

脆性材料の破壊と変形機構のモデル化に関する実験と考察

日本大学工学部 田野久貴  
 東北大学工学部 佐武正雄

1. 緒言

本報告は、柱状要素を並列したモデルの圧縮破壊試験を行ない、構成要素の力学特性とモデルの挙動との関連性について調べたものである。これまでも、要素の強度の確率分布とモデル(100本の要素よりなる)の耐力力との関係等について若干の考察を行なったが、今回は新たに行なった実験結果をもとに、要素の変形能力や破壊モードとモデルの挙動との比較を行ない、考察を加える。

	平均荷重	要素損傷率	変動係数
破壊開始点	11.9 t	1.7%	106.9%
最大耐力力点 (P <sub>max</sub> )	12.4 t	28.3%	26.2%
post failure (0.7P <sub>max</sub> )	8.9 t	82.6%	15.6%

表-1 荷重レベルと要素の損傷率(各10個)

2. 要素の強度及びヤング率の分布、モデルの耐力力と要素の損傷率について

2.1 要素の強度の確率分布と最大耐力力: 石コウを用いた要素の強度の分布はほぼ正規型に近いという結果が得られた。この分布を用い、要素の逐時破壊における応力再配分を考慮して得られたモデルの最大耐力力(P<sub>max</sub>)は実験値に近い値を示したが、P<sub>max</sub>以後のいわゆる post-failure の領域における荷重変位の関係については大きな相違がみられた。

2.2 破壊過程における要素の損傷率: 表-1は破壊開始点、P<sub>max</sub>及びP<sub>max</sub>の70%まで荷重が低下した点における損傷率を調べたものである。応力再配分のみを考慮した計算では、P<sub>max</sub>における損傷率は10数パーセントと推定された<sup>1)</sup>。しかし表-1の結果は30%に近いことを示しており、実際には多くの破損が観察される。

2.3 要素のヤング率Eの確率分布: 2.1においては、要素の応力(強度)の分布のみに着目し、そのヤング率は一定と仮定した。すなわち、強度と破壊時のヒズミは比例することを意味している。一方、図-1は要素の最大応力とそのときのヒズミの関係を1個の点で示したものである。これによると、強度と破壊時のヒズミの間には、ある程度の相関は認められるが必ずしも比例しない。従って、通常のような強制変位試験では、これらのヤング率の相違によって各要素間に応力の差が生じる。すなわち、平均応力を基本とした応力再配分の仮定には無理があり、その結果再配分量や要素の損傷率に実際と相違が生じると考えらる。

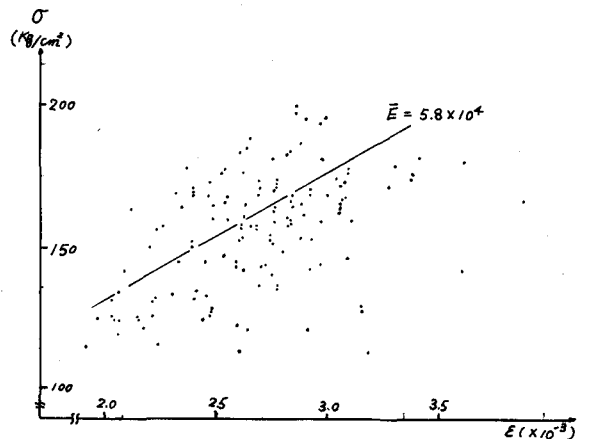


図-1 要素のヤング率Eの分布(1100本、E-bar:平均ヤング率)

そこで今回は、次に述べるような実験を行ない、主に要素のヒズミに重点を置いた実験を実施した。

3. 実験方法及び実験結果

3.1 実験方法: 要素の材料(石コウ)とその寸法(1 x 1 x 20 cm)及び載荷方法等は今までと同様である。

本実験では要素の側面中央に0.2 mm程度のへこみを作り、長さ8 mmのストレインゲージをはりつけ、単一要素及びモデルの部材としての要素のヒズミ等を測定した。なお、荷重の検出にはロードセルを、変位の測定には電気式ダイヤルゲージを使用

