

# アクティブ制御による土の非排気せん断試験方法の開発

地盤工学研究室 佐藤 勇太  
指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

近年、地震により不飽和斜面が流動化（液状化）した例が報告されている。飽和状態の地盤と違い、不飽和状態の地盤には間隙空気が存在しており、地震時の不飽和状態の地盤内では、急激なせん断により地盤内の空気・水が排出されない状態となる。すなわち非排気非排水状態となっている。それにもない、非排気非排水条件での不飽和土の繰返し三軸試験が盛んに行われるようになって

いる。非排気非排水条件での三軸試験は古くはビンヨップにより、セル水のかわりに水銀を用いて非排気試験が行われたが、その毒性のため近年は使用が制限されている。近年の不飽和三軸試験では二重セル構造の三軸試験機を用いて非排気試験を行うのが主流となっているが、メンブレンの空気の透過性を考えると厳密には非排気状態とはなっていない。それゆえに、飽和土の繰返し三軸試験と不飽和土の排気排水条件での三軸圧縮試験は基準化されているものの、非排気非排水条件は基準化されていないのが現状である。

そこで本研究では供試体内の間隙空気がメンブレンを透過して漏れ出しているのかを検証する。また、非排気状態と等価な状態を作り出すアクティブ制御を用いて水銀を用いなくても精度よく、そして容易に非排気試験が行えるか検討するものである。

## 2. 非排気非排水条件について

非排気非排水状態とは不飽和土のせん断時に供試体内部から空気と水を排出しない条件のことである。土粒子と水の体積は不変と仮定できるため、飽和土の非排水条件では供試体体積は一定となるが、空気は圧縮性があるため、供試体体積

も変化することになる。

原地盤で非排気非排水状態となりえる一例として、地震時の不飽和状態の地盤内では、急激なせん断により地盤内の空気・水が排出されない状態となることが考えられる。

## 3. 二重セル型三軸試験機について

二重セル型三軸試験機の簡略図を Fig.3.1 に示す。

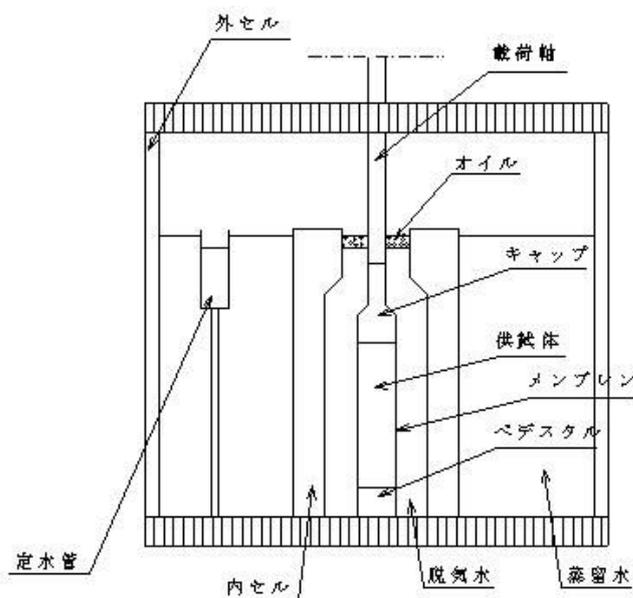


Fig.3.1 二重セル型三軸試験機簡略図

不飽和土の非排気非排水三軸試験は Fig.3.1 のような二重セル型三軸試験機で試験が行われている。供試体の体積変化量は、定水位管と内セル水の水位差による圧力差を差圧計で測定して、体積変化を計算している。精度良く体積変化量を測定するために、内セル水には脱気水を用いている。また、内セル水にセル圧が作用した空気が溶け込まないように、内セル水水面にオイルを浮かべることで内セル内を密閉している。

しかし、第1項でも述べているように、メンブ

レンの透過性により完全に非排気状態にはならないという問題点を抱えている。

#### 4. 間隙空気がメンブレンを透過し、内セル水に溶け込む現象

本現象が実際に試験機内で起きているか検証するため、供試体内に間隙空気圧  $u_a=200\text{kPa}$  を作用させた状態で、長時間非排気状態で放置したときの供試体内の間隙空気圧と内セル水(脱気水)の溶存酸素量の変化をみる実験を行った。Fig.4.1 に間隙空気圧の変化、Table.4.1 に溶存酸素量の変化を示す。

