

弱面を有する泥岩の動的強度-変形特性

DYNAMIC STRENGTH-DEFORMATION PROPERTIES OF MUDSTONE WITH WEAK PLANE

西 好 -*

By Koichi NISHI

To clarify mechanical properties in particular strain rate dependency and cyclic effect on strength and deformation of mudstone with weak plane, triaxial and cyclic triaxial compression tests are performed on specimens which has discontinuous plane with variable angle θ to the maximum principal stress plane. We mainly describe dependency of strength and deformation on the angle, and deformation characteristics during cyclic loading, and strain rate dependency of strength and Yong's modulus. Particularly, it is found that maximum deviator stress $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ at $\theta = 60^\circ$ nearly equals the residual strength, and rate dependency of strength clearly can be seen for the wide of strain rates, and $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ at $\theta = 60^\circ$ can be given by failure criterion for residual strength of intact specimen based on effective stress.

1. ま え が き

岩盤中には多かれ少なかれ、地質学的分離面が存在していることが一般的である。地質学的分離面といっても、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の幅と長さから成る微小な割れ目から地殻応力の作用によって生じた断層・破砕帯など幅広い範囲を含む¹⁾。

硬質な岩石から成る岩盤では、岩石の強度-変形特性そのものにマイクロクラックに依拠する寸法効果がみられること、および節理が発達している場合には、不連続面上での挙動が岩盤全体の挙動を支配することが知られているが、軟岩で構成される軟質岩盤では岩石の力学的挙動と岩盤のそれとの間に比較的強い相関性があるものと考えられている。たとえば、本論文で対象とする新第三紀堆積軟岩である泥岩の供試体寸法を変えて（直径35 mm～300 mm、高さは長さの2倍）実施した三軸圧縮試験結果から、三軸圧縮強度と供試体寸法とを比較してみると図-1のようになる²⁾。一般に岩石供試体に対する寸法効果は、微細な割れ目の間隔あるいは密度に依存するものとされているが、有効拘束圧 $=6\ \text{kgf/cm}^2$ ($1\ \text{kgf/cm}^2 = 98\ \text{kPa}$ ；以後同様)での実験結果からのみ判

断すると本泥岩に対してはこのような影響はほとんどないものと考えてよい。したがって、工学的に意味のある地質学的分離面を含んでいない場合は、このような泥岩に対しては岩石の強度-変形特性から岩盤の力学挙動を予測できるものといえよう（ただし、このような性質は、軟岩全体に適用されるものではなく、ひびわれの多い軟岩では顕著な寸法効果が生じることが知られ、いわゆる進行性破壊の原因の一つとして考えられている）。

これらの観点から、今までにインタクト供試体を用いてさまざまな角度から泥岩の強度-変形特性について論じてきた^{3)~5)}。特に、最大強度とクリープ破壊強度ならびに繰返し載荷時における強度に着目して議論を進めた

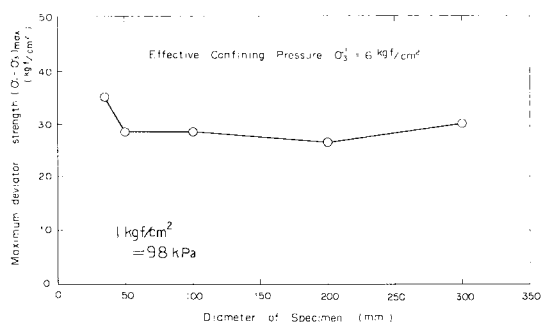


図-1 三軸圧縮強度と供試体寸法の関係

* 正会員 工博 電力中央研究所土木研究所立地部土質基礎研究室 (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

が、軟質岩盤といえども断層・破碎帯などの弱面が存在することがある。

弱面を有する岩石の力学特性、特に静的強度-変形特性に関しては、節理性岩盤との対比で古くから数多くの研究が行われている^{6)~8)}。本報告で対象とする三軸圧縮試験装置を用いた研究では、弱面角度とすべり面の角度の関係を論じた Lane & Hock の研究⁹⁾、同様の観点から岩石と岩盤との強度関係を論じた足立らの研究^{10), 11)}が挙げられよう。

従来の研究から、弱面を含む岩石供試体の静的力学特性についてかなりの部分が明らかにされてきたといえるが、弱面部において発揮される動的強度-変形特性については未解明な点が少なくない。本論文は、既往の研究成果を踏まえ、いったんせん断により破断面を生じさせた供試体ならびに最大主応力面に対し、60°の角度で切断面を形成した供試体を主たる対象とし、一定ひずみ速度試験および繰返し載荷試験を実施して、弱面上での強度-変形特性について考察した結果について述べたものである。

2. 実験装置・試料および実験内容

用いた実験装置および試料は、文献3)で述べたものと同様である。供試体寸法は直径50mm、高さ100mmの円柱形であり、最大主応力面に対し種々の角度 θ をもつ切断面をダイヤモンドカッターにより入れた供試体と切断面のない供試体を用いた。試験前には水浸させた状態で24時間脱気を行い、完全飽和のもとで試験を行った。

本報告で述べる主たる実験内容は、①種々なひずみ速度下における圧密非排水試験および②繰返し載荷試験である。

①に関しては、種々な角度で切断された供試体 (Saw cut Specimen: 以後これを切断面を有する供試体とよぶ)、およびインタクト供試体をいったん残留状態にまでせん断させて破断面を生じている供試体 (Re-Sheared Specimen: 以後これを破断面を有する供試体とよぶ) に対して実施したが、特に前者に対しては、最大主応力面に対し60°の角度で切断面を有する供試体を主たる対象として行った。②の試験は、すべて60°の角度で切断面を有する供試体を用いて実施した。

試験はすべて圧密非排水条件下で実施した。なお、圧密はナイロンメッシュによるサイドドレーン方式を採用して、側方排水により行った。圧密時には、6 kgf/cm² (側圧 ≤ 6 kgf/cm²) および 3 kgf/cm² (側圧 > 6 kgf/cm²) のバックプレッシャーを負荷している (軟岩においては一般に、低拘束圧下でせん断中に負の過剰間隙水圧が発生するが、場合によっては絶対大気圧と同等の負圧が生