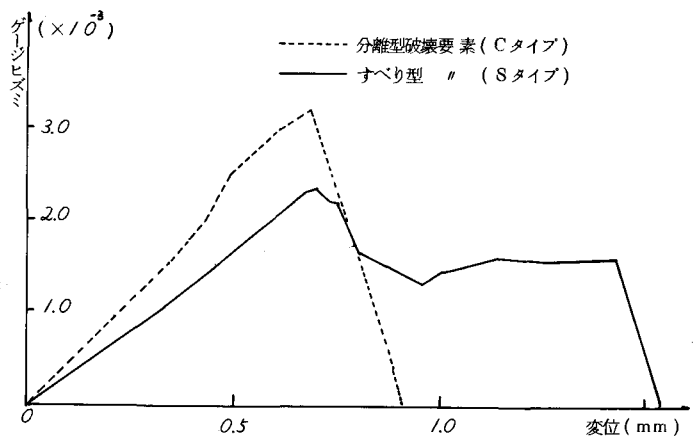


図-2 単一要素の変位とゲージによるヒズミの例

した。

### 8.2 単一要素の応力

**ヒズミ関係：** 図-2は要素一本に荷重した場合の両端面間の変位とゲージによるヒズミとの関係における典型的な例である。たとえば、ここではCタイプと称しておくが、 $P_{max}$ 以後に急速にそのヒズミの解放が生じるものと、解放速度の比較的遅いSタイプである。

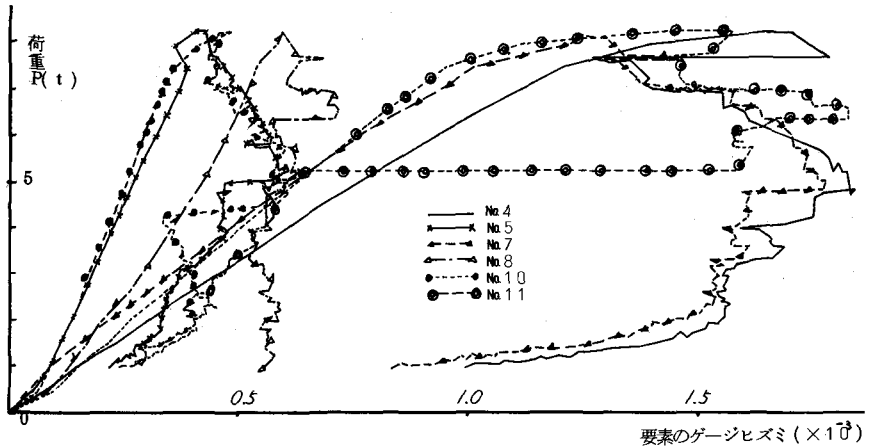


図-3 モデルに作用する荷重とモデルを構成する要素のヒズミ(ストレインゲージによる)

Sタイプの要素は、破損した部分の影響と思われる変位が大きく現われており、その後不安定となる。すなわち、両者には破損以後の変位能力に大きな相違が存在する。

### 8.3 モデルの構成部材としての要素の挙動：

モデルを構成する100本の要素のうち、10本にストレインゲージをはりつけ、得られた荷重と要素のゲージヒズミとの関係を図-3に示す(ゲージの配置は図-6参照)。なお、図-3には10本中6本のみを示してある。同図において、各要素の示す関係は $P_{max}$ で折れ曲がっているが、これは荷重が $P_{max}$ 以後減少するためである。 $P_{max}$ 以後において、ある変位を行なったのちほとんどの要素に、急激にヒズミの減少する点が存在する。この点はその要素における破損点である。この実験例では図-3から明らかのように、ヒズミを測定しているほとんどの要素が $P_{max}$ 以後に破損しているが、これは偶然であると考えられる。 $P_{max}$ に達する前の7.5t附近において、勾配の変化する点が多く要素にみられる。これは他の要素の破壊ないしは破損によってそのヒズミ(応力)が増加する、すなわち応力再配分の生じている点である。

