

異方圧密された粘性土の変形係数と測定手法に関する研究

地盤工学研究室 阪東聖人
指導教員 豊田浩史

1. はじめに

近年，近接施工や重要構造物建設の増加に伴い，詳細な解析を行うため，微小ひずみ領域における各種変形係数を精度よく求める必要性が生じてきている．また，実地盤では異方圧密状態で存在する地盤が多くあることが知られている．

このような微小ひずみ領域の変形係数の測定法については，静的載荷法や振動試験法は実績があるものの，統一的な試験法とはなっておらず，導入が簡便で安価な波動伝播法のベンダーエレメント試験(以後，BE 試験と称す)が普及しつつある．しかし，BE 試験については，粘性土に適用した実績が少なく，試験法は確立されていない．

そこで本研究では，異方圧密された粘性土の微小ひずみ領域における変形係数測定を目的として試験を行った．また，局所ひずみ測定試験，BE 試験を実施し，両者の比較から微小ひずみ領域における変形係数の測定手法について検討する．

2. 試験試料

本研究で使用した試料は，新潟県柏崎市米山付近より採取した粘性土(以後，米山粘性土と称す)である．米山粘性土の物性値，粒径加積曲線を Table.1 , Fig.1 に示す．試験には 840 μ m ふるいを通過したものを，一次元圧密容器により 50kPa の圧力で 24 時間予備圧密を行い，その土塊を直径 50mm，高さ 125mm に成形し試験を行った．

3. 試験手順

本試験では飽和土を対象とし，供試体の飽和度を高めるため，二重負圧法を用いる．本研究で実施した試験手順を Fig.2 に示す．

Table.1 米山粘性土の物性値

名称	ρ_s (g/cm ³)	W_L (%)	W_P (%)	I_p
Yoneyama sandy silt	2.746	46.2	31.0	15.2

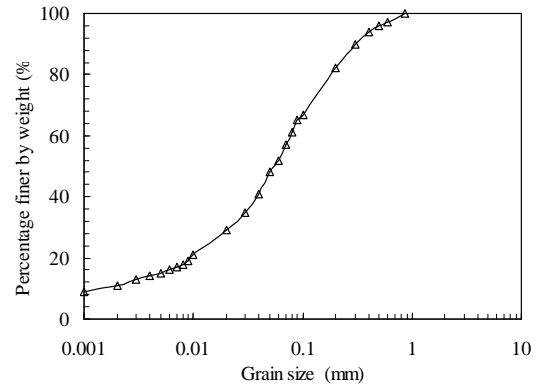


Fig.1 粒径加積曲線

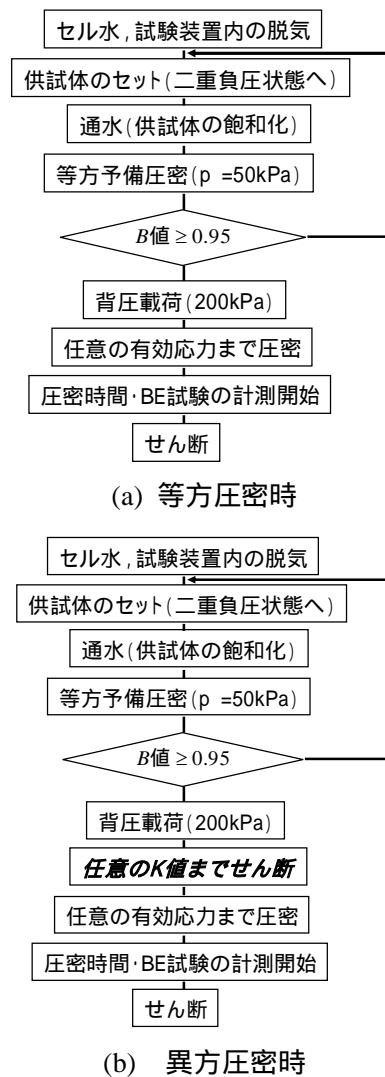


Fig.2 試験フロー

4. 試験概要・試験装置

4.1 局所ひずみ測定試験

局所ひずみ測定試験で使用した試験装置を Fig.3 に、測定機器の性能を Table.2 に示す。この試験機の特徴は長時間の圧密によるセル水を介した気泡の浸入で飽和度が下がるという問題に対処するため、三軸室内を脱気水で満たし、通気性のない油越しに空圧制御を行った。三軸試験機は非接触型変位計を使用しており、局所軸変位測定に二箇所、局所側方変位測定に一箇所設置した。局所変位計取り付け位置のモデル図を Fig.4 に示す。Target は、供試体へ影響を与えないよう、質量の軽いものを使用した。