じることがある。このことを防止するために有効拘束圧 < 6 kgf/cm² で大きなバックプレッシャーを負荷している)。

3. 実験結果とその考察

(1) 強度-変形特性に及ぼす弱面の角度の影響

あらかじめ人工的に弱面を入れた飽和供試体を用いた三軸圧縮試験を圧密非排水条件のもとで実施した。載荷速度は、 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/min$ とし、弱面の切断角度 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ (有効拘束圧 $\sigma'_{30} = 6 \text{ kgf/cm}^2$) および有効拘束圧 $\sigma'_{30} = 3 \sim 60 \text{ kgf/cm}^2$ ($\theta = 60^\circ$ の場合のみ) の10種について試験を行ったが、本節では切断面の角度をパラメーターとして実施した $\sigma'_{30} = 6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合を取り上げることとし、 $\theta = 60^\circ$ で拘束圧をパラメーターとした場合の試験結果は3.(2)以降で述べる。

切断面を有する供試体の試験後の破断面角度を図-2に示した。 $\sigma'_{30} = 6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合をみると、切断角度が

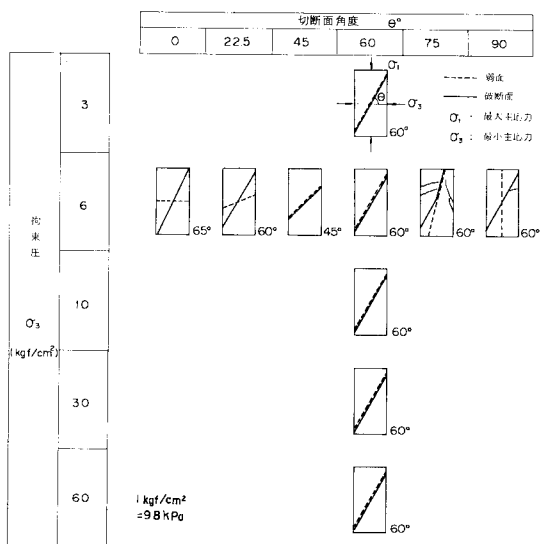


図-2 供試体に生じた破断面と切断面の角度

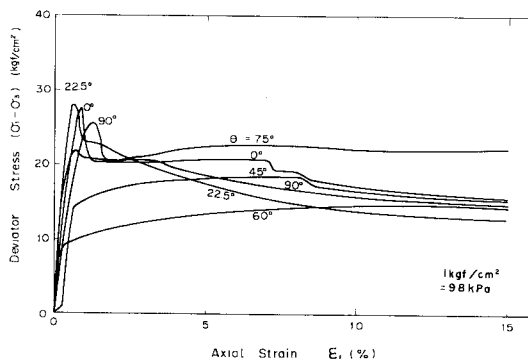
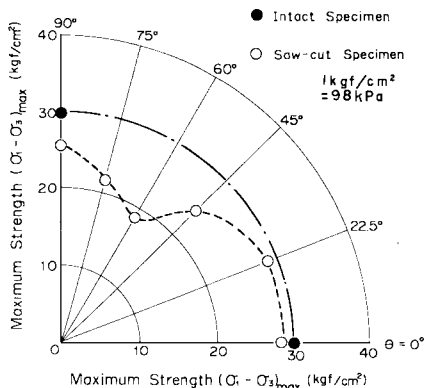
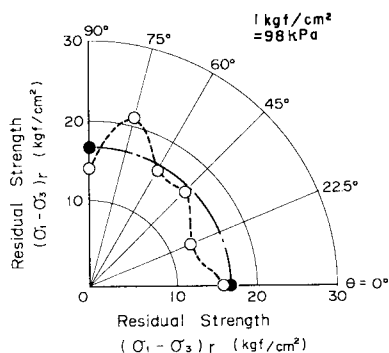


図-3 切断面を有する供試体の応力-ひずみ曲線



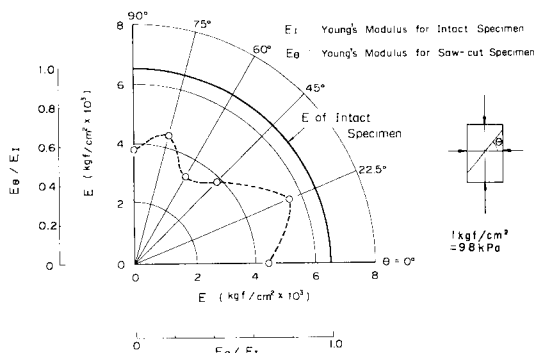
図—4 切断面角度と最大強度の関係 (初期有効拘束圧 = 6 kgf/cm²)



図—5 切断面角度と残留強度の関係 (初期有効拘束圧 = 6 kgf/cm²)

45°と75°の場合を除いて、すべて $\theta=60^\circ$ ですべり破壊を生じていることがわかる。一方、 $\theta=60^\circ$ の角度で切断面を有する供試体に対しては拘束圧の大きさによらず、すべて切断面上で破壊が生じていることが示されている。すなわち、 $\theta=60^\circ$ の方向で切断面を有している供試体の力学特性は、切断面上でのそれに支配されているものと考えてよい。

図—3は、 $\sigma_{30}=6 \text{ kgf/cm}^2$ の初期有効拘束圧下で三軸圧縮試験(CU)を行ったときの、応力-ひずみ曲線を角度 θ をパラメータにして示したものである。図によれば、 $\theta=0^\circ, 22.5^\circ$ および 90° の場合は、いずれもインタクト供試体と同様に軸ひずみが0.7%~1.2%付近で最大強度を示した後、急激にひずみ軟化を示す脆性的傾向が示されているが、切断面に沿ってすべりが生じた $\theta=45^\circ, 60^\circ$ および 75° の切断角度を有する供試体は、軸ひずみが0.5%~0.7%付近まで弾性的傾向を示した後、最大強度を示すことなく、幾分か硬化を伴いながら変形が増大する延性的な挙動を示していることが明らかである。



