

# すべり面の形成にともなう粘性土のせん断弾性係数の変化

秋田大学 学生会員 ○須田和哉 正会員 荻野俊寛  
清水建設 正会員 西尾伸也 秋田大学 正会員 高橋貴之 正会員 及川洋

## 1, はじめに

日本周辺海域にはメタンハイドレートが多く存在している。経済産業省が策定した「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」のフェーズ2の中で、商業的開発に向けた抽出を目的として2012年~2013年にかけて世界初となる第1回海洋産出試験が第二渥美半島海丘で実施された。海洋産出試験で採用された減圧法ではMH産出過程において海底地盤の有効応力が変化し、大きな地盤変形を誘発する可能性が否定できない。本研究ではMH産出に伴って生じる海底地すべりを念頭に、その危険予測における弾性波速度の有効性を検討するため、一面せん断試験機を用い、繰返し一面せん断中に実施した室内弾性波速度試験結果から、すべり面形成過程における粘性土のせん断弾性係数の変化について報告する。

## 2, 試験概要

実験に用いた試料は愛知県第二渥美海丘から採取した(AT1-GT1)コア試料(自然含水比約40%)のうち、三軸試験に用いた残滓試料を再構成したものである。再構成試料は残渣試料に含水比約60%になるよう蒸留水を加え、予圧密応力200kPaで、直径70mmの予圧密セル内で一次元圧密して作成した。これらの試料に対してベンダーエレメント(以下BEと略す)を組み込んだ一面せん断装置を用いて、圧密定圧繰返し一面せん断試験およびBE試験を実施した。実施した試験条件を表-1に示す。供試体は圧密応力300kPaおよび500kPaで段階的に圧密し、各段階で3t法によって圧密を打ち切った後、BE試験によってS波速度を測定した。500kPaで圧密を打ち切った後、供試体にせん断面を形成するため、定圧条件で繰返しせん断を行った。せん断は片振幅せん断変位5mmの両振りとし、せん断速度はピーク強度が発現する2サイクル目までは0.02mm/min、それ以降は0.04mm/minである。累積せん断変位が150mmから200mm程度までせん断を行った。その後、再度BE試験を実施し、せん断面形成前後のせん断弾性係数Gを比較した。なお、繰返しせん断は打ち切り時の残留せん断応力を極力小さくするよう、打ち切り直前に片振幅せん断変位を1mmあるいは0.2mmと減少させており、最終的に送受信BEがほぼせん断前の位置に復帰した状態で打ち切った。BEの寸法は幅12mm×高さ3.4mm×厚さ0.5mmであり、BEの曲げ振動方向が繰返しせん断方向と直交するように載荷版および底板に組み込まれている(図-1)。送信波は一波長のサイン波であり、周波数はS波の場合、20kHzから50kHz、P波の場合、100kHzから150kHzである。BE試験によって得られるせん断弾性係数Gは次式で求められる

$$G = \rho_s (L/\Delta t)^2 = \rho_s V_s^2 \quad (1)$$

ここに、 $\rho_s$ は湿潤密度、 $V_s$ はS波速度、 $L$ はBEの先端間の距離、 $\Delta t$ はS波の伝播時間を表す。

## 3, 試験結果及び考察

図-2は代表的な繰返し一面せん断の結果を示している。せん断応力 $\tau$ は累積せん断変位 $d=10$ mm付近で最大値 $\tau=356$ kPaを示しているが、その後残留状態にかけて $\tau$ の低下はおよそ4.5%程度と小さい。ピーク時および残留状態における $\tau$ から $\arctan(\tau/\sigma_v)$ を求めると、それぞれ $35.4^\circ$ および $34.2^\circ$ であり、ピーク時の値は他機関で実施された試験の $\phi_d$ の値<sup>1)</sup>とほぼ一致する。供試体の間隙比は約0.3(供試体高さにして約3mm)減少している。せん断後にはせん断箱のすき間から試料の漏出が確認されたため、これはせん断による負のダイレイタンスと試料の漏出によるものと考えられる。図-2中には漏出した試料の質量から逆算したせん断前の間隙比も示しているが、その差は約0.03であり、全体の間隙比変化の約10%程度である。

図-3は代表的な室内弾性波試験の送受信波を示している。受信波は比較的明瞭なピークを示し、波の到達時刻を容易に読み取ることができる。波の立ち上がり点から $\Delta t$ を求めて速度を計算すると、 $V_s$ はせん断面の形成によって供試体の一部の剛性が低下していると考えられるにも関わらず、せん断前で $V_s=291$ m/s、せん断後では $V_s=434$ m/s

表-1 実験条件

試験名	試料	せん断前の供試体高さ(mm)	圧密応力(kPa)	せん断速度(mm/min)	片振幅せん断変位(mm)	備考
Test-1	再構成 AT1-GT1	30.74	300, 500	0.02~0.04	5	累積せん断変位150mmに到達後、残留せん断応力の影響を取り除くため
Test-2		23.89				
Test-3		18.43				

