

# 飽和粘性土の変形係数に与える圧密応力比の影響

地盤工学研究室 田邊寛典  
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の建設増加に伴い、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がある。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。

昨年の研究では異方圧密された粘性土の微小ひずみレベルでの変形係数の変化について調べた。局所ひずみ測定試験とベンダーエレメント試験（以後、BE 試験と称す）を実施し、両者の比較から微小ひずみレベルでの変形係数の測定手法について検討した結果、局所ひずみ測定試験と BE 試験では応力状態により、弾性係数に差が出ることがわかった。

そこで本研究では、有効拘束圧( $p'$ )を一定としたケースと有効鉛直応力( $\sigma'_a$ )を一定としたケースの試験を行い、局所ひずみ測定試験と BE 試験による弾性係数を支配する応力状態を調べていく。

## 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 $\mu$ 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	$\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	$W_L$ (%)	$W_P$ (%)	$I_p$
Yoneyama sandy silt	2.746	46.2	31.0	15.2

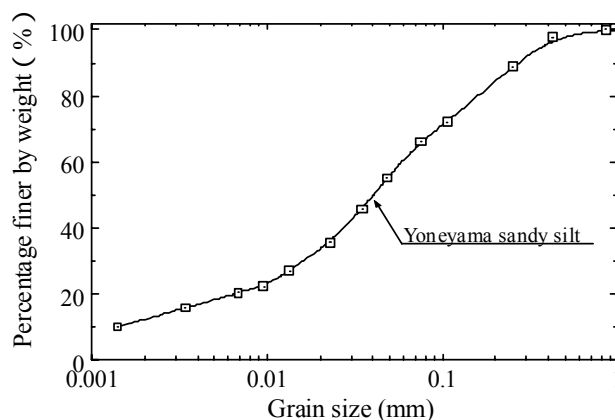


Fig.1 粒径加積曲線

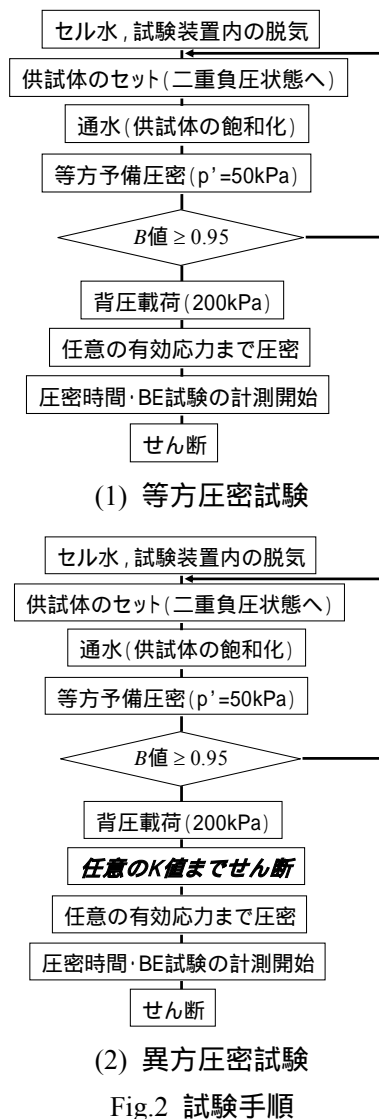


Fig.2 試験手順

## 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  $\varepsilon_a$ 、及び局所側方ひずみ  $\varepsilon_r$  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、 $\varepsilon$  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デスタルに 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。一方の BE に電圧を加え、土中にせん断波を発生させ、他方の BE でせん断波を受信する構造になっている。また、BE 試験では進行方向に直角に振動する弾性波である S 波を対象としている。

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  $\Delta t$  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。

