

(11) 泥質岩の変形特性に関する実験的研究

埼玉大学工学部 正員 吉中龍之進

埼玉大学工学部 正員 ○山辺 正

1. はじめに

軟岩の等方応力下、及びセン断応力下の変形特性を、主に圧密排水試験結果により論じ、粘土及び硬岩の変形特性と比較し、軟岩の満足すべき降伏関数の形状について考察する。

2. 等方応力下における変形特性と降伏点の意味

多数の軟岩について、一軸圧縮強度と飽和含水比の関係について調べた結果から、自然状態で非常に大きい間ゲキ比を有するにも拘らず、一軸圧縮強度も高いグループが存在し、その種の軟岩は構成粒子間の固結力が変形特性を支配している事が予想される。¹⁾ 図1は、多くの軟岩と代表的な粘土・砂の $e \sim \log p$ 曲線であり、図中の番号は表1に対応する。図中1～5の軟岩は、前述の粒子間固結力の強いグループに属しているが、この粒子間固結力をとり去った試料を用いて、逆に固結力の強さを知る事ができる。図1中、No.3の泥岩を気乾後、 74μ 以下に粉碎し改めて自然含水比の状態、元の泥岩の密度まで締固めた「人工泥岩」²⁾を用いた $e \sim \log p$ 曲線と、自然状態の泥岩の変形特性を比較すると、図2となる。図2から、自然状態の泥岩において現われる降伏点以降の圧縮指数は、人工泥岩の圧縮指数より大きい。これは自然状態の泥岩が降伏圧力より大きな等方応力を受けると、単に間ゲキが減少するのみならず、残存していた粒子間固結力も破壊していくためと考えられる。なお、人工泥岩の圧縮指数は、液性限界から Skempton の関係式で求めた値と近い³⁾事は興味深い。

以上により、自然状態の泥岩が見掛け上、正規領域にあっても圧密に続くセン断過程においては、残存している固結力の影響を強く受ける事が予想される。また、人工泥岩については、いわゆる正規粘土に関する多くの構成式^{4),5)}が、そのまま適用できる可能性がある。換言すれば、

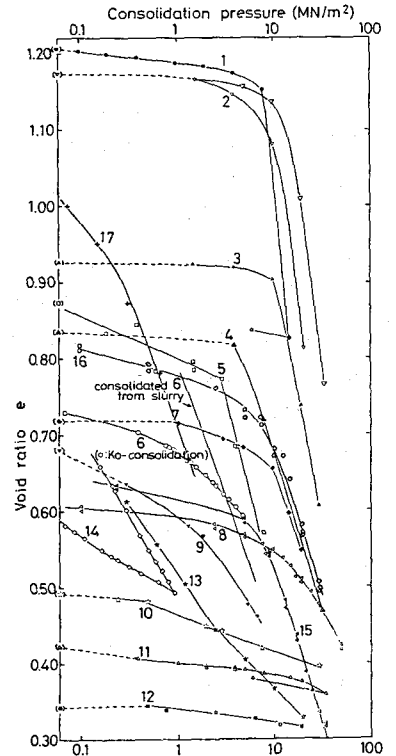


図1 等方応力下の変形特性
(Yoshinaka, Yamabe 1981)

表1
各種軟岩の
物理諸量
(Noは図1
中の1～17
に対応する。)

No.	Materials	Locality	Geology	e_0	G_s	q_u (Mpa)	remarks
1.	Higashi-Matsuyama siltstone	Higashi-Matsuyama	Miocene upper	1.21	2.54	6.81	
2.	Horinouchi mudstone	Yokosuka	Miocene	1.18	2.63	11.5	
3.	Sano mudstone	Yokosuka	Miocene	0.93	2.62	9.02	
4.	Hoshikawa siltstone	Yokohama	Pleistocene	0.84	2.56	3.45	
5.	Yokohama(N) siltstone	Yokohama	Pleistocene	0.87	2.67	2.06	
6.	London clay	Ashford	Eocene	0.64	2.73	0.21	(Bishop et al. 1965)
7.	Ohta tuff	Ohta	Miocene	0.72	2.48	4.70	(Adachi et al. 1979)
8.	Dense sand	Toyoura	Remoulded	0.61	2.63	0	(Miura et al. 1971)
9.	Keuper marl	Middle England	Triassic	0.52-0.72	2.76	0.41	(Chandler 1967)
10.	Kobe mudstone(B)	Shimohata	Miocene	0.49	2.67	2.63	
11.	Ohta tuff	Ohta	Miocene	0.44	2.53	13.6	
12.	Kobe mudstone(A)	Myodani	Miocene	0.34	2.66	7.06	
13.	Weathered granite	Iguchi-Jima	Cretaceous	0.67	2.66	0.02	(Yoshinaka et al. 1977)
14.	Weald clay	(LL 43, PL 18, Wsat 34 %)					(Henkel 1960)
15.	Dence sand	(ditto 8, and relation at maximum shear stress)					
16.	Loose sand	Toyoura	Remoulded	0.83	2.64	0	(Miura et al. 1971)
17.	Weathered granite	(Ryoke zone)	Cretaceous	0.09	—	—	(Nishida et al. 1979)

