

ロックフィル材料の応力ひずみ特性に関する一考察

三浦 哲彦*・山本 紀之**

A Consideration on the Stress Strain Characteristics of Rockfill Materials

Norihiko MIURA and Noriyuki YAMAMOTO

Abstract

The Cam-clay model or its modified model proposed by Roscoe et al. can be used to predict the elasto-plastic behaviors of normally consolidated clays under triaxial stresses.

In the previous paper⁴⁾ the author showed that there exists several similarities between stress strain response of normally consolidated clays and that of sand at high pressures, and that the elasto-plastic behaviors of sand at high pressures can be predicted, as a first approximation, by using the Roscoe's model.

This study deals with the stress strain relation of rockfill materials at elevated cell pressures, and describes that the Roscoe's model is also applicable to predict the stress strain behaviors of the rockfill materials.

1. まえがき

土質材料の応力ひずみ式に関する研究は、いろいろな角度からなされているが、それらは大別して、a) 塑性理論に基礎をおくもの、b) 粒状体の微視的幾何学的考察に基づくもの、c) 統計理論に依拠するもの、などに分けられよう。この中の a) を代表するものとして Roscoe 一派によって研究発展させられた等方硬化性理論があり、彼等が提案した弾塑性モデル¹⁾(Cam-clay モデル、またはその修正モデル)の正規圧密粘土への適用性は広く認められている。

さて、著者らはこれまでに、正規圧密粘土と高圧下の砂の応力ひずみ挙動の類似性に着目して、高圧下の砂の応力ひずみ挙動の予測に Roscoe らの等方硬化性モデルを適用することを試み、これがおおむね妥当であることを示してきた。^{2)~4)}

数 100kN/m² 程度の応力レベル下における正規圧密粘土の応力ひずみ応答と、その数 10~数 100 倍の応力レベル下における砂の応力ひずみ応答とが非常によく類似しているのは、結局次の 2つの理由によるものと考えられる。その一つは、粘土と砂はいずれも粒の集まりであって摩擦性の材料であること、他の一つは、

2つの材料のダイレイタンス特性、換言すれば硬化特性が類似していることである。

砂や礫などのいわゆる粒状材料は、通常の応力レベルの下では軟化性材料としての特性を有する⁵⁾。しかし、応力レベルがある大きさを越える領域では、変形過程で粒子破砕が生じて非可逆的体積減少を示すようになり硬化性の材料となるのである。

ところで、ロックフィルダムに使用されるいわゆるロック材料は、実際に 1,000kN/m² 程度の応力レベルの下で供用されるところから、その強度、変形特性を調べるのに 1,000kN/m² 程度の拘束圧の下で三軸圧縮試験を行うのが普通である。そして、そのせん断過程においては、かなりの量の粒子破砕を生じることが知られている⁶⁾。それゆえこのようないわば中圧下のロック材料の応力ひずみ特性は高圧下の砂の場合と同様に、低圧下の正規圧密粘土の応力ひずみ特性と類似したものになることが推測される。

本研究は、上述のような観点から、ロック材料の応力ひずみ応答に対する等方硬化性の弾塑性モデルの適用性を検討したものである。なお、本文では、九州電力総合研究所⁸⁾ および Marachi ら⁷⁾によって行なわれたロック材料に対する三軸圧縮試験の結果を用いて検討を進めた。

* 土木工学科

** 大学院土木工学専攻

2. ロック材料の物理的性質

本文で検討の対象としたロック材料は、緑色片岩⁸⁾ (G材料と略記)、ピラミッドダム材料⁷⁾ (P材料) および破碎玄武岩 (B材料) の3種類である。このうちP材料とB材料については、それぞれ試料の最大粒径を3種類に変えた場合の実験データが比較して示されている。試料の最大粒径の違いは大きさの順に L, M, またはSの記号を付して表すことにし、たとえば PL材料などと称す。本報では、実際の材料に最も近い粒径の PL材料および BL材料を中心に調べていく。

各ロック材料の粒度分布は、Fig.1に示されている。P材料とB材料は、同じ粒度分布になるように調整されているので粒度曲線は重なる。また、各材料の物理的諸性質は、Table 1に示されている。

