

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月2日現在

機関番号：10101
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760436
 研究課題名（和文） 自然硬質粘土の三次元剛性異方性に着目した新しい堆積・続成構造評価手法の提案
 研究課題名（英文） Assessing sedimentary/diagenetic structure in natural stiff clays through characterisation of three-dimensional stiffness anisotropy
 研究代表者
 西村 聡 (NISHIMURA SATOSHI)
 北海道大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：70470127

研究成果の概要（和文）：自然粘土は重力場で堆積するため、一般的に軸対称異方剛性を有する。本研究ではまず、この異方性を微小ひずみに対して正確に測定する手法を発展させた。そして、異なる地質学的性質を有する複数の自然粘土に対して、剛性異方性の原位置での状態と、その応力依存性を測定し、適切な剛性モデルとそのパラメータ群を決定した。そのパラメータ群と地質学的性質の関係性に着目し、土質構造を表わす非破壊指標としての剛性モデルパラメータの有用性について検証した。

研究成果の概要（英文）：The present study explored characteristics of cross-anisotropic stiffness in natural clays by refining laboratory testing techniques and applying them to clays with various geological backgrounds. Focusing on the relationships between adopted stiffness model's parameters and the geological characteristics, the parameters' usefulness as non-destructive diagnostic indices of soil structure was assessed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：粘土、剛性、異方性、土質構造

1. 研究開始当初の背景

硬質粘土は固化改良などが困難であり、土工において自然状態のまま扱う場合が多い。自然地盤の剛性特性は変形解析を行うのに必要な情報であり、特にトンネル掘削や開削など三次元的性質の顕著な問題については、剛性の異方性が、従来解析における盲点であった。土の軸対称異方剛性を完全に測定する技術は、研究レベルでは発展しつつあったが、精度に関しての研究が進んでおらず、方法・手順の標準化には至っていなかった。また、既存のデータは非常に限られており、粘土の地質学的性質と異方性の関係、および土の構造発展と異方性との関係について、考察を許す材料がなかった。よって、通常の試験室で実施可能な手法を高度化し、種々の粘土の高精度の三次元異方性データを蓄積することが望まれていた。

2. 研究の目的

上記の背景をうけて、本研究では以下の3つの目的を設定した。

- (1) 自然粘土を乱さずに室内試験へと供し、正確に三次元弾性係数（軸対称で5つの独立係数）を高精度で計測する試験システムと手法を構築する。この際、サンプラー径の日本標準規格などを考慮し、提案する方法が将来的に標準的なものとなるように配慮する。
- (2) 種々の地質学的性質を持つ自然粘土に対し上記手法を適用し、剛性異方性とその応力依存性について適切なモデルを選択・構築し、そのパラメータ群を正確に測定することによって、今後の学術的・実務的測定のガイドとする。
- (3) 得られたパラメータ群の値と地質学的性質との相関を調査し、これらのパラメータ

を用いて自然構造の特性を記述する手法を提案する。

3. 研究の方法

各々の目的を達成するために、種々の検討の結果、以下の方法を採用した。

(1) 高精度局所変位計とベンダーエレメント装置を導入した三軸試験装置を採用し、φ70-75mmの供試体寸法に対して最適化した。微小変位制御ステップモーターによる微小載荷と弾性波速度測定を組み合わせ、弾性理論を適用し、ひずみ0.001%以下の変形に対して全弾性係数を求めた。また、載荷速度の最適化や、異なる係数導出フロー間での精度比較などを行った。

(2) 信頼性の高い地質情報が得られる大阪近辺から6種、その他2種の計8種の不攪乱自然粘土を入手し、上記の三軸試験装置を用いて軸対称異方弾性係数の同定を試みた。これらには、海成・淡水性、正規圧密・過圧密、沖積起源・洪積起源など、種々の地質学的特性・起源が包含されている。研究期間内に全8種の粘土の試験を終了できる工程が予定されていたものの、貴重な自然試料を試験に供する前に、特に所有量が豊富な粘土を用いて万全の精度保証を行うことが適切と判断したため、現報告書作成時点において、5種12供試体（うち3供試体は再構成試料）の試験が終了しており、残りに関しては継続試験中である。

