

不飽和土の力学的挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Mechanical Behaviour for Partially Saturated Soils

村田 秀一* (Hidekazu Murata)
兵動 正幸** (Masayuki Hyodo)
安福 規之*** (Noriyuki Yasufuku)
館上 和史**** (Kazushi Tatigami)

キーワード: 不飽和土/粘性土/三軸圧縮試験/応力経路/圧縮/応力ひずみ曲線 (IGC:D6/D5)

1. まえがき

不飽和土の力学挙動を統一的に解釈することを主目的とした研究は、Bishopらの研究^{1)・2)}を端緒にして1950年代後半から国際的に活発に行われるようになった。特に、不飽和土の体積変化挙動やせん断挙動を有効応力のな考えから説明しようとする試みが数多くなされている。Bishop¹⁾、AitchisonとBishop³⁾は、不飽和土の有効応力式として間隙空気圧の項を含んだ次式を提案した。

$$\sigma' = \sigma - u_w + \alpha (u_a - u_w) \quad (1)$$

ここに、 σ' は有効応力、 σ は全応力、 u_w は間隙水圧、 u_a は間隙空気圧、 α は飽和度、土の構造や種類、応力経路などに依存するパラメータである。さらに、BishopとDonald⁴⁾は、 $(\sigma - u_w)$ とサクシオン $(u_a - u_w)$ を独立に制御した三軸試験を行い、上式の妥当性の検証を試みた。JenningとBurland⁵⁾は、上式の妥当性を明らかにするためには、 σ' を一定にして $(\sigma - u_w)$ と $\alpha(u_a - u_w)$ を変化させても土の挙動が変化しないことを示す必要があることを言及した上で、この場合 α の値はサクシオンが変化すると一般に変わるものであるから、結果的に σ' の値を一定にすることは難しく、Bishopらの行った試験からでは(1)式の妥当性を十分説明できないことを指摘した。また、彼らは、多くの土において見られる浸水に伴うクラップス現象が(1)式では説明できないことを示し、(1)式で定義される応力は、粒子間応力と呼ばれるべきものであることを指摘した。同様の指摘はBlight⁶⁾やBurland⁷⁾の実験的研究においても見られる。Coleman⁸⁾は、等方載荷条件下における体積変化特性と吸排水量特性を $(\sigma - u_w)$ と $(u_a - u_w)$ の二つの増分項で表示する式を提案した。BishopとBlight⁹⁾やBlight⁶⁾さらにFredlundとMorgenstern¹⁰⁾や軽部ら¹¹⁾もColemanの提案と同様、不飽和土の挙動を α の項にこだわらず、 $(\sigma - u_w)$ と $(u_a - u_w)$ の項を独立に用いて評価する便利さや有用性を示した。また、MatyasとRadhakrishna¹²⁾は載荷過程における間隙比と飽和度を上述した2つの項と関係付けるために状態面の概念を導入し、そのユニーク性をしめしたが、その適用条件は限られたものであった。さらに、近年日本において、軽部らの研究¹³⁾に代表されるように、新たに不飽和土の有効応力仮説をたて、応力ひずみ関係の実験式を提示し、不飽和土の挙動を系統的に説明する試みが行われている。このように、不飽和土の力学挙動を統一的かつ合理的に表現できるような有効応力式あるいはその考え方の確立をめざして多くの研究がなされているものの、現在いまだ研究途上にあるというのが現状であろう。

本研究は上述のような背景を踏まえ、試料として中国地方に多く分布する風化安山岩系の粘性土を対象に、三軸試験機を用いて間隙水圧 u_w と間隙空気圧 u_a 及び外的荷重を独立に制御した載荷試験、せん断試験を行い不飽和土の力学的特性をサクシオン $(u_a - u_w)$ に着目して基本的に考えてみることを試みたものである。具体的には、まず、実験の概要を明らかにした上で応力パラメータとしてのサクシオンの有効性について若干

*山口大学工学部建設工学科 教授, ** 同 助教授, *** 同 助手, **** 同 大学院

表-1 試料の指数的性質

	Sample A	Sample B
比重 G_s	2.705	2.692
液性限界 w_L (%)	47.50	57.25
塑性限界 w_p (%)	36.74	38.33
塑性指数 I_p	10.74	18.92
初期間隙比 e_0	0.934~1.002	1.303~1.351
初期飽和度 S_{r0} (%)	81.12~92.24	70.27~73.73
初期含水比 w_0 (%)	29.10~32.90	34.43~35.96

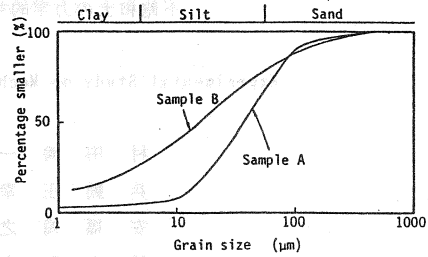


図-1 試料の粒径加積曲線

検討する。次に、等方載荷過程及びせん断過程における体積変化・吸排水量特性をサクシオンや平均主応力の大きさ、および載荷経路に注目して検討する。そして、最後に不飽和土のストレスダイレーション特性について実験的な観点から考察を加える。

2. 試料および実験方法

2.1 応力ひずみパラメーター 不飽和土の力学特性を考える上で、どのような応力パラメーターを用いるかは大切な問題である。ここでは、以下に示す応力およびひずみ状態を表すパラメーターを用いて実験的な検討を行っている。

$$\begin{aligned}
 p &= (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 - u_a & v &= e_1 + 2e_3 \\
 q &= (\sigma_1 - u_a) - (\sigma_3 - u_a) & e &= 2(e_1 - e_3)/3 \quad (2) \\
 S_u &= u_a - u_w & v_w &= (dV_w/V)
 \end{aligned}$$

ここに、 p 、 q 、 S_u はそれぞれ平均主応力、軸差応力およびサクシオン、 v 、 e 、 v_w はそれぞれ体積ひずみ、せん断ひずみ及び吸排水率を表す。また、 σ_1 、 σ_3 は最大及び最小主応力を、 e_1 、 e_3 は最大及び最小ひずみをそれぞれ表す。そして dV_w は、圧力変化に伴う給排水量の変化量であり、 V は、供試体の体積を表す。なお、本研究では、圧縮及び排水過程を正に取り、結果の整理を行っている。

2.2 試料及び供試体 実験に用いた試料は表-1中のSample A,Bと称するもので、いずれも山口県美祿市郊外で採取した安山岩系の強風化した残積土である。その主な指数的性質及び粒径加積曲線を表1、図1にそれぞれ示している。表1から分かるようにSample Bの方が若干塑性が高い試料である。供試体は、空気乾燥状態で保存した試料を自然含水比を目標に含水比調整した後、それをモールド内で所定の間隙比(試料を採取した地山の間隙比を目標とする)になるように締固めて作成される。締固めは、モールド内で12-13層に分

