

三軸圧縮状態の堆積軟岩の破壊と
エネルギー消散に関する考察FRACTURE AND ENERGY DISSIPATION OF SOFT SEDIMENTARY
ROCK IN TRIAXIAL COMPRESSION

赤井 浩一*・大西 有三**・八嶋 厚***

By Koichi AKAI, Yuzo OHNISHI and Atsushi YASHIMA

1. ま え が き

岩盤力学あるいは地盤工学上の解析に有限要素法を主体とした数値解析手法を用いることが一般的になってきた¹⁾。大容量・高速の電子計算機が広く使われるに従って、岩盤力学に関するあらゆる初期値・境界値問題も解決できるであろうと期待を抱くむきも少なくない。こうした中で、現在最も話題となり研究上の問題点となっているものは数値計算への入力データ、すなわち現実の岩盤のモデル化と岩盤を構成する材料の一般構成則の確立であろう。前者に関しては、岩盤工学におけるさまざまな調査・試験法を駆使して岩盤の正しいプロフィールを得るべく努力が続けられているが、十分満足すべき状況に達するまでには相当な年月が必要であると想像される。一方、後者の岩質材料の構成式に関する最近の研究成果には目を見はるものがある。特に室内における要素試験の結果をもとにして現象論的に要素の非線形挙動を弾性論、塑性論、その他を用いて説明しようとする方法は最近急激な進歩を遂げている^{2),3)}。

岩質材料の非線形挙動を解析するとき、降伏条件を主体とする弾塑性論などを用いないとする考えも提案されている。電子計算機の効率よい利用により難解な理論考察を行わなくても、実験で得た材料の挙動をそのままの形で構成式として計算に取り込んでいこうとする姿勢もこの考えを助けている。この端緒は双曲線モデル⁴⁾によって開かれ、Endochronic 理論^{5),6)}もこの流れに沿っていると考えられる。このような研究が進められる背景には、室内実験結果の弾・塑性論的解釈が岩質材料の本質をとらえているのだろうかという危惧があると思われる。すなわち、巨視的・現象論的アプローチでは、材料

の試験から得られる荷重と変位をそれぞれの系の断面積と長さで割った見掛けの平均応力と平均ひずみを用いて、要素内の応力分布・ひずみ分布は一様と仮定しながら考察を進めている。しかし、最近では AE⁷⁾、フラクトグラフィ⁸⁾などにより確かめられているように微視的にみれば試料内部では、あらゆる応力レベルでクラックが発生しており、供試体内にせん断面が形成されるような進行性の破壊においては、せん断に伴う不安定クラックの発生や体積変化(特にダイレイタンス)はせん断面の近傍の狭い範囲にしか生じていない。このことは、元来要素試験として考えられていた室内三軸試験が一つのモデル試験としての形態を備えていると示さなければならないことを示している。

微視的にみたクラックの発生は載荷応力、応力腐食(stress-corrosion)⁹⁾、環境¹⁰⁾、繰り返し載荷などによるが、本論文では従来からの巨視的な応力とひずみという考えに対して、巨視的なエネルギーの変換過程としての堆積軟岩のせん断中の変形さらには破壊過程を考察し、従来の三軸圧縮試験を再検討する。

堆積軟岩が破壊に至る過程において、供試体への外力仕事はポテンシャルエネルギー(内部エネルギー)として供試体内に蓄積される回復性の弾性ひずみエネルギーと、内部のクラックの進展や液相内の粘性摩擦などに消費される非回復性の損失エネルギーに変換されると考えられる。したがって、三軸圧縮試験において軟岩供試体に加えられた外力仕事の中でどのように分配、消費されているかを検討することによって、エネルギーの変換に注目した破壊過程の考察が可能となる¹¹⁾⁻¹⁴⁾。そこで本論文では、まず三軸供試体の圧縮過程におけるひずみの不均質性を実験的に証明し、次に載荷除荷を繰り返した実験による荷重-変位曲線からエネルギーを計算し、供試体のせん断破壊の過程を考察する。

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

** 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室

*** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

2. 試験概要

堆積軟岩試料は、通称船生石とよばれる凝灰岩で、 $G_s = 2.649$, $e = 0.409$, $\rho_d = 1.873 \text{ g/cm}^3$ である。これを高さ 10 cm, 直径 5 cm の円柱形に成形したものを供試体とし、サクシオンにより強制的に飽和させた状態で試験に用いた。一軸圧縮強度は約 120 kgf/cm^2 (11760 kPa) である。また、以下に述べる試験はすべて圧密非排水試験である。

試験中に観測されたデータは、X-Y レコーダーへ書き込むか、あるいは A/D 変換器を介してマイクロコンピュータシステム内のディスク上に記憶させる。記憶されたデータは、試験後初期条件の値をインプットすることにより必要に応じてラインプリンター、X-Y プロッターにそれぞれ結果を書き出すことが可能である。

今回行った各試験の手順は以下に述べるとおりである。

第1に、せん断中の側方変位を観察するために、供試体中央部にひずみゲージを張り付けた3本のキャンティレバーを設置した。その様子を図-1に示す。圧密応力 $10, 70 \text{ kgf/cm}^2$ ($980, 6860 \text{ kPa}$) のもと、ひずみ速度 $0.12\%/min$ でせん断した。過去の一連の実験もこの程度のひずみ速度を基準的に採用しており、他の速度での結果との比較は本論文の主旨と異なるので割愛する。