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

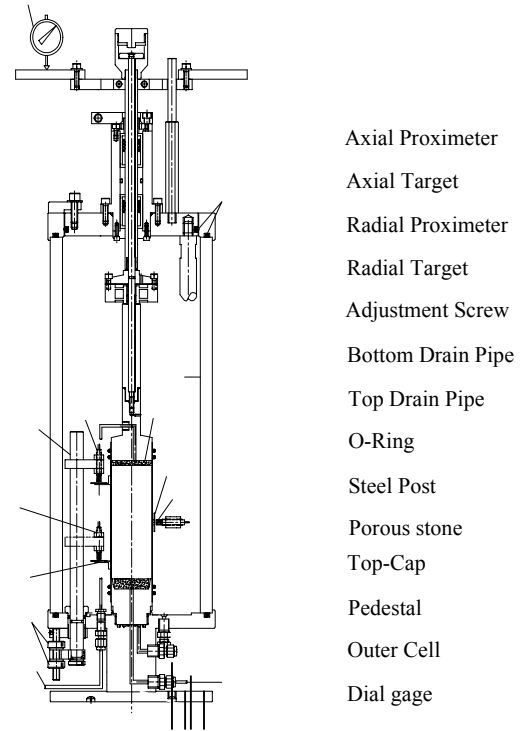


Fig.3 局所ひずみ測定試験機

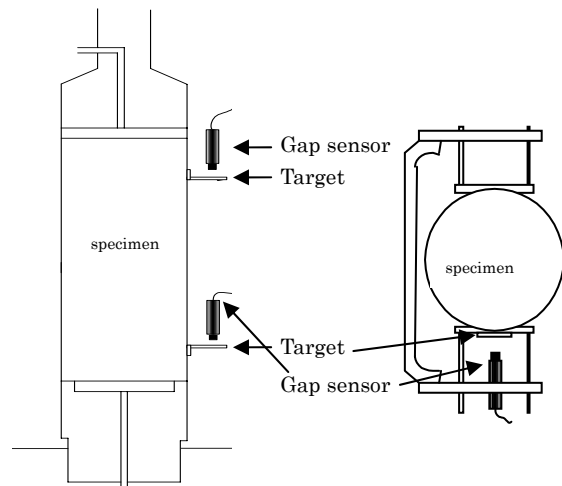


Fig.4 局所変位計取り付け位置

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	ビュレット	40cc	0.1cc
局所変位	ギャップセンサー	2.0mm	0.2 $\mu$ m

#### 4.2.2 伝播時間の同定方

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．

- 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．

#### 5. K 値について

K 値は有効鉛直応力  $\sigma'_a$  と有効水平応力  $\sigma'_r$  の比より，Eq.(3)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．この K 値を変化させて試験を行った．

$$K = \frac{\sigma'_r}{\sigma'_a}, p' = \frac{\sigma'_a + 2 \cdot \sigma'_r}{3} \dots (3)$$

#### 6. 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 ，Table4 に示す．

#### 7. 試験結果

##### 7.1 有効拘束圧を一定としたケース

Fig.5 に軸差応力と局所軸ひずみ関係を示す．初期勾配は，K 値が小さくなるほど大きくなっている．また，軸ひずみが大きくなると，軸差応力は一定の値に収束してくるようになる．

Table.3 有効拘束圧( $p'$ )を一定としたケース

CD test	$p'$ (kPa)	K-value	time (hours)
local strain test & Bender Element test	150	0.43	24
		0.6	
		0.8	
		1.0	
		1.5	
		2.0	
local strain test & Bender Element test	500	0.43	24
		0.6	
		0.8	
		1.0	
		1.3	

Table.4 有効鉛直応力( $\sigma'_a$ )を一定としたケース

CD test	$\sigma'_a$ (kPa)	$p'$ (kPa)	K-value	time (hours)
local strain test & Bender Element test	300	186	0.43	24
		220	0.6	
		260	0.8	
		300	1.0	
		400	1.5	

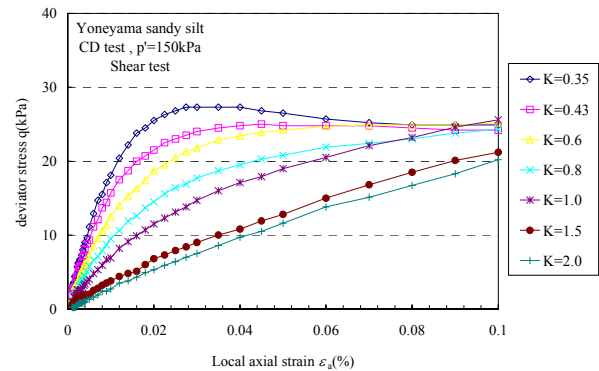


Fig.5 軸差応力 - 局所軸ひずみ関係 ( $p'=150\text{kPa}$ )

