



Title	衝撃荷重下における岩石の力学的挙動について
Author(s)	木下, 重教; Kinoshita, Shigenori; 佐藤, 一彦 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 83, 51-61
Issue Date	1977-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41410
Type	departmental bulletin paper
File Information	83_51-62.pdf



衝撃荷重下における岩石の力学的挙動について

木下重教* 佐藤一彦* 川北稔*

(昭和51年9月30日受理)

On the Mechanical Behaviour of Rocks under Impulsive Loading

Shigenori KINOSHITA, Kazuhiko SATO, Minoru KAWAKITA

(Received September 30, 1976)

Abstract

A compression test with Split Hopkinson Bar Method was carried out to investigate the mechanical behaviour of rocks under impulsive loading. Rocks selected for the experiment were limestone with fine grain size and coarse ones and tuff and sandstone occurring in two collieries. The experimental work confirmed that the response of rocks to the impact varies with the intensity of the stress pulse, in other words, the mechanical behaviour of rocks is sensitive to the strain rate in high rate compression. Taking these results, into account in this paper, a constitutive equation is formulated as follows:

$$\begin{aligned}\epsilon &= \sigma/E_0, & \text{for pre-failure deformation,} \\ \dot{\epsilon} &= \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{1}{\tau} \left(\frac{\sigma - S}{S} \right)^n, & \text{for post-failure deformation,}\end{aligned}$$

where E_0 : Young's modulus in static pre-failure deformation,

E, S : secant modulus and residual strength in static post-failure deformation.

After determining power n and constant τ regarding each rock, stress-strain curves in various strain rates were drawn employing the above constitutive relations.

1. 緒 言

爆破やさく岩等の動的応力場における岩石の破壊機構を明らかにするためには、高速荷重下での岩石の変形・破壊特性を研究することが必要となる。一般に、静的応力場における岩石の変形・破壊に関しては、多数の研究がなされており、最近では定ひずみ速度その他の剛性圧縮試験によって、岩石の構成方程式を実験的に定めたり、あるいはそれらの資料に基づいて、数式モデルが提案されたりしている。これに対し、爆破やさく岩のような荷重条件下で生ずる高ひずみ速度における岩石の変形に関する研究は通常の油圧試験機で実現することは、ほとんど不可能であるためか、前者に較べると研究例は極めて少ないと云って過言でないであろう。

当研究室では、昭和48年および昭和51年の2回に亘って文部省科学助成金の交付をうけて通常の油圧試験機の $10^4 \sim 10^6$ 倍のひずみ速度を与えることのできるホプキンソン棒法圧縮試験装置を試作し、一軸圧縮高速荷重下における(イ)岩石の変形特性および破壊強度に対するひずみ速度の影響、(ロ)高ひずみ速度における岩石の変形・破壊挙動を支配する構成方程式、を見出

* 資源開発工学科 岩石力学講座

すことに重点をおいて実験を行ってきた。

この中、(イ)においては既に報告した^{1,2)}。本報文で扱っているのは(ロ)の問題である。したがって以下本文では、先ず実験装置と実験方法を紹介し、実験によって得られた岩石の衝撃構成方程式について述べることにする。

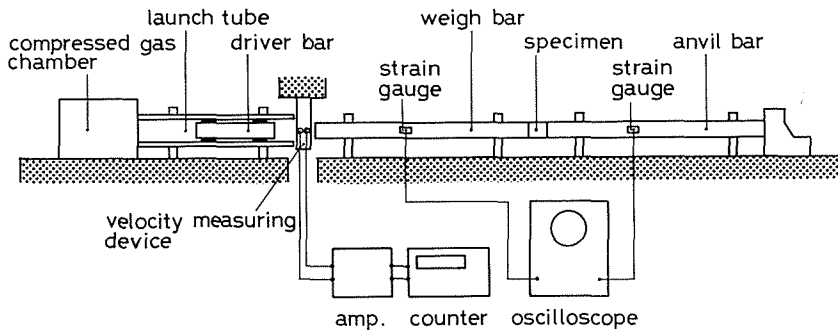
2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

試作したホプキンソン棒法圧縮試験装置を第1図に示す。装置の主要部分は、試験片の前後に接触配置される2本の弾性棒（これらをそれぞれ入力棒—weigh bar—，出力棒—anvil bar—，と呼ぶことにする）と、この静止系を衝撃する衝撃棒—driver bar—，および衝撃棒に所定の衝撃速度を与える発射装置である。入，出力棒には、弾性限界の高いドリルロッド（SK 6）を用い、直径はいずれも 25.4 mm，長さはそれぞれ 810 mm，750 mm とした。また衝撃棒は入，出力棒と同材質，同径で、長さは、衝撃によって入力棒に投射される応力波のパルス幅が 100 μsec となるように 266 mm に選定した。入，出力棒はそれぞれ運動0リングを介して2点で支持され、入力棒，試験片，出力棒の中心軸が一直線に配列されるように微調整をうける。