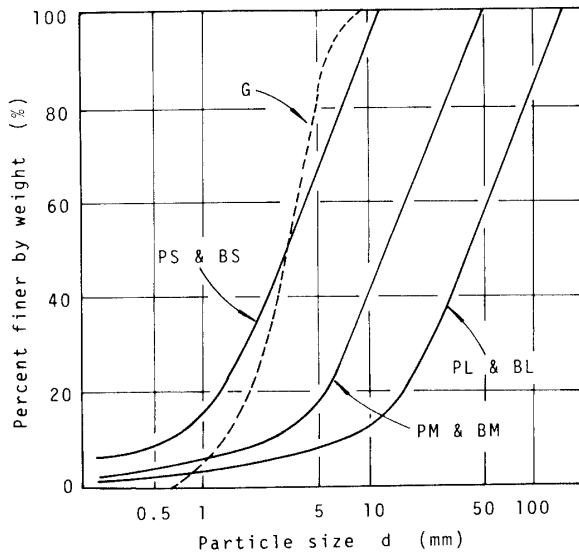


Fig.1 Particle size distribution of rockfill materials

3. 力学特性および材料定数

Table 1. Physical properties of rockfill materials

Material	Maximum particle size d_{max} (mm)	Diameter of specimen D (mm)	$\frac{D}{d_{max}}$	Height of specimen (mm)	Specific gravity	Uniformity coefficient
G	9.5	100	11	200	2.84	4.5
PL	152	914	6	2290	2.62	7.6
PM	50.8	305	6	762	2.62	6.8
PS	11.9	71	6	178	2.62	7.2
BL	152	914	6	2290	2.87	7.6
BM	50.8	305	6	762	2.87	6.8
BS	11.9	71	6	178	2.87	7.2

G: Greenschist, P: Pyramid dam material, B: Crusched basalt

Cam-clay 式などの応力ひずみ式では、3つの材料定数 λ , κ および M を用いる。前2者は、等方圧縮試験によって、また M はせん断試験の結果に基づいて決定される。以下において、文献のデータを整理して材料定数を決定していくが、実験データが不十分な場合にはこれまでの研究で得た知識を基にして類推でデータの整理を行った。

3.1 圧縮特性

(1) 緑色片岩の拘束圧縮特性

材料定数 λ および κ は等方圧縮試験の結果を $e \sim \ln p_i$ にプロットして求められる。ここに e は間ゲキ比、 p_i は等方圧縮圧力である。しかし、緑色片岩については $e \sim \ln p_i$ 関係を描くに足る実験データが与えられていないので、拘束圧縮試験による $e \sim \ln p_c$ 曲線を代用する。正規圧密粘土に関しては、 $e \sim \ln p_c$ によって λ , κ を決定しても結果はあまり変わらないことが示されている⁹⁾。

Fig.2 は緑色片岩の $e \sim \ln p_c$ 関係を示す。この実験は、内径 150mm、高さ 70mm の鋼製シリンダーに試料を詰め、拘束状態で一次元的に圧縮圧力 p_c を加えていったものである⁸⁾。

同図から次のことが読み取れる。すなわち、試料に圧縮圧力を加えていくと、 $e \sim \ln p_c$ 曲線は、始めは小さな勾配で変化するが、ある応力点に達すると降伏して以後は大きな勾配で変化するようになる。この $e \sim \ln p_c$ 曲線の特性は、広範な等方応力域における砂の $e \sim \ln p_i$ 曲線の特性と同じであって⁴⁾ 次のように解釈できよう。すなわち

- a) A'B'...E' 線は粒子破碎による非可逆の間げき比変化を生じる領域であり飽和粘土の正規圧密曲線に相当する。
- b) 正規圧密曲線より左側の領域は第一次近似とし

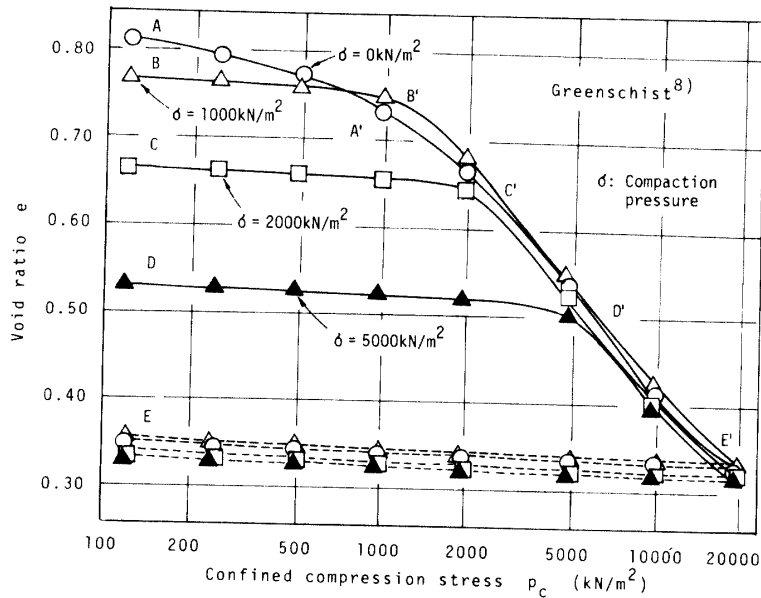


Fig.2 $e \sim \ln p_c$ characteristics of the Greenschist

て弾性領域とみなせる。AA', BB', ...などの曲線はいわゆる膨張曲線に相当し再負荷過程はほぼこの上を通る。

c) 試料の A, B, C, D の各点は、いわば過圧密な状態にあるとみなされて、それらの先行圧縮応力 (圧密降伏応力 p_v) は、それぞれ A', B', C', D' 各点の応力で与えられる。