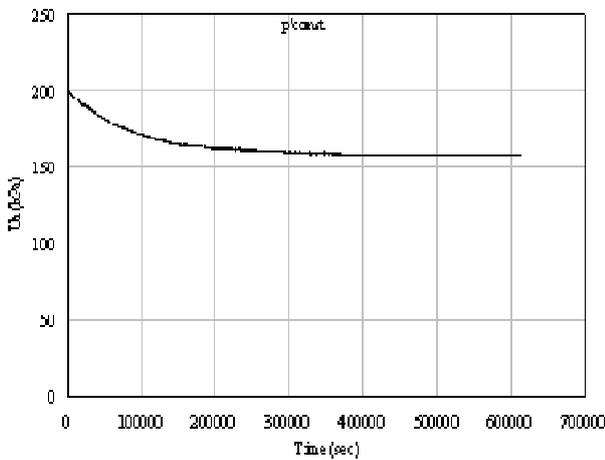


Fig.4.1 間隙空気圧の変化

Table.4.1 溶存酸素量の変化

	長時間放置前 の内セル水	長時間放置後 の内セル水
溶存酸素量 Do (mg/l)	0.84	8.88

Fig.4.1 より、供試体内の間隙空気圧  $u_a$  が時間経過と共に減少しているのが分かる。完全な非排気状態であれば間隙空気圧は時間が経過しても  $200\text{kPa}$  一定であるが、間隙空気圧が変化している。また、Table.4.1 より、内セル水として用いた脱気水が長時間放置前の溶存酸素量が  $0.84\text{ mg/l}$  だったのに対し、長時間放置後は  $8.88\text{ mg/l}$  となって

いることから、間隙空気がメンブレンを透過し、内セル水に溶け込んだと言える。

#### 5. アクティブ制御について

現行の試験のままではメンブレンの透気性により非排気状態が維持できないという問題に対し、本研究では非排気状態と等価な状態を作り出すアクティブ制御という手法を提案する。アクティブ制御とは、ある変化量を見積り、変化量にあわせて所定の制御を自動で行う制御方式である。

非排気非排水せん断中の供試体の体積変化を差圧計で逐次測定し、体積変化量から間隙空気圧の変化を式(1)により理論計算して、この間隙空気圧を自動制御することにより、非排気状態と事実上等価な状態をつくり出す。

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

$P_1$  : 初期の間隙空気の絶対圧力,  $V_1$  : 初期の間隙空気の体積,  $T_1$  : 初期の間隙空気の絶対温度,  
 $P_2$  : 試験中の間隙空気の絶対圧力,  $V_2$  : 試験中の間隙空気の体積,  $T_2$  : 試験中の間隙空気の絶対温度

水の体積変化は排水量から計算でき、土粒子の体積変化はないと仮定すれば、供試体の体積変化から、空気の体積変化を算定することが可能である。

#### 6. 試験方法および試験条件

本研究ではアクティブ制御を用いた不飽和粘性土・砂質土の非排気非排水単調載荷試験と完全乾燥砂の P (平均主応力) 一定繰返し載荷試験を行い、アクティブ制御の有効性について検討した。

砂試料は豊浦砂である。豊浦砂の物性値を Table.6.1 に示す。単調載荷試験ではモールドを使用した締固め法により砂試料を  $Dr=0\%$ ,  $w=5\%$  で締固めたものを使用した。また、完全乾燥砂での P 一定繰返し載荷試験では漏斗を使用し空中落下法で作成した。共に供試体直径  $50\text{mm}$ , 高さ  $125\text{mm}$  で作製した。

粘性土試料は新潟県柏崎市米山付近より採取した米山粘性土である。米山粘性土の物性値を Table6.2 に示す。乾燥した試料に蒸留水を加えスラリー状にしたものを脱気して、圧密容器内で一次元圧密をしてできた土塊を直径 50mm、高さ 125mm の供試体に作製した。

Table.6.1 豊浦砂の物性値

	豊浦砂
土粒子密度 $\rho_s$	2.65
最大間隙比 $e_{max}$	0.99
最小間隙比 $e_{min}$	0.597
均等係数 $U_c$	1.55
曲率係数 $U_c'$	1.05
細粒分含有率 $F_c$	0

Table6.2 米山粘性土の物性値

	米山粘性土
土粒子密度 $\rho_s$	2.746
液性限界 $W_L(\%)$	46.2
塑性限界 $W_p(\%)$	31.0
塑性指数 $I_p(\%)$	15.2
粘土 (%)	23.6
シルト (%)	57.0
砂 (%)	19.4

本研究ではアクティブ制御を実施し、単調載荷試験においては供試体の不飽和化に加圧板法を用いて試験を行った。供試体上部に背圧を与え、供試体下部のセラミックディスクより排水させ、供試体にサクシオンを与えた。単調載荷試験でのみセラミックディスクが埋め込まれている不飽和土用ペDESTALを使用している。米山粘性土では  $AEV=400kPa$ 、豊浦砂では  $AEV=50kPa$  の不飽和土用ペDESTALを用いた。ここで、本研究で取り扱うサクシオン  $s$  とは不飽和状態を表す重要なパラメータであり、式(2)の通り間隙空気圧  $u_a$

