



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	第三系堆積岩の力学的特性に関する研究（第2報）：第三系堆積岩の破壊機構
Author(s)	中村，章；石島，洋二
Citation	北海道大學工學部研究報告，140，51-62
Issue Date	1988-05-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42105
Type	departmental bulletin paper
File Information	140_51-62.pdf



第三系堆積岩の力学的特性に関する研究(第 2 報)
—第三系堆積岩の破壊機構—

中村 章 石島 洋二

(昭和 62 年 12 月 26 日受理)

**Studies of the Mechanical Characteristics of Tertiary
Sedimentary Rocks (Part II)
—Fracture Mechanism of Tertiary Sedimentary Rocks—**

Akira NAKAMURA and Yoji ISHIJIMA

(Received December 26, 1987)

Abstract

Laboratory experiments using the triaxial loading apparatus for the Tertiary sedimentary rocks have shown that:

1. Bilinearity of the fracture criteria, that is, the criteria shown as a bent line in the σ_1 - σ_3 diagram is valid irrespective of the applied stress path.
2. Volume expansion (Dilatation) occurs under relatively low confining pressure when the applied differential stress is above a critical value. This phenomenon indicates the occurrence of fracturing of the open micro-cracks existing in the rock.

Interpretation of the bilinear fracture criteria (BFC) were tried here in terms of micro-cracks behavior and the following were deduced.

1. Both the open and closed cracks exist when the confining pressure is lower than the overburden value. In contrast, most of the cracks are in a closed condition in relatively high confining pressure.
2. Rock fracture is preceded by the failure of cracks whose orientations are within a specified region.
3. Bilinearity of the fracture criteria is attributed to the difference of the failure conditions between open and closed cracks.

1. 緒 言

本論文の第 1 報¹⁾では、52 種に上る第三系堆積岩の強度試験結果を総括し、これらの岩石に対して、かぶり圧下で屈折する「双線形破壊条件」(Bilinear Fracture Criteria, BFC)があてはまることを指摘した。本文ではこの破壊条件が、どのような破壊機構に依拠しているかについての検討結果を述べることにしたい。

このためにまず、補足的な 2 種の実験を行なった。1 つは BFC が載荷時における供試体の端面拘束条件や負荷径路に依存しないことを確認するためのもので、他の 1 つは負荷開始時から破壊に到る間の岩石の体積歪挙動に関するものである。岩石内部の空隙の挙動が岩石の破壊機構に決

定的な影響を及ぼすことは良く知られているが、体積歪挙動にはそれが端的に現れる。したがって、破壊機構を明らかにする上で有力な手掛かりを得ることができるわけである。

次に、岩石をランダムな方位を持ち、かつ互いに独立した多数の微小クラックから成る媒質としてモデル化し、これを用いて破壊機構に関する理論的な検討を行なった。クラックはそれに作用する静水圧の大きさによって開口・閉鎖状態が決まり、これがかぶり圧よりも大きければほとんどのクラックは閉じ、小さければ開口、閉鎖の両方の状態を持つクラックが混在する。このクラック状態と個々のクラックの破壊、ならびに巨視的な破壊強度特性との関連性に力点を置いて解析を行なった。

2. 実験結果

2.1 端面拘束の影響

圧縮試験においてはどうしても供試体と載荷板との間に生じる端面拘束の影響が避けられず、それが強度特性にも影響を及ぼすと考えられる。特に、低封圧下ではこの影響が強いので、BFCもこれによって見掛け上生じたのではないかという懸念がもたれる。そこで、これを確認するための実験を行なった。

供試体両端に、供試体直径(D)と同径で厚さがD/2程度のスチール製エンドピースを介在させると、端面拘束はかなり緩和されることがわかっている²⁾。このため第1報で述べた実験に際して

はエンドピースを使用した。ところで、dog-bone型に整形した供試体を用い¹⁾、供試体中央部の細い領域で破壊が起こるようにすると、端面拘束の影響はほとんど無視することができる。そこでこれを用いた実験を行なってみた。1図は秋吉大理石(Q-lime-1)の結果を示したものである。図から明らかなように、dog-bone型供試体と標準供試体では結果に差異がなく、従って、BFCは端面拘束によってもたらされたものではないといえるであろう。

2.2 強度特性に及ぼす負荷径路の影響

封圧下の圧縮試験では、供試体はまず、静水圧下におかれ、次に一軸圧縮応力が重畳される。この場合常に、 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (封圧)の主応力関係が成立している。封圧は、その後の破壊に至るまでの軸圧(差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$)増加の間一定に保たれる(標準径路)。第1報に総括した実験結果の大半はこの標準径路で得られたものである。従って、BFCが特定の負荷径路でのみもたらされる強度特性かどうかの検討が必要であろう。本研究では標準径路とは異なる負荷径路として、一旦供試体に静水圧を負荷し、これを除荷すると共に差応力を負荷する径路(Case 1)を採用し実験を行なった。2図は、幌内砂岩(A-ss-3)を例にとり標準径路とCase 1径路で得られた破壊強度と封圧の関係を示したものである。負荷を領域II(BFCの屈折後の封圧範囲)に属する設定封圧から開始しても、強度破壊時の封圧が領域I(BFCの屈折前の封圧範囲)に属していれば、その供試体は領域Iの破壊条件に従うことがわかる。後節では、BFCの解釈のため、しばしば封圧の影響と差応力の影響を独立に取り扱ったり、加算的に組み合わせて検討を進めるが、これが一般性を失わないと考えられるのは以上の

