

異方応力を載荷した不飽和砂質土の吸水に伴う 変形について

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF UNSATURATED SANDY SOIL UNDER ANISOTROPIC STRESSES DUE TO ABSORPTION

笹原 克夫¹

Katsuo SASAHARA

¹高知大学教育研究部自然科学系 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

E-mail: sasahara@kochi-u.ac.jp

Key Words: unsaturated sandy soil, collapse, shear stress, volumetric water content

1. はじめに

降雨浸透に伴う斜面崩壊発生予測手法の一つとして、地表面変位や地中変位を計測し、崩壊直前の加速段階の変位データの解析から崩壊発生時刻の予測を行う手法¹⁾²⁾がある。これらの方法は実斜面や、模型斜面の人工降雨による崩壊実験などにおける、崩壊直前の斜面の変位速度が加速的に増加する段階のデータをもとに作成した、実験式であり、斜面内の応力や降雨強度などの力学的条件を考慮した方法ではない。実際の斜面においては、崩壊前の降雨強度は時々刻々変化し、それに伴って斜面内の水分量なども変化する。このように斜面内の水分条件が時間と共に、非定常に、変化する斜面の変形を予測するためには、降雨浸透に伴う不飽和土の吸水によるせん断変形を力学的にモデル化する必要がある。

斜面中の土の降雨浸透に伴う吸水によるせん断について検討するには、せん断応力の作用する状態で、不飽和土のサクシオンを減少させ、土に吸水させる試験を行う必要がある。そのために筆者は、供試体の間隙水圧と間隙空気圧を独立に載荷してサクシオンを制御できる、サクシオン制御式不飽和三軸圧縮試験装置を用いて、異方応力条件下の不飽和砂質土の供試体のサクシオンを段階的に除荷し、せん断応力の載荷された供試体に吸水させる「サクシオン除

荷試験」を行ってきた³⁾⁴⁾⁵⁾。

しかし実際の斜面内の土はサクシオンの除荷により吸水を行うわけではなく、降雨浸透により強制的に水が供給される。よって「サクシオン除荷試験」は実際の降雨浸透に伴う斜面内の土の吸水変形を再現しているかどうかは疑問である。

このため本研究では、異方応力を載荷した不飽和砂質土のサクシオンを段階的に除荷していく「サクシオン除荷試験」と、不飽和砂質土の供試体に吸水圧をかけて強制的に吸水させる「吸水試験」を実施する。そして吸水に伴う不飽和砂質土の圧縮・せん断変形特性を把握すると共に、「サクシオン除荷試験」と「吸水試験」の差異を検討することとする。

2. 試験方法

(1) 試験材料

試験に用いた土は、いわき硅砂(1.4mm~10mm)、東北硅砂(75 μ m~1.0mm)、藤の森粘土(75 μ m未満)を、混合し、 $D_{50}=0.5$ mm、 $U_c=244.4$ とした。粒度分布は図-1の通りである。供試体作成時の間隙比は、砂の最大・最小密度試験(JIS A-1204)⁶⁾の結果を参考に、最大密度と最小密度のほぼ中間である0.629を目標とした。そして含水比8.5(%)程度を目標に水を加え、混ぜ合わせた後に、静的締固め(JGS

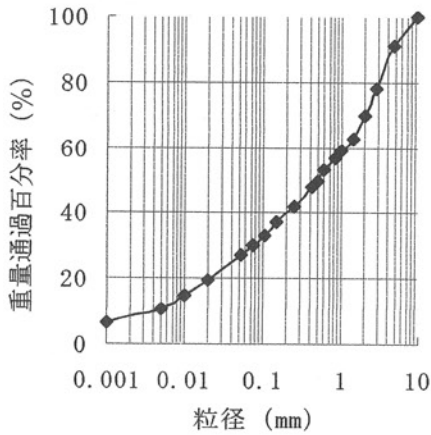


図-1 調整土の粒度分布

0812-2000)⁹⁾により締め固めた。なお含水比については、上記の間隙比で作成した供試体のサクシオン 78.5(kPa)に対応する値を予備試験等により求めた。

