

2種類の NSF 粘土のせん断弾性係数の異方性

Anisotropy of shear modulus on two kinds of NSF clays.

北見工業大学工学部 ○正 員 堀 智仁 (Tomohito Hori)
 北見工業大学工学部 正 員 山下 聡 (Satoshi Yamashita)
 北見工業大学工学部 フェロー 鈴木 輝之 (Teruyuki Suzuki)

1. まえがき

NSF 粘土は岡山県で産出される市販の粉末粘土である。NSF は New Snow Fine の略語であり、粉末はその名の通り白色をしている。一般的には陶器を作る際や、紙の白色度を増す場合、さらには化粧品に使用されている粘土である。

粘性土を用いて基礎的な研究を行う場合には、均質な供試体が数多く必要になるため、相当数の同一試料を入手することは現実的に困難である。NSF 粘土のような市販されている粉末粘土の場合、均質な供試体を数多く作製することが可能であるため、同粘土は多くの研究者に試験用の試料として採用されている。著者らも、過去の実験結果との比較検討ができるため、NSF 粘土を試験の試料として採用し、試験を行ってきた。しかしながら、過去に購入した NSF 粘土と昨年購入した NSF 粘土は性質が異なることがわかった。本稿では、購入した年が異なる2種類の NSF 粘土に対して、供試体内を伝播する S 波速度を測定することが可能なベンダーエレメント試験を行い、3方向のせん断波速度を測定し、せん断弾性係数の異方性を比較している。また、ベンダーエレメント試験は結線方法を変えるだけで P 波速度を測定することが可能であるため¹⁾、P 波速度の異方性を調べ、さらに、S 波と P 波速度からヤング率を算出し繰返し三軸試験の結果と比較した。

表-1 試料の物理的性質

試料名	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_P (%)	I_p
NSF-A	2.766	53.66	30.94	22.72
NSF-B	2.729	45.41	31.35	14.07

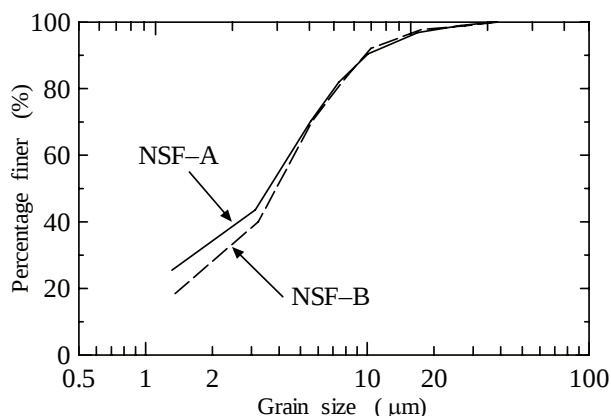


図-1 粒度分布

2. 試料と試験の概要

2.1 試料

試験に用いた NSF 粘土は約10年前に購入したものと、昨年購入したものである。本稿では、それぞれを NSF-A、NSF-B と呼ぶことにする。試料の物理的性質を表-1、粒度分布を図-1に示した。

供試体の作製方法は、液性限界の2倍程度になるよう、蒸留水を加えてスラリー状にし、真空に近い状態で1時間攪拌したのち、24時間放置して再び1時間攪拌してから大型予圧密セルにて、鉛直応力 $\sigma_v=150\text{kPa}$ で10日間予圧密を行った。予圧密後、供試体軸方向が堆積面に対して鉛直になるように切り出し、供試体を作製した。供試体の寸法は、直径70mm、高さ150mmである。

2.2 Bender Element 試験

試験に用いたベンダーエレメントは、圧電セラミックスの分極の向きを変えて貼り合わせた2種類である。それぞれを表-2に示した。ベンダーエレメントは表-2に示すように、Type-1、Type-2ともに直列または並列に結線することによって、S 波および P 波を発生させることが可能である。