図—6 切断面角度とヤング率の関係

一方、図—3から最大強度と残留強度を読み取り、切断面の角度とそれらの関係を示したのが、図—4および図—5である。ここに、 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ および 75° の場合の最大強度は残留強度に等しいものとし、残留強度は軸ひずみ15%時での軸差応力を採用している。なお各図中には、インタクト供試体に対する最大強度と残留強度を黒丸でそれぞれ示してある(最大強度 $\approx 30 \text{ kgf/cm}^2$ 、残留強度 $\approx 17 \text{ kgf/cm}^2$)。図—4によると、 $\theta=0^\circ, 22.5^\circ$ および $\theta=90^\circ$ での最大強度は、インタクト供試体の最大強度にほぼ等しいが、 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ および $\theta=75^\circ$ の場合のそれは、約60%~75%程度であることが知られる。一方、残留強度に関していえば、 $\theta=75^\circ$ の場合に幾分か大きめの値が得られているものの、 θ の大きさによらず、切断面を有する供試体の残留強度はインタクト供試体のそれにほぼ等しいものとみなすことができよう。

他方、切断面の存在とその角度が弾性定数(ヤング率)に及ぼす影響を調べるために準備したのが図—6である。なお、ここではヤング率 E として、応力-ひずみ曲線における初期接線勾配として算出した値を採用している。図中にはインタクト供試体で得られた同一拘束圧下での $E(E_i)$ も示した。図によれば、切断面を有する供試体の $E(E_\theta)$ は角度のいかんにかかわらず、インタクト供試体のそれよりいずれも小さい値を示している。これは、軸差応力の増加によって角度の大小を問わず、切断面上での接触部分が圧壊し、その部分での変形が供試体全体の圧縮分に含まれることによるものと思われる¹¹⁾。特に、 $\theta=45^\circ\sim 75^\circ$ の範囲では E の減少が顕著であるが、これは切断面上での変形が卓越して生じていることを意味している。なお、 $\theta=60^\circ$ での E とインタクト供試体の E との比は、約50%程度である。

(2) 一定ひずみ速度下における弱面の強度-変形特性

ここでは、インタクト供試体を残留状態にまでせん断し、破断面を生じさせた供試体と、 $\theta=60^\circ$ の角度で切

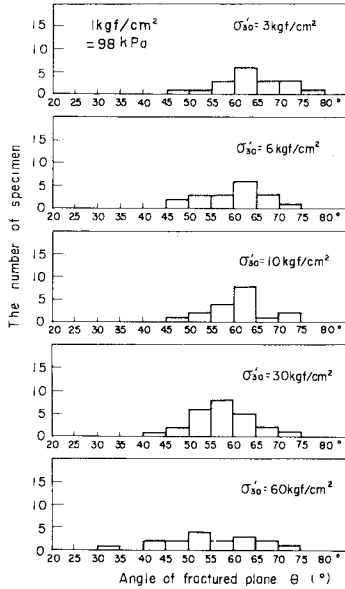


図-7 インタクト供試体に対する破断面の角度

断面を有する供試体の強度-変形特性、特にそれに及ぼす拘束圧の影響について述べる。

破断面をもつ供試体に対する試験は圧密非排水試験により残留状態にまで至らしめた供試体に対し、初期の拘束圧状態 ($\sigma'_{30} = 3 \sim 60 \text{ kgf/cm}^2$) へといったん除荷して等方圧密を行い、同一の拘束圧下で再びせん断試験を行う手順により実施した。なお、図-7にはクリープ試験および振動載荷試験を含めた試験結果よりインタクト供試体に対する破断角度の頻度分布を各拘束圧ごとに示してある。図から、初期有効拘束圧 σ'_{30} が $3 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲では 60° 付近、 30 kgf/cm^2 では $55 \sim 60^\circ$ 付近で破断面の角度が卓越していることが示されている。一方、 60 kgf/cm^2 の有効拘束圧下では分布にピークがみられないが、これはこの程度の拘束圧下では明瞭な破断面が生じず、たる形の変形を示したことによる。以下に述べる試験結果は、このような破断角度を有している供試体に対して得られたものである。一方、切断面を有する供試体に対しては、 $0.1 \text{ \%}/\text{min}$ および $1 \text{ \%}/\text{min}$ のひずみ速度を主体とした圧密非排水試験を実施した。

主たる試験結果は、表-1と表-2にまとめてあるが表-2中で(*)で示したのは、等方圧密後 2.0 kgf/cm^2 の軸差応力を負荷して、 $\pm 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の応力振幅下で 10^4 回繰返し載荷した後に非排水単調載荷試験を行ったものである。なお、表-2で示した降伏強度 ($\sigma_1 \sim \sigma_3$)_y は、せん断により急激なすべりが開始する時点での軸差応力を意味しており、残留強度は軸ひずみが 15 \% 時における軸差応力として決定した。

図-8および図-9は、実験結果の一例としてひずみ

表-1 破断面を有する供試体に対する三軸圧縮試験結果

σ'_{30} (kgf/cm ²)	$\dot{\epsilon}$ (%/min)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_y^{**}$ (kgf/cm ²)	u_y^{***} (kgf/cm ²)	ϵ_r^{****} (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_r^{*****}$ (kgf/cm ²)	u_r^{*****} (kgf/cm ²)
3	10	14.7	-1.16	8.35	12.3	-1.06
	0.1	12.9	0.25	6.51	12.8	0.28
	0.001	12.5	0.59	1.24	12.4	0.56
6	10	16.2	1.74	4.36	15.3	1.77
	0.1	17.4	2.37	2.61	16.4	1.94
	0.001	12.9	2.08	2.84	11.8	2.10
10	10	22.1	5.12	2.33	18.1	7.21
	0.1	17.9	4.73	1.95	14.8	4.78
	0.001	18.0	4.78	0.78	13.6	6.98
30	10	37.4	16.60	2.53	22.8	21.31
	0.1	29.6	20.44	3.58	22.8	21.25
	0.001	25.9	20.60	2.72	20.6	23.23
60	10	64.8	37.55	3.51	42.1	35.65
	0.1	63.2	36.35	4.51	48.3	42.78
	0.001	44.5	31.88	5.60	42.6	34.95

