

繰返し荷重下における泥岩の強度-変形特性

STRENGTH-DEFORMATION PROPERTIES OF MUDSTONE UNDER CYCLIC LOADING

西 好一*

By Koichi NISHI

The main object of this study is to clarify the strength and deformation characteristics of mudstone deposited during the Tertiary Period, which is widely distributed in Japan, for the wide range of effective confining pressure σ'_m (=294 kPa~5880 kPa) during cyclic loading. It is found that degradation of shear strength according to increase of the number of cycles is relatively small in comparison with that of soft soils. Shear strength mobilized at irregular cyclic loading tests using actual earthquake acceleration records is about 110%~120% of that obtained by monotonous loading tests, and the relation between shear modulus G and σ'_m at small strain level is expressed by two straight lines with breaking points, which is given as σ'_m equivalent to consolidation yield stress, in the log scale paper.

1. ま え が き

軟質岩盤の安定性に関しては、もっぱら長期安定性の観点から議論されることが多かったが、きわめて重要な構造物が軟岩を主体とする地盤上に建設される機会が増えたことと、それらが過大な地震入力に対して十分な安全性を確保することが要求されるようになってきたことなどから、特に比較的軟らかい軟岩を対象とする場合、それ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、かつ変形するのかといった力学特性の把握も重要視されてきた。また、軟岩は過圧密粘土と類似の挙動を示すことから、強度の大小や変形のしやすさは別として、過圧密粘土の動的強度-変形特性との関連性が強いことが予想されること、および強度のひずみ速度効果やクリープ破壊強度との関連からも動態における軟岩の強度-変形特性を調べることは力学特性の統一的解釈といった観点からも興味深いものと思われる。

本論文は、従来研究の対象とされることが少なく、したがって未解明な部分の多い軟岩、このうちわが国に広く分布する泥岩の繰返し荷重下での強度-変形特性に着目して実施した実験的研究成果について述べるものであ

る。

2. 実験装置・試料および実験内容

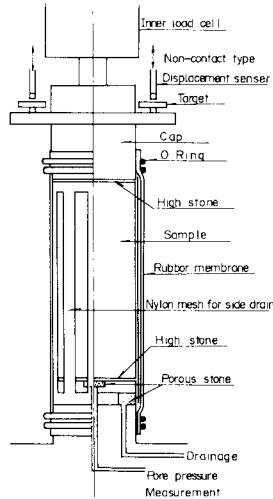
実験装置および実験に用いた試料（一軸圧縮強度 ≈ 30 kgf/cm²、圧密降伏応力 ≈ 30 kgf/cm²、 1 kgf/cm² $= 98$ kPa：以後も同様）は、文献1)で述べたものと同様である。用いた供試体は直径50 mm、高さ100 mmの円柱形であり、試験前には水浸させた状態で24時間脱気を行い完全飽和のもとで試験を行った。本論文で述べる主たる実験内容は以下のとおりである。

- ① 規則繰返し荷重下における動的強度試験
- ② 不規則繰返し荷重下における動的強度試験
- ③ 動的変形試験

①は、正弦波状の一樣振幅荷重を繰返し負荷させて、繰返し荷重下での強度-変形特性を検討する目的で実施したものである。載荷パターンとして、まず所定の拘束圧で等方圧密した後、あらかじめ設定した軸差応力を非排水条件で作用させ、しかる後に破壊に至るまで一樣振幅を有する繰返し荷重を負荷する方式を採用した。この試験で採用した周波数は0.5 Hzであるが、強度（非排水強度を意味する。本論文ではこれを強度と略称することにする）の周波数依存性を検討するために0.1~3.0 Hzの周波数範囲で同一初期応力条件下による繰返し載

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木研究所立地部
(〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

荷試験を実施した。②は2種類の地震加速度波形を用いて実施した不規則繰返し荷重載荷試験であり、①で得られる実験結果との関連について言及することを目的としている。この試験も①と同様に等方圧密後、所定の軸差応力を作用させた後実施した。③は、主に微小ひずみレベル（せん断ひずみ振幅 $\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ ）でのせん断剛性率と減衰比に関する実験である。このような微小ひずみレベル下での変形特性を検討していくと



図一 供試体の設置状況

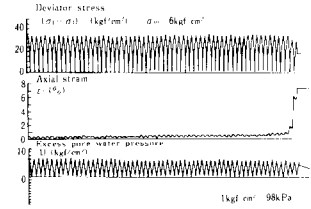
とき、荷重と変位の測定精度には十分な考慮が払われねばならないが、ここでは図一に示すように三軸セル内部に設置した非接触型変位計（容量 ± 1 mm）とロードセル（容量2 tf）を採用することにより測定精度の向上に努めた²⁾。また、供試体端面の整形度合いや平行度も測定精度に大きな影響を及ぼす重要なパラメーターであると思われる。ここでは、岩石試験の際用いられ

る高強度の石膏を水で練りキャップおよびベダスタルと供試体端面間に充填し固化（2時間程度）するのを待って試験を開始した。石膏そのものの厚みは1 mm程度であり、そのせん断剛性率は約 $4 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ であるので軟岩を対象とした実験においてはそれが測定ひずみ量に与える影響はほとんどないものとみてよい。採用した周波数は0.5 Hzであり、実験はすべて圧密非排水条件下で行った。

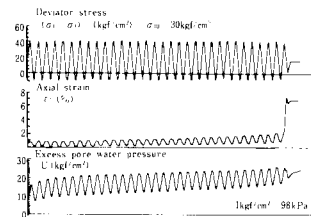
3. 規則繰返し荷重下における強度-変形特性

(1) 破壊の定義

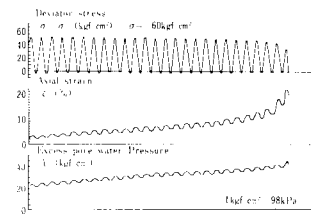
繰返し載荷時の強度特性を調べる場合には、まず破壊



(a) 有効拘束圧=6 kgf/cm²



(b) 有効拘束圧=30 kgf/cm²



(c) 有効拘束圧=60 kgf/cm²

図二 軸差応力、軸ひずみおよび過剰間隙水圧の時刻歴変化（代表例）

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繰返し載荷時における強度の定義ははまだ不明確であり、粘性土の場合のように載荷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。

