



Title	第三系堆積岩の力学的特性に関する研究（第1報）：第三系堆積岩の破壊条件
Author(s)	中村, 章; Nakamura, Akira; 石島, 洋二 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 137, 1-17
Issue Date	1987-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42057
Type	departmental bulletin paper
File Information	137_1-18.pdf



第三系堆積岩の力学的特性に関する研究(第1報)
—第三系堆積岩の破壊条件—

中村 章* 石島 洋二*

(昭和62年6月30日受理)

Studies of the Mechanical Characteristics of Tertiary
Sedimentary Rocks (Part I)

—Fracture Criteria of Tertiary Sedimentary Rocks—

Akira NAKAMURA and Yoji ISHIJIMA

(Received June 30, 1987)

Abstract

This paper presents the results of investigations on the mechanical characteristics of Tertiary sedimentary rocks at room temperature under various confining pressures up to 1705 kgf/cm². Fracture strength, residual strength, post-failure behaviors and effects of intermediate principal stress are discussed in the corresponding Parts of this paper respectively.

In Part I, bilinear fracture criteria for the rocks are suggested. The criteria are simply expressed in terms of overburden pressure (γh) of the rocks as follows;

$$0 \leq \sigma_3 \leq \gamma h \quad \sigma_1 = A_1 \sigma_3 + C_0$$

$$\gamma h \leq \sigma_3 \quad \sigma_1 = A_2 \sigma_3 + (A_1 - A_2) \gamma h + C_0$$

where σ_3 is the confining pressure, σ_1 is the fracture strength, C_0 is the uniaxial compressive strength and A_1, A_2 are constants.

1. 緒 言

当該研究室においては、炭坑の深部化に伴う地圧現象を解明する一助とするために、古第三紀石狩層群の夾岩層石を主要な供試岩石としてさまざまな実験(圧裂引張、一軸圧縮・引張、封圧下の圧縮・引張・多段階圧縮)を行ない、差応力(あるいは応力)～軸歪・体積歪特性を中心にデータの集積を計ってきた。それらの結果の一部については既に報告したが¹⁻⁴⁾、今回は、これらを含め、全てのデータを整理し直したので、これを結果の検討内容と共に報告することにした。その理由は2つある。1つは古第三紀に属する岩石、特に、深部に賦存する岩石に関するまとまった資料は今後、学術的に貴重になると考えられることである。周知のように、古第三系地層は、本邦の場合主に炭田地帯に分布しているが、国内の石炭鉱業を取り巻く諸状況が厳しいために、この地質に属する岩石の入手は将来困難になることが予想される。第2の理由は、ここ数年来、ダムや大規模地下構造物の構築など、第三系堆積岩層を対象とする設計・施工の要請が増えており、この分野における工学的重要性が増していることである。そこで本論文では幾つかのシリーズに分けて、1. 破壊条件式、2. 破壊機構、3. 破壊後挙動と脆性-延性遷移、4. 破壊挙動に

* 北海道大学工学部資源開発工学科

及ぼす層構造・含水率・中間主応力の影響，5. 大気圧下の物性値を指標とする破壊限界線の表現，等について順次報告することにした。本文では，この内で，全データの掲載と共に破壊条件式についての検討結果の一部を述べることにする。

2. 供試岩石

本実験に供した岩石の岩種，記号，採取場所，深度，地層，試験法などを表1に示す。岩石試料は岩塊あるいは岩芯として入手し，実験室で図1に示すような形状・寸法に整形した。供試岩石の分類に際しては，岩石試料の色調，粒度，層構造などに留意した他，大半の試料について弾性波速度や予備的な大気圧下の圧縮試験結果も参考にした。このようにして，岩石試料について，力学的に同一母集団に属すると考えられる供試体をそろえたわけである。

供試岩石の種類は，砂岩33種，砂質頁岩5種，頁岩6種，泥岩1種，凝灰岩1種，凝灰角礫岩2種，石炭2種，大理石2種の合計52種である。供試体数は，圧裂引張・一軸引張試験246個，一

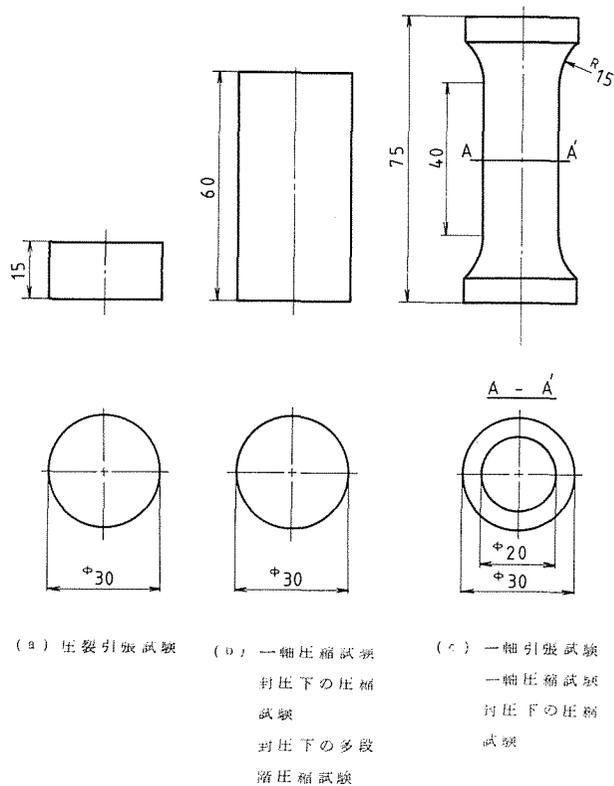


図1 供試体の形状および寸法

軸圧縮試験166個，封圧下の圧縮・引張・多段階圧縮試験433個の合計845個に上る。

表1の試験法の欄で「慣用」あるいは「サーボ制御」とあるのは，軸方向の負荷装置として，それぞれアムスラー型圧縮試験機，サーボ制御システムに基づく圧縮試験機を用いたことを示す。サーボ制御システム型の試験機は図2に示すように，①圧力容器，②封圧発生装置，③サーボ制御軸方向負荷装置，④剛性反力枠，⑤計測および記録装置から構成されている。図3は，圧力容

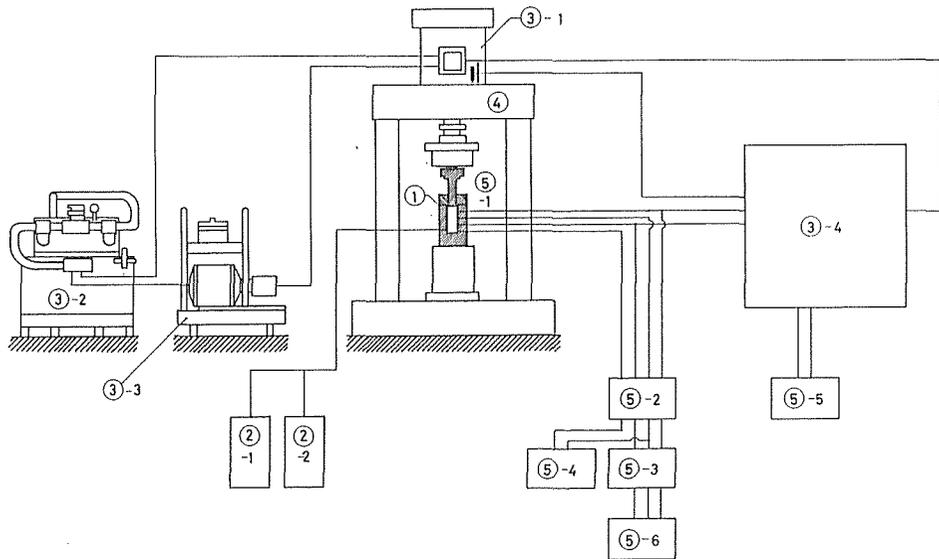


図2 サーボ制御システム

器内に供試体，エンドピース，変位計を収容するときの配置を示したものである。サーボ制御システムによる実験では，フィードバック信号として軸方向変位量を基に換算した軸歪を用いた。設定軸歪速度値は，表3に示したとおりである。両試験法には差異がでる場合もある。しかし，ここで述べる破壊強度については両試験法の差異はみられない。従って両試験法で得られた結果は全て使うことにした。

実験に先立って調べた供試岩石の基本的な諸物性値を表2に示す。封圧下の試験では，油の浸透を防止するため，供試体とその上下端に装着したエンドピースの全側面に生ゴムあるいはシリコンゴムを2~3mmの厚さに塗り，乾燥・固結した後実験に供した。負荷経路，荷重~変位計測法，応力~歪換算法などの実験方法は既報で述べたものと同様である。

