

# 排気・排水条件を制御した不飽和シルトの三軸圧縮試験

名城大学 正会員 小高 猛司

大阪ガス 正会員 鈴木 宏尚

京都大学 正会員 岡 二三生

## 1. はじめに

地盤材料は一般に、土粒子骨格およびその間隙を埋める空気と水から成る多相混合体であり、その置かれている環境により土の性質は複雑に変化する。多くの地盤工学的問題は不飽和地盤で発生しており、その力学特性の解明が要求されている。本論文では、まず等方応力条件下で所定のサクションを作用させる排水／吸水過程における圧縮特性を調べた。そして、初期サクションおよび拘束圧の影響を調べるために排気・排水三軸圧縮試験を行い、その力学特性について考察した。さらに、地震や斜面崩壊等の動的挙動が生じる地盤内部、急激な浸透や越流などで十分な排気条件が得られなくなった堤体内部、メタンハイドレート採取時など急激にガス圧が上昇する地盤深部等では、非排気あるいは定体積状態になることも十分予想される。そこで本論文では、間隙流体(間隙空気と間隙水)と土骨格の相互作用およびサクションの影響を把握することを目的として、実際の不飽和地盤の最悪の条件で起こりうる状態を想定して行った三軸圧縮試験についてもその結果を示す。具体的には、先の排気・排水試験の他に、非排気・非排水試験、空気圧制御・非排水試験、定体積・非排水試験も行い、間隙空気圧および間隙水圧の変化やそれに伴う変形挙動について考察した。

## 2. 試験概要

試料には、シルト分が 90% を占め均一な粒径を持つ DL クレーを用いた。そして、含水比が 20% となるよう調整した試料を、内径 50mm の金属パイプと同径のピストンを用いて静的かつ一次元的に圧縮し、高さ 100mm、直径 50mm、初期間隙比 1.14 の締固め供試体を作製した。上記の締固め方法を用いた理由は、JIS A 1210 に定められた突固めによる作製方法では、初期間隙比の揃った均一な供試体を作製することが困難であり、層ごとの密着性が弱いためである。また、本試験では、供試体の側方変位を計測するためにギャップセンサーをセル内に設置し、体積変化を測定した。間隙空気圧と間隙水圧は、供試体上部にポリプロピレンフィルターを、下部にセラミックディスク(AEV 200kPa)付きのペダスタルを用いることにより分離して測定した。さらに、本研究では、非排気条件下において間隙空気圧をより正確に測定するため、写真 1 に示すように供試体上部のキャップに間隙空気圧計および空気作動式バルブを取り付け、セル内で計測している。また、空気作動式バルブは空気圧により開閉を制御できるため、非排気試験時にはセル外からバルブを制御し間隙空気の出入りを遮断した。

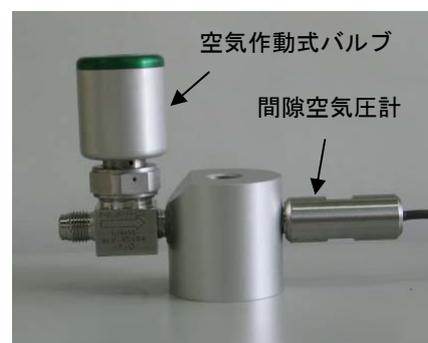


写真 1 間隙空気圧計測部

## 3. 応力変数

本研究で用いている応力変数は、平均化骨格応力<sup>1)</sup>である。平均化骨格応力とは、多孔質媒体理論(TPM)に基づいて気相と液相をそれぞれ一つの流体とみなし、骨格とその間隙を流れる流体の分応力から求められる平均間隙圧によって定義される応力であり、式(1)で定義される。ここで、 $P^f$  は平均間隙圧、 $u_a$  は間隙空気圧、 $u_w$  は間隙水圧、 $S_r$  は飽和度、 $\sigma_{ij}$  は全応力、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij}, \quad P^F = S_r u_w + (1 - S_r) u_a \quad (1)$$

#### 4. 排水／吸水過程

供試体を試験装置に設置した後、排気・非排水状態でセル圧を 20kPa 与えることにより初期拘束圧を与えた。そして、等方応力状態を保ちながら、非排水状態でセル圧と間隙空気圧を同時にそれぞれ 270kPa と 250kPa まで上昇させる。このとき計測した間隙水圧は約 230kPa であるため、供試体の初期サクシオンは約 20kPa となる。

