

琉球大学学術リポジトリ

新しいタイプの高剛性試験機による岩質材料の一軸 圧縮変形試験について

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-08-16 キーワード (Ja): キーワード (En): rock-like material, a stiff testing machine, uniaxial compression test, cyclic loading, complete stress-strain curve, deformation, fatigue life, a progressive failure model 作成者: 川本, 眺万, 渡嘉敷, 直彦 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1392

新しいタイプの高剛性試験機による岩質材料の 一軸圧縮変形試験について*

川本 眺万** 渡嘉敷直彦***

On Uniaxial Compression Tests of Rock-like Materials Using a New Type of High Stiff Testing Machine

Toshikazu KAWAMOTO and Naohiko TOKASHIKI

Summary

In planning of underground structures stability analysis of rock masses requires precise properties of fractured rocks.

In this paper, an experimental study of rock-like materials by uniaxial compression tests is presented using a new type of high stiff loading machine. Four kinds of rocks were selected, namely, Oya-stone (green tuff), Kobe-tuff, cement mortar and marble stone. Three different loading procedures were employed, i.e., static loading, incrementally cyclic loading and cyclic loading in post-failure region (see Fig. 4).

The machine used in these experiments has high stiffness about 312 ton/mm, and is capable of controlling either deformation or load of the specimen by mechanical action of the wedges under steel blocks installed in parallel with a specimen. This loading machine is very practical and efficient to obtain complete stress-strain curve of geologic materials.

Main results are summarized as follows:

(1) Obtained stress-strain curves are resolved into four characteristic regions due to the progress of fracturing, namely, intact, crack, fracture, and flow regions. The strains corresponding to each region are related to the strength, or the fabric of materials.

(2) Tests of incrementally cyclic loading show that the envelop of unloading and reloading curve is coincident with the statical loading curve.

(3) Relationship between plastic strain and total strain on incrementally cyclic loading are distributed by Weibull's probability.

(4) Fatigue life under cyclic loading in post-failure region are influenced significantly by crypto-damage due to initial loading and applied stress level.

Key Words : rock-like material, a stiff testing machine, uniaxial compression

原稿受付：1980年10月31日

* 本論文の一部は材料学会, "材料"にて発表済み

** 名古屋大学工学部地盤工学教室

*** 琉球大学工学部土木工学科

test, cyclic loading, complete stress-strain curve, deformation, fatigue life, a progressive failure model.

1. はしがき

最近地下空間の多方面への利用が検討され、また地下構造物の大型化が進められている。このような岩盤構造物の掘削施工時の周辺岩盤の安全性や、広範な荷重条件下の地下構造物の安定性を計ることが大きな問題となっている。この場合、掘削時の空洞周辺岩盤の力学的挙動や、種々の荷重状態に対する地下構造物周辺岩盤の力学的挙動を明らかにする必要がある。岩盤の力学的挙動は、岩盤を構成する岩石の力学的特性に大きく依存していると考えられ、地下構造物の安定性を解析するためには、強度破壊後の岩石の挙動を知ることが重要である。

岩石、セメントモルタル、コンクリートなどの岩質材料は、一定変形速度状態で圧縮されると、強度破壊点後徐々に耐荷重を減じながら変形が増大することが明らかになってきた。このような岩質材料の変形、破壊特性を明らかにするために、変形速度制御が可能な剛性の高い試験機が開発され試験に供されている。^{1)~7)}

著者らは、地下構造物の安定性を解析するのに必要な基礎的資料を得るために、2、3の岩質材料を用いて一軸圧縮試験を行った。本研究では、在来の剛性試験機に用いられている制御機構と異った、機械的制御機構を採用した高剛性一軸圧縮試験機を試作した。以下に、試験機の試作と試験結果について報告する。

2. 剛性圧縮試験機の試作

2.1 試験機の剛性

岩石のようなぜい性材料の強度破壊前後の挙動、すなわち、完全な応力-ひずみ曲線を得るためには、供試体の急激な破壊を制御することが必要である。供試体の強度破壊後の挙動は、試験機と供試体の系の挙動と考えられる。試験機全体の剛性を K 、供試体の荷重-変形曲線の強度破壊点後のこう配を k とすると、供試体が急激な破壊を起さない安定な条件は次式で表わされる。⁸⁾

$$K + k > 0 \quad (1)$$

(1)式から明らかなように、供試体の急激な破壊を制御するためには、試験機全体の剛性を高めなければならない。試験機の剛性を高める方法の一つに、試験機

の載荷盤間に供試体と並列に剛性支柱を設けて、剛性を高める方法がある。本試験で用いた試験機は、この方法により剛性を高めることにした。この試験機と供

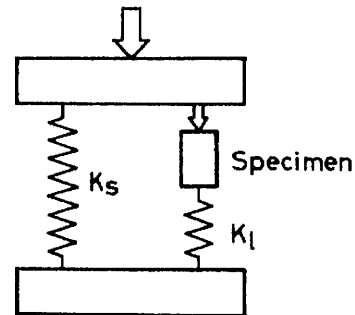


Fig. 1 A model of a system composed of a testing frame, a specimen, stiff columns K_s and a load cell K_l .