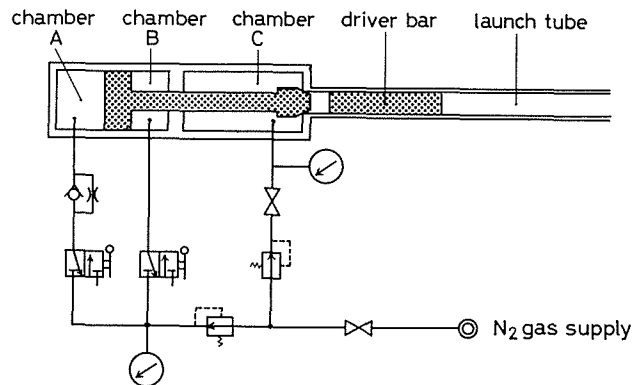
衝撃棒の発射装置は、圧縮ガスを急激に開放する開閉機構と、圧縮ガスの膨張により衝撃棒を加速する長さ 2 m のランチ・チューブ (Lanch tube) からなる。これは Meiden and Green³⁾の装置を参考にしたもので駆動ガスの開閉機構は第2図のごとくなっている。

衝撃棒の発射の手順は次のとおりである。



第1図 ホプキンソン棒法圧縮試験装置

- (1) ランチ・チューブと駆動室 C をシャ断するために、A にガスを供給しバルブを閉じる。
- (2) A と同圧のガスを B に供給する。
- (3) 衝撃棒に所定の衝撃速度を与えるため、C に所定の高圧ガスを供給する。これで発射の準備が完了する。
- (4) A のガスを大気開放すると B のガスによって駆動室とラ



第2図 衝撃棒発射装置

ンチ・チューブの間のバルブが開き、駆動室のガスがランチ・チューブに流出し、衝撃棒を加速する。

本装置での駆動ガスの圧力と衝撃棒に与えられる衝撃速度ならびに衝撃によって形成される応力パルスの波高値(振巾)の関係は第3図に示すとおりである。

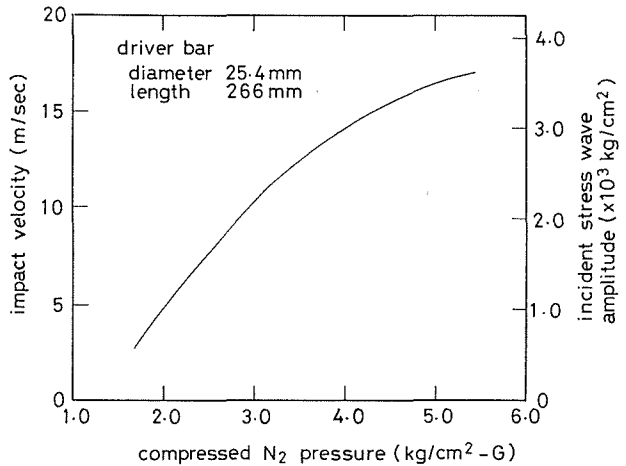
入・出力棒を伝播する応力波の検出にはストレイン・ゲージを用い、オシロスコープで記録した。また、衝撃棒の衝撃速度を確認するために入力棒の前方 20 mm の位置に標点間隔 15 mm で 2 組の光源とフォト・トランジスターからなる検出部をおき、衝撃棒が標点間を通過する時間間隔をカウンターで測定した。

2.2 供試岩石

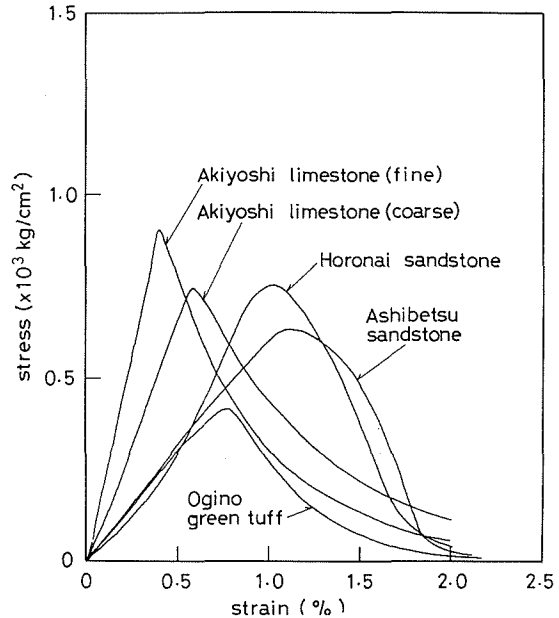
実験をおこなった岩石はいずれも堆積岩で、それらの岩種および物理的性質を第1表に示す。また、それぞれの試料について剛性圧縮試験によって求めた静的応力-ひずみ曲線を第4図に示す。

岩石試験片は直径 25.2 mm、長さは 25.0 mm を標準とし、端面は #600 カーボラダムによって研磨し、端面間の平行からの偏位は 0.01 mm 以内になるように仕上げた。

供試数は各岩種につき 15 以上である。



第3図 衝撃棒駆動ガス圧と衝撃速度、衝撃応力の関係



第4図 供試岩石の完全応力-ひずみ曲線 (剛性圧縮試験による)