と間隙水圧  $u_w$  の差で表す。

$$s=u_a-u_w \quad (2)$$

単調載荷試験では供試体を三軸試験機にセット後、飽和させ予圧密を行い、 $B$  値 0.95 以上を確保する。 $p'=100kPa$  で圧密を行った後、供試体上部から空気圧を載荷して脱水させる加圧板法を行い、所定のサクシオンで不飽和化を行う。その後、所定のせん断速度で非排気非排水せん断を行う。アクティブ制御でのせん断の場合、供試体上部へのバルブを開け、第 5 項での制御を行う。

繰返し載荷試験では脱水工程がないため、飽和用のペDESTALを用いている。供試体をセット後、背圧載荷を行い  $u_a=300kPa$  まで載荷し、 $p'=100kPa$  で圧密を行った後、所定のせん断速度で非排気  $P$  (平均主応力) 一定繰返しせん断を行う。アクティブ制御でのせん断の場合、供試体上部へのバルブを開け、第 5 項での制御を行う。

試験ケースを Table.6.3 に示す。

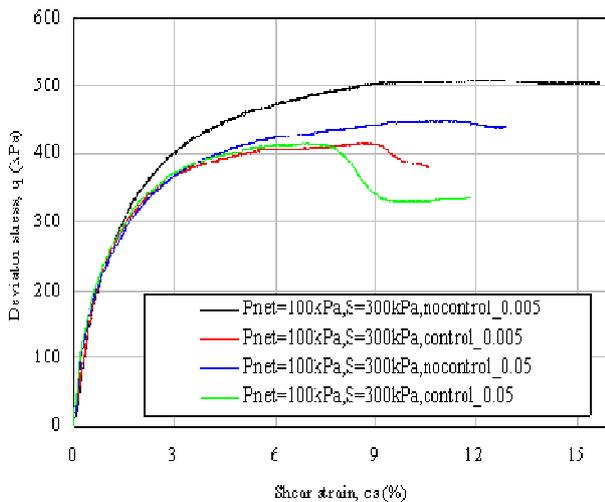
Table.6.3 試験条件 ( $P_{net}=100kPa$ )

条件	試料	初期サクシオン(kPa)	せん断速度 (mm/min)	非排気制御
単調載荷	米山粘性土 (不飽和)	300	0.05	なし あり
			0.005	なし あり
	豊浦砂 (不飽和)	10	0.1	なし あり
			0.00625	なし あり
繰返し載荷	豊浦砂 (完全乾燥砂)	$u_a=300$	0.012 (振幅 $q=50kPa$ 100 サイクルで終了)	なし あり

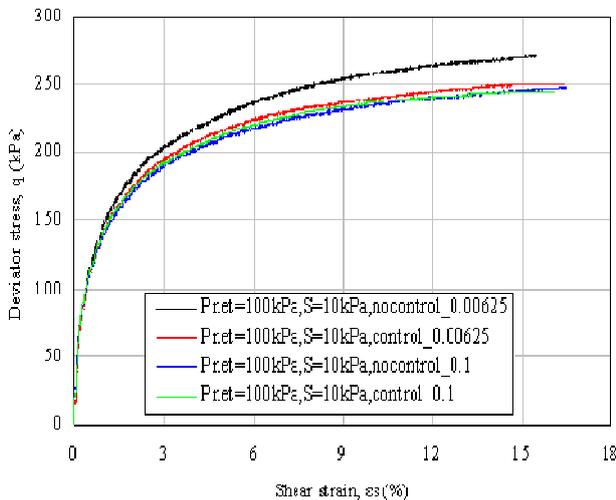
## 7. 非排気非排水単調載荷試験結果・考察

最初に非排気非排水単調載荷試験の結果について述べる。図中では制御なしを nocontrol, 制御ありを control と表示している。

Fig.7.1 に軸差応力 - せん断ひずみ関係図, Fig.7.2 に軸差応力 - 平均基底応力の関係図, Fig.7.3 に体積ひずみ - せん断ひずみ関係図, Fig.7.4 に間隙空気圧 - せん断ひずみ図, Fig.7.5 にサクシオン - せん断ひずみ関係図を示す。