表-2 試験に用いたベンダーエレメント

結線方法	BE Type	
	Type-1	Type-2
直列	S波	P波
並列	P波	S波

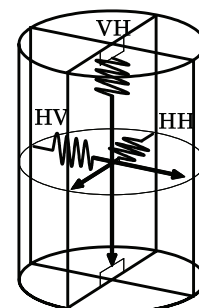


図-2 せん断波の伝播・振動方向

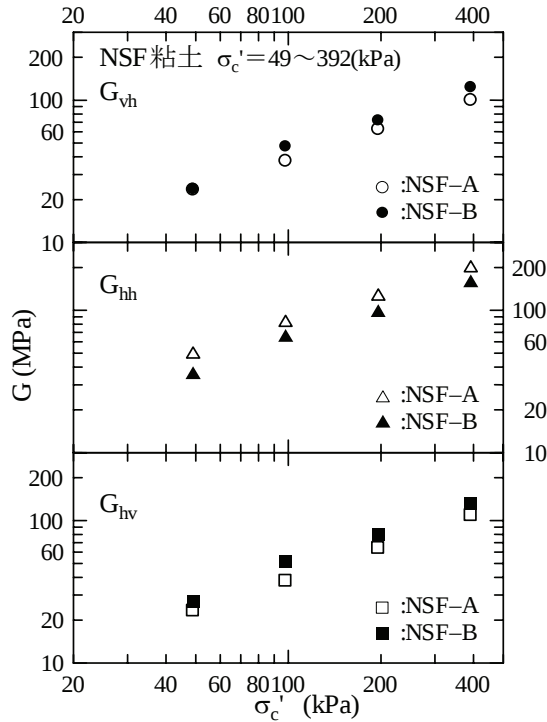


図-3 NSF-A と NSF-B のせん断弾性係数の比較

せん断波速度は、図-2に示した3対のベンダーエレメントを用いて3種類のせん断波速度 (V_{vh} , V_{hv} , V_{hh}) を測定した。1対のベンダーエレメントは、キャップとペデスタルに埋め込まれており、他の2対については、30kPaの負圧を与えた状態で供試体側面に取り付けた²⁾。送信波はsin波を用いて、周波数 $f=5, 10, 15, 20\text{kHz}$ で試験を行い、得られた結果を平均してせん断弾性係数を求めた。送信電圧は電圧増幅器を使用して送信電圧を10V から100V に増幅して試験を行っている。せん断波の伝播時間は、送信波および受信波の波の立ち上がり時間を時間差とする start-to-start によって求めた。

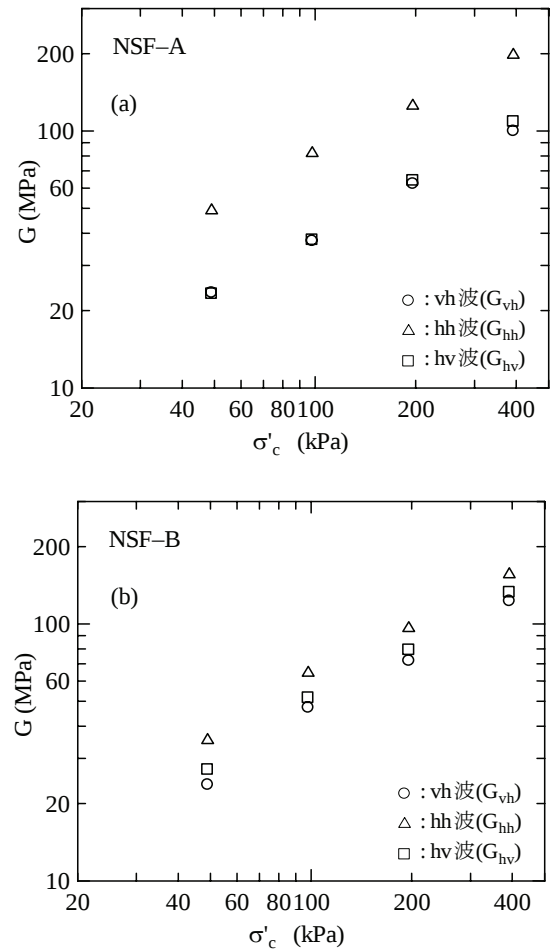
P波速度の測定は、高い周波数ほど受信波の振幅が大きいため、周波数 $f=40, 60, 80, 100, 120\text{kHz}$ で試験を行い、S波と同様に、得られた結果を平均してP波速度を求めた。

ベンダーエレメント試験は有効拘束圧 $\sigma'_c=49, 98, 196, 392\text{kPa}$ の各応力状態で試験を行い、拘束圧を上げた後の圧密時間は24時間とした。