さて、図-3には、ヤング率の相違によって破損以後のヒズミの解放の状態に明らかな違いがみられる。一方、図-4は同じ図-3の現象をモデルの変位と要素のヒズミとで表わしたものである(図-3, 4及び6における要素の番号は対応している)。この図-4によると、要素の破損点は一層明らかである。また、すでに述べたよ

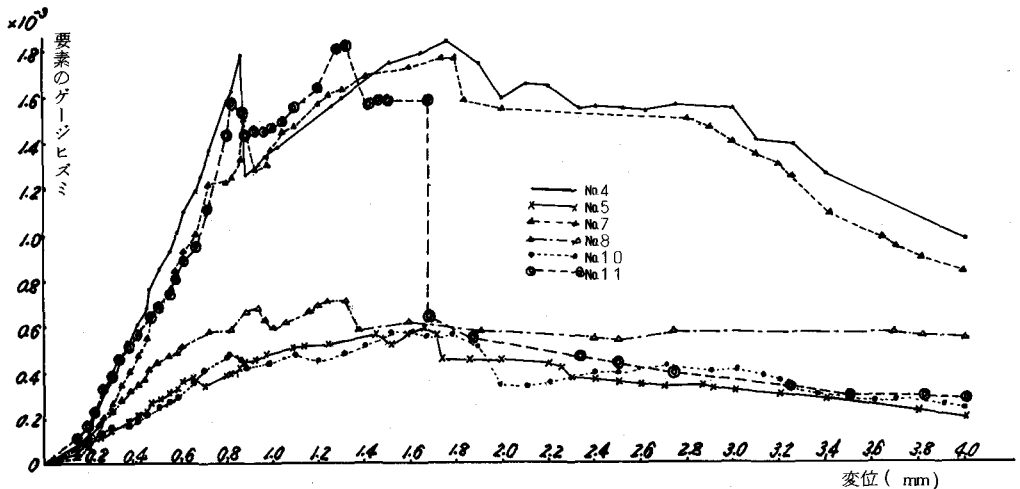


図-4 モデルの変位と要素のヒズミ(ストレインゲージによる)

うに、破損点において急速にヒズミが解放されて大きなピークの生じるものと、比較的ゆるやかに解放されるものとに大別される。さらに前者は、第2のピークをもつものが多い。この第2のピークはほぼ第1のピーク程度のヒズミを示す。

#### 4. 考察

**4.1 要素の破壊モードの分類とモデル化：** 単一要素の破壊モードには、先にも述べたように最大耐力力以後のヒズミの挙動によって、その解放の急なものをCタイプ、そして遅いものをSタイプと称している。これらのタイプと対応すると考えられる、具体的な破壊のモードを図-5に示す。すなわち、Cタイプはいわゆる分離型と、Sタイプはすべり型と対応させて考えている。



分離型 すべり型

図-5 破壊モード

**4.2 単一要素及び部材としての要素の破壊モードの比較：** 構成部材としての要素の破壊モードは周囲の他の要素による拘束があると、単一の場合のそれと異なると考えられる。すなわち、Sタイプのように横方向に大きな変形を示すモードは、周囲の状態に影響され易い。これに対してCタイプは、破壊角度（荷重方向からの）が小さいため、わずかな横変位によってもヒズミが解放される。

Sタイプのモードは、拘束の影響を次のように受けると考えられる。すなわち、隣接する要素との間ゲキが充分大きいと直ちにヒズミの解放が生じるが、小さいと解放は充分ではなく、その状態を保持しつづける場合は外力による変位が増加すると、再びヒズミが蓄積されよう。そしてその要素固有のヒズミ（応力）に達すると再び局部的な破壊による要素の破損（第2のピーク）が生じると考えられる。同一要素内でのこの局部的な破壊強度は、二つのピークにおいて等しいとすると、両者のピーク時のヒズミは同一となる。図-4の結果はある程度これを裏づけるものと思われる。ここにおいて、破損個所（ピーク）を1つ有するものをS<sub>1</sub>タイプ、2つのものをS<sub>2</sub>タイプとして区別する。