(a) 不飽和粘性土非排気非排水単調載荷試験

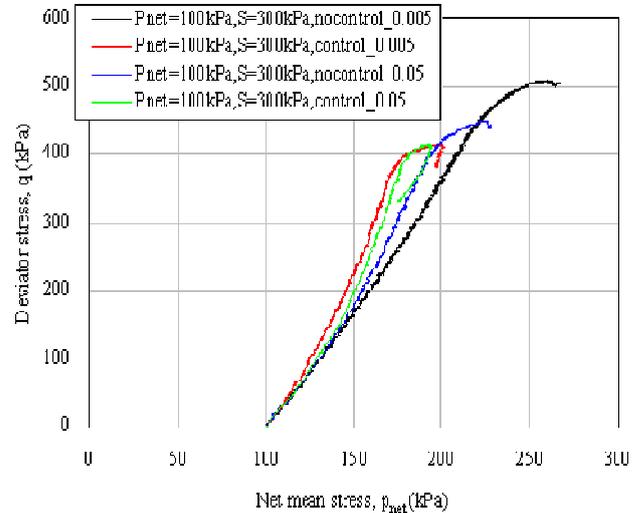


(b) 不飽和砂質土非排気非排水単調載荷試験

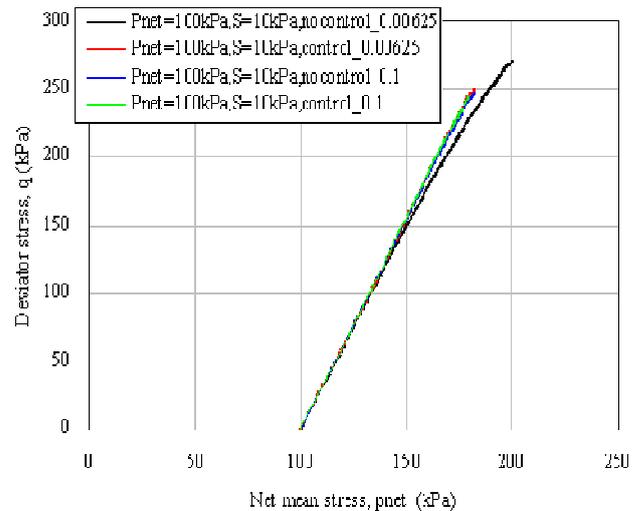
Fig.7.1 軸差応力 - せん断ひずみ関係図( $q - \epsilon_s$ )

Fig.7.1 より, 制御なしの低速度せん断(せん断速度 0.005, 0.00625mm/min)のケースが他ケースに比べ軸差応力  $q$  が大きく出ているのが分かる。ま

た, 制御ありの両ケースと制御なしの高速せん断(0.05, 0.1mm/min)はほぼ同一の挙動を示している。このことから, アクティブ制御はせん断速度の違いによる影響がないと言える。



(a) 不飽和粘性土非排気非排水単調載荷試験

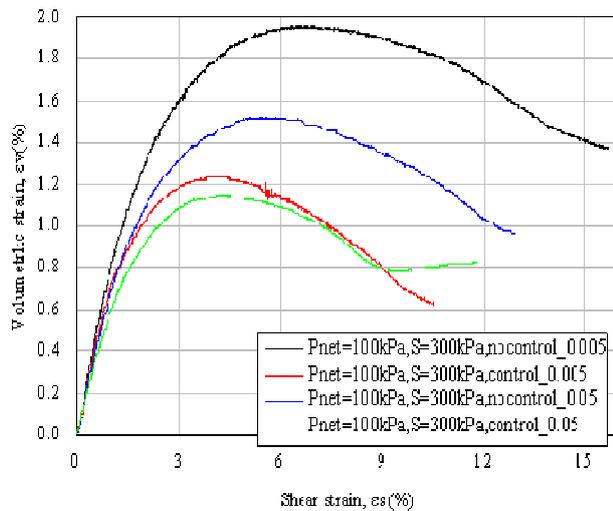


(b) 不飽和砂質土非排気非排水単調載荷試験

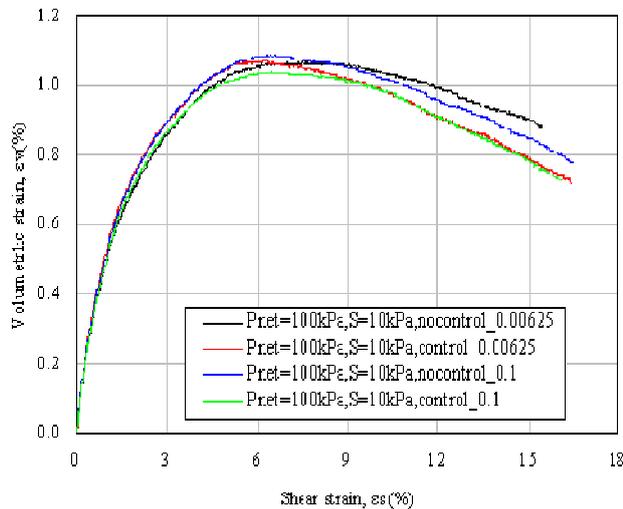
Fig.7.2 軸差応力 - 平均基底応力の関係図( $q - p_{net}$ )

低速度せん断(0.005, 0.00625mm/min)の制御なしのケースが他のケースに比べ  $q$  が大きく出ているのが分かる。これは  $u_a$  が低下し  $P_{net}(=P' - u_a)$  が上昇したためであると考えられる。  $P_{net}$  上昇により原地盤でいう土圧が高い状態となり, 供試体が過剰に拘束され本来の強度より過剰に値が出たと考えられる。 Fig.7.2(a)では制御なしの高速せん断

