

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

STRENGTH-DEFORMATION CHARACTERISTICS OF MUDSTONE UNDER SOME KINDS OF LOADING CONDITIONS AND ITS UNIFICATIVE INTERPRETATION

西 好 一*・岡 本 敏 郎**・江 刺 靖 行***
By Koichi NISHI, Toshiro OKAMOTO and Yasuyuki ESASHI

1. ま え が き

軟岩を主体とする岩盤上に巨大構造物が地上あるいは地下を問わず建設される機会が増大しているが、今後ともわが国の地質条件を考慮すれば軟質岩盤が利用される機会は増大するものと思われる。

軟岩およびそれと同様な力学挙動を示す強く過圧密された粘性土から成る地盤に関連した工学的問題としては、クリープに代表される時間依存性挙動および膨張性状に関連したトンネルにおける土圧問題^{1),2)}、切り取り斜面のように吸水膨張により経時的に地山の安定性が失われていく、いわゆる長期安定問題³⁾のように古くから土質・岩盤力学の分野で取り上げられてきた重要問題があり、これらの力学特性に関しても多方面にわたり数多くの報告がみられる。先に述べた切り取り斜面の安定問題に関連した代表的な研究としてロンドン粘土を対象としたSkempton⁴⁾、Bishop⁵⁾、Marsland⁶⁾らの実験的研究が挙げられよう。一方、国内においても軟岩の力学的挙動に関する研究が大規模土木構造物の建設に伴い活発化してきた。赤井・足立・西⁷⁾⁻⁹⁾は多孔質凝灰岩の一種である大谷石を用いた実験からその力学特性について論じ、塑性降伏挙動およびクリープ特性に関する考察を行い、粘弾塑性的性質を考慮した軟岩の構成式を提示している。また、足立・小川¹⁰⁾は軟岩の強度特性に関する詳細な考察を行い、Hobbs¹¹⁾ および Murrell¹²⁾ が指摘した破壊規準に基づき、最大強度および残留強度はともに軸差応力と有効平均応力を座標軸とする両対数紙上で直線近似できることを示すとともに、これらの知見から岩盤と岩石の強度特性の関連についても言及している。これと同

様の議論は吉中・山辺¹³⁾によっても行われ数多くの軟岩に対して上記した破壊規準が適用できることを示した。

一方、脆性的な粘土および頁岩の力学特性に及ぼす載荷速度の影響がCasagrandeとWilson¹⁵⁾により論じられ、それらの強度特性には明らかに時間依存性が認められることを示した。このような強度の時間依存性に着目し、足立^{16),17)}はクリープ試験および変位制御による繰返し試験結果に基づく軟岩の長期強度に対する推定式を提案している。

以上の研究は、時間の経過とともに強度が低下する材料、あるいは通常の拘束圧範囲において脆性的な性質を示す材料であるがゆえの遅れ破壊もしくは進行性破壊の可能性といった観点からおもに進められてきたものであるが、軟岩の強度-変形特性がきわめて短時間の載荷期間中にどの程度の外力に抵抗し、変形するのかといった力学特性の把握およびその評価手法の確立も重要な課題として取り上げられるようになってきている。

以上の観点に基づき、本論文は、種々なひずみ速度下における圧密非排水三軸圧縮試験、クリープ試験および振動載荷試験時における泥岩の力学特性、ならびに各種載荷試験結果の対応と強度-変形特性の統一的解釈について述べたものである。

2. 実験装置・試料および実験方法

用いた実験装置は油圧サーボ型の三軸圧縮試験装置である。その概要を図-1に示す。本装置は主として軟岩用に製作されたものであり、軸荷重および側力の負荷能力はそれぞれ5tおよび100kgf/cm²(×98kPa)である。図-1に示すとおり、三軸セル内・外部それぞれにロードセル(容量5t(外部)、3t(内部))と変位計(容量5mm, 15mm(外部:L.V.D.T.), 2mm(内部:非接触型変位計))を設置してあるが、今回の実験結果は

* 正会員 工修 電力中央研究所地盤耐震部

** 正会員 工修 電力中央研究所地盤耐震部

*** 正会員 工博 電力中央研究所地盤耐震部次長

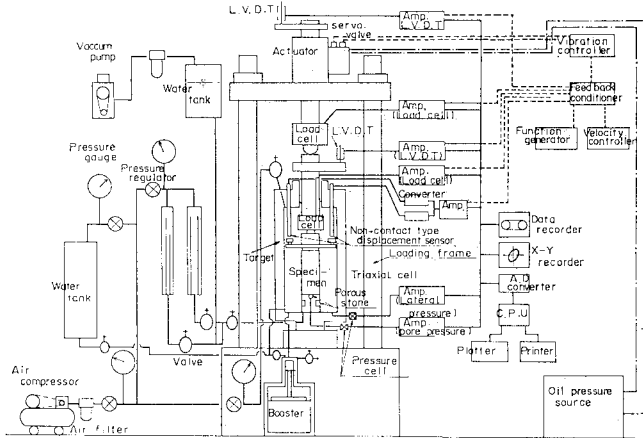


図-1 三軸圧縮試験装置の概要

表-1 試料の物理諸量

Liquid Limit	w_L (%)	95.1
Plastic Limit	w_P (%)	47.6
Plasticity Index	I_p	47.5
Specific Gravity	G_s	2.72
Water Content	w (%)	52.5
Wet Density	γ_t (gf/cm ³)	1.67
Dry Density	γ_d (gf/cm ³)	1.09
Void Ratio	e	1.49

($\sigma_1 - \sigma_3$) および間隙水圧 u と軸ひずみ ϵ_1 の関係を示したものであり、0.1%/min のひずみ速度下で得られたものである。この図から以下の点が指摘できる。

① σ_{30}' が 10 kgf/cm² (×98 kPa) 以下の比較的低い拘束圧下では最大強度に至るまでの変形は弾性的傾向が強く、ほぼ直線的な応力～ひずみ曲線を示す。最大強度に到達すると変形は急激に進み、比較的小さなひずみ量で残留強度へ到達する傾向にある。最大強度はいくぶん拘束圧依存性を示すが、拘束圧の増加に伴う強度の増加はそれほど大きなものではない。また最大強度発揮時点でのひずみ量は 0.8% 前後であり、この値は拘束圧に依存しないものとみてよい。