* 最大強度
** 最大強度発現時点での過剰間げき水圧と軸ひずみ
*** 残留強度
**** 残留強度発現時点での過剰間げき水圧

表-2 切断面を有する供試体に対する三軸圧縮試験結果

$\dot{\epsilon}_1$ (%/min)	σ'_{30} (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_y^{**}$ (kgf/cm ²)	ϵ_y^{***} (%)	u_y^{****} (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_r^{*****}$ (kgf/cm ²)	ϵ_r^{*****} (%)	u_r^{*****} (kgf/cm ²)
0.1	3.0	4.80	0.27	1.24	13.25	14.80	-1.06
	6.0	9.28	0.30	2.89	14.36	14.89	1.45
	10.0	13.50	0.50	5.68	16.26	14.80	6.11
	30.0	30.00	1.17	19.31	18.95	14.87	23.70
1.0	3.0*	5.72	1.39	2.26	13.40	15.0	0.74
	6.0*	14.83	0.98	2.76	13.80	13.0	1.94
	6.0	10.54	0.85	2.88	13.18	15.0	1.27
	10.0*	22.73	1.13	4.44	20.44	15.0	4.73
10.0	6.0	9.00	0.218	8.83	13.17	15.0	4.46

* 応力振幅一定で 10^4 回繰返し載荷させた後、試験を実施
** 降伏強度
*** 降伏強度発現時点での軸ひずみと過剰間げき水圧
**** 残留強度
***** 残留強度発現時点での軸ひずみと過剰間げき水圧

速度が $0.1 \text{ \%}/\text{min}$ 下における軸差応力-間隙水圧-軸ひずみ曲線を示したものである。破断面ならびに切断面を有する供試体の応力-ひずみ挙動は拘束圧の大小を問わず類似した傾向にあることが知られる。すなわち、初期有効拘束圧が $3 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ のもとでの応力-ひずみ関係は、弾-完全塑性的であり、最大強度と残留強度はほぼ一致しているが、 30 kgf/cm^2 以上でのそれはインタクト供試体において示されたのと同様にひずみ硬化-軟化型の応力-ひずみ曲線を示している。ただし、切断面を有する供試体で $\sigma'_{30} \leq 6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の降伏強度は残留強度よりも小さい。

一方、このときの有効応力径路を同一ひずみ速度下でインタクト供試体に対して得られた有効応力径路と比較して示したのが図-10および図-11である。なお、図中にはインタクト供試体に対して得られた残留強度線も示してある。図から以下の点が指摘できる。

1) 初期有効拘束圧 σ'_{30} の大きさにかかわらず、各拘

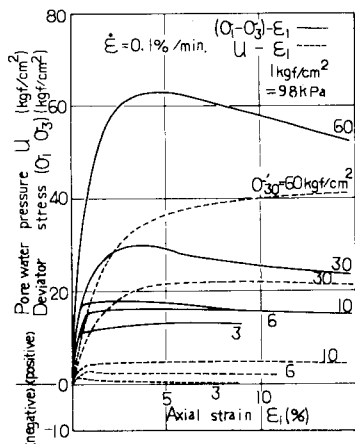


図-8 破断面を有する供試体の軸差応力-過剰間隙水圧-軸ひずみ関係 ($\dot{\epsilon} = 0.1\%/min$)

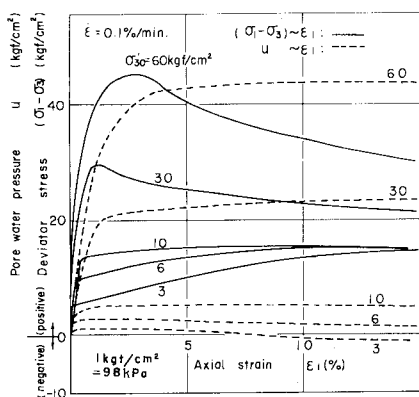


図-9 切断面を有する供試体の軸差応力-過剰間隙水圧-軸ひずみ関係 ($\dot{\epsilon} = 0.1\%/min$)

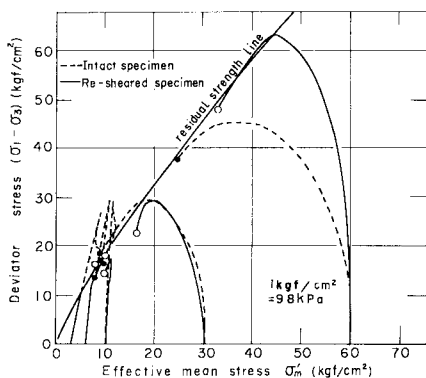


図-10 破断面を有する供試体の有効応力径路

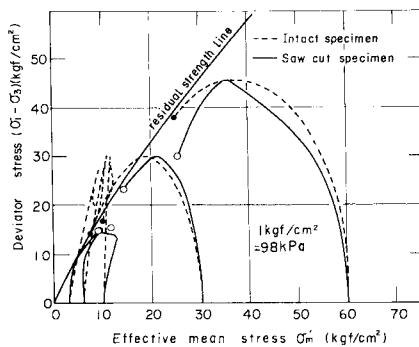


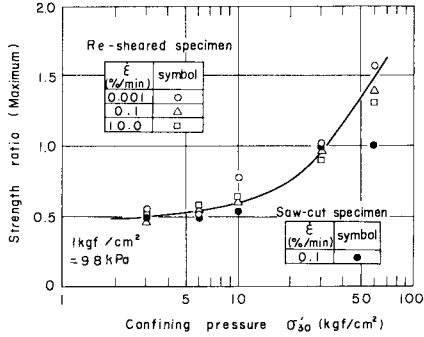
図-11 切断面を有する供試体の有効応力径路

にあるが、残留強度線に到達すると残留強度線に沿って遡上しながらせん断抵抗力が増大する傾向を示す。一方、 $\sigma'_{30} \geq 30 \text{ kgf/cm}^2$ 以上ではインタクト供試体に対する有効応力径路とまったく類似した傾向にある。一方、 $\sigma'_{30} = 60 \text{ kgf/cm}^2$ の高拘束圧に着目するとインタクト供試体の場合、最大強度発揮時の有効応力比 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} / \sigma'_m$ は残留強度のそれより小さいが、破断面ならびに切断面を有する供試体の場合はそれらはほぼ等しい。すなわち、最大強度および残留強度はともに残留強度線に近い位置にプロットされていることが示されている。