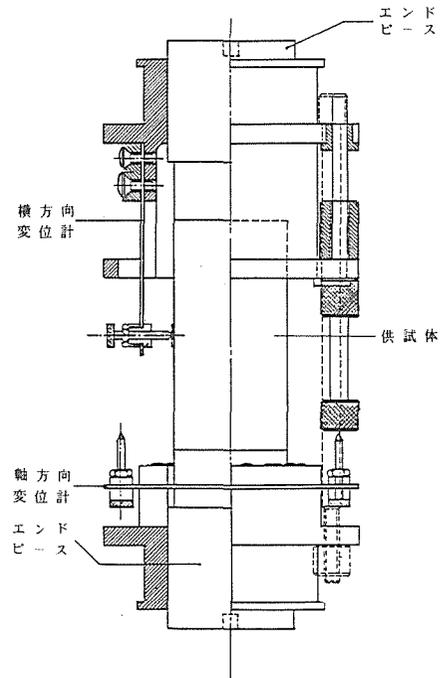


図3 供試体，エンドピース，変位計の配置

表2 供試岩石の物理的, 機械的性質

記号	T _o (Kgf/cm ²)	C _o (Kgf/cm ²)	ρ _a	ρ _t	φ (%)
A - ss - 1	33	440	2.33	2.62	11.1
2	36	680	2.32	2.66	12.8
3	80, 75*	1400	2.51	2.67	6.0
4	140	1840	2.50	2.56	2.3
5	28*	600	2.52	2.66	5.3
6	130	1770	2.64	2.75	4.0
7	74	900	2.42	2.64	8.3
8	170	2090	2.66	2.72	2.2
9	71	860	2.47	2.70	8.5
10	130	1800	2.61	2.71	3.4
11	79	1030	2.55	2.73	6.6
12	51	710	2.47	2.71	8.9
13	160	2160	2.67	2.73	2.2
14	70	900	2.44	2.65	7.9
15	79	1190	2.51	2.69	6.7
16	130	1630	2.63	2.72	3.3
17	50	390	2.46	2.80	12.1
18	58	1110	2.52	2.72	7.4
19	42	790	2.49	2.72	8.5
20	60	1030	2.52	2.71	7.0
21	64	1340	2.56	2.71	5.5
22	50	680	2.47	2.67	7.5
A - s. sh - 1	83	1360	2.58	2.70	4.5
2	80	680	2.58	2.70	4.5
3	64	710	2.54	2.75	7.6
B - ss - 1	58	1090	2.51	2.68	6.4
2	40	950	2.50	2.69	6.9
3	38	870	2.51	2.71	7.2
B - s. sh - 1	61	780	2.48	2.72	8.8
1'	—	—	"	"	"
C - ss - 1	31	1040	2.36	2.66	11.2
1'	"	970	"	"	"
D - sh - 1	160	1100	2.48	2.71	8.5
2	140	960	2.48	2.70	8.1
3	—	350	2.38	2.69	11.5
4	—	260	2.42	2.65	8.7
5	—	940	2.49	2.66	6.4
6	—	680	2.47	2.64	6.4
F - ss - 1	90	1310	2.60	2.71	4.1
2	70	1030	2.56	2.69	4.8
3	80	1010	2.57	2.69	4.5
3'	"	"	"	"	"
4	90	1280	2.58	2.70	4.4
4'	"	"	"	"	"
G - ss - 1	100	1460	2.59	2.70	4.1
2	110	1090	2.59	2.70	4.1
G - coal - 1	—	130	—	—	—
2	—	130	—	—	—
M - ss - 1	64	1290	2.52	2.66	5.3
1'	55	1170	2.52	2.67	5.3
O - mud - 1	29	470	2.24	2.63	14.8
P - tuff - 1	10	640	1.67	2.25	25.8
Q - lime - 1	17	690	2.70	2.72	0.88
1'	16*	690	2.70	2.71	0.37
2	67	920	2.71	2.72	0.44
T - tb - 1	68	620	2.44	2.71	10.0
2	42	180	2.16	2.71	20.3

T_o: 引張強度 (*: 一軸引張強度) C_o: 単軸圧縮強度 ρ_a: 見かけ比重
 ρ_t: 真比重 φ: 孔隙率

3. 実験方法と結果

主な試験法とこれらに供した岩石は次のとおりである。なお、夫々の詳細な実験方法および実験結果については、続報で個別に述べることにする。

封圧下の圧縮試験および封圧下の引張試験：A-ss-5, P-tuff-1, A-lime-1

dog-bone 型供試体による封圧下の圧縮試験：A-ss-5 (一部), A-lime-1'

封圧下の多段階圧縮試験：F-ss-3', F-ss-4'

含水比を制御した封圧下の圧縮試験：D-sh-3, D-sh-4, I-sh-5, D-sh-6

層理の影響を検討した封圧下の圧縮試験：A-ss-18, A-ss-19, A-ss-20, A-ss-21

炉乾燥状態あるいは自然乾燥状態での封圧下の圧縮試験：以上の他の全岩石

各種の実験で得られた差応力 (あるいは応力) ~ 軸歪・体積歪曲線から次のような諸量を求めて整理した結果を表3に示した。

σ_1 (破壊強度)：最大主応力値 (本論文では圧縮を正に取っている)

σ_R (残留強度)：破壊後に形成される破断面の摩擦抵抗の主応力表示

E (変形係数)：差応力 (あるいは応力) ~ 軸歪曲線の破壊前の線形部分の傾き

ε_{crt} (限界歪)：破壊強度点の軸歪値

ε_{vmax} (最大圧縮体積歪)：差応力 (あるいは応力) ~ 体積歪曲線の最大圧縮歪値

なお、表中の V_p , V_s , σ_3 は夫々、試験前の P 波, S 波速度および設定封圧である。また、 θ は破断面と供試体軸方向との角度 (破断角) を表す。MODE は破壊形態を示すもので、ここでは脆性 (B: Brittle), 遷移 (T: Transitional), 延性 (D: Ductile) の3種に分類した。

表3-1 実験結果

記号	V_p	V_s	σ_3	σ_1	σ_R	E	ε_{crt}	ε_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ /sec
A l s s 1	—	—	0	440	—	1.06	0.42	—	30	B	50
	—	—	100	1080	—	1.25	0.90	—	29	B	40
	—	—	200	1460	—	1.53	0.98	—	30	B	30
	—	—	300	1670	—	1.65	1.15	—	35	B	30
	—	—	300	1670	1180	1.55	1.25	—	34	B	30
	—	—	500	2300	—	1.80	1.62	—	—	T	30
A l s s 2	—	—	0	680	—	1.07	0.68	—	36	B	40
	—	—	150	1310	700	1.07	1.16	—	27	B	40
	—	—	300	1710	1130	1.42	1.35	—	36	B	30
	—	—	500	2300	1930	1.57	1.73	—	36	T	30
	—	—	750	2930	—	1.67	2.19	—	37	T	30
	—	—	1000	3650	—	1.70	3.35	—	35	D	30
A l s s 3	—	—	0	1400	—	3.02	0.55	—	21	B	20
	—	—	50	1660	520	3.43	0.56	—	21	B	10
	—	—	100	2060	650	3.45	0.70	—	21	B	10
	—	—	150	2350	840	3.37	0.83	—	23	B	10
	—	—	200	2590	1110	3.45	0.93	—	28	B	10
	—	—	300	2870	1390	3.18	1.01	—	25	B	20
	—	—	500	3480	1890	3.44	1.32	—	29	B	10
	—	—	750	4260	3310	3.46	1.63	—	29	B	10
	—	—	1000	5040	3940	3.43	1.95	—	29	B	10
	—	—	1250	5860	—	3.51	2.37	—	—	B	10
	—	—	1500	6320	—	3.42	2.92	—	—	B	10
	—	—	50	1670	—	—	—	—	30	B	—
—	—	100	1760	—	—	—	—	22	B	—	
—	—	140	2300	—	3.52	—	—	21	B	10	
—	—	160	2400	—	—	—	—	29	B	—	
—	—	270	2620	—	—	—	—	26	B	—	
—	—	300	2880	—	3.46	—	—	30	B	10	
—	—	1250	5450	—	3.33	—	—	30	B	10	

