

飽和砂の変形係数に与える圧密応力比の影響

地盤工学研究室 登坂直城
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、対象となる実地盤は異方圧密状態で存在していることが多い。

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、局所ひずみ測定試験、及びベンダーエレメント試験（以後、BE 試験と称す）を実施し、両者の比較により、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。

そこで、本研究では、豊浦砂を対象に、できる限り粒子の配向性をランダムにできる、細い棒を用いた乾燥突固めで供試体を作製し、昨年と同様のケースで実験を行った。この乾燥突固めの結果と米山粘性土の結果を比較した。以下に本研究で得られた知見を示す。

2. 試験試料

本研究では、標準砂である豊浦砂を使用した。豊浦砂の物理性質を Table.1 に、粒径加積曲線を Fig.1 に示す。

Table.1 豊浦砂の物性値

ρ (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	細粒分含有率 F_c
2.65	0.99	0.597	1.55	1.05	0

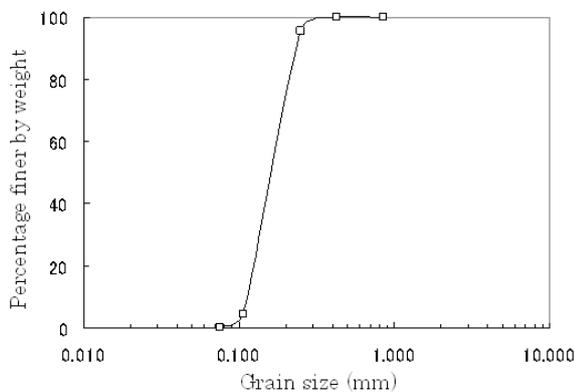


Fig.1 粒径加積曲線

3. 供試体作製方法

供試体の寸法は直径 50mm, 高さ 125mm を標準としている。供試体は $D_r=75\%$ を目標とし、乾燥突固めと湿潤締固めで作製した。

乾燥突固めは、供試体作製時にできる限り土粒子の配向性をランダムにすることを目的に、細い棒を使って作製した。

湿潤締固めは、供試体作製時に配向性を持たせることを目標に作製した。

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.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.3 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。

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

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。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 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。

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

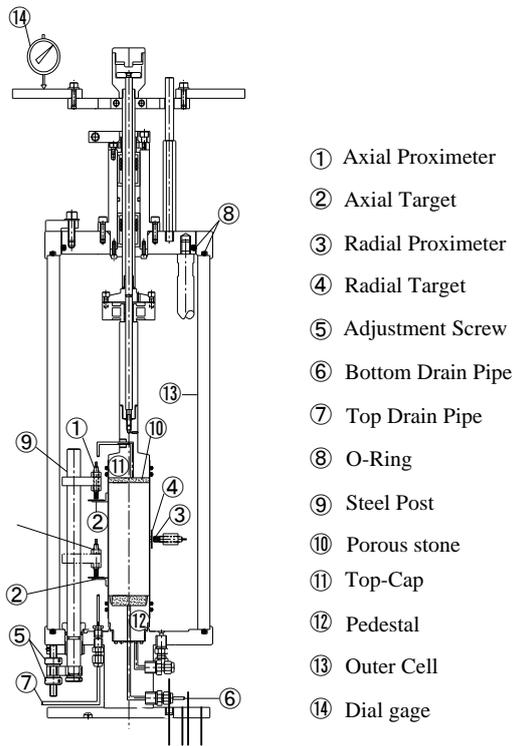


Fig.2 局所ひずみ測定試験機

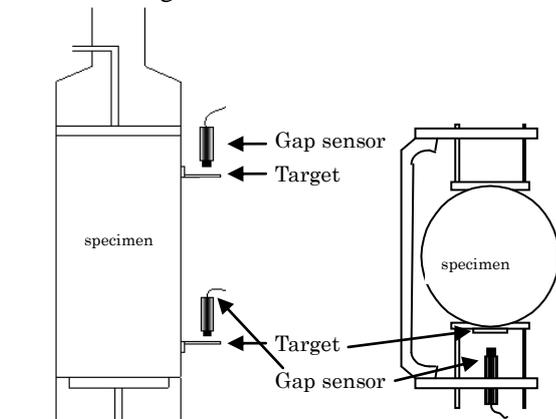


Fig.3 局所変位計取り付け位置

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 σ'_a と有効水平応力 σ'_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。