試体の系のモデルをFig. 1に示す。供試体と直列の剛性要素（ロードセル）を K_l 、並列な要素（剛性支柱）を K_s とすれば、試験機全体の剛性 K は次式で与えられる。

$$K = \frac{K_t \cdot K_s}{(K_t + K_s)} \quad (2)$$

なお、試験機の載荷フレームに作用する荷重は、載荷中一定であるので、この荷重による剛性の影響を考慮する必要はない。

本試験で用いた試験機は、 $K_t = 6.45 \times 10^5 \text{ kg/mm}$ 、 $K_s = 6.05 \times 10^5 \text{ kg/mm}$ であり、(2)式より試験機全体の剛性は、 $K = 3.12 \times 10^5 \text{ kg/mm}$ である。

2.2 試作の方針

岩質材料の応力-ひずみ曲線は、試験機の剛性とともにも供試体の変形速度の影響を受ける。したがって、載荷時の変形速度をできるだけ正確に制御する必要がある。油圧・サーボ制御方式は、供試体の破壊時における油圧の瞬間的な微小制御が困難であり、油の圧縮

性による剛性の低下などに難点がある。本研究では、機械的制御機構により、供試体の変形速度を制御することにした。

さらに試験機の試作にあたり、つぎの点に留意した。

(i) 比較的寸法の大きい岩石供試体の剛性試験ができるように、試験機の載荷容量を大きくすること、また載荷フレームの剛性を高くすること、(ii) 前述のように試験機全体の剛性を高めるため、供試体と直列に配置されるロードセルの胴径を太くすること、(iii) 各種の変形速度で試験ができるように、可変速度制御が可能であること、(iv) 種々の載荷条件に対応できるように、載荷・除荷の繰り返しが自由に行えること、また繰り返し時の上限、下限の設定が変位、荷重のいずれでも可能なこと、(v) 変形速度制御による三軸圧縮試験が可能のように、三軸圧力カセルを容易に装着できる構造とする。

2.3 試験機の制御機構と仕様

前述の方針に基づいて試験機を試作した。同じタイプの剛性試験機が、コンクリート構造物の終局耐力を明らかにする目的で谷川¹⁰⁾らによって開発されているが、本試験機はさらに改良を加えたものである。試験機本体、制御装置および油圧ユニットの外観をFig. 2に示す。本試験機は変形速度制御および荷重速度制御が可能であり、その制御システムをFig. 3に示す。

本試験機は鋼製の剛性支柱を供試体と並列に配置して剛性を高め、機械的制御により支柱高さを微小制御して供試体の急激な破壊を防ぎ、岩石供試体の強度破壊後の変形および破壊特性を得ようとするものである。

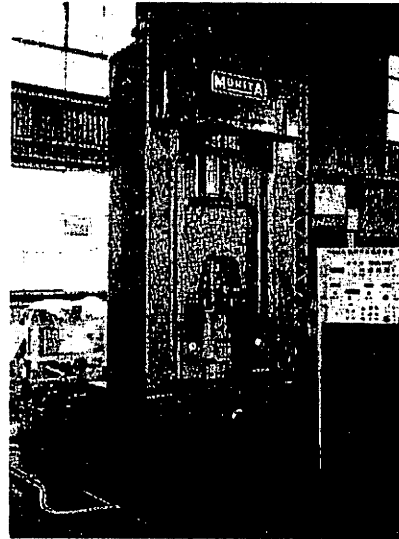


Fig. 2 A new type of high stiff testing machine.

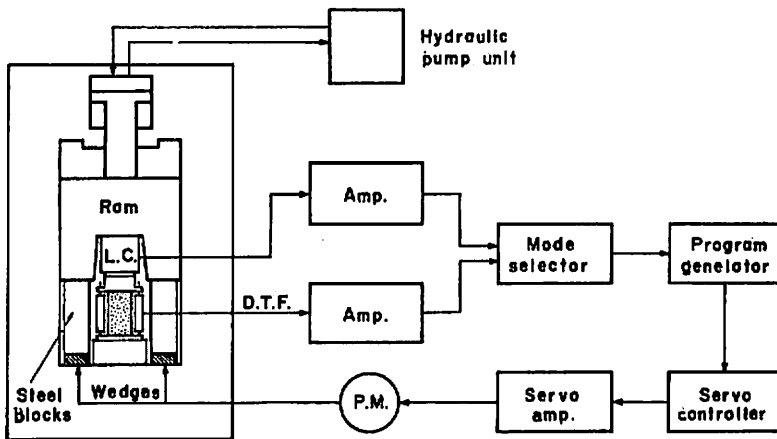


Fig. 3 Schematic diagram of control system in the used stiff testing machine.

2.3.1 変形速度制御機構

Fig. 3に示すように、油圧で作動する加圧ラムにより剛性支柱に一定荷重を加えたあと、支柱下部に配置した鋼クサビを水平方向に微動させ、支柱を下方へ移動して供試体に荷重を加える。クサビの移動は、減速機付きプリントモータ（安川電機製、0.2KW；以下、P.M.と略記）を用いた。このP.M.は直流サーボモータで反復負荷が可能である。P.M.の制御は、可変速度制御および荷重速度制御が可能で制御プログラムが設定できる制御盤（森田鐵工所製）を用いた。クサビの移動にともなう供試体の変形速度は、上下載荷盤間に設置した2個の差動トランス（森田鐵工所製；以下、D.T.F.と略記）の出力の平均値と、あらかじめ設定した変形速度に対応する出力が同一になるように、PI積分回路方式で制御される。なお、本試験機の変形速度制御は、上下載荷板間の距離の変化によって行っているが、供試体自体のひずみを検出できるようにすれば、ひずみ速度制御も可能である。

2.3.2 荷重速度制御機構

変形速度制御の場合と同様に、ラムにより剛性支柱に荷重を加えたあと、支柱を下方へ移動して供試体に荷重を加える。この場合支柱の移動速度は、ラムと上載荷盤間に設置したロードセル（東京測器製；以下、L.C.と略記）によって検出される荷重出力と、設定荷重速度が同じになるように制御される。

なお、いずれの制御においても支柱に加える荷重は、載荷中一定である。

2.3.3 試験機の仕様

本試験機の主な仕様を示すと、つぎの通りである。試験機の最大容量は100tonであり、L.C.の計測精度は $\pm 1\%$ である。載荷盤間の変形速度は $0.01\sim 1\text{mm}/\text{min}$ であり、この範囲で連続的に変えることができる。D.T.F.の変位ストロークは最大5mmであり、変位の計測精度は $\pm 1\%$ である。供試体の最大寸法は直径150mm、高さ510mmである。上下載荷盤の直径は220mmであり、上載荷板には球座が取り付けられている。また下載荷盤は供試体のセットが可能のように高さ可変装置がついており、高さ調節量は最大10mmである。上下載荷盤間の距離はラムストロークと剛性支柱の関係から、最大530mm、最小200mmである。直流サーボモータ制御盤は20、50、100tonの3レンジで荷重計測が行われる。変位計測範囲は $0\sim 6\text{mm}$ である。荷重出力電圧は各レ