(2) 応力・ひずみの定義

本研究では軸対称条件での、不飽和土の体積変化とせん断を対象とする。よって既往の研究事例⁷⁾⁸⁾を参考に、以下に定義する応力、ひずみを用いる。

u_a, u_w : 間隙空気圧, 水圧

$s = u_a - u_w$: サクシオン

σ_a, σ_r : 軸圧, 側圧

$\varepsilon_a, \varepsilon_r$: 軸ひずみ, 側方ひずみ

$\sigma_r - u_a$: 側方基底応力。

$p_{net} (= \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_r) - u_a)$: 平均基底主応力

$q = \sigma_a - \sigma_r$: 軸差応力。

$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$: 体積ひずみ。

$\varepsilon_d = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r)$: 偏差ひずみ。

(3) 試験装置

試験装置としては、供試体への間隙空気圧と間隙水圧を独立に制御して、サクシオンを載荷できる三軸圧縮試験装置を使用した。試験装置の詳細は笹原ら⁹⁾を参照されたい。その特徴としては、二重セル方式で内セルの水面高と、基準水面の水面高さの差を差圧計により読み取り、内セル水面高の変化から供試体の体積変化を求める。そして供試体へのサクシオン載荷は、供試体上部の撥水性ガラスフィルターから正の空気圧を加え、下部のセラミックディスク（空気侵入値 196(kPa)）から間隙水圧を大気圧に解放 ($u_a = 0$ (kPa)) した。供試体の形状は直径 5cm

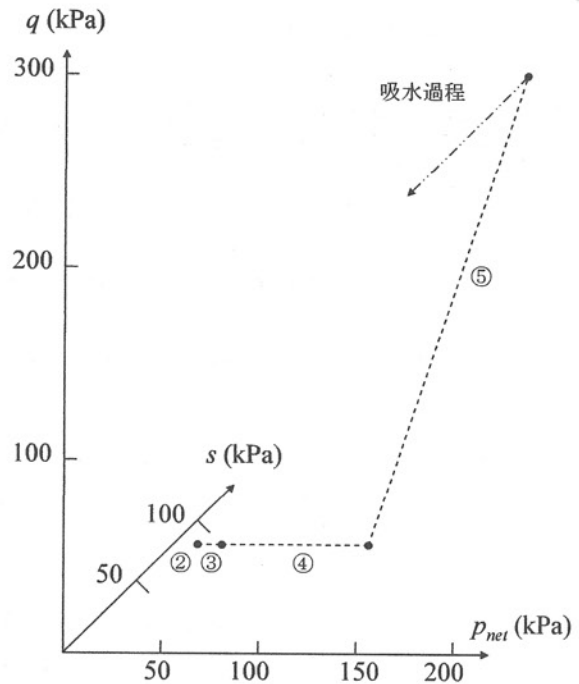


図-2 載荷応力経路図

表-1 予備試験（等方圧縮）における再現性

	ANo.1	ANo.2	SU	ばらつき
$-\Delta e$	0.056	0.038	0.035	0.021
$\Delta \varepsilon_v$ (%)	3.50	2.36	2.16	1.34
$\Delta \varepsilon_a$ (%)	0.14	0.33	0.33	0.19
$\Delta \varepsilon_d$ (%)	-3.36	-2.03	-1.83	1.48
$\Delta \theta$ (%)	0.33	0.70	0.46	0.36
Δw (%)	-0.1	0.2	0.1	0.3

で高さ 10cm の円筒形である。

(4) 応力経路

試験における応力経路について説明する。まず供試体を等方圧縮後、異方応力を載荷する。

- ① 三軸セルへの供試体のセット。
- ② $p_{net} = 9.8$ (kPa), $s = 78.5$ (kPa)を載荷。
- ③ $p_{net} = 19.6$ (kPa)で等方圧縮。
- ④ $p_{net} = 98.1$ (kPa)にて等方圧縮。
- ⑤ $\sigma_r - u_a = 98.1$ (kPa), 軸ひずみ速度 0.017%/min. で $q = 252$ (kPa)までせん断。その後体積変化と吸排水が終了するまで放置。この時 $s = 78.5$ (kPa)である。なお軸差応力は間隙比 0.97 の供試体を飽和状態でせん断する時のせん断強度の 86(%)の大きさである。