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

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 を載荷させ、K 値を保ったまま所定の有効拘束圧まで載荷させ、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。

7. 試験結果

ここでは、豊浦砂を対象に BE 試験及び局所ひずみ測定試験を行った結果と、既往の研究である米山粘性土を対象に同様の試験を行った結果の比較を行う。なお、比較に使用する豊浦砂の結果には、乾燥突固めのケースを用いた。

Table.3 有効拘束圧(p')を一定としたケース

p'(kPa)	K-value	p'(kPa)	K-value	p'(kPa)	K-value
150	0.4	300	0.4	500	0.4
	0.6		0.6		0.6
	0.8		0.8		0.8
	1		1		1
	1.5		1.5		1.2
	2		2		

Table.4 有効鉛直応力(σ'_a)を一定としたケース

p'(kPa)	K-value	σ'_a (kPa)
180	0.4	300
220	0.6	
260	0.8	
300	1.0	
400	1.5	

7.1 結果比較

7.1.1 局所ひずみ測定試験結果のひずみ依存性

Fig.4 に豊浦砂の局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数－局所せん断ひずみ関係, Fig.5 に米山粘性土の局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数－局所せん断ひずみ関係を示す. なお, これらは有効拘束圧 150kPa 一定のケースである.

豊浦砂において, 初期せん断弾性係数は $K \leq 1.0$ ではほとんど同じ値であるが, $K > 1.0$ では少し小さな値である. また, 局所せん断ひずみの増加とともにせん断弾性係数は減少する. このとき, K 値が大きいくほどせん断弾性係数の減少は緩やかである. 局所せん断ひずみ 0.01%以降の領域では, K 値が大きいくほどヤング率が高い. 豊浦砂では K 値によりひずみ依存の形が違ってくる.

米山粘性土において, 初期せん断弾性係数は K 値が小さいほど大きくなる. また, 局所せん断ひずみの増加とともにせん断弾性係数は減少する. 局所せん断ひずみが大きな領域では, せん断弾性係数は K 値によらず一定の値に収束する. 米山粘性土では K 値によらず相似的なひずみ依存を示す.

7.1.2 BE 試験の結果比較

Fig.6 に BE 試験から求めたせん断弾性係数－K

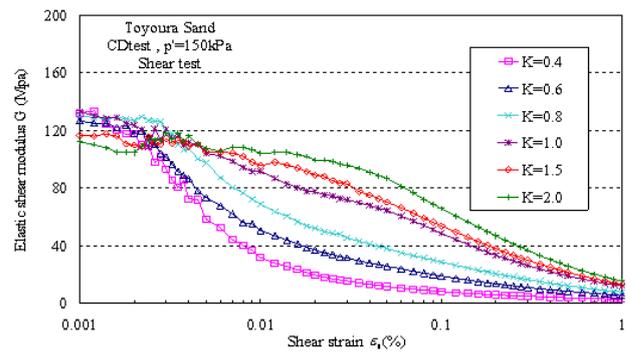


Fig.4 せん断弾性係数－局所せん断ひずみ関係 (Toyoura)