ンジ1V/フルスケールであり、また変形出力電圧は $0.6\text{V}/6\text{mm}$ で、いずれも外部記録が可能である。ラム駆動用油圧ユニットはプランジャーポンプを用いており、最大吐出力 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 、吐出量 $1.5\text{L}/\text{min}$ である。

3. 実験の方法

3.1 岩石供試体

組織構造の異なった岩質材料の完全な応力-ひずみ曲線の性状を求めるために、つぎのような岩石供試体を用いた。すなわち、粒子の粗い神戸層凝灰岩（神戸市垂水区名谷産）、大理石、大谷石（多孔質凝灰岩）およびモルタルの4種類とした。大理石はかなり細粒であり、神戸層凝灰岩の最大粒形は約1mm程度である。モルタルは豊浦標準砂と普通ポルトランドセメントを用い、水：セメント：砂 $=0.65:1:2$ の重量配合比でつくられた。供試体の形状は直径5cm、高さ10cmの円柱形とし、大理石については定荷重載荷試験において直径3cm、高さ6cmとした。供試体端面の平坦度および平行度は 0.05mm の精度になるよう整形した。

なお、供試体は試料採取後、自然乾燥状態で試験を行った。

3.2 載荷方法および測定方法

種々の荷重条件下で岩石の変形や破壊挙動を調べるために、Fig. 4に示す載荷方法により試験を行った。各載荷方法を説明するとつぎの通りである。

- (1) 静的載荷試験：変形速度を $0.1\text{mm}/\text{min}$ として単調に載荷を行い、強度破壊点を越した後も同じ変形速度を保ち、塑性変形をおこして耐荷力を失うまで試験を続ける。(Fig. 4(a))
- (2) 漸増繰り返し載荷試験：(1)の試験の任意のひずみの点から除荷を行い、荷重0.5tonで再び載荷をする。このような載荷、除荷を任意のひずみ間かくで繰り返す。変形速度は $0.1\text{mm}/\text{min}$ とする。(Fig. 4(b))
- (3) 定荷重繰り返し載荷試験：(1)の試験の強度破壊点後の応力-ひずみ領域において、任意の2つの応力レベル間で載荷、除荷を繰り返す。変形速度は $0.24\text{mm}/\text{min}$ とし、初期載荷時および繰り返し載荷時ともに一定とする。(Fig. 4(c))

載荷速度の制御は、上下載荷盤間の距離の変化によって行った。変形量の測定は、上下載荷板間に設けた

2個のD.T.F.を用い、これらの出力の平均値を計測した。荷重の測定は、ラムと上載荷盤間に設置したL.C.を用いた。変形量および荷重の測定値は、制御盤上にデジタル表示されると同時に、X・Yレコーダに入力して荷重-変形曲線として自記記録した。

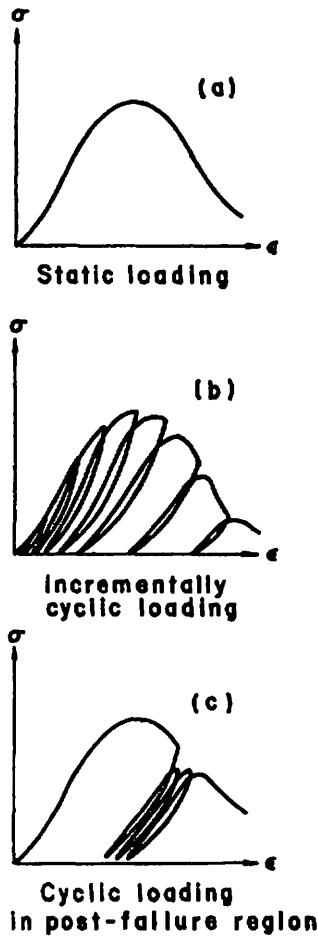


Fig. 4 Loading procedures employed in the tests.

4. 試験結果とその考察

4.1 静的載荷試験

試験に用いた各岩石の完全な応力-ひずみ曲線を Fig. 5 に示す。また、組織構造の異った岩種の変形、

破壊挙動を比較するために、Fig. 5 の応力、ひずみを強度破壊点の応力 σ_{cs} 、ひずみ ϵ_{cs} で無次元化し、相対応力-相対ひずみの関係として Fig. 6 に示す。曲線はいずれも供試体内の潜在クラックが閉合する領域を越すと変形が弾性的に挙動し、強度破壊点に近づくにしたがって曲線の勾配が緩かとなる。強度破壊点を過ぎると、しばらく緩かに応力が低下し供試体表面に分離が現われ、ひずみの増大に伴って耐荷重が急速に低下する。供試体表面の分離がほぼ終わると、ひずみのみが急増するようになる。

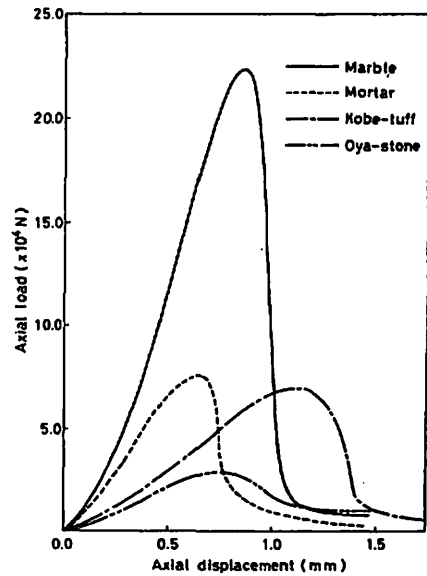


Fig. 5 Complete stress - strain curves for four rock-like materials under the static loading of uniaxial compression.