上述の解釈に立てば、A'B'C'...を連ねる線の勾配から定数 λ を、また AA', BB' などの曲線の勾配から κ の値をそれぞれ求めることができる。

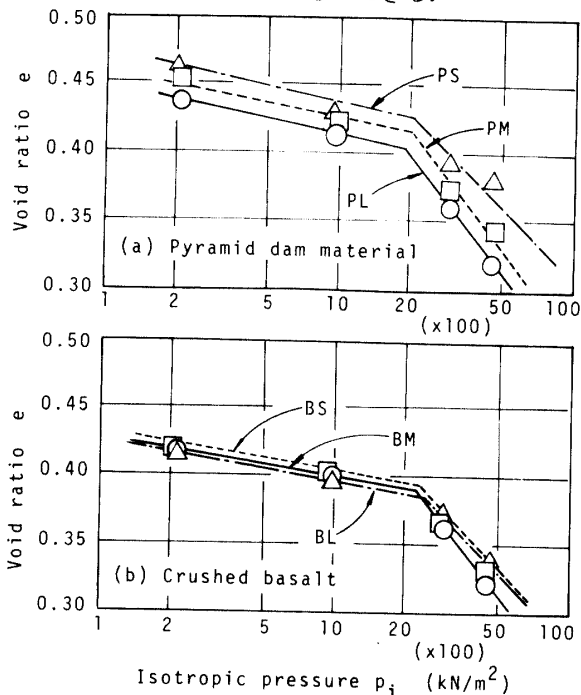


Fig. 3 $e \sim \ln p_i$ characteristics of the Pyramid dam material and the Crushed basalt

(2) P材料, B材料の $e \sim \ln p_i$ 特性

ピラミッドダム材料および破碎玄武岩については、それらの圧密排水三軸圧縮試験における拘束圧の大きさは、圧密降伏密力 p_v を十分越える大きさまでとられている。したがって、実験データの数は少ないが、必要とする $e \sim \ln p_i$ 関係は一応求めることができる。

Fig. 3 (a), (b)はP材料および、B材料の $e \sim \ln p_i$ 関係を示したものである。同図において、圧密降伏応力 p_v は2本の直線の交点で与えられ、また、材料定数 λ および κ はそれぞれ p_v より右側および左側の直線勾配によって与えられる。

p_v , λ および κ の各値と試料最大粒径 d_{max} の関係は Fig. 4 および Fig. 5 に示すようであった。 d_{max} が大きくなるほど p_v 値が低下するのは、a) 一定の応力下で考えたとき d_{max} が大きいほど粒子間圧力は大きくなるのでより低い応力下で破碎が始まる、 b) d_{max}

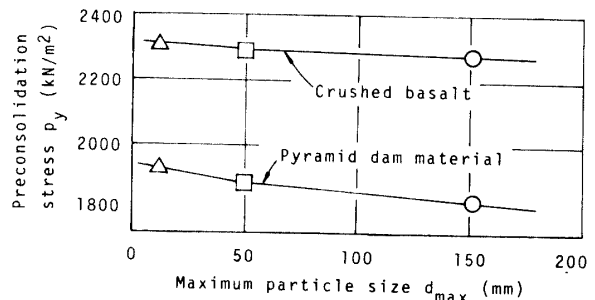


Fig.4 Change of the preconsolidation stress with increasing particle size of the rockfill material

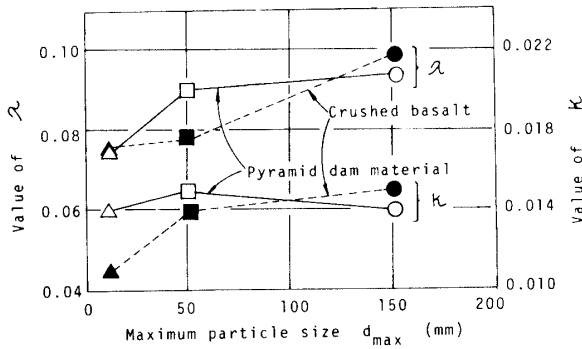


Fig. 5 Change of the value of λ and κ with increasing particle size of the rockfill material

が大きいほどより劣弱な潜在クラック（より大きい寸法の潜在クラック）を含むようになる，などの理由によると推察される。材料定数については， d_{max} が大きくなるに伴って λ および κ 共に大きくなる傾向が認められる。

3.2 強度特性

せん断中の土が有効平均主応力 $p (=(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3)$ ，軸差応力 $q (= \sigma'_1 - \sigma'_3)$ および間げき比 e の変化なしにせん断変形が進行する状態になったとき，土は限界状態に達したという。限界状態は次の2式によって表わされる⁵⁾。

$$\Gamma = e + \lambda \ln p \tag{1}$$

$$q = Mp \tag{2}$$

ここに Γ は，限界状態線上の基準圧力に対する間げき比である。また， M は限界状態における土の摩擦特性

を表わす材料定数であって，せん断抵抗角 ϕ' との間に次の関係がある。

$$M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi') \tag{3}$$

式 (1) および (2) は種々の正規圧密粘土または軽く過圧密された粘土についての実験事実に基づくものであるが，これらの関係式は高圧下の砂に対してもあてはまる⁴⁾。