(3) 検討の結果、剛性モデルはHardin & Blandfordの応力依存性モデルとJamiolkowski et al.の間隙比関数を組み合わせるものを採用し、そのパラメータ同定を行った。また、既往の研究において自然構造の尺度として提案されている、圧密降伏応力に基づく「応力鋭敏比」を、定ひずみ速度圧密試験により求め、弾性係数の応力依存パラメータとの関連を調査した。

4. 研究成果

(1) 軸対称異方剛性の測定手法の発展と精度保証

本研究で用いた手法は、砂や硬質粘土に対して研究レベルで適用された例がイギリスで数例報告されているのみであり、ポアソン比が非常に大きなばらつきをもって報告されているなど、精度保証があいまいであった。本研究では、装置の改良に加え、載荷速度の最適化やクリープ変形の適切な処理によって、ひずみにして0.001%以下の極めて微小な変形に対しても、剛性係数（鉛直・水平ヤング率および鉛直面内・水平面内せん断剛性率）は分散係数3%以内、ポアソン比は0.1以下の精度を保証するに至った（表1）。また、側方変位を計測せずに弾性係数群を導出するため新たな手法（図1）を提案し、側方変位計を用いずとも同様の精度で水平ヤング率を同定できることを示した（図2）。この手法により、異方弾性係数の完全決定はより簡素な設備で行えることが示された。

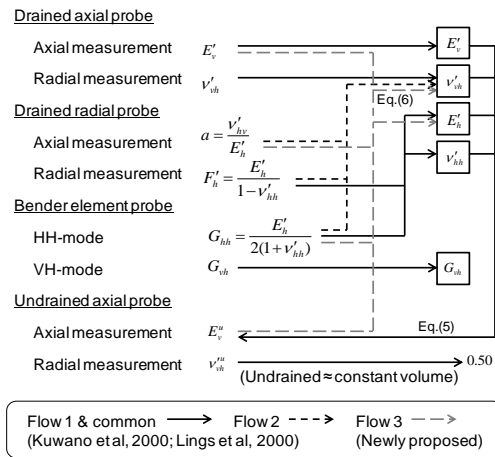


図1 軸対称異方剛性を求めるフロー：従来手法と提案手法

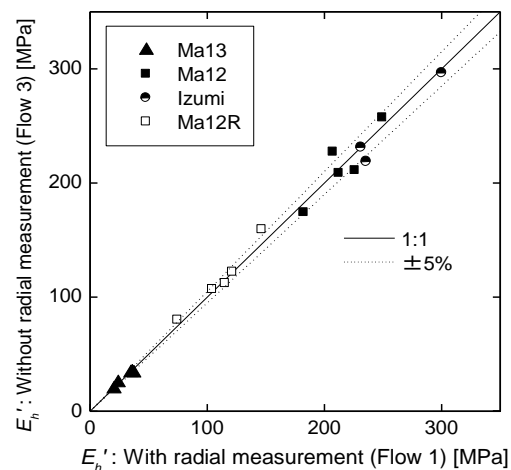


図2 従来測定法と提案する測定法による水平方向ヤング率の比較

表1 測定した剛性係数・ポアソン比の例（カッコ内は標準偏差、N:測定数）

	Ma13	Ma12	Ma12再構成	和泉
p' (kPa)	16	128	95	100
N	3	3	6	6
E_v' (MPa)	12.3 (0.2)	110.0 (6.7)	58.2 (0.8)	142.1 (3.3)
ν_{vh}' (Flow1)	0.063 (0.034)	-	0.049 (0.060)	0.122 (0.066)
F_h' (MPa)	22.3 (0.9)	184.7 (2.5)	109.5 (3.4)	203.1 (6.5)
a (1/MPa)	4.0×10^{-4} (2.7×10^{-4})	2.7×10^{-4} (9.7×10^{-4})	2.4×10^{-4} (5.8×10^{-5})	-8.0×10^{-5} (5.0×10^{-6})
G_{hh} (MPa)	13.0	118.5	61.1	156.7
G_{vh} (MPa)	11.0	62.4	37.7	89.3
E_v'' (MPa)	24.7 (0.3)	206.6 (1.1)	107.0 (1.3)	244.9 (1.8)
ν_{vh}''	0.56 (0.104)	0.52 (0.070)	0.43 (0.024)	0.51 (0.021)
E_h' (MPa)	12.3 (0.2)	207.6 (1.6)	115.5 (1.9)	246.3 (4.1)
ν_{hh}'	-0.078 (0.023)	-0.124 (0.007)	-0.055 (0.015)	-0.214 (0.013)
ν_{hv}'	0.010 (0.007)	0.056 (0.020)	0.027 (0.006)	-0.020 (0.001)
ν_{vh}' (Flow2)	0.005 (0.003)	0.030 (0.011)	0.014 (0.003)	-0.011 (0.001)
E_v'' (MPa)	23.2	227.0	109.9	248.3
E_h'' (MPa)	25.6	191.9	111.9	241.5