上述の変形・破壊挙動を定性的に把握するために、Fig. 7 に岩石のぜい性圧縮破壊過程を、つぎのような領域に分けて定義する。intact領域; 供試体が弾性的に挙動する領域、crack領域; 供試体内部にクラック、分離面が発生するが、まだ供試体表面に分離が見られない領域、fracture領域; 供試体の内部および表面に分離が生ずる領域、flow領域; 供試体の分離がほぼ終り、ひずみが急速に増大する領域、failure領域; 供試体内部にクラックが発生し、内部に破壊が始まる時

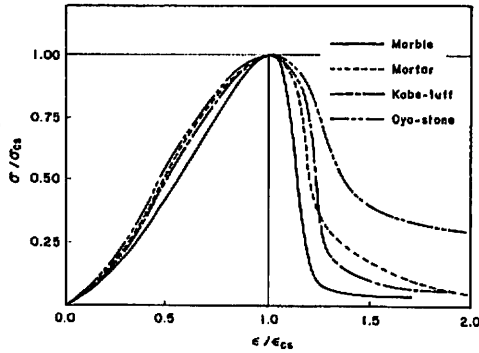


Fig. 6 Relative stress-strain curves for four rock-like materials.

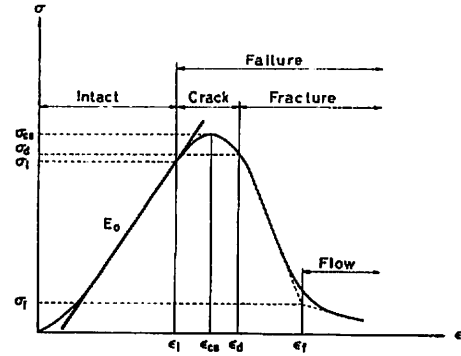


Fig. 7 Definitions of terms and symbols of brittle failure processes in rock.

点から後の領域で、crack, fracture, flow領域である。これらの領域の始点に対応する応力、ひずみをそれぞれ $\sigma_i, \epsilon_i, \sigma_d, \epsilon_d, \sigma_f, \epsilon_f$ とする。これらの定義に基づいて各岩石の試験結果を整理すると、Table I のようになる。表中の値はそれぞれ平均値を示しており、() の値は変動係数である。これらの結果より、つぎの点が明らかとなった。

- (1) 強度破壊点におけるひずみ ϵ_{cs} は、各岩石によって大きく相違している。各岩石の ϵ_{cs} は、破壊強度、ヤング係数、あるいは組成粒子の大小との間に、相関関係は認められなかった。
- (2) crack領域の始点における ϵ_i/ϵ_{cs} および σ_i/σ_{cs} の値は ϵ_{cs} の値と関係があり、 ϵ_{cs} が大きくなると ϵ_i/ϵ_{cs} および σ_i/σ_{cs} は大きくなる。
- (3) fracture領域の始点における ϵ_d/ϵ_{cs} および σ_d

σ_{cs} の値は組成粒子の大小に影響され、組成粒子の細かいほど ϵ_d/ϵ_{cs} は小さくなり、また σ_d/σ_{cs} は大きくなる。

- (4) flow領域の始点における ϵ_f/ϵ_{cs} および σ_f/σ_{cs} の値は、岩石の組成粒子の大小に大きく影響される。

4.2 漸増繰り返し載荷試験

4.2.1 応力-ひずみ曲線

漸増繰り返し載荷による曲線の一例として、粒子の粗い神戸層凝灰岩の応力-ひずみ曲線をFig. 8に示す。応力およびひずみは、 σ_{cs} および ϵ_{cs} で正規化している。同図に静的載荷時の応力-ひずみ曲線を重ねて点線で示してあり、Fig. 8 よりつぎの点が明らかとなった。すなわち、繰り返し載荷によって得られる応力-

Table I Results of the static loading of uniaxial compression.

	$\epsilon_{cs} \times 10^4$ kpa	$\epsilon_{cs} \times 10^{-2}$	$E_0 \times 10^3$ KN/m	σ_i/σ_{cs}	ϵ_i/ϵ_{cs}	σ_d/σ_{cs}	ϵ_d/ϵ_{cs}	σ_f/σ_{cs}	ϵ_f/ϵ_{cs}
Kobe-tuff	3.50 (0.063)	1.12 (0.036)	4.38 (0.020)	0.862 (0.026)	0.800 (0.028)	0.917 (0.018)	1.137 (0.013)	0.154 (0.412)	1.279 (0.023)
Marble	9.40 (0.068)	0.801 (0.053)	17.17 (0.016)	0.821 (0.027)	0.790 (0.016)	0.890 (0.020)	1.069 (0.020)	0.057 (0.216)	1.237 (0.017)
Oyo-stone	1.40 (0.132)	0.673 (0.074)	2.51 (0.088)	0.798 (0.040)	0.701 (0.070)	0.731 (0.067)	1.224 (0.015)	0.428 (0.107)	1.366 (0.050)
Mortar	3.80 (0.048)	0.653 (0.029)	8.55 (0.045)	0.779 (0.018)	0.685 (0.013)	0.851 (0.032)	1.123 (0.014)	0.238 (0.366)	1.130 (0.071)

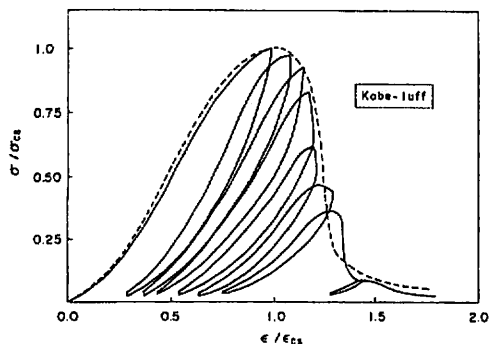


Fig. 8 Deformational behavior of kobe-tuff under the incrementally cyclic loading of uniaxial compression.