② σ_{30}' が 30 kgf/cm² (×98 kPa) 以上の拘束圧下では、拘束圧条件下でみられた顕著なひずみ軟化特性は示さず、最大強度が現われた後、徐々に軟化していく傾向にある。また、最大強度前においてもその応力～ひずみ曲線には大きな非線形性状が示されており、最大強度発揮時点でのひずみ量は拘束圧が高いほど大きい。

③ 間隙水圧の発生傾向に関しても拘束圧の依存性が認められる。すなわち、 σ_{30}' が 30 kgf/cm² (×98 kPa) 以下の拘束圧下では間隙水圧が最大強度発揮付近で最大値を示し、その後ひずみ軟化に伴い徐々に低下していく傾向にある。一方、 σ_{30}' が 30 kgf/cm² (×98 kPa) 以上の拘束圧下では間隙水圧は軸差応力が低下するにもかかわらず上昇していく傾向にある。

すべてセル外部で測定された検出値に基づいて整理している。

実験試料として用いたのは、新第三紀鮮新世に属する泥岩でありその物理諸量は表-1 に示すとおりである。本泥岩の一軸圧縮強度は約 28 kgf/cm² (×98 kPa)、等方圧密試験により求められた圧密降伏応力は約 30 kgf/cm² (×98 kPa) である。供試体寸法は直径 50 mm、高さ 100 mm であり、整形後水中で約 24 時間脱気したものを用いた。

試験はすべて等方応力下での圧密終了後に実施した。圧密時の排水は、供試体側面に巻かれたナイロンメッシュを通して行うサイドドレーン方式を採用して行った。間隙水圧はペダスタル中央部に設けた直径 10 mm のポーラスストーン部を通して測定を行い、シリコングリースを塗布したテフロンシート(厚さ 0.25 mm)を供試体端面とキャップおよびペダスタル間に設置し、それらの間の摩擦を除去することに努めた。等方圧力負荷時において測定された B -値は拘束圧の大きさによらず 95% 以上である。したがって供試体は十分な飽和状態にあり、通常の飽和土と同様に有効応力の考え方が適用できる材料であるものといえる。

3. 実験結果とその考察

(1) 圧密非排水試験結果

一定ひずみ速度下での圧密非排水試験結果について以下に述べる。本試験で採用した初期有効拘束圧 σ_{30}' は 3, 6, 10, 30, 60 kgf/cm² (×98 kPa) であり、ひずみ速度は 10, 0.1, 0.001%/min である。

応力-ひずみ関係に及ぼす拘束圧の影響をみるために試験結果の一例として 図-2 を示す。図は、軸差応力

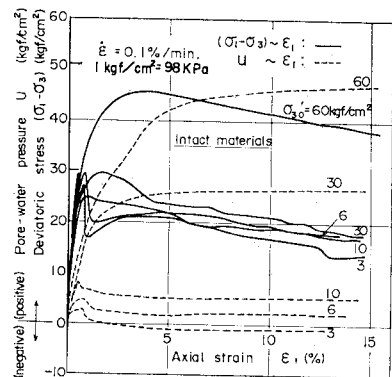


図-2 軸差応力-軸ひずみ-間隙水圧関係 ($\dot{\epsilon} = 0.1\%/min$)

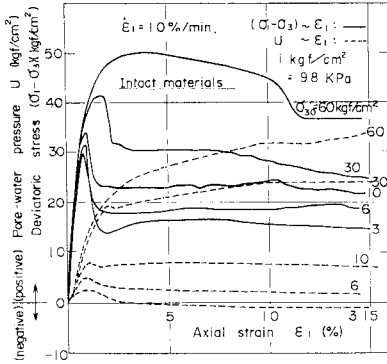


図-3 軸差応力-軸ひずみ-間隙水圧関係 ($\dot{\epsilon} = 10\%/min$)

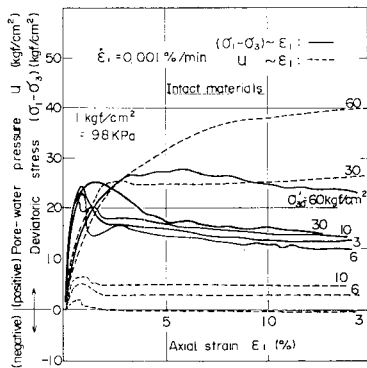


図-4 軸差応力-軸ひずみ-間隙水圧関係 ($\dot{\epsilon} = 0.001\%/min$)

④ 10~15% 程度の軸ひずみ状態では、軸差応力も間隙水圧も一定で軸ひずみのみが進行する残留状態がいずれの拘束圧下においてもみられる。

一方、10%/min および 0.001%/min のひずみ速度下で得られた応力-ひずみ関係を示したのが 図-3 および 図-4 である。応力-ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の観点からすると以下の点が指摘できよう。

① ひずみ速度が小さくなると最大強度は低下する傾向にある。残留強度も同様の傾向にあるが、最大強度ほどの低下はみられない。

② ひずみ速度が小さくなると、応力~ひずみ曲線はより延性的な傾向を示すようになる。これは特に $\sigma_{30}' = 30 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$) 以上でより顕著にみられる。

③ 間隙水圧の発生傾向はひずみ速度に依存せず、同一の拘束圧条件下ではほぼ同様な挙動を示す。

各拘束圧下における有効応力経路を ($\sigma_m', \sigma_1 - \sigma_3$) を座標軸とする応力平面上にひずみ速度をパラメーターとして示したのが 図-5~図-9 である。なお以上の図で (●) で示したのは残留状態での応力値を示している。これらの図から以下の点が指摘できる。

① σ_{30}' が 30 kgf/cm^2 ($\times 98 \text{ kPa}$) 以下の拘束圧下では過圧密粘土と類似の傾向を示すことが明らかである。

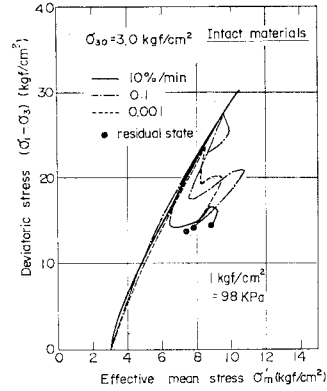


図-5 有効応力経路 ($\sigma_{30}' = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$))

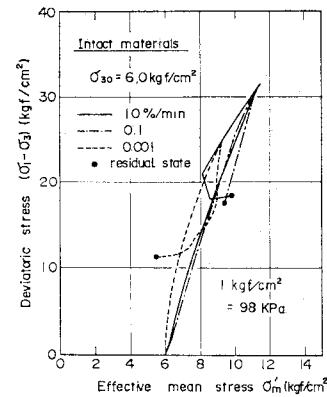


図-6 有効応力経路 ($\sigma_{30}' = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$))

