

ベンダーエレメント試験によるバイカル粘土のせん断剛性率

山口大学大学院	学生会員	○宮北志野
山口大学大学院	正会員	兵動正幸
清水建設技術研究所	正会員	西尾伸也
北見工業大学	正会員	山下 聡
東京大学大学院	正会員	山田 卓

1. はじめに せん断波速度や初期せん断剛性率は、室内および原位置いずれにおいても計測可能な物性であり、動的な情報を与えるだけでなく、他の土質定数との相関を得る上でも重要なパラメータであると考えられる。山田ら¹⁾は、これまで種々の塑性を有する粘土や砂粘土混合土についての動的変形に関する一連の実験を行ってきた。また、北見工大、清水建設および筆者らのグループは、メタンハイドレートを含む地盤の調査のため、ロシアのバイカル湖において湖底表層から土試料を採取し、一連の調査実験を行っている²⁾。本研究では、その中の一つのコア試料について、三軸セル内でベンダーエレメント試験 (BE 試験) を行い、せん断波速度 V_s およびせん断剛性率 G を求め、山田らの行ったわが国の海成粘土のものと比較し考察を行ったものである。

2. 試料採取現場の概況および試料 バイカル湖は、中央シベリアの南西部に位置し、世界の淡水の 20% を蓄える湖である。最大透明度は 40m を超えるとも言われ、その大きさは、長さ 639km、幅は最大で 80km、平均 48km、湖面積は 4 万 6000km² で琵琶湖の約 64 倍、深さは最大 1643m、平均で 730m というまるで海のような淡水湖である。今回用いた湖成粘土は、このバイカル湖で 2005 年に採取した不攪乱試料である。船上より、長さ 5m、総重量約 700kg の重力式コアサンプラーを船上からウインチでつないで湖底に落下させて試料の採取を行った。サンプリングは、バイカル湖でも表層型のメタンハイドレートが存在する水深 1000m 超の泥火山において、エコーサウンダーにより水やガスの湧出により発生するとされるガスフレアを確認し、その付近で行った。いくつかのコアでメタンハイドレートが確認されたが、今回用いたコア試料は、メタンハイドレートが含まれないものを持ち帰ったものである。しかしながら、メタンハイドレートが存在する付近での試料であり、メタンハイドレート分解によるガスの移動など少なからずその影響を受けているものと推察される。湖底から深度方向に 3m までのコア試料より、100cm 毎に供試体を作成し BE 試験を行った。一方、海成粘土は、日本の港湾で採取した粘土¹⁾ を攪拌し、予圧密セルで 3t 法により再構成したものである。採取地点はそれぞれ、Ariake A: 熊本県緑川河口、Ariake C: 佐賀県六角川河口、Itukaichi: 広島県五日市港、Onoda: 山口県小野田港である。各試料の物理的性質を表 1 に、バイカル粘土 (Baikal Clay) の粒径加積曲線を図 1 に示す。バイカル粘土は 3m の長さをもつ 1 本のコア試料であり、100, 200, 300 はそれぞれの湖底からの深さ (cm) を意味する。それらの土粒子比重 G_s は、海成粘土と比べ大きい値を示している。また細粒分含有率 FC 、粘土分含有率 PC および粒径加積曲線が示すように、有明、五日市に比べ PC が低い、塑性指数からは中塑性粘土とみなされることから、バイカル粘土は活性の高いスメクタイト成分をより多く含んでいるものと推察される。また、SEM による観察から珪藻遺骸も発見されたが、浅い部分にしか見られなかった。Baikal100 の比重が他より小さいのは、珪藻遺骸の影響かも知れないと思われる。また、供試体作成のため、試料をトリマーおよび直ナيفを用いて直径 50mm、高さ 100mm となるように整形した。その際、肉眼の観察において空隙が多く見られた。またその空隙は、試料の深さが増すほど多く見られた。これは泥火山における水やガスの湧出によるものと想像される。

表 1. 各試料の物理的性質

試料名	G_s	$FC(\%)$	$PC(\%)$	$w_L(\%)$	$w_p(\%)$	I_p
Ariake A	2.604	98.3	75.2	89.09	41.36	47.73
Ariake C	2.593	100.0	61.5	155.34	44.33	111.01
Itukaichi	2.691	98.6	77.0	109.59	34.54	75.05
Iwakuni	2.610	98.0	38.8	77.34	29.80	47.54
Onoda	2.601	84.5	37.5	84.04	35.70	48.34
Baikal 100	2.640	100.0	54.3	73.92	29.48	44.44
Baikal 200	2.748	100.0	35.3	83.40	33.38	50.03
Baikal 300	2.700	98.0	26.3	61.71	24.19	37.53