ひずみ曲線の包絡線と、静的載荷による曲線はほぼ一致しており、漸増繰り返し載荷状態が応力-ひずみ関係に及ぼす影響が小さいことを示している。fracture領域では、ひずみの増大に伴って耐荷重が低下し、再載荷時の回復強度がしだいに減少する。また、この回復強度は、繰り返しによる載荷曲線と除荷曲線の交点 (common point) とほぼ一致する。

4.2.2 全ひずみと塑性ひずみの関係

Fig. 9 に漸増繰り返し載荷時の各点のひずみを定義する。また、繰り返し載荷による除荷点の全ひずみ ϵ_t と、塑性ひずみ ϵ_p の関係を、Fig. 10 に示す。いま、岩石供試体を無数の要素からなる構造系と考え、構成要素の限界ひずみがある確率密度分布を有しているものとする、 ϵ_p/ϵ_{cs} は、ひずみレベル ϵ_t を確率量とする Weibull 分布⁽¹⁾ により、つぎのように表わされる。

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_{cs}} = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cs}} \left[1 - \exp \left\{ - \frac{(\epsilon_t/\epsilon_{cs})^m}{\sigma} \right\} \right] \quad (3)$$

ここで、 σ 、 m はそれぞれ scale parameter (尺度母数)、および shape parameter (形状母数) である。また、 $x = \epsilon_t/\epsilon_{cs}$ を変数として塑性ひずみの累積分布 $F(x) = \epsilon_p/\epsilon_t$ を表わすと、つぎようになる。

$$F(x) = 1 - \exp(1 - x^m/\sigma) \quad (4)$$

(3)式および(4)式について Fig. 10 の関係を検討すると、ひずみレベルの初期、および flow 領域を除いては

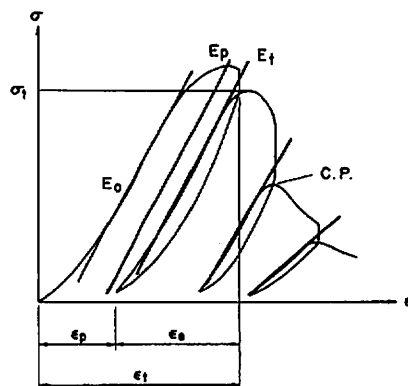


Fig. 9 Definitions of symbols on the incrementally cyclic loading processes.

は weibull 分布で近似されることがわかった。

4.2.3 再載荷時の変形係数の推移

漸増繰り返し載荷による強度破壊点後の再載荷時の変形係数 ϵ_t 、強度破壊点における変形係数 ϵ_p 、および初期接線変形係数 E_0 を、Fig. 9 のように定義する。また、Fig. 11 に、変形係数比 ϵ_t/E_0 と応力レベル σ_t/σ_{cs} の関係を示す。Fig. 11 から明らかなように、各岩石の強度破壊後の変形係数は、応力レベル σ_t/σ_{cs} との間にはほぼ直線関係が見られる。しかし、これらの変形係数とひずみレベル ϵ_t/ϵ_{cs} との間には、何ら相関関係は認められなかった。

ここで、全変形領域における再載荷時の変形係数の推移を、つぎのように考える。強度破壊点以前の変形係数は、 E_0 よりやや大きくなり、 ϵ_t を強度破壊点以前の変形領域で一定と仮定すると、つぎのように表わされる。

$$\epsilon_t = a E_0 \quad (\epsilon_t/\epsilon_{cs} \leq 1.0) \quad (5)$$

強度破壊点後の変形領域では、 ϵ_t/E_0 は応力レベル σ_t/σ_{cs} の関数として、次式で表現される。

$$\epsilon_t/E_0 = b + c (\sigma_t/\sigma_{cs}) \quad (\epsilon_t/\epsilon_{cs} > 1.0) \quad (6)$$

ここで、強度破壊点以前の変形領域における変形係数 ϵ_t が、強度破壊点の変形係数 ϵ_p に等しいと仮定す

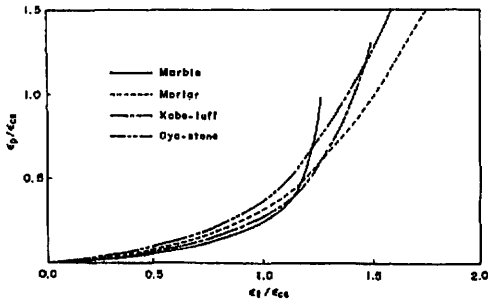


Fig. 10 Relationship between plastic strain and total strain for four rock-like materials under the incrementally cyclic loading of uniaxial compression.

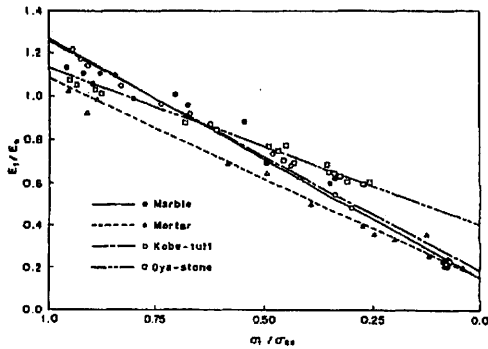


Fig. 11 Relationship between Young's modulus and stress for four rock-like materials under the cyclic loading of uniaxial compression in post-failure region.

ると、(5)式および(6)式は、つぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} E_t &= E_p && (\epsilon_t/\epsilon_{cs} \leq 1.0) \\ E_t/E_p &= b/a + c/a(\sigma_t/\sigma_{cs}) && (\epsilon_t/\epsilon_{cs} > 1.0) \end{aligned} \right\} (7)$$

ここに、 $E_p = (E_t)_{\epsilon_t/\epsilon_{cs}=1.0}$ である。

本実験で得られた各岩石供試体の実験定数 a, b および c を示すと、Table II のようである。

4.2.4 エネルギーとひずみの関係

Fig. 12 に示すように、漸増繰り返し载荷によって除荷時までに供試体に加えられた全エネルギー E_{gt} は、損傷エネルギー E_{gi} 、および弾性回復エネルギー E_{gr} に分けて考えられる。これらのエネルギー・ひずみ関係が、 $E_g/E_{go} - \epsilon/\epsilon_{cs}$ 曲線として Fig. 12 に示されている。エネルギー、およびひずみは、強度破壊点のひずみ ϵ_{cs} と、この点までの全エネルギー E_{go} でそれぞれ正規化している。