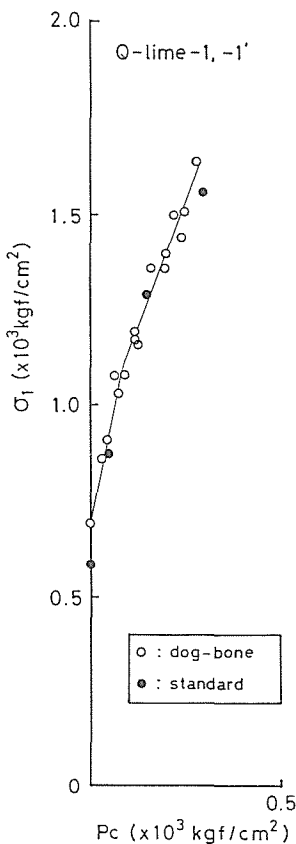


図1 破壊強度特性に及ぼす供試体形状の影響

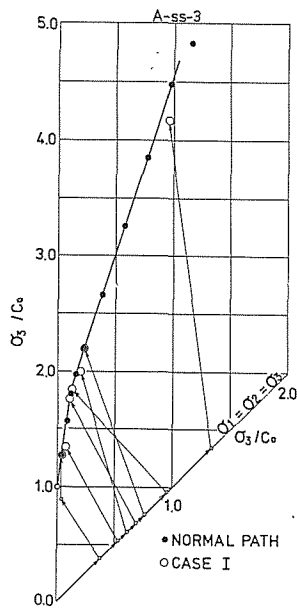


図2 破壊強度特性に及ぼす
 載荷径路の影響、標準
 径路および Case 1 の
 径路の比較

実験結果に基づいている。

2.3 载荷に伴う体積変形挙動

体積歪挙動を調べるために、
 静水圧と差応力の2つの応力条
 件下で実験を行なった。前者は
 静水圧縮試験、後者は封圧下の
 圧縮試験と呼ぶことにする。な
 お、体積歪(ϵ_v)は、軸歪(ϵ_a)およ
 び横歪(ϵ_l)をそれぞれ個別に計
 測し、 $\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_l$ (圧縮>0)のよ
 うに算定した。

(A) 静水圧一体積歪曲線

静水圧縮試験で得られた体積
 歪曲線の例を3図、4図に示す。
 これらの図を見ると、静水圧の
 初期の負荷段階では体積歪は著
 しく増大するが、ある段階から
 増加率は減少し始め、次いで一
 定になることがわかる。このよ
 うな変形特性が最も顕著である
 のは秋吉粗粒大理石(Q-lime-

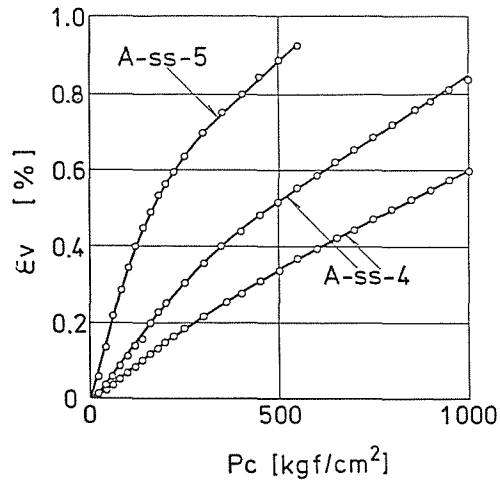


図3 静水圧～体積歪曲線(A-ss-5, A-ss-4)

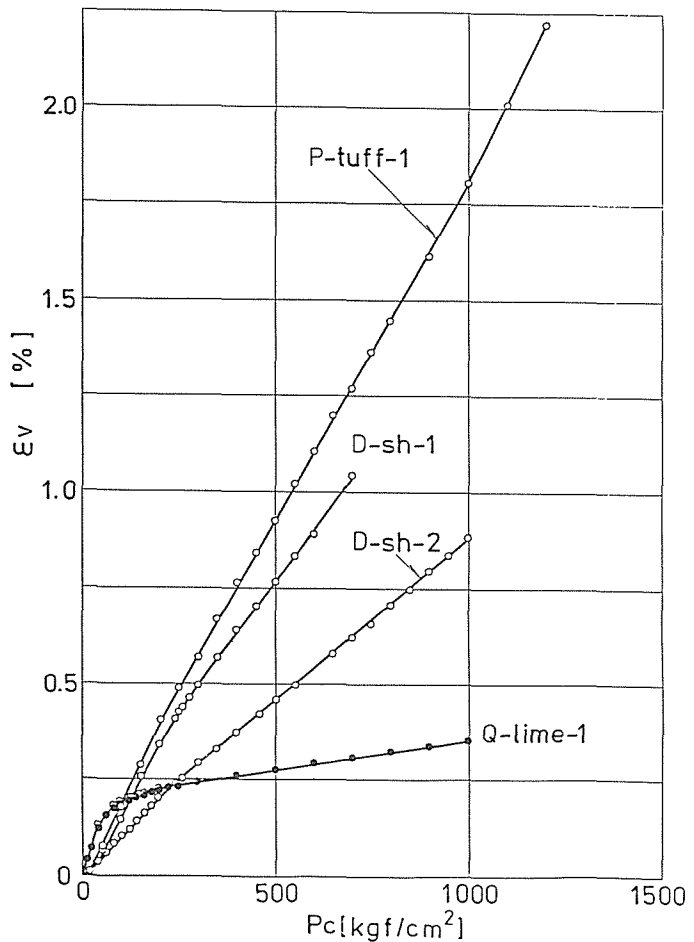


図4 静水圧～体積歪曲線(P-tuff-1, D-sh-1, 2, Q-lime-1)

1)であり、逆に荻野凝灰岩(P-tuff-1)では殆ど認められない。砂岩および頁岩はそれらの中間の変形挙動を示している。孔隙率はそれぞれ0.88%, 25.8%, 2.3~6.0%となっている。従って、今述べた変形挙動は孔隙率が小さいほど顕著に現れることがわかる。