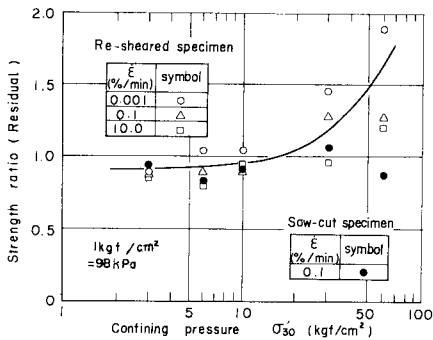
次に、インタクト供試体で得られた最大強度と残留強度および破断面と切断面を有する供試体に対するそれらと比較してみるために図-12および図-13を準備した。ここに、図-12は(破断面および切断面を有する供試体の最大強度/インタクト供試体の最大強度: 最大強度=最大軸差応力)と初期有効拘束圧 σ'_{30} の関係を、一方、図-13は同様に残留強度に対する比と σ'_{30} との関係を示したものである。図-12によれば $\sigma'_{30} = 3 \text{ kgf/cm}^2$ での強度比は0.5程度であるが、拘束圧が増大するにつれて強度比も増加し、いずれの試験においても $\sigma'_{30} = 30 \text{ kgf/cm}^2$ ではインタクト供試体の最大強度と等しくなることがわかる。また、 60 kgf/cm^2 の拘束圧下では両者の試験結果に差が現われ、破断面を有する供試体の強度比は1.5と高い値が示されているが、切断面を有する供試体では、1.0とインタクト供試体の強度とほぼ同等の値が示されている。一方、残留強度に対する比をみると弱面を有する供試体は、拘束圧の大きさによらずインタクト供試体の残留強度と同等の値を示しているが、再せん断時においては拘束圧が大きくなるほど強度比も大きくなり、 $\sigma'_{30} = 60 \text{ kgf/cm}^2$ のもとでは1.2~1.9の強度比を示している。このような再せん断時における高拘束圧下での強度の増大は、再圧密時において破断面上での粒子構造の変化が顕著に生じるとともに、せん断によって生じた過剰間隙水圧が消散することにより、過圧密状態へと移行し、続いてのせん断に対する抵抗強度が増加

束圧下での最大強度ならびに残留強度の値はインタクト供試体で得られた残留強度線付近に位置する。

2) 有効拘束圧 σ'_{30} が3, 6 kgf/cm²での有効応力径路をみると、残留強度線以下では σ'_m 軸に直交する傾向



図一12 強度比(破断面および切断面を有する供試体の最大強度/インタクト供試体の最大強度)と拘束圧の関係



図一13 強度比(破断面および切断面を有する供試体の残留強度/インタクト供試体の残留強度)と拘束圧の関係

することによって生じるものと考えられる。

(3) 繰返し載荷時における弱面の強度-変形特性

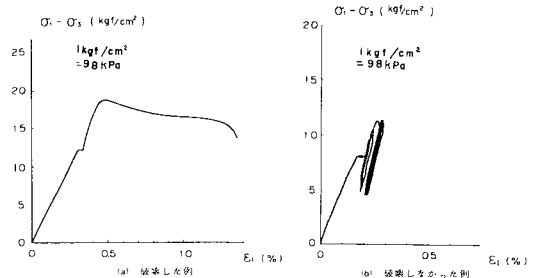
最大主応力面に対し、60°の角度で切断面を有する供試体に対し、3.0、6.0および10.0 kgf/cm²の有効拘束圧下で繰返し載荷試験を実施した。表一3には、実験条件と主たる試験結果を示す。採用した波形は正弦波であり、周波数は0.01~3.0 Hzの範囲とした。なお、繰返し載荷前には、表に示した大きさの初期軸差応力を負荷したが、これは最大主応力の方向を繰返し載荷時に変化させることなく、弱面部でのすべりのみに着目した実験を行うことを目的としたことによる。初期軸差応力の負荷は排水条件で実施した。

図一14 (a), (b) は、得られた軸差応力と軸ひずみの関係の一例(有効拘束圧=10.0 kgf/cm², 初期軸差応力=12.0 kgf/cm², および 8 kgf/cm², 周波数=0.5 Hz)を示したものであり、(a) はすべりが生じた場合を、一方 (b) はすべりが生じなかった場合を示している。表一3にも示したように、すべりを生じるときの繰返し回数は、おおむね1/4波である。すなわち、図一14(a)にも示されているように、切断面でのすべりは疲労破壊的に生じるのではなく、すべりに対するせん断強度を超過

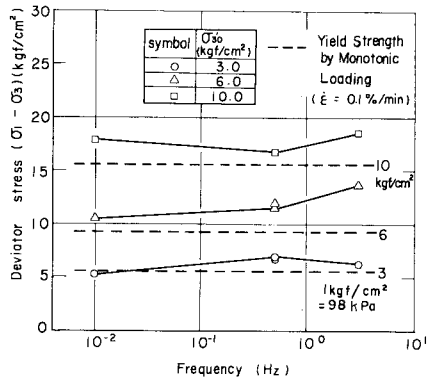
表一3 切断面を有する供試体に対する振動載荷試験の結果

σ_{30}^i (kgf/cm ²)	Frequency (Hz)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_0^*$ (kgf/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_1^{**}$ (kgf/cm ²)	N_f^{***}
3.0	0.01	4.0	5.27	1/4
	0.5	"	7.02	1.1/4
	3.0	"	6.74	1/4
	"	"	6.34	1/4
8.0	0.01	8.0	10.55	1/4
	0.5	"	11.56	24
	3.0	"	12.13	15
	"	"	13.86	1/4
10.0	0.01	12.0	17.92	1/4
	0.5	"	16.78	1/4
	3.0	"	18.91	1/4