E_{gt} は、供試体表面に分離が発生するまでは急速に蓄えられるが、以後供試体の剛性が低下するにつれて、その増加率が小さくなる。 E_{gr} は、強度破壊点以後低下し、供試体が flow 領域に入ると弾性回復がなくなる。これらの曲線は、岩石によって多少異っており、岩石の組織、構造の不均質性に関連があるものと考えられる。

塑性変形に消費される損傷エネルギー E_{gi} は、いずれの岩石の場合も供試体表面に分離が始まると急増する。これは、ひずみの増大にともない、岩石内部の累積損傷が強度破壊後に急速に増加することを示している。

4.3 定荷重繰り返し載荷試験

Fig. 14 に示すように、本試験はまず、一定変形速度で強度破壊点の応力 σ_{cs} を越すまで静的載荷試験を行い、任意の応力 σ_r に達したとき除荷を行う。このあと繰り返し載荷試験の上限応力 σ_u まで達すると、繰り返し載荷試験を始める。最初の除荷・載荷を $n=1$ とし、 σ_u に達せずに破壊した最後の載荷時の n を n_f とする。

Table II Coefficients of four rock-like materials for the relation between stress and Young's modulus under the incrementally cyclic loading.

	a	b	c	b/a	c/a	p
Kobe-tuff	1.254	0.171	1.083	0.136	0.864	6
Marble	1.257	0.156	1.101	0.124	0.876	8
Oya-stone	1.129	0.391	0.738	0.346	0.654	4
Mortar	1.083	0.144	0.939	0.133	0.867	3

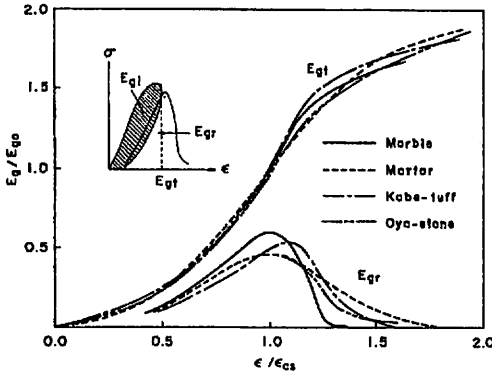


Fig. 12 Correlation between total (work-done) energy, elastic energy and total strain for four rock-like materials under the incrementally cyclic loading of uniaxial compression.

この破壊時の繰り返し数を N_f とし、 $\log N_f$ を疲労寿命とする。上述の定義にもとずいて、定荷重繰り返し疲労試験による大理石のひずみの推移と、疲労寿命について考察する。

4.3.1 ひずみの推移

Fig.13(a)に、定荷重繰り返し疲労試験の上 限応力 σ_u におけるひずみレベル ϵ/ϵ_{cs} と、繰り返し数 n/n_f の関係を、強度破壊後の除荷開始時の応力レベル σ_r/σ_{cs} について示している。 n 回目の除荷開始時におけるひずみ ϵ_n および繰り返し数 n を、強度破壊点におけるひずみ ϵ_{cs} と最大繰り返し数 n_f でそれぞれ正規化している。これらのひずみの推移曲線は、繰り返し数 n/n_f が約0.7より大きくなると、ひずみの増加率が增大して供試体が破壊に至る傾向を示している。また、 σ_r/σ_{cs} が小さいほど、すなわち強度破壊後の繰り返し疲労の開始が遅いほど、同じ n/n_f に対するひずみが大となっている。これは、体試体内部の損傷が進行するほど、繰り返し疲労の各段階におけるひずみが大になることを示している。

Fig.13(b)は、損傷度¹²⁾ $(\epsilon_n - \epsilon_1) / (\epsilon_{nf} - \epsilon_1)$ と、繰り返し数の比 $(n-1) / (n_f-1)$ の関係を示しており、 ϵ_{nf} 、 ϵ_1 は、それぞれ最大繰り返し疲労時、およ

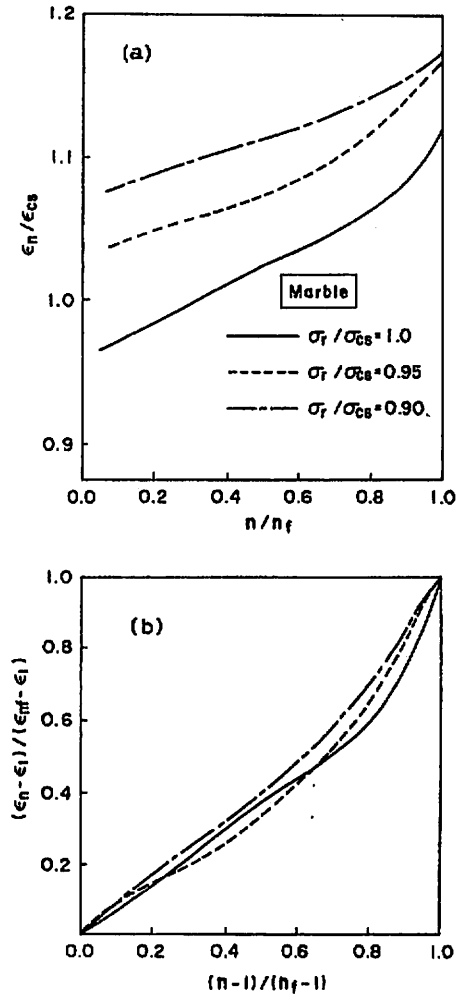


Fig. 13 Behaviors of failed marble stone under cyclic loading in post failure region: (a) relative strain vs fatigue life ratio : (b) damage vs accumulative number ratio of loading cycles.