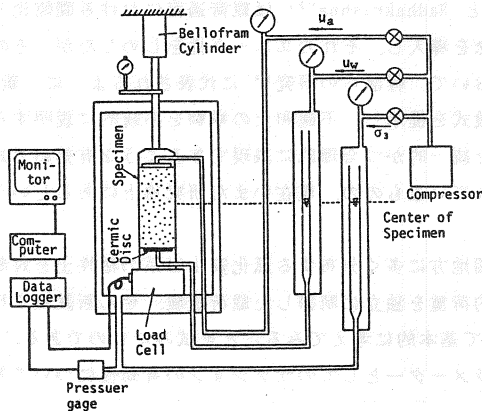


図-2 試験機の概略

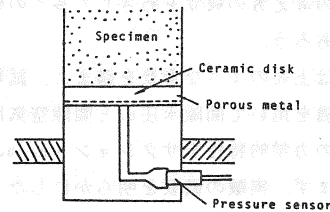


図-3 下部ベDESTAL

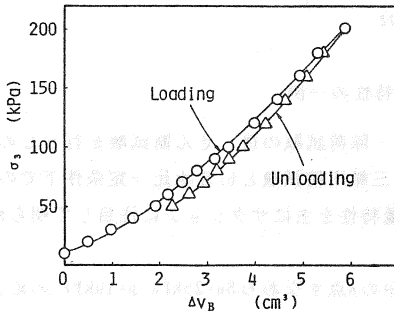


図-4 拘束圧変化に伴う側液の変化量

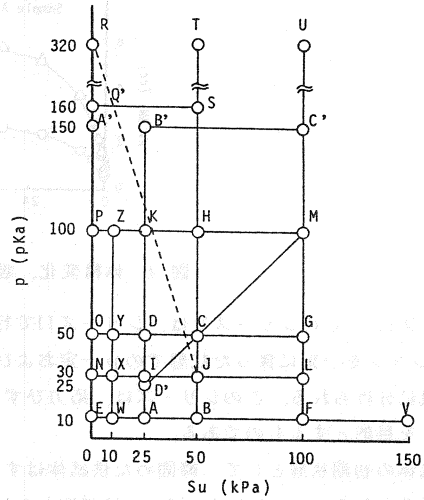


図-5 Su-p 等方載荷・除荷経路

けて行われ、供試体の直径及び高さはほぼ5cm, 12cmとなる。なお、表中には今回実験に供した全ての供試体の間隙比、飽和度、含水比の範囲が示されている。

2.3 試験機の特徴 実験に用いた試験機は、図2に示すように水密性のロードセルを内蔵した一重セル型の三軸試験機である。供試体の体積変化量は、側液（脱気水を使用）の変化量をもって評価し、吸排水量は下部ペDESTALに取り付けたセラミック版（エアエントリー値：180kPa）を介して出入りする脱気水の量によって評価する。軸変位量はセルの外に取り付けた1/100mm 読みのダイヤルゲージで視読する。間隙水圧は、供試体下部のセラミック版を介して任意に負荷でき、また図3に示すように半導体タイプの間隙水圧計（HK M-375-50, TEAC）をセラミック版の直下に取り付けることにより、供試体中（下部）において生じる間隙水圧を測定することも可能である。一方、間隙空気圧は、上部ペDESTALを介して任意にコントロールできる。また、ゴムスリーブを通しての漏水を可能な限り防ぐために、実験には防水加工を施したゴムスリーブを2枚重ねで使用している。図4は、硬質プラスチック製のダミー供試体をセル中にセットした場合の、側圧増加・除荷に対する側液の変化量の一例を示したものであるが、本研究では、このような検定曲線を用いて側液の変化量の補正を行っている。なお、この検定は実験を行う前に、実験中に予定される載荷経路に従って毎回行うものとした。

3.4 実験計画および試験手順 本研究では、以下に示す実験計画に基づいて実験を行った。

シリーズI ---このシリーズでは、サクシオンは同一であるけれども間隙水圧と間隙空気圧の大きさが異なるという条件でp-q-Su空間における等方載荷試験および拘束圧一定の三軸試験を行う。ここでは、間隙水圧の大きさを0, 20, 50及び100kPaと色々変えて実験を行っている。このシリーズは、応力パラメータとしてのサクシオンの有効性を調べるために行うものであり、得られる試験結果により、 u_w の大きさの違いが圧縮・せん断特性にどのような影響を与えるのかを言及する。対象とした試料は、Sample Aである。

シリーズII ---このシリーズでは、a) pとSuを任意にコントロールして行う等方載荷・除荷試験とb) 含水比一定条件下でpを変化させつつ、供試体下部において u_w を測定する等方載荷試験を実施する。このシリーズは、等方載荷・除荷過程における体積変化・吸排水量特性をサクシオンと載荷除荷経路に注目して調べるために行うものであり、a)の場合、全ての試験でサクシオンは、 u_w を大気圧に解放し、 u_a を供試体上部より強制的に加えることにより与えられる。図5には今回行った全ての試験のSu-p空間における載荷経路を示している。

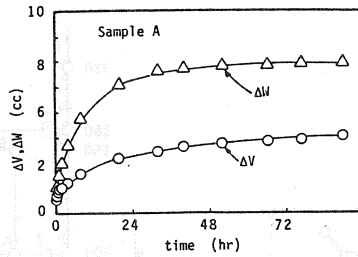


図-6 体積変化、吸排水量時間特性の一例

シリーズIII--このシリーズでは、シリーズIIで行う等方載荷・除荷試験の後、せん断試験を行うもので、a)サクシオンを一定に保った状態でのp一定および拘束圧一定三軸圧縮試験とb)含水比一定条件下での三軸圧縮試験に分けられる。このシリーズは、応力ひずみ・吸排水量特性を主にサクシオンに注目して明らかにすることを目的とするものである。

供試体の初期状態として、締固めた供試体はすべて、図5中のA点すなわち $S_u=25kPa$, $p=10kPa$ の応力状態まで載荷される。ここで、 $S_u=25kPa$ は採取した試料の現地でのサクシオンに概ね対応する。図6は、A点まで載荷した際の体積変化及び吸排水量変化と時間の関係の代表的なものを示したものであるが、体積変化及び吸排水量が落ち着くのは概ね48時間程度である。また、上述の全ての試験において、載荷・除荷は応力制御方式で行っている。等方載荷・除荷試験では、図5に示しているような1ブロック(例えばA-I, I-D間のように記号間の経路意味する)を数段階の荷重増分に分けて載荷・除荷し、せん断試験では、破壊状態までを8~15段階の応力レベルに分けて載荷を行っている。いずれの試験においても各荷重増分に対して体積変化および吸排水量が、 $0.01cc/hour$ 以内になったなら次の段階に進むことを原則とした。結果的に、圧縮時間は7~21日、せん断時間は3~5日であった。表2、表3には今回行った等方載荷・除荷試験及びせん断試験での

表-2 供試体の締固め時、初期状態における諸性質

No	e_s	w_s (%)	S_{rs} (%)	e_a	w_a (%)	S_{ra} (%)	Stress path	U_w (kPa)
A-1	0.956	29.10	82.34	0.928	28.83	84.04	A-B-C-D-A	0
A-3	1.062	31.43	80.05	1.005	31.13	83.79	A-B-C	0
A-4	1.002	31.67	85.50	0.939	30.62	88.21	A-D-C	0
A-5	0.971	31.51	87.78	0.971	28.00	78.00	A-B-C	20
A-6	0.957	30.90	87.34	0.925	29.91	87.47	A-B-C	50
A-7	0.972	31.85	88.64	0.938	30.81	88.85	A-D-G	0
A-8	0.937	31.85	92.24	0.912	31.70	94.02	A-D-G	20
A-9	0.983	32.15	88.47	0.954	32.00	90.73	A-D-G	50
A-10	1.024	32.83	86.73	0.979	31.61	87.34	A-K-M	0
A-11	1.002	31.26	84.40	0.985	30.35	83.39	A-D-G	0
A-12	1.016	32.31	86.06	0.985	31.34	86.11	A-B'-C'	0
A-13	0.978	29.45	81.48	0.983	29.60	81.43	A-F-M	0
A-14	0.989	29.86	81.69	0.979	29.76	82.24	A-D'-M	0
A-15	0.983	29.56	81.33	0.973	29.27	81.39	A-K-M	0
A-16	0.985	28.98	79.62	0.981	28.81	79.42	A-K-H	0
A-17	0.973	29.45	81.87	0.968	29.31	81.94	A-F-M-K	0
A-18	1.013	31.66	84.58	1.001	30.97	83.70	A-F-G-D	0
A-19	0.994	30.54	83.09	0.987	30.02	82.32	A-F-G	0
A-20	0.997	30.62	83.12	0.965	30.13	84.49	A-K	0
A-21	1.022	31.64	83.72	1.004	31.01	83.55	A-D	0
A-22	0.995	30.39	82.65	0.994	29.43	80.10	A-D-C	0
A-23	0.999	30.95	83.82	1.003	30.89	83.34	A-B-H	0
A-24	0.984	30.23	83.08	0.973	29.55	82.13	A-F-M-P	0
A-25	0.989	30.10	82.33	0.975	29.62	82.19	A-E-P	0
A-26	1.014	32.05	85.53	0.994	31.62	86.53	A-E-A'	0
A-27	1.004	31.43	84.66	0.981	30.10	83.00	A-K-M	50
A-28	0.990	30.33	82.85	1.004	31.43	84.66	A-K-M	100
A-29	0.994	31.31	84.91	0.977	30.23	83.73	A-F-A-F-A-F-E	0
A-30	1.001	30.80	83.22	0.989	30.05	82.19	A-F-M-K-M-K-P	0
A-31	1.006	31.26	84.02	0.989	30.50	83.45	A-B-C	0
B-1	1.351	35.43	70.61	---	---	---	A-W-V-E	0
B-2	1.319	34.84	71.11	---	---	---	A-E-R	0
B-3	1.325	25.37	71.88	1.301	35.40	73.25	A-B-T	0
B-4	1.333	35.01	70.70	1.315	34.96	71.57	A-F-U	0
B-5	1.327	34.83	70.66	---	---	---	A-E-N-J	0
B-6	1.309	35.08	72.14	1.295	35.06	72.88	A-B-J-M	0
B-7	1.313	35.96	73.73	1.272	36.29	76.80	A-B-S-G	0
B-8	1.311	35.32	72.53	1.299	25.59	73.76	A-B-J-R-T	0