局所ひずみ測定試験では、局所軸ひずみ ε_a 、及び局所側方ひずみ ε_r を直接測定し、Eq.(1)を用いて各種変形係数を求めた。ここで、 ε は収縮方向を正の値、膨張方向を負の値とする。

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a}, \quad \nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}, \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad \dots (1)$$

4.2 BE 試験

4.2.1 BE 試験概要

三軸試験機のキャップ及びペDESTAL に BE を装着し、三軸供試体の軸方向に伝播する波を測定した。BE は圧電素子を弾性補強かつ電極の役割を果たすシム材の両面に貼り合わせた構造(バイモルフ)となっている(Fig.5 参照)。

本研究では送信波条件を、砂質土で推奨されている、波形：sin 波、電圧：20V、周波数：10kHz、15kHz、20kHz として行った。送受信波伝播時間 Δt とベンダー間距離 L よりせん断波速度 V_s を算出し、Eq.(2)を用いてせん断弾性係数 G を求めた。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t}, \quad G = \rho \cdot V_s^2 \quad \dots (2)$$

4.2.2 伝播時間の同定法

BE 試験においては、伝播時間の同定法が重要になってくる。伝播時間の同定法としては、以下の3種類が挙げられる。

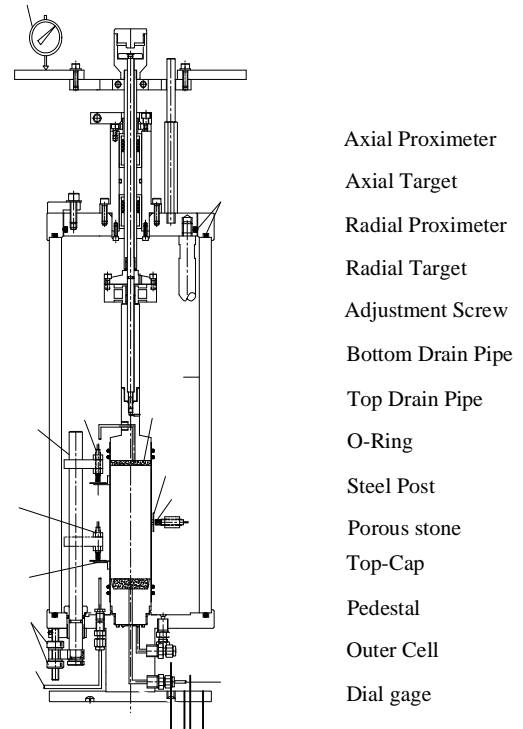


Fig.3 局所ひずみ測定試験機

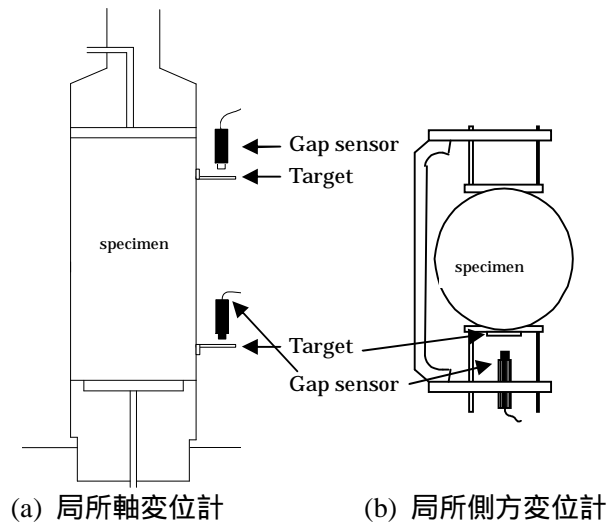


Fig.4 局所変位計取り付け位置

Table.2 測定機器の性能

測定項目	測定機器	定格容量	精度
軸変位	ダイヤルゲージ	30mm	0.01mm
軸力	水中ロードセル	100N	0.01N
側圧・間隙水圧	水圧計	100kPa	0.5kPa
排水量	ピュレット	40cc	0.1cc
局所変位	ギャップセンサー	2.0mm	0.2 μ m

- 1) T.D.法 : time domain technique
- 2) C.C.法 : cross correlation
- 3) F.D.法 : frequency domain technique

それぞれの同定法の特徴は以下の通りである .