それでは、泥岩のように比較的低拘束圧下で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、初期有効拘束圧が6.30および60 kgf/cm²の場合を例にとり軸差応力、軸ひずみおよび過剰間隙水圧の経時変化を示したのが図二である。図をみると明らかなように、拘束圧の大きさにかかわらず繰返し回数の増加に伴い軸ひずみは徐々に累積するが、 $\sigma_{30} \leq 30 \text{ kgf/cm}^2$ での挙動と $\sigma_{30} = 60 \text{ kgf/cm}^2$ の場合とでは破壊のし方に差異がみられる。すなわち、 $\sigma_{30} = 6, 30 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は、あるひずみ量に到達（ $\sigma_{30} = 6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は約1%，一方30 kgf/cm²の場合は約2%）すると急激にひずみが増大し所定の応力振幅を保持できず破壊に至ることが示されているが、 $\sigma_{30} = 60 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は軸ひずみが10%に到達しても供試体はせん断抵抗を示している。また、過剰間隙水

圧も圧密非排水クリープ試験でみられたように $\sigma'_{30}=6$ kgf/cm² の場合は繰返し回数の増大に伴い幾分低下する傾向にあること、一方 $\sigma'_{30}=30, 60$ kgf/cm² の場合は逆に上昇する傾向にあることが知られる。

上記した破壊特性から $\sigma'_{30} \leq 30$ kgf/cm² の拘束圧下では繰返し载荷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・ひずみ状態で泥岩の強度を定義づけることができる。一方、 $\sigma'_{30}=60$ kgf/cm² の場合、別途報告¹⁾した圧密非排水試験結果に基づき、最大強度発揮時点でのひずみ量 (5%) をもって繰返し载荷時における強度と定義づける。

(2) 強度に及ぼす周波数の影響

(1) で定義した強度の周波数依存性に対する影響を検討するために、初期有効拘束圧が 6 kgf/cm²、初期軸差応力が 20 kgf/cm² のもとで 0.1, 0.5, 1.0 および 3.0 Hz の周波数を採用して試験を実施した。

図-3 に、周波数をパラメーターとする強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ と繰返し回数 N の関係を示す。図中には、圧密非排水三軸圧縮試験 (ひずみ速度 = 0.1 %/min) から得られた最大強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を破線で示してある。図によれば、いずれの周波数下でも強度は繰返し回数の増大に伴い低下する傾向にあるが、0.1 Hz で得られた強度は他の強度と比較して幾分小さな値を示しているのが認められ

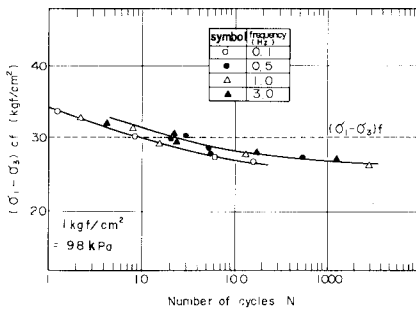


図-3 周波数をパラメーターにした強度と繰返し回数の関係

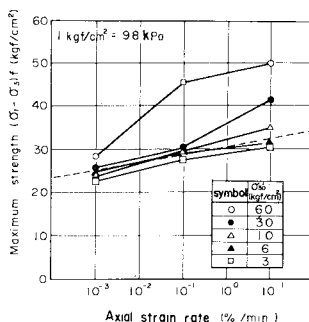


図-4 最大強度とひずみ速度の関係

た。一方、0.5~3.0 Hz の間においては顕著な差はみられない。すなわち、この程度の周波数範囲では強度に及ぼす周波数の影響はほとんどないものといつてよい。

ところで、別途述べた圧密非排水試験によると最大強度に対してひずみ速度依存性が示された¹⁾。いま、各拘束圧下で得られた最大強度とひずみ速度の関係を示すと図-4 を得る。ここで取り上げた $\sigma'_{30}=6$ kgf/cm² の場合に着目し、図中に示した破線により最大強度とひずみ速度の関係を表わすと、

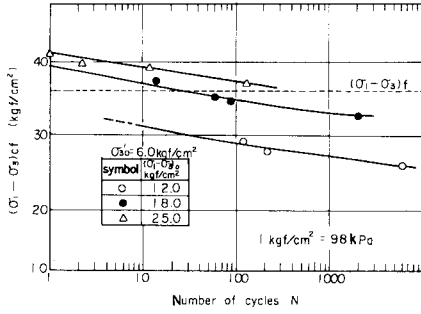
$$(\sigma_1 - \sigma_3)_c = 30.25 + 2.05 \times \log \dot{\epsilon} \dots \dots \dots (1)$$

となる。ただし、応力単位は kgf/cm²、ひずみ速度の単位は %/min である。応力制御による繰返し载荷試験と一定ひずみ速度試験を同一視して議論することができないが、破壊時ひずみ ϵ_f は载荷条件によらずほぼ一定値 ($\approx 0.8\%$) として与えられる¹⁾点を考慮して、試験時の周波数 f から $N=1/4$ 波 (単調载荷試験に相当) に要する時間 t を求め、 ϵ_f/t よりひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に換算すると $f=0.1, 0.5, 1.0$ および 3.0 Hz に対する $\dot{\epsilon}$ として 19.2, 96.0, 192.0 および 576.0 %/min が得られる。0.1 Hz の場合を考えると、式 (1) へ $\dot{\epsilon}=19.2$ %/min を代入して $N=1/4$ 波での強度を求めると 32.9 kgf/cm² が算出される。同様に、各周波数下での $N=1/4$ に対する強度を求め、0.1 Hz での強度でそれぞれの強度を除すと、 $f=0.5, 1.0$ および 3.0 Hz のそれぞれに対し、1.04, 1.06 および 1.09 が得られる。すなわち、0.1 Hz での強度と 10 Hz での強度は高々 10% 程度の違いを示すのみであり、図-3 に示した実験結果は一定ひずみ速度試験で得られた最大強度のひずみ速度依存性と矛盾しないことが知られる。