表-3 供試体の圧縮後、破壊時における諸性質

No	e_s	W_s (%)	Sr_s (%)	e_r	W_r (%)	Sr_r (%)	p_r (kPa)	q_r (kPa)	U_w (kPa)	Stress path
A-7	0.871	29.02	90.13	0.853	27.00	85.62	174	372	0	A-D-G
A-8	0.850	30.22	96.17	0.828	28.82	94.15	162	336	25	A-D-G
A-9	0.909	31.11	92.58	0.892	27.81	84.33	174	372	50	A-D-G
A-10	0.874	28.13	87.27	0.925	27.81	84.33	100	216	0	A-K-M
A-11	0.943	28.28	81.13	0.959	27.64	77.93	50	144	0	A-D-G
A-12	0.845	27.80	89.04	0.811	26.71	89.12	150	272	0	A-B'-C'
A-13	0.964	27.44	77.04	0.939	27.07	77.96	100	192	0	A-F-M
A-14	0.908	27.66	82.37	0.885	27.34	82.06	100	207	0	A-D'-M
A-15	0.812	26.86	89.47	0.765	24.23	85.62	100	207	0	A-K-M
A-16	0.893	27.24	82.55	0.893	27.24	82.55	100	183	0	A-K-H
A-17	0.912	26.50	78.63	0.897	26.48	79.86	100	189	0	A-F-M-K
A-18	0.951	28.33	80.63	0.962	28.32	79.67	50	123	0	A-F-G-D
A-19	0.953	27.63	78.51	0.942	27.10	77.83	50	144	0	A-F-G
A-20	0.914	29.13	86.22	0.878	28.76	88.57	100	168	0	A-K
A-21	0.973	30.42	84.61	0.951	30.18	85.86	50	102	0	A-D
A-22	0.949	28.22	80.48	0.951	27.65	78.63	50	114	0	A-D-C
A-23	0.925	28.84	84.33	0.923	28.86	84.58	100	177	0	A-B-H
A-24	0.909	32.81	97.64	0.883	30.55	93.61	100	135	0	A-F-M-P
A-25	0.906	32.94	98.40	0.858	31.36	98.86	100	126	0	A-E-P
A-26	0.789	31.88	100.0	0.806	26.41	88.63	150	198	0	A-E-A'
A-27	0.920	27.83	77.57	0.908	26.84	79.95	100	225	50	A-K-M
A-31	0.959	29.53	83.28	0.984	29.23	80.39	50	112	0	A-B-C
B-9	1.271	47.21	100.0	1.147	42.61	100.0	51	63	0	A-E-N
B-10	1.291	36.93	77.01	1.187	38.15	86.51	62	97	0	A-I-X
B-11	1.295	35.65	74.11	1.195	36.27	81.71	67	112	0	A-I
B-12	1.303	34.88	72.06	1.185	34.69	78.80	77	140	0	A-I-J
B-13	1.295	35.34	73.46	1.190	36.05	81.56	69	118	0	A-I-J-I
B-14	1.196	38.40	86.43	1.085	37.91	94.07	70	119	0	A-E-N-I
B-15	1.276	47.40	100.0	1.236	45.91	100.0	30	41	0	A-E-N
B-16	1.255	45.52	100.0	1.182	43.91	100.0	50	65	0	A-E-O
B-17	1.145	42.53	100.0	1.073	39.86	100.0	100	124	0	A-E-P
B-18	1.283	36.77	77.15	1.279	38.21	80.42	30	63	0	A-N-X
B-19	1.279	36.70	77.25	1.212	38.60	85.73	50	82	0	A-N-Y
B-20	1.196	36.13	81.32	1.078	37.02	92.45	100	128	0	A-N-Z
B-21	1.297	34.76	72.15	1.330	35.40	71.64	30	69	0	A-I
B-22	1.287	35.00	73.21	1.245	36.08	78.02	50	94	0	A-D
B-23	1.228	34.74	76.16	1.126	35.73	85.41	100	154	0	A-K
B-24	1.307	34.91	71.90	1.345	34.88	69.81	30	76	0	A-B-J
B-25	1.274	34.26	72.39	1.264	34.45	73.36	50	104	0	A-B-C
B-26	1.205	34.20	76.40	1.128	34.53	82.41	100	175	0	A-B-H
B-27	1.207	33.06	73.73	1.130	32.43	77.38	100	183	0	A-F-M
B-28	1.289	34.79	72.66	1.345	34.75	69.55	30	76	0	A-I-J
B-29	1.216	34.04	75.36	1.133	34.20	81.25	100	173	0	A-K-H
B-30	1.279	34.79	72.85	1.254	34.61	74.30	50	107	0	A-B-C
B-31	1.276	34.71	73.23	1.210	34.78	77.38	50	134	0	A-B-C

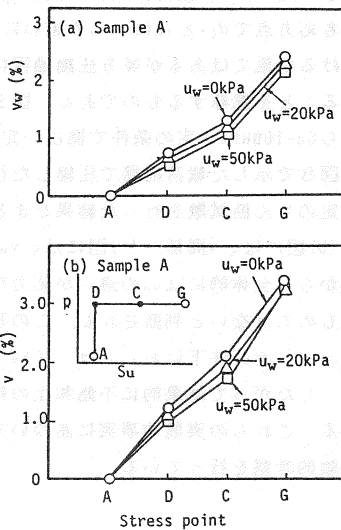


図-7 圧縮特性に与える u_w の影響 (I)

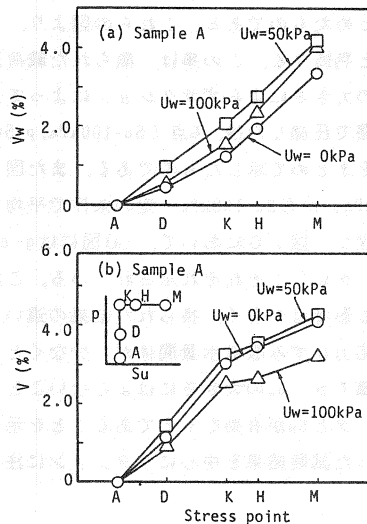


図-8 圧縮特性に与える u_w の影響 (II)

供試体の締固め時、初期状態、そして破壊状態での間隙比、含水比、飽和度がまとめて示されている。

3.5 応力パラメータとしてのサクシヨンの有効性について 図7は、Sample Aに対して、 $U_w=0kPa, 20kPa$ および $50kPa$ の条件下で、それぞれ $S_u=100kPa, p=50kPa$ のG点までA-D-Gの S_u - p 応力経路下で、等方圧縮試験を行った結果を示している。(a)図は、吸排水率 v_w と応力点との関係、(b)図は、体積ひずみ v と応力点の関係を示し

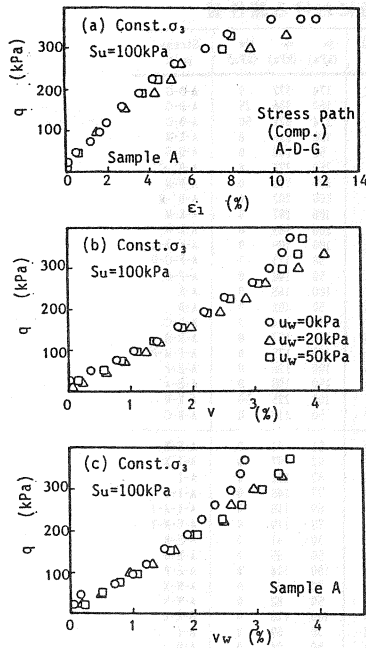


図-9 応力ひずみ・吸排水率関係
に与える u_w の影響 (I)

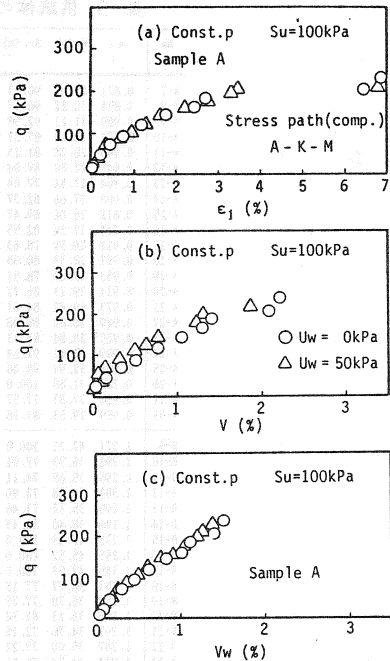


図-10 応力ひずみ・吸排水率関係
に与える u_w の影響 (II)