さて，綠色片岩，ピラミッドダム材料および破碎玄武岩の排水三軸圧縮試験における $p \sim q$ プロットは，Fig. 6 に示すようであった。材料定数 M 値を求めるために正規圧密状態の試料に対する破壊点に注目して原点を通る直線を引いた。過圧密比が大きくなるのに伴って，破壊点は，この直線から離れる傾向が認められる。

3.3 材料定数

上述のようにして求めた3つの材料定数をまとめると Table 2 のようになる。P材料およびB材料については，試料最大粒径 d_{max} が大きくなるほど M の値は小さくなる傾向が認められる。これは， p_y 値の場合と

Table 2. Material constants

Material	λ	κ	κ/λ	M
G	0.14	0.0036	0.26	1.57
PL	0.094	0.014	0.15	1.43~1.46
PM	0.090	0.015	0.17	1.46~1.49
PS	0.075	0.014	0.19	1.55~1.58
BL	0.099	0.015	0.15	1.46~1.50
BM	0.078	0.014	0.18	1.52~1.54
BS	0.076	0.011	0.14	1.60~1.62

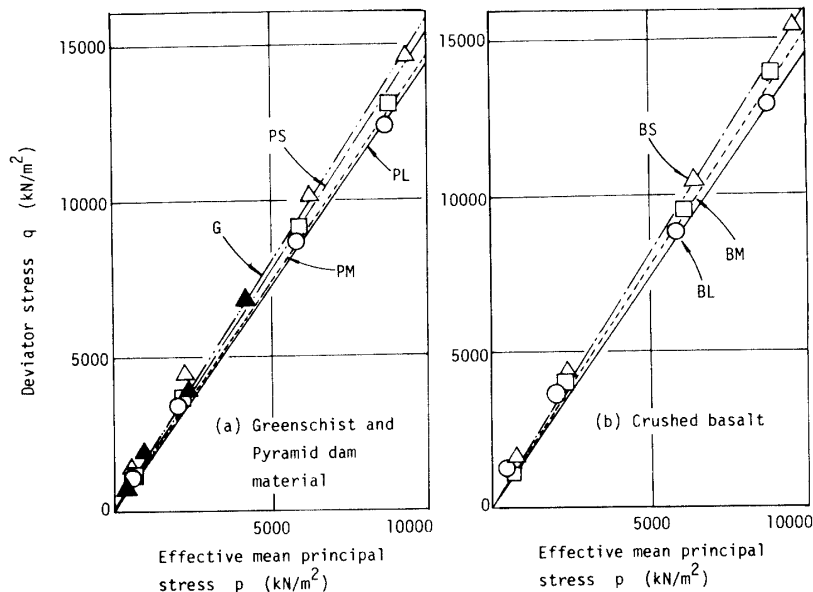


Fig. 6 Determination of critical state line based on the test results of drained triaxial compression test

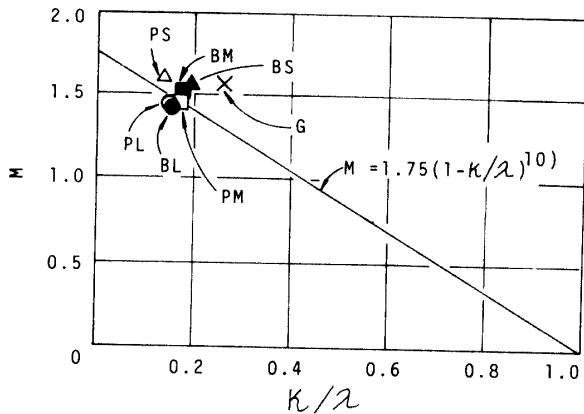


Fig. 7 Relation between κ/λ and M

同じように、粒子の破碎され易さと関係がありそうである。

ところで、軽部は飽和粘土について Fig. 7 に示すような $M \sim (\kappa/\lambda)$ 関係を見出している¹⁰⁾。そこで、ロック材料の M 値と κ/λ の関係を同図上にプロットしてみると、ほぼ $M=1.75(1-\kappa/\lambda)$ の線に集まり、ロック材料の材料定数間の関係は飽和粘土の場合とほぼ同じであることがわかる。

4. 応力ひずみ関係

4.1 正規圧密状態の場合

等方硬化性の弾塑性モデルとして、Cam-clay 式およびその修正式が提案されている¹⁾。これらの式は、応力とひずみ増分の関係を表わしたものである。排水三軸圧縮試験の場合には、 $dq=3dp$ なる応力経路をたどるのでこの関係を増分式に入れると、積分が可能となって次式を得る。ただし、脚符 c および m は、それぞれ Cam-clay 式および修正式を意味する。

$$\varepsilon_c = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left\{ \frac{1}{3 - M} \ln \left(\frac{3 - \eta}{M - \eta} \right) - \frac{1}{M} \ln(M - \eta) + C_1 \right\} \quad (4)$$

$$v_c = \frac{1}{1 + e} \left\{ \frac{\lambda - \kappa}{M} \eta - \lambda \ln(3 - \eta) + C_2 \right\} \quad (5)$$