排水／吸水過程では、閉じていた排水経路のバルブを開け、所定の間隙水圧を与えることによりサクシオンを作用させた。本研究では、全ての供試体で間隙空気圧は 250kPa としており、間隙水圧を制御することにより所定の初期サクシオン ( $s = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150\text{kPa}$ ) を与えている。また、排水／吸水過程を開始した 15 分後にセル圧を 450kPa まで上昇させることにより、所定の拘束圧を与えた。なお、拘束圧による影響を調べる試験も行うために、別途セル圧を 350kPa あるいは 650kPa とする実験も実施した。すべての場合を通して、排水／吸水過程における拘束圧およびサクシオンの作用は、24 時間で終了とした。

図 1 にセル圧が 450kPa の場合の排水／吸水過程における排水／吸水量および体積ひずみの経時変化を示す。図 1(a) に示す排水／吸水量では、供試体の初期サクシオン約 20kPa より大きいサクシオンを作用させた場合は排水挙動を、小さいサクシオンを作用させた場合は吸水挙動を示している。また、図 1(b) に示す体積ひずみの経時変化では、初期段階に拘束圧の上昇により急激に体積ひずみが生じている。その後、排水挙動を示すサクシオン 20kPa 以上の場合は体積変化が生じないのに対し、吸水挙動を示すサクシオン 0, 10kPa の場合は徐々に体積ひずみが増加していることがわかる。これは、初期サクシオン約 20kPa から、吸水により 10kPa あるいは 0kPa までサクシオンが解放され、飽和コラプスが生じたためだと考えられる。なお、サクシオン 0kPa を 24 時間作用させた後の飽和度は約 70% であり、不飽和状態である。

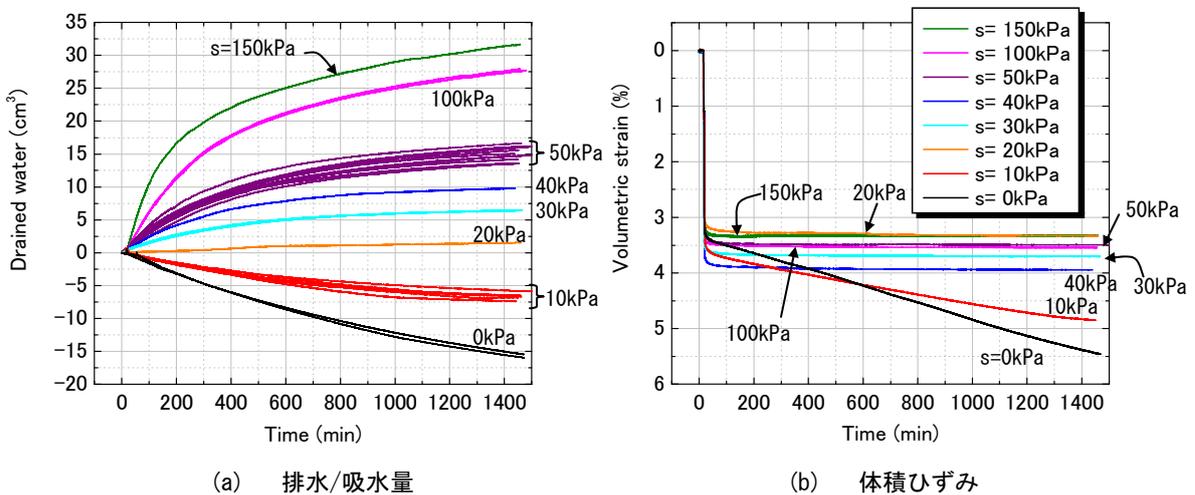


図 1 排水／吸水過程

#### 5. 排気・排水せん断試験結果

初期サクシオンおよび拘束圧の異なる条件で、排気・排水せん断試験を行った。まず、拘束圧を 200kPa、ひずみ速度を 0.05%/min とし、初期サクシオン 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150kPa で排気・排水せん断試験を行い、初期サクシオンによる影響を調べた。