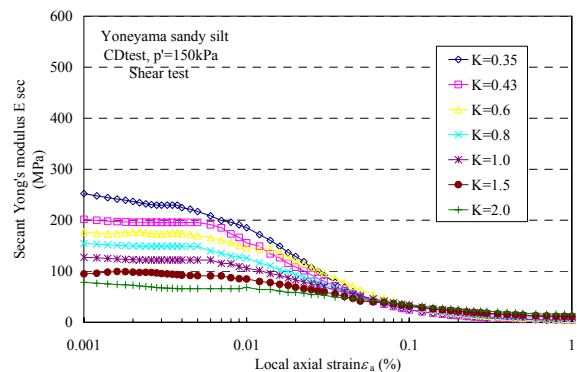


Fig.6 ヤング率 - 局所軸ひずみ関係 ( $p'=150\text{kPa}$ )

縦軸をヤング率，横軸を局所軸ひずみの対数で表した関係を Fig.6(有効拘束圧 150kPa のケース)，Fig.7(有効拘束圧 500kPa のケース)に示す．昨年度の有効拘束圧 300kPa<sup>1)</sup>では，K 値が大きくなるほどヤング率及び，せん断弾性係数は小さくなり，この傾向は有効拘束圧 150kPa，500kPa とともに同じである．Fig.8，Fig.9 に Fig.6，Fig.7 のヤング率をせん断弾性係数に置き換えた図を示す．せん断弾性係数もヤング率と同様の傾向を示すことがわかる．

各有効拘束圧別にヤング率と K 値の関係をまとめたものを Fig.10 に示す．ヤング率は有効拘束圧が大きいほど大きいが，K 値が大きいほど小さくなることからわかる．次に，Fig.10 のヤング率のかわりに，せん断弾性係数を取った結果を Fig.11 に示す．ここには同時に BE 試験結果も示してある．局所ひずみ測定試験の結果をみると，せん断弾性係数は K 値が大きくなるほど小さくなる傾向にある．しかし，BE 試験においては K 値の影響をあまり受けず，ほぼ一定の値を示す．このことから，局所ひずみ試験結果と BE 試験結果は異なる傾向を示していることがわかる．

## 7.2 有効鉛直応力を一定としたケース

有効拘束圧を一定としたケースでは，局所ひずみ測定試験より求まる弾性係数は K 値によって変化するため，局所ひずみ測定試験より求まる弾性係数はどの応力に支配されているのか調べる必要がある．そこで，次に有効鉛直応力を一定としたときの弾性係数の変化について見ていく．

Fig.12 に軸差応力と局所軸ひずみ関係を示す．K 値が変化しても軸差応力の立ち上がりはどれも同じであることがわかる．また，軸ひずみが大きくなると有効拘束圧が大きいほど軸差応力は大きくなる．

Fig.13 にヤング率と局所軸ひずみの対数関係を示す．この結果より，K 値が変化してもヤング率はほぼ一定の値を示すことがわかる．Fig.14 には，Fig.13 の縦軸をせん断弾性係数とした結果を示す．せん断弾性係数もヤング率と同様の傾向を示す．

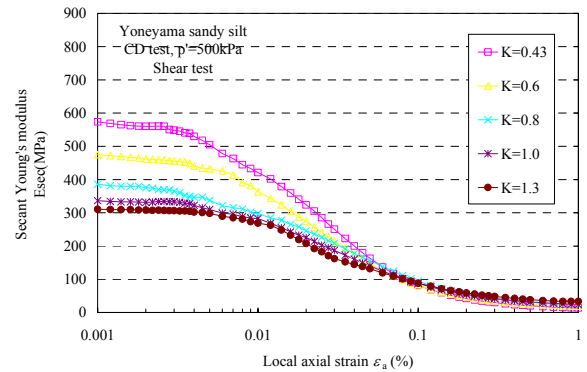


Fig.7 ヤング率 - 局所軸ひずみ関係 (p'=500kPa)