および

$$\varepsilon_m = \frac{2(\lambda - \kappa)}{1 + e} \left\{ \frac{3}{2M(3 + M)} \ln(M + \eta) - \frac{3}{2M(3 - M)} \ln(M - \eta) - \frac{1}{M} \arctan \left(\frac{\eta}{M} \right) + \frac{3}{9 - M^2} \ln(3 - \eta) + C_3 \right\} \quad (6)$$

$$v_m = \frac{1}{1 + e} \left\{ (\lambda - \kappa) \ln(M^2 + \eta^2) - \lambda \ln(3 - \eta) \right.$$

$$\left. + C_4 \right\} \quad (7)$$

ここに、 $\varepsilon = \varepsilon_1 - (v/3)$ 、 $v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ 、 $\eta = q/p$ 、積分定数 $C_1 \sim C_4$ は、諸式に材料定数 λ, κ, M の値を代入し、初期条件を考慮して決定される (Table 3)。

さて、正規圧密状態におけるピラミッドダム材料および破碎玄武岩の排水三軸圧縮試験における応力ひず

Table 3. Integrating constants

Material	C_1	C_2	C_3	C_4
PL	0.103	-0.342	0.0427	-2.49
PM	0.0989	-0.342	0.0421	-2.49
PS	0.0824	-0.342	0.0362	-2.49
BL	0.109	-0.334	0.0429	-2.62
BM	0.0857	-0.334	0.0355	-2.62
BS	0.0835	-0.334	0.0325	-2.62

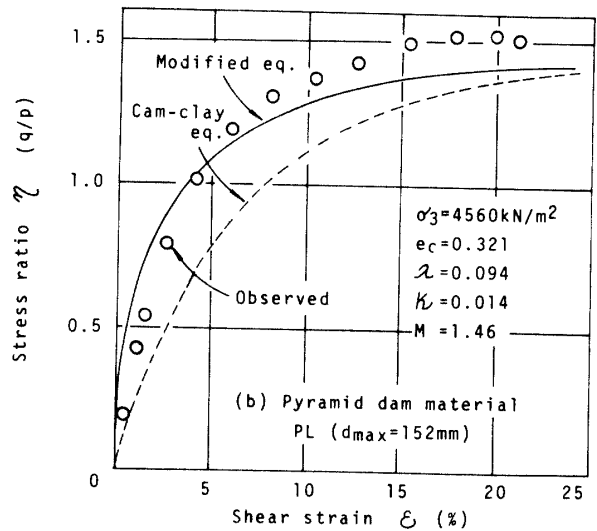
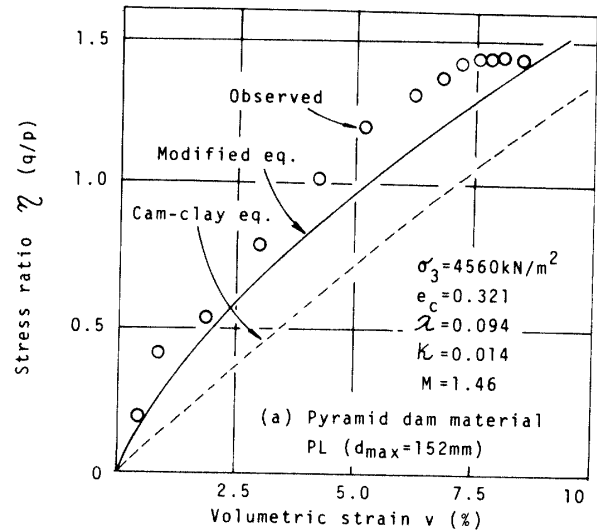


Fig. 8 Stress strain relation of the Pyramid dam material in drained triaxial compression test