* 初期軸差応力
** 降伏強度
*** 破壊時繰返し回数
1 kgf/cm² = 9.8 kPa



図一14 切断面を有する供試体の繰返し載荷試験における応力-ひずみ曲線



図一15 切断面を有する供試体の繰返し載荷試験における破壊強度と周波数の関係

した応力が負荷されると、繰返し効果を伴わずに急激に発生するものといえよう。一方、すべりを生じたときの軸差応力(これは先に述べた単調載荷時における降伏強度と同義である)と周波数の関係を図一15に示した。図中には0.1 %/minのひずみ速度下で、同一の切断面角度を有する供試体に対して得られた降伏強度を破線で示してある。図によれば、繰返し載荷による降伏強度には幾分かの周波数依存性が示されており、速度効果によ

る降伏強度の増大がわずかではあるが認められることが知られる。

4. 弱面での強度-変形特性に関する考察

(1) ヤング率と拘束圧の関係

3.(1)では、切断面の角度と応力~ひずみ曲線の初期接線勾配から求めたヤング率 E の関係について述べたが、ここでは $\theta=60^\circ$ の弱面角度を有する供試体（破断面を有する供試体も含む）の E と拘束圧の関係について整理してみる。図-16はインタクト供試体、切断面および破断面を有する供試体の E と拘束圧の関係プロットしたものである。なお、実験結果はすべて $0.1\%/min$ のひずみ速度下で得られたものである。図によれば、拘束圧 30 kgf/cm^2 （インタクト供試体の圧密降伏応力に相当）以上では、弱面の有無を問わず各供試体で得られる E には大きな差はみられず、ほぼ同一の値を

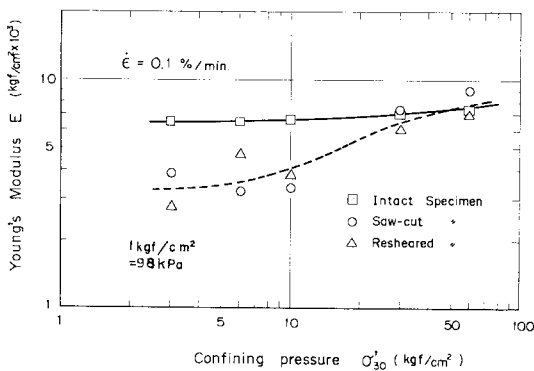


図-16 インタクト供試体、破断面および切断面を有する供試体のヤング率と拘束圧の関係（ひずみ速度 = $0.1\%/min$ ）

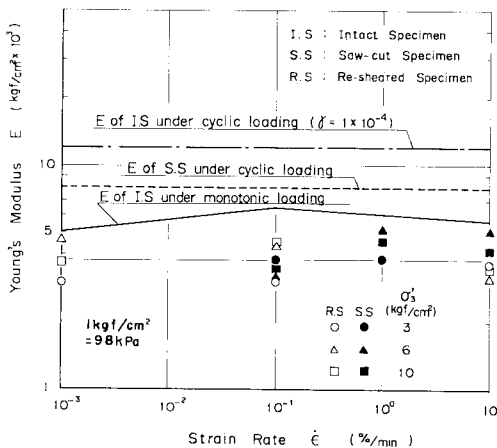


図-17 各供試体におけるヤング率とひずみ速度の関係ならびに繰返し載荷時のヤング率

示しているものとみてよい。これは弱面を有する供試体の最大強度が、 30 kgf/cm^2 以上の拘束圧下でインタクト供試体の最大強度とほぼ同一になることと類似している。一方 30 kgf/cm^2 以下では、弱面上での E はインタクト供試体の E を下回り、 $3, 6, 10\text{ kgf/cm}^2$ の拘束圧下ではいずれもインタクト供試体における E の約 50% の値を示していることがわかる。したがって、変形特性の面からみても、インタクト供試体における圧密降伏応力の大きさが、弱面上での変形挙動をも支配しているものといつてよい。

(2) ヤング率とひずみ速度との関係

ひずみ速度の大きさがヤング率に及ぼす影響を調べるために準備したのが図-17である。なお、図は比較的数据の多い拘束圧 $3, 6, 10\text{ kgf/cm}^2$ のもとでの実験結果のみについて整理を行っている。また、図中にはインタクト供試体に対し、単調載荷時および繰返し載荷時（ γ が 1×10^{-4} でのヤング率）に得られた E 、および 3.(3) で述べた切断面を有する供試体の繰返し載荷試験で得られた E （破壊しなかった供試体に対し、ヒステリシスループの勾配から求めたヤング率）も示してある。これらは、すべて拘束圧 $3, 6, 10\text{ kgf/cm}^2$ の条件下で得られた値の平均値を算出してプロットしたものである。図によれば、切断面を有する供試体および破断面を有する供試体の E はともに、今回採用したひずみ速度範囲内ではひずみ速度依存性が現われていないことが明らかである。これは、インタクト供試体についてもいえることである。一方、繰返し載荷時における切断面上での E は単調載荷時における E を上回った値を示している。すなわち、降伏強度以下においても、微細にみれば弱面上での応力~ひずみ特性は粘弾-塑性的なものであるといえよう。

また、図から2通りの載荷条件下で各供試体が示すヤング率の比較をしてみると、繰返し載荷時においてひずみが $\gamma=1 \times 10^{-4}$ 時のインタクト供試体の E を 1.0 とすれば、繰返し載荷時における弱面上での E 、単調載荷時におけるインタクト供試体および弱面を有する供試体の E はそれぞれ $0.67, 0.5$ および 0.32 と算出される。

(3) 残留強度ならびに降伏強度と拘束圧の関係

繰返し載荷試験および圧密非排水試験でみられた急激なすべりが生じるときの降伏強度、最大強度発揮前に 10^4 回の繰返しを行ったときの降伏強度ならびに一定ひずみ速度下で得られた残留状態での強度を比較するために図-18を準備した。図は残留ならびに降伏強度と初期有効拘束圧の関係を示したものであるが、ひずみ速度ごとの整理は行っていない。なお、図中にはインタクト供試体に対する残留強度と初期有効拘束圧 σ_{30} の関係を実線（平均値）で示してある。また、図中で（*）を示