第2に、供試体各部のひずみ変化のばらつきを観察するために、供試体にひずみゲージを縦方向と半径方向についてそれぞれ4枚ずつ張り付けた¹⁹⁾。せん断終了後に観測されたすべり面の位置とともに図-2にその様子を示す。この場合の圧密応力は 10 kgf/cm^2 (980 kPa) である。

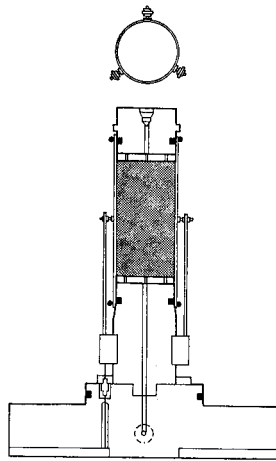
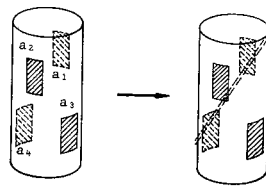
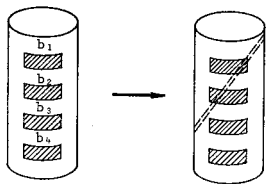


図-1 供試体とキャンティレバー設置



(a) 鉛直



(b) 水平

図-2 ひずみゲージの張り付け

キャンティレバーからのリード線およびひずみゲージからのリード線は、三軸セル底部に設けた特別なパッキングを通じてセル外へ引き出した。

第3に、せん断終了後の供試体各部(せん断面付近、外周端部分および全体)の含水比分布を観察するために、供試体を三軸セルから取り外した後迅速に計量瓶に供試体各部の試料を少量ずつ入れ含水比の測定を行った。

最後に、圧密応力 $10 \sim 180 \text{ kgf/cm}^2$ ($980 \sim 17640 \text{ kPa}$) の各供試体に対して、エネルギー的考察を行うための試験を行った。本研究では図-3に示すような3種類の荷重方法を用いた。通常の三

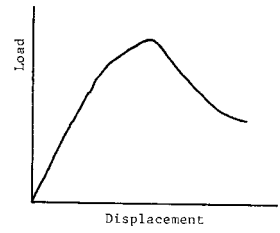
軸圧縮試験が図-3(a)に示すような単調荷重方法に従うのに対して、任意の変位におけるエネルギーの分配を計算するためには、図-3(b)に示すような載除荷重方法(すなわち漸増繰り返し荷重方法)が用いられる。消散エネルギーは、おもに内部クラック形成の際の表面エネルギーの解放の形で定量化されるが、ほかに粘性的な摩擦によって消費されるエネルギーがあると考えられる。そこで、これらをそれぞれ分離して非弾性的な挙動のメカニズムを考察するために、図-3(c)に示すような荷重振幅値一定繰り返し荷重方法を用いる。上記の3種類の荷重方法についてもそのひずみ速度はすべて $0.12\%/min$ である。

3. 試験結果と考察

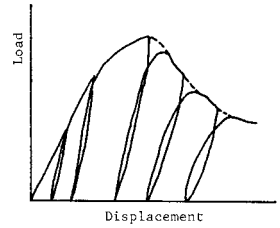
(1) 微視的にみた構造変化

a) 側方変位

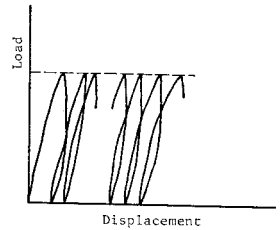
図-4にキャンティレバーの3本の軸をそれぞれ 120° ずつずらした座標で書き、圧密終了点(Start), 最大強度点(Peak), 残留強度点(Residual)の3段階の変位をそれぞれの軸にプロットした。圧密応力 $10, 70 \text{ kgf/cm}^2$



(a) 単調荷重



(b) 載除荷重



(c) 繰り返し荷重

図-3 荷重方法

(980, 6860 kPa) の両者とも最大強度点においては、それぞれの方向にほぼ同じ量だけ変位しており、この段階まではまだ明瞭なせん断面が現われず、ほぼ等方的に側方に膨れていることがわかる。しかし、その後残留強度点へ至るまでの軟化過程においてはせん断面の形成により著しいせん断すべりが引き起こされ、圧密応力 10 kgf/cm² (980 kPa) においては 2 の方向へ、圧密応力 70 kgf/cm² (6860 kPa) においては 1 の方向へそれぞれすべりを起こしている。