表3-2 実験結果

記号	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	$\epsilon_{vmax.}$	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ/sec
A s 4	—	—	0	1840	—	2.58	0.89	—	—	B	20
	—	—	60	2080	540	2.35	0.898	—	20	B	20
	—	—	110	2400	—	2.68	1.072	—	24	B	20
	—	—	170	2710	890	2.40	1.274	—	25	B	20
	—	—	200	2720	—	2.42	1.350	—	24	B	20
	—	—	300	3120	—	2.74	1.289	—	30	B	20
	—	—	500	3840	—	2.93	1.598	—	29	B	20
	—	—	750	4470	2750	2.51	2.271	—	29	B	20
A s 5	3.0	1.6	0	600	—	1.13	0.70	0.21	28	B	40
	2.9	1.7	30	890	200	1.54	0.73	0.26	30	B	30
	2.8	1.5	60	1040	—	1.74	0.81	0.28	—	B	30
	2.9	1.4	70	1020	—	1.44	0.90	0.34	29	B	30
	2.9	1.5	100	1170	470	1.66	0.93	0.31	31	B	30
	3.2	1.7	120	1400	520	1.97	0.91	0.28	25	B	20
	3.2	1.6	150	1510	—	1.86	1.04	0.33	24	B	30
	3.0	1.7	170	1340	800	1.91	0.85	—	31	B	30
	—	—	200	1650	—	1.91	0.93	0.26	—	B	30
	2.7	1.5	220	1620	1220	1.75	1.13	0.34	32	B	30
	2.7	1.7	260	1920	—	2.16	0.95	0.22	—	B	20
	2.6	1.5	270	1810	1550	1.74	1.25	0.39	—	B	30
	2.8	1.8	320	2170	—	1.98	1.32	0.35	40	B	20
	3.3	1.7	400	2430	1990	2.15	1.57	0.42	—	B	20
	3.0	1.7	420	2110	1720	2.04	1.37	—	38	T	20
	3.2	1.6	520	2720	—	2.23	1.66	0.42	—	B	20
	2.7	1.5	610	2830	2730	2.09	1.86	0.58	—	T	20
	3.1	1.7	730	3280	3190	2.67	2.04	0.50	—	T	20
	2.9	1.7	850	3540	3500	2.60	2.50	0.66	—	T	20
	3.2	1.6	1030	3930	—	2.41	2.96	0.84	—	D	20
	2.7	1.4	-47	120	—	—	—	0	0	B	—
	2.6	1.4	-51	230	—	2.50	0.30	—	0	B	20
	—	—	-46	330	—	1.84	0.42	0	0	B	30
	2.6	1.4	-31	510	—	—	—	—	6	B	—
	2.7	1.5	-43	600	—	3.04	0.51	—	0	B	20
	—	—	-15	660	—	2.68	0.52	—	7	B	20
	2.5	1.4	-29	750	—	—	—	—	7	B	—
	2.6	1.5	-4	870	—	3.33	0.66	—	10	B	10
	2.8	1.3	15	970	—	—	—	—	11	B	—
	2.7	1.4	56	1050	—	2.67	0.88	—	13	B	20
	—	—	61	1130	—	—	—	—	15	B	—
	2.7	1.4	73	1170	—	—	—	—	21	B	—
	—	—	86	1300	—	3.21	1.05	—	21	B	10
	2.6	1.4	150	1410	—	—	—	—	24	B	—
	2.3	1.3	99	1440	—	—	—	—	23	B	—
	—	—	170	1490	—	—	—	—	22	B	—
	—	—	120	1550	—	3.40	1.11	—	25	B	10
	2.7	1.3	150	1700	—	3.46	1.23	—	24	B	10
	—	—	180	1800	—	—	—	—	24	B	—
	—	—	-28	0	—	—	—	—	0	—	20
—	—	-47	118	—	—	—	—	0	—	20	
—	—	-51	229	—	2.50	0.295	—	0	—	20	
—	—	-46	332	—	1.84	0.423	—	0	—	20	
—	—	-63	444	—	2.80	0.429	—	0	—	20	
—	—	-31	510	—	—	—	—	6	—	20	
—	—	-43	595	—	3.04	0.505	—	0	—	20	
—	—	-15	655	—	2.68	0.601	—	7	—	20	
—	—	-29	751	—	—	—	—	7	—	20	
—	—	-4	870	—	3.33	0.663	—	10	—	20	
—	—	15	965	—	—	—	—	11	—	20	
—	—	56	1045	—	2.67	0.883	—	13	—	20	
—	—	61	1130	—	—	—	—	15	—	20	
—	—	73	1172	—	—	—	—	21	—	20	
—	—	86	1300	—	3.21	1.054	—	21	—	20	
—	—	99	1435	—	—	—	—	23	—	20	
—	—	166	1485	—	—	—	—	22	—	20	
—	—	118	1550	—	3.40	1.110	—	25	—	20	
—	—	148	1700	—	3.46	1.225	—	24	—	20	
—	—	183	1800	—	—	—	—	24	—	20	
A s 6	4.1	2.0	0	1770	—	4.22	0.43	0.20	—	B	10
	3.7	1.9	120	2470	750	4.23	0.66	—	28	B	10
	—	—	160	2900	450	4.58	0.82	0.36	25	B	10
	3.9	1.9	200	2820	1040	4.32	0.79	—	26	B	10
	4.1	2.1	240	3140	680	4.13	0.95	0.41	20	B	10
	4.2	2.0	360	3750	—	4.54	0.96	0.28	28	B	10
	4.0	1.9	450	4050	1610	4.25	1.05	0.27	28	B	10
4.3	1.9	550	4480	1630	4.37	1.15	0.35	28	B	10	
4.3	2.0	820	5350	3400	4.25	1.62	0.55	28	B	10	
A s 7	3.5	1.9	0	910	—	1.77	0.63	0.30	25	B	100
	3.5	1.9	0	890	—	1.84	0.62	0.36	23	B	10.0
A s 8	4.9	2.3	0	2090	—	3.35	0.65	0.41	19	B	100; 10.0
	4.8	2.3	60	2290	—	3.73	0.71	0.39	25	B	3.60
	4.8	2.3	100	2630	800	3.87	0.78	0.27	26	B	57.0
	4.8	2.3	200	2800	940	3.84	1.05	—	26	B	7.50
	4.8	2.3	310	3580	1590	4.18	0.96	0.06	29	B	10.0

表3-3 実験結果

記号	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	ϵ_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ /sec
A S 9	3.4	1.7	0	880	—	1.47	0.68	0.35	32	B	100
	3.4	1.7	0	840	—	1.44	0.70	0.40	27	B	10.0
A S 10	4.6	2.2	0	1800	—	3.06	0.69	0.42	24	B	100; 10.0
	4.6	2.2	50	2170	550	4.03	0.65	0.26	25	B	10.0
	4.7	2.2	100	2330	700	3.75	0.83	0.31	26	B	12.0
	4.4	2.1	150	2370	940	3.50	0.81	—	29	B	10.0
	4.6	2.2	170	2850	—	3.97	0.90	0.18	28	B	10.0
	4.5	2.2	180	2610	—	3.56	0.85	0.26	28	B	10.0
	4.4	2.1	200	2630	1000	3.51	0.97	0.23	29	B	10.0
	4.7	2.2	300	3250	—	4.10	0.98	0.27	31	B	10.0
	4.7	2.2	390	3600	1770	4.39	1.18	0.34	31	B	10.0
A S 11	3.5	1.7	0	1030	—	2.06	0.59	0.32	25	B	100; 10.0
	3.6	1.9	60	1540	510	3.00	0.57	0.12	29	B	20.0
	3.6	1.8	130	1770	—	3.05	0.64	0.07	31	B	20.0
	3.4	1.8	200	2130	990	3.17	0.74	0.06	31	B	20.0
	3.5	1.9	250	2310	1180	3.38	0.75	0.08	31	B	11.0
	3.5	1.9	300	2290	1430	3.46	0.82	0.10	34	B	10.0
	3.6	1.8	340	2560	1520	3.49	0.87	0.14	32	B	20.0
	3.5	1.8	350	2780	1830	3.66	1.08	0.10	34	B	20.0
	3.5	1.8	400	2780	1820	3.56	0.89	—	32	B	20.0
A S 12	2.9	1.6	0	710	—	1.24	0.67	0.35	16	B	100; 10.0
	2.9	1.5	50	1050	530	1.75	0.72	0.11	31	B	12.0
	2.9	1.5	100	1280	710	2.02	0.79	0.13	32	B	10.0
	2.9	1.5	150	1460	870	2.00	0.89	0.12	35	B	10.0
	2.9	1.5	180	1570	720	1.98	0.93	0.12	34	B	20.0
	2.9	1.5	200	1550	1130	1.98	0.92	0.08	36	B	10.0
	2.7	1.4	220	1690	960	2.05	1.04	0.10	35	B	20.0
	2.9	1.6	250	1790	1210	2.24	0.98	0.12	34	B	20.0
	2.9	1.5	300	1870	1380	2.18	1.11	0.10	36	B	20.0
2.9	1.6	350	2090	1470	2.27	1.19	0.22	35	B	20.0	
2.9	1.5	400	2150	1640	2.16	1.22	0.21	34	B	20.0	
A S 13	5.2	2.5	0	2160	—	3.94	0.64	0.36	14	B	100; 10.0
	5.1	2.4	60	2340	580	3.80	0.71	0.12	18	B	11.0
	5.3	2.4	60	2500	570	4.68	0.59	0.10	18	B	10.0
	5.3	2.4	80	2700	600	4.46	0.75	0.16	19	B	10.0
	5.2	2.4	110	2790	930	4.43	0.77	0.14	19	B	10.0
	5.2	2.4	150	2810	1000	4.75	0.67	0.09	19	B	10.0
	5.3	2.4	160	2770	730	3.88	0.91	—	21	B	10.0
	5.2	2.4	160	3060	990	4.60	0.82	0.13	18	B	10.0
	5.2	2.4	180	3030	1010	4.65	0.79	0.04	22	B	10.0
	5.2	2.4	190	3170	—	—	—	—	22	B	10.0
	5.2	2.4	250	3440	—	4.89	0.91	0.08	22	B	10.0
	5.2	2.4	300	3420	1540	4.83	0.87	0.14	21	B	10.0
	5.2	2.4	350	3700	1370	4.57	1.00	0.27	21	B	10.0
5.2	2.4	380	3830	1640	5.02	1.13	0.23	25	B	10.0	
A S 14	3.3	1.7	0	880	—	1.69	0.70	0.36	20	B	100
	3.3	1.7	0	910	—	1.70	0.65	0.38	26	B	10.0
A S 15	3.7	1.9	0	1190	—	2.11	0.69	0.30	25	B	100; 10.0
	3.6	1.9	50	1560	450	2.65 [?]	0.86	0.26	28	B	10.0
	3.5	1.8	100	1760	680	2.63	0.84	0.26	28	B	10.0
	3.7	1.8	150	1920	760	2.80	0.85	0.24	30	B	10.0
	3.7	1.8	210	2210	1020	2.95	0.91	0.25	30	B	10.0
	3.7	1.9	300	2310	1270	2.85	1.03	0.32	30	B	10.0
	3.5	1.9	300	2500	1310	3.03	1.07	—	30	B	11.0
	3.5	1.8	390	2570	1460	2.94	1.28	—	30	B	12.0
	3.6	1.8	400	2710	1700	2.94	1.29	0.33	31	B	10.0
A S 16	4.7	2.2	0	1400	—	2.88	0.60	0.39	22	B	100
	5.0	2.3	0	1830	—	3.36	0.64	0.39	22	B	10.0
	5.0	2.3	0	1560	—	3.16	0.60	0.37	22	B	1000
	2.2	2.2	0	1740	—	3.22	0.62	0.33	30	B	1.00
A S 17	2.8	1.8	0	390	—	1.23	0.59	—	27	B	500
	2.9	1.9	50	1070	390	1.60	0.72	—	15	B	500
	3.0	1.9	100	1220	630	1.88	0.70	—	20	B	500
	2.8	1.9	320	2220	1310	2.15	1.27	—	28	B	500
	2.5	1.9	530	2960	2460	2.14	1.71	—	31	B	500
	2.4	2.0	800	3690	3080	2.42	1.96	—	31	T	500
A S 18	3.2	1.9	0	1110	—	2.05	0.73	0.37	—	B	10.0
	3.2	1.9	50	1580	290	2.48	0.88	0.30	23	B	10.0
	3.2	1.9	130	2100	890	2.76	1.00	0.33	30	B	10.0
	3.1	1.9	200	2540	990	3.10	1.07	0.33	32	B	10.0
	3.1	1.9	290	2810	1270	3.04	1.25	0.06	32	B	10.0
	3.1	1.9	350	3160	1680	2.85	1.35	0.34	32	B	10.0
	3.1	1.9	400	3110	1710	2.80	1.41	0.31	34	B	10.0
A S 19	2.9	1.7	0	790	—	1.40	0.75	0.26	22	B	10.0
	2.9	1.7	40	1170	300	1.71	0.89	0.24	25	B	10.0
	2.9	1.7	50	1340	340	1.86	0.92	0.26	25	B	10.0
	2.9	1.7	100	1560	560	1.94	0.98	0.27	29	B	10.0
	2.9	1.7	150	1740	590	1.59	1.08	0.35	32	B	10.0
	2.9	1.7	200	2100	1090	2.26	1.16	0.18	34	B	10.0