- 1) 送信時間と到達時間の差を伝播時間とする .
- 2) 相互相関関数の最大地点を伝播時間とする .
- 3) 周波数特性を利用して伝播時間を求める .

T.D.法は , 送信波と受信波の立ち上がり地点の時間差を伝播時間とする start-to-start(S-S)と , 送信波と受信波のピーク点の時間差を伝播時間とする peak-to-peak(P-P)が挙げられる . 本研究においては , T.D.法の start-to-start を適用した .

4.2.3 ノイズ除去

伝播時間の読み取り精度は , 土のせん断弾性係数に直接影響を与える . 受信波形からノイズを除去することにより , 伝播時間を精度よく決定する必要がある . 受信波形からの信号処理方法としては主に以下の3種類が挙げられる .

- 1) 信号波形の平滑化処理
- 2) 雑音の抑圧処理
- 3) 信号波形の返還処理

今回の信号処理では信号波形の初動時間に着目しているため , 雑音の抑圧処理法を用いた . 他の信号処理では , 信号波形の移動平均をとると波形の初動時間が明確に表れなくなる , 雑音成分が大きいとノイズと周波数との切り分けが困難であるなどの問題がある . 雑音の抑圧処理方法は Eq.(3)で表すことができる(Fig.6 参照) .

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_i^{(k)} , x_i^{(k)} = s_i + n_i^{(k)} \dots (3)$$

100 回同期加算した場合 Eq.(4)のようになる .

$$\frac{1}{100} \sum_{k=1}^{100} \{s_i + n_i^{(k)}\} \dots (4)$$

4.3 K 値について

K 値は有効鉛直応力 σ_a' と有効水平応力 σ_r' の比より , Eq.(5)のように表わされ , 等方圧密時は $K=1$ となる . ここで , 水平方向変位がない状態の K 値を K_0 値といい , 米山粘性土の K_0 値は 0.43 である .

$$K = \frac{\sigma_r'}{\sigma_a'} , p' = \frac{\sigma_a' + 2 \cdot \sigma_r'}{3} \dots (5)$$

異方圧密時における変形係数の影響因子としては , K 一定圧密時の応力経路 , K 一定圧密時の軸ひずみ速度が挙げられる . ここで , 応力経路については , 所定の K 値を保ったまま , 所定の有効拘束圧 p' を载荷させたため , 影響はないものとする . 軸ひずみ速度の影響については , 後述する .

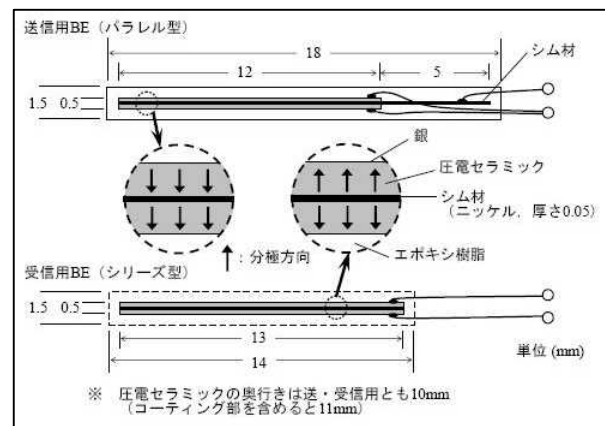


Fig.5 BE 構造 1)