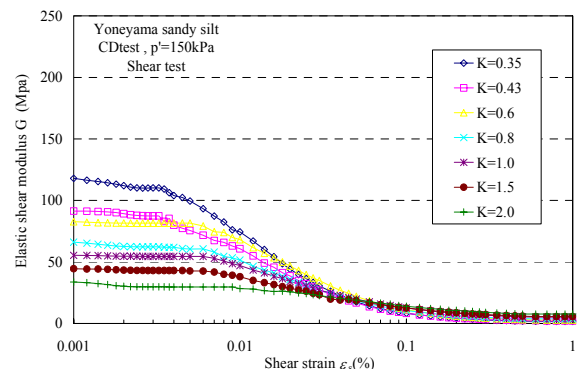


Fig.8 せん断弾性係数 - 局所せん断ひずみ関係 (p'=150kPa)

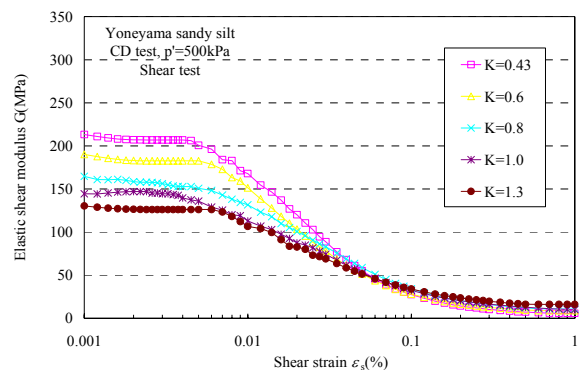


Fig.9 せん断弾性係数 - 局所せん断ひずみ関係 (p'=500kPa)

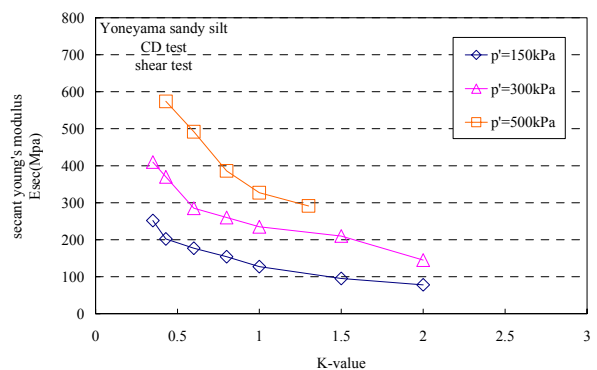


Fig.10 有効拘束圧別ヤング率と K 値の関係

有効鉛直応力を一定としたケースのヤング率を有効拘束圧を一定としたケースと比較して、局所ひずみ測定試験によるヤング率と K 値の関係を Fig.15 に示す。有効拘束圧を一定としたケースでは、ヤング率は K 値が大きくなるほど小さくなる。一方で有効鉛直応力を一定としたケースでは、ヤング率は K 値が変化してもほぼ一定の値となる。このことから、局所ひずみ測定試験から求まるヤング率は、有効拘束圧ではなく、有効鉛直応力に大きく支配されることがわかる。

Fig.16 には、Fig.15 の縦軸をせん断弾性係数として、BE 試験の結果を示す。有効鉛直応力を一定としたケースでは、K 値とともにせん断弾性係数は大きくなる。一方で有効拘束圧を一定としたケースでは、せん断弾性係数は K 値が変化してもほぼ一定の値を示す。このことから、BE 試験から求まるせん断弾性係数は、有効鉛直応力ではなく、有効拘束圧に大きく支配されることがわかる。

### 7.3 有効拘束圧一定と有効鉛直応力一定の比較

局所ひずみ測定試験により求まるせん断弾性係数をまとめたものをせん断弾性係数と有効鉛直応力の関係として Fig.17 に示す。有効拘束圧を一定としたケースでは、せん断弾性係数は有効鉛直応力とともに大きくなる傾向にある。一方で有効鉛直応力を一定としたケースは、せん断弾性係数はほぼ一定の値を示している。どのケースもほぼ同じ線上にのっていることから、局所ひずみ測定試験により求まるせん断弾性係数は有効鉛直応力による支配を受けることがわかる。