たものであり、いずれの図もA点でのひずみ量を初期状態として整理を行っている。また、図8は、Sample Aに対して $u_w=0\text{kPa}$ 、 50kPa および 100kPa の条件下で図7とは異なったA-K-Mの載荷経路での試験結果を図7と同様な手法でまとめたものである。これらの図より、ここでは各応力点での v と v_w に、 u_w の違いによる有為な差は見られないと判断する。この事は、限られた載荷過程における結果ではあるが等方圧縮過程における v と v_w の特性が u_w の大きさによらずサクションによって規定できることを意味するものである。図9は、図7で示した載荷経路で圧縮した後、G点 ($S_u=100\text{kPa}$, $p=50\text{kPa}$) から $S_u=100\text{kPa}$ 一定の条件下で側圧一定のせん断試験を行った結果をまとめて示したものである。また図10は、図8で示した載荷経路で圧縮した後、M点 ($S_u=100\text{kPa}$, $p=100\text{kPa}$) から $S_u=100\text{kPa}$ 一定の条件下で平均主応力一定のせん断試験を行った結果をまとめて示したものである。図9、図10において、(a)図には q - ϵ_1 関係、(b)図には q - v 関係、(c)図には q - v_w 関係が間隙水圧 u_w をパラメータにしてそれぞれ示されている。これらの図から、全体的には u_w の違いが応力ひずみ吸排水量関係に与える影響は少なく、得られた結果の違いは有為なものではないと判断される。この事は、せん断過程における応力ひずみ吸排水量関係が、少なくともサクション一定条件下においては、 (S_u, p, q) の大きさによって評価でき、 u_w の大きさにはよらないことを意味し、したがって結果的に不飽和土の挙動を評価する応力パラメータと S_u が有効なものであることを示唆している。これらの実験的事実に基づいて、以下の章では $u_w=0$ に保った試験結果を中心にサクションに注目した実験的考察を行っている。

4. 実験結果および考察

4.1 等方載荷・除荷過程における体積変化・吸排水量特性

i) p 載荷時の特性 --- 図11は、Sample Bを用いて $u_w=0$ の条件のもとで、A-E-R, A-K, A-B-T および A-F-U の載荷経路で行った圧縮試験結果を整理したものである。(a)図には、 v_w - $\ln p$ 関係を、(b)図には v - $\ln p$ 関係を示している。なお、ここでは p の増加に注目して体積変化特性の比較を行うために、E点 ($p=10\text{kPa}$, $S_u=0\text{kPa}$)、A点 ($p=10\text{kPa}$, $S_u=25\text{kPa}$)、B点 ($p=10\text{kPa}$, $S_u=50\text{kPa}$) および F点 ($p=10\text{kPa}$, $S_u=100\text{kPa}$) における v および

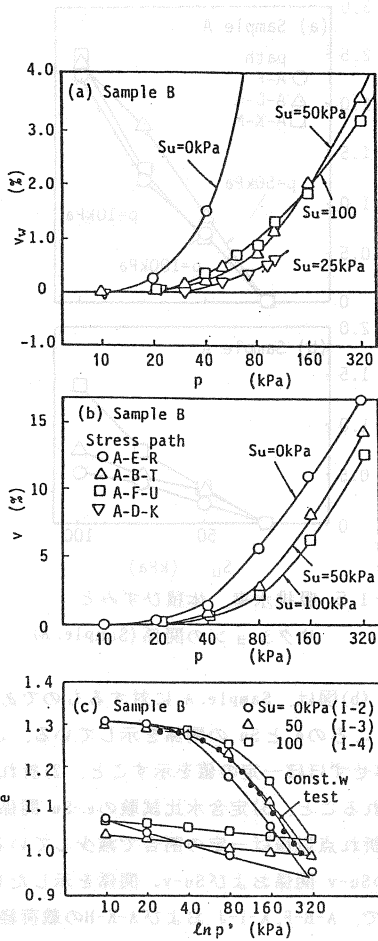


図-1 1 吸排水率、体積ひずみ、間隙比変化のサクシオン依存性 (Sample. B)

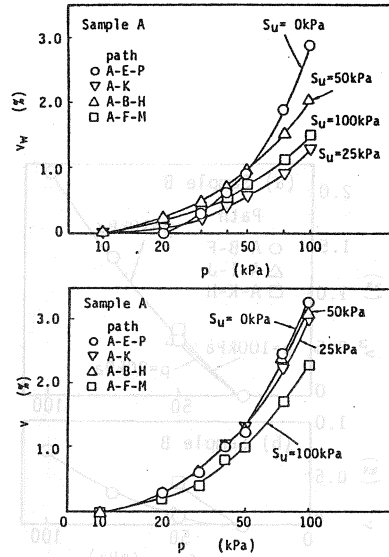


図-1 2 吸排水率、体積ひずみのサクシオン依存性 (Sample. A)

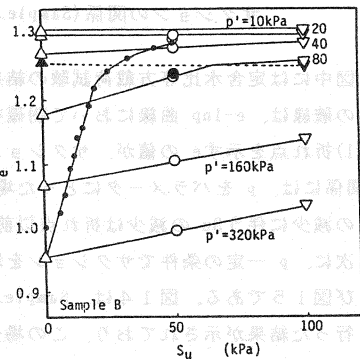


図-1 3 間隙比とサクシオンの関係 (Sample. B)

v_w の値を基準状態として、それらの応力点からの v, v_w の比較を行っている。また、(c) 図には定含水比試験結果を含めて、得られた $e-\ln p$ 関係を示している。これらの図から、次のようなことが理解できる。1) p 値に対応する v の値は、 $S_u=0$ すなわち飽和供試体の場合が最も大きく、 S_u の増大に伴って減少する傾向にあり、 v の増加のサクシオン依存性がうかがえる。これは、サクシオンが土の剛性を高める方向に作用することを示唆するものである。2) v_w については、飽和供試体に比べて、 v_w はサクシオンの増加と共に著しい低下を示す。ただ、その減少の傾向に一義的な関係はこの結果からは見られない。3) $S_u=50\text{kPa}$ と $S_u=100\text{kPa}$ の場合、 p の増加に対する v の増加割合は、 v_w のそのほぼ 5 倍にもなり、相対的には p の増加は、 v_w の変化よりも v の変化に貢献する。4) 不飽和土の $e-\ln p$ 関係において明確な折れ点を示す p の値はサクシオンの増大と共に大きくなる傾向にあるが、その曲線の特徴は飽和土のそれと類似である。図 1 2 は、Sample. A に対して行った同様の試験結果をまとめて示しているが、 $v-\ln p$ 曲線、 $v_w-\ln p$ 曲線においては、傾向的には Sample. B において得られた結果とよい対応を示し、上記した特性が不飽和土の特性として一般的なものであると思われる。なお、載荷経路は図中に示す通りである。

ii) S_u 載荷時の特性 --- 図 1 3 は、図 1 1 と図 1 2 におけるサクシオン一定下の $e-\ln p$ 曲線に基づいて、間隙比 e とサクシオン S_u の関係を p をパラメータにして表したものである。(a) 図は、Sample. B に対するも

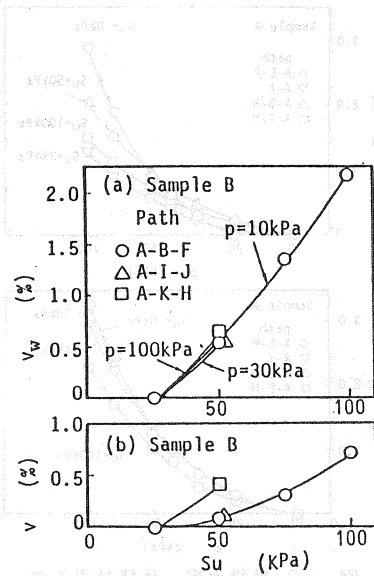


図-1 4 吸排水率、体積ひずみとサクシヨンの関係 (Sample. B)

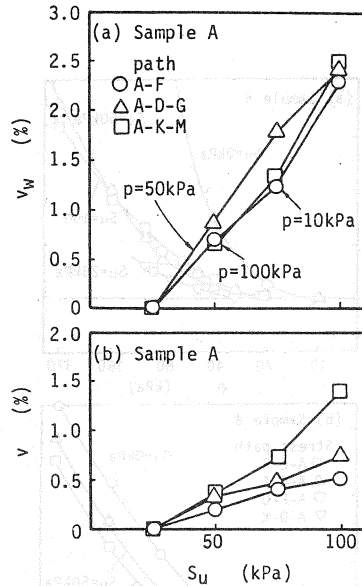


図-1 5 吸排水率、体積ひずみとサクシヨンの関係 (Sample. A)