第1表 供試岩石とその物理的性質

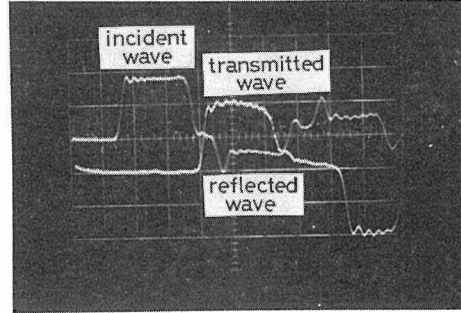
岩種	産地	区分	真比重	空隙率 (%)	P波速度 (km/sec)	圧縮強度 (kg/cm ²)
石灰岩	秋吉	細粒	2.71	0.5	6.00	910
		粗粒	2.72	0.9	5.37	750
凝灰岩	荻野		2.60	25.8	2.92	420
砂岩	幌芦別		2.66	12.8	2.50	750
			2.69	6.9	3.04	630

3. 実験結果ならびに考察

3.1 衝撃荷重に対する岩石の変形応答

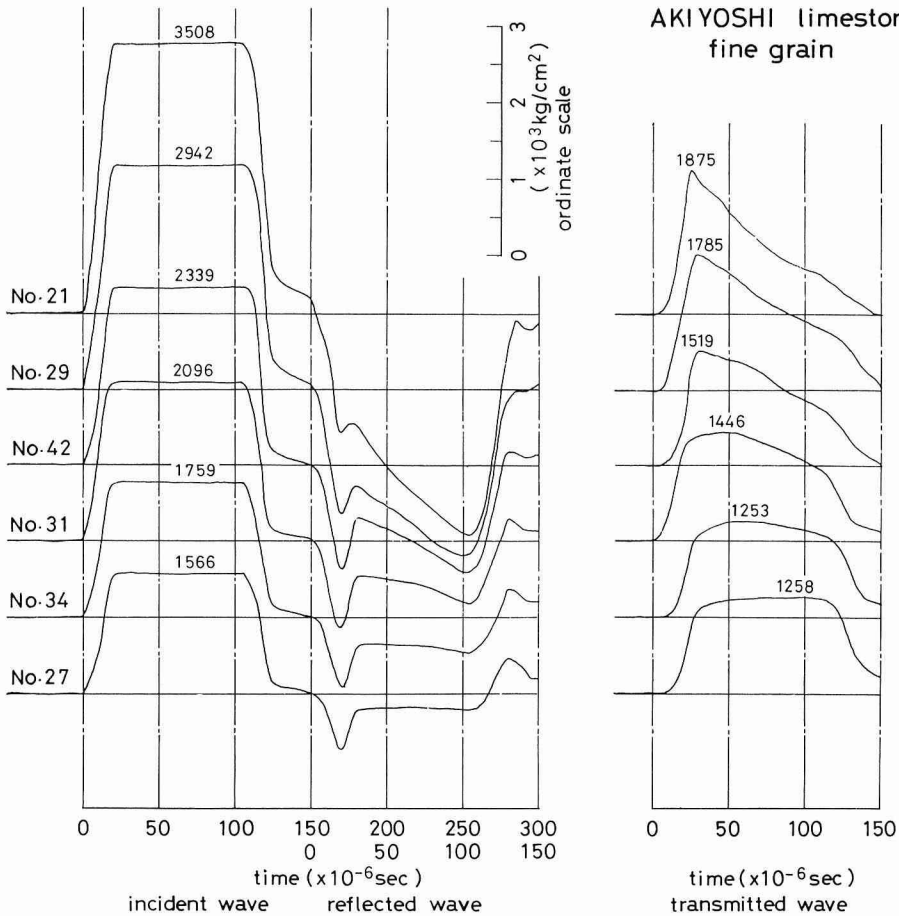
本実験で得られた応力波の測定例を第5図に示す。第5図で upper beam は入力棒の、また lower beam は出力棒のストレイン・ゲージで検出された応力波形を表わしている。upper beam の前半部の矩形状パルスは衝撃棒の衝突により入力棒に投射された圧縮応力波（これを入射波と呼ぶことにする）である。これに続く後半部は、入力棒と試験片の接触端面から反射された引張応力波（これを反射波と呼ぶことにする）である。Lower beam は岩石試験片中を透過して出力棒に伝達された圧縮応力波（これを透過波と呼ぶことにする）である。

入射波の波高値は、衝撃棒の衝撃速度を変える



第5図

試料：秋吉石灰岩細粒
 衝撃速度：8.6 m/sec
 オシロスコープ感度：
 水平軸 50 μ sec/div
 垂直軸 upper beam 1048 kg/cm²/div
 lower beam 574 kg/cm²/div



第6図 入射波，反射波，透過波

ことによって静的圧縮強度 (Sc) の 1.5~5.0 倍の範囲で、5~8 段階に変化させて実験をおこなった。

第 6 図は、入射応力波の波高値を 6 段階に選定しておこなった時の入射波、反射波および透過波の測定結果を複写整理して示したもので、秋吉石灰岩 (細粒) の例である。それぞれの入射波に附した数値は入射波の波高値を、また透過波に附した数値は透過波の最高値を示している。

ホプキンソン棒法圧縮試験では、岩石試料に加わる応力 (σ)、ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) およびひずみ (ϵ) は試料の両端面での応力が著しく異ならないという条件が満たされれば次式であらわされる。

$$\sigma = \frac{A_0}{A} \frac{\sigma_I + \sigma_R + \sigma_T}{2} \quad (1)$$

σ_I : 入射波の応力値

σ_R : 反射波の応力値

σ_T : 透過波の応力値

A_0 : 入出力棒の断面積

A : 試験片の断面積

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho c a} (\sigma_I - \sigma_R - \sigma_T) \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{1}{\rho c a} \int_0^t (\sigma_I - \sigma_R - \sigma_T) dt \quad (3)$$