cm² (6860 kPa) においては 1 の方向へそれぞれすべりを起こしている。

b) ひずみ変化

図-2 に示したように張り付けたひずみゲージについて図-5 には縦ひずみの局所的なばらつきを、図-6 には側方ひずみの局所的なばらつきを、それぞれ供試体の軸変位から計算した平均軸ひずみ ϵ_1 を横軸にとってプロットした (ϵ_1 というひずみは供試体の変形が均一とした平均のひずみであり、ひずみゲージで測定する局所的なひずみと本来異なる。また、端面の影響や圧縮中の供試体の側方膨張のため、ゲージの読みは平均ひずみより一般に小さくなる)。図-5 より ϵ_1 が 1% までは局所的なひずみのばらつきはみられず供試体全体が一樣に変形している(図-4 の結果と対応している)。しかし、その後せん断面の形成とともにひずみ変化に局所性が現われる。図-2 に示すように ϵ_{a3} 以外のひずみゲージはせん断面と交わっており、最大強度点以後もせん断の進行とともにひずみは伸びている。一方 ϵ_{a3} のひずみゲージはせん断面の形成とともにひずみが回復しており、弾性的な除荷挙動を示している。図-6 の側方ひずみについても同様なことがいえる。つまり ϵ_{r3} はせん断面の形成とともにひずみが回復している。通常要素試験の結果整理の際に用いられる平均ひずみ ϵ_1 は、図-5 における ϵ_{a1} , ϵ_{a4} に代表されるものであり、せん断面のすべり変位を含んだ形の巨視的平均ひずみであり、局所的なひずみ変化はまったく無視している。したがって、平均ひずみは要素試験における真の挙動を表わしているものではない。このような結果をみる限りにおいては、要素試験はせん断面の形成過程を把握するための 1 つのモデルと考えた方がよいかもかもしれない。

c) 含水比(間隙水圧)分布

せん断終了後、せん断面付近(圧密応力が高くなり、明確なせん断面が見出せない場合には、供試体内部の任意点で代表させた)と、供試体外周端部分および供試体全体で含水比を測定しそれぞれの部分の平均値を各圧密

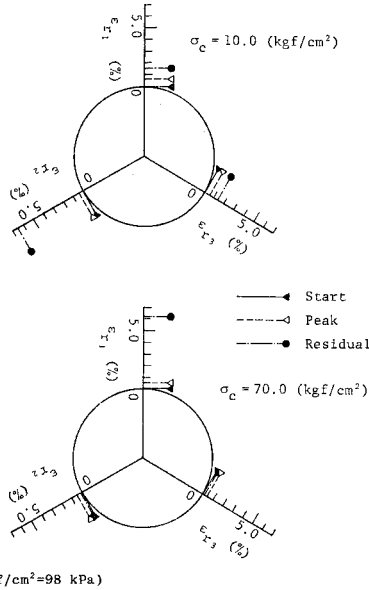


図-4 せん断中の側方変位

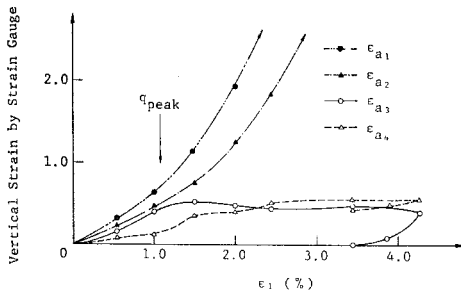


図-5 縦ひずみの局所の変動

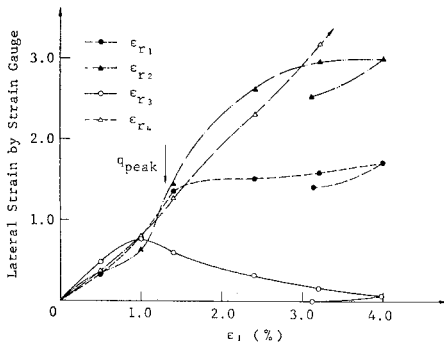


図-6 側方ひずみの局所の変動

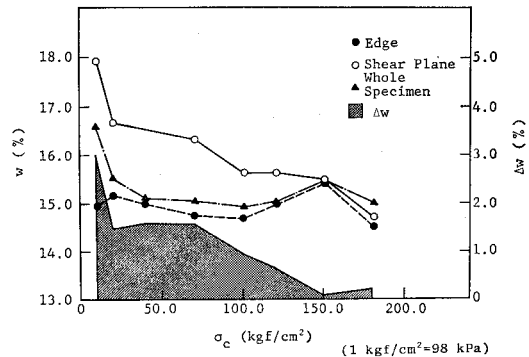


図-7 せん断終了後の供試体内の含水比分布

応力ごとに図-7に表示した。同時に図には、せん断面付近の平均含水比と外周端部分のそれとの差 Δw をスクリーン・トーンで示している。

非排水条件下においては、供試体内の全含水量は常に一定に保たれる。しかし、局所的にその分布をみれば図-7からも明らかなように、せん断面付近の含水比は供試体外周端部分のそれよりかなり高くなっており、この傾向は圧密応力の小さいほど（直接的には残留状態での平均主応力が小さいほど）大きくなっている。一方、圧密応力が大きくなると含水比分布はほぼ一様となる。これは、破壊形態が1つの卓越したせん断面に支配される上述の平均主応力小のものと異なり、せん断面の現われないタル型破壊であり、通常の要素試験の仮定である平均応力・平均ひずみの概念があてはまることを意味する。

さて、図-7における含水比分布のばらつきは供試体内部における間隙水圧分布の不均一性を表わすものである。せん断面付近での吸水（含水比の上昇）は正のダイレイタンスが生じていることを意味し、したがって有効応力の概念によればそれに伴う負の間隙水圧の発生が平均主応力を増加させ、せん断面付近での抵抗力を増大させる。つまり、最大強度点から残留状態への軟化過程