ん断と制御ありの両ケースに若干の開きがあるのに対し、Fig7.2(b)では制御なしの低速度せん断以外のケースは結果が同じとなっている。これは、Fig7.2(a)での高速度せん断のせん断速度が0.05mm/minに対し、Fig7.2(b)の高速度せん断のせん断速度が0.1mm/minによるせん断時間の違いによるものだと考えられる。0.05mm/minだと間隙空気圧  $u_a$  がメンブレンを透過して内セル水に溶け込んでしまう現象が起きたと考えられる。



(a) 不飽和粘性土非排気非排水単調載荷試験

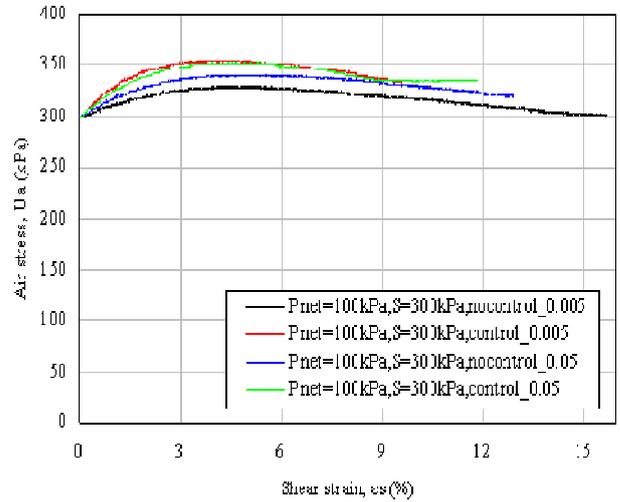


(b) 不飽和砂質土非排気非排水単調載荷試験

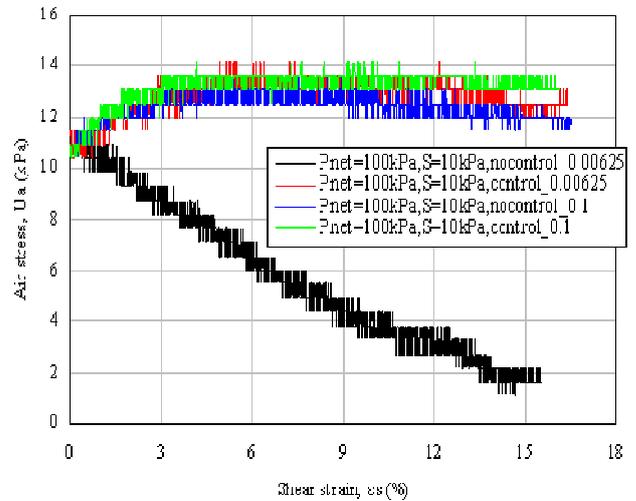
Fig7.3 体積ひずみ - せん断ひずみ関係図 ( $\epsilon_s - \epsilon_v$ )

Fig7.3 より、制御ありの2ケースは似たような結果となった。アクティブ制御により間隙空気圧  $u_a$  が同様に保たれ、体積ひずみが同一の変化をし

たとえられる。制御なしの2ケースは間隙空気が内セルに溶け込んだ分体積が減少しており、またせん断による空気の体積変化により体積ひずみ  $\epsilon_v$  が制御ありの2ケースより大きく表れていると考えられる。