自然状態で固結力の影響の大きな泥岩にあっては、等方応力下での降伏点を Roscoe らの立場⁴⁾で解釈する事ができない事を意味する。セン断応力下での初期降伏面の形状と、等方応力下での降伏点の関係については後述する。

ここで、等方応力下の変形特性について更に検討するため各種の粘土を用いた高圧圧密実験結果⁶⁾に着目する。図3中の番号は、1がイライト、2がハロイサイト、3がカオリナイト、4がP-95 dry lake clay、5が風化した石灰岩である。同様に図4中の番号は1がモンモリロナイト、2と5は自然状態の粘土、3はヘクトライト、4がディクタイトである。これらの高圧圧密試験結果は、全て正規状態に相当することは言うまでもないが、活性が高い粘土ほど、圧縮性が高いことも指摘できる。また、図3.4中の各試料の圧縮指数は、モンモリロナイトの0.467、イライトの0.23を除くと全て0.16～0.08の範囲にある。さらに、これらの各直線を外挿し、 $e=0$ に相当する応力点を考えると構成鉱物の違いにかかわらず、ある範囲内に収束する傾向がみられる。この傾向は、間ゲキ比が更に大きな試料に関する圧密試験結果⁷⁾にもみられる。この収束点と、液性限界から求まる圧縮指数を用いれば、 $e-\log p$ 空間における Remould Sample の変形特性を、ある程度、予測しうる。

以上の考察により、図1の応力範囲で多数の泥質岩における見かけの正規領域は、粘土における正規領域とは無関係であり、固結力の存在を無視して考えられない事が明確となった。

3. セン断応力下における変形特性

一般に、地盤材料が繰返しセン断応力を受けると、除荷・再載荷に伴って弾性定数が変化することはよく知られている。この特性を表現するために種々の試みがなされている^{8),9)}が、ここでは、セン断過程において単調載荷した場合と、等方応力履歴を与えた後にセン断応力を加えた場合の変形特性について議論する。

まず、硬岩の降伏関数に関する研究のいくつかに触れる。図5は、各種硬岩の降伏点に関するデータをまとめたものである。¹⁰⁾ Y_0 は延性度1%に相当する降伏応力であり、 T_{oct} と平均応力は Y_0 によって無次元化されている。これらの実験結果から、硬岩における降伏関数は、Von Misesに近い形か、平均応力の増大に伴い降伏時の T_{oct} も増大する形となる事がわかる。いずれにしても平均応力の増加に伴い、降伏応力は減少する事がない。ただし、この場合の硬岩の一軸圧縮強度は数千 kgf/cm^2 である。

次に、塑性ひずみ増分ベクトルと降伏関数の形状について調べた例に注目してみる。図6及び図7は、一軸圧縮強度が、それぞ

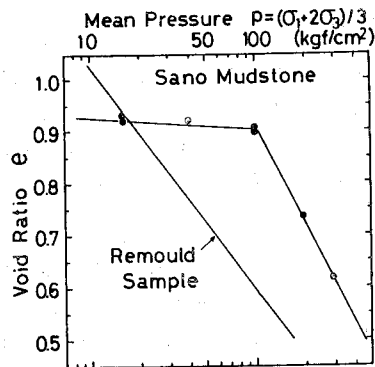


図2 自然状態及び人工泥岩の等方応力下の変形特性

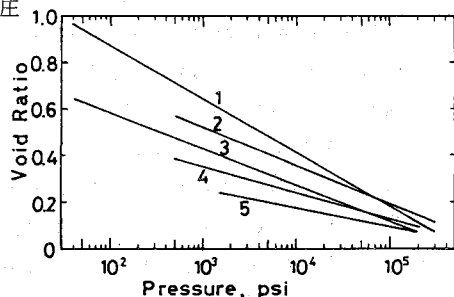


図3 各種粘土の圧密特性 (I) (Rieke et al. 1974)