図 2 に試験結果を示す。図 2(a) に示す軸差応力～軸ひずみ関係において、サクシオン 0, 10kPa での軸差応力には差が生じていないが、サクシオンが大きくなるにつれて同一軸ひずみに対する軸差応力が大きくなっている。また、軸ひずみ 5% まではサクシオンによる影響が顕著であり、挙動に大きな違いが見られるが、

軸ひずみ 10%以降では大きな違いは見られない。図 2(b)に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係では、全てのサクシオンで体積は圧縮挙動を示している。側方ギャップセンサーで計測した体積ひずみはサクシオン 0, 10kPa でほぼ同じであり、サクシオンが大きくなると同一軸ひずみに対する体積ひずみは減少している。また、ビュレットで計測した排水量は、サクシオン 30kPa 以上では排水挙動を示しているのに対し、サクシオン 0, 10, 20kPa では体積が圧縮しているにもかかわらず吸水挙動を示している。これは、せん断に伴い土粒子骨格や間隙が変化することにより、供試体内部の水分特性(サクシオン)が変動したためだと考えられる。なお、図中に示す排水量とは、全体積に占める排水量の割合を意味する。

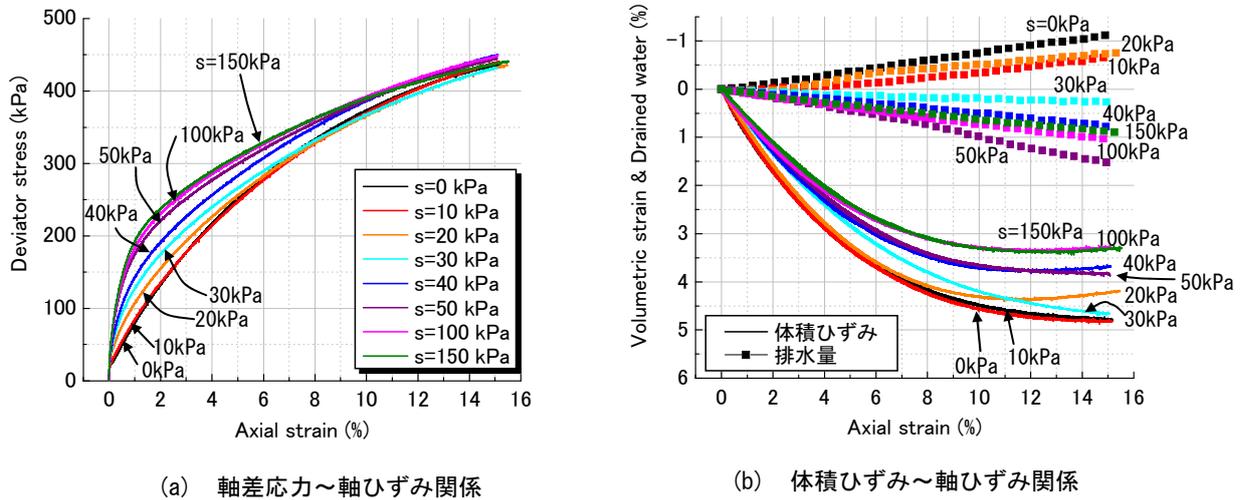


図 2 排気・排水せん断試験結果 (初期サクシオンの影響)