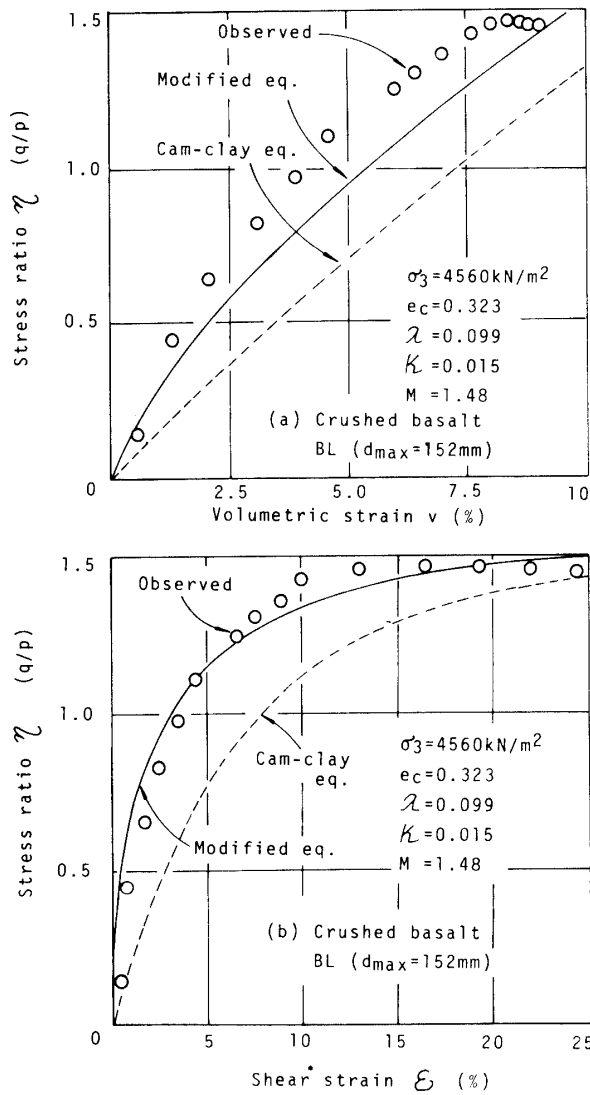


Fig.9 Stress strain relation of the Crushed basalt in drained triaxial compression test

み曲線と、式(4)~(7)によって描いた応力ひずみ曲線との比較は、Fig.8 および Fig.9 に示すようである。これらの図において、実験曲線とモデル曲線は、おおむね一致すること、2つのモデルの適合性の比較では、修正式の方が実際のデータに近いことなどがわかる。

Fig.10 および 11 は、修正式による $q \sim \epsilon_1 \sim v$ 関係を描き実験結果と対比させたものである。

4.2 過圧密状態の場合

Fig.2 の AA' 曲線で示したように、締め固め圧を加えずに供試体を作製した場合には、緑色片岩の降伏応力 p_y 値は $1,560 \sim 1,930 \text{ kN/m}^2$ となる。ゆえに、 $\sigma_3 = 1,000 \text{ kN/m}^2$ で等方圧密した場合には (Fig.12 において $O \rightarrow A$ の応力経路)、この供試体は $O \rightarrow B \rightarrow A$ 経路で過圧密されたのと同じ状態にあると考えることができる。

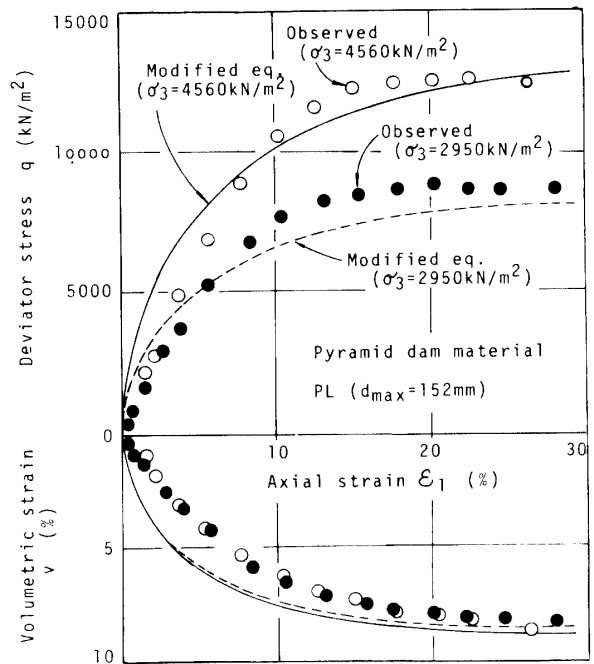


Fig.10 Comparison of predicted stress strain curve with observed on the Pyramid dam material

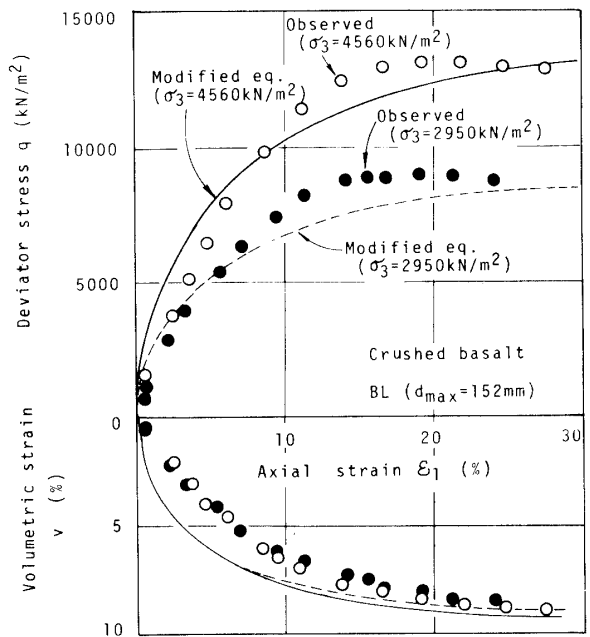


Fig.11 Comparison of predicted stress strain curve with observed on the Crushed basalt

等方硬化理論においては、この材料はBPCなる降伏曲面を有することになる。したがって $\sigma_3 = A \text{ kN/m}^2$ で等方圧密の後、拘束圧一定の排水せん断試験を行えば、OAF の応力経路をたどりP点で塑性ひずみを生じはじめF点で限界状態に達することになる。扇形OBCは弾性領域であるが、Roscoeらは、弾塑性モデ