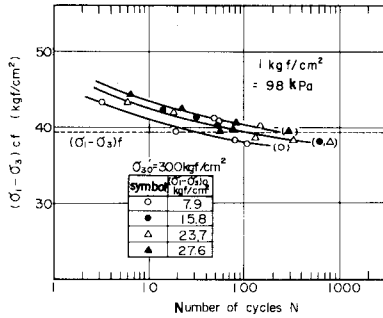
(3) 強度に及ぼす拘束圧と初期軸差応力の影響

繰返し载荷時における強度と繰返し回数の関係に及ぼす有効拘束圧と初期軸差応力の関係を検討するために、 $\sigma'_{30}=3, 6, 10, 30$ および 60 kgf/cm² の拘束圧下で所定の軸差応力を非排水条件下で負荷した後、繰返し载荷試験を実施した。強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ と繰返し回数の関係の一例として片対数紙上で整理したものを図-5 として示した。各図中には、圧密非排水三軸圧縮試験 ($\dot{\epsilon}=0.1$ %/min) で得られた最大強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を破線で示した。図によればいずれの拘束圧下においても繰返し载荷による強度は、初期軸差応力依存性を示し、初期軸差応力が大きいほど強度は大きい。初期軸差応力の増加によりその依存性は小さくなっていくこと、ならびにひずみ速度効果によりもたらされる繰返し回数の少ない範囲での強度増加は、繰返し回数の増加によって消滅していき徐々に強度は低下する傾向にあることが示されている。

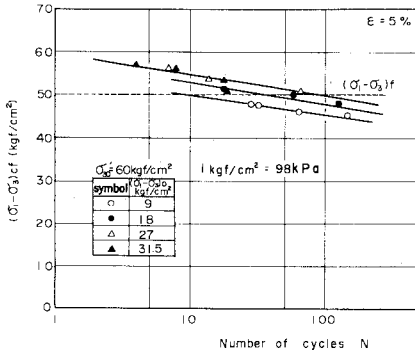
図-6 は、繰返しに伴う強度の低下割合をみるために $N=1$ 波目での強度で N 波目の強度を除した値と繰返



(a) 有効拘束圧=6 kgf/cm²



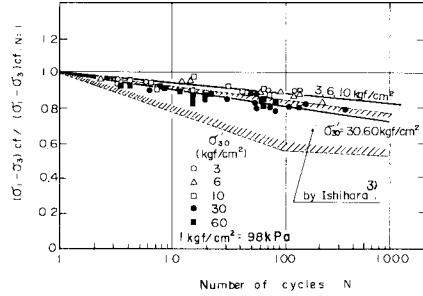
(b) 有効拘束圧=30 kgf/cm²



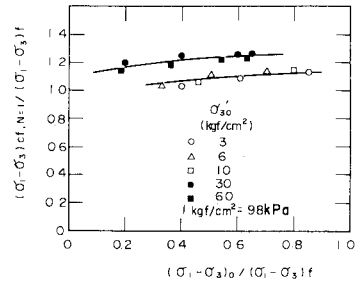
(c) 有効拘束圧=60 kgf/cm²

図—5 強度と繰返し回数の関係

し回数 N の関係を片対数紙上に示したものである。図によれば、 $N=1$ 波に対する強度の比は N の増加に伴い直線的に減少する傾向が示されているが、拘束圧が圧密降伏応力以下の場合、強度の低下は圧密降伏応力より大きな拘束圧下でのそれに比べて少ないことが知られる。たとえば、 $N=100$ 波目での強度比は $\sigma'_{30}=3\sim 10$ kgf/cm² では 0.88、一方 $\sigma'_{30}=30, 60$ kgf/cm² の場合は約 0.8 程度である。これは拘束圧が高い場合繰返しによる攪乱効果、すなわちダイレイタンスの発現により正の過剰間隙水圧の発生が著しく(図—2(c)参照)、それに伴い強度の低下がより顕著に現われてくるものと考えられる。ちなみに、圧密降伏応力以下の拘束圧下では



図—6 強度比 (N 回目の強度/1 回目の強度) と繰返し回数の関係

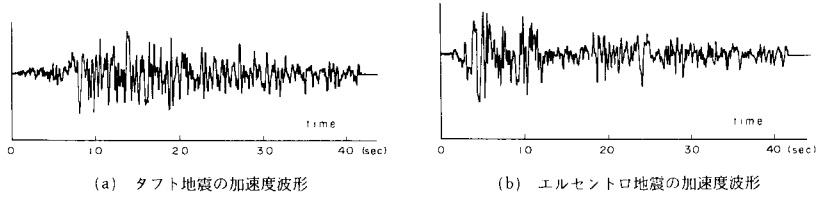


図—7 強度比 ($N=1$ 回目の強度/三軸圧縮強度) と初期軸差応力/三軸圧縮強度の関係

図—2(a)に示したようにわずかながら負の過剰間隙水圧が発生する傾向にあった。なお図中には各種土質材料に対する実験結果を石原³⁾がとりまとめたものをハッチングで示してあるが、それと比較すると用いた泥岩の繰返しに伴う強度低下はそれほど大きなものではないことが知られる。

一方、 $N=1$ 波目の強度を $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ で除した値と $(\sigma_1 - \sigma_3)_0 / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の関係を示したのが図—7である。図によれば、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0 / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ が 0.6 以上では初期軸差応力の大きさによらず、 $N=1$ 波目の強度は一定値を示す傾向にあるが、三軸圧縮強度に対する比は圧密降伏応力以上の拘束圧下とそれ以上の拘束圧下とで明瞭な差がみられる。すなわち、 $\sigma'_{30} \geq 30$ kgf/cm² の場合はそれ以下の場合と比較して強度の増加は大きい、これは、図—4に示した一定ひずみ速度試験結果からもわかるように、 $\sigma'_{30} \geq 30$ kgf/cm² の拘束圧下ではそれ以下の拘束圧下と比較して、最大強度に対するひずみ速度効果は大きい、という実験結果と一致するものである。したがって、圧密降伏応力以上の拘束圧下では、それ以下の拘束圧下と比較して、ひずみ速度の増大による強度の増大は大きい、繰返しに伴う強度の低下もまた大きいことが指摘できる。

4. 不規則繰返し荷重下における強度-変形特性



図—8 用いた地震加速度波形

前節では応力振幅一定条件下における繰返し载荷時の強度-変形特性について考察してきたが、実際問題として考えると地震時のように不規則荷重を対象として地盤の安定問題を議論していかねばならないことが多い。特に、試験そのものが単純でかつデータ解析の容易な応力振幅一定条件下で得られる強度特性が、不規則荷重条件下での強度-変形特性とどのように対応しているかを検討しておくことは重要である。そこで、先に述べた試験結果に基づき、不規則荷重下での強度-変形特性を明確にするとともに、応力振幅一定条件下での強度-変形特性と比較・検討した結果について述べる。

