

(95) 上総層群泥岩の繰返し荷重下における動力学的特性

(株) 間組 平井光之
吉村和彦
世一英俊

Dynamic Characteristics of Mudstone during Fatigue Test

Mitsuyuki HIRAI Technical Research Institute, Hazama-Gumi, Ltd.
Kazuhiko YOSHIMURA Engineering Division, Hazama-Gumi, Ltd.
Hidetoshi YOICHI Technical Research Institute, Hazama-Gumi, Ltd.

In order to advance the effective use of underground space, it is necessary to clarify the dynamic characteristics of soft rock such as Mudstone and Sandstone. Specially, evaluation of fatigue characteristics and long-term strength is very important. The regular cyclic loading test was carried out. Then, elastic modulus, loss coefficient and strain rate were mainly investigated.

From this experiment, the following results were obtained,

- ① Degradation of elastic modulus and ascending of loss coefficient according to increase of the number of cycles was remarkable in high confining pressure than in low one.
- ② The number of cycles at failure was in proportion to the number of cycles when acceleration fatigue started. Further the value of proportion coefficient depends on confining pressure.
- ③ Ascending of loss coefficient preceded the ascending of strain rate. That is, the sign of failure appears in energy loss sensitively.

1. はじめに

大深度地下鉄、地下都市、電力貯蔵施設等を首都圏およびその近郊の地下空間に建設しようという構想が目白押しである。これらの構造物立地の主な対象となるのは、関東地域では上総層群に属する堆積軟岩層（おもに泥岩）である。特に21世紀の電力貯蔵技術として注目されている超電導電力貯蔵（SMES）においては周辺岩盤に長周期の繰返し荷重が長期にわたって作用する。このため、堆積軟岩の力学的挙動、なかでも疲労特性と長期強度に関する知見の集積が重要である。また、最終的にはこれらの大深度地下構造物の設計ならびに安定性評価技術の確立が大きな課題である。

堆積軟岩の力学特性に関しては、大谷石を用いた一連の実験に基づき破壊基準・時間依存性に検討を加えた足立らの研究^{1)~3)}、泥岩を用いた西らの系統的な研究⁴⁾を挙げることができるが、その挙動にはまだまだ不明な点も多くデータの集積が必要である。

本研究は、第四紀更新世～第三紀鮮新世に属する上総層群泥岩について、種々の側圧、載荷周波数の下での繰返し載荷試験を実施し、主に繰返し載荷の進行に伴う割線弾性係数、損失指数、ひずみ速度等の変化について検討を加え、その破壊過程の把握を試みたものである。

2. 試験方法

2-1 供試体

実験に用いたのは千葉県市原市で採取した泥岩であり、その一軸圧縮強度は、 $30 \sim 40 \text{ kgf/cm}^2$ の間である。供試体形状は直径 50 mm 、高さ 100 mm の円柱状とし、24時間の水中脱気の後試験に供した。

2-2 载荷方法

実験に使用した装置は油圧式サーボ機構を有する振動三軸試験装置である。試験はすべて圧密非排水試験であり、圧密時の排水はペーパーによるサイドドレーン方式によった。载荷パターンは図-1に示すように圧密終了後あらかじめ設定した初期軸差応力まで静的に载荷し、その後初期軸差応力を中心に一樣振幅の繰返し荷重を作用させた。本試験で採用した側圧は $5, 10, 30 \text{ kgf/cm}^2$ 、繰返し载荷周波数は $0.5, 0.1, 0.01 \text{ Hz}$ である。繰返し最大応力は先に実施した静的三軸圧縮試験において得られた最大応力に対し $70 \sim 120\%$ の大きさである。

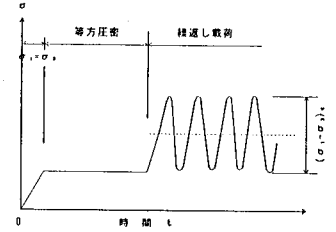


図-1 载荷パターン

3. 試験結果・考察

3-1 割線弾性係数の変化

泥岩の動力学的特性として図-2のように割線弾性係数、損失指数を定義する。図-3に示すように、繰返し载荷に伴い割線弾性係数は徐々に低下していく傾向にある。第1波目から第2波目に形成されるヒステリシスループから求めた割線弾性係数(初期割線弾性係数 E_1)は側圧の大きさに対応して $5000 \sim 14000 \text{ kgf/cm}^2$ の値を示しており、側圧の高いほど载荷の繰返しに伴う割線弾性係数の低下の割合が大きい。同図は周波数 0.1 Hz の例であるが、他の周波数においてもほぼ同様の傾向であった。割線弾性係数と側圧の関係を図-4、5に示す。図-4は E_1 に関する図であり、図-5は破壊直前のヒステリシスループから求めた値(破壊時割線弾性係数 E_f)である。なお、