ρ, c : 出力棒の密度および音速

a : 試験片の変形前の長さ

t : 荷重サイクル開始以降の時間

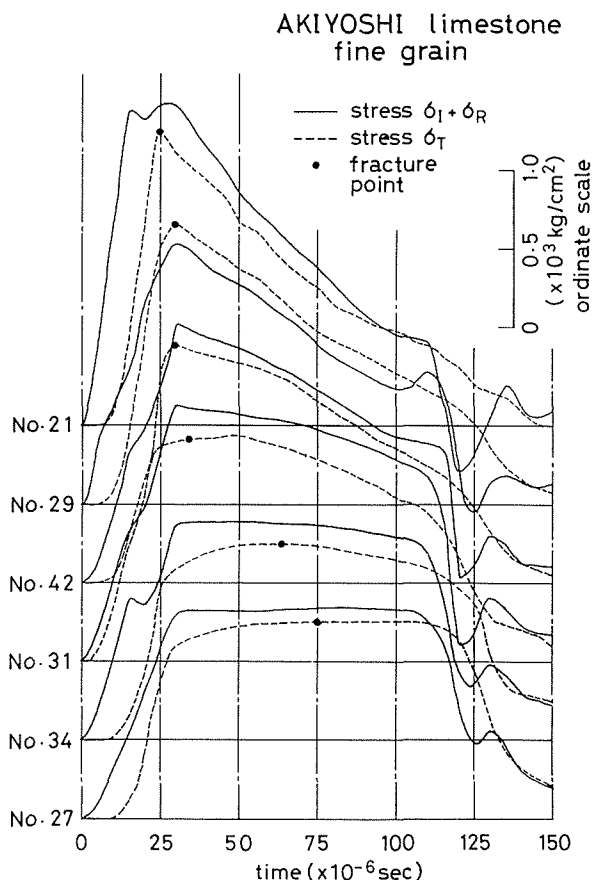
第 7 図は、第 6 図のデータから衝撃時において試料に作用する入力棒側の応力 ($\sigma_I + \sigma_R$) と出力棒側の応力 (σ_T) を示したものである。両者が一致するのが理想であるが、実際には図のごとく若干のくい違いがある。特に破壊点までのくい違いが大きい。

また、第 8 図 (a) は、同様に 2 式によって荷重サイクル中のひずみ速度を第 8 図 (b) は (3) 式によってひずみ ϵ を計算し、図示したものである。なお (3) 式の積分には $5 \mu \text{sec}$ 刻みの

区分面積の総和がとられている。この図から荷重サイクル中のひずみ速度は一定ではなく、破壊強度点以降の変形では、除荷に至るまで単調増加していることがわかる。

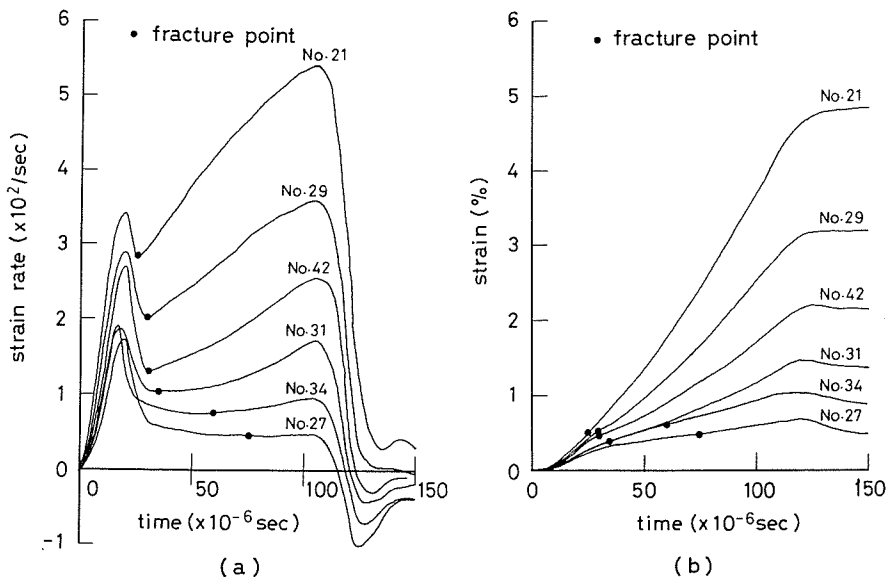
最後に (1) 式と (3) 式からパラメータ t を消去すると応力—ひずみ曲線が得られる。こうして求められた応力—ひずみ曲線が第 9 図である。

一般に、応力—ひずみ曲線は定ひずみ速度変形によって得られたものでなければならない。従って、ホプキンソン棒法圧縮試験で厳密に応力—ひずみ曲線を得るためには、同一試料について多数の試験を行い、ひずみ速度が同じである応力・ひずみ点の軌跡として求める必要がある。金属材料の場合には、このようにして高ひずみ速度での応力—ひずみ曲線が求められている⁴⁾。しかし、岩石の場合には同一試料でも強度や変形特性にバラツキが多く、この手法の適用は困難で