(2) 異方剛性モデル設定とパラメタ同定

試験はいずれも、過圧密領域においてK0を概ね保つ有効応力経路を辿って載荷・除荷を行い、結果として生じる異方応力状態5点においてそれぞれ弾性係数群を測定した。この結果を表わすにあたり、全ての試験において以下の式が固有異方性・誘導異方性の両者を同時に表現するのに妥当であることが確認された。

$$E'_i = C_i f(e) p_a^{1-2m_i} \sigma_i'^{2m_i}$$

$$G_{ij} = S_{ij} f(e) p_a^{1-m_i-n_j} \sigma_i'^{m_i} \sigma_j'^{n_j}$$

ここで、 $f(e)$ は間隙比関数 ($e^{-1.3}$ を仮定)、 p_a は大気圧、 C_i 、 S_{ij} 、 m 、 n は定数である。添字 i 、 j は方向を示し、ここでは鉛直方向 v あるいは水平方向 h のいずれかが対応する。図3は、計測した剛性係数の応力依存性の例であり、上式の各パラメタ値が明確に同定できることがわかる。ここまで終了している試験について、精度保証の完了したものについてパラメタ値を一覧としてまとめたものが表2である。

(3) 異方剛性パラメタと自然構造の関係

自然不攪乱試料と再構成試料との比較を通して(表2)、以下の二つの主要な知見が得られた。

① C_h/C_v 、 S_{hh}/S_{vh} 、 S_{hh}/C_v といった指標で表わされる固有異方性(初期異方性)には、年代や起源の影響はほとんど現れず、自然試料と再構成試料と同様であった。よって、固有異方性は堆積時の粒子配列により完全に決定され、その後の続成作用の影響を受けてないと言える。

② 一方、応力依存性を示す指数 m 、 n には自然試料と再構成試料との間で明確な相違が見られた。現在のところ、3種の粘土のみからの暫定的な結論となるが、年代が古くなるにしたがい、すべての弾性係数に対して自然試料の指数は再構成試料に比べて小さくなっていることがわかる。従来、Chandlerによって再定義された降伏応力に基づく「応力鋭敏比」(図4)あるいはこれと等価な概念が自然構造の発達の指標とされることが多かったが、この鋭敏比は、例えば関西国際空港でのケーススタディから、年代に関わらずほぼ一定の値しか示さないことが確認されている。

これに対し、剛性応力依存指数は、年代効果をより敏感に示すものであった(図5)。また、実務的な観点から、降伏応力がMPaのオーダーになる硬質粘土では、降伏応力を求めること自体が困難となる。これに対し、剛性応力依存指数は、大容量載荷装置などを必要としない別のアプローチとして適用可能である。