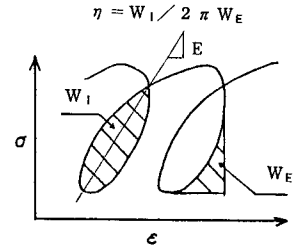


図-2 割線弾性係数・損失指数の定義

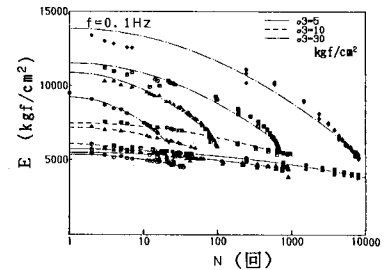


図-3 割線弾性係数の変化

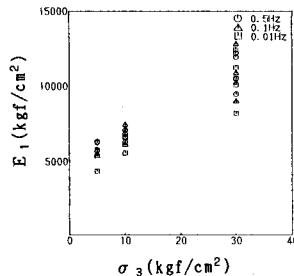


図-4 初期割線弾性係数-側圧関係

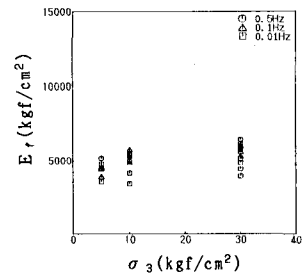


図-5 破壊時割線弾性係数-側圧関係

ここでは载荷応力が急激に低下し始める段階をもって破壊としている。 E_1 は前述したように側圧の大きさに比例した値である。ところが、 E_f は約 5000 kgf/cm^2 で側圧の大きさによる差はほとんど

どない。また、側圧5kgf/cm²の場合E₁とE_rの値にはほとんど差がなく、繰り返し载荷による割線弾性係数の低下の割合はごく小さい。側圧5、10kgf/cm²においては繰り返し载荷の進展とともに間隙水圧が低下していく傾向があるため有効側圧が上昇することとなり、その結果、割線弾性係数の低下を妨げると考えられる。一方、側圧30kgf/cm²では、徐々に間隙水圧が上昇していくため有効側圧の低下が生じ、結果的に割線弾性係数の低下すなわち剛性の低下が進む。このように、非排水の繰り返し载荷試験においては側圧の違いによる剛性の差を緩和するように破壊が進む。

同様に载荷周波数との関係を考察すると、E₁では载荷周波数による差は顕著でないにもかかわらず、わずかながらE_rに周波数依存性がみられる。すなわち、载荷周波数が低いほど繰り返し载荷に伴う割線弾性係数の低下が大きい。これは繰り返し回数が同じでも载荷時間の長いほど供試体に与えるダメージが大きいことと対応している。

3-2 損失指数の変化

図-6に繰り返し载荷の進行に伴う損失指数の変化の例（ $\sigma_3=30\text{kgf/cm}^2, f=0.5\text{Hz}$ ）を示す。同図では第一波目から2波目の载荷過程で描かれるヒステリシスループより得られる損失指数（初期損失指数）に対する比で表示している。载荷応力レベルの高い場合、損失指数は载荷開始直後から上昇し始めそのまま破壊に至る。一方、応力レベルの低い場合は、損失指数は一旦減少した後破壊に近づくにつれて増大に向う。初期・破壊時損失指数と側圧の関係を図-7、8に示す。初期損失指数には側圧による違いはあまり見られない。これに対し破壊時損失指数は側圧が大きいほど大きくなる傾向にあるが、その値のパラツキも大きい。側圧の高いケースほど三軸圧縮強度が大きく、繰り返し载荷試験時の応力レベルも高くしているため単純に側圧の影響のみを表しているとはいえないが、側圧が大きくなると破壊挙動が延性的になることを反映していると考えられる。

また、载荷初期、破壊時とも载荷周波数の低いほど損失指数が高くなる傾向がある。これは、長周期になるほど一回の繰り返し载荷で加えられるエネルギーが大きくなるためと理解される。

3-3 ひずみ速度と損失指数

クリープ試験においては载荷継続時間とひずみ速度の関係の変化から供試体の破壊が顕著に始まる段階として加速クリープを捉えることができる。繰り返し载荷試験においても、一回の繰り返し载荷で進行するひずみ量をもってひずみ速度と考えると、繰り返し回数との間に同様な関係がある。この関係を示したのが図-9である。同図には、繰り返し载荷時の各波の最大ひずみに関するひずみ速度の変化を示しており、ひずみ速度は繰り返し载荷の進展に従い小さくなっていき载荷応力レベルに応じたひずみ速度の下限値が存在し、破壊に近づくると転じて増加し始め破壊に至ることがわかる。