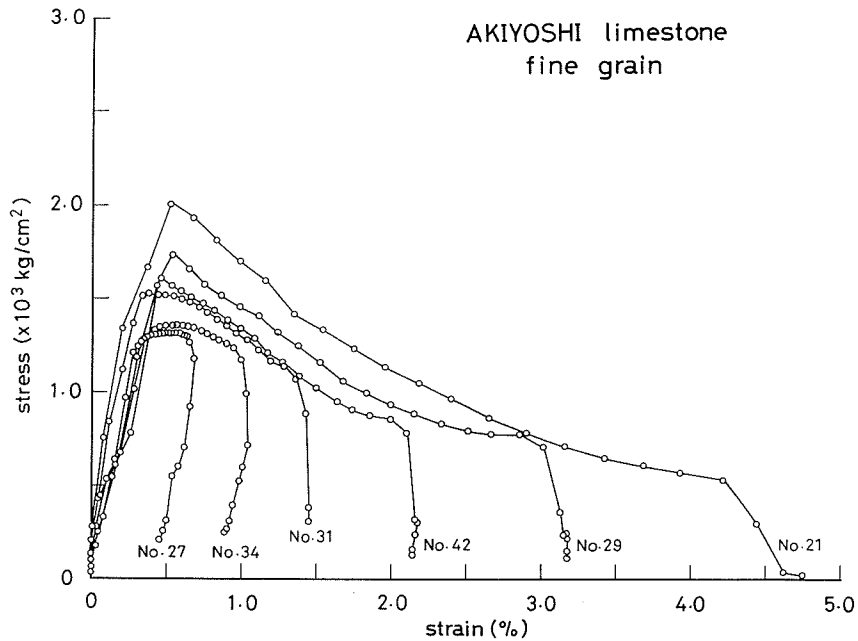


第 7 図 荷重サイクル中の試料両端面での応力の変化

AKIYOSHI limestone fine grain



第8図 荷重サイクル中のひずみ速度, およびひずみの変化



第9図 応力-ひずみ曲線

ある。

以上は秋吉石灰岩（細粒）の例のみを述べたが、他の岩種についても全く同様である。

3.2 岩石の衝撃構成方程式

岩石が高速ひずみをうける場合の構成方程式を誘導するに当たって次の仮定を設ける。

(a) 降伏点に達するまでの変形挙動は静的変形と同じヤング率を有する直線変形とする。

- (b) この場合の降伏点は，ひずみ速度の増加と共に向上するものとする。
- (c) 静的変形における降伏点以降の応力—ひずみ曲線は次式で近似されるものとする。

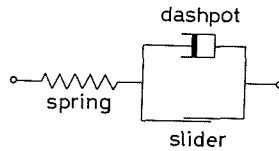
$$\log S = -A(\epsilon - \epsilon_0)^n + B \tag{4}$$

S: 静的応力

ϵ : S におけるひずみ

ϵ_0 : 降伏点におけるひずみ (限界ひずみ)

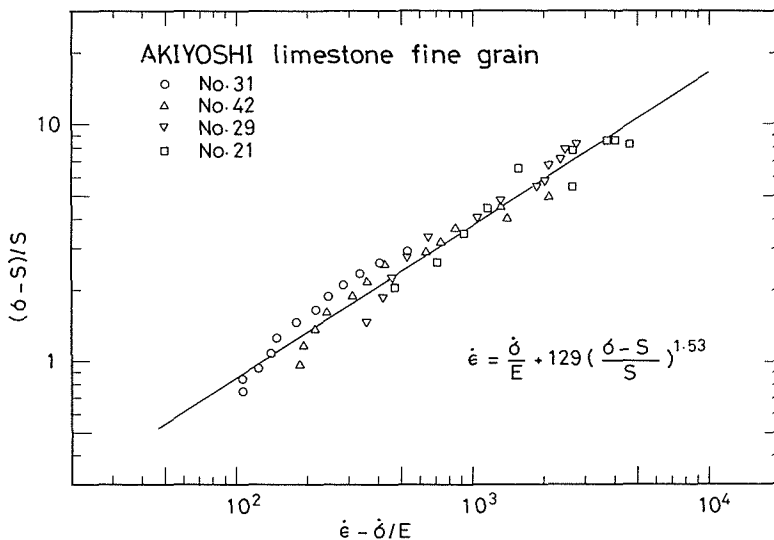
- (d) 動荷重による降伏点以降の岩石のひずみ速度は，応力速度に比例する弾性変形部分と擬塑性流動のクリープひずみ速度よりなり，次式で近似されるものとする。



第 10 図 岩石の衝撃構成方程式の力学的モデル

第 2 表 Post-Failure Curve
 $\log S = -A(\epsilon - \epsilon_0)^n + B$
 (S: kg/cm², ϵ_0 : %)

岩石名	n	A	B	ϵ_0
秋吉石灰岩細粒	1	1.80	2.23	0.4
秋吉石灰岩粗粒	1	1.36	2.02	0.6
荻野凝灰岩	1	2.67	1.66	0.8
幌内砂岩	2	3.13	2.03	1.0
芦別砂岩	3	4.92	1.87	1.1