においては、供試体外周端部分からせん断面付近へ向かう間隙水の流れは、せん断をそれ以上進行させまいとする方向に働く。このような正のダイレイタンスの発現によるせん断抵抗の増加は、ダイレイタンス硬化 (dilatant hardening) として知られているものである¹⁵⁾。

せん断に伴う正のダイレイタンスは、一面せん断や三軸圧縮試験時のせん断領域に沿って生ずる程度の小さいスケールのもから、地質的大スケールのせん断¹⁶⁾、すなわち断層作用やしゅう曲作用によっても生ずるものと考えられる（地震の前には、その付近の地盤が正のダイレイタンスを示すとされている^{17), 18)}。

以上のように、せん断中における供試体内のひずみおよび間隙水圧分布に注目すると、従来要素試験において考えてきた平均応力・平均ひずみの概念は、その試料に対する応力レベルによりその妥当性が大きく左右されることが判明した。つまり、応力レベルの小さい範囲ではせん断面が卓越し、応力・ひずみともその分布にはかなりの局所的なばらつきがみられるようになる。

(2) エネルギーによる考察

(1)で述べたように応力レベルの大小によって、要素試験における平均応力・平均ひずみの概念の妥当性が問題となる。そこで本節では三軸圧縮試験で得られた荷重と変位とを直接用いて各変位におけるエネルギー量を計算し、軟岩の破壊過程におけるエネルギー変換について考察を行う。

図-8には、圧密応力 10, 40, 100, 180 kgf/cm² (980, 3920, 9800, 17640 kPa) の単調載荷による結果と載除載荷による結果を縦軸に軸差荷重、横軸に軸変位をとって比較している。どの場合をみても最大強度点までの変位に関しては両者の結果はほぼ一致している。曲線の立ち上がりは緩やかになっているのは端面の不整合などの理由によるものと

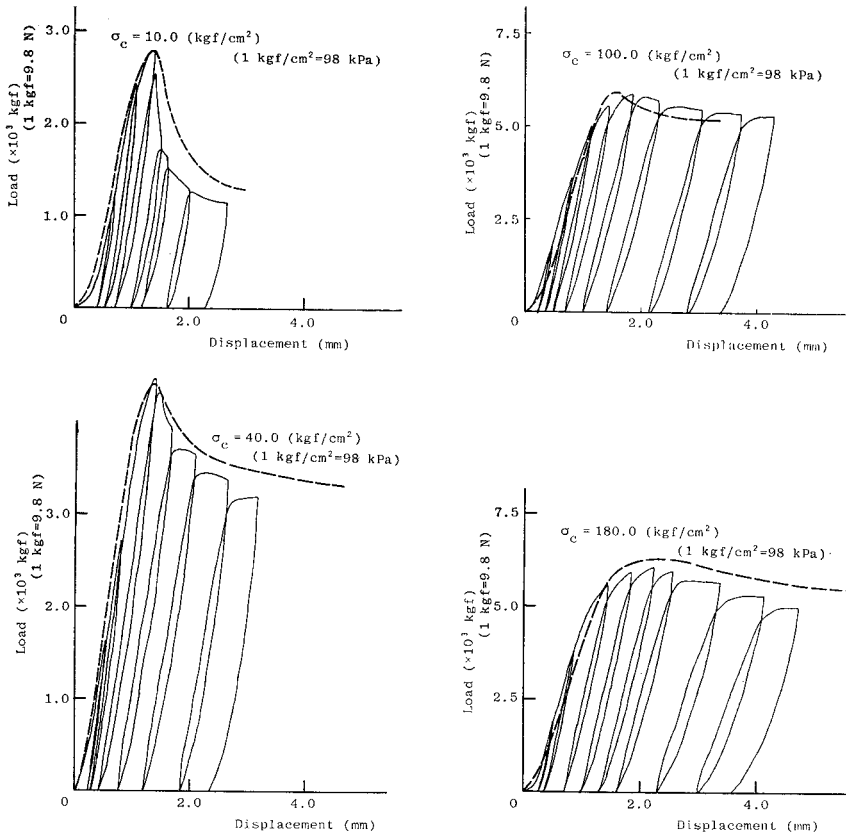


図-8 単調載荷（点線）と載除載荷（実線）による結果の比較

考えられる。一方、最大強度点から残留状態に至るまでの軟化領域においては、両者の結果が一致するとは言い難く、載除載荷による結果の方が単調載荷による結果よりも強度が小さくなる傾向にある。これは、軟化過程における載荷除荷が硬化過程における載荷除荷とは異なり、供試体の内部クラックの進展を助長し破壊過程をかなり加速させるものと考えられる（ただし $\sigma_c = 100 \text{ kgf/cm}^2$ (9800 kPa) の場合は例外と思われる）。

図-8 から判断する限りにおいては両者の結果の完全な一致はみられなかったが、試料間のばらつきも含めてこの差を許容できる範囲内のものとして以下の議論を進めていくことにする。図-8 の載除載荷による荷重変位図より、除荷開始点の軸変位においてエネルギーを計算する。エネルギー定量化の方法は次のように行う。図-9 に示すように、点Aにおいて除荷した場合、载荷曲線の点Aまでに外荷重によって加えられた供試体への全エネルギー W_T は、線分 OAC で