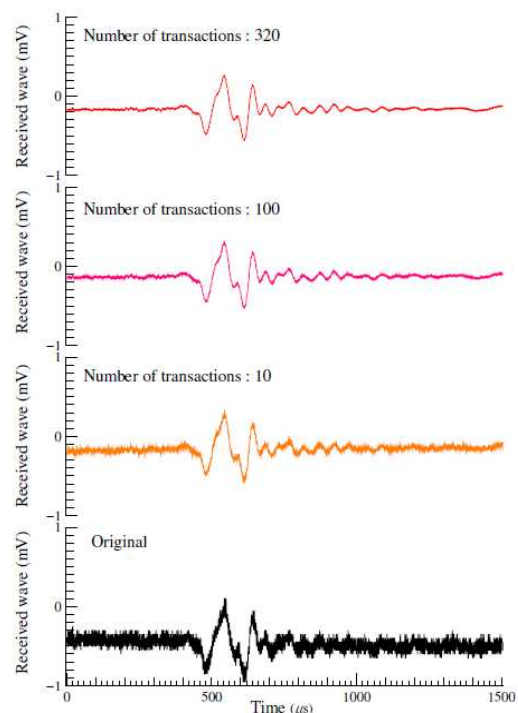


Fig.6 雑音抑圧処理

Table.3 試験ケース

test	K-value	Effective stress p' (kPa)	Axial ratio (%/min)	time (hours)				
local strain test	CD-test	300	/	3, 12, 24, 36, 48, 72				
		150						
		300						
	CU-test	300	0.005	3, 12, 24, 48, 144				
		150	0.01					
		300	0.005					
	CD-test	0.43	300	0.005	96			
			150		24			
			300		24			
			0.35					
0.6								
CD-test	0.8	300	0.005	24				
		1.5						
		2.0						
		CD-test			1.0	300	/	0, 1, 2, 3, 6, 12, 24, 36, 48, 72
						150		
300								
BE-test	CD-test	300	0.005	0, 1, 2, 3, 6, 12, 24, 36, 48, 72, 96, 120, 144				
		150						
		300						
	CU-test	0.43	300	0.005	0, 1, 2, 3, 6, 12, 24, 36, 48, 72, 96			
			150					
			300					
	CD-test	0.35	300	0.005	0, 1, 2, 3, 6, 12, 24			
			0.6					
			0.8					
			1.5					
2.0								

5. 試験条件

試験は、二重負圧法で飽和した後、全てのケースにおいてバックプレッシャー200kPa を载荷させ、K 値を保ったまま所定の有効拘束圧まで载荷させ、所定の圧密時間で圧密を行い、その後せん断速度 0.0025%/min にてせん断した。本研究で実施した試験ケースを Table.3 , Table.4 に示す。

6. 試験方法の検討

6.1 圧密打ち切り時間の検討(K=1)

ヤング率と局所軸ひずみ関係、せん断弾性係数と局所せん断ひずみ関係を Fig.7, Fig.8 に示す。また、Fig.9 に波形送信側 BE 出力と波形受信側 BE 出力を示す。ここで、ヤング率、及びせん断弾性係数は、0.001%より小さい範囲では弾性挙動を示すことから 0.001%での値を初期弾性係数として取り扱う。

排水量は2時間で落ち着き、3t 法では 6.1 時間の圧密が必要であるという結果が得られた。しかし、Fig.10 より、微小ひずみ領域におけるせん断弾性係数が落ち着くには、ある程度の圧密が必要であると考えられることから、本研究における圧密打ち切り時間は 24 時間 (12t に相当) とした。

Table.4 周波数の影響

BE-test		
K-value	Voltage (V)	frequency (kHz)
0.6	20	1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30
0.8		1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30
1.5		1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30