次に供試体に吸水させるが、供試体 SU と、供試

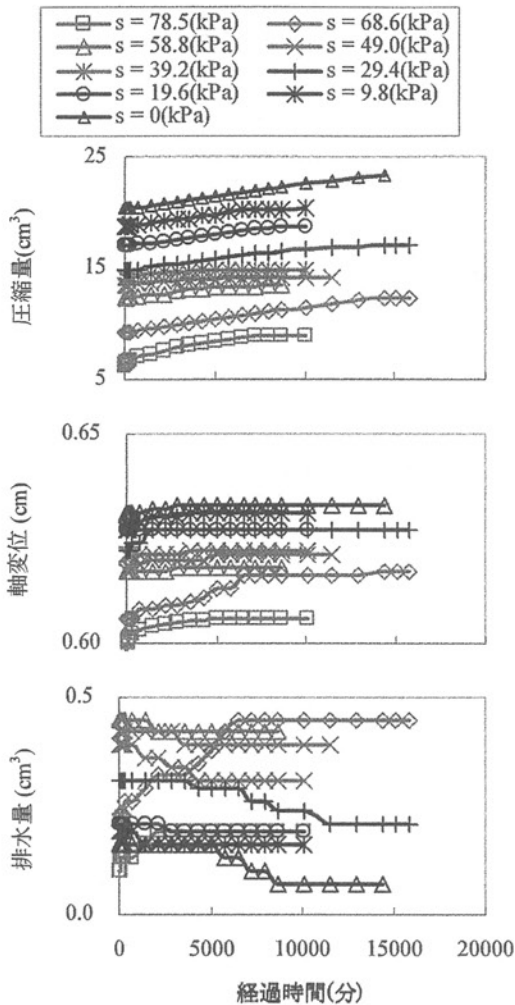


図-3 サクシオン除荷試験（供試体 SU）での圧縮量、軸変位、排水量の経時変化

体 ANo.1 および ANo.2 で吸水方法を変えた。

供試体 SU（サクシオン除荷試験）：排気・排水状態でサクシオンを段階的に除荷 ($s = 68.6, 58.8, 49.0, 39.2, 29.4, 19.6, 9.8, 0(\text{kPa})$)。各除荷段階で体積変化と吸排水が終了するまで放置。

供試体 ANo.1, ANo.2（吸水試験）：供試体の間隙水圧のみを上昇させ、供試体に吸水させる。

供試体 ANo.1 では間隙水圧を $0.5(\text{kPa})$ 、ANo.2 では $5(\text{kPa})$ とした。1 段階 $2(\text{cm}^3)$ を目標に吸水させたが、ANo.2 の第 3,4 ステップでは $1(\text{cm}^3)$ 吸水させた。その後排気・非排水状態で供試体の変形とサクシオン変化を計測し、両者の変化が終了するまで放置。