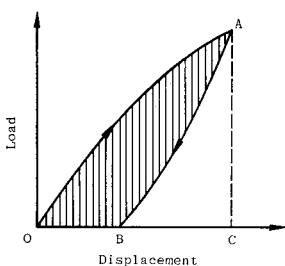


図-9 エネルギーの定量化

囲まれる面積で与えられ、変換された弾性エネルギー W_E (BAC の面積) と非弾性損失エネルギー W_I (OABO の面積) の和となる。このように定量化したエネルギーを縦軸に、最大強度点における軸変位 (D_p) で正規化した軸変位 D/D_p を横軸にしてプロットした結果が図-10 に示すエネルギー変位曲線である。図中 W_P は最大強度点までに外荷重によって供試体に加えられた全エネルギーを示し、他のエネルギー成分はすべてこの W_P で正規化されている。図-10 に示す結果より以下のような知見が得られる。

- i) 最大強度点 ($D/D_p=1$) で、供試体に蓄えられた弾性エネルギーは最大値をとるとみなすことができる。すなわち、応力-ひずみ曲線上の最大強度点は、供試体に蓄えられる弾性エネルギーが増加から減少へ向かう変曲点として特徴づけられる。外荷重の作用によって供試体内の組織破壊が進行し、供試体に蓄えられる弾性エネルギーがもはや増加し得なくなった点が、その供試体の巨視的な最大強度点であると考えられる。
- ii) 非弾性エネルギーはせん断のごく初期から存在しており、純粋な弾性挙動の領域はほとんど存在していない。
- iii) 最大強度点以後での弾性エネルギーの減少は圧密応力が小さいほどその割合

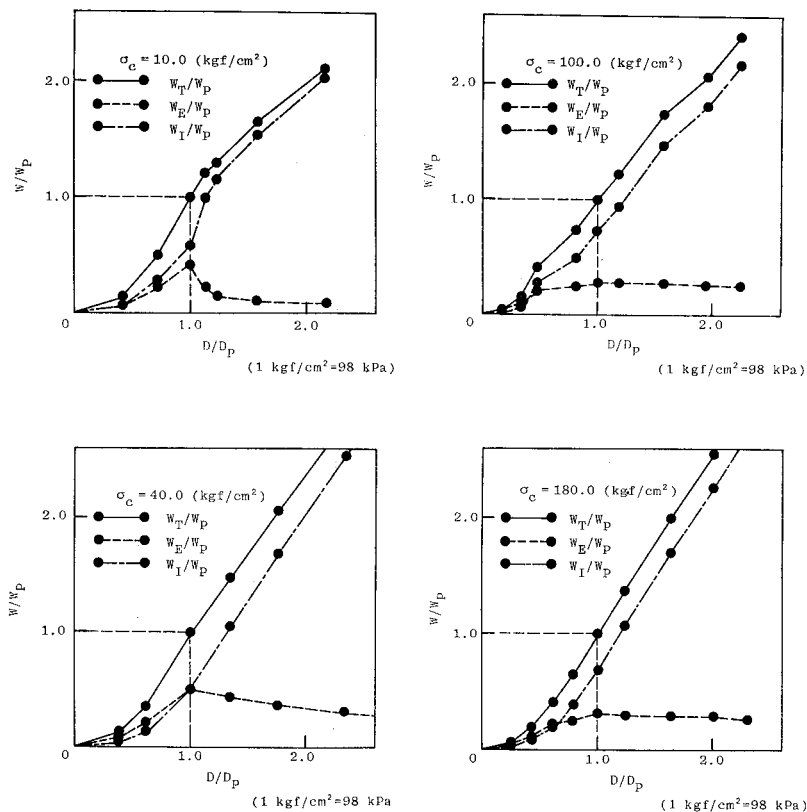


図-10 エネルギー変位曲線

が大い。これは、明確なせん断面が形成されるような破壊形態（圧密応力が小さい範囲で現われる）では、外荷重の作用による仕事の大部分はせん断面の形成、すなわち表面エネルギーとして消費されることを示す。

iv) 変形がさらに進行すると弾性エネルギーは零ではないある値に収束する傾向を示す。これは、せん断面以外の部分が残留強度状態において弾性的に変形していることを示すものである。つまり、最大強度点以後せん断面以外の部分は除荷されていることになる。これは、ひずみゲージによるひずみ変化の局所的なばらつきという測定結果ともよく合致する。

v) Griffith の亀裂伝播の規準によれば、規準に至った時点で破壊が起こるので最大

強度点以後の弾性エネルギーの考察をすることはできない。したがって、堆積軟岩のような多孔質材料においては、この規準の示す概念は破壊を取り扱う場合の出発点としては有効であるが、圧縮変形・破壊過程の説明に直接適用することは困難である。

次に除荷-再載荷の1回のサイクル中に消費される非弾性エネルギーについて、圧密応力 10, 40 kgf/cm² (980, 3920 kPa) の2つの試験を例にとって考察する。非弾性エネルギー量を整理する場合に、図-11 に示すような2つの変位量を考える。Dは除荷を開始した点までの全変位を表わし、D' は1回のサイクルにおける変位振幅