第 11 図 降伏点以降の変形における応力とひずみ速度の関係
 (ホプキンソン棒法圧縮試験による)
 (a) 秋吉石灰岩 (細粒)

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{1}{\tau} \left(\frac{\sigma - S}{S} \right)^n \tag{5}$$

$\dot{\epsilon}$: ひずみ速度

$\dot{\sigma}$: 応力速度

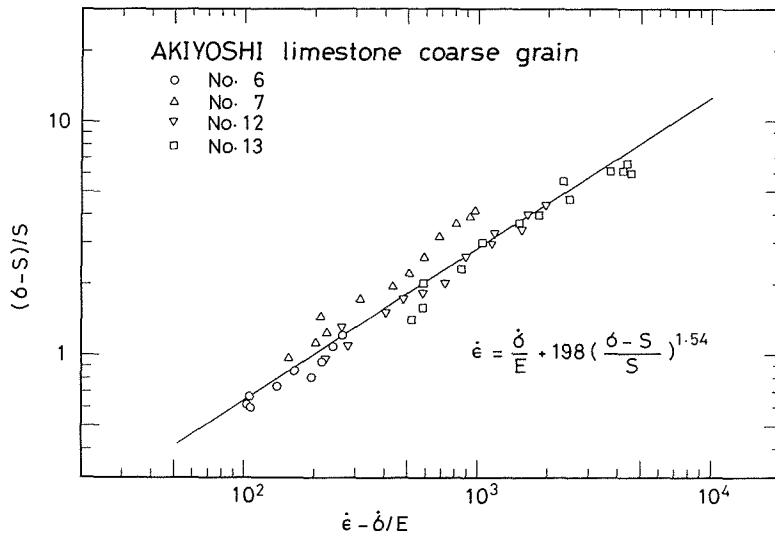
σ : 動的応力

E : 静的変形における降伏点以降のひずみ ϵ での有効ヤング率でひずみ軟化の進行と共に低下する。

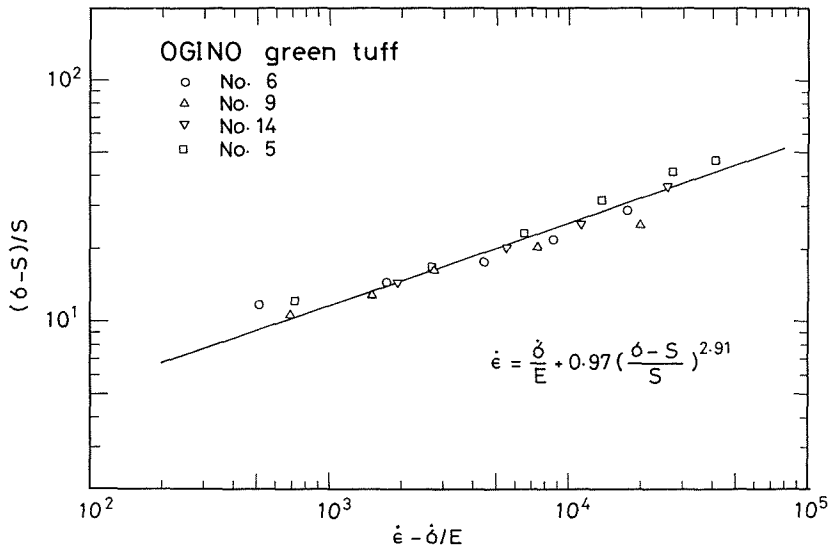
S : 静的変形における降伏点以降の応力で、ひずみの増大と共に低下する。

n, τ : 岩石固有の定数

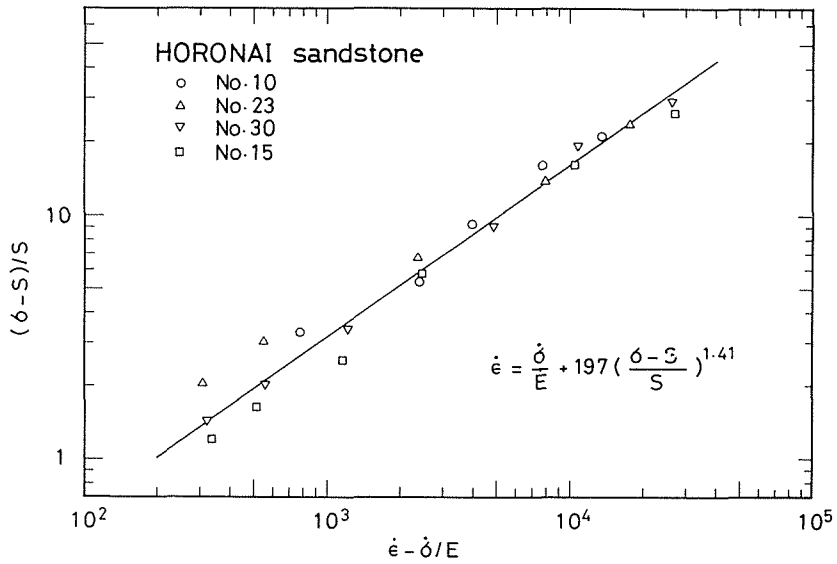