表3-4 実験結果

記号	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	ϵ_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ /sec
A l s s i 19	3.0	1.8	250	2260	1130	2.22	1.23	—	32	B	10.0
	3.0	1.8	300	2370	1350	2.17	1.29	0.26	32	B	10.0
	2.9	1.7	360	2700	1480	2.29	1.45	0.33	32	B	10.0
	2.9	1.7	400	2880	1860	2.58	1.40	0.27	34	B	10.0
	3.0	1.9	490	3050	2020	2.55	1.50	0.38	34	B	50.0
	2.9	1.9	610	3460	2730	2.61	1.75	0.46	34	B	20.0
	3.0	1.9	660	3650	2350	2.69	1.83	—	34	B	25.0
	2.9	1.9	790	3850	3080	2.43	2.03	0.66	35	B	25.0
	2.9	2.0	800	3920	3220	2.67	2.03	—	33	B	25.0
A l s s i 20	3.2	2.0	0	1030	—	1.67	0.76	0.31	25	B	10.0
	3.0	1.9	30	1120	290	1.70	0.87	0.35	26	B	10.0
	3.2	2.0	50	1420	390	1.62	1.05	0.39	24	B	10.0
	3.1	2.0	70	1420	410	1.80	0.97	0.29	26	B	10.0
	3.1	1.9	100	1630	600	1.87	1.12	0.42	27	B	10.0
	3.2	2.1	120	1790	570	1.83	1.08	0.32	27	B	10.0
	3.2	2.1	130	1920	660	2.38	0.99	0.25	26	B	10.0
	3.2	2.1	200	2220	1060	2.50	1.07	0.23	31	B	10.0
	3.2	2.1	210	2220	970	2.18	1.25	0.29	31	B	10.0
	3.1	2.0	300	2360	1490	2.68	1.30	0.56	33	B	10.0
	3.2	2.1	300	2570	1520	2.20	1.38	0.40	36	B	10.0
	3.1	1.9	310	2490	1550	2.48	1.33	0.30	35	B	10.0
	3.1	2.0	350	2650	1330	2.59	1.39	0.29	31	B	10.0
	3.0	2.0	400	2620	1850	2.34	1.52	0.55	33	B	10.0
	3.3	2.1	400	2920	1590	2.68	1.37	0.36	34	B	10.0
	3.1	2.0	400	2670	1600	2.70	1.50	0.51	35	B	10.0
	3.2	2.0	510	3340	1990	2.79	1.60	—	34	B	25.0
3.1	2.0	650	3640	2580	2.63	1.72	—	38	B	25.0	
3.1	2.0	760	3810	—	2.65	2.04	—	32	B	25.0	
3.1	1.9	870	3960	3550	2.82	2.25	—	—	T	25.0	
A l s s i 21	3.5	2.0	0	1340	—	2.03	0.81	0.40	26	B	10.0
	3.3	1.9	60	1520	590	2.04	0.97	0.40	—	B	10.0
	3.5	1.9	100	2030	—	2.23	0.97	0.35	28	B	10.0
	3.4	1.9	150	2140	850	2.35	1.08	0.35	26	B	10.0
	3.5	2.0	200	2460	1170	2.45	1.13	0.30	32	B	10.0
	3.3	1.8	250	2480	1180	2.23	1.31	0.38	32	B	10.0
	3.4	2.0	300	2940	1680	2.89	1.32	0.39	32	B	10.0
	3.5	2.0	360	3030	1600	2.70	1.41	0.41	32	B	10.0
	3.5	2.0	400	2990	1650	2.38	1.71	0.50	32	B	10.0
	3.5	1.9	460	3360	1910	2.94	1.58	—	34	B	25.0
	3.4	2.0	550	3500	2110	2.97	1.58	0.30	32	B	25.0
	3.4	1.9	720	4100	2750	3.15	1.83	—	34	B	25.0
	3.4	1.9	820	4290	3020	3.22	1.90	0.40	34	B	25.0
A l s s i 22	2.9	1.6	0	680	—	1.47	0.58	0.21	24	B	50
	2.9	1.6	50	1160	—	1.60	0.72	0.34	—	B	50
	2.8	1.6	50	1270	310	3.00	0.62	0.26	25	B	50
	3.0	1.6	50	1300	330	2.30	0.80	0.44	20	B	50
	2.8	1.6	100	1560	580	2.13	0.88	0.32	24	B	50
	2.8	1.5	110	1510	510	2.13	0.74	0.36	32	B	50
	3.0	1.7	150	1960	630	2.72	0.96	0.30	26	B	50
	3.1	1.6	200	2240	—	2.85	1.00	0.31	25	B	50
	2.9	1.5	200	1940	920	2.28	1.15	0.30	33	B	50
	3.1	1.6	300	2650	1260	2.94	1.25	0.27	32	B	50
	3.0	1.7	300	2530	1260	2.88	1.05	0.27	30	B	50
	3.0	1.6	490	2920	1850	1.84	0.95	—	34	B	50
	2.9	1.6	510	3100	1990	2.06	1.10	—	35	B	50
2.8	1.5	600	3120	2308	3.52	1.25	0.17	35	B	50	
A l s s h i l 1	3.5	2.4	0	1360	—	1.83	0.76	—	14	B	500
	4.0	2.0	100	1970	920	3.18	0.65	—	16	B	500
	3.4	2.3	140	2180	970	3.14	1.26	—	13	B	500
	3.3	2.7	160	2690	1400	3.12	1.11	—	18	B	500
	4.0	2.1	220	2940	1690	3.41	1.02	—	27	B	500
	3.4	2.4	260	2910	1250	2.50	1.44	—	24	B	500
	3.1	2.1	420	3190	1990	2.57	1.24	—	22	B	500
3.4	2.2	620	4160	2780	2.84	1.66	—	21	B	500	
A l s s h i l 2	3.2	1.8	0	740	140	1.44	0.34	—	18	B	500
	3.5	2.2	50	1220	480	2.19	0.54	—	26	B	500
	3.5	2.0	100	1460	780	2.30	0.68	—	19	B	500
	3.7	2.4	210	2030	1140	2.22	1.01	—	16	B	500
	3.7	2.3	310	2530	1560	2.21	1.25	—	21	B	500
	3.8	2.3	320	2110	1460	2.18	0.92	—	28	B	500
	3.6	2.2	490	2720	2120	2.53	1.09	—	21	B	500
	3.0	1.7	620	3480	2480	2.60	1.35	—	27	B	500
	3.6	2.1	750	3840	2850	3.13	1.35	—	21	B	500
	3.5	2.3	990	4640	3670	2.18	2.48	—	27	B	500
	3.7	2.0	1040	4640	3710	2.43	2.41	—	21	B	500
A l s s h i l 3	3.6	2.1	0	710	—	1.39	0.52	—	18	B	500
	3.7	2.4	50	1120	400	1.62	1.01	—	15	B	500
	2.9	1.8	100	1570	650	2.13	0.86	—	22	B	500
	3.4	1.9	150	1180	750	2.04	0.52	—	26	B	500
	3.1	2.0	170	1360	760	1.93	0.63	—	19	B	500
	3.8	2.3	200	1600	1130	1.86	0.76	—	23	B	500
	3.6	2.1	210	1590	1170	2.21	0.66	—	18	B	500
3.7	2.4	300	2320	1550	2.36	0.91	—	16	B	500	