本試験で採用した不規則波形は、観測地震波として著名なタフト地震波(NS成分)とエルセントロ地震波(NS成分)の加速度波形の2種類である。これらの波形を図—8に示す。試験は、 $\sigma_{30} = 6 \text{ kgf/cm}^2$ の拘束圧で圧密した後、非排水条件下で初期軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0 = 18 \text{ kgf/cm}^2$ を負荷させて過剰間隙水圧および軸ひずみの進行が停止するのを確認してから不規則繰返し荷重載荷試験を実施した。不規則荷重は、データレコーダに収録した加速度波形を外入力としてフィードバックシステムへ導入し、荷重の経時変化として供試体に負荷された。地震波の時間軸は実地震波の5倍を基準として実施したが、速度効果を検討するためにタフト地震波については実地震波の時間軸(1倍)および25倍の時間軸を用いて行った。なお、用いた供試体のサンプリング位置が異なり、試験結果にばらつきが生じることが懸念されたので、あらかじめ三軸圧縮試験を実施し、静的強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$

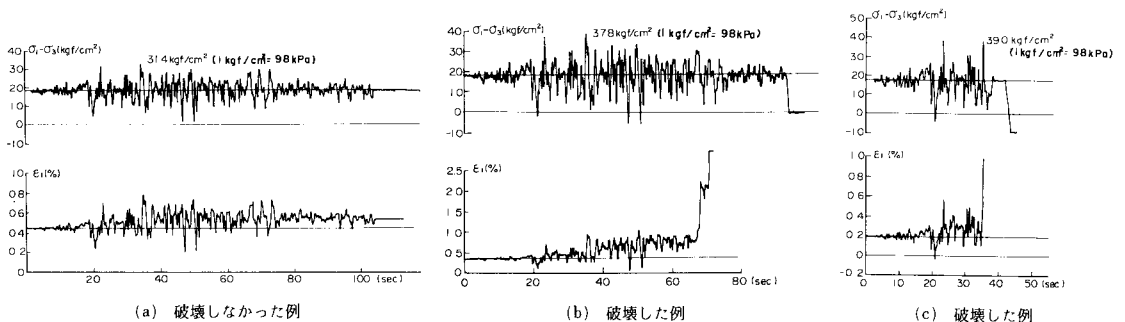
と破壊ひずみ ϵ_f を把握しておいた。また、各地震波を用いた試験では同一のサンプリング位置で採取された供試体を用いている。

(1) 実験結果とその考察

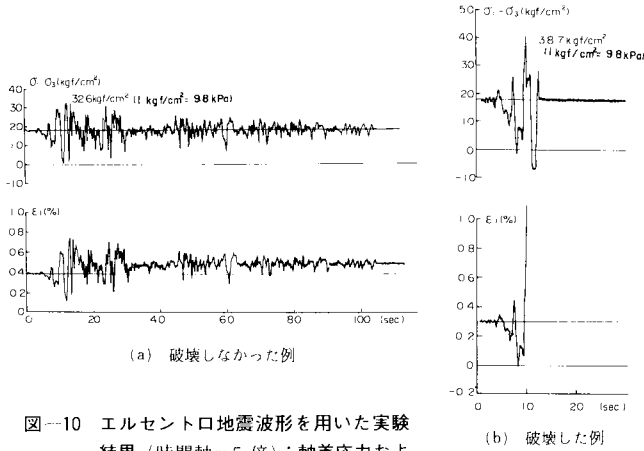
主たる実験結果を表—1に、一方軸差応力と軸ひずみの時刻歴変動を図—9, 10に示す。これらの図および表から以下の点が指摘できる。

表—1 不規則繰返し荷重載荷試験の結果

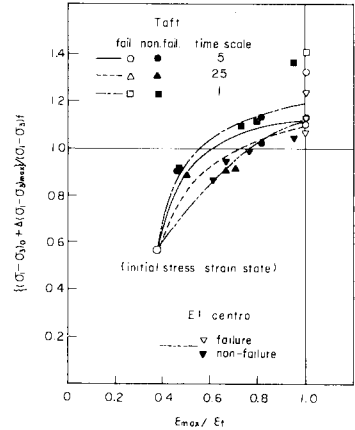
| 地震波形 | 時間軸 | t_c (sec/cm) | t_d (sec/cm) | W (%) | $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ (kgf/cm ²) | ϵ_{max} (%) | 備考 |
|-----------|------|-------------------|-------------------|----------|---|-------------------------|-----|
| タフト地震波 | 1 | 1.74 | 1.12 | 45.9 | 38.2 | 0.73 | 非破壊 |
| | | 1.68 | 1.09 | 51.8 | 38.3 | 0.87 | ・ |
| | | 1.67 | 1.09 | 52.1 | 34.7 | 0.67 | ・ |
| | | 1.68 | 1.10 | 53.5 | 26.2 | 0.43 | ・ |
| | | 1.68 | 1.10 | 52.1 | 40.4 | — | 破壊 |
| | 5 | 1.57 | 0.94 | 67.1 | 31.4 | 0.75 | 非破壊 |
| | | 1.70 | 1.13 | 50.6 | 37.9 | 0.74 | ・ |
| | | 1.68 | 1.10 | 53.1 | 23.2 | 0.43 | ・ |
| | | 1.73 | 0.99 | 46.7 | 45.5 | — | 破壊 |
| | | 1.72 | 1.16 | 49.6 | 37.8 | — | ・ |
| | 25 | 1.72 | 1.14 | 48.4 | 39.0 | — | ・ |
| | | 1.59 | 0.96 | 65.8 | 25.5 | 0.46 | 非破壊 |
| | | 1.58 | 0.96 | 64.7 | 28.1 | 0.61 | ・ |
| | | 1.58 | 0.95 | 61.7 | 30.5 | 0.65 | ・ |
| | | 1.68 | 1.11 | 49.5 | 38.8 | — | 破壊 |
| エルセントロ地震波 | 5 | 1.73 | 1.16 | 47.5 | 37.8 | 0.81 | ・ |
| | | 1.71 | 1.14 | 45.3 | 41.5 | 0.90 | 非破壊 |
| | | 1.57 | 0.94 | 66.0 | 28.4 | 0.63 | ・ |
| | | 1.58 | 0.95 | 66.7 | 32.6 | 0.72 | ・ |
| | | 1.68 | 1.09 | 51.7 | 22.5 | 0.58 | ・ |
| | | 1.71 | 1.13 | 44.3 | 36.6 | — | 破壊 |
| | | 1.57 | 0.94 | 66.5 | 38.7 | — | ・ |
| 1.57 | 0.95 | 66.6 | 35.3 | — | ・ | | |