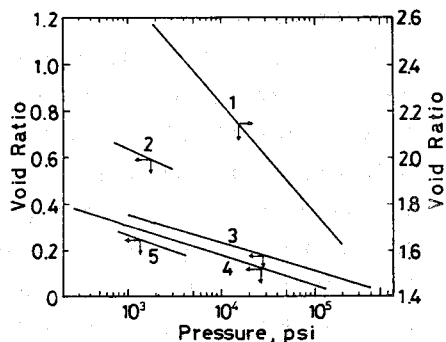


図4 各種粘土の圧密特性 (II) (Rieke et al. 1974)

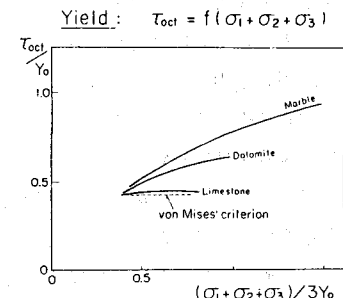


図5 各種硬岩の降伏曲線 (Mogi 1971)

れ 385kgf/cm^2 と 280kgf/cm^2 の大理石と石灰岩について、初期降伏点における塑性ひずみ増分ベクトルを、レンドリック面上にプロットした例である。¹¹⁾ いずれの場合にも、その初期降伏面は静水圧軸に関して閉じた形となっており、伸張側の形にも言及している。また、内部破壊が応力～歪関係に及ぼす影響を考慮して、Critical State Theoryにおける energy equation を修正し、岩石への適用を試みた研究¹²⁾では、滑らかな形状の閉曲線を得ている。

次に、軟岩の変形挙動に関する最近の研究について概観すれば以下のようであろう。Cambridge theoryの軟岩への適用を試みた研究¹³⁾では形式的に¹²⁾と同一の energy equationを導いている。また、エネルギー的考察に基づく構成式¹⁴⁾では放物線型の降伏関数を導いている。更に、非関連流動則を適用した研究^{15)～17)}、Mrözらの異方硬化則を適用した研究¹⁸⁾、Bažantらの Endochronic 理論を適用した研究¹⁹⁾などがある。ここでは、固結力の影響が大きな軟岩において、ひずみ硬化を示す領域において示すセン断変形特性から降伏関数が満足すべき条件について考察する。

図8は、図1中No.5の試料を用いたCD試験時の塑性ひずみ増分ベクトルの一部を対応する応力空間上にプロットしたものであり、塑性ひずみ増分は全ひずみ増分から弾性ひずみ増分を減じて求めた。また、P軸上の◎印は、等方応力下での降伏点を示すが $\sigma_3=30$ 及び 40kgf/cm^2 のCD試験においても、その初期に弾性部分を残すことは、前節で示した通り残存する固結力の影響を表わしている。

塑性ひずみ増分のベクトルは、セン断応力の増加に伴い、セン断ひずみ増分が徐々に卓越する形状を示し、ついには塑性体積ひずみが発生しない段階に至る。セン断応力の相対的な大小にもよるが、この傾向は図9のシルト岩や図10の泥岩にも共通する。なお、図9のシルト岩の物理諸量や繰返しセン断応力下での挙動については、既に発表した。²⁰⁾ また、図10の泥岩は図2の泥岩と同一である。図9中には、応力空間上の応力点と、その点における塑性ひずみ増分ベクトルを与えた時に考え得る楕円形の降伏曲面を同時にプロットしてある。引張応力下においては、近似的に破壊と降伏が同時に発生すると考えれば、P軸の引張応力側での境界条件を決定できる。