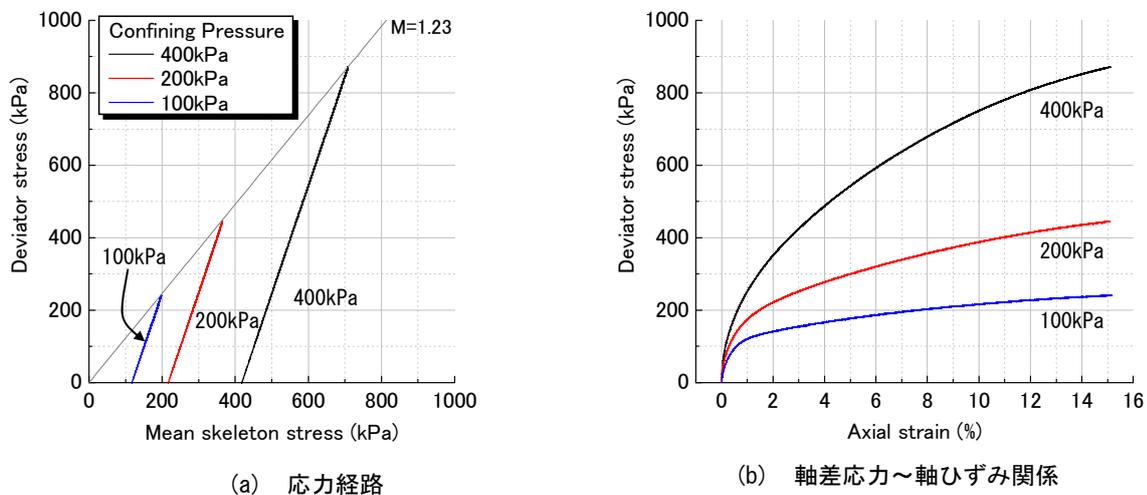
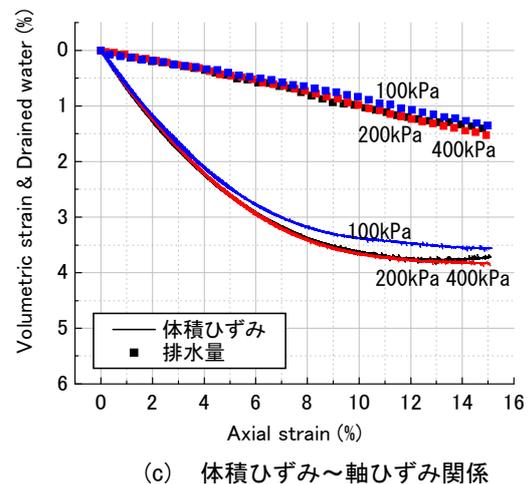


図 3 排気・排水せん断試験結果 (拘束圧の影響)

次に、初期サクシオンを 50kPa、ひずみ速度を 0.05%/min とし、650kPa, 450kPa, 350kPa の 3 種のセル圧で排気・排水せん断試験を行い、拘束圧の違いによる影響を調べた。図 3 に試験結果を示す。図 3(a)に示す応力経路において、それぞれの拘束圧における最終応力点を結ぶと直線になり原点を通過している。このため、不飽和土の力学

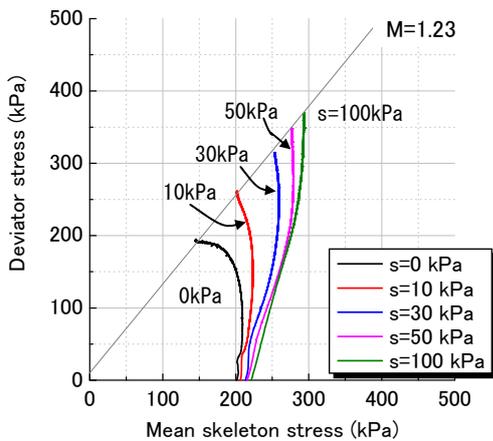


挙動は平均化骨格応力を用いたモデルで統一的に表現できる可能性を示唆している。図 3(b)に示す軸差応力～軸ひずみ関係において、拘束圧が大きいほど同一軸ひずみに対する軸差応力が大きくなっている。図 3(c)に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係では、体積ひずみ、排水量のいずれにおいても拘束圧 200, 400kPa ではほぼ同量であり、拘束圧 100kPa に比べ僅かに大きくなっている。以上のことから、体積ひずみおよび排水量は拘束圧による影響をあまり受けず、初期サクシオンに依存していると考えられる。

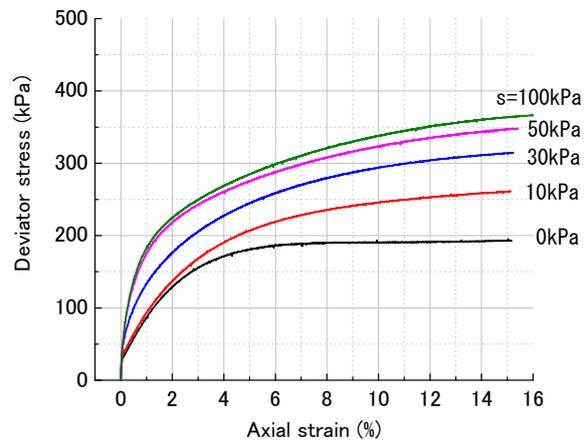
## 6. 非排気・非排水せん断試験結果

本章以降に示す全ての試験においては、セル圧は 450kPa、間隙空気圧は 250kPa、間隙水圧は所定の初期サクシオンに応じた圧力を作用させて、24 時間の排水/吸水過程を行った。その後、間隙空気を様々な条件で制御し、ひずみ速度 0.5%/min で非排水せん断試験を行った。