さて、Sタイプにおいてその破損時の一時的なヒズミの低下量の検討を、簡単な仮定のもとに行なってみよう。Sタイプの横変位は、その破壊角と要素間初期間ゲキ、ポアソン比が与えられれば、縦変位との対応として簡単に求められる。実測によって得た、ポアソン比0.23、初期間ゲキ0.07mmを用いて試算した結果では、20~30%程度の低下が推定された。ここでは、間ゲキは要素の破損数の増加に影響されないと仮定している。

**4.3 ヤング率の影響による要素間の相互作用（S<sub>1</sub>タイプとS<sub>2</sub>タイプの比較）：** 図-3あるは4の実験結果において、破損後急速なヒズミ解放のない、小さなピークのS<sub>1</sub>タイプと、するどいピークもち、かつ、二つのピークをもつS<sub>2</sub>タイプのあること述べた。そして、この両者にはヤング率の相違がみられた。そこでここにおいては、この二つのタイプとそれぞれのヤング率とが関連することを述べる。

Sタイプの破損におけるヒズミ解放速度は比較的遅く、周囲の要素に充分応力の再配分が可能であると仮定すると、これはいわゆる（局部的な）荷重一定条件に相当する。この条件のもとでは、破損する要素のヤング率が平均ヤング率Eより大きな場合には、破損による再配分量も大きく周囲の変位も大きい。したがって、この要素と周囲との相対変位は小さく、ヒズミの解放も小さい。これがS<sub>1</sub>であり、逆の場合にS<sub>2</sub>の挙動を示すと考えられる。

**4.4 モデルの耐力力と変位能力に関する若干の計算結果：** 表-2はこれまでの考察を模式的にまとめたものである。この表における各々の破壊モードの要素に占める比率（破壊確率）は実験によって定められるものと考えられる。数値計算に際し、ヤング率及びその分布は図-1を、ポアソン比及び初期間ゲキは4.2の値を用いた。破壊条件は変位で与え、各レベルで複数個生じる破損要素は、破壊モードの比率（ $p=0.2, q=0.8$ を用いた）に応じて分配される。また、Sタイプについては、平均ヤング率Eと破損する要素のヤング率との大小関係によってS<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>に分類し、S<sub>2</sub>における第一次と第二次破損間におけるヤング率は、第一次のその70%と仮定した。この方法によって求めた各要素の応力の合計を荷重とした。

その結果（ $P_{max}=1.22t$ 、損傷率 $D=2.7\%$ ）は表-1に示した結果（ $P_{max}=1.24t$ 、 $D=2.8.3\%$ ）と比較的良好一致を示した。しかし、変位能力にはまだ差があるが、これはSタイプの取扱いが充分ではないためと考えられる

破壊モード		$\frac{E}{E}$	荷重-変位図 (要素)
A	S	$\frac{E_1}{E} > 1$	
		$\frac{E_1}{E} < 1$	
φ	C		