この式は第10図に示す一般化されたビンガム・モデルに対応する。



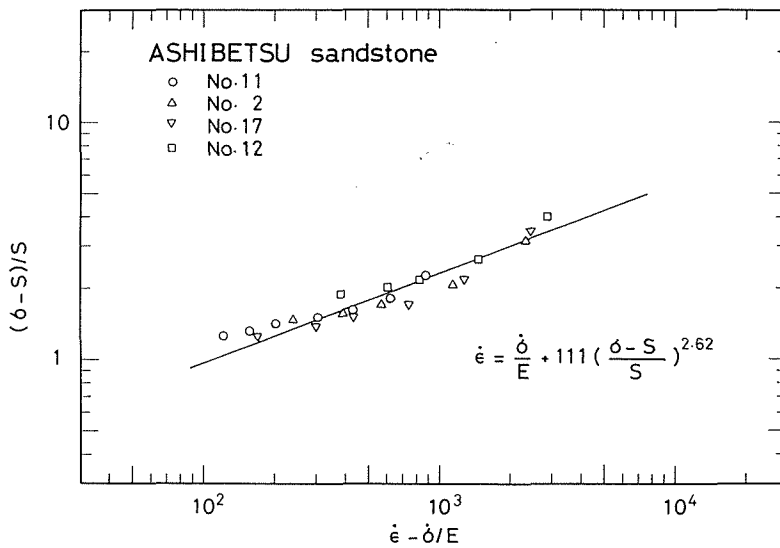
第11図 (b) 秋吉石灰岩(粗粒)



第11図 (c) 荻野凝灰岩



第11図 (d) 幌内砂岩



第11図 (e) 芦別砂岩

第3表 衝撃構成方程式

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{1}{\tau} \left(\frac{\sigma - S}{S} \right)^n$$

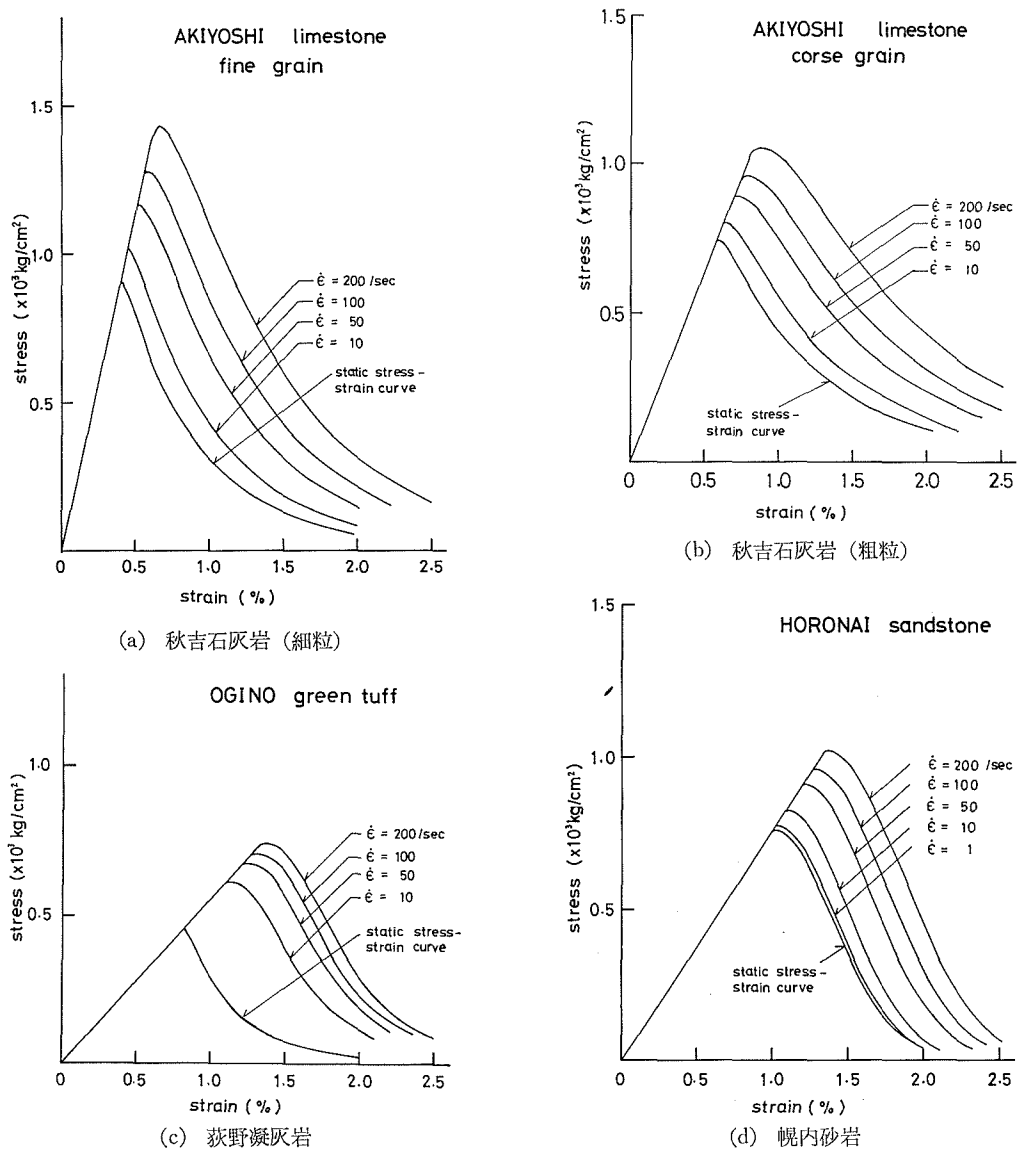
岩石名	n	τ (sec)	相関係数
秋吉石灰岩細粗	1.53	7.75 × 10 ⁻³	0.976
秋吉石灰岩粗粒	1.54	5.05 × 10 ⁻³	0.968
萩野凝灰岩	2.91	1.03	0.973
幌内砂岩	1.41	5.08 × 10 ⁻³	0.985
芦別砂岩	2.62	9.01 × 10 ⁻³	0.947