表3-5 実験結果

試片 No.	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	ϵ_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ/sec
A sh 1 3	3.7	2.4	410	2870	1750	2.68	1.28	—	25	B	500
	3.5	2.4	500	2880	2240	2.46	1.09	—	21	B	500
	2.9	1.9	630	3530	2460	2.43	1.45	—	23	B	500
	3.4	2.1	1030	4260	3530	2.61	1.79	—	28	B	500
B 1 5 5 1 1	—	—	0	1090	—	1.50	0.83	—	27	B	30
	—	—	300	2150	1120	1.15	1.77	—	29	B	40
	—	—	500	2650	1830	1.38	2.31	—	36	B	30
	—	—	750	3240	2800	1.28	2.88	—	38	T	40
	—	—	1500	4350	—	1.68	3.11	—	39	T	30
B 1 5 5 2	—	—	0	950	—	1.52	0.64	—	23	B	30
	—	—	300	2050	1210	1.25	1.22	—	26	B	40
	—	—	500	2900	1810	1.58	2.24	—	29	B	30
	—	—	750	3640	2840	1.62	2.79	—	34	B	30
	—	—	1500	5590	5061	2.00	4.41	—	37	B	20
B 1 5 5 3	—	—	0	870	—	1.30	0.71	—	33	B	40
	—	—	150	1470	860	1.18	1.40	—	38	B	40
	—	—	300	1910	1410	1.20	1.56	—	33	B	40
	—	—	500	2440	1910	1.26	1.99	—	33	B	40
	—	—	750	3310	2570	1.56	2.68	—	35	B	30
	—	—	1500	4730	—	1.56	4.97	—	—	D	30
B 1 5 5 1 1	2.6	1.7	0	780	—	1.04	0.93	0.44	23	B	100
	2.6	1.7	50	1090	270	1.31	1.05	0.43	25	B	100
	2.3	1.5	80	1030	420	0.97	1.29	0.44	27	B	100
	3.4	1.9	100	1110	700	1.67	0.62	0.17	30	B	100
	2.5	1.7	100	1120	480	1.02	1.32	0.69	27	B	100
	2.4	1.7	100	1200	590	1.01	1.28	0.51	20	B	100
	2.5	1.7	100	1240	550	1.02	1.30	0.75	25	B	100
	2.7	1.7	100	1250	470	1.39	1.23	—	29	B	100
	2.9	1.8	100	1270	520	1.14	1.34	0.52	25	B	100
	2.3	1.6	110	1220	640	0.93	1.43	0.60	23	B	100
	2.4	1.6	110	1240	600	0.83	1.61	0.64	22	B	100
	2.5	1.8	110	1270	640	0.95	1.64	0.67	23	B	100
	2.3	1.5	190	1300	940	0.97	1.60	0.85	35	B	100
	2.8	1.7	200	1610	840	1.41	1.34	0.58	28	B	100
	2.8	1.9	200	1670	850	1.30	1.34	0.49	26	B	100
	3.1	1.9	200	1760	820	1.57	1.29	0.46	33	B	100
	2.5	1.6	210	1440	840	0.87	1.85	0.70	26	B	100
	2.5	1.6	210	1610	820	1.05	1.66	0.50	27	B	100
	2.5	1.7	210	1620	920	1.13	1.73	0.60	22	B	100
	2.8	1.9	210	1670	940	1.35	1.45	0.50	35	B	100
	3.2	2.0	210	1730	830	1.46	1.23	0.29	34	B	100
	3.1	1.8	300	1790	1220	1.16	1.73	0.55	31	B	100
	2.7	1.8	300	1900	1200	1.02	0.95	0.21	23	B	100
	2.2	1.5	310	1660	1250	0.97	2.11	0.98	36	B	100
	2.8	1.8	310	1830	1230	1.54	1.41	1.41	35	B	100
	2.8	1.8	320	1830	1400	1.03	2.00	0.72	34	B	100
	2.4	1.6	490	2050	1820	0.95	2.51	1.24	36	B	100
	3.1	1.8	500	2320	1830	1.43	2.18	0.72	35	B	100
	2.4	1.6	510	2190	—	1.04	2.45	0.82	34	T	100
	2.6	1.6	510	2240	1810	0.89	2.41	—	30	B	100
	2.5	1.6	520	2260	1840	1.11	2.70	0.89	36	B	100
	2.5	1.6	750	2680	2290	0.95	3.30	1.06	33	B	100
2.5	1.6	750	2730	2620	1.15	3.30	0.95	—	T	100	
2.4	1.6	770	2690	—	0.88	3.35	1.08	—	D	100	
2.7	1.8	780	2950	2750	1.33	2.81	—	35	T	100	
B 1 5 5 1 1	—	—	-48	0	—	—	—	—	—	—	—
	2.9	1.8	0	840	—	1.15	0.77	0.38	24	B	40
	—	—	-54	0	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	-44	0	—	—	—	—	—	—	—
	3.4	1.9	0	880	—	1.73	0.60	0.26	25	B	30
	—	—	-49	0	—	—	—	—	—	—	—
	2.4	1.6	0	770	—	—	—	—	23	B	—
	2.7	1.7	0	780	—	1.29	0.83	0.31	26	B	30
	—	—	-41	0	—	—	—	—	—	—	—
	2.4	1.6	0	830	—	0.87	1.16	0.54	23	B	50
	2.4	1.6	0	700	—	0.89	0.98	0.39	21	B	50
	—	—	-45	0	—	—	—	—	—	—	—
	2.4	1.7	0	770	—	0.91	1.09	0.45	21	B	50
	—	—	-32	0	—	—	—	—	—	—	—
	2.5	1.7	0	730	—	0.90	0.95	0.47	23	B	50
	2.4	1.7	0	680	—	0.97	0.90	0.45	22	B	50
2.7	1.7	0	730	—	0.72	0.95	0.40	24	B	50	
2.5	1.6	—	820	—	0.78	1.23	0.45	21	B	50	
2.6	1.7	0	840	—	1.02	0.91	0.46	22	B	40	
2.5	1.7	0	760	—	0.89	0.96	0.54	30	B	50	
3.2	2.0	0	790	—	1.59	0.72	0.31	22	B	30	
2.4	1.6	0	660	—	0.79	1.02	0.37	22	B	50	
—	—	-73	0	—	—	—	—	—	—	—	
C 1 5 5 1 1	—	—	0	1040	—	1.48	0.77	—	30	B	30
	—	—	300	2070	1310	1.64	1.57	—	35	T	30
	—	—	500	3420	2170	2.51	1.71	—	35	B	20
	—	—	750	4070	3270	2.56	2.20	—	34	B	20
	—	—	1000	4710	4160	2.40	2.62	—	36	T	20

表3-6 実験結果

記号	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	ϵ_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ/sec
C l s s i l'	—	—	0	970	—	1.94	0.62	—	20	B	20
	—	—	300	2640	1630	2.33	1.47	—	36	B	20
	—	—	500	2780	2130	2.02	1.85	—	36	T	20
	—	—	750	4230	3060	2.48	2.03	—	32	B	20
D l s h l l	—	—	0	1100	—	2.64	0.47	—	—	B	20
	—	—	60	1760	850	2.63	0.87	0.57	17	B	20
	—	—	300	2670	1920	2.00	1.42	—	22	B	20
	—	—	500	3210	2120	2.12	1.91	—	26	B	20
	—	—	1000	4400	3300	1.82	3.68	—	27	B	30
—	—	1500	5610	4830	1.88	4.11	—	29	B	30	
D l s h l 2	2.9	1.6	0	960	—	1.87	0.58	—	—	B	30
	3.1	1.8	60	1240	580	1.70	1.15	—	24	B	30
	3.5	1.8	150	1890	1430	2.24	1.06	—	24	B	20
	3.6	1.8	300	2410	2120	2.29	1.38	—	23	B	20
	3.4	1.7	510	3060	2250	1.82	2.08	—	24	B	30
2.7	1.5	740	3670	2250	1.87	2.48	—	25	B	30	
D l s h l 3	2.9	—	0	350	—	1.00	0.40	—	—	B	20
	2.9	—	20	850	440	1.09	0.92	0.42	—	B	20
	2.8	—	60	1000	580	1.14	1.08	0.50	—	B	20
	2.9	—	110	1230	760	0.93	1.40	0.73	—	B	20
	2.8	—	230	1630	1250	1.04	1.68	—	—	B	20
	2.7	—	310	1910	1330	0.98	2.24	0.88	—	B	20
	2.8	—	390	1910	1390	0.96	2.12	0.87	—	B	20
	2.8	—	590	2180	1790	1.00	2.12	1.10	—	B	20
	2.9	—	780	2700	2280	1.04	3.00	0.90	—	B	20
	2.8	—	960	3060	2820	1.06	3.40	1.00	—	B	20
	3.0	—	0	280	—	0.63	0.56	0.05	—	B	20
	2.9	—	20	440	250	0.90	0.65	0.08	—	B	20
	3.1	—	70	670	420	0.91	0.80	0.25	—	B	20
	2.5	—	110	770	420	1.00	0.95	—	—	B	20
3.2	—	230	960	710	1.00	0.94	—	—	B	20	
3.1	—	360	1060	860	0.96	1.10	0.12	—	B	20	
2.4	—	480	1230	1150	0.95	1.30	—	—	B	20	
3.1	—	580	1260	1130	1.00	1.10	—	—	B	20	
2.6	—	680	1540	1450	0.91	1.60	0.12	—	B	20	
2.4	—	850	1700	1560	0.80	1.50	—	—	B	20	
D l s h l 4	3.3	—	0	260	—	1.10	0.30	—	—	B	20
	3.2	—	50	690	310	1.16	0.60	—	—	B	20
	3.3	—	90	950	490	1.28	0.80	—	—	B	20
	3.3	—	220	1280	840	1.32	0.98	0.55	—	B	20
	3.0	—	320	1420	1020	1.19	1.20	—	—	B	20
	3.2	—	430	1650	1290	1.22	1.36	—	—	B	20
	3.2	—	540	1780	1380	1.25	1.40	0.58	—	B	20
	3.0	—	820	2140	1920	1.16	1.70	0.77	—	B	20
	D l s h l 5	4.2	—	0	860	—	2.15	0.48	0.24	—	B
3.6		—	0	1020	—	2.10	0.50	—	—	B	20
4.2		—	50	1350	650	1.90	0.70	—	—	B	20
4.2		—	100	1400	850	1.94	0.68	—	—	B	20
3.8		—	100	1540	580	1.85	1.00	—	—	B	20
4.2		—	170	1570	970	1.88	0.82	—	—	B	20
3.3		—	170	1610	1130	1.67	1.00	0.26	—	B	20
4.2		—	250	2120	—	2.10	1.05	—	—	B	20
3.5		—	410	2490	1610	1.92	1.20	—	—	B	20
3.8		—	490	2530	1840	2.08	1.20	0.50	—	B	20
3.8		—	500	2500	1500	1.85	1.30	—	—	B	20
4.2		—	580	2880	2060	2.00	1.51	0.36	—	B	20
4.4		—	700	3140	2380	1.79	1.76	—	—	B	20
4.2		—	780	3210	2730	1.92	1.48	—	—	B	20
3.6	—	800	3520	3120	2.08	1.56	—	—	B	20	
3.6	—	1070	3950	3210	2.30	1.74	0.46	—	B	20	
3.9	—	1090	3890	3210	1.87	2.10	—	—	B	20	
D l s h l 6	3.2	—	0	680	—	1.52	0.52	—	—	B	20
	—	—	40	1000	290	1.42	0.76	—	—	B	20
	—	—	110	1090	470	1.72	0.76	—	—	B	20
	2.9	—	110	1270	590	1.78	0.94	—	—	B	20
	2.4	—	230	1550	720	1.43	1.26	—	—	B	20
	4.4	—	260	1640	1260	2.00	0.82	—	—	B	20
	3.8	—	420	2100	1640	1.96	1.16	—	—	B	20
	2.7	—	430	1960	1450	1.39	1.12	—	—	B	20
	4.1	—	500	2180	—	2.00	1.04	—	—	B	20
3.2	—	640	2640	1940	1.78	1.62	0.32	—	B	20	
2.8	—	800	2880	2400	1.33	1.94	0.32	—	B	20	
F l s s i l	3.8	2.1	0	1310	—	1.76	0.94	0.43	23	B	50
	3.8	2.1	60	1720	430	1.71	1.16	—	30	B	100
	3.8	2.1	100	1940	550	1.70	1.34	—	27	B	100
	3.8	2.1	160	2200	920	1.86	1.27	—	36	B	100
	3.8	2.1	220	2250	1050	1.58	1.41	—	34	B	100
	3.8	2.1	310	2790	1390	1.83	1.60	—	32	B	100
	3.6	2.0	420	2710	1660	1.58	1.89	—	34	B	100
	3.8	2.1	550	3720	2030	1.82	2.13	—	31	B	100
	3.8	2.1	760	4190	2970	1.82	2.40	—	35	B	100
	3.8	2.1	760	3920	2600	1.87	2.27	—	35	B	100