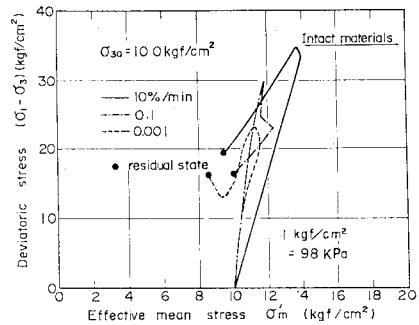


図-7 有効応力経路 ($\sigma_{30}' = 10.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$))

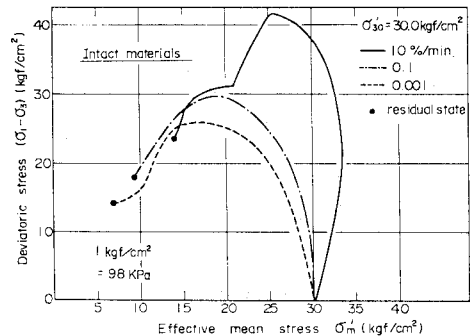


図-8 有効応力経路 ($\sigma_{30}' = 30.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$))

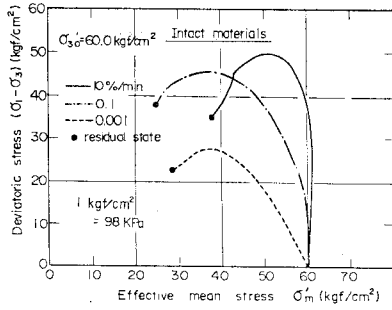


図-9 有効応力経路 ($\sigma_{30}' = 60 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$)

特に、 $\sigma_{30}' = 3 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ においては有効応力経路に与えるひずみ速度の影響は少なく全応力経路に近似した応力経路を示す。一方、 σ_{30}' が 6, 10 $\text{kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の場合、最大強度に到達するまでの有効応力経路をみるとひずみ速度による影響を受け、それが小さいほどせん断初期には有効応力経路に直交する。すなわち弾性的な傾向の強いことが伺える。

② σ_{30}' が $30 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ 以上の拘束圧下では、正規圧密粘土と同様な有効応力経路を示し、かつ明瞭なひずみ速度依存性が認められる。すなわち、ひずみ速度が大きいほど、同一軸差応力のもとでの過剰間隙水圧の発生量は小さい。

(2) クリープ試験

圧密非排水条件下でクリープ試験を実施した。

図-10 および 図-11 は実験結果の一例として $\sigma_{30}' = 6, 30 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の場合を取り上げ軸ひずみ ϵ_1 と時間 t の関係を片対数紙上にプロットしたものである。図によれば、圧密非排水試験 (0.1%/min) により得られた最大強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の 70% 以下の軸差応力下では ϵ_1 と $\log t$ の関係はほぼ直線的であるが、それ以上の軸差応力のもとではある時間経過後にクリープ破壊に至っている。クリープ破壊が生じる時間はいずれの拘束圧下でも軸差応力が大きいほど短い、 $\epsilon_1 \sim \log t$ 関係が直線から遊離して変形が急増する際の軸ひずみは、 $\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の場合は 0.8% 前後、一方 $30 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の場合は 2% 前後であり、(1) で述べたのと同様拘束圧の増大により泥岩は延性的になるものといえる。また、上記したひずみ量は軸差応力の大きさにはほとんど依存しないものといってよい。

図-12 および 図-13 には同様の応力条件下における有効平均応力 σ_m' と時間 t の関係を片対数紙上に示した。 $\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の場合をみると、作用軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s = 17.7 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ でみられる異常な間隙水圧挙動を除けばすべて時間の経過に伴い有効平均応力は増加する (間隙水圧は減少) のに対し 30

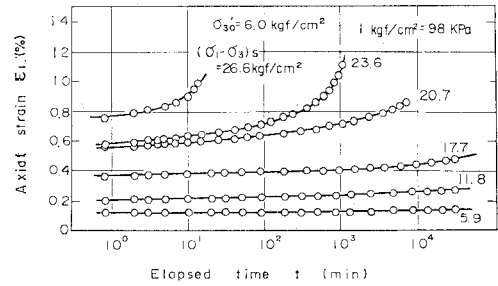


図-10 軸ひずみ-時間関係 ($\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$)

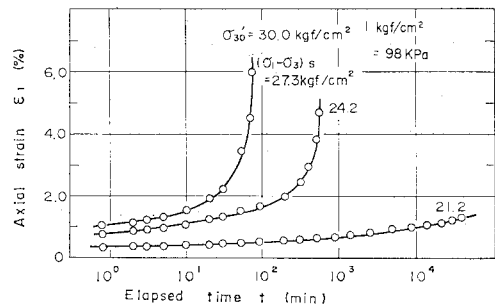


図-11 軸ひずみ-時間関係 ($\sigma_{30}' = 30 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$)

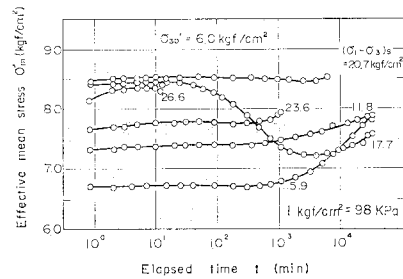


図-12 有効平均応力-時間関係 ($\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$)

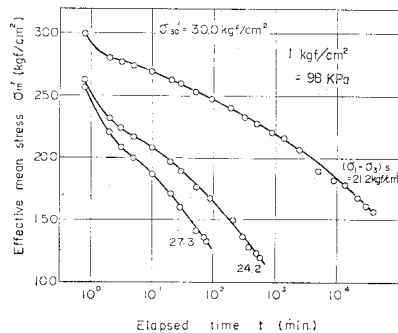
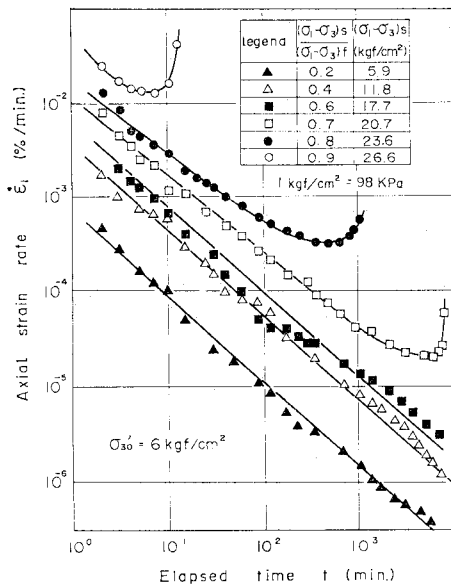