これらの体積歪特性が強度特性とどのように関連しているかについて検討してみよう。5図に示すように、体積歪曲線の屈曲部分に注目し、その開始時と終了時の静水圧を、それぞれ C_c 、 C_e とする。これらの値を破壊限界線の屈折時の封圧 σ_3^* および、かぶり圧 γh (第1報の表2を参照)と共に、一括して整理したものが表1である。同表からわかるように、 σ_3^* 、 γh 、 C_c はほぼ同じ値

となっている。要するに、5図に示す体積歪の双線形性はBFC、つまり、強度の双線形性に対応するものであるといえよう。

表1 双線形強度特性と体積変形特性の比較

Rock Sample	σ_3^*	γh	C_c	C_e
A-ss-3	180	206	200	600
A-ss-4	246	211	200	600
A-ss-6	290	264	250	600
D-sh-2	189	189	200	250

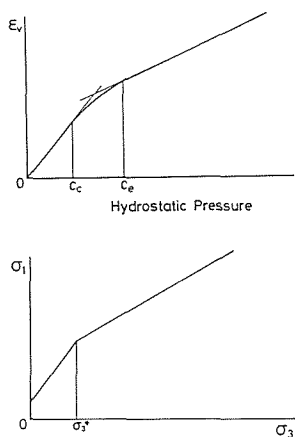


図5 静水圧～体積歪曲線と破壊限界線の対応関係

(B) 差応力～体積歪曲線

差応力～体積歪曲線の例を6図～9図に示す。これらの図の一部には、参考までに差応力～軸歪曲線も示した。図中の数値は封圧(kgf/cm²)を表わしている。体積歪曲線については、次のような特徴がみられる。

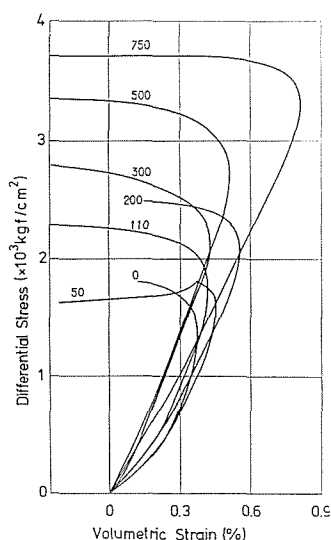


図6 差応力～体積歪曲線(A-ss-4)

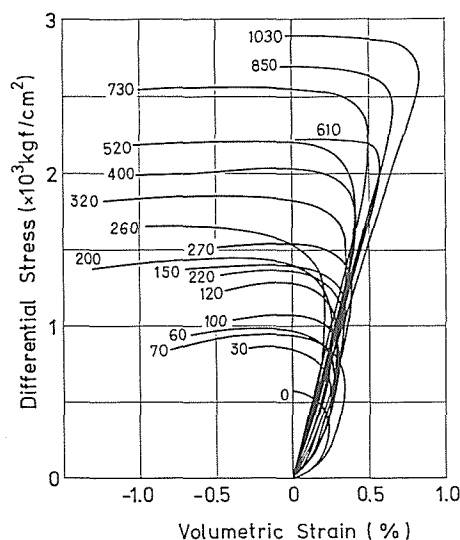


図7 差応力～体積歪曲線(A-ss-5)

(i) 幌内砂岩(6図, 7図)

A-ss-5(7図)の封圧 610 kgf/cm^2 以上の結果を除けば、他は殆どが差応力～軸歪曲線で脆性挙動を示したものである(この封圧範囲は双線形強度特性の領域ⅠおよびⅡにまたがっている)。砂岩の体積歪曲線は一般に、差応力の増加と共に圧縮から膨張へ転じる。この現象はダイラタンシーと呼ばれるものであるが、ここでは体積歪曲線の反転性と呼ぶことにする。領域Ⅰでは比較的低い差応力レベルで反転性を示すが、著しい圧縮性も同時に示している。これに対し、領域Ⅱでは、広範囲な差応力下で圧縮性を示すが、体積歪曲線はほぼ直線となる。反転性は高い差応力レベルでしか見られない。

(ii) 荻野凝灰岩(8図)

封圧 60 kgf/cm^2 では脆性挙動を、封圧 520 kgf/cm^2 および 750 kgf/cm^2 では歪硬化を伴う延性挙動をそれぞれ示している。この点を考慮して体積歪曲線を見ると、脆性領域では領域Ⅱの砂岩と同様な反転性を示しているが、延性領域では広範囲な差応力下で著しい圧縮性を示し、上に凸の曲線状を呈している。封圧 520 kgf/cm^2 の場合、反転性は降伏強度にほぼ等しい差応力レベルでみられるが、封圧 750 kgf/cm^2 ではもはやみられなくなる。

(iii) 秋吉粗粒大理石(9図)

体積歪曲線は、歪効果を伴う延性挙動においても、領域Ⅱの砂岩と同様な反転性を示し、荻野凝灰岩とは対照的である。大理石と凝灰岩はそれぞれ、典型的な緻密な粒状構造と多孔性構造を呈しており、これが変形特性の差異となって現れているのであろう。

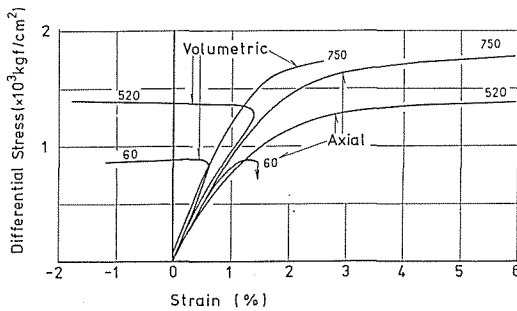


図8 差応力～体積歪・軸歪曲線(P-tuff-1)