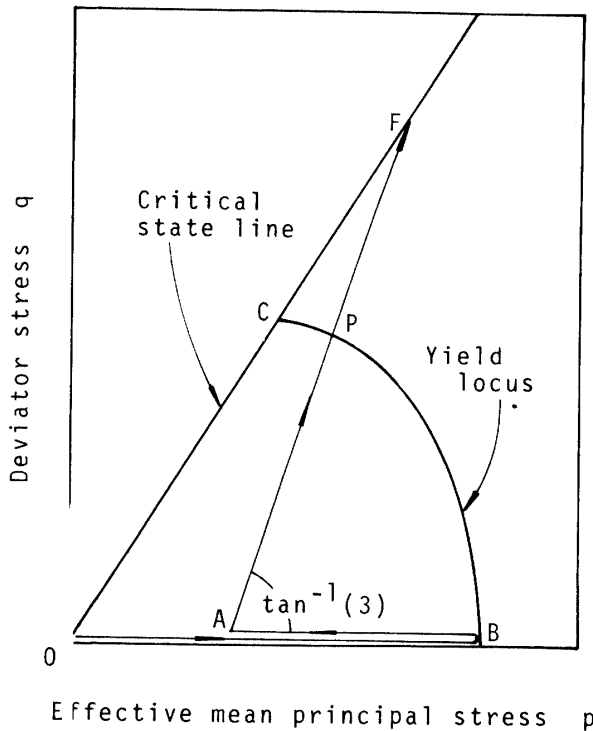


Fig.12 Stress path in the drained triaxial compression test on an overconsolidated specimen.

ルのこの領域における変形に対して $v^e > 0$, $\epsilon^e = 0$ を仮定している。この v^e は、次式で与えられる。

$$v^e = \frac{\kappa}{1+e_c} \ln p + C \quad (8)$$

ただし、 e_c は等方圧密後の間げき比

ここで $\sigma_3 = \text{一定}$ の排水条件では、 $p = 3\sigma_3 / (3 - \eta)$ の関係がなり立ち、また、点Aでの初期条件は、 $\eta = 0$ で、 $e_c = e_A$, $v = v^e = 0$ であるから、積分定数 C は、 $C = -\kappa \ln \sigma_3 / (1 + e_A)$ となる。結局、弾性的な体積ひずみは次式で与えられる。

$$v^e = \frac{\kappa}{1+e_A} \ln \left(\frac{3}{3-\eta} \right) \quad (9)$$

さて、降伏曲線 (Fig.12 の BPC) は、次式で与えられている。

Cam-clay 式による降伏曲線

$$\eta = M \ln \left(\frac{p_y}{p} \right) \quad (10)$$

修正式による降伏曲線

$$\frac{p}{p_y} = \frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \quad (11)$$

ここに、 p_y は、圧密降伏応力を意味する。降伏点 P の応力比 η_P は、 $p = \sigma_3 / (3 - \eta)$ の関係を式 (10)(11) へ代入するとこの時の応力比 η で与えられる。すなわち Cam-clay 式による降伏時の応力比 η_P は、

$$\eta_P = M \ln \left\{ \frac{(3 - \eta_P) p_y}{3 \sigma_3} \right\} \quad (12)$$

上式より、直接その解を得ることはできないので、Newton 法等により、その近似解を求める。

修正式による降伏時の応力比 η_P は

$$\eta_P = \frac{-M p_y + \sqrt{(M p_y)^2 + 36 \sigma_3 (p_y - \sigma_3)}}{6 \sigma_3} M \quad (13)$$

また、応力経路 A→Y は弾性域内にあるので、この時の間げき比変化は、 $e = e' - \kappa \ln p$ に従う。ただし、 e' は p の基準の値に対する弾性的間げき比の値である。点Aで $e = e_A$, $p = \sigma_3$ であり、点Pでは、 $e = e_P$, $p = 3\sigma_3 / (3 - \eta_P)$ であるから次式を得る。

$$e_P = e_A + \kappa \ln \left(\frac{3 - \eta_P}{3} \right) \quad (14)$$

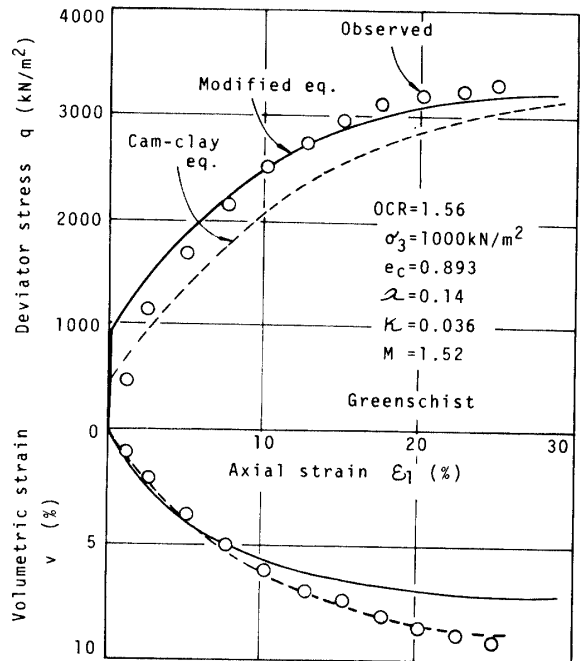


Fig.13 Comparison of predicted stress strain curve with observed on an overconsolidated Greenschist