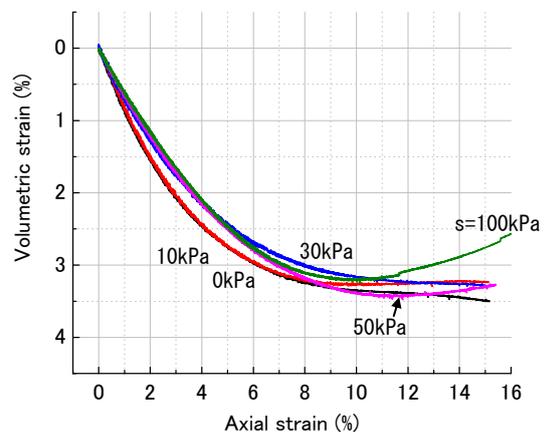
図 4 に初期サクシオンが 0, 10, 30, 50, 100kPa の供試体を用いて行った非排気・非排水せん断試験結果を示す。図 4 (a)に示す応力経路では、サクシオンが大きくなるほど、同一軸差応力に対する平均骨格応力の減少量が小さくなっている。また、それぞれのサクシオンでの最終応力点を結んだ線は直線となり、約 10kPa の切片を持つことがわかる。図 4 (b)に示す軸差応力～軸ひずみ関係では、サクシオンが大きいほど同一軸ひずみに対する軸差応力が小さくなっており、またサクシオン 10kPa と 50kPa では強度に大きな差が生じていることがわかる。図 4 (c)に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係では、サクシオンが大きいほうが同一軸ひずみでの体積ひずみが小さくなっており、サクシオン 0, 10kPa と 30, 50, 100kPa では挙動に違いが生じている。図 4 (d)に示す間隙空気圧～軸ひずみ関係では、サクシオンが小さく飽和度が高いほど、同一軸ひずみに対する



(a) 応力経路

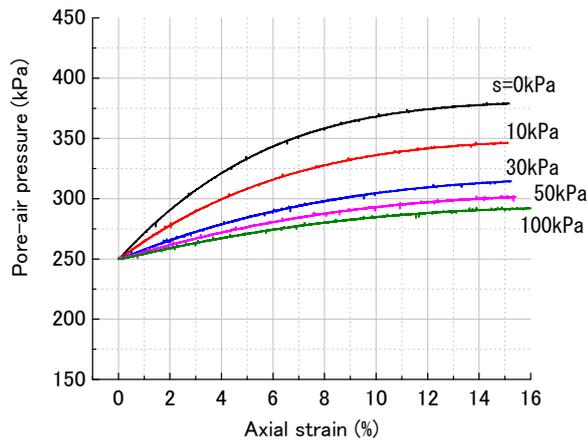


(b) 軸差応力～軸ひずみ関係

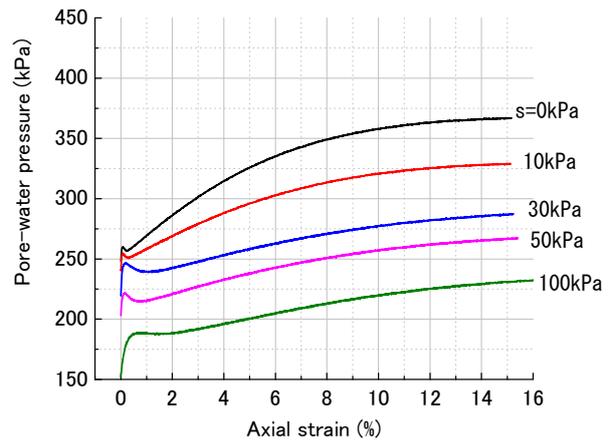


(c) 体積ひずみ～軸ひずみ関係

図 4 非排気・非排水せん断試験結果



(d) 間隙空気圧～軸ひずみ関係



(e) 間隙水圧～軸ひずみ関係

図4 非排気・非排水せん断試験結果 (続き)