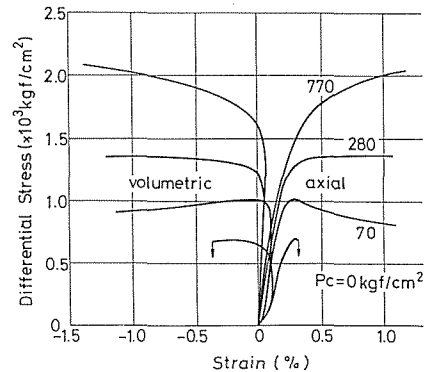


図9 差応力～体積歪・軸歪曲線(Q-lime-1)

2.4 BFCに関する実験結果のまとめ

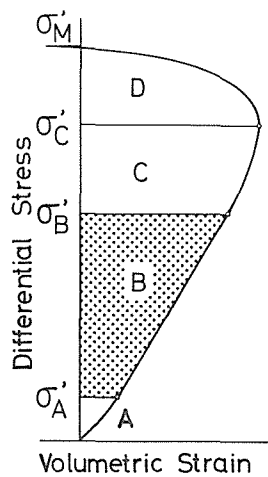
BFCに関する実験結果は第1報で報告した通りであるが¹⁾、後の解析の便宜上、これを Mohr-Coulomb 条件と比較し、その結果をまとめてみた。BFCは2つの直線 $\sigma_1 = A_{I,II} \sigma_3 + B_{I,II}$ で表わされるので、これらを Mohr-Coulomb 条件式と比較してみよう。内部摩擦係数 μ_c は $\mu_c = (A-1)/(2\sqrt{A})$ で、また、内部摩擦角 ϕ_c 、破断角 θ_c はそれぞれ、 $\phi_c = \tan^{-1} \mu_c$ 、 $\theta_c = (\pi/4) - (\phi_c/2)$ で与えられる。供試岩石についてこれらの定数を求め、領域ⅠとⅡに分けて整理した結果を表2に示す。なお、この表には BFC に対する Mohr-Coulomb 条件式の適合度を評価する1つの方法として、誤差率 δ も記載した。 δ は、 θ を破断角の実測値として、 $\delta = \{(|\theta - \theta_c|)/\theta\} \times 100$ で定義したものである。砂岩類は概して適合性が良く、また、全般に領域Ⅰよりも領域Ⅱの方が適合度が高い。

表 2 双線形破壊限界線に対する Mohr - Coulomb 条件の適用性(1)

Sample	Region I					Region II				
	μ_c	ϕ_c (°)	θ_c (°)	θ (°)	δ (%)	μ_c	ϕ_c (°)	θ_c (°)	θ (°)	δ (%)
A-ss-3	1.09	48	21	22	4.5	0.57	30	30	27	11.1
-4	0.86	41	35	23	52.1	0.57	30	30	29	3.4
-5	0.84	40	25	22	13.6	0.56	29	31	39	20.5
-6	0.98	44	23	25	8.0	0.67	34	28	28	0.0
-8	0.85	40	25	25	0.0	---	---	---	---	---
-10	0.80	39	26	27	3.7	0.73	36	27	31	12.9
-11	0.86	41	35	29	20.7	0.88	41	25	35	24.2
-12	0.76	37	27	32	15.6	0.54	28	31	35	11.4
-13	0.89	42	24	19	26.3	0.92	45	24	22	9.1
-15	0.84	40	25	28	10.7	0.48	26	32	30	6.7
-17	1.23	51	20	21	4.8	0.59	31	30	30	0.0
-18	1.01	45	23	29	20.7	---	---	---	33	---
-19	0.97	44	23	28	17.9	0.56	29	31	34	8.8
-20	0.87	41	25	27	7.4	0.54	28	31	34	8.8
-21	0.92	43	24	29	17.2	0.56	29	31	33	6.1
-22	1.08	47	22	27	18.5	0.33	18	36	33	9.1
A-s.sh-1	1.08	47	22	19	15.8	0.87	41	25	22	13.6
-2	1.04	46	22	20	10.0	0.64	33	29	24	20.8
-3	0.66	33	29	20	45.0	0.49	26	32	23	39.1
B-s.sh-1	0.73	36	27	27	0.0	0.38	21	35	33	6.1

Sample	Region I					Region II				
	μ_c	ϕ_c (°)	θ_c (°)	θ (°)	δ (%)	μ_c	ϕ_c (°)	θ_c (°)	θ (°)	δ (%)
D-sh-1	1.51	56	17	17	0.0	0.46	25	33	26	26.9
-2	1.05	46	22	24	8.3	0.55	29	31	24	29.2
-3	0.79	38	26	---	---	0.32	18	36	---	---
-4	1.21	50	20	---	---	0.18	10	40	---	---
-5	0.71	35	28	---	---	0.42	23	34	---	---
-6	0.77	38	26	---	---	0.45	24	33	---	---
F-ss-1	0.97	44	25	30	23.3	0.48	26	32	34	5.9
-2	0.82	39	26	27	3.7	0.50	27	32	34	5.9
-3	0.74	37	27	26	3.8	0.49	26	32	34	5.9
-3'	0.85	40	25	---	---	0.48	26	32	34	5.9
-4	0.92	45	24	26	7.7	0.65	33	29	35	17.1
-4'	0.96	44	23	---	---	0.49	26	32	32	0.0
G-ss-1	0.73	36	27	23	17.4	0.59	31	30	30	0.0
-2	0.85	40	25	26	3.8	0.57	30	30	31	3.2
G-coal-1	0.91	42	24	26	7.7	0.18	10	40	35	14.3
-2	0.79	38	26	29	10.3	0.31	17	37	35	5.7
M-ss-1	1.11	48	21	24	12.5	0.74	37	27	34	20.6
-1'	1.13	48	21	28	25.0	0.78	38	26	33	21.2
T-tb-1	2.06	64	13	26	50.0	0.44	24	33	31	6.5
-2	2.06	64	13	18	27.8	0.37	20	35	31	12.9