3. せん断弾性係数

ベンダーエレメント試験によって3方向のせん断波速度を測定し、求めたせん断弾性係数を比較したものを図-3に示した。図-3より、NSF-A および NSF-B の結果を比較すると、 G_{vh} (○, ●) および G_{hv} (□, ■) は NSF-B の方がやや高い。それに対して、 G_{hh} (△, ▲) では NSF-A の方が高い結果であった。しかしながら、NSF-A と NSF-B の結果に大きな差はないと言える。

図-4は有効拘束圧とせん断弾性係数の関係を示したものである。図-4(a)に示した NSF-A の結果では、 G_{vh} と G_{hv} はほぼ等しいのに対して、 G_{hh} は他の結果に比べ高くなって


 図-4 有効拘束圧とせん断弾性係数の関係
(a)NSF-A (b)NSF-B

いる。一方、NSF-Bの結果を示した図-4(b)では、 G_{vh} と G_{hv} は NSF-A と同様にほぼ等しい。また、 G_{hh} については、 G_{vh} と G_{hv} に比べ高いという傾向は同じであるが、NSF-A ほど高くはない。

図-5は G_{vh} と G_{hv} および G_{hh} を比較したものである。横軸は G_{vh} 、縦軸は G_{hv} および G_{hh} である。NSF-A の結果を示した図-5(a)では、 G_{hh} が G_{vh} および G_{hv} に比べ約2倍高くなっている。それに対して、図-5(b)に示した NSF-B は、 G_{vh} に比べ G_{hh} は3割高く、NSF-A に比べて異方性が低いことがわかる。

図-6は有効拘束圧とせん断弾性係数の異方性の関係を示したものである。図より、異方性の程度にかかわらず、両試料とも拘束圧の増加とともに異方性が低下傾向にある。これは、予圧密によって一定方向に配列した粘土粒子が等方圧密することによって等方的な構造に変化したため、異方性が低下したと考えられる。

以上の結果から、同じ鉛直応力で予圧密した試料でも、購入した年の違いによって、異方性が著しく異なることが明らかになった。

4. 各種指数の算出

NSF-A および B 試料の性質の違いを比較するために、液性限界、塑性限界、塑性指数および含水比から算出可能な指数を求め、それぞれを比較した。算出した指数は、コンシステンシー指数、液性指数そして活性度である。それぞれの指数は式(1)～(3)より求めた³⁾。

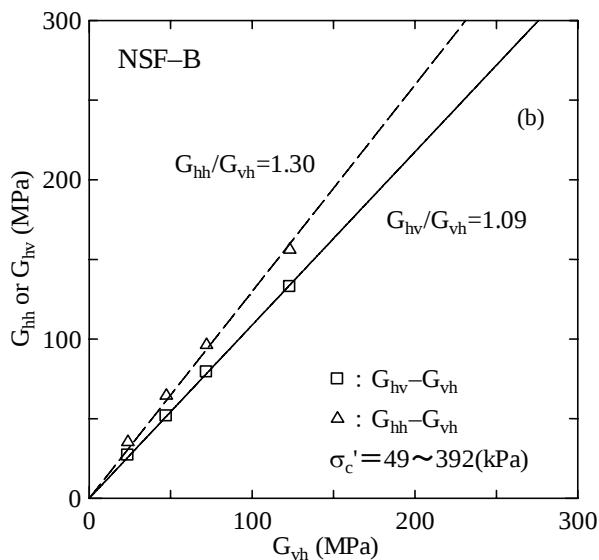
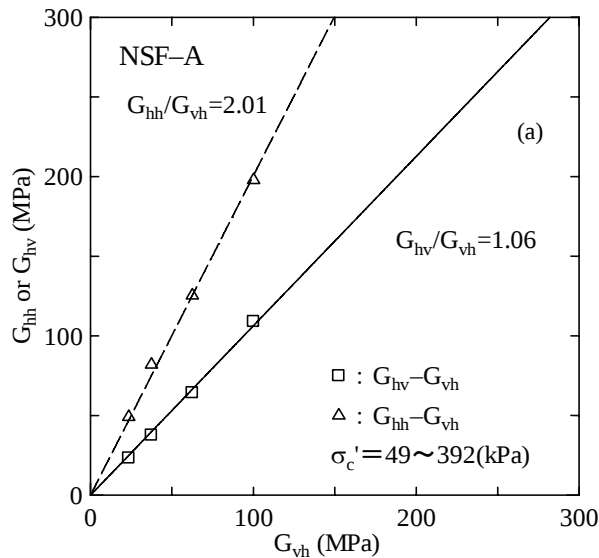