る間隙空気圧は大きくなっている。これは、サクシオンによらずほぼ同一の骨格変形が発生するが、初期の飽和度が高い場合には間隙中に含まれる間隙空気の体積が小さいため、空気の圧縮率が大きくなり間隙空気圧が大きくなるからである。図4(e)に示す間隙水圧～軸ひずみ関係では、せん断初期に急激に間隙水圧が上昇した後、一旦減少し再び増加に転じる。このメカニズムは、供試体の緩詰め構造によりせん断開始直後に土骨格が急激に圧縮し間隙水圧が急増しているが、間隙空気の存在により緩和され減少しているものと考えている。

## 7. 空気圧制御および定体積・非排水せん断試験結果

空気圧制御・非排水せん断試験は、ガス圧が急激に上昇する状況等を想定した試験であり、供試体上部から送り込む間隙空気圧を一定の上昇速度で制御した。また、実際の不飽和地盤において最も危険な状態を調べるため、間隙空気が圧縮しない条件、すなわち定体積条件で非排水せん断試験する実験も行った。なお、定体積試験は、空気圧を制御することにより体積を一定に保つという意味で、特殊な条件下での空気圧制御試験である。

図5に初期サクシオン 50kPa、ひずみ速度 0.5%/minでの試験結果を示す。比較のため、排気・排水試験、非排気・非排水試験結果を合わせて示す。空気圧制御試験では、図5(c)の間隙空気圧～軸ひずみ関係に示すように、430kPaを上限として5, 10, 20kPa/minの3種類の上昇速度で空気圧を制御した。また、定体積試験ではせん断中の体積が一定となるよう間隙空気圧を制御した。図5(a)に示す応力経路において、非排気・非排水試験に比べ、空気圧を制御する試験では間隙空気圧の上昇速度が大きいほど、同一軸差応力に対する平均骨格応力の減少量が大きく、最大軸差応力も小さくなっている。図5(b)に示す軸差応力～軸ひずみ関係では、空気圧の上昇速度が大きいほど、同一軸ひずみに対する軸差応力が減少しており、また軸差応力が最大となる軸ひずみが小さくなっている。そして、非排気試験ではひずみ硬化挙動を示すのに対し、空気圧を制御した試験ではひずみ軟化挙動を示している。図5(d)に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係では、間隙空気圧が大きいほど同一軸ひずみに対する体積ひずみが小さくなっている。すなわち、間隙圧が増加することにより体積圧縮が抑制されており、定体積条件に近づくものと考えられる。以上のことから、例えば、メタンハイドレートの分解に伴うガス圧上昇のように間隙圧が増加する場合は、最大軸差応力が減少しひずみ軟化挙動を示す可能性があるため、地盤のせん断強度が急激に低下し地盤の大変形が生じる危険性が示唆される。