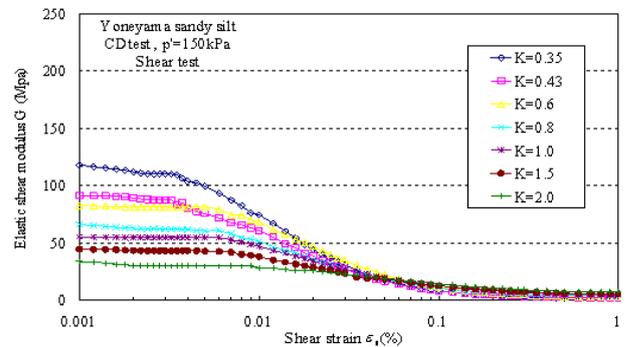


Fig.5 せん断弾性係数－局所せん断ひずみ関係 (Yoneyama)

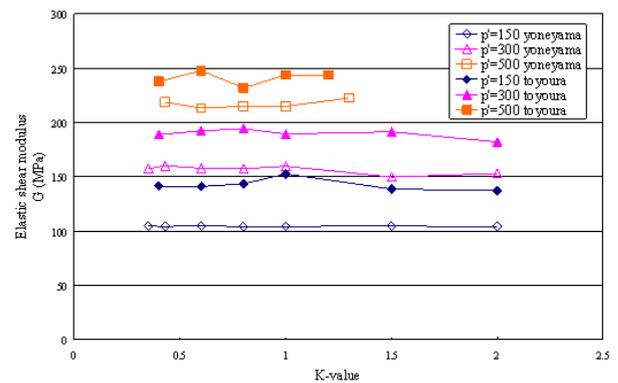


Fig.6 せん断弾性係数－K 値関係 (BE 試験)

値関係を示す。

豊浦砂・米山粘性土ともに、BE 試験から求めたせん断弾性係数は K 値による変化は無く、有効拘束圧が大きいくほど大きくなっている。

豊浦砂と米山粘性土の BE 試験の結果は同様の傾向がある。また、BE 試験の結果は K 値に影響されず、有効拘束圧に影響される。

7.1.3 局所ひずみ測定試験の結果比較

Fig.7 に局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数- K 値関係を示す。

米山粘性土において、局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数は、 K 値が大きくなるほど小さくなり、有効拘束圧が大きくなるほど大きくなっている。

豊浦砂において、局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数は、 $K \leq 1.0$ ではほとんど同じ値であるが、 $K > 1.0$ では少し小さくなり、有効拘束圧が大きくなるほど大きくなっている。

米山粘性土では K 値の影響を大きく受けるのに対し、豊浦砂では K 値の影響を僅かしか受けない。米山粘性土と豊浦砂では全く異なった傾向を示す。

7.2 結果整理

7.2.1 BE 試験整理

Fig.8 に豊浦砂の BE 試験から求めたせん断弾性係数-有効拘束圧関係、Fig.9 に米山粘性土の BE 試験から求めたせん断弾性係数-有効拘束圧関係を示す。

豊浦砂において、有効拘束圧が同じであれば、BE 試験から求めたせん断弾性係数は K 値の影響を受けず、一定である。つまり、せん断弾性係数は有効拘束圧と一意的関係がある。

米山粘性土において、有効拘束圧が同じであれば、BE 試験から求めたせん断弾性係数は K 値の影響を受けず、一定である。つまり、せん断弾性係数は有効拘束圧と一意的関係がある。

以上より、豊浦砂・米山粘性土ともに、有効拘束圧が同じであれば、BE 試験から求めたせん断弾性係数は K 値の影響を受けず、一定である。つ

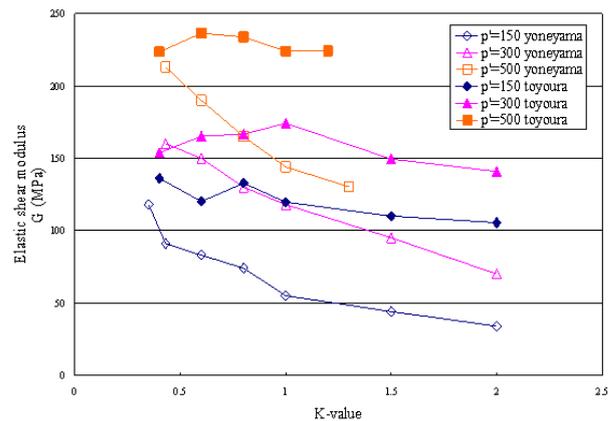


Fig.7 せん断弾性係数- K 値関係 (局所ひずみ測定試験)