図-5 G_{vh} と G_{hv} および G_{hh} の比較
(a) NSF-A (b) NSF-B

コンシステンシー指数 I_c

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} \quad \dots (1)$$

液性指数 I_L

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} \quad \dots (2)$$

活性度 A

$$A = \frac{I_p}{2mm \text{以下の粘土の含有量}(\%)} \quad \dots (3)$$

試験前および試験後の含水比と算出した各種指数を表-3に示した。コンシステンシー指数は、細粒土の相対的な硬さを示すもので、砂や礫のような粗粒土の相対密度に相当するものである。また、液性指数は相対的な硬軟の度合いを示す量であり、相対含水比とも呼ぶ。含水比が塑性限界 w_p に近いほど土は安定であり、液性限界 w_L に近いほど不安定であるため、 I_c においては1, I_L では0が安定である。表より、NSF-A はのコンシステンシー指数は試験前、試験後ともに値は大きく、さらに、液性指数は小さいため、安定であると言える。一方、NSF-B に関しては、試験前のコンシステンシー指数は低く、液性指数は高いため、非常に不安定である。これは、試験前の含水比が液性限界より高いことに起因している。

活性度は、細粒土の活性を定量的に示す指標で、土に含まれる粘土鉱物の保水性や表面活性を反映するものである。

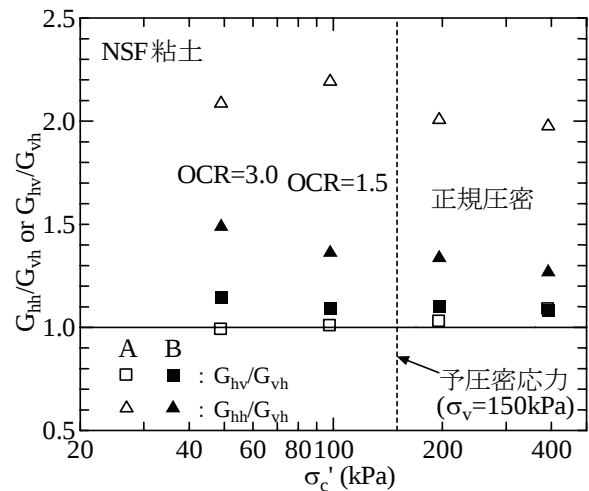


図-6 拘束圧とせん断弾性係数の異方性の関係

表-3 算出した各種指数

試料名	含水比 w		コンシステンシー指数 I_c		液性指数 I_L		活性度 A
	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後	
NSF-A	44.21	33.54	0.42	0.89	0.58	0.11	0.67
NSF-B	47.07	36.33	-0.12	0.65	1.12	0.35	0.50

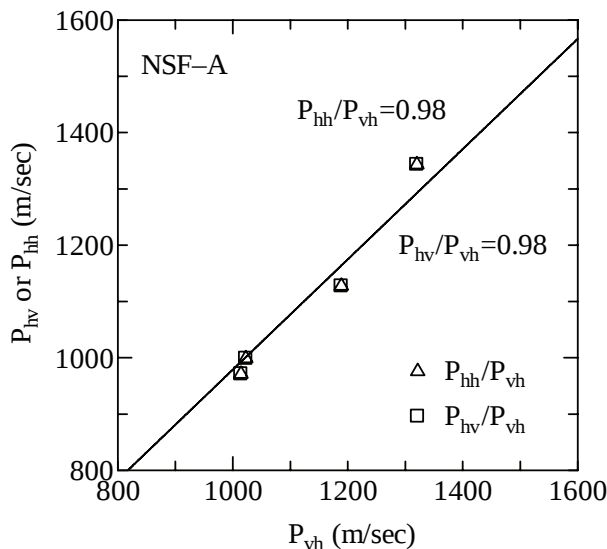


図-7 鉛直方向と水平方向の P 波速度の比較

カオリナイトを主成分とする $A < 0.75$ の不活性粘土, イライトを主成分とする $0.75 < A < 1.25$ の普通の活性粘土, および $1.25 < A$ の活性粘土に分けることができる. 本研究で用いた, NSF 試料はどちらもカオリナイトを主成分とする不活性粘土であり, 保水性の小さい試料であると言える.