表-2 破壊モードと要素の荷重・変位の関係

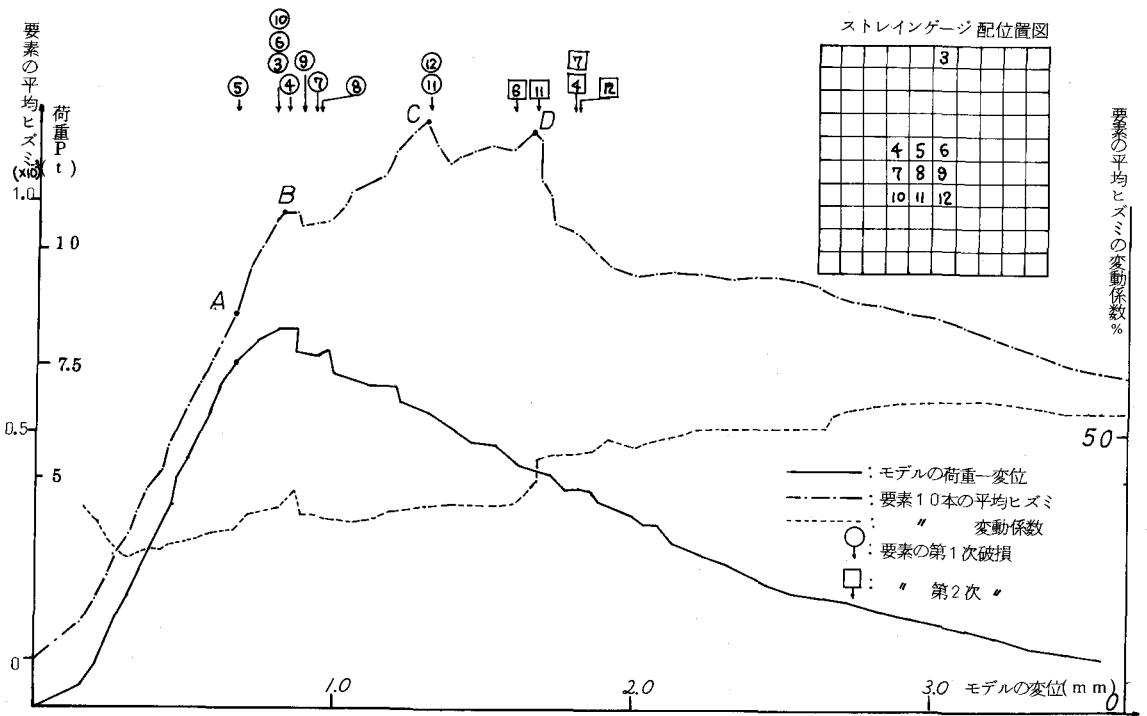


図-6 モデルの荷重-変位と要素10本の平均ヒズミとの関係

5. 柱状要素並列モデルの逐時破壊現象 (結語にかえて)

図-6は、モデルの荷重-変位、構成要素の平均ヒズミ(10本)及び変動係数を変位との関係で表わしたものである。また、各要素の一次・二次破損位置も示してある。これら10本の要素は必ずしも全要素を代表し得るとは言い難いが、これらの平均ヒズミとモデルの荷重の変化とが良く一致しているのがわかる。

- 1) A点はモデルの破壊開始点と推定され、応力(ヒズミ)の再配分がみられる。
- 2) B点附近はこれらの要素の第一次破損点であり、集中しているが逐時破損である。また、この点が $P_{max}$ であるが、この近傍において50%の一次破損が生じている。
- 3) B C間にはほぼ直線であるが、これは未破損要素(No 11, 12)の影響による。
- 4) C点は10本の要素すべてに一次破損の生じる点である。また表-1の結果を考慮すると、この点までに約80%の要素の一次破損がモデルに生じる。
- 5) C D間の一次破損後も若干のヒズミ増加がみられ、耐荷能力のあることがわかる。
- 6) D点において半数(5本)の要素に第二次破損が生じている。
- 7) 平均ヒズミは、要素破損とよく対応している。その変動係数は、モデルの変形にともないほぼ一定の勾配で増加するが、破壊過程の進行とともにある一定値に落ちつく傾向にあるのは興味深いことである。

参考文献

- 1) 田野久貴, 佐武正雄: 脆性材料の破壊発生とその伝播機構に関する考察, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, 1977, 55~60.
- 2) 田野久貴, 佐武正雄, 城田政次: 脆性材料の破壊と変形機構のモデル化に関する一考察, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集 第3部, 343~344.

Experimental Study on the Mechanism of Fracture and Deformation  
of Brittle Materials by Models

Hisataka Tano Nihon Univ.  
Masao Satake, Tohoku Univ.

Abstract

The objective of the model studies described in this reports is to determine on the uniaxial compressive strength of brittle materials and the deformability after failure.

The models being tested consist of 100 elements which are put in paralell to the direction of axial load. A element is a 1x1x20cm column, which is made by hydrated gypsum.

Main results are as follows;

- (1) The young's modulus of a element has a probability distribution.
- (2) There are two typical fracture modes of a single element. One is a cleavage type, the other is a slip type.
- (3) After failure the cleavage type elements show a relatively sharp decrease in stress. The other hand, the slip type elements have a slow rate of stress drop.
- (4) The interaction of elements of a modal after failure has effects upon the release rate of stress, the slip type is influenced considerably.