載荷応力経路を図-2 に示す。なお等方圧縮及びサクシオン除荷・吸水試験の各段階の終了の判定基準については、不飽和土の三軸圧縮試験における等方

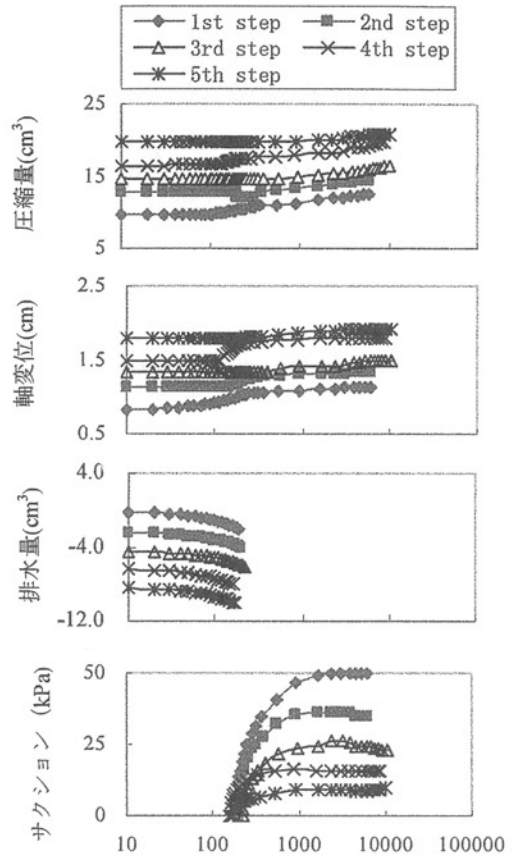


図-4 吸水試験 ANo.1 における圧縮量、軸変位、排水量、サクシオンの経時変化

圧密終了の基準⁹⁾を参考に、供試体からの吸・排水量の経時変化がほぼ落ち着く、吸・排水量 $0.2(\text{cm}^3/\text{day})$ を目安とした。なお試験の再現性を確認するために、上記 3 ケースの⑤異方応力載荷過程における $e, \varepsilon_v, \varepsilon_a, \varepsilon_d, \theta, w$ の増分のばらつきを求めた(表-1)。本試験では、異なる供試体の試験結果の相異が表-1 のばらつきの中に収まるようであれば、試験結果は等しいものと判断する。

3. 試験結果

(1) 吸水およびサクシオン除荷中の供試体の変化

供試体 SU のサクシオン除荷過程における各サクシオン除荷ステップの圧縮量、軸変位、排水量の経時変化を図-3 に、供試体 ANo.1 及び ANo.2 の吸水過程における各ステップの圧縮量、軸変位、排水量、サクシオンの経時変化を各々図-4 および図-5 に示す。図-3 を見ると供試体 SU のサクシオン除荷過程においては、供試体の圧縮は、各ステップにおいて、時間当たりの圧縮量が顕著に変化することなく進行

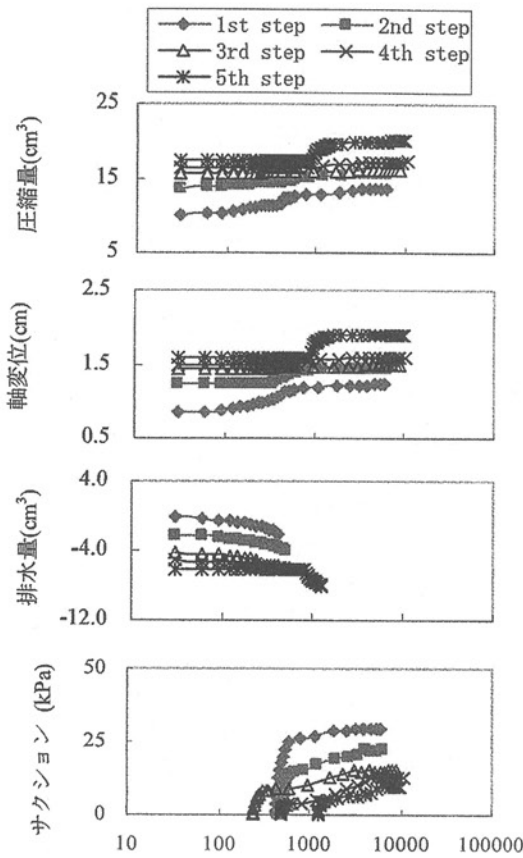


図-5 吸水試験 ANo. 2 における圧縮量、軸変位、排水量、サクシヨンの経時変化

する。またサクシヨン値による圧縮量の相違もそれほど認められない。軸変位は各サクシヨンにおいて非常に小さいためその変化がわかりにくい、各ステップにおいて 5000~10000 分までの比較的早うちに終了するようである。サクシヨン除荷に伴う排水は、軸変位と同様に 5000~10000 分までの間に終了する。またサクシヨンが高い場合は排水し、 $s=58.8(\text{kPa})$ よりサクシヨンが小さくなると吸水する。図-4.5 のように供試体に強制的に吸水させた場合は、吸水中は吸水速度が時間の経過と共に大きくなる傾向がある。それと共に供試体の圧縮速度（単位時間当たりの圧縮量）と軸変位速度（単位時間当たりの軸変位量）も大きくなる。そして吸水終了直後にサクシヨンが急激に上昇するタイミングまで、供試体の圧縮と軸変位の大きな変化は続く。