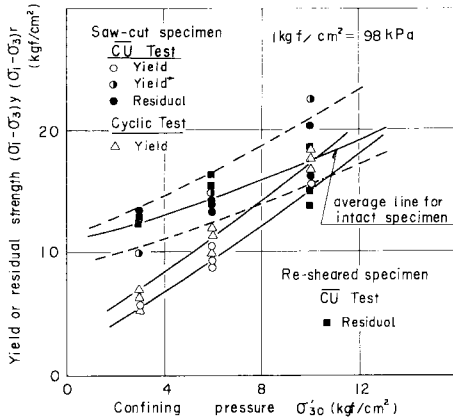


図-18 残留強度ならびに降伏強度と拘束圧の関係
 (*は応力振幅一定で 10^4 回繰返し載荷した後
 に得られた降伏強度)

したものは、 10^4 回の繰返しを ± 2 kgf/cm²の応力振幅のもとで行った後に、一定ひずみ速度下で得られた降伏強度を示したものである。図から以下の点が指摘できる。

- 1) 降伏および残留強度はともに拘束圧の大きさに依存し、それらの関係はほぼ直線で近似できる。
- 2) $\sigma_{30} \leq 10$ kgf/cm²の拘束圧下における降伏強度は残留強度よりも小さく、この傾向は拘束圧が低いほど顕著にみられる。しかし、 $\sigma_{30} = 10$ kgf/cm²での降伏強度は、残留強度とほぼ等しい値を示す。
- 3) 残留強度に着目すると、破断面を有する供試体および切断面を有する供試体ともに有意な差はなく、また、それらはインタクト供試体で得られた残留強度線付近にプロットされている。
- 4) 10^4 回の繰返しをあらかじめ与えておいた切断面を有する供試体の降伏強度は、他の条件下で行われた供試体の残留強度にほぼ相当した値を示している。

4)の結果は、微小な応力を繰返し切断面に負荷することにより切断面上で破砕が生じ、その結果大きなひずみを与えたときの切断面上での接触状態と類似したものになることを示している。また、2)に関しても同様に拘束圧の大きさに応じて弱面上での接触状態がより緊密になりせん断抵抗が増大することを意味しているものと思われる。特に、切断面を有する供試体を用いて不連続性岩盤の振動時における強度特性を把握しようとする場合は、対象とする不連続面上での接触状態、すなわち面の破砕状況や粒子配列方向ならびに夾在物の有無等を十分考慮して試験を実施することが肝要であろう。さらにきわめて大きなひずみ条件下では供試体内部での応力-ひずみ状態が不均一になり、その結果、残留強度の決定に幾分かの問題点を残すが、先に述べたようにせん断に先立ち、微小な応力振幅下での繰返し載荷により、切断

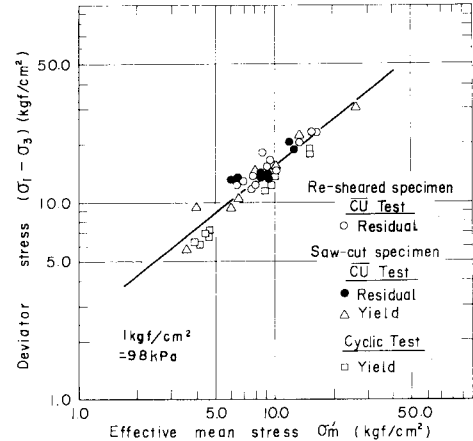


図-19 有効応力に基づく破断面および切断面を有する供試体の破壊規準

面上で破砕をもたらして行う方法は、小さなひずみレベルで泥岩の残留強度を推定できることから、残留強度を決定する有効な方法の一つと考えられる。同種の方法により他軟岩材料に対するデータを集積して、今後さらに検討を進めてゆきたい。

(4) 残留強度ならびに降伏強度と破壊時有効平均応力の関係

今まで述べてきた各種試験結果から、文献3)で述べた有効応力に基づく破砕規準との対比を示すために図-19を準備した。図は破断面を有する供試体の残留強度、切断面を有する供試体の降伏ならびに残留強度を破壊時における有効平均応力との関係で示したものである。図から泥岩の残留ならびに降伏強度に対する破壊規準は、弱面上での破砕状況、粒子配列方向などにかかわらず、インタクト供試体の残留強度に対する破壊規準で統一的に表わし得るものと結論づけることができる。このことは、破壊時の間隙水圧、言い換えれば排水せん断時におけるダイレイタンスー特性を詳細に検討し、定量的な評価を行うことで、地震時安定問題のように非排水せん断における破壊挙動を有効応力の立場から説明できる可能性を示している。また、弱面を含む斜面の長期安定問題に対しては、図に示した破壊線がそのまま適用できることが指摘されねばならない。

(5) 残留強度のひずみ速度依存性

一定ひずみ速度下における3種類の供試体を用いた圧密非排水試験から得られた残留強度とひずみ速度 ($10 \sim 10^{-3} \%$ /min)の関係を示したのが図-20である。図によれば、残留強度に対するひずみ速度依存性が認められ①ひずみ速度依存性は、いずれの供試体においても共通してみられること、②拘束圧が大きいほどその依存度合いは大きく、 $10^{-3} \%$ /minでの残留強度を基準にしたと

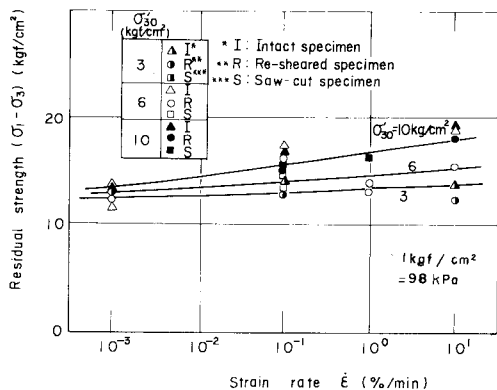


図-20 残留強度のひずみ速度依存性

き $\sigma_{30} = 10, 6, 3 \text{ kgf/cm}^2$ における 10 \% / min での強度増加率はそれぞれ $30 \text{ \%}, 18 \text{ \%}$ および 15 \% として与えられることなどが知られる。このような強度の時間依存性は、3. (3) で述べたように繰返し載荷試験から得られた降伏強度に対してもみられたものである。