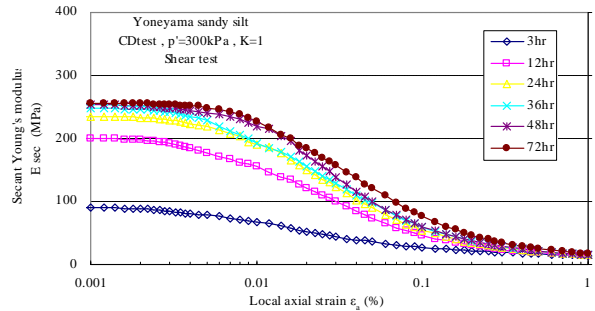


Fig.7 ヤング率 - 局所軸ひずみ関係

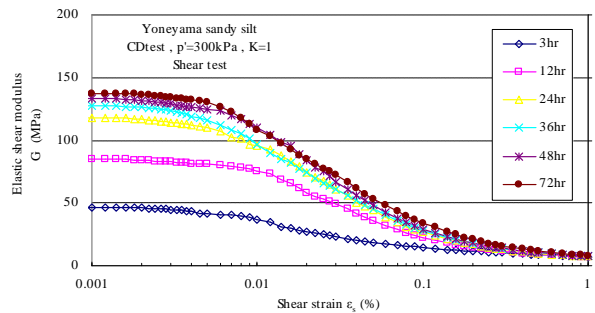


Fig.8 せん断弾性係数 - 局所せん断ひずみ関係

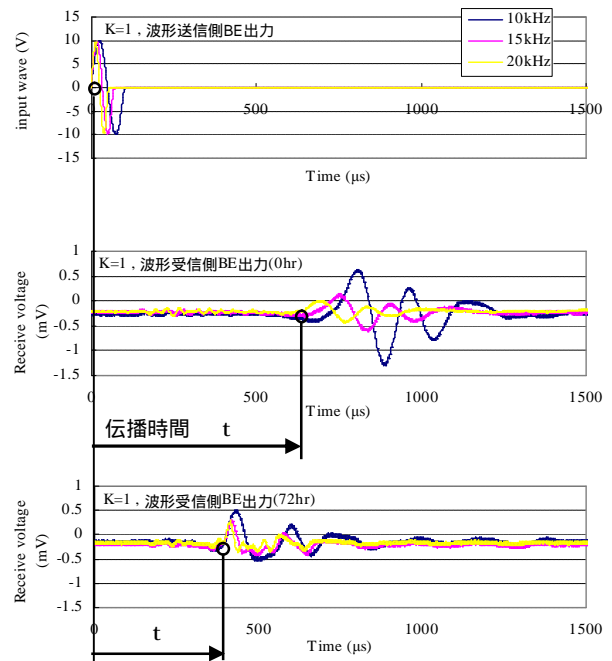


Fig.9 BE 出力 (K=1)

6.2 軸ひずみ速度の検討(K=0.43)

K_0 圧密試験より得られたせん断弾性係数と圧密時間の関係を Fig.11 に示す。軸ひずみ速度は 0.005%/min 及び 0.01%/min で実施した Fig.11 より、軸ひずみ速度 0.01%/min では 0.005%/min の時と比べせん断弾性係数の発達が遅い。また BE 試験においては、軸ひずみ速度の影響が小さい。そこで、本研究の異方圧密における K 一定圧密時の軸ひずみ速度は 0.005%/min とする。また、 K 値が 1 以上の時は、軸ひずみ速度 0.005%/min に対応するセル圧荷速度 0.5kPa/min とする。

6.3 入力周波数の検討(K=0.6, 0.8, 1.5)

異方圧密時において、周波数の影響を受けると見られるものがあつたため、入力周波数の再検討を行う。Fig.12 に $K=0.8$ における波形受信側 BE 出力、Fig.13 に周波数別せん断弾性係数を示す。

Fig.12, 13 より、1, 2, 5kHz では、波形は大きく現れるが、せん断弾性係数は小さな値となる。25, 30kHz ではせん断弾性係数は安定しているが、受信波形が小さく、立ち上がり点の判断が難しい。以上のことから、本研究における入力周波数は 10, 15, 20kHz とする。

7. K 値が及ぼす影響

異方圧密試験結果を Fig.14 から Fig.17 に示す。これらの結果より、微小ひずみ領域における変形係数は K 値の影響を受けるといえる。また、軸差応力は $K=1$ を境に違う傾向を示し、ポアソン比は K 値が小さくなるほど大きくなる。

K 値別ヤング率の変化と K 値別せん断弾性係数の変化を Fig.18, 19 に示す。Fig.18 より、ヤング率は K 値が大きいくほど小さくなる傾向にあり、非排水時のヤング率の方が高くなる。Fig.19 より、せん断弾性係数は排水条件に因らず同程度の値となり、 K 値が大きくなるほど小さくなる。その傾向は局所ひずみ測定試験の方が強く、BE 試験ではほとんど変化が見られない。以上のことから両試験で違う傾向を示すことが分かる。

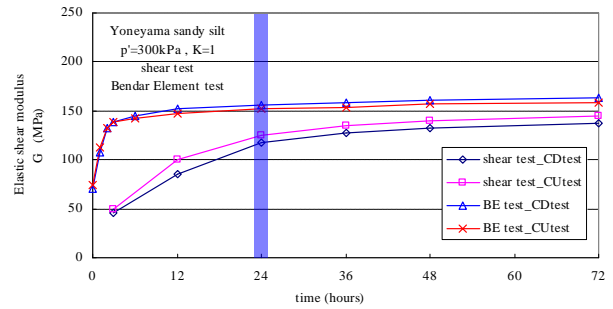


Fig.10 せん断弾性係数と圧密時間関係(K=1)