(a) 不飽和粘性土非排気非排水単調載荷試験

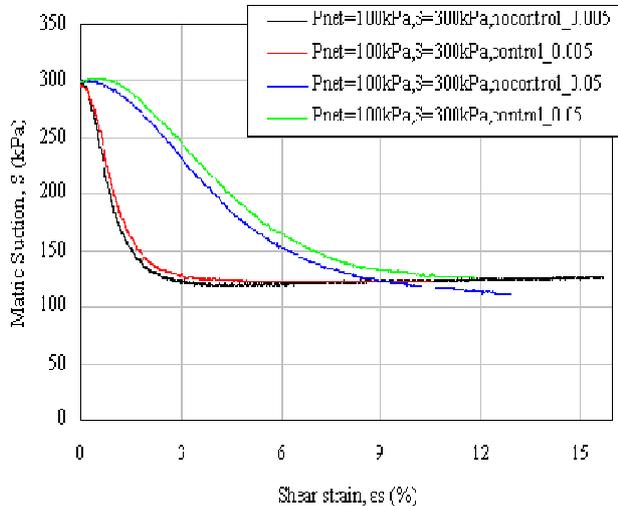


(b) 不飽和砂質土非排気非排水単調載荷試験

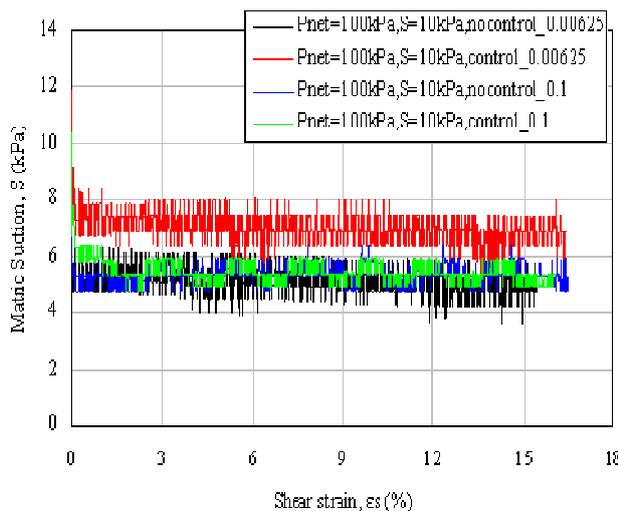
Fig.7.4 間隙空気圧 - せん断ひずみ図 ( $u_a - \epsilon_s$ )

Fig.7.4 より制御なしの低速度せん断の間隙空気圧  $u_a$  の低下は確認できる。Fig.7.4(a)では制御なしの高速度せん断でも間隙空気圧  $u_a$  の低下が起きていることが見て取れる。また、Fig.7.4(b)より、制御なしの高速度せん断では間隙空気圧  $u_a$  の低下が確認されておらず、非排気状態であると言える。制御ありのケースは、非排気状態である制御

なしの高速せん断と同一の結果でどれも同じ軌跡を描いており、せん断速度によらず同一の結果が出ていることから、アクティブ制御は上手く出来ており、非排気状態であると考えられる。



(a) 不飽和粘性土非排気非排水単調載荷試験



(b) 不飽和砂質土非排気非排水単調載荷試験

Fig7.5 サクシオン - せん断ひずみ関係図(s- $\epsilon_s$ )

Fig.7.5(b)ではサクシオンはほぼ同じ値となっているが、Fig.7.5(a)ではせん断速度の違いによる影響が見て取れる。Fig.7.5(a)ではサクシオンは最終的にほぼ同値となるが、それまで値に開きが出ている。これは不飽和用ペDESTALの圧の伝わり方が影響しているのではないかと考えられる。粘性土用ペDESTALは AEV 値が高いセラミックディスクを使用しているため、計測機器への間隙水圧

$u_w$  の伝達が遅かったためと考えられる。サクシオンは間隙空気圧  $u_a$  と間隙水圧  $u_w$  の差で求められる。どの程度のせん断速度で行えば間隙水圧  $u_w$  伝達の遅延がなく、サクシオンを正確にはかれるのか、次項にて述べる。

## 8. AEV 値の高い不飽和土用ペDESTALによる間隙水圧伝達の遅延

不飽和粘性土非排気非排水単調載荷試験では AEV=400kPa の高い AEV 値のセラミックディスクを使用している。AEV 値が高い場合、圧の伝達に遅延が生じる。

せん断速度が速い場合は間隙水圧の変化が早く、AEV 値の高い不飽和土用ペDESTALの場合、正確な間隙水圧を測定することが困難であると考えられる。逆にせん断速度が十分遅くなると、間隙水圧の変化が遅く、正確な間隙水圧が測定できると思われる。以上の事を証明するために AEV 値 400kPa の不飽和粘性土用ペDESTALを用いて米山粘性土非排気非排水条件の三軸圧縮試験を行った。試験ケースは S=300kPa, Pnet=100kPa にてアクティブ制御ありのせん断速度 0.0025mm/min を実施し、不飽和粘性土非排気非排水条件三軸圧縮試験のサクシオンとせん断ひずみの関係で比較を行った。Fig.8.1 に比較図を示す。

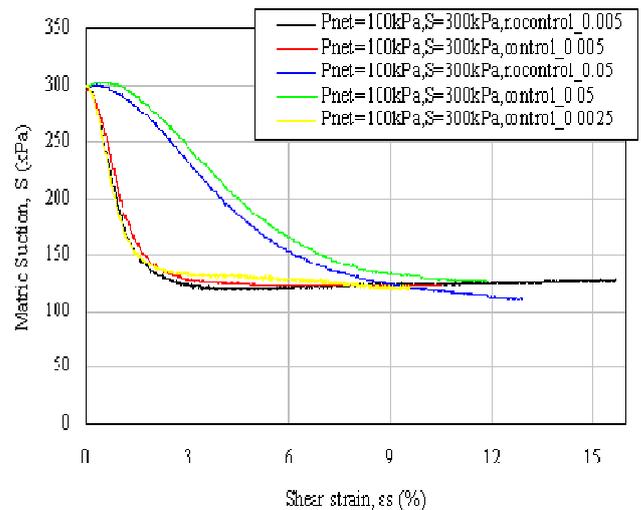


Fig.8.1 せん断速度によるサクシオンの変化

せん断速度 0.005mm/min のケースとアクティブ制御ありのせん断速度 0.0025mm/min のケースはほぼ同等の軌跡を描いている。高速度せん断のケースと比べると開きがないのがわかる。高速度せん断だとセラミックディスクの圧伝達遅延の影響によるサクションが低速度せん断と比べて高いのが見て取れる。AEV 値が高い不飽和用ペダスタルを用いてサクションを測定する場合はせん断速度を遅くする必要があることが分かった。本試験の場合はせん断速度 0.005mm/min 以下でサクションを正確に測定できるということが言える。