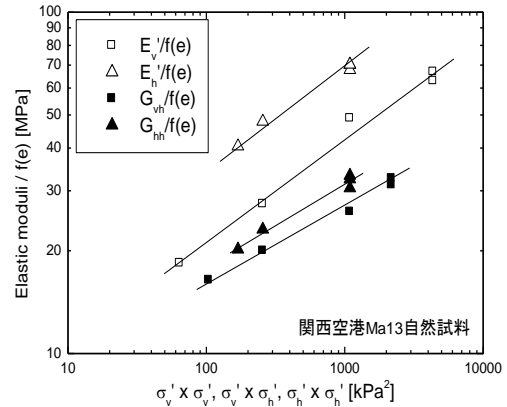


図3 弾性係数の応力依存性の例

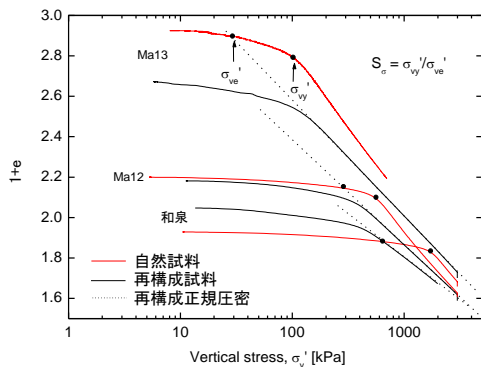


図4 圧密挙動と応力鋭敏比の定義

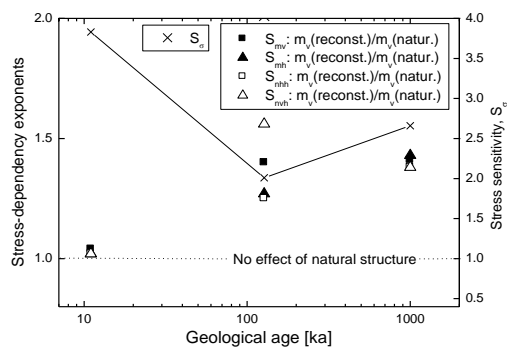


図5 剛性応力依存指数と粘土年代

表2 決定された異方剛性モデルパラメタと異方性指標

試験ケース	m_v	m_h	n_{hh}	n_{vh}	C_v	C_h	S_{hh}	S_{vh}	C_h/C_v	S_{hh}/S_{vh}	S_{hh}/C_v
和泉-1	0.21	0.21	0.21	0.20	1272	2039	1203	980	1.6	1.2	0.9
和泉-2	0.19	0.16	0.12	0.14	1411	2561	1498	872	1.8	1.7	1.1
和泉-3	0.22	0.24	0.17	0.16	1424	2419	1475	828	1.7	1.8	1.0
和泉再構成	0.29	0.29	0.23	0.23	760	1306	773	425	1.7	1.8	1.0
Ma12-1	0.19	0.22	0.20	0.16	1001	2062	1141	751	2.1	1.5	1.1
Ma12-2	(1応力点のみでの剛性計測のため導出されず:右の異方性比は等方190kPaでのもの)								2.0	1.5	1.1
Ma12再構成	0.27	0.28	0.25	0.25	609	1449	796	595	2.4	1.3	1.3
Ma13-1	0.30	0.28	0.24	0.21	854	1282	542	433	1.5	1.3	0.6
Ma13-2	0.28	0.25	0.31	0.32	623	1069	663	524	1.7	1.3	1.1
Ma13再構成	0.30	0.27	0.28	0.27	684	1249	688	479	1.8	1.4	1.0
守山-1	0.24	0.24	0.21	0.19	674	1148	540	519	1.7	1.0	0.8

(4) 今後への継続性

本研究での実験は、1供試体あたり平均約1カ月の期間を要し、研究の進捗は遅い。しかし、装置の自動化を進めた結果、必要とされる労力は小さく、今後は特別な投資を必要とせずに長期的に進められる体制が整った。本研究で実施したように、全国の実務者・研究者と連携を取り、種々の自然粘土を当実験室に輸送・ストックし順次試験をしていくことにより、長期的には包括的なデータベースを構築することが見込まれる。これにより、本研究で得られた知見がより普遍的なものとして確認されることが期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ①西村聡、大阪湾粘土群の異方弾性係数の特性、第48回地盤工学研究発表会、富山国際会議場(富山)、2013年7月23日発表予定
- ②西村聡、粘土の異方剛性：新しい測定方法と大阪湾粘土への適用、第53回地盤工学会北海道支部技術報告会、函館市勤労者福祉センター(函館)、2013年1月31日
- ③西村聡、静的・動的ハイブリッド三軸試験装置によるセメント改良粘土の異方弾性係数の測定、第47回地盤工学研究発表会、八戸工業大学(八戸)、2012年7月16日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 聡 (NISHIMURA SATOSHI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：70470127