のであり、図中には定含水比等方載荷試験の結果も示してある。(b)図は、Sample. A に対するものである。また、図中の破線は、 $e-\ln p$ 曲線において明確な折れ点を示すところの e と S_u の関係を示している。これらの図より、1)折れ点を示す e の値が、サクシヨンの大きさに依存せずほぼ一定の値を示すこと、2)折れ点以降の $e-S_u$ 関係には、 p をパラメータにとった場合直線性が見られること、3)定含水比試験の $e-S_u$ 関係を見た場合、 e の減少に伴う S_u の減少は折れ点以前で顕著であり、折れ点以後は一定の割合で減少していることが分かる。次に、 p 一定の条件でサクシヨンを増加させた場合の S_u-v 関係および S_u-v_w 関係を示したものが図 1 4 および図 1 5 である。図 1 4 は、Sample. B に対するもので、A-B-F、A-I-J および A-K-H の載荷経路で圧縮試験を行った結果が示されており、この場合も図 1 1 の場合と同様な考えから、A点 ($p=10\text{kPa}$, $S_u=25\text{kPa}$)、I点 ($p=30\text{kPa}$, $S_u=25\text{kPa}$) および K点 ($p=100\text{kPa}$, $S_u=25\text{kPa}$) における v と v_w の値を基準値として整理を行っている。また、図 1 5 には、Sample. A に対して、A-B-F、A-D-G および A-K-M の載荷経路で圧縮試験を行った結果が示されている。これらの図から、結果にばらつきは見られるものの、 v_w-S_u , $v-S_u$ 関係の p 値依存性は小さいこと、またサクシヨンの増加に対する v の変化量が v_w のそれに比べて小さいことから、サクシヨンは相対的には v の変化よりも v_w の変化に大きく寄与することがわかる。

iii) 応力経路に注目した特性の比較 --- 図 1 6 は、Sample. A に対してサクシヨンと p が単調に変動する場合、その圧縮経路の違いが体積ひずみ v の特性にどのような影響を与えるかについて調べたものである。(a)図は、先にサクシヨンを増加させる経路 A-B-C-H と p を増加させる経路 A-D-K-H での v の比較を特に、H点 ($p=100\text{kPa}$, $S_u=50\text{kPa}$) と K点 ($p=100\text{kPa}$, $S_u=25\text{kPa}$) に注目して行っている。また、(b)図は、同様の比較を G点 ($p=50\text{kPa}$, $S_u=100\text{kPa}$) と D点 ($p=50\text{kPa}$, $S_u=25\text{kPa}$) に注目して行行ったものであり、(c)図は M点 ($p=100\text{kPa}$, $S_u=100\text{kPa}$) と k点に注目して行行ったものである。これらの図から、(a)図の場合には、H点かまたは K点、(b)図の場合には G点、そして (c)図の場合にはどちらかと言えば K点と言ったように載荷経路の違いによって同じひずみ量を示す応力点がそれぞれ異なっていることが読み取れ、 S_u 増分、 p 増分の大きさに依存した結果となっている。次に、図 1 7 は、図 1 6 の試験結果に基づいて吸排水率 v_w の特性を載荷経路に注目して調べたものである。なお、(a)図から (c)図における載荷経路は図 1 6 中の (a)から (c)図のそれに対応している。これらの図から、吸排水率の場合には、いずれの載荷経路の場合にも p と S_u が最大となるところの H点、G点、M点

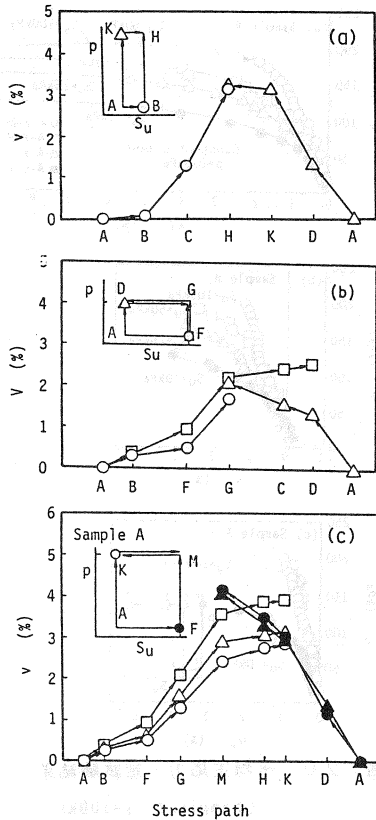


図-16 載荷経路に着目した
体積ひずみ特性 (Sample. A)

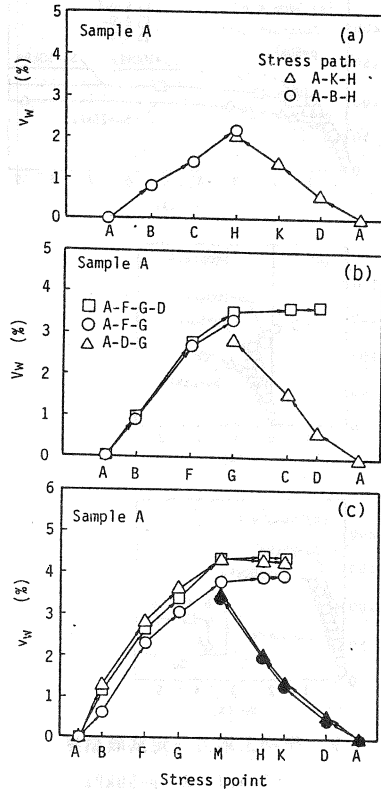


図-17 載荷経路に着目した
吸排水率特性 (Sample. A)

において、ほぼ同程度のひずみ量を示すことが読み取れる。

iv) 状態面について --- 図18は、図11と図13(a)の結果に基づいて描いたSample.Bに対する $e-p-Su$ 関係を示している。図中の・印はA-B-Jの載荷経路で圧縮した後、含水比一定の条件で $p=320\text{kPa}$ まで載荷試験を実施した時の $e-p-Su$ 関係を示したものであるが、概ね先に定義した $e-p-Su$ 空間上を移動していると言える。また、他の全ての試験結果から得られた供試体の状態は、ほぼこの面上か、もしくは下方に存在するという結果となった。このことは、 $e-p-Su$ 関係を状態面として利用すれば、ある程度の方荷過程における

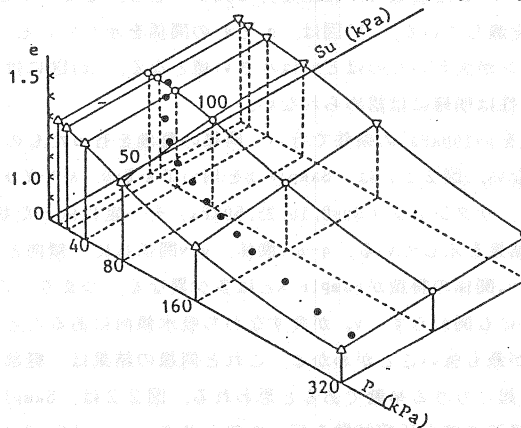


図-18 $e-p-Su$ 関係 (Sample. B)

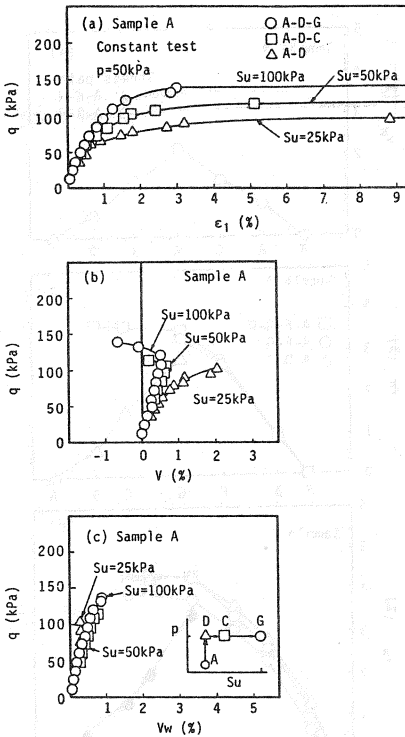


図-19 平均主応力一定試験結果
(Sample. A p=50kPa)