クリープ試験の加速クリープに対応するひずみ速度の急増を加速疲労、加速疲労開始前のひずみ速度の下限値を定常ひずみ速度と呼

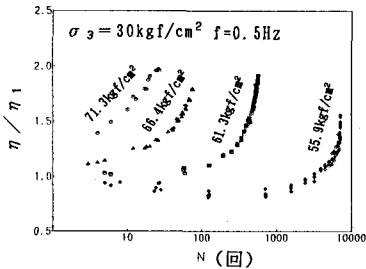


図-6 損失指数の変化

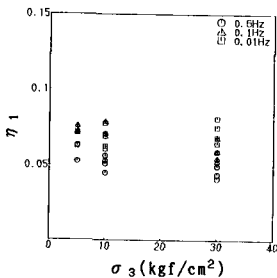


図-7 初期損失指数-側圧関係

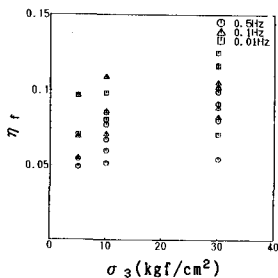


図-8 破壊時損失指数-側圧関係

ぶこととする。定常ひずみ速度と応力レベル関係を求めたのが図-10の例である。繰り返し载荷試験においても、クリープ試験と同様定常ひずみ速度の対数と軸差応力が比例し、また、载荷周波数が小さいほど同一軸差応力に対する定常ひずみ速度が大きい。

加速疲労が開始するときの繰り返し回数と最終的な破壊時の繰り返し回数の関係を側圧ごとにまとめたのが図-11である。両者の間には比例関係が成立し、比例係数の値は側圧の大きさに対応して大きくなる傾向にあり、破壊形態も延性的となる。

一方、ひずみ速度と損失指数の関係を各繰り返し段階ごとに追ってみると、図-12の例に示すようにループを描く。応力レベルの低い場合は、ひずみ速度・損失指数とも载荷初期には減少傾向をたどり、やがて、ひずみ速度は一定値に落ち着き定常ひずみ速度状態に至る。この定常ひずみ速度状態においてすでに損失指数が増加し始め供試体内に変化の生じていることがわかる。その後、加速疲労段階に至るとひずみ速度の急激な増大が生じ破壊に至る。一方、応力レベルの高い場合、载荷初期の損失指数の顕著な減少はみられず、ひずみ速度が定常ひずみ速度に向かって小さくなっていく段階においてすでに損失指数は増加し始める。

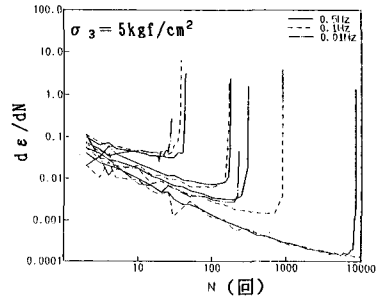


図-9 ひずみ速度の変化

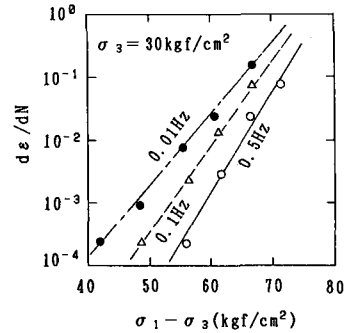


図-10 定常ひずみ速度-軸差応力関係

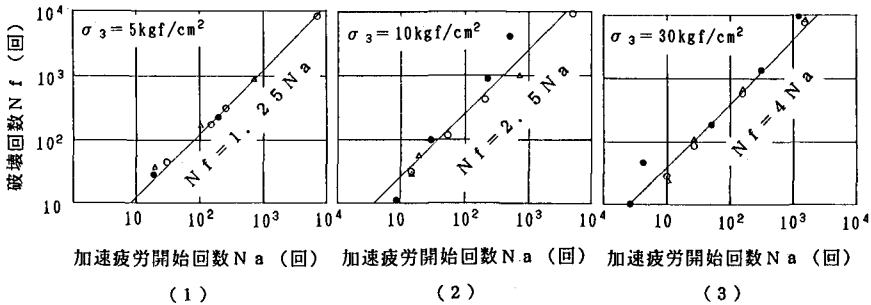


図-11 加速疲労開始回数-破壊回数関係

このように損失指数は供試体の変化をひずみ速度より早期に捉える傾向があり、繰り返し载荷を受ける岩盤の挙動の監視に有用な指標になると考えられる。また、ひずみ速度と損失指数の関係は同図に描いたような包絡線で規定される関係にある。