図-13 有効平均応力-時間関係 ($\sigma_{30}' = 30 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$)

$\text{kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ ではいずれの軸差応力下でも顕著な減少を示し、過圧密および正規圧密に対応した挙動を示していることがわかる。また、 $\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の場合、載荷後のある一定期間、有効平均応力の

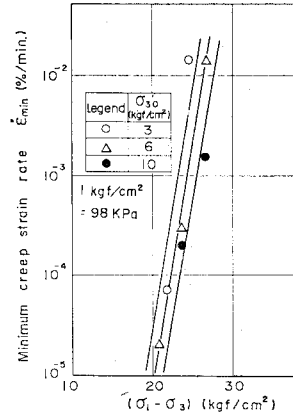


図一四 軸ひずみ速度の時間変化 ($\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$))

経時変化がほとんどみられない状態があるが、 30 kgf/cm^2 ($\times 98 \text{ kPa}$) の場合をみると有効平均応力は荷重期間中、 $\log t$ に比例してほぼ直線的に減少することが特徴的である。

図一四には、 $\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$) の場合を例にとり軸ひずみ速度と経過時間の関係を両対数紙上に示した。 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s / (\sigma_1 - \sigma_3)_e < 70\%$ の軸差応力状態でのクリープ時における軸ひずみ速度は時間の経過に伴い直線的に減少する傾向にあり、その勾配は軸差応力の大きさに依存せずほぼ一定値を示す。その値としては 0.93 が得られる。この値はロンドン粘土の 0.93、多孔質凝灰岩の 0.95 ときわめて近い値である。一方、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s / (\sigma_1 - \sigma_3)_e \geq 70\%$ の軸差応力のもとではクリープ破壊に至っているが、クリープ破壊へ至る過程は軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ が時間とともに減少する 1 次 (遷移) クリープ状態、 $\dot{\epsilon}_1$ がほぼ一定値 (最小値) を示す 2 次 (定常) クリープ状態、および $\dot{\epsilon}_1$ が急増する 3 次 (加速) クリープ状態に明確に区分できることが示されている。

クリープ破壊に至った場合の実験結果から最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\min}$ を読み取り、作用軸差応力との関係を片対数紙上に示したのが 図一五 である。図に示されるとおり、各拘束圧ごとにほぼ直線関係が近似的に成立しているものとみてよい。また、拘束圧が小さいほど同一軸差応力下での最小ひずみ速度は大きな値を示していることが伺われるが非排水クリープ時においては初期拘束圧の大きさに応じて有効平均応力が時間とともにいくぶん変動する。したがって、本関係における拘束圧依存性を統一的に解釈しようとするならば有効応力の観点が



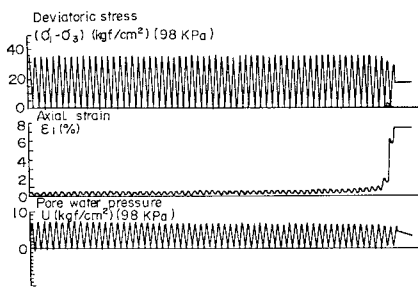
図一五 圧密非排水クリープ試験時における最小クリープひずみ速度と軸差応力の関係 ($\sigma_{30}' = 3, 6, 10 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$))

ら議論されねばならないが、この点については 4. で述べることにする。

(3) 振動荷重試験

本試験での結果は、稿を改めて詳細に述べることにするが、先に述べてきた各種荷重試験結果と振動荷重試験結果との関連性について述べるために、以下では初期有効拘束圧 σ_{30}' が 6 kgf/cm^2 ($\times 98 \text{ kPa}$) の実験結果を例にとり簡単にふれる。試験は上記した拘束圧で圧密した後、初期軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ を $12.0, 18.0, 25.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$) の 3 レベルまで非排水条件下で負荷した後、所定の応力振幅下で振動荷重を作用させたものである。なお、採用した周波数は 0.5 Hz であり振動荷重は非排水条件下で実施した。

振動荷重時の強度特性を調べる場合には、まず破壊をどのように定義するかが問題となる。飽和した砂のように液状化という明確な破壊を定義できる場合を除いては、振動荷重時における強度の定義はいまだ不明確であり、粘性土の場合のように繰返し荷重により発生するひずみ量が所定の値に到達したときに破壊とみなす方法も採用されつつある。



図一六 振動三軸圧縮試験時における軸差応力、軸ひずみおよび間隙水圧の時刻歴変動 ($\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_0 = 18 \text{ kgf/cm}^2$ ($1 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$))

それでは泥岩のように比較的低拘束圧下では脆性的な挙動を示す材料の強度はどのように決定すべきであろうか。この点を明らかにするために、実験結果の一例を図-16 に示した。試験は $\sigma_{30}'=6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$, $(\sigma_1-\sigma_3)_0=18 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$, 応力振幅 $d(\sigma_1-\sigma_3)=17.0 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ のもとで行われたものである。図をみると明らかなように、繰返し回数の増加に伴い軸ひずみは徐々に累積していくが、あるひずみ量に到達（本試験では1%前後）すると急激にひずみが増大し破壊に至ることが示されている。また、間隙水圧も圧密非排水クリープ試験結果でみられたようにある繰返し回数以降いくぶん低下する傾向にあることが知られる。すなわち、 $\sigma_{30}'=6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ 程度の拘束圧下では、繰返しにより軸ひずみの累積が生じるが、破壊そのものはある繰返し回数のもとで急激に発生し、そのときの応力・ひずみ状態と繰返し回数で振動載荷時における泥岩の強度を定義づけることができよう。

以上に述べたように定義した強度 $(\sigma_1-\sigma_3)_{cf}=(\sigma_1-\sigma_3)_0+d(\sigma_1-\sigma_3)$ と繰返し回数 N の関係を示したのが図-17 である。一方、図-18 には、 $N=1$ 波目における $(\sigma_1-\sigma_3)_{cf, N=1}$ で N 回目の $(\sigma_1-\sigma_3)_{cf}$ を除した値と N の関係を示した。これらの図より以下の点が指摘できる。