以上のことから, 同じ NSF 粘土でも, 約10年前と昨年購入した粘土では, 採取する場所や深さが異なるため, 性質に違いがみられたと考えられる. また, NSF 粘土は, 用途が試験用ではないため, 豊浦珪砂のように厳密な規格に従って品質を管理していない. そのような理由により, 購入した年の違いで粘土の性質が異なると考えられる.

5. P 波速度の異方性およびヤング率の比較

ベンダーエレメント試験によって3方向の P 波速度を測定した結果を図-7に示した. P_{vh} , P_{hv} , P_{hh} は, それぞれ vh 波, hv 波, hh 波を測定するベンダーエレメントを用いて求めた P 波速度を示している. 図より, 鉛直方向の P 波速度 P_{vh} と水平2方向の P 波速度 P_{hv} および P_{hh} はほぼ等しいことから P 波速度には異方性がないことがわかる. その理由として, 試料の密度が鉛直方向と水平方向で均一であったためであると考えられる. この結果から, せん断弾性係数の異方性が高い試料であっても, P 波速度に異方性はないということが明らかになった.

図-8は, ベンダーエレメント試験の vh 波から求めた S 波速度と, 鉛直方向に伝播する P 波速度から式(4)によって算出したヤング率 E_{BE} と, 片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA} = 10^{-5}$ 程度の繰返し载荷を与え, 応力-ひずみ関係から求めたヤング率 E_{CTX} を比較したものである. 図より, 繰返し三軸試験から求めたヤング率に比べ, ベンダーエレメント試験から求めたヤング率の方が高いことがわかる. 豊浦珪砂で同様の試験を行った結果と同様の傾向を示していることから⁴⁾, ベンダーエレメント試験のような波動試験で求めたヤング率は载荷試験で求めたヤング率より高くなると考えられる. その原因の一つとして, 波動試験から求まるヤング率は 10^{-6} 以下のひずみレベルの値であるのに対し, 繰返し三軸試験では, 10^{-5} のひずみからヤング率を求めているため, 比較してい

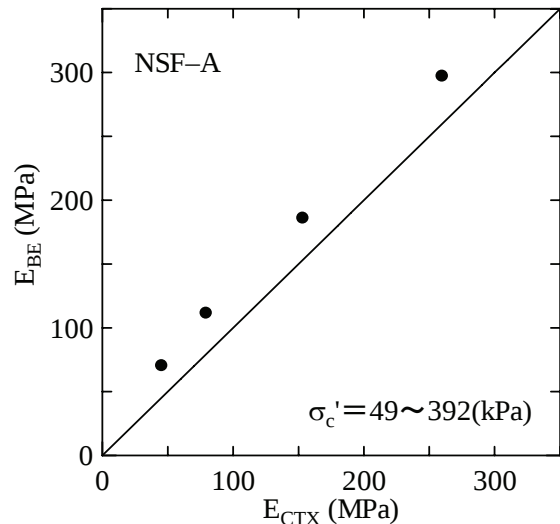


図-8 BE 試験と繰返し三軸試験で求めたヤング率

るひずみレベルが異なることが考えられる.

$$E_{BE} = \rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad \dots (4)$$

6. 結 論

- (1) 同じ圧密圧力で予圧密した試料でも, 購入した年の違いによって, せん断弾性係数の異方性は著しく異なることがわかった.
- (2) コンシステンシー指数や液性指数から, NSF-A と NSF-B は性質が異なることが明らかになった. その理由として, NSF 粘土は試験用途の粘土ではないため, 厳密な品質管理下におかれていないことが考えられる.
- (3) せん断弾性係数の異方性が高い試料に対して, P 波速度の異方性を調べた結果, P 波の速度には異方性がないことが明らかになった.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 名波敬太君 (北見工業大学 4 年) の協力を得た. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) Lings ML, Greening PD : A Novel Bender/Extender Element for Soil Testing, *Géotechnique* 51(8), pp.713-717, 2001.
- 2) Fioravante V. : Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing, *Soils and Foundations*, 40(4), pp.129-142, 2000.
- 3) 地盤工学会用語辞典改訂編集委員会: 地盤工学用語辞典, pp.64-117. 地盤工学会, 2006.
- 4) 平山知暁, 堀智仁, 山下聡, 鈴木輝之: ベンダーエレメント試験による3方向の S 波速度および P 波速度の測定, 第41回地盤工学研究発表会, pp.375-376, 2006.