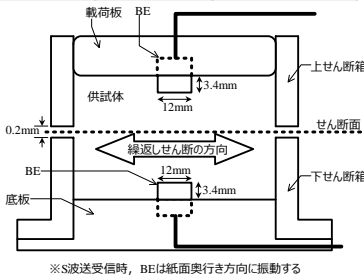


図-1 せん断箱とBEのレイアウト

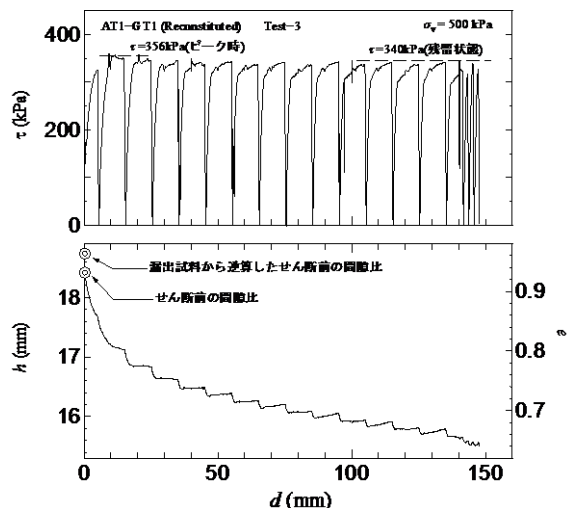


図-2 繰返し一面せん断試験結果

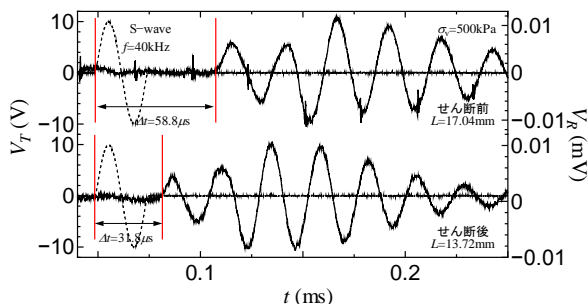


図-3 室内弾性波試験結果(Test-3, S波)

となり、大きく増加している。図-4は繰返しせん断中に実施した室内弾性波試験の送受信波形を示している。受信波形はせん断初期から大きく変化し、ピーク点(図中矢印)が左側へ移動していることから、 $\Delta t$ はせん断中一貫して減少傾向を示していることがわかる。繰返しせん断中の $G$ も同様に一貫して増加傾向を示し、せん断終了時ではおよそ2倍程度となっている(図-5)。

土の $G$ は間隙比と応力の関数として表されることが知られている<sup>2),3)</sup>。本実験では図-2に示されるように供試体はいずれも負のダイレイタンシーによってせん断中間隙比が減少しているため、これが $G$ を増加させる要因となり得る。Shibuya & Tanaka<sup>4)</sup>、Shibuya et al.<sup>5)</sup>は $K_0$ 状態の正規圧密粘土の $G$ を表す実験式として式(2)および式(3)を提案している。

$$G = 5000 e^{-1.5} \sigma_v^{0.5} \quad (2)$$

$$G = 24000 (1 + e)^{-2.4} \sigma_v^{0.5} \quad (3)$$

ここに、 $G$ および $\sigma_v$ の単位はkPaである。図-6は繰返しせん断中の間隙比と $G$ の関係を示しており、図中に示す曲線は $\sigma_v=500\text{kPa}$ として式(2)および式(3)から計算した値である。Test-1を除けば、せん断前のAT1-GT1の $G$ はこれらの実験式とおおよそ一致しているが、せん断中の $G$ は実験式よりも大きな値を示しており、せん断中の $G$ の増加が式(2)および式(3)の間隙比減少に対する $G$ の増分よりも大きいことがわかる。

一面せん断試験のようなせん断応力载荷型試験ではせん断応力の载荷に伴って主応力軸が回転し、通常、測定される応力は水平面上の直応力およびせん断応力のみであるため主応力の大きさや方向は未知であるが、小田・小西<sup>6)</sup>は最大主応力軸の方向に関して実験的に以下の式を導いている。

$$\alpha \sigma_v = \kappa \tan \theta \quad (4)$$

ここに、 $\theta$ は最大主応力軸と鉛直軸のなす角、 $\kappa$ は実験条件によらない材料定数で、 $\kappa=0.6$ 程度の値をとる。式(4)を用いれば、一面せん断試験中のモールの応力円を作図することができ、最大および最小主応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$\sigma_1 = (\tau^2 + \kappa \sigma_v^2)^{0.5} / (\kappa \sigma_v), \quad \sigma_3 = (1 - \kappa) \sigma_v \quad (5)$$