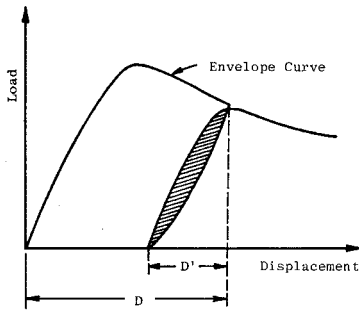


図-11 変位範囲の定義

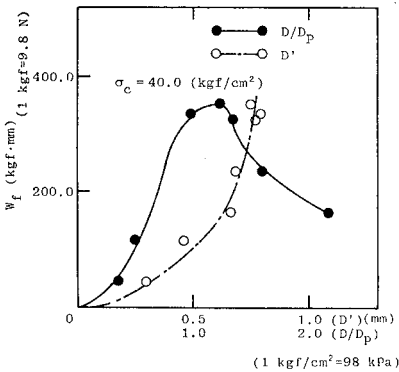
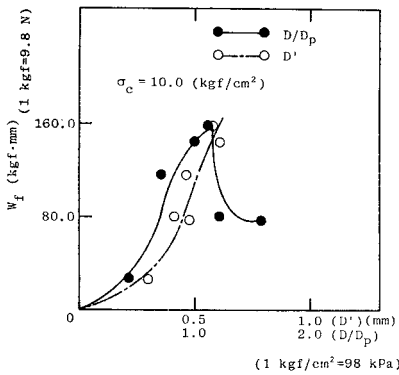


図-12 除荷-再載荷の1サイクル中に消散するエネルギー量

の大きさを表わす。図-12 に除荷-再載荷の1サイクル中に消散するエネルギー量 W_f を D' および D/D_p で整理した結果を示す。

サイクルによって消散するエネルギー量 W_f は、最大強度点までは増加しその後減少していくことがわかる。一方、サイクルにおける変位振幅 D' で整理した非弾性エネルギー量は、その変位振幅の増加とともに単調増加しており、この傾向は最大強度点以前、以後のどちらにおいても同じである。したがって、1回のサイクルでの減衰 (damping) により消散するエネルギーは損傷 (damage) には無関係であり、供試体における損傷の状態が著しくかけ離れているにもかかわらず、最大強度点以前であろうが以後であろうが D' さえ与えておけば減衰によるエネルギーの消費量は等しいことがわかる。

クリープ試験に準ずるものとして繰り返し疲労試験 (Cyclic Fatigue Test) がありよく実施されているが、このときの減衰によるエネルギーの消散も D' に依存しているわけであるから、 D' 対エネルギーの消散 (ひずみ速度など時間的効果を加味したもの) の関係が正確に把握できれば繰り返し疲労試験の破壊までのメカニズムを知る上で大きな手助けとなることはいうまでもない。

図-8 を別の観点からみるために、それぞれの圧密応力における載除載荷曲線を用い、再載荷時の立ち上がり勾配からせん断係数 G を測定した。これを初期せん断弾性定数 G_0 で除して正規化し、横軸に D/D_p をとって整理しせん断の進行に伴うせん断係数の低下を考察した。その結果を 図-13 に示す。

図-13 より、どの圧密応力においてもせん断の進行に伴ってせん断係数が低下していくことがわかる。しかし、その低下の様子には2つの傾向がみられる。つまり、圧密応力が小さい場合には、最大強度点付近まではせん断係数の低下はみられず、軟化領域に至って初めて低下し始める。一方、圧密応力が大きい場合には、せん断初期の段階からせん断係数の低下がみられる。このことは、圧密応力が小さい場合には、最大強度点付近まで

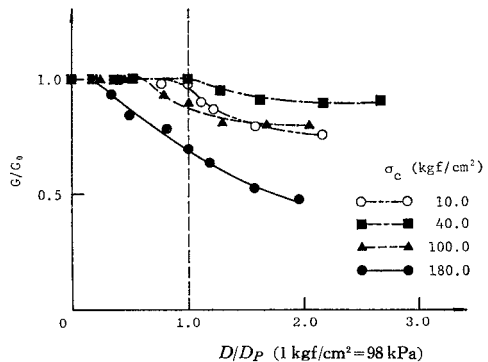


図-13 せん断の進行に伴うせん断係数の低下

はせん断係数の低下を引き起こすような供試体の内部構造の劣化はほとんど起きていないことを示す。一方、圧密応力が大きい場合には、せん断初期の段階から内部構造の劣化がかなり進むものと考えられる。

材料の応力-ひずみ関係を表わす構成式において、せん断係数 G は最も重要なパラメータの1つである。通常の弾塑性論を用いた理論においては、 G は一定と仮定されておりこの限りにおいては上記のような挙動は説明できない。したがって、せん断係数の変化を支配する因子（筆者としては、平均有効主応力とダイレイタンスーが最も大きな因子であると考え）を見つけ出し、その変化の様子をモデル化することは重要な課題である。

以上の論議では全エネルギーを弾性エネルギー W_E と非弾性エネルギー W_I に分けて考えたが、これ以後非弾性エネルギーを構成粒子を引き離す仕事に使われるエネルギー W_{cra} と、構成粒子をすべらせる仕事に使われるエネルギー W_{fri} に分けて考える。 W_{cra} はおもに表面エネルギーに変換され、結果として内部ひびわれが形成され、 W_{fri} はおもに液相での粘性摩擦や固相のずれにおいて熱エネルギーに変換され、最終的には系外へ放出されると考えられる。