(a), (b) の仮定は、敵密とはいわないまでも、実験的仮定に基く仮定である。(c) は数値計算の便宜のために近似したもので、実際には第4図を利用して差支えない。なお、第4図の剛性圧縮試験結果から供試岩石の破壊強度点以降の特性を(4)式で近似した場合の定数を第2表に示す。

また第11図はホプキンソン棒法圧縮試験によって得られたデータを(5)式に従って整理したもので、直線は最小2乗法による回帰直線である。第3表に定数 n , τ を示す。これらの図より各供試岩石とも、ほぼ(5)式の関係を満たしていることがわかる。

3.3 定ひずみ速度変形における応力-ひずみ曲線

静的変形における構成方程式を(4)式、動的変形におけるそれを(5)式と仮定して、定ひずみ速度変形の応力-ひずみ曲線を求めたのが第12図である。第12図で降伏点にいたるまでの変形は直線弾性としている。



第12図 高速圧縮における応力-ひずみ曲線

動的変形における降伏点は次のように定められている。即ち、降伏点は降伏点以前の直線弾性変形と降伏点以降のひずみ軟化との接続点にあたるので、この両者を表わす方程式の連立解として求められている。また、降伏点以降の応力—ひずみ曲線は (5) 式で初期条件として応力の値に降伏応力を取り、数値計算によって求めたものである。

第 12 図に示した応力—ひずみ曲線は、いずれもひずみ速度の増加とともに降伏点が上昇し、降伏点以降の変形ではひずみ軟化特性を示している。

4. 結 論

高速圧縮下での岩石の力学的挙動に関する実験的研究には、ひずみ速度が 10/sec 以上の高速荷重をどのような方法で実現するかという問題と、 10^{-4} sec の荷重サイクル中での荷重と変形量の変動を検出し記録しなければならないという問題がある。ホプキンソン棒法圧縮試験はこれらの困難を解決する手法ではあるが、その原理からして、荷重サイクル中のひずみ速度を制御できないという制約がある。換言すれば、この試験法によって得られる応力—ひずみ曲線は、正確には単一衝撃荷重に対する変形応答というべきものである。従って、特定の高ひずみ速度での応力—ひずみ曲線を得るには、多数の異った衝撃荷重に対する変形応答曲線から、注目するひずみ速度の変形点を抽出し、それらを合成するという手続きが必要である。

本報文では、この手続きのかわりに、ホプキンソン棒法圧縮試験から得られる変形応答曲線に適合する構成方程式を見出し、次にその構成方程式に従う定ひずみ速度変形における応力—ひずみ曲線を求める手法をとった。

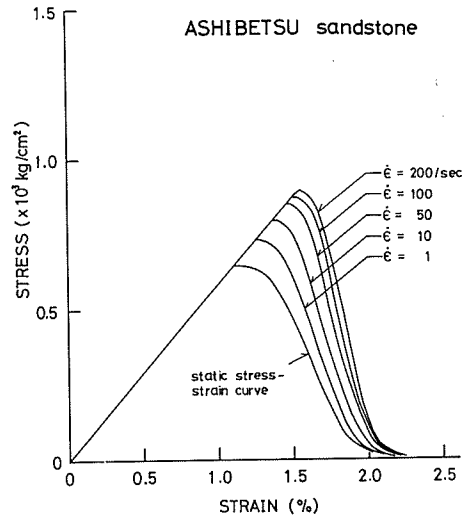
その結果、本文中に述べたように、衝撃構成方程式としては (5) 式を、また実験を行った各岩種について、第 12 図に示した高速圧縮下での岩石の力学的挙動の特徴として、ひずみ速度が重要な役割を演ずることが指摘される。

本文で紹介したホプキンソン棒法圧縮試験装置は、現在、試験片に 500 kg/cm^2 までの封圧も加えることができるように改良中である。

最後に、本装置の設計、試作にあたって御助言と御協力を頂いた東大生産技術研究所山田嘉昭教授、ならびに製作にあたられた小樽製作所に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 木下; 日本鉱業会誌, 90 巻, 1038 号 (1974).
- 2) 佐藤, 木下; 日本鉱業会誌, 91 巻, 1048 号 (1975).
- 3) Meidem, J. C and Green, S. J; J. Appl. Mech. Sept. 1966.
- 4) 田中; 日本機械学会誌, 69 巻, 575 号 (1966).



第 12 図 (e) 芦別砂岩