び最初の繰り返し疲労開始時の上限応力 σ_u に対応するひずみを表わす。ひずみ増加比率で示される損傷度 $(\epsilon_n - \epsilon_1) / (\epsilon_{nf} - \epsilon_1)$ は、 σ_r/σ_{cs} に関する相違はほとんど見られず、 $(n-1) / (n_f-1)$ が約0.7から、その増加率が大きくなっている。

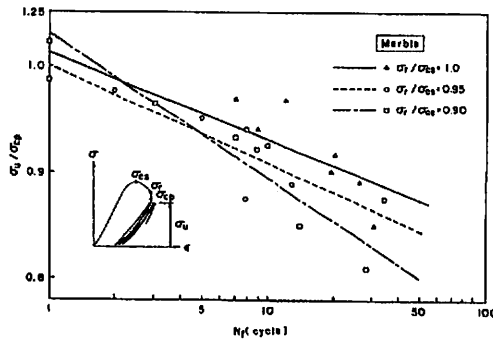


Fig. 14 Maximum stress of cyclic loading vs fatigue life for marble stone in post-failure region.

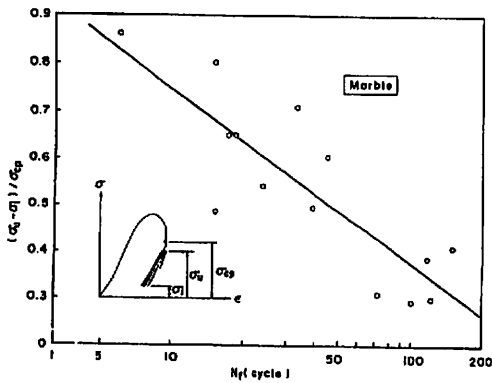


Fig. 15 Stress amplitude of cyclic loading vs fatigue life for marble stone in post-failure region.

4.3.2 疲労寿命

定荷重繰り返し載荷試験による大理石の疲労寿命を、Fig.14, およびFig.15に示す。Fig.14の縦軸は、繰り返し上限応力 σ_u と、最初の除荷・載荷時のcommon pointの応力 σ_{cp} の比をとり、 σ_u/σ_{cp} と疲労寿命 $\log N_f$ の関係を、 σ_i/σ_{cp} をパラメータとして図示している。また、Fig.15には、上、下限の応力振幅($\sigma_u - \sigma_i$)と σ_{cp} の強度比と、疲労寿命 $\log N_f$ の関係を示している。ただし、この試験では、上限応力レベル σ_u/σ_{cp} を0.9に設定している。Fig.14, およびFig.15

から、強度破壊後の岩石供試体の疲労特性として、つぎの点明らかとなった。すなわち、初期載荷による供試体内の損傷が大きくなるほど、繰り返し載荷による疲労寿命が小さくなる。また、各初期載荷を受けた供試体において、その疲労寿命は、繰り返し時の上限応力 σ_u が減少するにつれて増大し、また、繰り返し時の応力振幅が小さくなくても、疲労寿命は増大する。

5. 一軸圧縮破壊モデル

漸増繰り返し載荷試験の結果に基づいて、各岩石の一軸圧縮下における完全な応力-ひずみ曲線を表わす。ここでは、福島¹³⁾らが提案した圧縮破壊モデルを考える。すなわち、岩石の組織・構造の不均質性を考慮して、破壊と変形の過程について、つぎのように考える。

- (1) 任意のひずみレベルにおいて、全ひずみ ϵ には弾性ひずみ ϵ_e と塑性ひずみ ϵ_p が共存し、つぎのように表わされる。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (8)$$

- (2) ひずみレベルが進行するにつれて、岩石を構成する要素の破壊が増加し、塑性ひずみの累積分布が確率分布を有するものとする。すなわち、次式で示される。

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon} = F(\epsilon) \quad (9)$$

ここに、 $F(\epsilon)$ は確率分布関数である。漸増繰り返し試験結果から(9)式を検討すると、(4)式のWeibull分布で与えられる。

- (3) 岩石試験片の応力は、弾性ひずみに依存しているものとし、次式で示される。

$$\sigma = E \cdot \epsilon_e \quad (10)$$

ここで、 E は変形係数であり、実験結果から応力の関数として(7)式で与えられる。

上述の仮定にしたがって岩石の応力-ひずみ曲線を表わすと、つぎようになる。

$$s = E(1 - F(x))x \quad (11)$$

ここで、 $s = \sigma/\sigma_{cs}$ 、 $x = \epsilon/\epsilon_{cs}$ とし、応力-ひずみ関係について正規化を行い、簡単のために $\sigma_{cs} = 1.0$ 、 $\epsilon_{cs} = 1.0$ としている。変形係数 E は、(7)式よりつぎのように書ける。

$$E = \begin{cases} E_p = a E_0 & (\epsilon \leq 1.0) \\ E_t = \{d + (1-d)s\} E_p & (\epsilon > 1.0) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 $d=a/b$ とする。塑性ひずみの累積分布関数 $F(x)$ におけるパラメータ σ , m は、 $x=1.0$, $s=1.0$, および $(ds/dx)_{x=1.0} = 0$ より、 $m=a=p$ という関係がある。したがって、(4)式は、つぎのように表わされる。

$$F(x) = 1 - e^{-x^p} \quad (13)$$

(12)式、および(13)式により、(11)式の応力-ひずみ曲線を具体的に表わすと

$$\left. \begin{aligned} s &= e^{-x^p} \left(\frac{1}{p} - \frac{x^p}{p} \right) x & (x \leq 1.0) \\ s &= \left\{ d \cdot e^{-x^p} \left(\frac{1}{p} - \frac{x^p}{p} \right) x / \right. \\ & \quad \left. \left[1 - (1-d) \cdot e^{-x^p} \left(\frac{1}{p} - \frac{x^p}{p} \right) x \right] \right\} & (x > 1.0) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となる。

各岩石の実験定数 p および d を Table II に示す。これらの定数を(14)式へ代入し、各岩石の全変形領域における応力-ひずみ曲線を求めると、Fig.16のようになる。モデル化された応力-ひずみ曲線と、Fig. 6に示す静的載荷試験結果を比較すると、これらのモデル曲線は、その立ち上り部分と、ひずみが塑性流動する領域($x > \epsilon_t / \epsilon_{cs}$)を除いて、実験による応力-ひずみ曲線とはほぼ一致することがわかる。

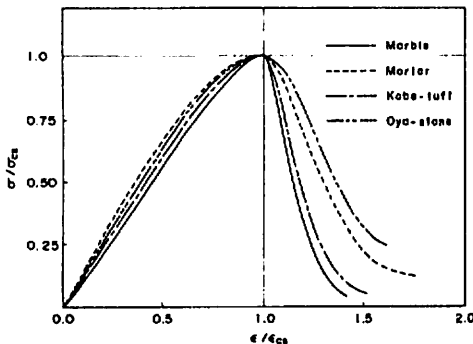


Fig. 16 Calculated stress - strain curves for uniaxial compression tests on four rock - like materials.