3. 実験結果に基づく体積歪挙動に関する考察



Region D : unstable fracture propagation
 Region C : stable fracture propagation
 Region B : elastic deformation
 Region A : closing of cracks

[after Bieniawski]

図 10 差応力～体積歪曲線の模式図と破壊機構

3.1 静水圧下の体積歪挙動の解釈

供試岩石の試験を行なう時には、岩石の賦存時に作用していた地山応力が解放されていることは言うまでもない。これに伴い、孔隙の状態も賦存時には閉鎖していたものが実験時には開口すると考えられる。静水圧縮過程の初期段階つまり、領域 I における体積歪の著しい増大は、開口状態に変化した多数の孔隙の閉鎖過程を意味する。勿論、賦存時においても孔隙の一部は開口していようが、それらの影響は少ない。換言すれば、静水圧縮試験における孔隙の閉鎖過程は、BFC の領域 I に固有な過程である。双線形な破壊特性は、このような孔隙の挙動に支配されることを強く示唆している。

3.2 差応力下の体積歪挙動の解釈

Bieniawski は差応力～体積歪曲線の解析に基づき、供試岩石の破壊が次のような 4 段階の機構にしたがって進展することを示している³⁾(10 図参照)。

- (I) クラックの閉鎖
- (II) クラック面間の摩擦すべり、およびこれに伴う微少な亀裂の発生
- (III) クラック端近傍の微小裂の伸展
- (IV) クラックの合体

これらの(I)~(IV)の段階は、それぞれ10図の差応力範囲A~Dで生ずる。体積歪曲線の特徴的な形状は、A($0 \sim \sigma_A'$)では下に凸の曲線、Bでは($\sigma_A' \sim \sigma_B'$)直線、C($\sigma_B' \sim \sigma_C'$)では反転性の出現、D($\sigma_C' \sim \sigma_M'$)では反転となっている。

このモデルを用いて二、三の幌内砂岩を例に取り、破壊機構を検討してみよう。前掲の差応力~体積歪曲線から $\sigma_A' \sim \sigma_C'$ を求め、封圧との関係をプロットすれば11図、12図が得られる。これらの図で、記号A~Dは10図中の記号に対応している。以上の整理から、次のような知見が得られる。

- (i) 領域B~C、C~D間の境界線は、破壊限界線(11図、12図で最上位の実線)と同様に、屈折する直線で近似される。これらの直線は領域Iでは応力の増加と共に傾きが微増するが、領域IIにおいては、互いにほぼ平行である。
- (ii) 12図の差応力範囲Aは、領域Iで下に凸の形状を示し、領域IIとの境界で急激に増大している。但し、領域II以降は安定している。

11図においても幾分この傾向が見られる。もし、領域IIにおいて、差応力負荷に先立つ静水圧の作用下で総ての孔隙が閉鎖していれば、差応力範囲Aは現われない筈である。即ち、この範囲は領域Iで徐々に減少し、領域IIとの境界で消滅するであろう。上述の結果は、この過程が実際にはもっと複雑なものであり、孔隙の挙動に関し次のようなことを示唆していると考えられる。領域Iでは、「地圧解放後に開口した孔隙」の一部が静水圧縮過程で閉鎖し、その残りが差応力負荷過程で順次閉鎖する。これらの孔隙の挙動は、破壊機構に深い係わりを持つ。一方、領域IIでは、差応力~体積歪曲線の立上がり部分(A)の傾きが、それ以後の直線部分(B)の傾きとそれ程違いがないことから、「地層賦存時の開口孔隙」が静水圧縮過程や差応力過程で単調に「圧縮」されるだけで、破壊機構には殆ど関与しない。

なお、ここではいずれも「孔隙」と表現してはいるが、それぞれの領域における静水圧~体積歪特性などから見ても分るように、その構造・形態はかなり異なっていると思われる。

- (iii) 領域IIでは、差応力範囲Bが封圧の増加と共に著しく拡大する。領域Iでは、まず未閉鎖孔隙が閉鎖して圧縮変形が生ずる一方で、孔隙の破壊に伴って発生する亀裂が伸展して膨張変形も生ずる。領域IIに比べて、体積歪曲線が極めて低い差応力レベルから反転性を示すのはこのためである。これに対し領域IIにおいては、地山応力が解放されて開口した孔隙は、

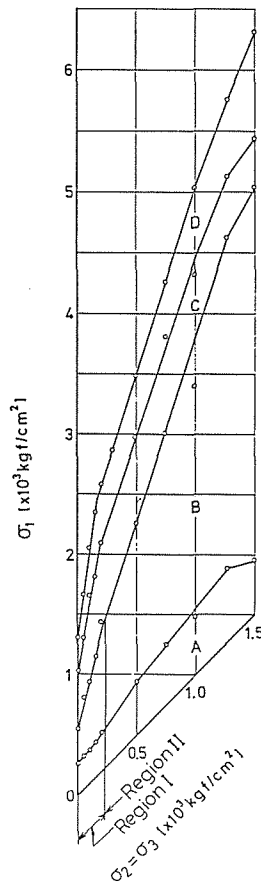


図11 図10の各領域に対応する応力状態(供試体A-ss-3)

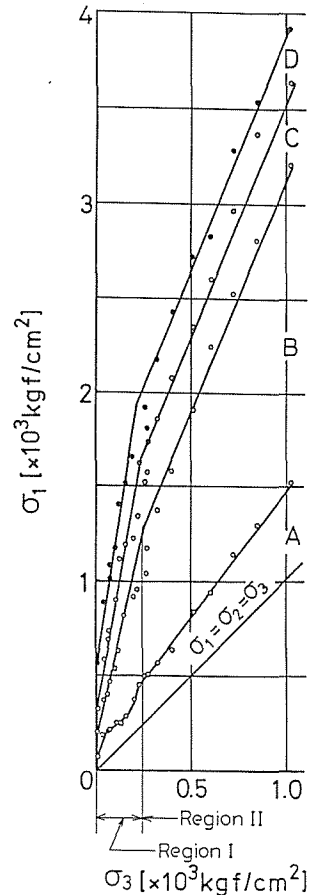


図12 図10の各領域に対応する応力状態(供試体A-ss-5)