BE 試験により求まるせん断弾性係数をまとめたものをせん断弾性係数と有効拘束圧の関係として Fig.18 に示す。せん断弾性係数は有効拘束圧とともに大きくなる。有効拘束圧一定のケースも有効鉛直応力一定のケースも、K 値が変わってもほぼ同じラインにのっていることがわかる。このことから、BE 試験により求まるせん断弾性係数は有効拘束圧による支配を受けることがわかる。

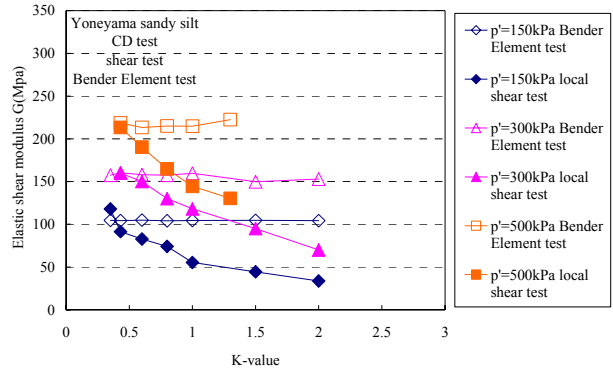


Fig.11 有効拘束圧別せん断弾性係数と K 値の関係

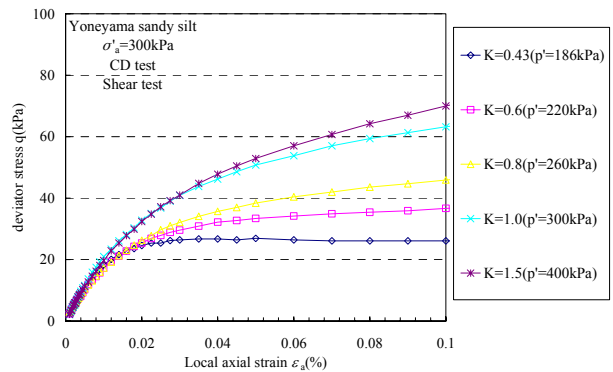


Fig.12 軸差応力 - 局所軸ひずみ関係

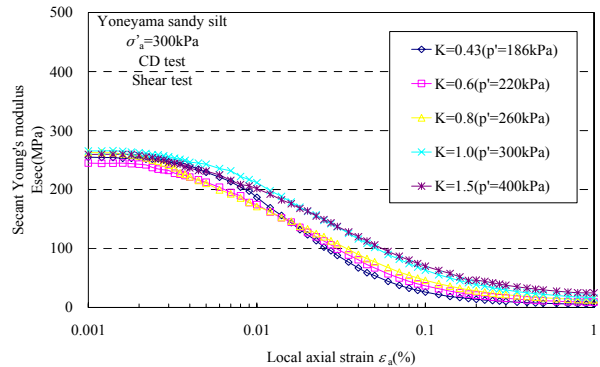


Fig.13 ヤング率 - 局所軸ひずみ関係

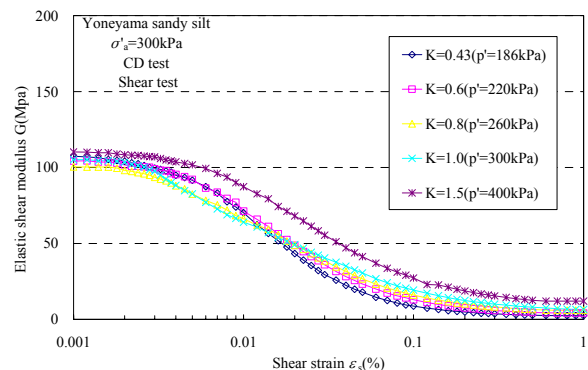


Fig.14 せん断弾性係数 - 局所せん断ひずみ関係

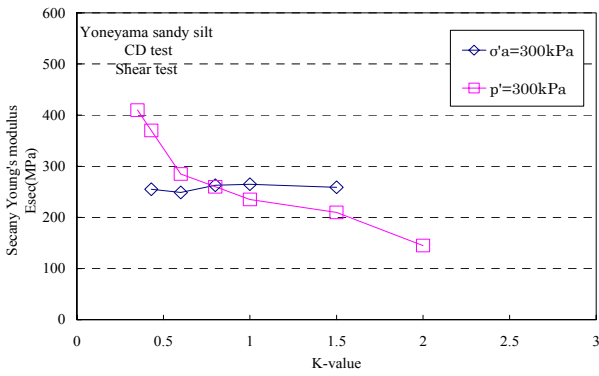


Fig.15 ヤング率と K 値の関係

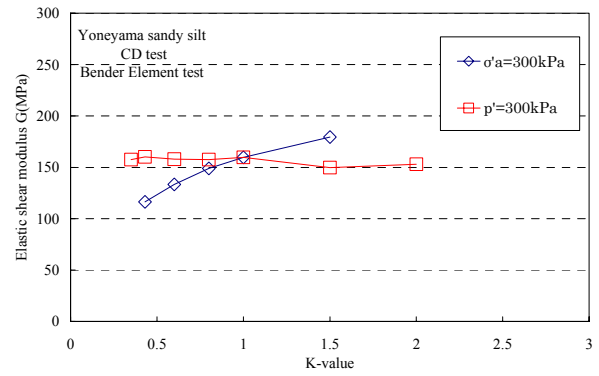


Fig.16 せん断弾性係数と K 値の関係 (G - K)

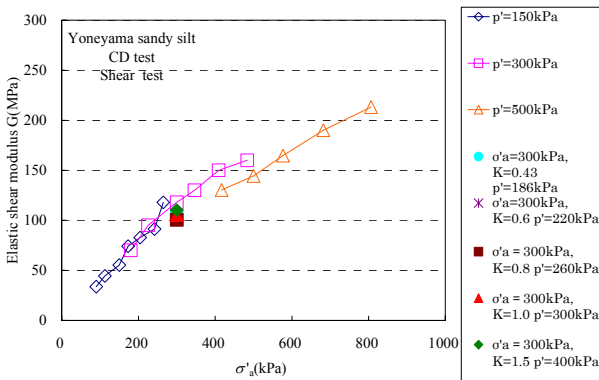


Fig.17 局所ひずみ測定試験によるせん断弾性係数と有効鉛直応力の関係図 (G -  $\sigma'_a$ )