図—9 タフト地震波形を用いた実験結果(時間軸=5倍): 軸差応力および軸ひずみの経時変化(代表例)



図一10 エルセントロ地震波形を用いた実験結果（時間軸=5倍）：軸差応力および軸ひずみの経時変化（代表例）



図一11 応力比（最大軸差応力／三軸圧縮強度）と最大軸ひずみ／破壊時軸ひずみの関係

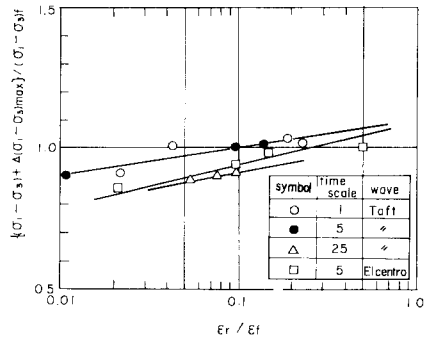
1) いずれの地震波形を用いた場合でも破壊が生じなかった場合をみると、最大軸ひずみは最大軸差応力が作用した時点で発生しており、そのときの発生ひずみ量は三軸圧縮試験で求められた破壊ひずみ ϵ_f を上回ることはない。

2) 破壊が生じた場合、最大軸差応力が作用した時点で急激にひずみが発生し破壊に至る場合が多いが、破壊時ひずみを超えても急激なひずみの増大は示さず、その後の応力変動に伴い徐々にひずみが累積していく傾向を示す場合、および図-9 (b) に示されるように最大応力を超過した後の不規則荷重荷荷によって破壊する場合もみられる。ただし、エルセントロ地震波形による場合はすべて最大軸差応力作用時点で破壊が生じている。

3) タフト地震波形での実験結果をみると時間軸が長くなると破壊強度は低くなる傾向にある。

実験結果から示されたように、不規則荷重荷荷時においても破壊を論議する際、三軸圧縮試験で得られる破壊ひずみは重要な意味を有する。そこで、三軸圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ と不規則荷重荷荷時における最大軸差応力ならびに発生ひずみ量との関係を検討するために図-11を準備した。図は縦軸に最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0 + \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ を三軸圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ で除した値（応力比）をとり、横軸には最大ひずみ ϵ_{max} を破壊時ひずみ ϵ_f で除した値（ひずみ比）をとってプロットしたものである。図中、不規則荷荷により破壊が生じた場合のひずみ比はすべて1.0としている。この図から以下の点が指摘できる。

1) 応力比とひずみ比の関係は、同一波形において時間軸が等しい場合、一本の曲線で規定することができる。また、波形にかかわらず応力比が1.0を超過してもひずみ比は1.0以下であり、したがって不規則荷重荷荷時の



図一12 応力比（最大軸差応力／三軸圧縮強度）と残留軸ひずみ／破壊時軸ひずみの関係

破壊強度は通常ひずみ速度下で得られる三軸圧縮強度を下回ることはないものといえる。

2) タフト地震波による実験結果をみると、時間軸の違いにより応力比とひずみ比の関係および破壊強度は異なり、時間軸が長くなれば同一の応力比に対するひずみ比は大きくなること、および破壊強度は低下することが知られる。

3) 時間軸が5倍のものについて比較すると、地震波の種類によらずひずみ比が1.0時における応力比はほぼ等しい値（≒1.12）を示す。

一方、応力比と試験終了後の残留ひずみ ϵ_r を ϵ_f で除した値（残留ひずみ比）との関係を図-12に示す。同一時間軸および同一応力比のもとではタフト、エルセントロの順に残留ひずみが大きくなる傾向を示している。これは荷荷時間の長短と関連があるものと考えられるが、応力比が1.0付近での差はほとんどみられない。また、そのときの残留ひずみ比は0.15程度であり、三軸圧縮強度と同程度の最大軸差応力をもつ不規則荷重が載

荷されても破壊ひずみが高々1%程度であることを考えると載荷終了時において生じる残留ひずみはきわめて小さいものといえる。

(2) 等価繰返し回数

前節では、不規則荷重載荷時の強度特性について述べた。ここでは、規則荷重載荷時の強度特性との比較、特に不規則荷重を応力振幅一定条件下に置換したときの等価繰返し回数について述べる。泥岩のように低拘束圧下では脆性的な挙動を示す材料の場合は、図-12からも知られるように破壊を生じない場合の残留ひずみはきわめて小さい。したがって、破壊を生じる場合でも最大軸差応力発生以前での残留ひずみも小さいことが予想される。そこで、4.(1)で定義した不規則荷重下での応力比と規則荷重載荷時における $N=1$ 波目での応力比(繰返し載荷時の強度/三軸圧縮強度=強度比)との関係に着目してみる。図-11でタフトおよびエルセントロ地震波に対し、それぞれ得られた応力比を読み取ると、双方ともに1.12が得られる。一方、図-7から $(\sigma_1 - \sigma_3)_0 = 18 \text{ kgf/cm}^2$ の軸差応力下 $((\sigma_1 - \sigma_3)_0 / (\sigma_1 - \sigma_3)_f = 0.57)$ で得られる $N=1$ 波に対する強度比を求めると1.10となる。すなわち、不規則荷重下での等価繰返し回数は近似的に $N=1$ 波として与えられることを意味する。このことは、規則荷重下で得られる強度比と不規則荷重下における最大軸差応力/三軸圧縮強度との比較から地震時における泥岩の破壊の有無を議論することができるということになる。ただし、上述した方法では各地震波の有する波形の特徴や速度効果を十分に含みきれておらず、またいくらかは破壊に寄与するであろう残留ひずみの取扱も問題点として残されている。これらの点をさらに明確にするために、累積損傷度の概念を用いて別の角度から考察を進めることにする。

累積損傷度の考え方を用いて不規則荷重載荷時の強度特性を検討する場合、通常は破壊強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cr}$ と N の関係が用いられるが、ここでは $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ との関連をみるために強度比 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cr} / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と N の関係を用いて議論を進める。図-13には、不規則荷重載荷試