次に吸水過程における各供試体の吸水速度を見るために、各供試体のサクシヨン除荷および吸水中のステップ毎の吸水速度を図-6 に示す。横軸は各ステップ最終時のサクシヨンである。ここで吸水速度とは、吸水試験およびサクシヨン除荷試験におけるス

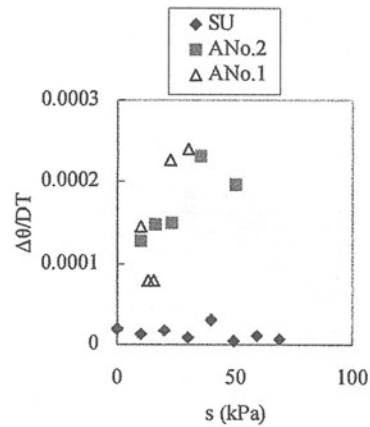


図-6 吸水過程中の吸水速度

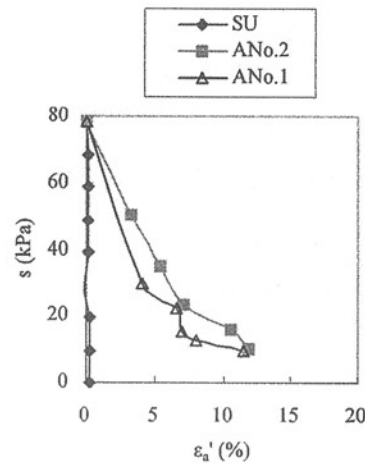


図-7 吸水過程のサクシヨン-軸ひずみ

テップ毎の体積含水率増分 $\Delta\theta$ を各ステップの継続時間 DT で除した、各ステップにおける平均的な値とした。これを見るとサクシヨン除荷試験では、吸水試験に比べて、吸水速度が小さいことがわかる。また吸水試験ではサクシヨン減少に伴って吸水速度が大幅に減少するが、サクシヨン除荷試験では逆にやや増加する傾向がある。また吸水試験 No.1 と No.2 では注水圧が異なるにも関わらず、吸水速度はほとんど同様で、サクシヨンと吸水速度がほぼ線形関係を有する。これは吸水試験では吸水圧により強制的に吸水しているのではなく、サクシヨンによる自然吸水が起こっているためと考えられる。

図-7 に吸水過程における各ステップ最終時の軸ひずみとサクシヨンの関係を示す。なお軸ひずみ ε_a' はサクシヨン除荷および吸水開始である、サクシヨン 78.5(kPa) 荷重ステップの最終時を基準として算出している。これを見ると各供試体とも吸水に伴うサクシヨン減少と共に、軸ひずみが進行している。