以上においては、単調載荷セン断過程における塑性変形について考えたが、次に等方応力下において、降伏値より大きな応力履歴を与えた後のセ

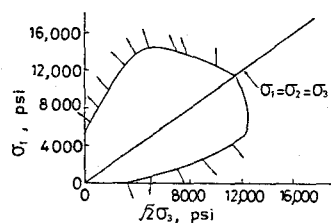


図6 Cordova 石灰岩の初期降伏面 (Miller et al. 1972)

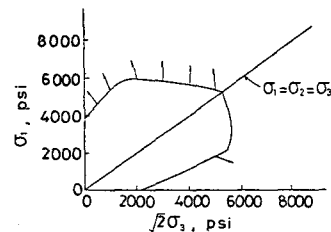


図7 Batesville 大理石の初期降伏面 (Miller et al. 1972)

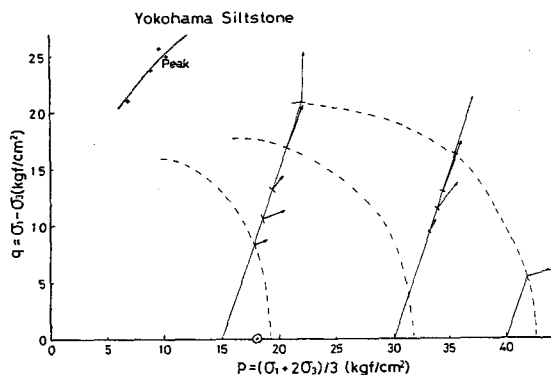


図8 横浜シルト岩における塑性歪増分ベクトル

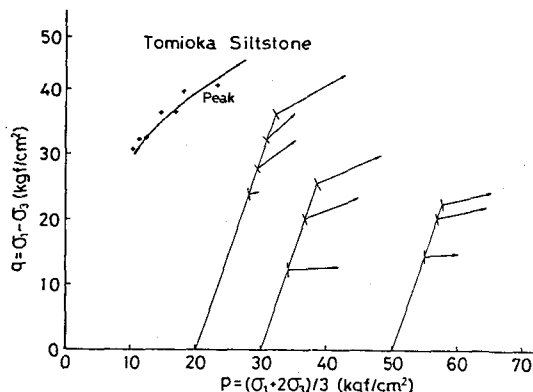


図9 富岡シルト岩における塑性歪増分ベクトル

ン断応力下の挙動を調べる。図11及び図12は、それぞれ、図8及び図9の試料を用いた場合のセン断変形である。いずれの場合にも、OCRの増大に伴い最大強度も変形係数も著しく低下するが、残留強度はほぼ等しいことがわかる。この場合OCRが高ければ高いほど密度も高くなっているが、等方応力履歴を与えた事により粒子間固結力が著しく低下する事を示した好例であり、コンクリートのように固結力が強度発現に支配的な材料にもみられる²¹⁾現象である。

4. まとめ

自然状態において固結力の影響を無視できない泥質岩にあっては、等方応力下の降伏点以降の変形挙動は、いわゆる正規粘土の変形挙動と異なる事。単調載荷のセン断過程においては、楕円形の降伏曲面を考へる事、等方応力下の応力履歴を与えた後のセン断変形過程においては残存する固結力の影響を強くうけ、異方硬化則の適用に際してもセン断応力と等方応力の質の差などを考慮する必要性がある事、などを示した。変形過程の定式化については、別途報告する。

5. 参考文献

- 1)Yoshinaka,R&T.Yamabe(1981)Proc.Int.Symp.on Weak Rock pp.87-92
- 2)仲野(1966) 農土試報告 №4,pp.143-167 3)吉中・永湖・長谷川(1976) 土木学会年講Ⅲ-129,pp230-231 4)たとえば,Roscoe & Burland(1968) "Engineering Plasticity" pp.535-609 5)関口(1978)Soils and Found. vol.18, №3, pp. 85-95 6) Rieke & Chilingarian (1974) "Compaction of Argillaceous Sediments" P.185 7) Lambe & Whitman(1969) "Soil Mechanics" p.320 8) Mroz, et al.(1978)Int. J. Num.& Anal. Methods in Geomech. vol.2, pp. 203-221 9) Bazant et al.(1979) ASCE, EM3, pp.407-428
- 10)Mogi,(1971)J.G. R., vol.76,pp.1255-1269 11)Miller & Cheatham(1972) Int. J. R. M. M. S., vol.9,pp.453-474
- 12)Gerogiannopoulos & Brown(1978)Int. J. R. M. M. S. vol. 15 pp.1-10 13)赤井・足立・西(1978) 土木論報 №271 pp. 83-95 14)Hirai & Satake(1982)Proc. JSCE №320 pp. 159-164 15)Pender (1978) Geotech. vol.28 №1 pp. 1-25 16) Ichikawa et al.(1983) Proc. of Int. Conf. on Constitutive Laws, Tucson 17) 田中(1979) 農土試報告 №18 pp.101-122 18) 岡本・田中(1982) 土木学会年講Ⅲ-120 pp.237-238
- 19) 大西 他 (1982) 17th 土質研究発表 pp.633-636
- 20) 吉中 他 (1982) 17th 土質研究発表 pp.605-608
- 21) 丹羽 他 (1971) 土木論報 №185 pp.31-41