静水圧縮過程で殆ど閉鎖しており、閉鎖孔隙面の摩擦すべりが卓越する。これが、差応力範囲 B の拡大をもたらすといえる。反転性が破壊強度点のごく近傍でしか出現しないのは、閉鎖孔隙の破壊に伴って発生する亀裂の伸張が、封圧によって抑制されているためであろう。因みに、この抑制効果が強く作用するとき差応力～軸歪曲線で延性挙動を示すようになる。

(iv) 閉鎖孔隙面間の摩擦係数は、既に述べたように、各差応力範囲の屈折後の境界線の傾きが破壊限界線と同様であることから、巨視的破断面間の摩擦係数にほぼ等しいと言えよう。

4. BFC(双線形破壊条件)の解釈

堆積岩をクラック媒質と見なすことにより、BFC の解釈を試みることにしよう。すなわち、岩石中にはランダムな方位を持つ多数のクラックが存在し、それらの偏平率は同一と仮定する。領域 I では開口クラック系が支配的であるが、封圧が大きくなるにつれ、閉鎖クラックが増え、両者が混在する。さらに封圧の大きな領域 II では閉鎖クラック系が支配的となる。開口クラックと閉鎖クラックでは破壊機構が異なるので、その状態に注意し以下の解析を行なった。

4.1 開口クラックの閉鎖条件

13 図に示す開口クラックは遠方に作用するクラックに垂直な直応力成分 σ (圧縮)がある大きさ以上であれば閉鎖すると考えられる。すなわち、亀裂の開口－閉鎖の限界は次のように表現される。

$$\sigma = C_c' \quad (1)$$

σ : クラックに作用する垂直応力

C_c' : ある限界値

なお、亀裂の開口－閉鎖の状態変化は弾性的に(可逆的に)行なわれることが、2.1 節の実験結果から推定される。さて、 σ は

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (2)$$

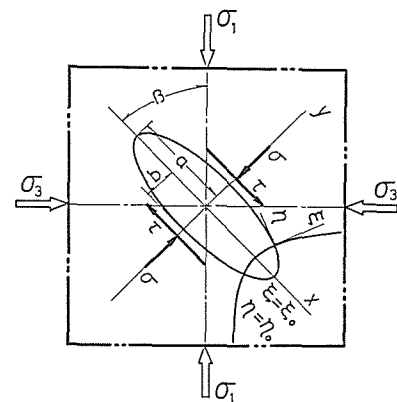


図 13 微小亀裂と応力状態の定義
主応力 $\sigma_1 > \sigma_3$ (圧縮を+と仮定)

であるから、(1)式は次のように表すことができる。

$$\sigma_1 = \frac{2C_c'}{1 - \cos 2\beta} - \frac{1 + \cos 2\beta}{1 - \cos 2\beta} \sigma_3 \quad (3)$$

また、この式を変形することにより、クラックの内で方位が次のような条件を満たすものは閉鎖することがわかる。

$$\cos 2\beta \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2C_c'}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4)$$

$\sigma_3 \geq C_c'$ のとき、(4)式は σ_1 と無関係に成立する。言い換えれば、方位 β が $0 \leq \beta \leq \pi/2$ の範囲にある任意のクラックについて閉鎖条件が満たされる。領域 II ではこのような条件が満たされているものと考えられる。

$\sigma_3 < C_c'$ のとき、方位 β が

$$\frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2C_c'}{\sigma_1 - \sigma_3} \leq \beta < \pi/2 \quad (5)$$

の範囲にあるクラックは閉鎖し、方位 β が

$$0 \leq \beta < \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2C_c'}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (6)$$

の範囲にあるクラックは開口状態を維持する。領域Ⅰはこのような条件が満たされており、開口、閉鎖の両方のクラックが混在していると考えられる。

ところで、クラックの閉鎖に必要な応力の大きさ C_c' に関して、Jager および Cook⁴⁾ は次のような評価を与えた。

$$C_c' = \frac{\alpha E}{2} \quad (7)$$

ここで

E = ヤング率

α = 楕円亀裂の偏平率 (b/a : 13 図参照)

この評価は、偏平率が十分小さいクラックに関し、その面に垂直な応力 σ によって生じる表面変位が、開口距離に等しいときに閉鎖すると仮定し、弾性理論に基づいて導かれたものである。

例えば、 α および E をそれぞれ 10^{-3} 、 3×10^5 kgf/cm² とすれば、 $C_c' = 150$ kgf/cm² が得られる。これは、本供試岩石の物性値と比較して、ほぼ妥当な値と言えるであろう。

4.2 領域Ⅰにおける破壊条件

前節で述べたように領域Ⅰは封圧が $\sigma_3 < C_c'$ の条件を満たし、開口、閉鎖クラックが共存している。まず、(5)式の成立する閉鎖クラックは修正 Griffith⁶⁾ 条件と呼ばれる次式を満たすとき、クラックの上下面が摩擦に打ち勝ってすべりだす⁶⁾。

$$\sigma_1 = \frac{\sin 2\beta + \mu + \mu \cos 2\beta}{\sin 2\beta - \mu + \mu \cos 2\beta} \sigma_3 - \frac{4T_0 \sqrt{1 - C_c'/T_0} + 2\mu C_c'}{\sin 2\beta - \mu + \mu \cos 2\beta} \quad (8)$$