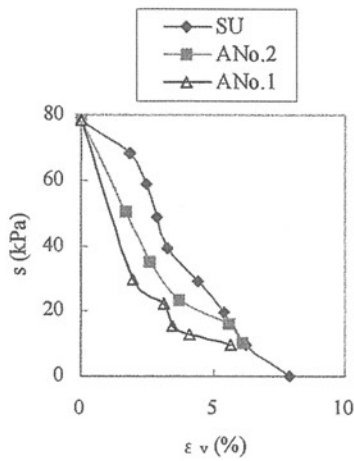


図-8 吸水過程のサクシオンー体積ひずみ

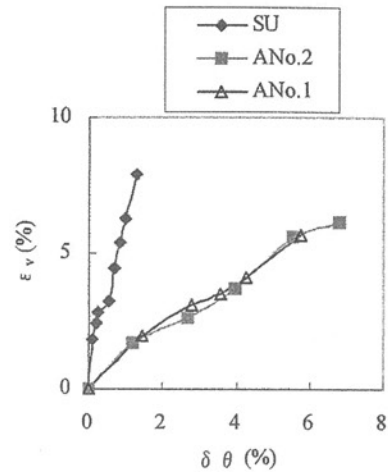


図-10 吸水過程での体積ひずみー体積含水率増分

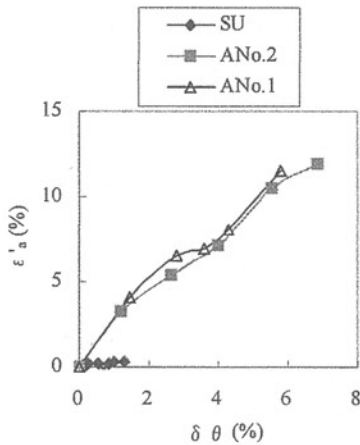


図-9 吸水過程での軸ひずみー体積含水率増分

また吸水試験の供試体 ANo.1 と ANo.2 は同程度の軸ひずみであるが、サクシオン除荷試験の SU は軸ひずみが非常に小さい。図-6 より ANo.1 と ANo.2 の吸水速度は同程度であるが、SU の吸水速度は小さいことから、軸ひずみの進行は吸水速度に影響されることが示唆される。次に図-8 に吸水過程における各ステップ最終時の体積ひずみとサクシオンの関係を示す。吸水によるサクシオン減少に伴って体積ひずみが進行することがわかる。しかし吸水速度の最も小さな SU が最も体積ひずみが大きくなるなど、図-6 で示される吸水速度との関係は認められない。

4. 吸水に伴う変形

(1) 吸水過程における吸水と変形

先にサクシオン減少に伴う供試体の変形を見てき

たが、不飽和土の強度・変形特性はサクシオンのみならず、含水状態を表す飽和度や体積含水率にも影響を受ける。よってここでは吸水過程における体積含水率増分と供試体の軸ひずみ (図-9)、体積ひずみ (図-10) の関係を検討する。なお図中の $\delta\theta$ はサクシオン 78.5(kPa) 載荷ステップ最終時を初期値とし、それから各ステップ最終時の体積含水率までの増分である。図-9 より吸水過程での軸ひずみは、各供試体とも、吸水過程における体積含水率増分にほぼ線形に増加することがわかる。そして吸水速度がほぼ等しい供試体 ANo.1 と ANo.2 では体積含水率増分に対する軸ひずみの増加もほぼ等しいが、吸水速度の小さなサクシオン除荷試験の供試体 SU では体積含水率増分に対する軸ひずみ増加は非常に小さい。次に図-10 の吸水過程における体積含水率増分に対する体積ひずみの進行であるが、これも供試体毎に見ると、吸水過程における体積含水率の増加とほぼ線形に体積ひずみは増加する。そして吸水速度のほぼ等しい ANo.1 と ANo.2 は、体積含水率増分に対する体積ひずみ増加がほぼ等しい。しかし吸水速度の小さな供試体 SU では体積含水率増分に対する体積ひずみの増加が、ANo.1 や ANo.2 より大きい。

(2) 吸水過程の各ステップの吸水と変形

上記の検討で、供試体の軸ひずみと体積ひずみの増加は、体積含水率増加とほぼ線形であることがわかり、体積含水率が供試体の変形に大きく影響することが示唆された。ここではさらに細かく各供試体の吸水過程における各ステップの体積含水率増分と、供試体のひずみ増分の関係を検討する。