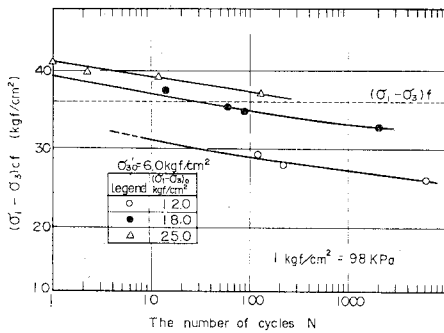


図-17 動的強度と繰返し回数の関係 ($\sigma_{30}'=6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$)

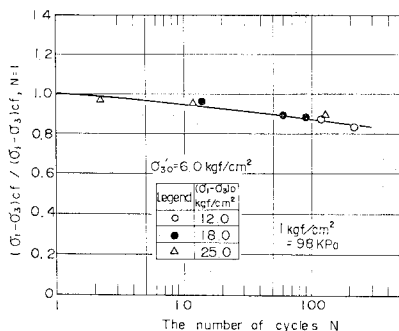


図-18 応力比 (N 回目の動的強度/1 回目の動的強度) と繰返し回数の関係 ($\sigma_{30}'=6 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$)

① 動的強度には初期軸差応力依存性が認められ、 $(\sigma_1-\sigma_3)_0$ が大きいほど強度も大きい。

② 繰返し回数の増加に伴い、強度は低下する。ただし、その低下割合には初期軸差応力依存性はみられない。

4. 強度特性に関する統一的解釈

3. では圧密非排水、クリープ試験および振動載荷試験のおおのこの結果について述べてきた。以下では、各種載荷条件下での力学特性、特に圧密降伏応力以下の拘束圧下における強度特性を対象とし、有効応力に基づく破壊基準、破壊時ひずみ、クリープ時における最小ひずみ速度に着目して総合的な考察を行った結果について述べる。

(1) 強度のひずみ速度依存性

3. (1) で圧密非排水試験結果から最大強度に対するひずみ速度依存性について述べた。このような強度のひずみ速度依存性に関し、最大強度と残留強度およびクリープ破壊強度との関連性を示すために、過圧密領域における拘束圧 3, 6, 10 $\text{kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の場合を例にとりそれらの関係を示したのが図-19 である。なお、クリープ破壊強度を図上にプロットするにあたり、ひずみ速度としてはクリープ破壊と関連性の強い最小クリープひずみ $\dot{\epsilon}_{min}$ を採用している。図によれば、最大強度とクリープ破壊強度は各拘束圧とともに1本の直線上にプロットされるようであり、クリープ試験時における最小クリープひずみ速度と圧密非排水試験時におけるひずみ速度との等価性が伺える。一方、残留強度に関してもひずみ速度依存性がみられ、特に 10 kgf/cm^2 の場合に著しいが、今回用いた泥岩と類似した泥岩を用いた大槻・西⁽²²⁾らの広範囲なひずみ速度下における実験結果による

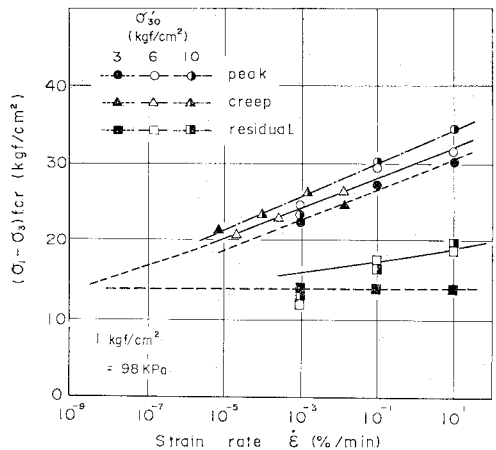


図-19 強度とひずみ速度の関係

と、 $10^{-2}\%/min$ より小さなひずみ速度下での残留強度はひずみ速度には依存しないとされている。このことが本泥岩にも適用できるものとすれば、図上で最大強度およびクリープ破壊強度とひずみ速度の関係を示す線と残留強度とひずみ速度の関係を示す線が交差するひずみ速度はほぼ $10^{-9}\%/min$ となる。後述するように破壊時ひずみは試験条件にかかわらず約 0.8% 程度とみなしてよいので、これから破壊に要する時間を算出すれば 15000 年が得られる。すなわち、残留強度は泥岩の有する下限強度であるが、以上の類推に基づくならばそれに相当する軸差応力を負荷してクリープ破壊に至らしめるには 1 万年オーダーの期間を要するというを意味する。

(2) 有効応力に基づく破壊規準

用いた泥岩の破壊規準を知るために、各ひずみ速度下で得られた排水および非排水試験結果から最大強度および残留強度を求め、図-20 に有効平均応力 σ_m' との関係を示した。足立ら¹⁰⁾および吉中ら¹³⁾がすでに指摘しているように、最大ならびに残留強度と有効平均応力の関係を両対数紙上で整理することにより、両者の関係をほぼ直線によって近似することができる。また、同一のひずみ速度 (0.001%/min) で実施した排水および非排水試験のいずれの強度も、このように有効応力表示することにより一義的に取り扱うことができる。さらに、ひずみ速度の増大は最大強度の増加をもたらすが、いずれのひずみ速度下においても直線近似は成立すること、および残留強度に対する破壊規準はひずみ速度に依存せず一義的に決定できることが示されている。なお、最大強度線と残留強度線の交点で与えられる平均有効応力 $\sigma_m'^*$ は足立らにより先行履歴応力と称されているが、これは等方圧密試験で得られる圧密降伏応力と直接的な関係はなく、ひずみ速度の大きさによって変化する性質のものであることが示されている。

上記した実験事実により用いた泥岩の破壊規準は次式

で表示できる。

$$\text{最大強度} : \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{P_0} = \alpha_f \cdot \left(\frac{\sigma_m'}{P_0} \right)^{\beta_f} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{残留強度} : \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_r}{P_0} = \alpha_r \cdot \left(\frac{\sigma_m'}{P_0} \right)^{\beta_r} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、式 (1) は σ_m' が $\sigma_m'^*$ より小なるときに成立する式であり、 $\sigma_m' \geq \sigma_m'^*$ での最大強度 (= 残留強度) に対する破壊規準は式 (2) で与えられる。また、 α_f と β_f はひずみ速度に依存する材料パラメーターであり、 $\dot{\epsilon} = 0.001, 0.1, 10\%/min$ の各ひずみ速度に対し、 $\alpha_f = 14.30, 16.38, 16.73, \beta_f = 0.208, 0.218, 0.262$ がそれぞれ得られた。一方、 α_r, β_r はひずみ速度には依存しない材料定数であり、それぞれ 2.42, 0.798 として与えられた。 P_0 は単位圧力を表わす。