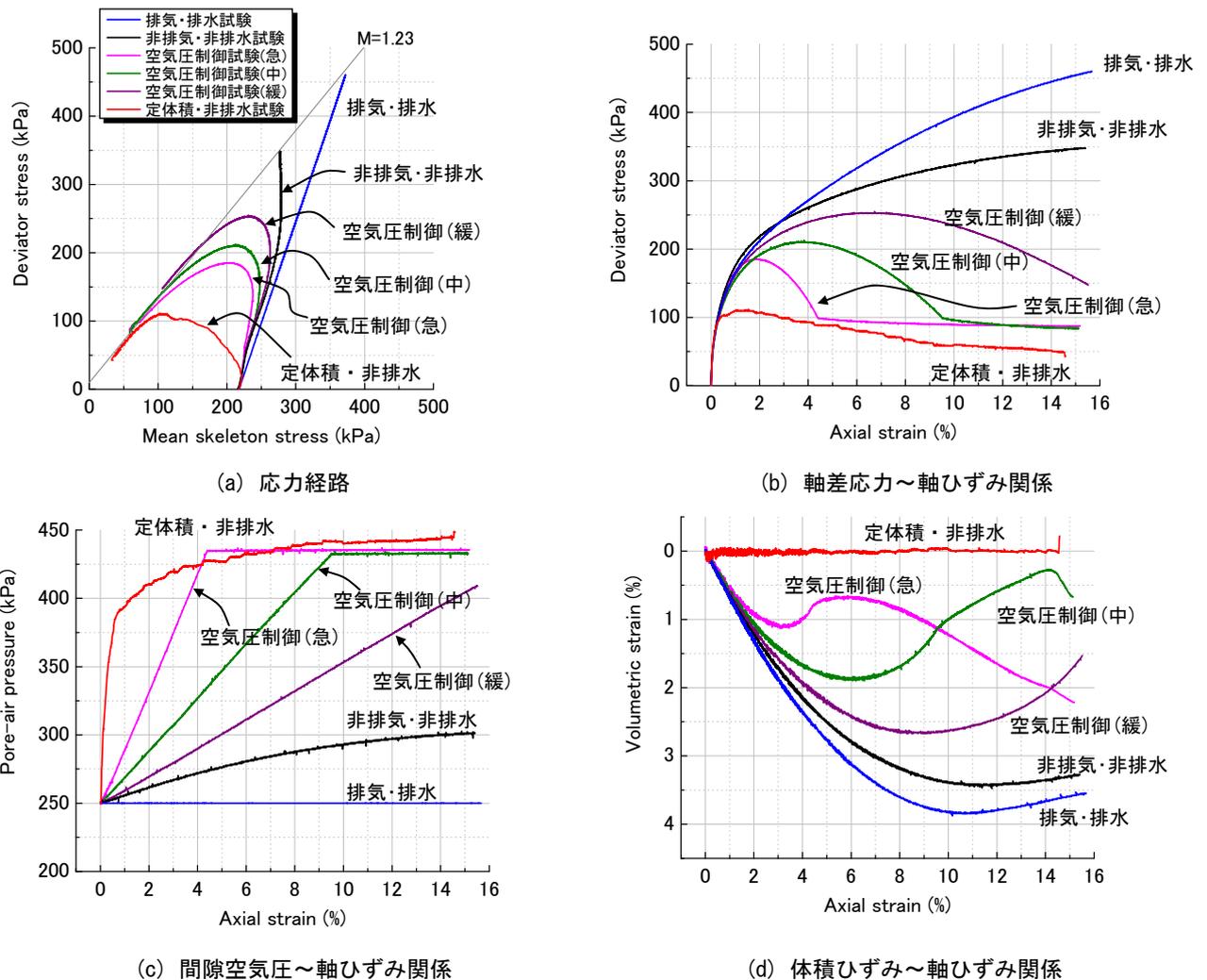


図2 空気圧制御および定体積・非排水せん断試験結果

## 8. まとめ

排気・排水条件下では、初期サクシオンが大きいほうが同一軸ひずみに対するせん断強度が大きく体積ひずみも小さくなることがわかった。そして、せん断に伴う供試体内部の水分特性の変化により、初期サクシオンが小さい場合には体積が圧縮するにもかかわらず吸水挙動を示した。しかし、拘束圧による体積ひずみおよび排水量に対する影響は小さく、初期サクシオンに依存していると考えられる。

一方、間隙流体（間隙空気と間隙水）と土骨格の相互作用およびサクシオンの影響を把握することを目的として、土骨格～間隙空気～間隙水相互作用の様々な条件下で三軸圧縮試験を行った。その結果、非排気・非排水試験では、供試体の緩詰め構造により土骨格の急激な体積圧縮が生じるため、せん断開始直後に間隙水圧が急増するが、間隙空気の存在により減少するといった不飽和土特有の挙動が見られた。また、非排気試験および空気圧制御試験では、排気・排水試験に比べせん断強度が低下した。特に、排気試験および非排気試験ではひずみ硬化挙動を示すのに対し、空気圧を上昇させる試験では最大軸差応力が減少する上、ひずみ軟化挙動を示すことから、非常に不安定な状態になることがわかった。最後に、本研究では応力変数として平均骨格応力を用いたが、いずれの試験結果においても破壊応力比が一定となり、不飽和土の力学挙動が平均化骨格応力を用いたモデルで統一的に表現できる可能性が示唆された。

参考文献：1) Jommi, C. : Remarks on the constitutive modeling of unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Tarantino, A. and Mancuso, C. eds., Balkema, 139-153, 2000.