ここで

T_0 = 引張強度

次に、(6)式の成立する開口クラックは Griffith⁶⁾ 条件と呼ばれる次式を満たすとき、クラックの先端付近に新しい引張り亀裂が発生する。

$$\sqrt{\sigma_3^2 \cos^2 \beta + \sigma_1^2 \sin^2 \beta} - \sigma_3 \cos^2 \beta - \sigma_1 \sin^2 \beta = -2T_0 \quad (9)$$

(8), (9)式をクラックの破壊条件と呼ぶことにする。さて、一定の封圧下 (σ_3) で、軸応力 (σ_1) が増加する負荷径路を考えると、クラックの破壊条件(8), (9)式と開口クラックの閉鎖条件(3)式は、 $\sigma_1 \sim \beta$ 座標上の1点 (σ^* , β^*) で常に変わる。この交点は、

$$\begin{aligned} \sigma^* &= \frac{-4T_0(C_c' - T_0)}{C_c' - \sigma_3} + C_c' \\ \beta^* &= \tan^{-1} \frac{C_c' - \sigma_3}{2 \sqrt{-T_0(C_c' - T_0)}} \end{aligned} \quad (10)$$

で与えられる。即ち、ある方位 (β) を有するクラックは、必ず(8)式か(9)式のいずれかの破壊条件に従うことになる。

(8), (9)式を $\sigma_1 \sim \beta$ 座標に表示したものが 14 図である。両者は互いに(3)式で示される限界(限界点は σ^* , β^* である)の片側でのみ意味を持つことはもちろんである。このグラフから明らかなように、軸応力 (σ_1) がある大きさになると最初のクラックの破壊が起る。14 図の場合それは開口クラックであり、その方位と σ_1 の大きさは(9)式から

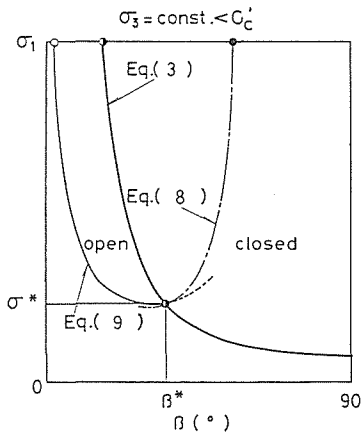


図14 開口クラックと閉鎖クラックの破壊条件

と評価される。さらに軸応力 (\$\sigma_1\$) が増加するにつれ, (11) 式で示されるよりも小さい方位を持つクラックが破壊する。同時に, 閉鎖クラックも破壊するようになり, 破壊条件を満たすクラックの数が増えていく。最も破壊しやすいクラックが破壊し, その後, 差応力の増加と共にクラックが逐次破壊する過程は 10 図の差応力範囲 D の存在に対応するものと考えられる。

ところで, (8), (9) 式の適用に際して問題となるのは, クラック面間の摩擦係数 \$\mu\$, 開口クラックが閉鎖するのに必要な垂直応力 \$C'_c\$, 最終段階で破壊するクラックの方位 \$\beta\$, および内部摩擦係数 \$\mu_c\$ などの値である。これらのうち, 摩擦係数に関しては当然のことながら, 領域 II で得られる値を採用すべきであろう。そこで, \$\mu\$, \$C'_c\$, \$\mu_c\$ については, 体積歪曲線の解析結果などを参照すると, 近似的に次のような関係が成立すると考えてよい。

$$\mu \doteq \mu_c$$

$$C'_c \doteq C_c \doteq \gamma h (\text{かぶり圧})$$

\$\gamma h\$ は一応既知量としてよいであろう。また, 表 2 に示した夾炭層岩石 (砂岩, 頁岩) の内部摩擦係数の平均値 (\$\mu_0\$) および変動係数 (\$v\$) を求めてみると, \$\mu_0 = 0.589\$, \$v = 23.5\%\$ である。従って, 近似的には \$\mu_c \doteq \mu_0\$ と見なしてよいであろう。

次に, 破壊強度時に取り得るクラックの方位 \$\beta\$ についての評価を行ってみよう。このために, 幌内砂岩 (A-ss-6) を例に取り, このときの破壊強度に (8) 式, (9) 式, (3) 式を適用する。その結果を

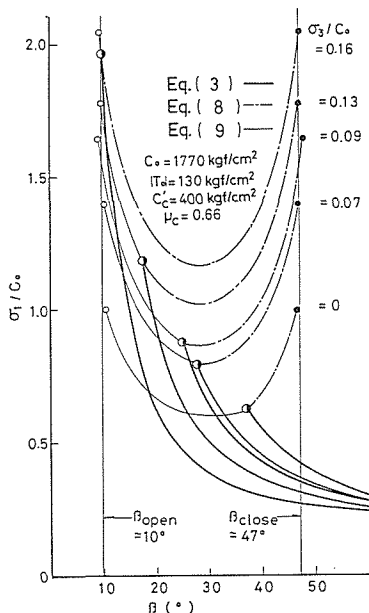


図15 領域Iの破壊条件とクラック方位の関係 (供試体 A-ss-6)

15 図に示す。但し, ここでは特に \$C'_c \doteq \gamma h\$ と仮定していない。図から, 最終破壊時の開口クラックおよび閉鎖クラックの方位 \$\beta\$ は, 封圧の大きさによらずにそれぞれほぼ一定と見なし得ることがわかる。このような \$\beta\$ の近似は他の岩石についても同様に成り立つ。このように, \$\beta\$ について \$\beta \doteq \beta_0\$ (各岩石について一定値) と近似してよい。従って, 採取深度がわかっている夾炭層岩石の, 領域 I における破壊限界線の概形を求めるには, 例えば (8) 式では, 直線の傾き (\$A_1\$) のみを求めればよいことになり, 次のように算定される。

一軸圧縮強度 \$C_0\$ および一軸引張強度は既知とし, (8) 式で \$\sigma_3 = 0\$ とすれば,

$$\tan \beta_0 = \frac{1 + \sqrt{1 - (k_0 + 2\mu_0)k_0}}{k_0 + 2\mu_0} \quad (13)$$