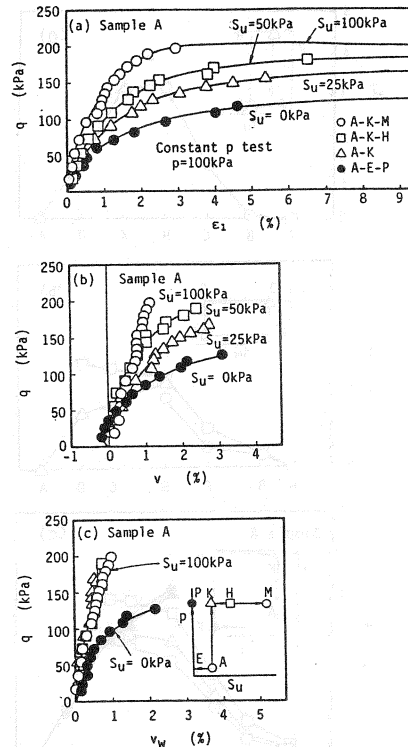


図-20 平均主応力一定試験結果
(Sample. A p=100kPa)

変形予測が可能であることを示すものである。このような状態面の考え方は、Matyasら¹²⁾によってなされており、彼らはこのような状態面を用いた不飽和土の圧縮特性の評価方法について言及している。

4.2 サクシオンに注目した強度変形特性

i) 応力・ひずみ・吸排水率関係 --- 図19から図23には、今回行った、代表的なせん断試験結果をサクシオンに注目して示している。図19は、Sample.Aを用いてA-D, A-D-E およびA-D-Gの載荷経路で等方圧縮試験を行った後、サクシオン ($S_u=25, 50, 100\text{kPa}$) を一定に保った状態で平均主応力一定せん断試験 ($p=50\text{kPa}$) を行った結果を示している。(a)図は、 q と e_1 の関係を示しているが、サクシオンの大きなものほど初期の立ち上がりは急になり、また破壊時の軸差応力も大きくなる。なお、ここでは便宜上軸ひずみ量 e_1 が15%のときをもって破壊と定義している。(b)図は、 q と v の関係を示している。ある q に注目して v の大きさを比較すると、サクシオンが大きいものほど v は小さい値となる。(c)図には、 q と v_w の関係を示しているが、 v_w のサクシオン依存性は明確には認められない。

図20は、上と同様の試験を $p=100\text{kPa}$ の条件で行い、同様の整理を行ったものであるが、傾向的には $p=50\text{kPa}$ の場合とさほど変わらない。図21には、Sample.Bを用いてA-E-0, A-W-Y, A-D およびA-B-Cの載荷経路で等方圧縮試験を行った後、サクシオン ($S_u=0, 10, 25, 50\text{kPa}$) を一定に保った状態で平均主応力一定せん断試験 ($p=50\text{kPa}$) を行った結果を示している。 q - e_1 関係、 q - v 関係共に、傾向としては図19で得られた結果と同様なものであるが、 q - v_w 関係の特徴がSample.Aとは多少異なる。つまり、この場合(b)図からもわかるように供試体は収縮しているにもかかわらず、 v_w が負すなわち吸水傾向にあることである。また、その傾向はサクシオンが 10kPa の供試体が最も強いことがわかる。これと同様の結果は、軽部らによっても指摘されており、試料の状態や特性によって起こりうる挙動であると思われる。図22は、Sample.Bを用いてA-I-N, A-I-X, A-I およびA-I-Jの載荷経路で等方圧縮試験を行った後、サクシオン ($S_u=0, 10, 25, 50\text{kPa}$) を一定に保った

状態で側圧一定せん断試験 ($\sigma_3=30\text{kPa}$) を行った結果を示している。 $q-e_1$ 関係、 $q-v$ 関係、 $q-v_w$ 関係共に、傾向としては図 2 1 の p 一定せん断試験で得られた結果と同様のものである。 図 2 3 は、 A-B-C の載荷経路で圧縮試験を行った後、 p 一定の条件 ($p=50\text{kPa}$) で定含水比せん断試験を行った結果を示している。 (a) 図には、 q とサクシヨンの関係、 (b) 図には、 サクシヨンと e_1 の関係、 そして (c) 図には $q-e_1$ の関係を示している。 サクシヨンは、 q の増加と共に低下し、 軸ひずみ e_1 が 1% 近くまでこの傾向が続くが、 その後サクシヨンは急激に増加しある値に収束するようである。 この結果は、 吸排水を自由に許した試験においてせん断初期には排水傾向にある供試体がせん断が進むに連れて吸水傾向に転じる結果とうまく対応しているものと思われる。

ii) 載荷経路に注目した応力・ひずみ・吸排水率関係 --- 図 2 4 と図 2 5 は、 せん断特性に及ぼす載荷経路の影響を調べたものである。 図 2 4 は、 Sample A を用いて、 A-K-M、 A-D'-M および A-F-M の異なった載荷経路で圧縮した後、 $p=100\text{kPa}$ 、 $S_u=100\text{kPa}$ 一定の条件でせん断試験を行った結果をまとめて示している。 (a) 図には、 q と e_1 の関係、 (b) 図と (c) 図には、 それぞれ q と v および q と v_w の関係が示されているが、 これらの得られた結果に載荷経路依存性はみられない。 こらは、 M 点が、 S_u-p 空間において正規圧縮的な応力点であると考えれば理解できる。 図 2 5 は、 図 2 4 と同じ試料を用いて、 A-K と A-F-M-K の載荷経路で圧縮した後に行った、 $S_u=25\text{kPa}$ 、 $p=100\text{kPa}$ 一定の条件下でのせん断試験結果を比較したものである。 (a) 図には $q-e_1$ 関係、 (b) 図には $q-v$ 関係、 (c) 図には $q-v_w$ 関係を示しているが、 得られた結果には明らかな載荷経路依存性が見受けられる。 これは、 載荷経路中に M-K というサクシヨンの除荷履歴が含まれているために、 供試体が飽和土でいうところの過圧密的な特性を示した結果であると考えれば理解できる。 上述したような傾向は、 図 2 6 に示すように Sample B おいても見られる。

iii) 破壊包絡線の特徴について --- 図 2 7 は、 表 3 に示す Sample A に対して行ったせん断試験結果に基づいて、 破壊時の応力状態をせん断時のサクシヨンと圧縮経路に着目して描いたものである。 (a) 図には $q-p$ 関

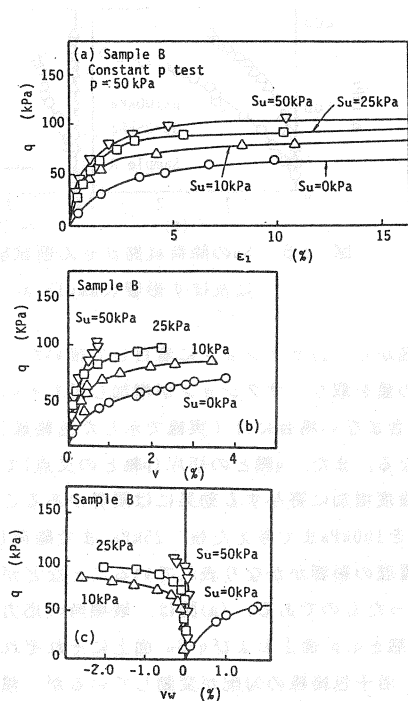


図 2 1 平均主応力一定試験結果
(Sample B $p=50\text{kPa}$)

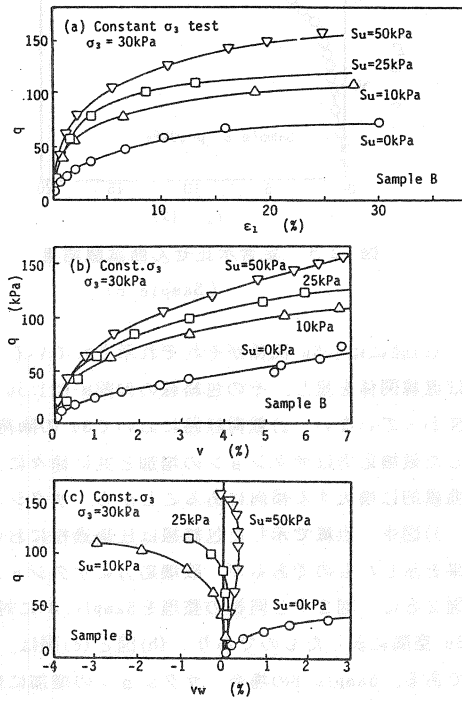


図 2 2 拘束圧一定試験結果
(Sample B $\sigma_3=30\text{kPa}$)