図-11 は吸水過程における各ステップでの偏差ひずみ増分と体積含水率増分の関係である。ここで偏

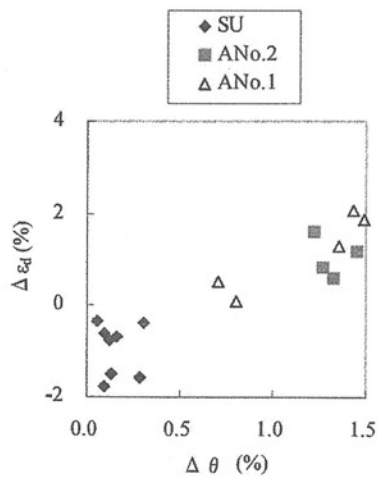


図-11 各ステップにおける偏差ひずみ増分-体積含水率増分

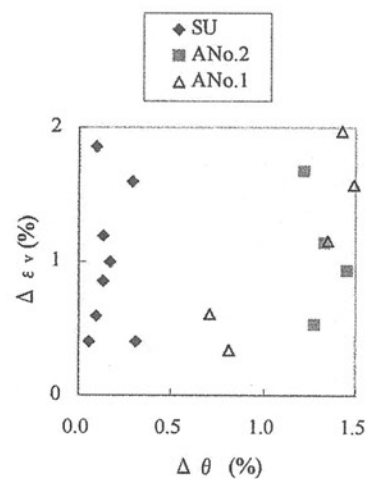


図-12 各ステップにおける体積ひずみ増分-体積含水率増分

差ひずみ増分を用いたのは、せん断に着目するためである。これを見るとサクシオン除荷試験と吸水試験という吸水方法に関わりなく、各ステップにおける偏差ひずみ増分は体積ひずみ増分と一義的な関係があるように見える。これから供試体の初期条件と、応力条件が同一であれば、吸水経路や方法に関係なく、吸水中の供試体の偏差ひずみの増加は、体積含水率の増加に依存することが示唆される。

次に図-12 に、吸水過程における各ステップでの体積ひずみ増分と体積含水率増分の関係を示す。吸水試験の供試体 ANo.1 と ANo.2 は両者の関係がほぼ同一のようであるが、吸水経路の異なる供試体 SU では両者の関係が、ANo.1 や ANo.2 とは明らかに異なる。

5. おわりに

異方応力を受ける不飽和砂質土の吸水に伴う変形は、せん断については吸水方法や経路に関わりなく、吸水に伴う体積含水率の増加と一義的な関係を持つこと、しかし圧縮については吸水による体積含水率の増加のみならず、吸水方法・経路にも影響されることが示唆された。

今後はより試験データを蓄積し、今回得られた事実を確かめていくことが必要である。

参考文献

1) 斉藤迪孝：土質工学におけるレオロジー-7.2 斜面崩壊予測，土と基礎，Vol.29, No.5, pp.77-82, 1981.

- 2) 福園輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法，地すべり，Vol.22, No.2, pp.8-13, 1985.
- 3) 笹原克夫：飽和度の上昇に伴う不飽和砂質土のせん断変形機構に関する研究，地すべり，Vol.34, No.3, pp.1-8, 1997.
- 4) 笹原克夫，小山内信智，田村圭司：間隙比および応力経路が不飽和砂質土の土壌水分特性曲線に及ぼす影響，日本地すべり学会誌，Vol.45, No.4, pp.284-291, 2008.
- 5) 笹原克夫，田村圭司：粒度分布の異なる砂質土のサクシオン除荷に伴うせん断・圧縮特性，第48回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.77-78, 2009.
- 6) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説—第一回改訂版一，2000.
- 7) Toyota, H., Sakai, N. and Nishimura, T.: Effects of Stress History due to Unsaturation and Drainage Condition on Shear Properties of Unsaturated Cohesive Soils, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.13-24, 2001.
- 8) 加藤正司，榊原辰雄，畑中憲彦：三軸試験時の不飽和砂の変形強度特性に与えるサクシオンの影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.785/III-70, pp.93-106, 2005.
- 9) 笹原克夫，酒井直樹，栗原淳一：初期間隙比を変えた不飽和砂質土の破壊時及び限界時のせん断強度と間隙比，土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.197-208, 2008.

(2010. 5. 14 受付)