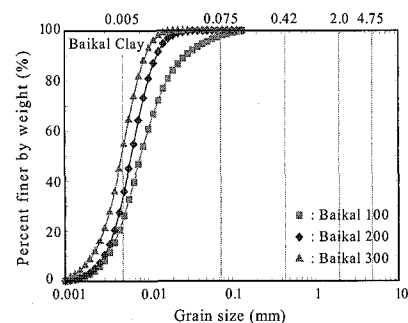


図 1. バイカル粘土の粒径加積曲線

(Baikal Clay) の粒径加積曲線を図 1 に示す。バイカル粘土は 3m の長さをもつ 1 本のコア試料であり、100, 200, 300 はそれぞれの湖底からの深さ (cm) を意味する。それらの土粒子比重 G_s は、海成粘土と比べ大きい値を示している。また細粒分含有率 FC 、粘土分含有率 PC および粒径加積曲線が示すように、有明、五日市に比べ PC が低い、塑性指数からは中塑性粘土とみなされることから、バイカル粘土は活性の高いスメクタイト成分をより多く含んでいるものと推察される。また、SEM による観察から珪藻遺骸も発見されたが、浅い部分にしか見られなかった。Baikal100 の比重が他より小さいのは、珪藻遺骸の影響かも知れないと思われる。また、供試体作成のため、試料をトリマーおよび直ナيفを用いて直径 50mm、高さ 100mm となるように整形した。その際、肉眼の観察において空隙が多く見られた。またその空隙は、試料の深さが増すほど多く見られた。これは泥火山における水やガスの湧出によるものと想像される。

3. 試験条件および結果の整理方法 BE 試験は、三軸試験機を用いて等方圧力状態で有効拘束圧 $\sigma'_c = 50, 100, 200 \text{ kPa}$ で行った。試料の圧密前に b 値検定を行ったところ、いずれも 0.96 以上を示し飽和状態と判断された。下部ペダスタルからの送信波として、正弦波で電圧：10V、周波数：2.5～30kHz を用いた。得られた送受信波電圧時刻歴より伝達時間 $\Delta t(\text{sec})$ を求め、せん断波速度 $V_s = L / \Delta t (\text{m/sec})$ およびせん断剛性率 $G = \rho_t \cdot V_s^2$ を算定した。ここで、 L ：ベンダーエレメント先端間の距離(m)、 ρ_t ：湿潤密度(kg/cm^3)である。

4. 実験結果と考察 図2は、三軸試験における等方圧密時の間隙比 e と有効拘束圧 σ'_c の関係を示す。バイカル粘土の等方応力载荷に対する e の変化は小野田粘土および岩国粘土等とほぼ同程度を示しており、他の粘土と同等の圧縮性を有していることを示している。図3は、有効拘束圧 $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$ における、BE 試験および中空ねじり繰返し単純せん断試験 (CTS 試験) より得られたせん断波速度 V_s と間隙比 e の関係を示す。バイカル粘土は、他の粘土に比べて V_s が高くなっており、これは深い湖底での長期間の堆積による年代効果によるものと考えられる。図4は、せん断剛性率 G と平均有効主応力 σ'_m の関係を示す。バイカル粘土の G は他の粘土よりもかなり高い値を示すが、その傾きは同程度となった。 G の拘束圧依存性は他の粘土とほぼ同程度で、 σ'_m と比例関係を示している。図5は、平均有効主応力 $\sigma'_m = 100 \text{ kPa}$ における、せん断剛性率 G と塑性指数 I_p の関係を示す。今回のコア試料の中にも塑性指数の違いが若干あるが、この関係より、他のデータ同様、 I_p が低い程 G は高くなる傾向が認められる。「港湾の施設および技術上の基準・同解説」において、善ら³⁾の提案した式を用いると $I_p \geq 30$ の粘性土の G は平均有効主応力 σ'_m が一定であれば I_p のみで推定できるとされている。図中の直線はこの式から求めた $\sigma'_m = 100 \text{ kPa}$ における G と I_p の関係を描いたものである。この式は、粘性土の G が I_p の低下に伴って直線的に増加することを示している。図のように、この式で与えられる G は、既存および今回のバイカル粘土の実験結果の下限に位置しており、 I_p のみで G を推定することは難しいことがうかがえる。図6は、平均有効主応力 $\sigma'_m = 100 \text{ kPa}$ における、せん断剛性率 G と間隙比 e の関係を示す。図中、Hardin-Black⁴⁾、澁谷ら⁵⁾の式による近似曲線を描いた。これらの式によれば海成粘土、バイカル粘土ともに比較的良く近似できることがわかる。一般的に土の G は拘束圧が等しければ、 e が小さいほど高くなることが知られている。バイカル粘土の場合も例外ではないが、同一の e においても他の粘土に比べ高い G の値を示している。