(3) 破壊時ひずみ

圧密非排水試験によれば、圧密降伏応力以下の拘束圧条件下で顕著なひずみ軟化特性を示し、最大強度発揮時のひずみレベルはほぼ等しいことは前述した。また、クリープ試験においては定常クリープ終了後、比較的短時間でクリープ破壊に至ること、および振動三軸試験においては繰返し回数の増加とともにひずみが徐々に累積し、あるひずみ量に到達すると急激に破壊状態へ移行することも示された。したがって、応力のみならず泥岩の破壊は発生するひずみ量とも関連性のあることが推察できる。この点に着目し、図-21 を準備した。この図は、一定ひずみ速度試験においては最大強度発揮時点での軸ひずみと最大強度の関係を、クリープ試験においては破壊が生じた場合の加速クリープ開始時点での軸ひずみと作用軸差応力の関係を、また振動載荷試験においては、繰返し載荷により急激にひずみが発生した時点での軸ひずみと初期軸差応力の関係を示したものである。この図によれば各試験での破壊ひずみには多少のばらつきがみられ、破線で示した 0.6~1.0% の範囲内にデータがブ

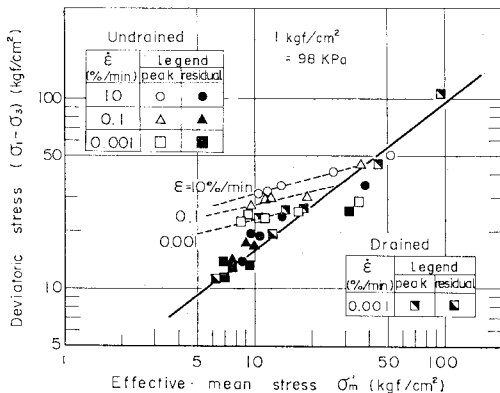


図-20 最大および残留強度に対する破壊規準

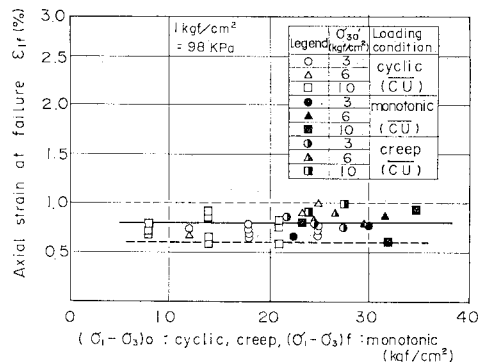


図-21 一定ひずみ速度試験、クリープ試験および振動三軸試験における破壊時の軸ひずみ

ロットされていることがわかる。しかし、このばらつきは同種の試験においてもこの程度の範囲内で表われており、試験の種類によるものではないものと判断できる。したがって、破壊ひずみは各試験での荷重条件によらず、ほぼ同一の値を示すものといえる。なお、図に示した破壊ひずみの平均値は約 0.8% である。

以上に示した破壊ひずみの一義性は、圧密降伏応力以下の拘束圧下で成立するものであるが、工学上問題視される拘束圧範囲を勘案すれば、荷重の荷重条件を問わず成立する基本的力学特性の一つとして重要な意味を有することは明らかである。

(4) 破壊規準の統一的理解

一定ひずみ速度試験、クリープ試験ならびに振動荷重試験の結果を個々に眺めると荷重の荷重条件および供試体に与える荷重時間により供試体がさまざまな挙動を呈するかのように見える。しかし、先に述べたように最小クリープひずみ速度とクリープ破壊強度(図-15 参照)およびひずみ速度と最大強度との対応関係、破壊時ひずみの一義性などを考えると、上記した試験結果には強い相関性があるものと考えられる。ここでは、これら各種荷重試験時の力学特性、特に圧密降伏応力以下の拘束圧下における破壊強度に着目し、式(1)として与えられた一定ひずみ速度試験による最大強度に対する破壊規準ならびに図-15で示されたクリープ試験による最小クリープひずみ速度と作用軸差応力の関係を用いてそれらの相関関係について論じる。

一定ひずみ速度試験により得られた最大強度に対する破壊規準およびクリープ試験による最小クリープひずみ速度と作用軸差応力の関係を示すと以下のとおりである。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{P_0} = \alpha_f \cdot \left(\frac{\sigma_m'}{P_0} \right)^{\beta_f} \dots\dots\dots (1)_{bis}$$

$$\ln \dot{\epsilon}_{min} = A \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) + B \dots\dots\dots (3)$$

ここに、式(3)は図-15で示した $\dot{\epsilon}_{min}$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の関係を片対数紙上で直線近似したものであり、AおよびBは拘束圧に依存する材料定数を表わしている。

さて、式(1)中の α_f および β_f はともにひずみ速度に依存する材料定数であるが、図-20からもわかるように β_f は第1近似としてひずみ速度に依存せずほぼ一定とみなし得る。この点を認めれば式(1)における α_f はひずみ速度の関数として与えられる。すなわち、

$$\alpha_f = f(\dot{\epsilon}) \\ = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f}$$

あるいは

$$\dot{\epsilon} = f^{-1}\{(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f}\} \dots\dots\dots (4)$$

なお、上式では単位圧力 P_0 は便宜上省略している。式

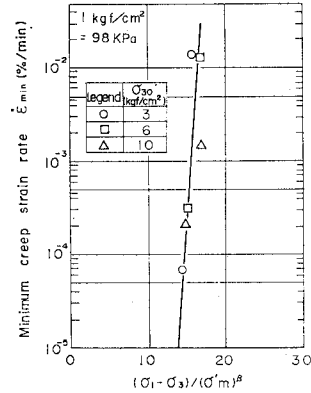


図-22 圧密非排水クリープ試験における最小クリープひずみ速度と $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f}$ の関係