ここに,

$$k_0 = \frac{-4T_0\sqrt{1 - \gamma h/T_0 - 2\mu_0\gamma h}}{C_0}$$

が得られる。従って \$A_1\$ は,

$$A_1 = \frac{\mu_0 + \tan \beta_0}{(1 - \mu_0 \tan \beta_0) \tan \beta_0} \quad (14)$$

で与えられる。あるいは、(9)式の β に(13)式の β_0 を代入してもよい。

幌内砂岩 A-ss-3 について、以上のような手順から β の平均値を求め、(8)式、(9)式を主応力座標に示したものが 16 図である。(8)式と(9)式で表わされる破壊条件式の差違は極めて小さいことが注目される。

4.3 領域 II における破壊条件

領域 II では $\sigma_3 \geq C_c'$ が成立しているから、媒質中のクラックは総て閉鎖クラックである。従って

破壊条件式としては(8)式のみ適用を考えればよい。ここで、前節と同様に、幌内砂岩(A-ss-3)を例に、この領域の破壊強度時に取り得るクラックの方位 β を評価してみると、17 図に示すとおりになる。

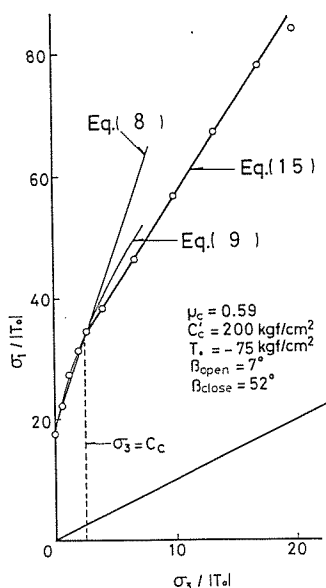


図 16 亀裂媒質モデルに基づく破壊条件の予測(供試体 A-ss-3)

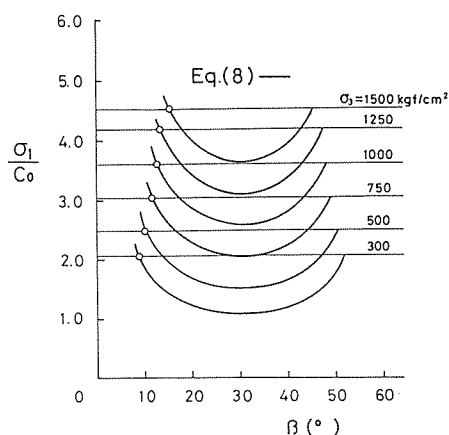


図 17 領域 II の破壊条件とクラック方位の関係(供試体 A-ss-3)

開口クラック系とは異なり、 β の方位範囲は封圧の増大と共に徐々に減少していく。これは、3.2 節で述べたように、閉鎖クラック系の方が封圧による分岐亀裂伸展の抑制効果が大きいためである。これに伴い、クラックの合体過程(差応力範囲 D)の破壊強度に占める割合も著しく減少すると思われる。換言すれば、領域 II においては、クラックが、その分岐亀裂の十分な伸展によって合体し系全体の破壊をもたらすというよりは、様々な方位のクラックが破壊していく過程で突然、系全体のせん断破壊が生ずると考えた方が合理的であろう。この事は、2.4 節に整理した実験結果とも矛盾しない。

要するに、 β を σ_3 の関数として表現し、(8)式を領域 II の破壊条件式に適用することは不可能ではない。しかし、前節でも指摘したように、この領域では $\mu \approx \mu_c \approx \mu_0$ が近似的に成立するから、ここでは破壊条件式として、次式で示される Mohr-Coulomb 条件を適用することにしよう。

$$\sigma_1 = (\sqrt{1 + \mu_c^2} + \mu_c)^2 \sigma_3 + 2S_0(\sqrt{1 + \mu_c^2} + \mu_c) \quad (15)$$

S_0 : 凝集抵抗

16 図には、 $\mu_c \approx \mu_0$ として領域 II の破壊条件(15)式を適用した結果も示した。図から、本文で言う

双線形破壊条件(BFC)が、極めて妥当なものであることがわかるであろう。

5. 結 言

本研究を概括すると次のとおりである。まず、本論文の第1報で提案した第三系堆積岩の双線形破壊条件(BFC)が、これらの岩石に固有な強度特性を表現したものであることを示した。次に、体積歪曲線の解析から、破壊機構が2つの主要な封圧の作用、即ち開口孔隙を閉鎖させる作用、および孔隙の破壊に伴って発生する亀裂の伸展を抑制する作用から解釈されることを指摘した。

また、岩石をクラック媒質と見なしたとき、BFCの屈折前の封圧領域Ⅰでは開口クラック系が、屈折後の封圧領域Ⅱでは閉鎖クラック系がそれぞれ卓越することを指摘し、強度破壊はある範囲内の方位を持つクラックの破壊の集積の結果生じるものと解釈できることを示した。

なお、本稿の整理に際し、当該講座大学院修士課程1年児玉淳一君、山崎淳君、同4年萩野克彦君に協力を戴いた。記して深謝したい。

文 献

- 1) 中村 章・石島洋二：北海道大学工学部研究報告, 137(昭 62), pp. 1-17.
- 2) Peng, S. D.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 8 (1971), pp. 399-432.
- 3) Bieniawski, Z. T.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 4 (1967), pp. 395-430.
- 4) Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W.: Fundamentals of Rock Mechanics, Methuen (1969), pp. 390-393.
- 5) McClintock, F. A. and Walsh, J. B.: U. S. National Congr. Appl. Mech. (1962), pp. 1015-1021.
- 6) Griffith, A. A.: Congr. Appl. Mech., 1st (1924), pp. 55-63.