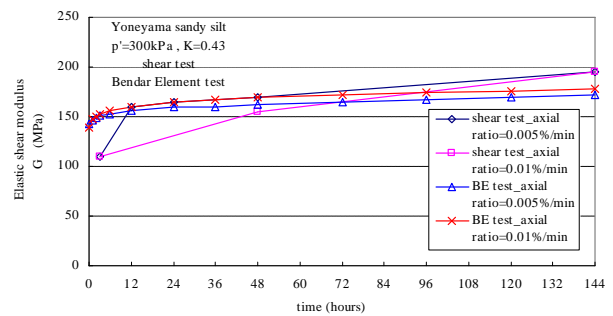


Fig.11 せん断弾性係数と圧密時間関係(K=0.43)

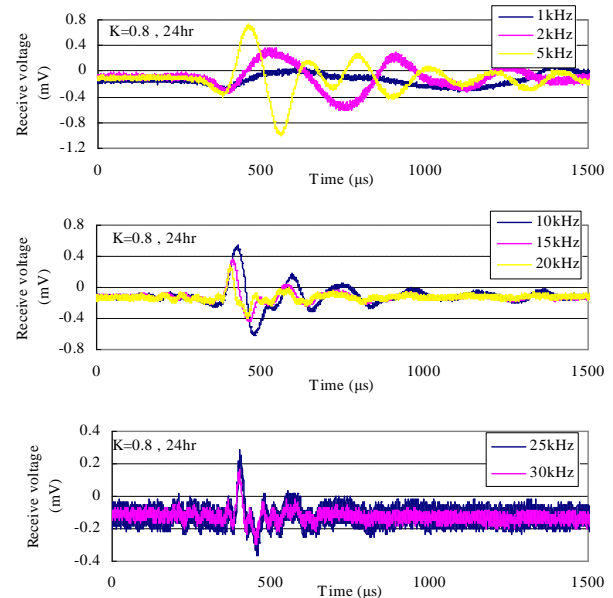


Fig.12 周波数別波形受信側 BE 出力

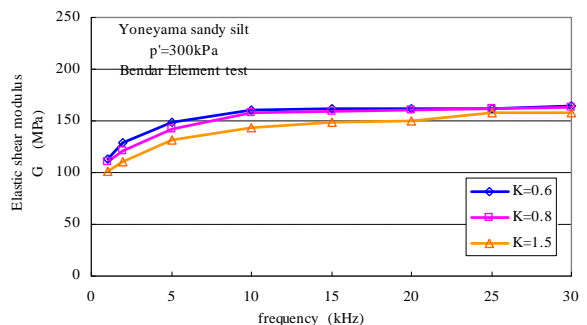


Fig.13 せん断弾性係数と周波数関係

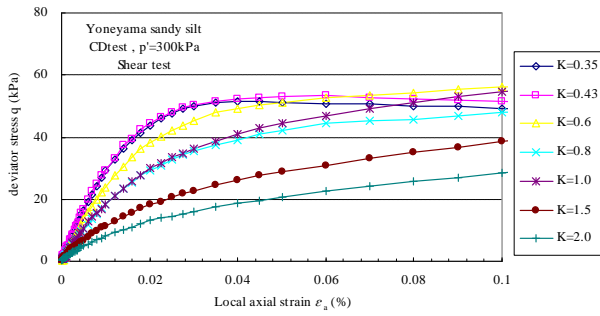


Fig.14 K 値別軸差応力の変化(E- ϵ_a)

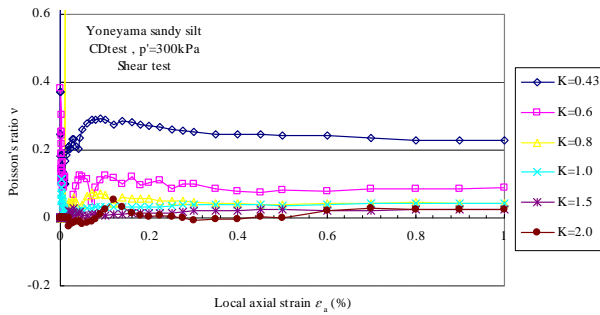


Fig.15 K 値別ポアソン比の変化(- ϵ_a)