(3)に含まれる材料定数は初期有効拘束圧に依存するが、式(4)の右辺の項に着目し、図-15で示した関係を $\dot{\epsilon}_{min} \sim (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f}$ と置き換えて再整理したのが図-22である。なお、 σ_m' としては最小クリープひずみ速度を示した時点での値を採用している。図によればクリープ破壊と直接的な関係にある最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{min}$ が $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f}$ と片対数紙上で直接関係にあることが示されている。すなわち、 $\dot{\epsilon}_{min}$ は拘束圧および初期軸差応力の大きさによらず一義的に決定することになる。この点に着目し、近似的に式(4)の $\dot{\epsilon}$ が $\dot{\epsilon}_{min}$ に相等しいものと置けば、式(4)中の右辺の項が次式によって与えられることになる。

$$\dot{\epsilon} = \exp \left\{ \ln a + b \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_m')^{\beta_f}} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、aおよびbは $\ln \dot{\epsilon}_{min}$ と $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f}$ との関係を直線表示したときに与えられる材料定数を表わしている。いま、上式で基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{min} = \dot{\epsilon}^*$ における $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f}$ の値を σ^* とおくと次式を得る。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^* \cdot \exp \left\{ b \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_m')^{\beta_f}} - \sigma^* \right) \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、上式の適用範囲は $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f} > \sigma^*$ として与えられる。

式(6)は、クリープ試験で得られた式(3)に着目し、一定ひずみ速度試験結果に基づく式(4)の右辺項を与えたものであり、 $\dot{\epsilon}$ なるひずみ速度下で試験を行ったときの破壊規準を与えるものである。なぜならば、式(6)を次式で書き改めると、

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \left(\frac{1}{b} \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}^*} + \sigma^* \right) \cdot (\sigma_m')^{\beta_f} \dots\dots\dots (7)$$

となり、式(1)の α_f をクリープ試験で得られる $\frac{1}{b} \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}^*} + \sigma^*$ として表示した形になっているからである。ただし、両者の試験におけるひずみ速度は同一のものではなく、 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{min}$ とした是非を論じなければならない。こ

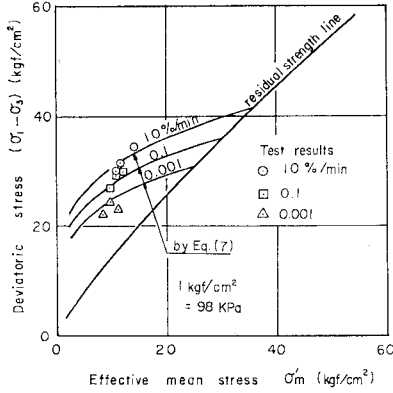


図-23 式(7)による破壊規準と実験結果との比較

の点を示すために 図-23 を準備した. 図は, 図-22 から算出される b を 2.80 として与え, $\beta_f = 0.23$, $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ (%/min) および σ^* として 14.0 を採用し, $\dot{\epsilon} = 10, 0.1$ および 0.001 %/min のひずみ速度に対して式 (7) で計算される $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と σ_m' との関係を与えたものである. また, 図中には 3. (1) で述べた最大強度と有効平均応力の関係をひずみ速度をパラメーター (○, □, △ で示す) として示してある. 図に示したように, 式 (6) あるいは式 (7) は一定ひずみ速度試験時における最大強度に対する破壊線を比較的良好に近似しており, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{min}$ の仮定の妥当性が示されたものといえる.

次に, 式 (6) が振動荷重試験時における破壊挙動に対しても成立するかどうかを考察してみる. 振動荷重試験による破壊は, 時間刻みを dt とすれば, dt の間にひずみの進行が生じ, これらが累積することにより生じるものでありクリープ破壊と等価なものと考えられる. すなわち, 時間的に変動する応力が繰返し加えられたときの累積ひずみは式 (6) を用いて次式で算定できることになる.

$$\epsilon = \int_{t=0}^t \dot{\epsilon}^* \cdot \exp \left\{ b \cdot \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_m')^{\beta_f}} - \sigma^* \right) \right\} dt \dots (8)$$

上式より, 振動荷重時における累積ひずみを算定する方法を概念的に示したのが 図-24 である. 式 (8) は一応不規則荷重時における変形挙動も取り扱える形になっているが, 簡単化のために正弦波を荷重波形として用いたときの状況を示してある. 図中, 1 から 2 までの荷重は $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f} < \sigma^*$ であり, 弾性ひずみのみしか生じないが, 2 から 3 および 3 から 4 へ至る過程では非可逆的ひずみ (粘塑性ひずみ) が発生する. この点を念頭において, 繰返しに伴う非可逆ひずみを積算すれば, $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f} \geq \sigma^*$ を満足する応力条件下での累積ひずみが計算できることになる. すなわち, $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f} = \sigma^*$ を一種の降伏規準と考えるわけである.

さて, $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_m')^{\beta_f} < \sigma^*$ では弾性挙動のみを生

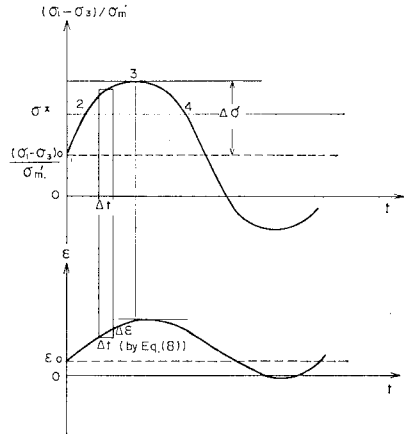


図-24 振動荷重時における累積ひずみの算出方法

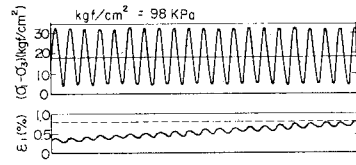


図-25 振動荷重時におけるひずみの経時変化に対する計算結果

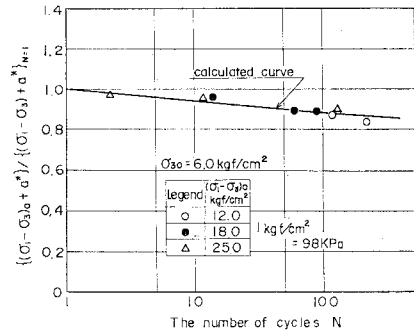


図-26 応力比 (N 回目の動的強度/1 回目の動的強度) と繰返し回数 の関係 ($\sigma_{30}' = 6 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$)) に関する計算結果と試験結果の比較