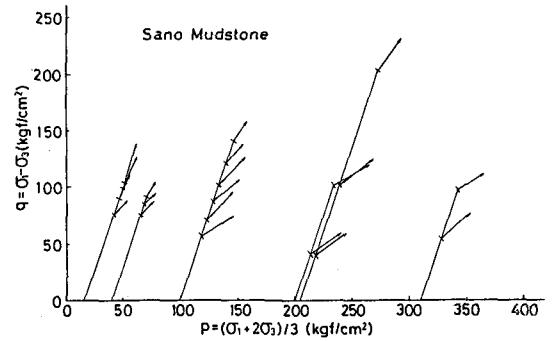


図10 佐野泥岩における塑性ひずみ増分ベクトル

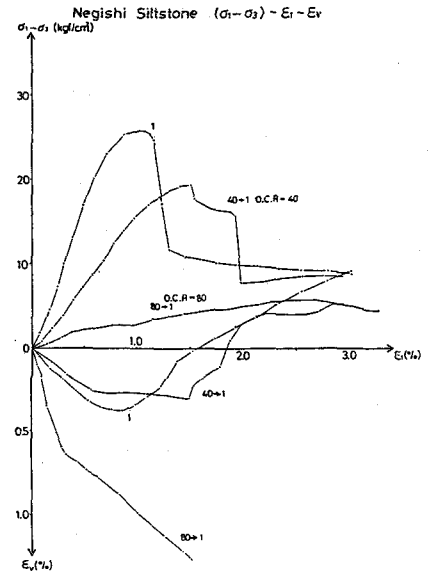


図11 横浜シルト岩の等方応力履歴後の
応力～ひずみ関係

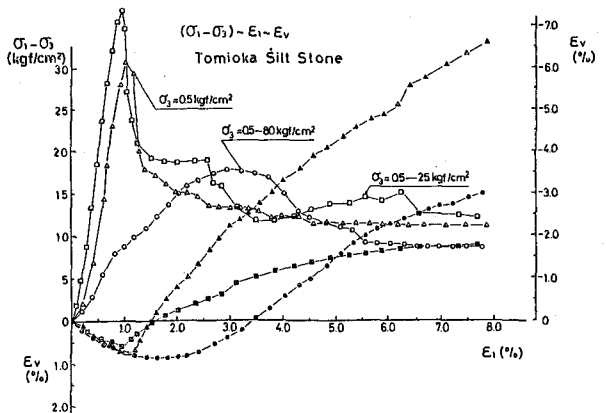


図12 富岡シルト岩の等方応力履歴後の応力～ひずみ曲線

(11) Experimental studies on plastic deformation behaviour of soft rocks

Saitama Univ. Ryunoshin Yoshinaka

Saitama Univ. Tadashi Yamabe

Abstract

Triaxial compression tests under consolidated-drained condition were performed using many soft rocks in Japan. Plastic deformation properties of these soft rocks are examined, and compared with that of clays and hard rocks.

Main results obtained from the experiments are as follows:

- 1 Mechanical properties of soft rocks are greatly influenced by bonding strength.
- 2 Deformation behaviour of these soft rocks under high spherical stress, are quite different from that of normally consolidated clays.
- 3 Under monotonic loading condition, the shape of plastic potential can be considered to be ellipse.
- 4 Shearing process after loading history of spherical stress, are also influenced by bonding strength.