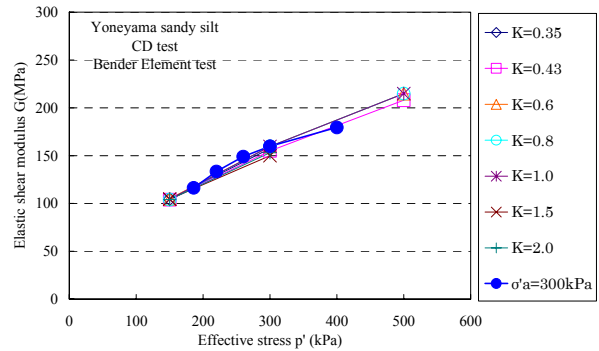


Fig.18 BE 測定試験によるせん断弾性係数と有効拘束圧の関係図 (G -  $p'$ )

## 8. 結論

本研究より得られた知見を以下に示す。

「有効拘束圧一定のケース」

局所ひずみ測定試験により求まるヤング率、及びせん断弾性係数は K 値が大きくなるほど小さくなる。

BE 試験により求まるせん断弾性係数は K 値の影響をあまり受けず、ほぼ一定の値を示す。

「有効鉛直応力一定のケース」

局所ひずみ測定試験により求まるヤング率、及びせん断弾性係数は K 値の影響をあまり受けず、ほぼ一定の値を示す。

BE 試験により求まるせん断弾性係数は K 値とともに大きくなる。

よって、これらのことから以下のことが導かれる。

局所ひずみ測定試験による弾性係数は有効鉛直応力による支配を受ける。

BE 試験による弾性係数は有効拘束圧による支配を受ける。

## 9. 今後の検討課題

試料の種類を増やして、異なる試料においても同様の傾向を示すか調べる。また、本研究では飽和土を対象としていたため、不飽和土でも飽和土と同様の傾向を示すのか調べていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 阪東聖人(2009)：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，長岡技術科学大学修士論文，pp.122～161。