6. 結 語

岩質材料の一軸圧縮下における強度破壊後の変形・破壊特性を調べるために、機械的制御機構を用いた新しいタイプの高剛性圧縮試験機を試作して、神戸層凝灰岩、大理石、大谷石、およびモルタルについて、静的載荷試験、および繰り返し載荷試験を行った。これらの試験結果のおもなものを列挙すると、つぎのようである。

- (1) 試作した高剛性変形速度制御圧縮試験機は、岩質材料の圧縮破壊過程を解明するために非常に有効であり、使用性、価格についても十分実用的である。
- (2) 岩質材料の完全な応力-ひずみ曲線は、intact, crack, fracture、およびflowの各領域に分けられる。これらの各境界におけるひずみ、および応力は、強度破壊点のひずみ、あるいは岩石の組成粒子の大小に関係がある。
- (3) 漸増繰り返し載荷時の応力-ひずみ曲線の包絡線と、静的載荷試験の応力-ひずみ曲線はほぼ一致し、繰り返し載荷による応力径路が、応力-ひずみ関係に及ぼす影響は少ない。
- (4) 漸増繰り返し載荷試験の除荷点の全ひずみ ϵ_t と、塑性ひずみ ϵ_p の関係は、Weibull確率分布で近似される。
- (5) 漸増繰り返し載荷試験の強度破壊後の再載荷時の変形係数比 $\epsilon_t / \epsilon_{cs}$ は、応力レベル σ_t / σ_{cs} と、直線関係があることが明らかとなったが、ひずみレベル $\epsilon_t / \epsilon_{cs}$ との相関は認められなかった。
- (6) エネルギー的な立場から漸増繰り返し載荷試験結果を検討すると、岩質材料は、繰り返し載荷によってひずみが増大するのにもない、内部の累積損傷が強度破壊後に急速に増加する。
- (7) 岩質材料の強度破壊後の高応力繰り返し載荷によるひずみの推移は、初期載荷による損傷が進行するほど、繰り返し載荷の各段階におけるひずみが大きくなる。また、ひずみ増加比率で示される損傷度は、いずれの供試体においても、繰り返し数の比が0.7程度からその増加率が大きくなる。
- (8) 強度破壊後の高応力繰り返し載荷による岩石試料の疲労寿命は、初期載荷による損傷の程度と、繰り返し時の上限応力、および応力振幅の大小に関係がある。すなわち、初期載荷による損傷が大きくなると、疲労寿命が小さくなり、繰り返し

時の最大応力が小さいほど、また応力振幅が小さいほど、疲労寿命が大きくなる。

- (9) 岩石の組織・構造の不均質性を考慮した圧縮破壊モデルに基づいて、ひずみ、および変形係数に関する試験結果から、各岩石試料の一軸圧縮下における完全な応力-ひずみ曲線を表わした結果、静的載荷試験から得られた応力-ひずみ曲線にはば一致した。

本論文では、一軸圧縮下における岩質材料の変形挙動について考察したが、実際の岩盤状態における応答をは握するために、さらに三軸応力状態の力学特性を明らかにする必要がある。また、本論文は、実験結果を主として現象論的な面から述べたが、これらの試験結果を実際の設計へ利用する立場から、その基礎的資料として岩質材料の力学的挙動を記述する構成式を確立することが重要である。これらは、今後の問題点として研究を継続していく考えである。

本研究の一部は、昭和53年度科学研究費補助金（試験研究2）を受けて行ったものである。剛性試験機の試作に関して、貴重なご助言を賜った名古屋大学工学部建築工学科の小坂義夫教授、谷川恭雄助教授に厚く感謝の意を表す。また、実験にあたり終始ご協力を頂いた清水建設研究所石塚与志雄、名古屋大学工学部地盤工学教室大石雅彦の諸氏、同地盤工学教室市川康明氏を始めとする川本研究室の皆様にも厚く感謝の意を表す。試験機の試作に際しては、森田鐵工所の関係者のご協力を得た。ここに厚く謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) Bieniawski, Z.T., H.G. Denkhaus, and U. W. Vogler, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 6, 323 (1969).
- 2) Wawersik, W.R., and C. Fairthrst, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 7, 561 (1970).
- 3) Peng, S. and E.R. Podicks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, 699 (1972).
- 4) 小林良二, 杉本文男, 日本鉱業会誌, 91, 647 (1975).
- 5) Cook, N.G.W., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2, 389 (1965).
- 6) 平松良雄, 岡田 清, 岡 行俊, 小柳 浩, 水田義明, 材料, 24, 260 (1975).
- 7) 西松裕一, 松本浩二, 小泉昇三, 材料, 23, 248 (1974).
- 8) Salamon, M.D.G., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 7, 613 (1970).
- 9) 平松良雄, 岡 行俊, 水田義明, 齊藤敏明, 菅原勝彦, 日本鉱業会誌, 90, 399 (1974).
- 10) 谷川恭雄, 西川公三, 小坂義夫, 日本建築学会論文報告集, 260, 9 (1977).
- 11) Weibull, W., J. Appl. Mech., 293 (1951).
- 12) 都築和夫, 成岡昌夫, 土木学会論文報告集, 206, 125 (1972).
- 13) 福島 篤, 木下重教, 材料, 24, 741 (1975).