このようにして、Cam-clay 式、修正式に対する降伏点の応力比 η_P 、間げき比 e_P をそれぞれ決定する。前者に対する降伏点を $P_C(\eta_{PC}, e_{PC})$ 、後者に対する降伏点を $P_M(\eta_{PM}, e_{PM})$ とすると、過圧密状態の試料の応力ひずみ式は次のようになる。

$$0 \leq \eta \leq \eta_P \text{ のとき} \\ v^e = e_m^e = 0 \quad (15)$$

$$v^e = v_m^e = \frac{\kappa}{1+e_A} \ln \left(\frac{3}{3-\eta} \right) \quad (16)$$

$\eta_P \leq \eta \leq M$ のとき

Cam-clay 式では、式 (4), (5) により

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c(\lambda, \kappa, M, e_{PC}, C'_1)$$

$$v_c = v_c(\lambda, \kappa, M, e_{PC}, C'_2)$$

ただし、 C'_1 および C'_2 は $\eta = \eta_{PC}$ のとき $\varepsilon_c = 0$,

$v_c = v^e$ より求める。

次に修正式では、式 (6), (7) により

$$\varepsilon_m = \varepsilon_m(\lambda, \kappa, M, e_{PM}, C'_3)$$

$$v_m = v_m(\lambda, \kappa, M, e_{PM}, C'_4)$$

ただし、 C'_3 および C'_4 は、 $\eta = \eta_{PM}$ のとき $\varepsilon_m = 0$,

$v_m = v^e$ より求める。

軸ひずみについては、常に $\varepsilon_1 = \varepsilon + (v/3)$ の関係より求める。

以上の方法によって求めた緑色片岩に対する応力ひずみ曲線と実験結果との比較は、Fig.13 に示されている。

5. まとめ

ロック材料が $1,000\text{kN/m}^2 \sim$ 数 $1,000\text{kN/m}^2$ の拘束圧下でせん断される場合の応力ひずみ関係を予測するのに、Roscoe らの等硬化性弾塑性モデルを用いることを検討し次のような結論を得た。

1) 等方(または一次元的)圧縮圧力 p_i (または p_c) と間げき比 e の関係は、半対数図上で折点をほさむ 2本の直線で近似できる。折点は圧密降伏応力点 p_y とみなし得る。

2) $e \sim \ln p_i$ 曲線において、 p_y に至る部分は弾性的変形領域であり、膨張曲線(あるいは、再負荷曲線)とほぼ同じ勾配を示すのでこれより κ の値が決定できる。 λ 値は p_y より高い圧力域の $e \sim \ln p_i$ 曲線勾配で与えられる。

5) 正規圧密状態の試料を対象に $p \sim q$ 関係をプロットし摩擦定数 M を決定した。3つの材料定数の間

には、正規圧密粘土の場合と同じような関係、 $M/1.75 = 1 - (\kappa/\lambda)$ が見出された。

6) 過圧密状態の材料については、降伏曲面内においては v^e の発生のみを認め ($\varepsilon^p = \varepsilon^e = v^p = 0$)、降伏曲面を越えてから ε^p , v^p を計算することにより理論曲線を求めればよい。この方法で求めた応力ひずみ曲線と緑色片岩の実験曲線とは、比較的よく一致することが認められた。

終りに、貴重な実験データの使用を快くお許しいただいた九州電力総合研究所の赤司六哉室長に深謝いたします。

参考文献

- 1) Roscoe, K.H. and Burland, J.B.: Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press (1975), pp.535~609
- 2) 三浦哲彦・岡田 進: 山口大学工学部研究報告, 26, 35 (1975)
- 3) 三浦哲彦・乗安直人・綾木和弘: 山口大学工学部研究報告, 27, 215 (1977)
- 4) 三浦哲彦: 土木学会論文報告集, No. 282, 127 (1979)
- 5) Schofield, A.N. and Wroth, C.P.: Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill Book Company (1968)
- 6) Marsal, R.J.: Proc. ASCE, 93, 27 (1967)
- 7) Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B. and Duncan, J.M.: Geotechnical Engineering Report No. TE69-5, (1969)
- 8) 九州電力総合研究所土木研究室: 第9回材料試験に関する報告検討会資料(その1), (その2) (1978)
- 9) Amerasinghe, S.F. and Parry, H.G.: Proc. ASCE, 101, 1277 (1975)
- 10) 軽部大蔵: 第20回土質工学シンポジウム, 昭和50年度発表論文集, 45 (1975)

(昭和54年10月15日 受理)