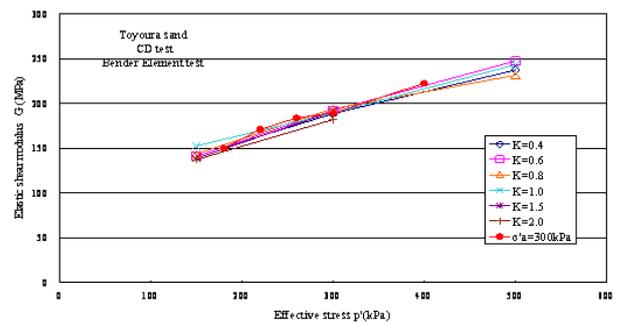


Fig.8 せん断弾性係数-有効拘束圧関係 (BE 試験, Toyoura)

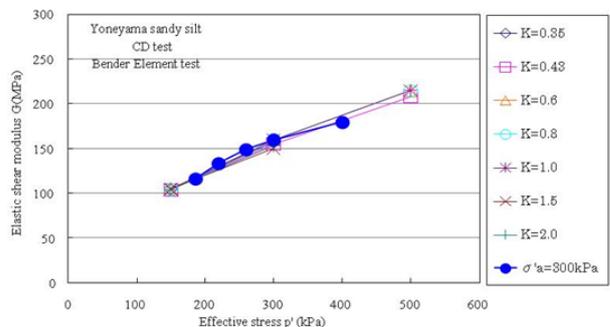


Fig.9 せん断弾性係数-有効拘束圧関係 (BE 試験, Yoneyama)

まり，せん断弾性係数は有効拘束圧と一意的関係がある。

7.2.2 局所ひずみ測定試験整理(米山粘性土)

Fig.10 に米山粘性土の局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数－有効鉛直応力関係を示す。

局所ひずみ測定試験から求めた米山粘性土のせん断弾性係数は，有効鉛直応力と一意的関係で表すことができる。

7.2.3 局所ひずみ測定試験整理(豊浦砂)

Fig.11 に豊浦砂の局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数－有効拘束圧関係を示す。

豊浦砂の局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数は有効拘束圧が大きくなるほど大きくなっている。K=1.5, 2.0 のケースは K 値の影響を受け，K ≤ 1 のケースよりもやや小さな値になっている。せん断弾性係数は有効拘束圧に影響されるが，有効拘束圧と一意的関係にあるとはいえず，K > 1 において K 値が大きくなると小さくなる傾向がある。

ここで，重みつき有効平均主応力 (p'_{weight}) を導入する。この重みつき有効平均主応力 (p'_{weight}) は三軸伸張状態 (K > 1) において，軸方向の応力に重みをつけた有効平均主応力である。重みつき有効平均主応力 (p'_{weight}) を Eq.(4) に示す。

$$p'_{weight} = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3} \dots (4)$$

Fig.12 に豊浦砂の局所ひずみ測定試験から求めたせん断弾性係数－重みつき有効平均主応力 (p'_{weight}) 関係を示す。

局所ひずみ測定試験から求めた豊浦砂のせん断弾性係数は，重みつき有効平均主応力 (p'_{weight}) を導入することにより，せん断弾性係数を一意的関係で表すことができる。