8. 結論

本研究により，得られた知見を以下に示す．

- 1) K 一定圧密時の軸ひずみ速度は 0.005%/min，圧密打ち切り時間は 24 時間が適切である．
- 2) 入力波条件は砂質土で推奨されている周波数 10，15，20kHz の 1 波の sin 波が適応できる．
- 3) 排水条件，圧密条件に関わらず，微小ひずみ領域における粘性土の変形係数は圧密時間の影響を受け，圧密時間の増加とともに大きくなる．ただし，この影響は，BE 試験より局所ひずみ測定試験の方が大きく現れる．
- 4) 微小ひずみ領域での変形係数は，K 値が大きくなるほど，ヤング率，せん断弾性係数は小さくなる．BE 試験では，K 値の影響は小さい．
- 5) K 値が大きくなると，局所ひずみ測定試験に比べて BE 試験により求まるせん断弾性係数は大きくなる．このことから，応力状態に応じて，局所ひずみ測定試験と BE 試験では違う傾向を示す．

9. 今後の検討課題

有効拘束圧を変化させても同様の傾向を示すか調べ，変形係数測定手法の確立を目指す．

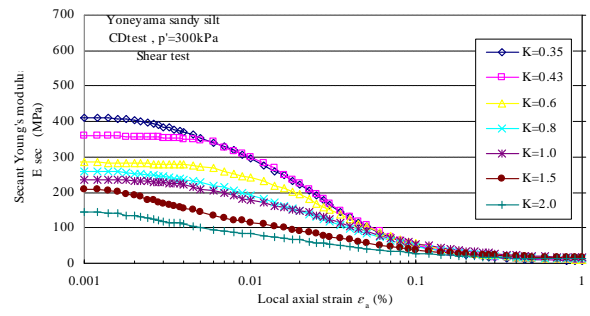


Fig.16 K 値別ヤング率の変化(E- ϵ_a)

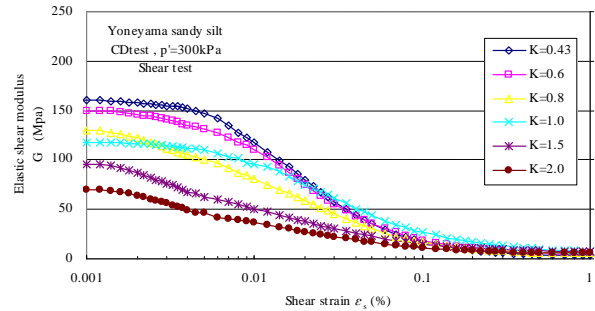


Fig.17 K 値別せん断弾性係数の変化(G- ϵ_s)

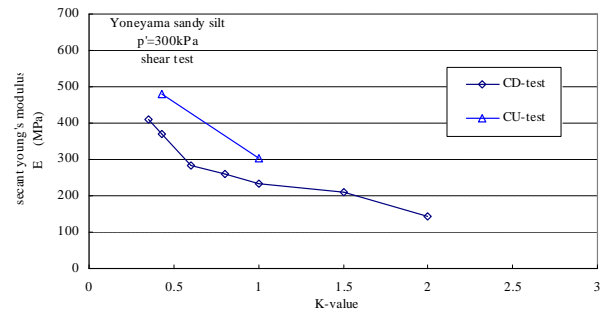


Fig.18 K 値別ヤング率の変化(E-K)

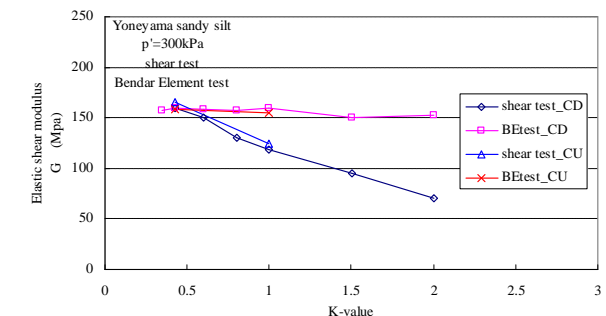


Fig.19 K 値別せん断弾性係数の変化(G-K)

参考文献

- 1) 山下聡：バンダーエレメント試験方法の標準化に関する研究，平成 16 年度～平成 17 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)）研究成果報告書，2006．