残留強度のひずみ速度依存性は、文献3) で述べた最大強度に対するものほど大きなものではないが、地震時のようにひずみ速度が大きい場合を想定したとき、弱面間では通常のひずみ速度 ($0.1 \sim 1 \text{ \% / min}$) のもて得られる残留強度を上回る強度が発揮できることが指摘できる。

5. 結 論

新第三紀鮮新世に属する泥岩を対象とし、主に弱面上での強度-変形特性を明らかにすることを目的として、三軸圧縮試験および振動三軸圧縮試験を実施した。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 種々な角度で切断面を有する供試体を対象にした三軸圧縮強度によると、それらの強度および弾性定数(ヤング率)は θ (最大主応力面に対する角度) $= 60^\circ$ 付近で最小値を示す。すなわち、 $\theta = 60^\circ$ の角度で弱面を有する供試体の力学特性は弱面上での力学特性に強く支配されているものといえる。

(2) 最大主応力面に対し 60° の角度で破断面および切断面を有する供試体の応力-ひずみ特性は、圧密降伏応力以上の拘束圧下 ($\geq 30 \text{ kgf/cm}^2$) ではインタクト供試体のそれと同様であり、最大強度・残留強度およびヤング率には弱面の影響は現われない。一方、圧密降伏応力よりかなり低い拘束圧下 ($\leq 10 \text{ kgf/cm}^2$) における弱面を有する供試体のヤング率および最大強度は、インタクト供試体のヤング率の $1/2$ および残留強度に相当する値をそれぞれ示す。

(3) $\theta = 60^\circ$ の切断面角度を有する供試体に対し、

圧密降伏応力以下の拘束圧下において、急激なすべりが生じる応力として定義した降伏強度は残留強度よりも小さい。一方、降伏強度以下の応力レベルで繰返し載荷した後にせん断させたときの値は、インタクト供試体の残留強度とほぼ一致した値を示した。これは、切断面上での強度が破砕の程度や接触状態に依存することを示している。

(4) $\theta = 60^\circ$ の切断面角度を有する供試体が繰返し載荷を受けるとき、繰返し回数が $1/4$ 波で急激なすべりに至る。すなわち、破壊は繰返し載荷により累積ひずみを伴う疲労破壊的なものではなく、ある大きさの軸差応力(降伏強度)が負荷されたときに急激に生じるものといえる。また、繰返し載荷時で発揮される降伏強度およびヤング率は単調載荷時に得られるそれらよりいずれも大きな値を示す。

(5) $10 \text{ \% / min} \sim 10^{-3} \text{ \% / min}$ のひずみ速度範囲内において、残留強度にはインタクトおよび弱面を有する供試体を問わず幾分かひずみ速度依存性が認められた。すなわち、載荷時間が短いほど残留強度も大きい。またこの依存度合いは拘束圧が大きいほど強く現われる。この結果と(4)の結論を併せて考えると、地震時安定問題を考えていくとき、弱面上ではひずみ速度効果による強度の増大が期待できるものといえる。一方、ヤング率にはひずみ速度依存性は認められなかった。

(6) 弱面上で発揮される降伏強度および残留強度はインタクト供試体が示す残留強度の有効応力に基づく破壊規準によって統一的に表示できる。このことは、破壊時における間隙水圧を定量的に評価することによって地震時安定問題のような非排水条件下でのすべり破壊の有無を有効応力の立場から議論できる可能性を示している。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、暖かいご指導を頂いた京都大学工学部、赤井浩一博士ならびに足立紀尚博士に深謝の意を表する次第である。また、貴重なご助言を頂いた電力中央研究所立地部、江刺靖行博士ならびに国生剛治博士、実験面でご協力頂いた東電設計(株)宇野晴彦および応用地質(株)満 弘之、国松 直(現・山口大学工学部)の諸氏に厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Jaeger, C. : Rock Mechanics and Engineering, Second Edi., Cambridge Univ. Press, 1979.
- 2) 岡本敏郎・西 好一・江刺靖行・松井家孝：泥岩の力学的特性に関する研究(その1), 電研研究報告 No. 382011, 1982.
- 3) 西 好一・岡本敏郎・江刺靖行：各種載荷条件下における泥岩の強度-変形特性とその統一的解釈, 土木学会論文

- 報告集, No. 338, pp. 149~158, 1983.
- 4) 西 好一・江刺靖行・宇野晴彦：泥岩の動せん断剛性率と減衰比, 第18回土質工学研究発表会講演集, pp. 799~802, 1983.
 - 5) 西 好一・江刺靖行・宇野晴彦：振動荷重下における泥岩の強度特性, 第18回土質工学研究発表会講演集, pp. 803~806, 1983.
 - 6) Hayashi, M. : Strength and Dilatancy of Brittle Jointed Mass. 1st Congress Int. Society of Rock Mecha., Lisbon, 1966.
 - 7) Barton, N.R. : A Relationship between Joint Roughness and Joint Shear Strength, I. S. R. M, Nancy, France, 1971.
 - 8) Einstein, H.H. and Hirschfeld, R.C. : Model Studies on Mechanics of Jointed Rock, Proc. ASCE, SM 3, pp. 229~248, 1973.
 - 9) Lane, K.S. and Hock, W.J. : Triaxial Testing for Strength of Rock Joints, 6th Sympo. on Rock Mecha., Univ. of Missouri, 1964.
 - 10) 足立尚紀・林 正之：軟岩の力学特性に及ぼす不連続面の影響, 土木学会論文報告集, No. 305, pp. 97~110, 1981.
 - 11) 足立尚紀・森田栄治：不連続面を有する軟岩の力学挙動と破壊規準, 土木学会論文報告集, No. 320, pp. 99~111, 1982.

(1983.12.2・受付)