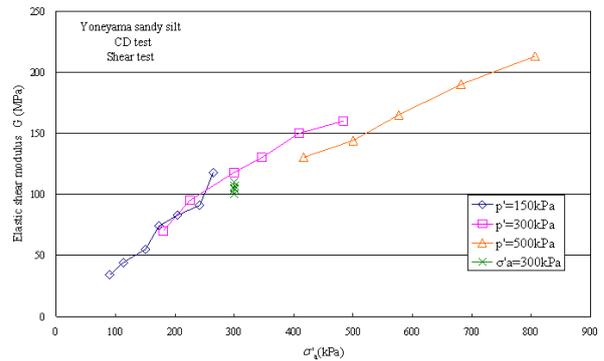


Fig.10 せん断弾性係数－有効鉛直応力関係 (局所ひずみ測定試験，Yoneyama)

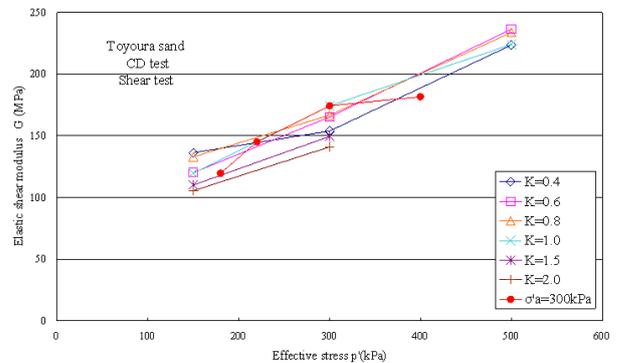


Fig.11 せん断弾性係数－有効拘束圧関係 (局所ひずみ測定試験，Toyouura)

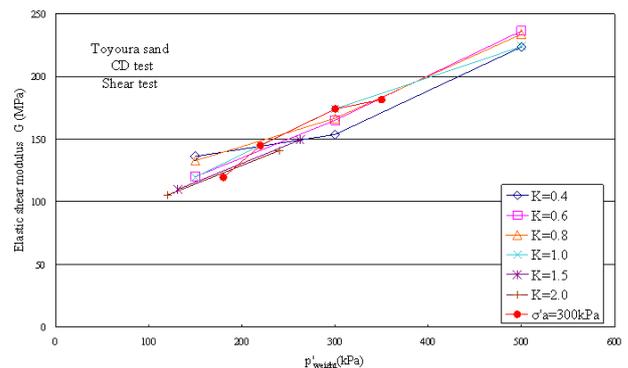


Fig.12 せん断弾性係数－重みつき有効平均主応力 (p'_{weight}) 関係 (局所ひずみ測定試験，Toyouura)

8. 結論

本研究では、豊浦砂を対象に局所ひずみ測定試験及び BE 試験を行った。また、昨年の研究である米山粘性土の試験結果と比較を行った。本研究より得られた知見を以下に示す。

- ① 豊浦砂・米山粘性土ともに、有効拘束圧が同じであれば、BE 試験から求めたせん断弾性係数は K 値の影響を受けず、一定である。つまり、せん断弾性係数は K 値によらず有効拘束圧と一意的関係がある。
- ② 米山粘性土において、局所ひずみ測定試験から求めたヤング率・せん断弾性係数は、 K 値によらず有効鉛直応力と一意的関係がある。一方、豊浦砂においては、ヤング率・せん断弾性係数は、有効拘束圧と一意的関係にあるとはいえず、 $K > 1$ において K 値が大きくなると小さくなる傾向がある。ここで、重みつき有効平均主応力 (p'_{weight}) を導入することにより、ヤング率・せん断弾性係数を一意的関係で表すことができる。
- ③ 局所ひずみ測定試験から求めた割線弾性係数のひずみ依存性（割線弾性係数－ひずみ関係）に関しては、米山粘性土では K 値によらず相似的なひずみ依存を示すが、豊浦砂では、 K 値によりひずみ依存の形が違ってくる。

9. 今後の検討課題

- ・ 本研究では $D_r=75\%$ でのみ行った。相対密度を変化させ、同様の傾向を示すか調べる。
- ・ 砂質土の種類を増やして、異なる試料においても同様の傾向を示すか調べる。