### 9. 非排気非排水 P 一定繰返し载荷試験試験結果・考察

非排気非排水 P 一定繰返し载荷試験の結果について述べる。不飽和での繰返し試験では、せん断ひずみごとに側圧が変化してしまう。地震時の地盤内は拘束圧が一定で、横揺れが作用しているとすると、 $P=(P'+u_a)$ 一定とすることでせん断応力のみを载荷し、地震時の地盤内を再現できる。

図中では制御なしを nocontrol, 制御ありを control と表示している。

Fig.9.1 に軸差応力 - せん断ひずみ関係図, Fig.9.2 に軸差応力 - 平均基底応力の関係図, Fig.9.3 に体積ひずみ - せん断ひずみ関係図, Fig.9.4 に間隙空気圧 - せん断ひずみ図を示す。

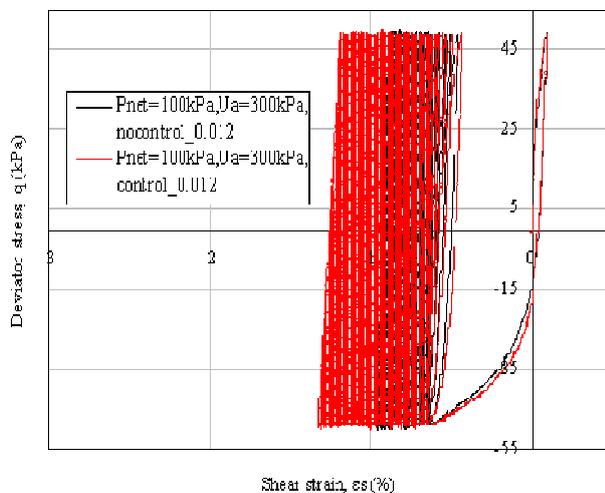


Fig.9.1 軸差応力 - せん断ひずみ関係図( $q - \epsilon_s$ )

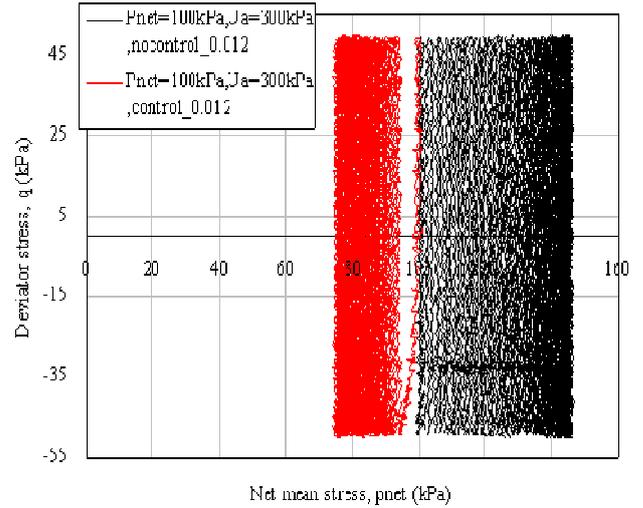


Fig.9.2 軸差応力 - 平均基底応力の関係図( $q - p_{net}$ )

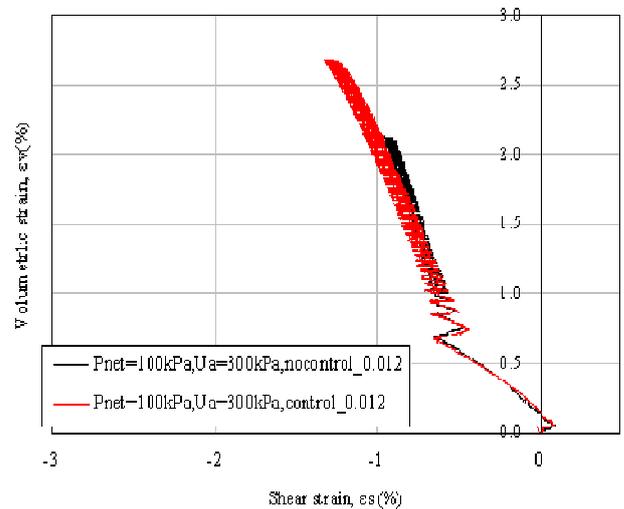


Fig.9.3 体積ひずみ - せん断ひずみ関係図( $\epsilon_s - \epsilon_v$ )