験と同一拘束圧条件下で行われた規則荷重載荷試験の結果を $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cr} / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と N の関係として示す。

不規則波の最大応力比を $\{(\sigma_1 - \sigma_3)_0 + \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}\} / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ とし、任意の応力振幅 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_i$ と $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ との比を k で表わせば、不規則波形中の任意の応力比 η_i は次式で与えることができる。

$$\eta_i = \{(\sigma_1 - \sigma_3)_0 + k \cdot \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}\} / (\sigma_1 - \sigma_3)_f \dots \dots \dots (2)$$

採用した2種類の不規則応力波形から $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ をまず設定した後、 $0.65 \times \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ を超過する波をピックアップして k の値を決定する。なお、 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ の65%を下限値としたのは、この程度の応力以下では繰返しによる破壊への寄与率がきわめて小さいことを勘案したことによる。 k の値と $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ が決定できれば図-13に示した強度比 η と N の関係から、不規則振幅の強度比のうち、任意の振幅 η_i をもつ強度比が作用している繰返し回数 N_i と N_{cr} (η_i のもつて破壊に至る繰返し回数)ならびに N_i / N_{cr} が求められる。この手順を別の η_i を用いて繰返し行い、得られた N_i / N_{cr} を累積して累積損傷度 $D = \sum (N_i) / (N_{cr})$ を算出する。次に η_i が N_i 回作用したのと同様な効果を別の応力レベル η_e が作用したものに置き換えたときの繰返し回数 N_e として、 $N_e / N_{cr} = N_i / N_{cr}$ 、したがって $N_i / N_{cr} \cdot N_{cr} = N_e$ (N_{cr} は η_e による破壊までの N) と表わしたときの N_{cr} を図-13で示した強度比 η_e が1.0~1.15の範囲で設定する。そして複数の η_i を有する不規則波全体を η_e による単一応力レベルでの規則波に置き換えたときの等価繰返し回数 N_{eq} を $N_{cr} \cdot D$ として算出する。このようにして求められた N_{eq} をそれに対応する N_{cr} で除した値と最大応力比の関係を示したのが図-14である。累積損傷度の考え方によれば、不規則波載荷条件下での破壊規準は $N_{eq} / N_{cr} \geq 1.0$ として与えられるので、 $N_{eq} / N_{cr} = 1.0$ となる最大応力比を図-14から読み取れば、タフトおよびエルセントロ地震波のそれぞれに対し、1.14および1.12が求められる。先に述べたように図-7で $N=1$ 波

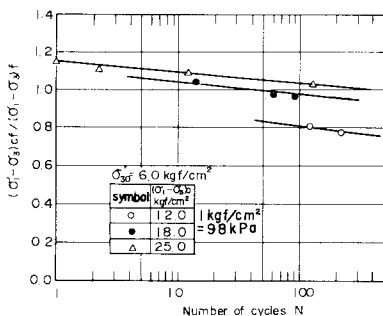


図-13 強度比と繰返し回数の関係 ($\sigma'_0 = 6 \text{ kgf/cm}^2$)

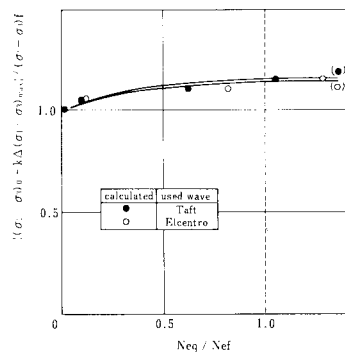


図-14 最大応力比と等価繰返し回数/応力振幅一定試験による破壊時繰返し回数の関係

に対する $(\sigma_1 - \sigma_3)_{c,N=1} / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は 1.10 であるので、上記した値とこれとの比較から等価繰返し回数として $N_{eq} \approx 1$ が得られる。したがって、累積損傷度の概念からも不規則荷重載荷時の破壊強度は規則荷重載荷時における $N=1$ 波の破壊強度と等価であることが結論づけられた。ただし、破壊強度に及ぼす載荷速度の影響については明確になっていない。この点につき以下に考察を進める。

不規則荷重載荷試験での破壊強度は、その波形の最大軸差応力で決定される。そこで、この最大軸差応力作用時点に着目して時間軸が 5 倍の周波数を求めると、タフトおよびエルセントロ地震波のそれぞれに対し、0.67 および 0.5 Hz が得られる。これらの値を用いて、3. で述べた方法により速度を算出し、式 (1) からタフトおよびエルセントロ地震波に対する強度を求めると、それぞれ 33.96 および 33.70 kgf/cm² が得られる。三軸圧縮強度 ($\dot{\epsilon} = 0.1\%/\text{min}$) に対するこれらの値の割合は、それぞれ 1.12 および 1.11 であり、図-11 に示したひずみ比 = 1.0 時における応力比の値とはほぼ対応した値であることが知られる。同様の手順によりタフト地震波での時間軸が 1 倍および 25 倍の最大軸差応力を求め、三軸圧縮強度との比をとると、それぞれ 1.17 および 1.08 を得る。これらの値は図-11 に示したタフト地震波におけるひずみ比 = 1.0 時の応力比とはほぼ一致した値である。したがって、一定ひずみ速度試験で得られた結果と不規則荷重載荷試験で得られた結果とは矛盾なく対応することが示された。

5. せん断剛性率と減衰比

(1) ひずみ依存性

等方圧密後、軸差応力を繰返し加えたときに得られた応力-ひずみ曲線の一部を図-15 に示す。図から明らかなように、軸ひずみが 10^{-4} レベルにおいてさえその応力-ひずみ曲線は履歴ループを示しており、完全弾性体としての挙動は示していない。これは、微小なひずみ領域においても用いた泥岩の力学特性は弾塑性的なものであることを意味しているが、このことは金属材料、たと