表3-7 実験結果

試号	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	ϵ_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ /sec
F1SS1	3.6	2.0	1000	4460	3490	1.77	2.57	—	35	B	100
	3.8	2.1	1030	5050	3680	1.90	2.75	—	39	B	100
	3.8	2.0	1360	5370	—	1.76	3.08	—	33	B	100
	3.8	2.1	1390	5410	4480	1.79	3.12	—	35	B	100
F1SS2	3.3	1.9	0	1030	—	1.37	0.91	0.38	24	B	50
	3.3	1.9	90	1470	740	1.34	1.32	—	34	B	100
	3.3	1.9	210	1970	910	1.47	1.47	—	32	B	100
	3.2	1.9	300	2120	1120	1.35	1.72	—	29	B	100
	3.3	1.9	510	2830	1960	1.45	2.20	—	35	B	100
	3.2	1.8	740	3270	2600	1.51	2.50	—	37	B	100
F1SS3	3.2	1.9	0	1010	—	1.22	0.90	0.38	20	B	50
	3.2	1.9	50	1200	480	1.17	1.16	—	19	B	100
	3.2	1.9	80	1310	630	1.20	1.28	—	29	B	100
	3.2	1.9	150	1590	690	1.21	1.43	—	33	B	100
	3.2	1.9	210	1830	990	1.28	1.64	—	28	B	100
	3.2	1.9	310	2100	1280	1.29	1.83	—	28	B	100
	3.1	1.8	390	2320	1570	1.31	2.00	—	34	B	100
	3.2	1.9	520	2600	1930	1.35	2.29	—	31	B	100
	3.2	1.8	630	2980	2180	1.32	2.60	—	35	B	100
	3.2	1.8	770	3350	2550	1.34	2.81	—	33	B	100
	3.2	1.8	960	3750	3410	1.34	2.80	—	39	B	100
	3.2	1.8	1060	4030	3340	1.35	3.29	—	36	B	100
F1SS3'	3.1	1.8	90	1230	—	1.07	1.12	—	—	—	100
	—	—	190	1700	—	—	1.45	—	—	—	100
	—	—	290	2050	—	—	1.73	—	—	—	100
	—	—	380	2320	—	—	2.20	—	—	—	100
	—	—	490	2610	1890	—	2.59	—	34	B	100
	3.1	1.8	320	1960	—	1.18	1.93	—	—	—	100
	—	—	530	2690	2320	—	2.50	—	32	B	100
	—	—	500	2470	—	1.24	2.00	—	—	—	100
	—	—	600	2800	—	—	2.30	—	—	—	100
	—	—	700	3050	—	—	2.65	—	—	—	100
—	—	800	3260	2760	—	3.00	—	36	B	100	
F1SS4	3.3	2.1	0	1280	—	1.80	0.89	0.53	23	B	50
	3.2	1.9	60	1640	640	1.66	1.12	—	26	B	100
	3.2	1.9	100	1870	680	1.74	1.50	—	28	B	100
	3.2	1.9	160	2250	1040	1.95	1.41	—	—	—	100
	3.2	1.9	220	2430	1160	1.77	1.58	—	28	B	100
	3.2	2.0	420	3080	—	1.80	1.91	—	37	B	100
	3.0	1.9	540	3370	2150	1.75	2.12	—	33	B	100
	3.0	1.9	760	4200	2800	1.89	2.33	—	31	B	100
	3.0	1.9	1000	5020	4360	1.88	2.83	—	37	B	100
	F1SS4'	2.9	1.9	260	2570	—	1.74	1.72	0.40	—	—
—		—	400	3200	—	—	2.14	—	—	—	100
—		—	500	3360	—	—	2.40	—	—	—	100
—		—	600	3680	—	—	2.66	—	—	—	100
—		—	700	3870	—	—	2.95	—	—	—	100
—		—	800	4030	—	—	3.20	—	—	—	100
—		—	900	4180	3450	—	3.42	—	30	B	100
3.0		1.9	60	1600	—	1.54	1.20	0.35	—	—	100
—		—	100	1900	—	—	1.38	—	—	—	100
—		—	200	2390	—	—	1.74	—	—	—	100
—		—	300	2700	—	—	2.05	—	—	—	100
—		—	400	2950	—	—	2.35	—	—	—	100
—	—	500	3270	—	—	2.68	—	—	—	100	
—	—	600	3550	2750	—	2.95	—	33	B	100	
G1SS1	4.1	1.9	0	1460	—	2.32	0.72	0.17	—	B	10
	4.0	1.8	50	1670	—	2.32	0.83	0.30	23	B	50
	4.1	1.8	110	1860	—	2.16	0.93	0.37	21	B	50
	4.0	1.9	190	2210	1000	2.36	1.10	0.36	24	B	50
	4.0	1.9	250	2310	1340	2.34	0.92	—	27	B	50
	4.0	1.8	310	2480	1480	2.32	1.07	0.25	29	B	50
	4.1	1.9	370	2910	1560	2.28	1.34	—	28	B	50
	4.0	1.8	560	3290	2380	2.40	1.54	0.37	31	B	50
	4.2	1.9	760	4060	2660	2.51	2.02	0.45	30	B	50
	4.0	1.9	940	4520	3280	2.36	2.42	—	33	B	50
4.1	1.8	1090	4880	3850	2.64	2.29	0.47	32	B	50	
G1SS2	3.4	1.7	0	1090	—	1.59	0.74	0.28	—	B	10
	3.5	1.7	120	1650	880	1.76	1.02	—	26	B	50
	3.6	1.8	220	2170	1060	1.80	1.01	—	29	B	50
	3.5	1.7	340	2520	—	1.94	1.60	0.42	30	B	50
	3.4	1.7	450	2790	—	1.94	1.59	0.54	30	B	50
	3.7	1.8	540	3220	2070	1.99	1.90	—	32	B	50
	3.6	1.7	660	3400	2660	1.88	2.03	—	35	B	50
	3.6	1.8	870	4130	2990	1.88	2.72	—	27	B	50
G1SS2'	1.8	1.0	0	130	—	2.33	0.69	—	—	B	10
	1.5	0.8	40	390	260	3.11	1.58	—	25	B	50
	1.9	1.0	70	600	350	3.33	1.80	—	24	B	50
	1.9	1.0	100	680	440	3.43	1.90	—	23	B	50
	1.9	0.9	150	910	600	3.56	2.45	—	33	B	50
	1.9	0.9	210	1050	—	3.47	2.80	—	34	B	50