3-4 疲労破壊時の有効応力経路

図-13、14に静的三軸圧縮試験時の有効応力経路と繰り返し载荷試験における破壊時の応力状態を示す。図-13における2本の包絡線はそれぞれピーク強度と残留強度に対

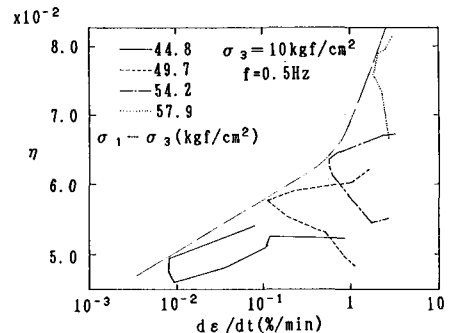


図-12 損失指数-ひずみ速度関係

応するものである。2本の包絡線は $\sigma_m' = 47 \text{ kgf/cm}^2$ 付近で交わり、この値が先行履歴応力¹⁾に対応すると思われる。通常、静的試験における破壊包絡線は載荷速度によって異なるが、ここでは、0.03%/minの載荷速度による試験結果である。また、図-14には静的試験時の包絡線を重ねて描いている。繰り返し載荷試験時の有効応力経路は側圧5、10 kgf/cm²では繰り返し載荷の進行に伴い徐々に間隙水圧が減少していくため平均有効応力の上昇すなわち応力経路が図上で左から右方向への軌跡を描く。これに対し、側圧30 kgf/cm²ではほぼ逆の傾向を示し、低応力レベルでは右から左への軌跡を描く。側圧30 kgf/cm²の場合試験時の平均有効応力は先行履歴応力以下であるが、その破壊挙動は正規圧密状態における挙動に近い。破壊時の応力状態は静的試験時の破壊包絡線に対し上側にプロットされるが、これは繰り返し載荷試験における載荷速度が静的試験における値より大きいためと理解される。

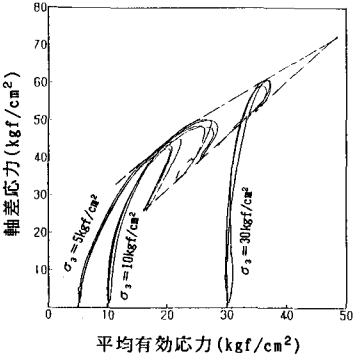


図-13 有効応力経路
(静的三軸圧縮試験)

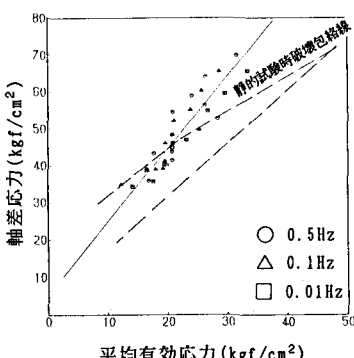


図-14 破壊時有効応力状態
(繰り返し載荷試験)

4. まとめ

堆積軟岩の一種である上総層群泥岩に関し一定荷重の繰り返し載荷試験を実施し、その動力学的特性を検討した結果以下のような知見を得た。

- 1) 非排水条件下での繰り返し載荷試験においては、割線弾性係数は載荷初期には側圧に依存した値を示すが、破壊時には側圧の大小に関わらずほぼ一定の値に近づく。一方、損失指数は載荷初期よりも破壊時に側圧に依存した値を示す。両者は裏腹の関係にあり、側圧の大きいほど繰り返し載荷過程における動力学的パラメータの変化が大きいことを示している。
- 2) 繰り返し載荷試験においてもクリープ試験と同様に定常ひずみ速度、加速疲労段階などを定義できる。定常ひずみ速度の対数値と軸差応力は比例関係にあり、また、載荷周期の長いほど定常ひずみ速度が大きい。破壊時の繰り返し回数は加速疲労開始時のそれに比例し、その比は側圧の大きさに依存する。
- 3) 定常ひずみ状態においてすでに損失指数の増加現象が始まっており、破壊の進展の兆候はひずみ速度の変化よりもエネルギー損失量の変化において先に生じる。
- 4) 繰り返し載荷時の有効応力経路は側圧の大きさによって異なる傾向を示し、過圧密状態においては載荷中に間隙水圧の低下が進むため平均有効応力が上昇していき破壊に至るが、正規圧密状態付近では逆に平均有効応力は低下しながら破壊に至る。

参考文献

- 1) 足立、小川：堆積軟岩の力学特性と破壊基準、土木学会論文報告集、第295号、1980年3月
- 2) 赤井、足立、西：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、第282号、1979年2月
- 3) 足立、林：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、第305号、1981年1月
- 4) 西、岡本、江刺：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、第338号、1983年10月