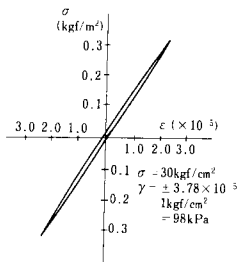


図-15 履歴ループの一例

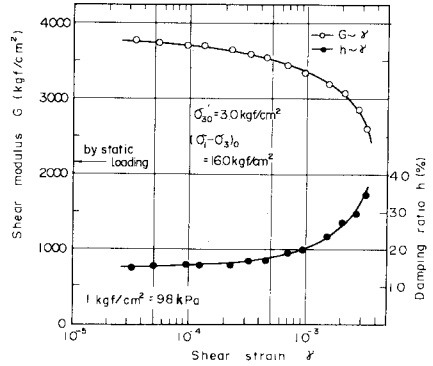


図-16 せん断剛性率とせん断ひずみおよび減衰比とせん断ひずみの関係

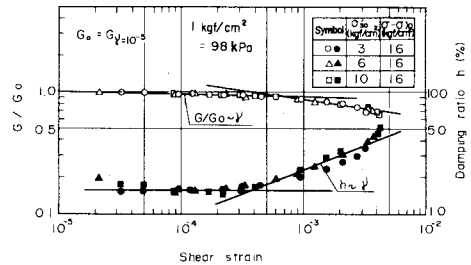


図-17 せん断剛性率とせん断ひずみおよび減衰比とせん断ひずみの関係 (半対数紙上)

えば軟鋼などにおいて比例限界内で繰返し荷重を加えたときにもみられる現象⁶⁾である。すなわち、破壊領域までの大きなひずみレベル下での実験結果からは予想されなかった現象がひずみ領域を限定することにより拡大された形で現われてきたものといえる。

いま、等価線形化手法の考え方³⁾を導入して上記した弾性係数と減衰比がひずみの大きさに伴いどのように変化するかをみてみよう。図-16 は有効拘束圧 3 kgf/cm² で圧密後、16 kgf/cm² の軸差応力を負荷して繰返し載荷試験を行ったときに得られたせん断剛性率 G とせん断ひずみ γ (双方ともにポアソン比 ν を 0.5 と仮定して算出) ならびに減衰比 h と γ の関係を示したものである。図によれば G は γ の増大に伴い 10^{-5} レベルから低下する傾向にあるが、この低下傾向は 10^{-3} 以上のひずみレベルで顕著である。また、減衰比の変化傾向についても同様のことがいえる。なお、図中には 0.1%/min のひずみ速度下で得られた応力-ひずみ曲線から $\gamma = 0 \sim 10^{-3}$ の範囲で求めたせん断剛性率を矢印で示してあるが、繰返し載荷試験で得られた G と比較してかなり小さな値を示し、その割合は 60% 程度である。

一方、ひずみの大きさに応じた G と h の非線形性をより詳細に考察するために図-17 を準備した。ただし、

G は $\gamma=1 \times 10^{-3}$ 時の $G(=G_0)$ で除した値を採用し、他の応力条件下で得られた実験結果も併記してある。図によれば、 G は γ の増大に伴い徐々に低下するものの、拘束圧の大きさにかかわらず $\gamma=6 \times 10^{-4}$ 程度までは G_0 に対し約 10% の減少を示すに過ぎないが、このレベルを超過すると G の低下傾向はより明瞭に表われてくる。一方、 h に対してはいずれの拘束圧条件下でも $\gamma=4 \times 10^{-4}$ 程度までは 1.5% とほぼ一定値を示すが、そのひずみレベルを超過すると増大し始め、 $\gamma=5 \times 10^{-3}$ で 5% 程度の値を示す。すなわち、ひずみに対する非線形性状は G に比較して h の方が幾分小さなひずみレベルから発生することが伺える。なお、 $\gamma=4 \times 10^{-4}$ というせん断ひずみ振幅は、三軸圧縮試験による破壊時軸ひ

ずみ ϵ_r の 5% に相当する。

(2) 拘束圧依存性

せん断剛性率 G の拘束圧依存性をみるために、有効拘束圧 σ_{30} が 3~60 kgf/cm² の範囲で圧密し、繰返し載荷試験を行った。図-18 は試験結果を G と γ の関係で整理したものである。図中、“Loading” は σ_{30} を 3 kgf/cm² から 60 kgf/cm² へと増加させる過程を示しており、他方“Unloading”は 60 kgf/cm² から有効拘束圧を減少させる過程を示している。図より以下の点が指摘できる。

1) 載荷過程を問わず、 G は拘束圧依存性を示し、拘束圧の増加は G の増大をもたらす。また、この依存度合いは“Unloading”時により顕著にみられる。

2) G と γ の関係をみると σ_{30} が 60 kgf/cm² の場合を除けばせん断ひずみの増加に伴う G の低下割合は拘束圧によらずほぼ同様なものといつてよい。

一方、同一ひずみレベル ($\gamma=1 \times 10^{-4}$) での G の拘束圧依存性をみるために準備したのが図-19 である。

図は縦軸に $\gamma=1 \times 10^{-4}$ での G を、横軸には有効平均応力 σ_{m0} をとり、実験結果を両対数紙上に整理したものである。図によれば、(○) で示した“Loading”時での $\log G \sim \log \sigma_{m0}$ 関係は、 $\sigma_{m0}=30$ kgf/cm² 付近までは直線関係 ($G=3450 \times (\sigma_{m0})^{0.09}$) にあるが、その応力レベル以上では別の直線関係 ($G=1350 \times (\sigma_{m0})^{0.36}$)、すなわち 2本の直線により規定されることがわかる。一方“Unloading”時の $\log G \sim \log \sigma_{m0}$ 関係は 2本の直線で近似でき、その勾配は $\sigma_{m0}=30$ kgf/cm² 以上の“Loading”時における直線勾配とほぼ同一である。なお、“Loading”時における直線の折れ曲り点における有効平均応力は、本泥岩の圧密降伏応力に相当する。上記した結果は、圧密降伏応力以上の拘束圧の負荷により粒子間のセメンテーションが崩壊し、これにより変形特性の拘束圧依存性が増加したためと思われる。このことは、一定ひずみ速度試験結果から多孔質凝灰岩に対する弾性係数の拘束圧依存性を論じた足立⁷⁾と同様の結果を与えている。なお、不攪乱粘土を用いた Hardin-Black の研究⁸⁾によると、上記したのと同様、せん断剛性率と有効拘束圧の関係は圧密降伏応力を境にして、正規および過圧密領域で 2本の直線で与えられることを示している。しかし、泥岩の場合、圧密降伏応力以上の有効拘束圧下で圧密し、それを減少させる過程、すなわち過圧密領域での $\log G \sim \log \sigma_{m0}$ の関係は正規圧密領域でのそれと同様であり、粘土とは異なった特性を示す、すなわち、粒子間のセメンテーションが発達し固結の進んだ粘土とそうでない粘土とは正規および過圧密領域での変形特性に違いがみられることが指摘できる。