表3-8 実験結果

記号	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	ϵ_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE	
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ/sec	
G c o a l 1	1.8	1.0	290	1190	—	3.67	2.90	—	34	B	50	
	1.8	0.9	400	1340	1120	3.70	2.81	—	36	B	50	
	1.8	0.9	490	1460	—	3.64	3.20	—	35	B	50	
	1.9	0.9	560	1720	—	3.80	3.38	—	35	B	50	
	1.7	1.0	610	1570	—	3.53	3.34	—	33	B	50	
G c o a l 2	1.5	0.6	0	130	—	2.89	0.64	—	—	B	10	
	1.3	0.7	50	360	230	3.07	1.08	—	31	B	50	
	2.0	0.8	60	610	320	3.13	2.00	—	28	B	50	
	1.9	0.9	100	680	380	3.33	1.89	—	25	B	50	
	1.3	0.7	160	780	610	3.00	2.34	—	32	B	50	
	1.7	—	200	930	—	3.46	2.41	—	35	B	50	
	1.5	0.8	300	950	—	3.37	2.35	—	37	B	50	
	1.3	—	410	1320	760	3.36	3.12	—	33	B	50	
	3.5	1.8	0	1290	—	3.01	0.47	0.18	21	B	10	
3.2	1.7	50	1640	450	2.85	0.70	0.23	23	B	50		
3.0	1.7	100	1950	820	3.21	0.75	0.23	26	B	50		
3.2	1.7	160	2360	1000	3.21	0.90	0.25	27	B	50		
3.2	1.8	200	2660	1360	3.47	0.92	0.23	—	B	50		
3.2	1.8	290	3060	1490	3.47	1.05	0.29	28	B	50		
3.4	1.8	380	3410	1940	3.21	1.23	0.34	34	B	50		
3.0	1.7	480	3800	2680	3.21	1.45	0.36	36	B	50		
3.5	1.9	730	4770	3530	3.49	1.56	0.41	36	B	50		
M i s s i l '	3.6	1.8	0	1170	—	2.42	0.43	0.14	18	B	10	
	2.9	1.7	40	1530	280	3.81	0.51	0.71	28	B	50	
	2.8	1.6	90	1990	370	2.46	0.65	0.20	31	B	50	
	2.8	1.6	150	2230	470	2.79	0.95	0.33	31	B	50	
	2.9	1.7	190	2530	610	3.20	1.00	0.30	32	B	50	
	2.9	1.6	290	2980	1010	2.06	1.65	—	33	B	50	
	3.2	1.7	380	3550	1130	3.47	1.13	0.36	33	B	50	
	3.2	1.7	500	3900	2140	3.21	1.50	0.36	31	B	50	
	3.5	1.8	730	4880	3180	3.73	1.40	—	34	B	50	
O m d i l	—	—	0	471	—	0.53	1.09	—	23	B	20	
	—	—	300	1066	932	0.37	2.48	—	35	B	20	
	—	—	550	1328	—	0.42	4.20	—	40	T	20	
	—	—	750	1800	—	0.58	2.52	—	36	D	20	
P l t u f f i l	—	—	0	641	—	0.86	0.08	—	17	B	20	
	—	—	60	944	—	0.97	1.26	—	20	B	20	
	—	—	100	921	—	—	—	—	22	B	20	
	—	—	150	1313	—	0.86	1.62	—	21	B	20	
	—	—	150	1291	752	0.88	1.63	—	24	B	20	
	—	—	300	1496	—	0.80	1.85	—	31	B	20	
	—	—	300	1687	1307	0.96	2.35	—	34	B	20	
	—	—	400	1760	—	0.98	2.04	—	35	T	20	
	—	—	500	1785	—	0.92	3.78	—	—	D	20	
	—	—	500	2035	—	1.05	2.96	—	—	D	20	
	—	—	515	1942	—	0.95	3.73	—	—	D	20	
	—	—	590	2048	—	0.88	3.58	—	—	D	20	
	—	—	750	2457	—	0.92	3.85	—	—	D	20	
	—	—	750	2310	—	0.98	3.82	—	—	D	20	
	—	—	1000	2320	—	1.24	2.80	—	—	D	20	
	—	—	1000	2420	—	0.95	2.16	—	—	D	20	
	—	—	1265	2605	—	0.93	2.50	—	—	D	20	
	—	—	1500	2350	—	1.26	1.22	—	—	D	20	
	—	—	1705	2675	—	—	1.55	—	—	D	20	
	—	—	-47	0	—	—	—	—	0	—	—	20
	—	—	-19	230	—	1.02	0.211	0	—	—	—	20
	—	—	-35	410	—	1.25	0.398	0	—	—	—	20
	—	—	-27	640	—	1.47	0.676	15	—	—	—	20
	—	—	5	805	—	—	—	24	—	—	—	20
	—	—	19	902	—	1.41	1.091	20	—	—	—	20
	—	—	87	1065	—	—	—	23	—	—	—	20
	—	—	126	1175	—	1.39	1.340	28	—	—	—	20
—	—	142	1290	—	—	—	23	—	—	—	20	
—	—	200	1430	—	1.52	1.493	30	—	—	—	20	
—	—	324	1550	—	—	—	35	—	—	—	20	
Q l l i m e i l	—	—	0	584	—	4.44	0.19	—	27	B	20	
	—	—	50	869	626	4.00	0.35	—	34	B	20	
	—	—	150	1292	—	7.80	0.53	—	36	T	20	
	—	—	300	1561	—	1.78	1.70	—	35	D	20	
	—	—	570	2437	—	6.30	2.08	—	—	D	20	
	—	—	1500	4020	—	5.20	3.36	—	—	D	20	
	—	—	-17	0	—	2.03	0.017	—	0	—	20	
	—	—	-18	105	—	—	—	—	0	—	—	20
	—	—	-18	201	—	6.94	0.083	—	0	—	—	20
	—	—	-23	345	—	6.97	0.068	—	0	—	—	20
—	—	-13	455	—	6.58	0.121	—	0	—	—	20	

表3-9 実験結果

記号	Vp	Vs	σ_3	σ_1	σ_R	E	ϵ_{crt}	ϵ_{vmax}	θ	MODE	STRAIN RATE
	Km/sec	Km/sec	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	Kgf/cm ²	$\times 10^5$ Kgf/cm ²	%	%	degrees		μ /sec
Q l l i m e e l l	—	—	-12	545	—	—	—	—	0	—	20
	—	—	-6	608	—	7.11	0.131	—	5	—	20
	—	—	-20	662	—	6.77	0.161	—	8	—	20
	—	—	2	739	—	7.58	0.239	—	4	—	20
	—	—	6	813	—	6.75	0.253	—	9	—	20
	—	—	19	901	—	7.33	0.259	—	13	—	20
	—	—	49	998	—	6.59	0.458	—	19	—	20
	—	—	50	1000	—	6.87	0.364	—	18	—	20
	—	—	59	1120	—	7.03	0.698	—	27	—	20
	—	—	95	1200	—	7.41	0.670	—	23	—	20
	—	—	101	1235	—	7.08	1.579	—	—	—	20
	—	—	127	1370	—	7.29	1.170	—	—	—	20
	—	—	183	1525	—	7.03	1.322	—	—	—	20
	—	—	227	1620	—	7.48	0.804	—	—	—	20
Q l l i m e e l l'	—	—	0	686	—	4.18	0.272	—	—	B	20
	—	—	30	863	—	5.35	0.285	—	—	B	20
	—	—	45	906	—	5.48	0.300	—	—	B	20
	—	—	65	1076	—	6.11	0.289	—	—	B	20
	—	—	75	1029	—	5.29	0.296	—	—	B	20
	—	—	90	1079	—	5.70	0.344	—	—	B	20
	—	—	115	1189	—	5.95	0.320	—	—	B	20
	—	—	120	1170	—	5.60	0.317	—	—	B	20
	—	—	125	1161	—	5.84	0.399	—	32	B	20
	—	—	160	1355	—	6.10	0.359	—	—	T	20
	—	—	195	1361	—	5.90	0.395	—	—	T	20
	—	—	200	1399	—	6.50	0.623	—	—	T	20
	—	—	220	1496	—	6.50	0.445	—	—	T	20
	—	—	240	1439	—	6.70	0.899	—	—	D	20
	—	—	250	1508	—	5.60	0.590	—	—	D	20
	—	—	280	1635	—	6.01	0.630	—	—	D	20
—	—	505	2155	—	6.06	0.673	—	—	D	20	
—	—	770	2815	—	7.17	1.160	—	—	D	20	
Q l l i m e e l l	—	—	0	922	—	3.00	0.42	—	30	B	20
	—	—	60	1167	—	3.80	0.42	—	—	B	20
	—	—	150	1570	900	4.75	0.64	—	34	T	20
	—	—	200	1733	1376	5.62	0.85	—	34	T	20
	—	—	300	2069	1693	5.60	1.42	—	36	T	20
	—	—	450	2526	—	5.63	2.35	—	—	D	20
	—	—	620	3086	—	6.05	5.53	—	—	D	20
	—	—	750	3180	—	5.66	1.88	—	40	D	20
	—	—	1000	3280	—	5.65	2.55	—	—	D	20
	—	—	1195	3861	—	4.20	1.78	—	—	D	20
—	—	1500	3880	—	4.45	2.48	—	—	D	20	
T l t t b l l	4.0	2.1	0	620	—	2.07	0.30	0.17	19	B	10
	4.1	2.0	10	840	—	1.60	0.60	0.29	30	B	50
	4.0	1.9	20	1000	340	1.97	0.50	0.23	29	B	50
	3.9	1.9	120	1160	720	1.70	0.80	0.47	28	B	50
	4.1	1.9	150	1300	910	1.55	1.00	0.60	34	B	50
	4.1	2.1	210	1460	1110	1.42	1.10	0.41	32	B	50
	3.7	1.8	310	1660	1370	2.28	0.59	—	32	B	50
4.1	1.9	510	2160	1860	1.40	1.80	0.41	30	T	50	
T l t b l l	2.3	1.1	0	180	—	0.41	0.52	0.35	18	B	10
	2.3	1.4	10	370	270	0.51	1.20	—	17	B	50
	2.9	1.5	40	620	400	1.11	0.80	0.45	30	B	50
	2.7	1.5	100	790	680	1.42	0.80	0.40	30	B	50
	2.5	1.4	120	840	700	0.91	0.80	0.54	34	B	50
	2.0	1.3	220	1000	980	0.66	1.04	0.93	—	T	50