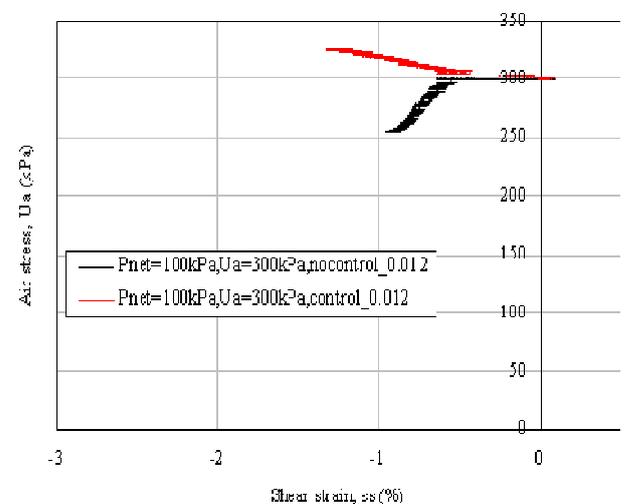


Fig.9.4 間隙空気圧 - せん断ひずみ図( $u_a - \epsilon_s$ )

Fig.9.1 より、制御なしはせん断が進むにつれ、せん断ひずみの進展が小さくなっているのが分かる。単調载荷同様、 $P_{net}$  上昇が原因であると考えられる。

Fig.9.2 より、初期挙動は合ってるがせん断が進むにつれずれているのがわかる。制御なしは  $P_{net}$  が上昇していくのに対し、制御ありは  $P_{net}$  が低下している。制御なしのケースでは  $u_a$  が低下しているので  $P_{net}$  が高くなっていると考えられ、制御ありのケースでは空気の漏れが起きないために  $u_a$  が上昇して  $P_{net}$  が低くなったと考えられる。

Fig.9.3 より、初期挙動は同じであるが、せん断が進むにつれて制御なしのケースに比べて制御ありのケースは体積ひずみが大きく出ているのが見て取れる。制御なしはせん断が進むにつれて供試体強度が上がり、体積ひずみが制御ありに比べて値が小さく表れていると考えられる。

Fig.9.4 より、両ケースともある一定のせん断ひずみまでは同じ間隙空気圧  $u_a$  となっているが、せん断が進むにつれ制御ありのケースは間隙空気圧  $u_a$  が上昇、制御なしのケースは間隙空気圧  $u_a$  が低下している。制御なしのケースにおいてはアクティブ制御がないため、間隙空気圧  $u_a$  が空気漏れのため低下していると考えられる。初期においては、 $u_a$  は変化しないが、空気漏れのと空気圧縮による分が釣り合っただけで変化がないと考えられる。制御ありのケースはアクティブ制御により、空気漏れ分の間隙空気圧  $u_a$  と供試体の体積変化による間隙空気圧  $u_a$  の変化分が制御されており、間隙空気圧  $u_a$  が上昇したと考えられる。ゆるい砂であるので、この間隙空気圧  $u_a$  の上昇が、原地盤内の挙動である。

## 9. 結論

以下に実験から得られた結論を列挙する。

① 空気圧-せん断ひずみ関係図をみると、アクティブ制御なしの低速度せん断の長時間かかる試験では試験開始前と開始後では間隙空気圧

$u_a$  が低下しているのが分かった。

- ② 空気圧-せん断ひずみ関係図をみると、アクティブ制御なしの高速度せん断でも若干ながら間隙空気圧  $u_a$  の減少が起きていた。
- ③ 全試験の応力-せん断ひずみ図、軸差応力 - 平均基底応力の関係図、体積ひずみ-せん断ひずみ図を見て分かるように、間隙空気圧  $u_a$  が低下することにより  $P_{net}$  が高くなり、供試体強度が上がっているのが分かった。
- ④ 全試験の体積ひずみ-せん断ひずみ図より、アクティブ制御なしの低速度せん断は間隙空気がメンブレンを透過し、内セル水へ浸透することによる間隙空気圧  $u_a$  が減少し、 $P_{net}$  が高くなり、体積ひずみが大きく出る。アクティブ制御なしの高速度せん断も間隙空気がメンブレンを透過し、内セル水へ浸透することによる間隙空気圧  $u_a$  の減少による体積変化が若干起きており、体積ひずみがアクティブ制御ありのケースに比べて大きい。
- ⑤ 間隙空気圧  $u_a$  と間隙水圧  $u_w$  はアクティブ制御の影響を受けて大きく変化するが、サクションの変化は小さい。
- ⑥ 不飽和粘性土の非排気非排水三軸圧縮試験の間隙水圧  $u_w$  は、不飽和ペDESTALにおける水圧伝播速度の影響が出ている。AEV 値が高い不飽和用ペDESTALを用いる場合は、せん断速度を遅くする必要がある。