一方、減衰比 h とせん断ひずみ γ 関係を拘束圧をバ

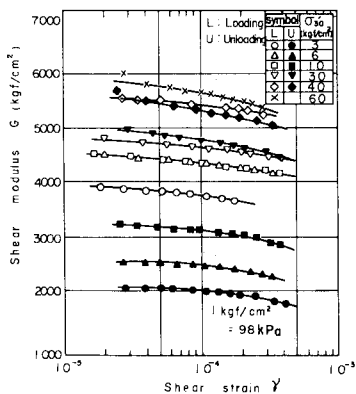


図-18 せん断剛性率とせん断ひずみの関係

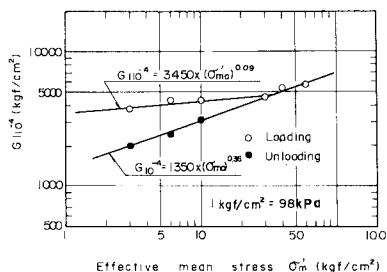


図-19 $\gamma=1 \times 10^{-4}$ 時の G と有効平均応力の関係

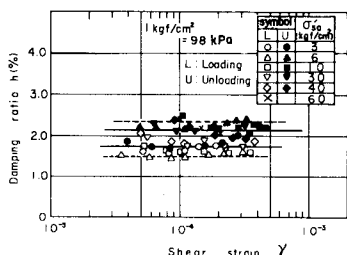


図-20 減衰比とせん断ひずみの関係

ラメーターにして示したのが図—20である。拘束圧の大きさが h にもたらす影響の度合いは必ずしも明瞭ではないが“Loading”時をみると拘束圧が圧密降伏応力を超過すると幾分減衰比は大きくなる傾向にある。一方，“Unloading”時においては $\sigma_{30} = 3 \text{ kgf/cm}^2$ の場合を除いては、約 2.2% と拘束圧の大きさにかかわらずほぼ同一の値を示している。これは、先に述べた拘束圧の増大によりもたらされる粒子間のセメンテーションの劣化とつながりがあるものと思われるが、いずれにしても h は 1.5~2.3% という狭い範囲内にあり、 h に及ぼす拘束圧効果はほとんどないものといつてよい。

6. 結 論

軟岩用振動三軸圧縮試験装置を用いた繰返し載荷試験結果から、規則荷重下ならびに不規則荷重下における泥岩の動的強度-変形特性に関して幾つかの知見を得た。得られた結論を要約すると以下のとおりである。

(1) 規則荷重(応力振幅一定)下での繰返し載荷試験によると、圧密降伏応力以上の拘束圧下では繰返し回数が増大とともにひずみは徐々に累積し、ある回数で急激にひずみが増加する。この状態をもって繰返し載荷による破壊と定義づけることができる。

(2) 0.1~3 Hz 下で得られる強度には幾分かの周波数依存性がみられた。なお、周波数から算出される載荷時間と破壊ひずみ量より算出されるひずみ速度を用いると、 $N=1$ 波時における強度の周波数依存性は一定ひずみ速度試験により得られる強度特性から推定できることを示した。

(3) 初期有効拘束圧を 3~60 kgf/cm² の広い拘束圧範囲内で実施した応力振幅一定下での繰返し載荷試験によると、圧密降伏応力以上の拘束圧(正規圧密領域)における $N=100$ 波時の強度は $N=1$ 波時の強度の 80% 程度であるが、それ以下の拘束圧下(過圧密領域)では 88% 程度であり、繰返しに伴う強度低下割合は正規圧密領域の方が大きいものといえる。一方、 $N=1$ 波時における強度は正規圧密領域の方が大きい。すなわち、正規圧密領域では、過圧密領域と比較して強度に及ぼすひずみ速度効果は大きいものといえる。

(4) 2種類の地震加速度波形を採用して実施した不規則荷重載荷試験によると、用いた試料の強度は三軸圧縮強度を 10~20% 程度上回る傾向を示し、しかもその強度は規則荷重下で得られる $N=1$ 波でのそれとほぼ同程度に値を示す。これらの実験結果は採用した地震波形の違いに依存しない。なお、金属疲労理論における累積損傷度の概念を適用して上記の実験結果を確認した。また、不規則荷重下での強度は載荷時間の影響を受け、そ

れが長いほど強度は低下する傾向にあるが、この載荷速度効果は、圧密非排水試験から得られたひずみ速度と強度の関係を用いて推定できる。

(5) 繰返し載荷により求められたせん断剛性率 G ならびに減衰比 h は、せん断ひずみ γ が大きくなると低下および増大する傾向にあるが、この傾向は $\gamma \geq 6 \times 10^{-4}$ で顕著である。

(6) 拘束圧の増大は G の増加をもたらすが、この増加割合は、圧密降伏応力を境にして異なり、2本の直線(両対数紙上)で G と有効平均応力 σ_m の関係を与えることができる。一方、圧密降伏応力を超えた拘束圧下で圧密させた後、拘束圧を減少させていく場合には正規および過圧密にかかわらず正規圧密領域で得られたのと同じ勾配を有する一本の直線(両対数紙上)で G と σ_m の関係を表示できる。これは、圧密降伏応力以上の拘束圧下では粒子間のセメンテーションが劣化することによるものと考えられる。なお、 h の拘束圧依存性は小さく、 γ が 1×10^{-6} 以下では 1.5~2% の範囲である。

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) 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, 1983.
- 2) Nishi, K., Kokusho, T. and Esashi, Y.: Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Rocks for a Wide Confining Pressure Range, Proc. Int. Congress on Rock Mecha, Melbourne, 1983.
- 3) 石原研而：土質力学の基礎、鹿島出版会、1976.
- 4) Miner, A. M.: Cumulative Damage in Fatigue, Trans. ASME, Vol. 67, 1945.
- 5) Annaki, M. and Lee, K. L.: Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics, Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT6, 1977.
- 6) 横堀武夫：材料強度学、技報堂、1969.
- 7) 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, 1980.
- 8) Hardin, B. O. and Black, W. L.: Closure to Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, Proc. ASCE, No. SM 6, 1969.

(1983.12.2・受付)