図-7は式(5)から求めたせん断中の $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ および平均主応力 $p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$ を示している。 $\sigma_3$ は一定値となる一方、せん断による $\tau$ の増加に伴って $\sigma_1$ は大きく増加している。図-7の残留状態( $\tau=335\text{kPa}$ )において、 $p=400\sim 455\text{kPa}$ であり、これはせん断前に比べ、約1.4倍となっている。前述のように、土の $G$ は圧密応力(あるいは拘束圧)に強く依存することから、せん断に伴う $p$ の増加が図-7における $G$ の大きな増加の一要因になっていると考えられる。一連の試験では試験装置に取り付けられた水平荷重計に荷重がほぼ作用しない状態(供試体の平均的なせん断力 $\approx 0$ )でせん断終了時の $G$ を測定しているが、せん断終了時の $G$ の値はせん断中と同様の高い状態を維持し続けていることから(図-6)、内部の不均一なせん断応力分布によって、供試体になおせん断応力が残留しているものと考えられる。

#### 4. まとめ

定圧繰返し一面せん断試験によってせん断面を挟在した正規圧密粘性土供試体の $G$ を評価した。せん断面形成によってせん断面の剛性は低下するにもかかわらず、供試体の $G$ は増加した。 $G$ を増加させる主な要因は、1. 負のダイレイタンシーによる間隙比の減少、2. せん断に伴う主応力の増加、であると論じた。結果として $G$ の変化は両者の要因の重ね合わせによって決定するものと考えられる。したがってせん断面を挟在する粘性土の剛性は、これらの要因を考慮する必要があるが、今後、それぞれの要因がおよぼす影響の大きさを評価する必要がある。

謝辞：本研究は経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業」に係るJOGMECからの委託研究の一部として行ったものである。ここに記して、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムに謝意を表す。

#### 【参考文献】

- 1) 高橋俊博, 浅見匡俊, 三田地利之, 西尾伸也: 第二渥美海丘から採取された粘性土の非排水せん断強さの評価と過圧密の算定, 第6回メタンハイドレート総合シンポジウム, pp. 115-117, 2014.
- 2) Hardin, B.O. and Richarts, Jr., F. E.: Elastic Wave Velocities in Granular Soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp. 33-65, 1963.
- 3) Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Lo Presti, D.C.F.: Remarks of the stiffness at small strains of six Italian clays. *Pre failure Deformation of Geomaterials*, Vol.2, pp.817-836, 1994.
- 4) Shibuya S. and Tanaka H.: Estimate of elastic shear modulus in Holocene soil deposits, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 4, pp. 44-55, 1996.
- 5) Shibuya S., Hwang, S. C. and Mitachi T.: Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement, *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 593-601, 1997.
- 6) 小田匡寛, 小西純一: 粒状体のせん断における主応力軸の方向について—理論的考察—, 第9回土質工学研究発表会講演集, pp. 183-186, 1974.

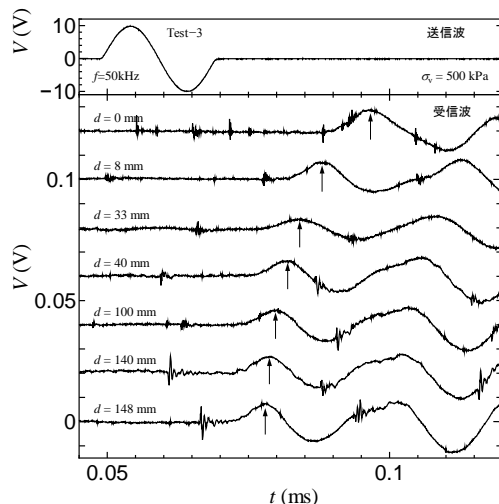


図-4 繰返し一面せん断中の受信波形の変化

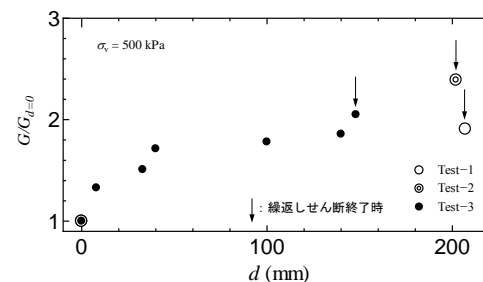


図-5 繰返し一面せん断前後の $G$ の変化

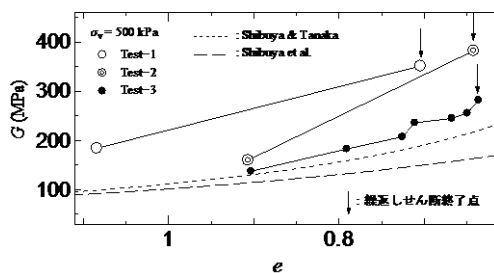


図-6 繰返しせん断中の $G$ - $e$ の関係

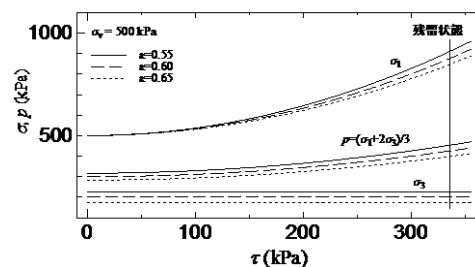


図-7 式(5)によるせん断中の応力変化