圧密応力 40 kgf/cm^2 (3920 kPa) の供試体を $q_r/q_p = 0.66$ (q_r : 繰り返し応力振幅, q_p : 最大強度) の条件下 10 回の繰り返しせん断試験を行った。その結果を図-14 に示す。繰り返しせん断における非弾性エネルギーは初回が最も大きく、2 回目以後は徐々に一定値に落ち着く。このことは、初回の荷重で内部ひびわれが進展し、2 回目以後の荷重によるひびわれの増加はほとんどないことを意味する。一定値に落ち着いた非弾性エネルギーの大部分は、液相内での粘性摩擦や固相内でのずれなどに使われ熱エネルギーに変換されたと仮定する。こうすると、初回の荷重除荷による非弾性エネルギー W_I は、ひびわれの進展に使われたエネルギー W_{cra} と液相での粘性摩擦などに使われたエネルギー W_{fri} とに分離

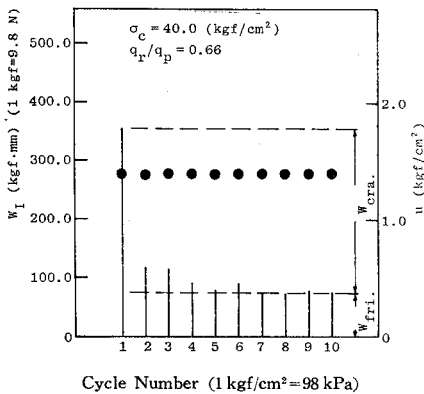


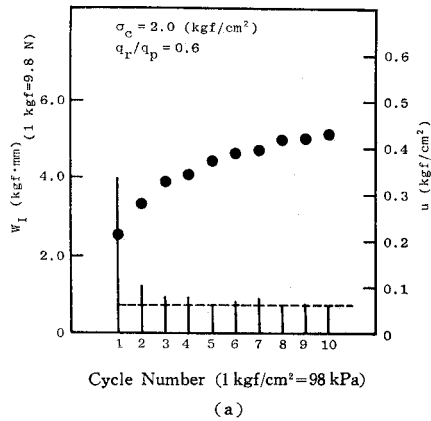
図-14 非弾性エネルギー (船生石)

することが可能である。各サイクルの除荷開始点の間隙水圧を●印で示したが、初回から最後のサイクルまでその値はほぼ一定である。これは、2 回目以後の荷重によって供試体内の構造はほとんど変化していない、ダイレイタンスーが新たに起こらないことを意味する。

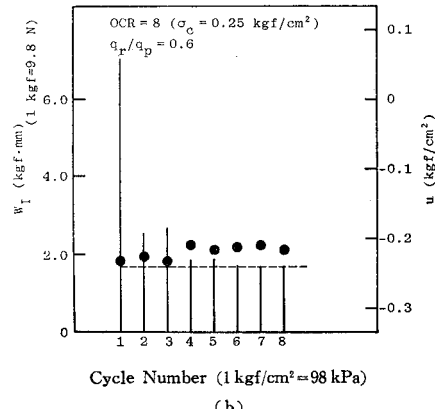
次に圧密応力の大小によって繰り返しせん断時の挙動がどのように異なっているかを考察する。深草粘土 ($G_s = 2.71$, $LL = 45.4\%$, $PL = 22.4\%$) を試料とし、正規圧密 (圧密応力 2.0 kgf/cm^2 (196 kPa)), 過圧密 (過圧密比 8, 圧密応力 0.25 kgf/cm^2 (24.5 kPa)) の2つの状態で $q_r/q_p = 0.6$ の条件下 10 回の繰り返しせん断を行ったときの結果を図-15 に示す。

非弾性エネルギーの減少傾向は船生石の結果とほぼ同様である。また正規圧密粘土と過圧密粘土の間に明らかな違いはみられない。

間隙水圧挙動に関して、過圧密粘土においては船生石の結果とほぼ同様で同じ考察が成り立つが、正規圧密粘土においては異なった挙動を示す。つまり、間隙水圧は一定ではなく繰り返し回数とともに増加しており、過圧密粘土と同じ応力振幅レベルにおいても内部構造の変化が順次進行していることがわかる。



(a)



(b)

図-15 非弾性エネルギー (深草粘土)

4. おわりに

堆積軟岩の三軸圧縮下における破壊過程を、まず微視的に観察し、次に平均応力・平均ひずみをそのまま利用する従来の考えから離れてエネルギー変換過程として検討した。その結果得られた知見をまとめると次のとおりである。

(1) 供試体の局所的なひずみ変化を観察した結果、せん断面の形成とともに著しい局所性の現われることがわかった。つまり、通常要素試験の結果整理の際に用いる平均ひずみは、せん断面付近のひずみ(相対的なすべり)を含んだもので、せん断面近傍以外の部分は軟化過程では単に除荷過程となっておりひずみが回復している。