Vp: P波速度 Vs: S波速度 σ_3 : 封圧 σ_1 : 破壊強度
 σ_R : 残留強度 E: 変形係数 ϵ_{crt} : 限界歪 ϵ_{vmax} : 最大圧縮体積歪
 θ : 破断角 (破断面と σ_1 軸の角度)
 MODE: 破壊の形態 B: 脆弱 T: 脆性~延性遷移 D: 延性

4. 封圧下の破壊強度特性

破壊強度—封圧の関係，すなわち破壊限界線は，いずれの供試岩石についても図4～図5に示すように，ある点を境に屈折する2直線で表現できることがわかる。これは本研究で得られた知見のうちで，注目すべきものの1つである。なお，このような傾向は，続報で述べるように負荷経路や供試体形状に依存しない。

屈折前の直線が適用できる封圧範囲を領域Ⅰ，屈折後を領域Ⅱとして夫々の破壊強度—封圧に関する相関係数 R_1 および R_2 を供試岩石別に求め，それらの結果を表4に示す。これらの係数は領域Ⅰ，Ⅱのいずれにおいても高い値となっており，破壊限界線が双線形であることに対する実験的な傍証を与えていると言える。なお，概して領域Ⅱの方が領域Ⅰに比べ良好な直線性を示すものが多い。同表では，屈折点の封圧 σ_3^* とかぶり圧 γh の対比が示されている。 γ は地層平均比重で 2.50 gf/cm^3 を仮定した。 h は供試岩石の賦存深度である。図6は，これら σ_3^* と γh との相関をグラフにしたものである。図から明らかなように， σ_3^* と γh とは良い一致を示しており，破壊限界線がかぶり圧に相当する封圧下で屈折することを意味している。

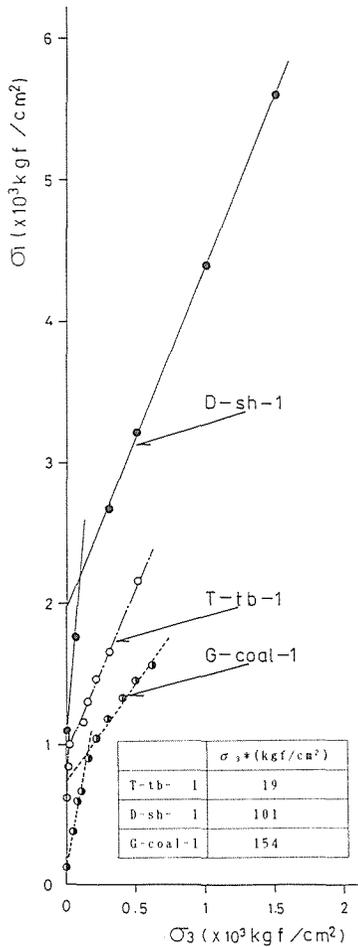


図4 破壊強度と封圧の関係(1)
 σ_3 : 屈折点の封圧

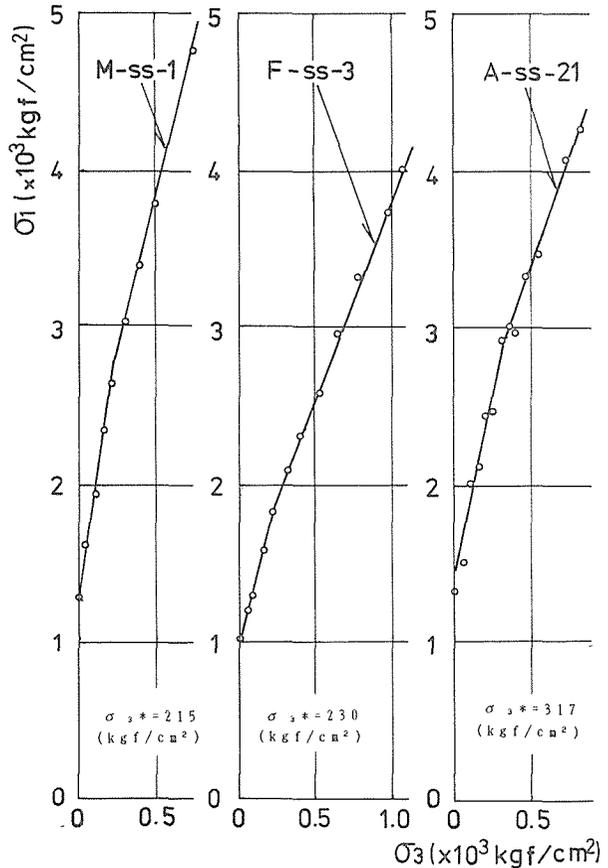


図5 破壊強度と封圧の関係(2)
 σ_3 : 屈折点の封圧

表4 領域IおよびIIにおける適用直線の相関係数

記号	r_h (Kgf/cm^2)	σ_3^* (Kgf/cm^2)	R ₁	R ₂
A - ss - 3	206	180	0.979	0.996
4	211	246	0.990	0.995
6	264	290	0.985	0.999
10	275	278	0.942	1.000
11	275	278	0.987	0.629
12	275	302	0.986	1.000
13	275	275	0.944	0.994
15	275	276	0.997	0.812
17	275	310	0.971	0.997
18	298	330	0.984	1.000
19	298	280	0.992	0.990
20	308	309	0.973	0.976
21	335	317	0.971	0.995
22	280	254	0.964	0.961
A - sh - 2	275	261	0.982	0.998
B - s, sh - 1	213	192	0.932	0.977
D - sh - 1	113	101	1.000	1.000
2	188	189	0.994	1.000
3	180	192	0.998	0.987
5	190	181	0.936	0.987
6	203	155	0.917	0.991
F - ss - 1	230	231	0.993	0.969
3	230	230	1.000	0.999
3'	230	223	1.000	0.985
4	230	159	0.998	0.998
4'	230	241	0.995	0.982
G - ss - 1	210	191	0.998	0.995
2	210	235	1.000	0.998
G - coal - 1	150	154	0.989	0.990
2	170	168	0.974	1.000
M - ss - 1	200	215	1.000	1.000
1'	200	221	0.990	0.994
T - tb - 1	20	19	0.996	1.000
2	20	23	1.000	0.985

つまり堆積岩の場合、破壊限界線としてかぶり圧で屈折する「双線形破壊条件」(Bilinear Fracture Criteria, BFC) が最も良くあてはまるように考えられる。この BFC は次式のように表現できる。

$$0 \leq \sigma_3 \leq \gamma h \quad \sigma_1 = A_1 \sigma_3 + C_0$$

$$\gamma h \leq \sigma_3$$

$$\sigma_1 = A_2 \sigma_3 + (A_1 - A_2) \gamma h + C_0$$

ここに、 σ_1 : 破壊強度、 σ_3 : 封圧、 C_0 : 一軸圧縮強度、 A_1, A_2 : 定数

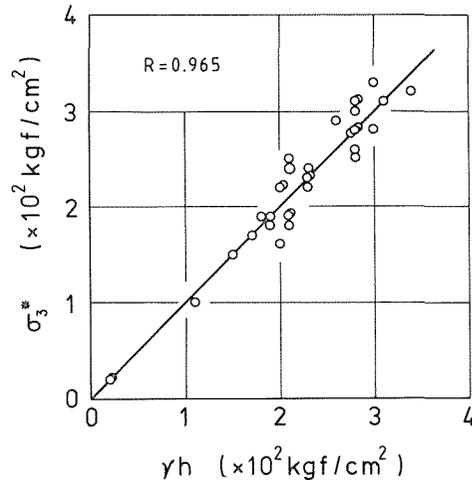


図6 屈折点の封圧とかぶり圧の相関関係

堆積岩の力学的挙動全般にこのようなかぶり圧依存性があることは、既に予想されてい

たが⁵⁾、上述の多数の事例によって、その妥当性に関し一層の重みが付けられたといえよう。破壊限界線が折れ曲がる物理的な意味は、岩石を賦存の初期地圧状態（平坦な地層であれば、これはかぶり圧にほぼ等しい）の作用下にある地層から切り取るにより、地圧が解放され、その内部構造にゆるみを生じることに関係していると考えられる。すなわち、領域 I の封圧下では、岩石の内部構造がゆるんだ状態になっており、封圧の増加と共に次第に圧縮され、より密な構造に移行する。一方、領域 II の封圧下では、地中の賦存時の拘束された構造（その意味では安定な構造）に近い状態になっていると推定される。

領域 I, II を夫々開口クラック系および閉鎖クラック系と見なして検討した結果は、続報で述べることにしたい。

5. 結 言

本文ではデータの掲載に紙数の大半を費やし、実験結果の内破壊強度特性の一部を述べるに止まった。続報からは、緒言で列挙した残りの項目について述べる予定である。

なお、本研究のデータ整理においては、当該講座大学修士課程 2 年 中山岳志君、同 1 年 児玉淳一君に協力を戴いた。記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) 木下重教, 山下 秀, 石島洋二, 中村 章, 西原彰夫: 北海道大学工学部研究報告, 76号 (昭50) p. 1-10
- 2) 同上 p. 11-17
- 3) 木下重教, 石島洋二, 後藤龍彦, 中村 章: 北海道大学工学部研究報告, 90号 (昭53), p. 11-21
- 4) 同上 p. 23-36
- 5) 中村 章: 学位論文 (昭53), 北海道大学