5. まとめ バイカル湖底粘土は、他の海成粘土と比べて、せん断波速度 V_s およびせん断剛性率 G が高い値を示す。供試体作成時に見られた空隙が強度になんらかの影響を及ぼしている可能性があり、今後さらに静的な室内試験を行うとともに、土粒子構造など観察などより詳細な調査を続けていく必要がある。

参考文献 1) 山田ら：“広範な粒度と塑性を有する土の動的変形特性”，土木学会論文，No.806/III-73, pp.155-168, 2005. 2) 西尾ら：“バイカル湖における表層型メタンハイドレート”，土木第61回年次学術講演会概要集，pp341-342, 2006. 3) 善ら：“地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究”，港湾技術研究所，Vol.26, No.1, 1987. 4) Hardin, B.O. and Black, W.L.: Closure to vibration of normally consolidated clay, *Proc. of ASCE*, Vol.95, SM6, pp.1531-1537, 1969. 5) Shibuya, S. Tanaka, H.: “Estimate of elastic shear modulus in holocene soil deposits”, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.4, pp.45-55, Dec.1996.

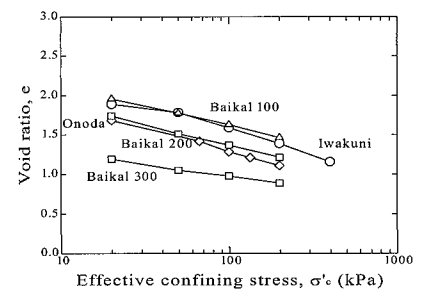


図2. 間隙比と有効拘束圧の関係

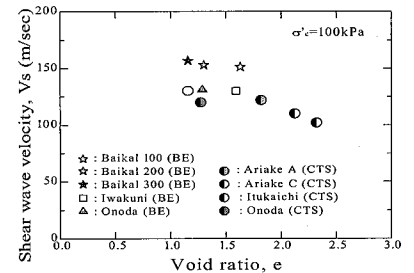


図3. せん断波速度とせん断剛性率の関係

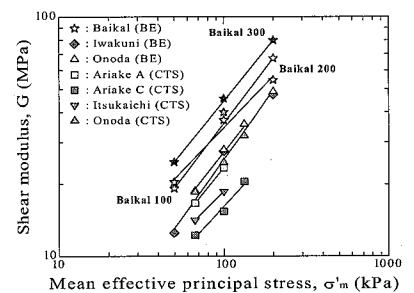


図4. せん断剛性率と平均有効主応力との関係

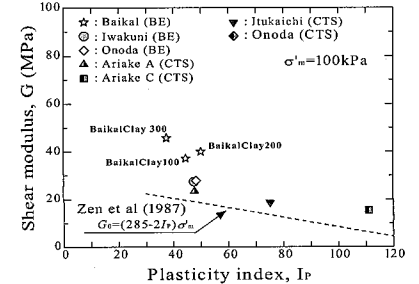


図5. せん断剛性率と塑性指数の関係

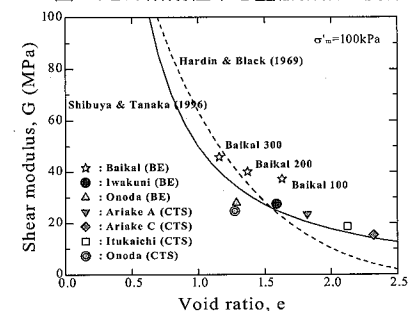


図6. せん断剛性率と間隙比の関係