(2) 供試体の局所的な含水比分布を観察した結果、せん断面形成過程においては、間隙水は供試体外周端部分からせん断面付近に向かって移動しており、供試体全体でみた含水量は一定値を保つものの、局所的にみれば真の意味での非排水条件は成り立っていない。

(3) (1)、(2)の結論からわかるように、応力レベルの大小によって要素試験における平均応力・平均ひずみの概念の妥当性が問題となる。

(4) 堆積軟岩の三軸圧縮下での破壊過程は、供試体内のエネルギーの変換過程を観察することにより把握できる。本研究で用いた圧密応力 180 kgf/cm^2 (17640 kPa) 以下の応力レベルでは、最大強度点で供試体に蓄えられた弾性エネルギーは最大値をとり、それ以後の軟化過程では零でないある値に減少収束していく。またこの減少傾向は圧密応力が小さいほど顕著である。さらに非弾性エネルギーはせん断のごく初期から存在しており、純粋な弾性挙動の領域はほとんど存在していない。

(5) 減衰によるエネルギーの消散量は、応力状態が最大強度点以前であろうが以後であろうが関係なく、そのサイクルにおける変位振幅 D' の大きさによって一意的に定まる。

(6) せん断の進行に伴って、再載荷時の立ち上がり勾配は徐々に減少していくが、この傾向は応力レベルによってかなり異なる。すなわち、圧密応力が小さい場合には、最大強度点付近まではせん断係数の低下はみられず、軟化領域に至って初めて低下し始める。一方、圧密応力が大きい場合には、せん断初期の段階からせん断係数の低下がみられる。

(7) 応力振幅一定繰り返しせん断における非弾性エネルギーは初回が最も大きく、2回目以後は徐々に一定値に落ち着く。このことは、初回の載荷で内部ひびわれ(クラック)が進展し、2回目以後の載荷によるひびわれの増加はほとんどみられないことを意味する。

最後に、本研究における実験を遂行するにあたり京都大学大学院生 李 徳河、川西正夫の両君に多大の助力を受けたことを記し、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 川本眺万・林 正夫：地盤工学における有限要素解析，培風館，1978。
- 2) Prevost, J.H. : Soil Stress-Strain-Strength Models Based on Plasticity Theory, Ph.D. Thesis, Stanford Univ., 1974.
- 3) Dragon, A. and M. Nroz : A Model for Plastic Creep of Rock-Like Materials Accounting for the Kinetics of Fracture, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, 1979.
- 4) Duncan, J.M. and C.Y. Chang : Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, J. SM & F Division, ASCE, 96, SM 5, 1970.
- 5) Valanis, K.C. : A Theory of Viscoplasticity without a Yield Surface, Achieves of Mechanics, Vol. 23, No. 4, 1971.
- 6) Bažant, Z.P. and C.L. Shieh : Endochronic Model for Nonlinear Triaxial Behavior of Concrete, Nuclear Engineering and Design, 47, 1978.
- 7) Byerlee, J.D. and D. Lockner : Acoustic Emission during Fluid Injection into Rock, Proc. 1st Conf. AE, Trans. Tech. Pub., 1977.
- 8) たとえば、小寺沢良一：講座 フラクトグラフィ(破面解析)，材料，Vol. 23, No. 238, 1974.
- 9) Anderson, O.L. and P.C. Grew : Stress Corrosion Theory of Crack Propagation with Applications to Geophysics, Review of Geophysics and Space Physics, Vol. 15, No. 1, 1977.
- 10) たとえば、山川宏二：討論「応力腐食割れと腐食疲労」，材料，Vol. 23, No. 254, 1974.
- 11) Spooner, D.C. and J.W. Dougill : A Quantitative Assessment of Damage Sustained in Concrete During Compressive Loading, Mag. Conc. Res., Vol. 27, No. 92, Sept., 1975.
- 12) Spooner, D.C., C.D. Romeroy and J.W. Dougill : Damage and Energy Dissipation in Cement Pastes in Compression, Mag. Conc. Res., Vol. 28, No. 94, March, 1976.
- 13) 岡田 清・小柳 治・六郷恵哲：含水量の異なるコンクリートの圧縮過程に関するエネルギー的考察，土木学会論文報告集，No. 248, 1976.
- 14) 岡田 清・小柳 治・六郷恵哲：コンクリートの曲げ引張破壊過程に関するエネルギー的考察，土木学会論文報告集，No. 285, 1979.
- 15) Rice, J.R. : On the Stability of Dilatant Hardening for Saturated Rock Masses, J. Geophysical Res., Vol. 80, No. 11, 1975.
- 16) 仲野良紀：軟岩をめぐる諸問題一泥岩の力学特性，土と基礎，Vol. 28, No. 7, 1980.
- 17) Rice, J.R. and D.A. Simons : The Stabilization of Spreading Shear Faults by Coupled Deformation-Diffusion Effects in Fluid-Infiltrated Porous Materials, J. Geophysical Res., Vol. 81, No. 29, 1976.
- 18) Scholz, C.H. : Experimental Study of the Fracturing Process in Brittle Rock, J. Geophysical Res., Vol. 73, No. 4, 1968.
- 19) 大西有三・李 徳河・坂本隆洋：横ひずみ制御による多段階試験法について，第15回土質工学研究発表会講演概要集，pp. 1421~1424, 1980. (1981.5.20・受付)