5. まとめ

湖成粘性土のせん断剛性は、拘束圧に依存し、拘束圧が大きいほど大きい値を示す。密度や物理特性からは軟弱な粘性土の特徴があつたが、沖積粘性土よりも初期剛性は数倍程大きく、初期剛性は非常に硬い特殊な粘性土であることがわかった。また、大きなせん断履歴を受けると砂質土のような変形特性となる。

【謝辞】 本研究は JSPS 科研費基盤研究(B)17H03306 の補助を受け、阿蘇市にもご協力をいただいている。また本実験を行うにあたり、勝山孝太氏(元東京電機大学学生)の協力と中島敬祐氏(元基礎地盤コンサルタンツ)に供試体整形などの技術指導を頂いた。記して謝意を表します。

【参考文献】 1)安田ら：熊本地震による地盤関係の被害と過去の被害との比較，日本地震工学会第 12 回年次大会梗概集，O1-5，2016。 2)安田ら：熊本地震により阿蘇カルデラで発生したグラブの被災メカニズム，第 15 回日本地震工学シンポジウム，OS7-01-4，2018。 3) Kokusho ら：Dynamic properties of soft clay wide strain range, *Soil and Foundations*, Vol.22, pp.1-18, 1982。 4)安田ら：動的変形特性のひずみ依存と粒径の関係，土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集。 5)能登ら：泥炭の動的変形特性に関する実験研究，土木試験所月報，No.393, pp.13-15, 1986。 6)吉田：地盤の地震応答解析，第 6 章室内試験とその整理方法，6.5 試料採取時や試験時の乱れ，pp.65, 2010。

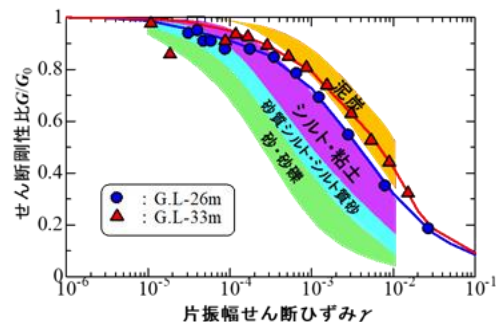


図 4 G/G_0 - γ において既往の研究結果と比較

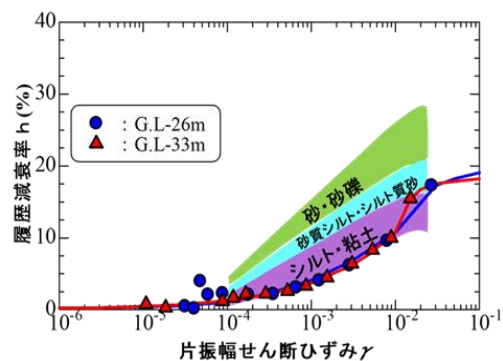


図 5 h - γ において既往の研究結果と比較

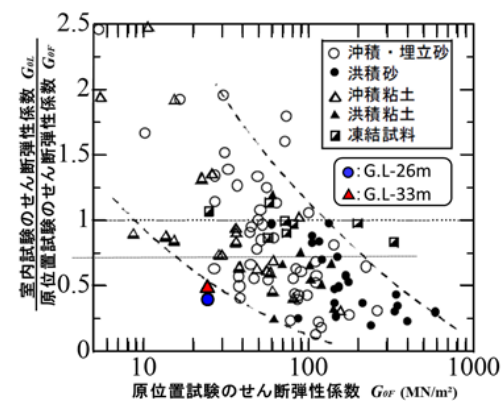


図 6 原位置試験と室内試験による G_0 の比較