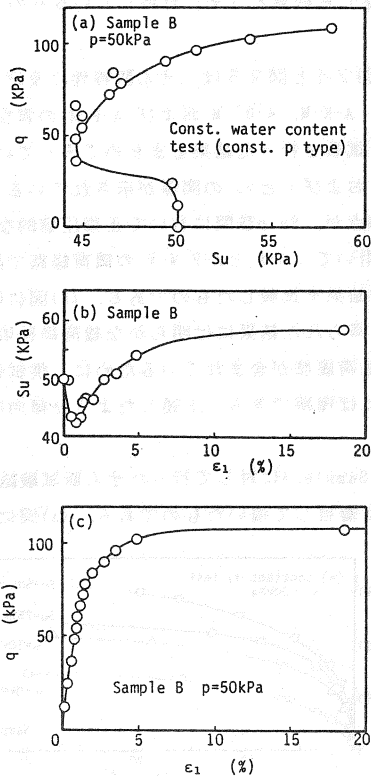


図-23 定含水比せん断試験結果 (Sample. B)

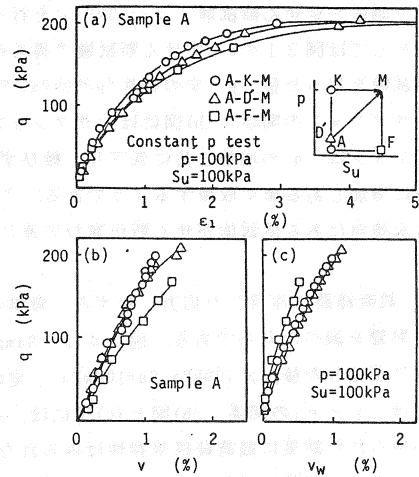


図-24 せん断試験結果に及ぼす
載荷経路の影響 (Sample. A)

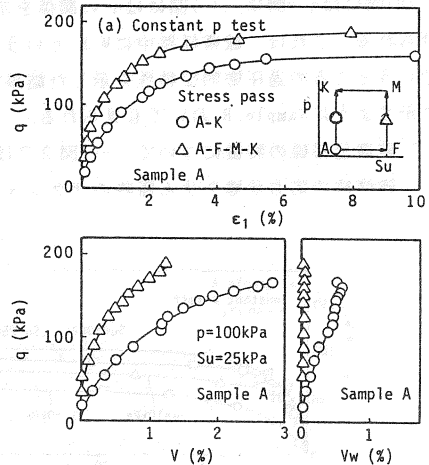


図-25 Suの除荷経路がせん断試験結果
に及ぼす影響 (Sample. A)

係、(b)図には q - S_u 関係がそれぞれ示されている。この図から、1)サクシオンに着目して描いた q - p 関係は、ほぼ直線関係を呈し、その包絡線の勾配 M は1.30-1.32 の値を取り、サクシオンが増加してもその値はさほど変わっていない。2)載荷経路において S_u の除荷過程を含まない場合には(実線で示した包絡線)、 p に着目した破壊応力はサクシオンの増加と共に徐々に大きくなる。また、 q 軸との切片(p 軸との交点)での応力は双曲線的に増大する傾向にあることから、サクシオンの強度増加に寄与する効果には限界があることも伺える。3)図中、点線で示した包絡線は圧縮過程において S_u を100kPaまで与えた後、25kPaまで除荷した場合の結果を示したものであるが、破壊応力にサクシオン除荷履歴の影響がかなり表れていることなどが分かる。

図28は、図27と同様の整理をSample. B に対して行ったものである。(a)図は、破壊時の応力状態を p - q - S_u 空間に表したものであり、(b)図と(c)図は、破壊状態を q - p 面上および q - S_u 面上にそれぞれ描いたものである。Sample. Bの場合、サクシオンの増加に伴って、若干包絡線の勾配が変動しているが、傾向的には、包絡線の特徴は、Sample. Aのそれとよく似たものとなっている。

iv) 応力比・ひずみ増分比関係 --- ここでは、次式で定義する応力比 η^* を用いてSample. Aに対する応力比

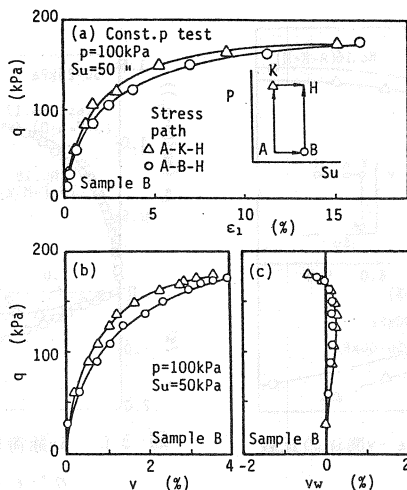


図-26 せん断試験結果に及ぼす
 荷経路の影響 (Sample B)

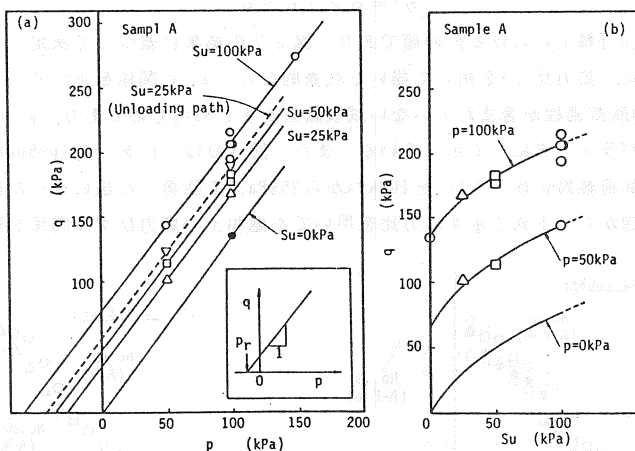


図-27 破壊包絡線, (a) q-p関係, (b) q-Su関係 (Sample A)

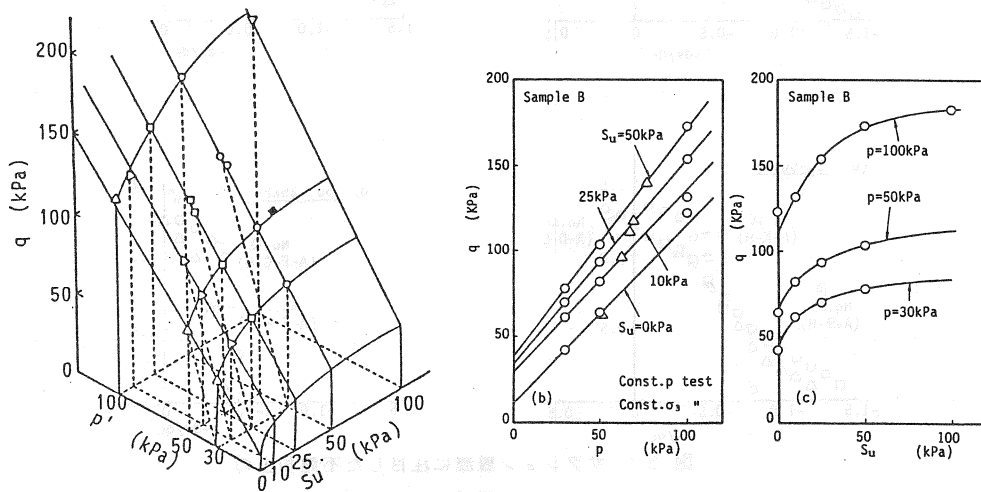


図-28 破壊包絡線, (a) q-p-Su関係, (b) q-p関係, (c) q-Su関係 (Sample B)

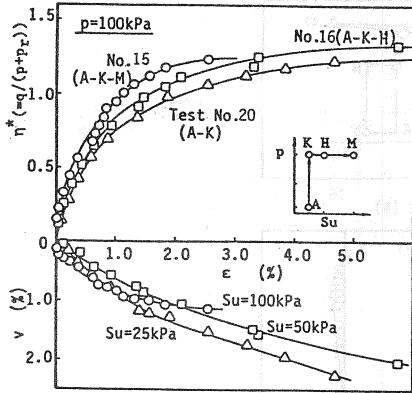


図-29 Suに着目した $\eta^*-\epsilon-v$ 関係の比較 (Sample. A)

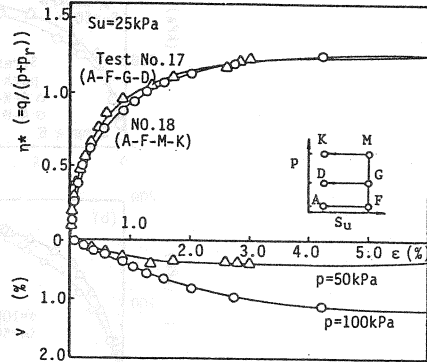


図-30 Su除荷履歴を受けた供試体の $\eta^*-\epsilon-v$ 関係の比較 (Sample. A)