じることとし, また, ひずみが $\epsilon_f (= 0.8\%)$ に到達すると破壊を生じるものと仮定して行った計算結果について以下に述べよう. 振動試験時において供試体に負荷される繰返し応力は, $d(\sigma_1 - \sigma_3) = a^* \cdot \sin \omega t$ で表わせる. ここに a^* は応力振幅であり, ω は振動数を表わす. また, 振動荷重時における過剰間隙水圧挙動は弾性的なものとし, $\sigma_m' = \text{一定}$ とする. 図-25 は, 周波数 0.5 Hz, $\sigma_{m0}' = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$), $(\sigma_1 - \sigma_3)_0 = 18.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$), および $a^* = 14.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($\times 98 \text{ kPa}$) を採用して計算された結果を示したものである. 式 (8) に含まれる材料定数は, 先に述べた値を採用している. 一方, 図-26 には, 同様の計算を行って得られた破壊強度と繰返し回数の関係を実験結果との比較で示した. 図

における縦軸は N 回の繰返し回数で ϵ_f を生じさせる最大軸差応力 $((\sigma_1 - \sigma_3)_0 + a^*)$ を $N=1$ 波での最大軸差応力で正規化した値を用いている。図より、一定ひずみ速度試験およびクリープ試験結果から導かれた式 (6) が、振動載荷試験における破壊挙動をまで説明できることを明らかに示している。したがって、各種載荷試験による泥岩の破壊挙動は統一的に説明できることが示された。ただし、正規圧密領域を含む幅広い拘束圧下での力学挙動の統一的解釈は今後の課題として残されている。

5. 結 論

新第三紀鮮新世に属する泥岩を対象し、各種載荷試験 (一定ひずみ速度試験、クリープ試験、振動載荷試験) 時における力学挙動、特に圧密非排水条件下での強度-変形特性と各種試験結果との対応について論じた。以下に得られたおもな結論を列記する。

(1) 本研究に用いた泥岩は圧密降伏応力以下の拘束圧下 ($\sigma_{30}' < 30 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$) ではひずみ軟化が顕著に生じ、その最大強度は $25 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2 (\times 98 \text{ kPa})$ の範囲にある。一方、圧密降伏応力以上の拘束圧下ではひずみ硬化-軟化型の応力-ひずみ特性を示し、正規圧密土の強度-変形特性と同様の挙動を示す。最大強度は、拘束圧の大小によらずひずみ速度依存性を示し、それが大きいほど、強度も大きくなる傾向にある。

(2) クリープ破壊強度は三軸圧縮強度の約 70% である。また、最小クリープひずみ速度と作用軸差応力の間には一定の関係がみられた。

(3) 圧密降伏応力以下の拘束圧下では破壊に至る際の軸ひずみは載荷条件の違いによらず 0.8% とほぼ一定値で与えられる。

(4) 過圧密領域における最大強度とひずみ速度の関係はクリープ破壊強度と最小クリープひずみ速度の関係と一致する。また、強度の下限値は残留強度として与えられ、それは $10^{-9} \%$ /min のひずみ速度下における破壊強度に相当する。

(5) 有効応力に基づくならば、最大および残留強度に対する破壊規準は軸差応力と有効平均応力を座標軸とする両対数紙上で直線近似できる。また、最大強度に対する破壊規準はひずみ速度依存性を示し、ひずみ速度が大きいほど上位に位置する。

(6) 最小クリープひずみ速度と応力ならびに破壊規準のひずみ速度依存性に着目して、過圧密領域での応力-ひずみ速度関係式を誘導した。そして、この関係式は一定ひずみ速度下における最大強度に対する破壊規準ならびに振動載荷による強度と繰返し回数の関係を説明でき、したがって各種載荷試験での強度-変形特性を統

一的に解釈できることを示した。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、ご指導を賜わった京都大学工学部教授 赤井浩一博士 および 足立紀尚博士に深謝の意を表する次第である。また、実験面で東電設計 (株) 宇野晴彦氏および応用地質 (株) 田中荘一、満 弘之、国松 直の各氏にご援助いただいたことを付記し、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 仲野良紀：泥岩の力学特性と膨脹性トンネルおよびフィルダム、土と基礎、Vol. 28, No. 7, pp. 37~43, 1980.
- 2) 世良田章正・足立紀尚・岩崎好規：地下空洞における岩盤のクリープ変形の計測とその適用、土と基礎、Vol. 24, No. 1, pp. 21~26, 1976.
- 3) Morgenstern, N. : Slope and Excavation in Heavily Overconsolidated Clay, State of the Art Report, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, Tokyo, pp. 567~581, 1977.
- 4) Skempton, A.W. : Long-term Stability of Clay Slopes, Geotech., Vol. 14, No. 2, pp. 77~101, 1964.
- 5) Bishop, A.W. and H.T. Lovénbury : Creep Characteristics of two Undisturbed Clays, Proc. 7th ICSMFE, pp. 29~37, 1969.
- 6) Marsland, A. : The Shear Strength of Fissured Clay, Stress-Strain Behavior of Soils, Roscoe Memorial Symposium, pp. 59~68, 1972.
- 7) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：堆積軟岩 (多孔質凝灰岩) の弾-塑性挙動、土木学会論文報告集, No. 271, pp. 83~95, 1978.
- 8) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：堆積軟岩 (多孔質凝灰岩) の時間依存特性と構成式、土木学会論文報告集, No. 282, pp. 75~87, 1979.
- 9) Akai, K., T. Adachi and K. Nishi : Mechanical Properties of Soft Rocks, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 1, Tokyo, pp. 7~10, 1977.
- 10) 足立紀尚・小川豊和：堆積軟岩の力学特性と破壊規準、土木学会論文報告集, No. 295, pp. 51~63, 1980.
- 11) Hobbs, D.W. : A Study of the Behavior of Broken Rock under Triaxial Compression and its Application to Mine Roadways, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., Vol. 3, pp. 11~14, 1966.
- 12) Murrell, S.A.F. : The Effect of Triaxial Stress System on the Strength of Rocks at Atmospheric Temperature, Geophys. J., Vol. 10, No. 3, pp. 231~281, 1966.
- 13) Yoshinaka, R. and T. Yamabe : Strength Criterion of Rocks. Soils and Foundations, Vol. 20, No. 4, pp. 113~126, 1980.
- 14) Casagrande, A. and S.D. Wilson : Effect of Rate of Loading on the Strength of Clay and Shales at Constant Water Content, Geotechnique, Vol. 2, pp. 251~263, 1951.
- 15) Adachi, T. and A. Takase : Prediction of Long Term Strength of Soft Sedimentary Rock, Proc. ISRM, Tokyo, pp. 93~98, 1981.
- 16) Ohtsuki, H., K. Nishi, T. Okamoto and S. Tanaka : Time Dependent Characteristics of Strength and Deformation of a Mudstone, Proc. ISRM, Tokyo, pp. 113~118, 1981.

(1983.3.7・受付)