・ ひずみ増分比関係の検討を行っている。

$$\eta^* = q / (p + p_r) \quad (3)$$

ここに、 p_r は包絡線の p 軸上における p の値であり、図27の結果に基づいて決定している。

図29から図30は、応力比 η^* を用いて描いた代表的な $\eta^*-\epsilon-v$ 関係を示している。図29は、等方載荷過程において S_u の除荷過程が含まれていない試験結果をまとめたものであり、 $p=100\text{kPa}$ 一定せん断試験の結果をサクシオンをパラメータにして示している。また、図30は、 p を一定($p=50\text{kPa}$ と $p=100\text{kPa}$)に保った状態で図中に示す除荷経路に従って S_u を 100kPa から 25kPa まで除荷した後に行った試験結果をまとめたものである。これらの図から、上式で示す応力比を用いて不飽和土の応力ひずみ関係を整理すれば、応力ひず

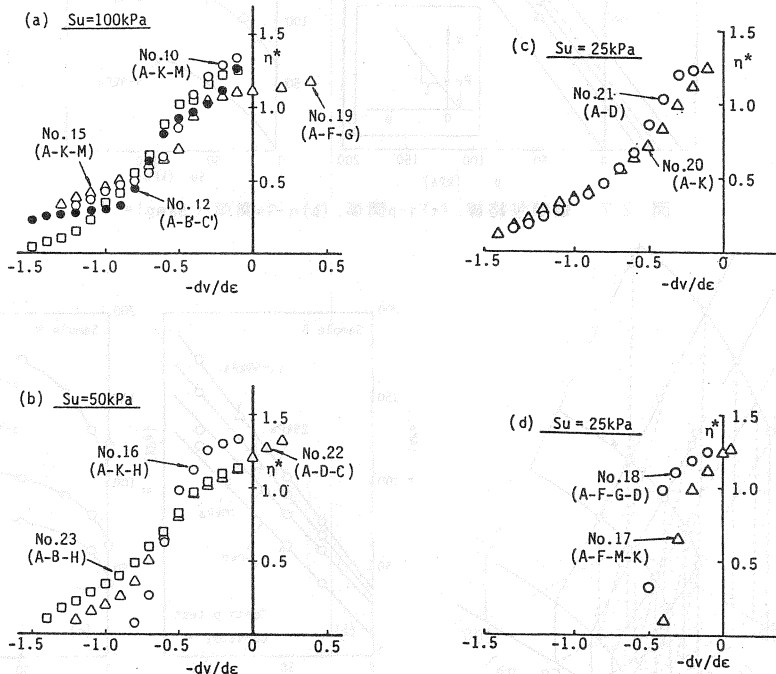


図-31 サクシオン履歴に注目した不飽和土の $\eta^*-dv/d\epsilon$ 関係 (Sample. A)

み挙動に及ぼす S_u の載荷・除荷履歴の影響や拘束圧の影響を少なくとも q をパラメータとして用いるよりは客観的に評価できそうである。図31は、主に図29と図30に示している η^*-e-v 関係に基づいて描いたひずみ増分比 dv/de と η^* の関係を示している。この関係は、飽和土のストレスダイランシー特性を評価するのによく用いられるものである。(a), (b), (c)図は、 S_u の除荷過程を含まない場合の結果であり、それぞれ S_u が100kPa, 50kPa, 25kPaの条件における η^*-dv/de 関係を示している。これらの結果から、 S_u に着目すれば不飽和土の η^*-dv/de 関係には p の大きさに関係なく一義的な関係が存在するように思われる。(d)図は、図30の結果を整理したものであり、 S_u 除荷履歴を受けた供試体の η^*-dv/de 関係を示している。 η^*-dv/de 関係は、飽和土という過圧密土の特性に類似しており、(a)から(c)図の結果とは異なった傾向となっている。このことは、サクシジョンの除荷履歴が不飽和土のせん断特性に与える影響は大きいものであることを示している。今後は、このようなひずみ増分比と応力比の関係を利用して、不飽和土の応力ひずみ挙動を弾塑性的な立場から検討して行きたい。

5. まとめ

本研究では、2種類の不飽和粘性土を対象に、間隙水圧と空気圧を独立に制御した三軸圧縮試験を実施し、特にサクシジョンの大きさと履歴に注目して、不飽和粘性土の力学挙動について実験的検討を加えた。得られた主な結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 不飽和土の力学特性を評価するための応力パラメータとしてサクシジョン S_u が有効なパラメータとなりうることを実験的に確認した。
- (2) S_u-p (平均主応力)空間上での等方圧縮過程において、相対的ではあるが、 p の変動は体積ひずみの変化に大きく寄与し、サクシジョンの変化は吸排水率の変化に大きく寄与することが実験的に明らかになった。また、いくつかの等方圧縮試験結果に基づいて、 e (間隙比) $-p-S_u$ 空間上に描いた状態面を利用すれば、ある程度不飽和土の圧縮特性が評価できることを示した。
- (3) サクシジョンは、せん断中に生じる軸ひずみ、体積ひずみ、吸排水率の発生を抑制する方向に作用していることが示された。
- (4) S_u-p 空間における等方載荷・除荷経路の違いが、その後のせん断特性に与える影響は、 S_u の除荷履歴を受けない限りにおいては、少ないことが示された。
- (5) S_u をパラメータにして描いた強度包絡線は概ね直線を呈し、その勾配は S_u の大きさに関わらずほぼ一定の値を示すことが確かめられた。また、破壊包絡線が、サクシジョンの除荷履歴の影響を受けることも確かめられた。
- (6) S_u の増加に伴い強度包絡線の軸差応力軸切片は双曲線的に増加し、その強度増加に対する寄与率には限界があることが示された。
- (7) サクシジョンの大きさや履歴に注意すれば、(3)式に示す応力パラメータを導入することにより、不飽和土の応力比・ひずみ増分比関係は比較的うまく評価できることが明らかにされた。

あとがき

本報告は、昭和60年度から昭和62年度まで、土質工学会中国支部より補助を受けて実施した「不飽和まき土の諸問題に関する研究委員会」(委員長河野伊一郎)の研究成果を取りまとめたものである。

3年間の研究活動において河野伊一郎委員長、藤井弘章、西垣 誠、および竹下祐二の各委員には不飽和土の実験方法、試験機の改良およびその力学的性質についての貴重な助言をいただいた。ここに、深く感謝の意を表すものである。

参考文献

- 1) Bishop, A.W. (1959): The principle of effective stress, Teknik Ukeblad. Vol.39, pp.859-863.
- 2) Bishop, A.W. (1960): The measurement of pore pressure in triaxial test, Proc. Conf. pore pressure and suction in Soils, London, Butterworths, pp.38-46.
- 3) Aitchison, G.D. and Bishop, A.W. (1960): Discussion in "Pore pressure and suction in soils", pp.150. London: Butterworths.
- 4) Bishop, A.W. and Donald, I.B. (1961): The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus, Proc. 5th Int. Conf. SMFE, Vol.1, pp.13-21.
- 5) Jennings, J.E.B. and Burland, J.B. (1962): Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils, Geotechnique 12, No.2, pp.125-144.
- 6) Blight, G.E. (1965): A study of effective stresses for volume changes, in Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas, pp.259-269. Sidney: Butterworths.
- 7) Burland, J.B. (1965): Some aspects of mechanical behaviour of partly saturated soils, in moisture equilibria and moisture changes in soil beneath covered areas, pp.270-278. Sidney: Butterworths.
- 8) Colman, J.D. (1962): Stress strain relations for partly saturated soils, Correspondence. Geotechnique 12, No.4, pp.348-350.
- 9) Bishop, A.W. and Blight, G.E. (1963): Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils, Geotechnique 13, No.3, pp.177-197.
- 10) Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1976): Constitutive relations for volume change in unsaturated soils, Can. Geotech. Jour., Vol.13, No.3, pp.261-276.
- 11) 軽部大蔵・苗村康造・森田 登・岩崎哲雄 (1978): 不飽和土の力学特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.269, pp.105-119.
- 12) Matyas, E.L. and Radhakrishna, H.S. (1968): Volume change characteristics of partially saturated soils, Geotechnique 18, pp.432-448.
- 13) 軽部大蔵・加藤正史・勝山潤一 (1986): 不飽和カオリンの有効応力と力学定数, 土木学会論文集, No.370, pp.5-14.