

埼玉大学工学部 正 吉中龍之進 (株)熊谷組 正 清水昭男
小田急建設(株) 正○山田治宏 (株)熊谷組 正 森田栄治

はじめに 岩盤(特に軟岩盤)掘削等における地山のゆるみの問題は、従来より材料のひずみ軟化現象によるものと考えられている。ひずみ軟化現象は、従来の弾塑性論では説明困難な現象であり、軟岩に関してもそれは例外ではない。そこで我々は、ひずみ軟化現象をマクロにみつめ、ひとつの破壊確率現象とみなし、その応力～ひずみ関係を、確率密度関数の1つであるワイブル分布関数にて表現する試みを行った。

1. 実験試料 本研究に使用したデータは、シルト質軟岩4種、泥質軟岩2種、凝灰岩1種、硬質砂岩1種の計8種であり、その物理諸量は表1に示すとおりである。本報告では、このうち多孔質凝灰岩の大谷石と宮崎青島互層泥岩部の結果を中心に説明していく。なお、図1、2はそれぞれの岩の三軸圧縮試験における軸差応力～軸ひずみ関係である。

また、本研究に先立って、供試体の形状、寸法を変化させて三軸圧縮試験を実施したが、ひずみ軟化現象は、各々の試験において発生し、この現象が岩石固有の特性であるということを確認している。

2. 解析手法 軸ひずみを ϵ_1 、軸差応力を $\bar{\sigma}$ 、最大強度時の軸ひずみを ϵ_{1p} 、最大強度を $\bar{\sigma}_p$ 、残留強度を $\bar{\sigma}_r$ とし、最大強度以降に対し、

$$\epsilon_n = (\epsilon_1 - \epsilon_{1p}) / \epsilon_{1p} \quad \epsilon_n: \text{規格化した軸ひずみ} \cdots (1)$$

$$\bar{\sigma}_n = (\bar{\sigma}_p - \bar{\sigma}) / (\bar{\sigma}_p - \bar{\sigma}_r) \quad \bar{\sigma}_n: \text{軟化時の強度低下率} \cdots (2)$$
の2つの量を考えると $\epsilon_n = 0$ ($\epsilon_1 = \epsilon_{1p}$ のとき) $\rightarrow \bar{\sigma}_n = 0$: 強度低下率 0%
 $\epsilon_n \rightarrow \infty$ ($\epsilon_1 \rightarrow \infty$ のとき) $\rightarrow \bar{\sigma}_n = 1$: 強度低下率 100%
となり、累積確率分布関数で定式化できることがわかる。そこで本研究では、この関係をワイブル分布関数で表現することを試みた。図3は、ワイブル確率紙上に実験値(大谷石)の $\epsilon_n \sim \bar{\sigma}_n$ 関係をプロットしたものであるが、図に示すとおり直線関係が得られ、同

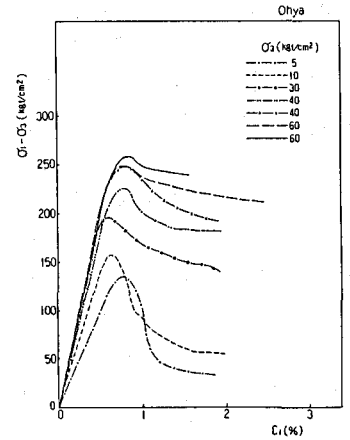


図1 応力～ひずみ関係(大谷石)

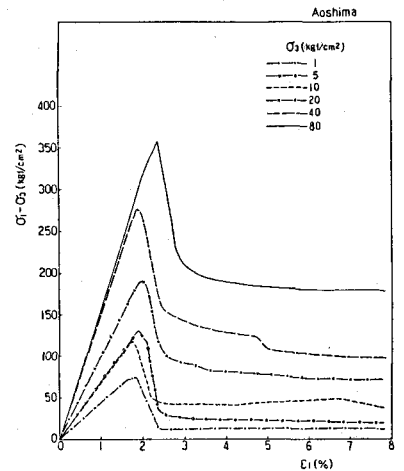


図2 応力～ひずみ関係(青島互層)

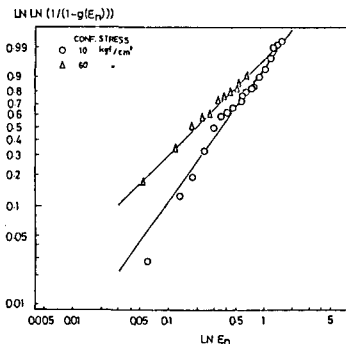


図3 ワイブル確率紙上の応力～ひずみ関係

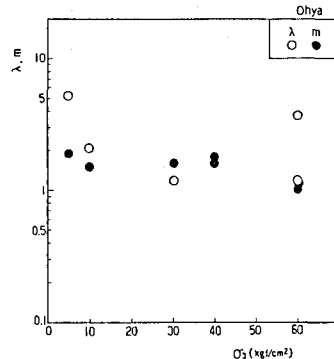


図4 パラメータ λ, m (大谷石)

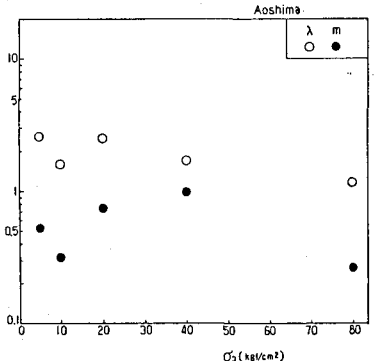


図5 パラメータ λ, m (青島互層)

関係がワイブル分布で表現可能なことがわかる。以上を式で表わすと、

$$\bar{\sigma}_n = F(\epsilon_n) = 1 - \exp(-\lambda \cdot \epsilon_n^m) \dots\dots\dots (3)$$
 となる。式中の λ 、 m はパラメータであり、図3に示すように実験値を線形回帰することによって求まる。図4、5はこうして求めた λ 、 m の値を拘束圧別にプロットしたものである。岩によって傾向は異なるが、 λ 、 m の値に極端なばらつきはなく、ある範囲に分布する値であることがわかる。また、一連の研究により、 λ は残留強度への収束性、 m は軟化初期の強度の低下率に影響を与える値であることがわかった。そこで式(2)を変形し、式(3)を代入すれば

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_p - \{1 - \exp(-\lambda \cdot \epsilon_n^m)\} (\bar{\sigma}_p - \bar{\sigma}_r) \dots\dots\dots (4)$$

となり、材料の最大強度： $\bar{\sigma}_p$ 、残留強度： $\bar{\sigma}_r$ が求まれば、任意の軸ひずみ： ϵ_n に対する軟化時の強度： $\bar{\sigma}$ が求まることになる。そこで本試料にべき関数型の破壊規準⁽¹⁾を適用し、各拘束圧に対する $\bar{\sigma}_p$ 、 $\bar{\sigma}_r$ を求め、それぞれの拘束圧に対して、軟化時の応力～ひずみ関係を計算してみた。図6、7にその結果を実験値とともに示す。なお、簡単のため今回は、 λ 、 m の値は図4、5の平均値を、最大強度時の軸ひずみ： ϵ_{ip} も実験値の平均をとっている。これらの図を見る限り、一連の解析手法による近似は一応の成功を収めているといえる。また、この手法を硬質砂岩についても適用してみたが、この場合もよい整合性が得られた。このことにより、本手法が岩石材料全体についても適用できる有効な手法であることが予想される。なお、各岩に関するパラメータ λ 、 m 、 ϵ_{ip} の平均値は、表2に示した。また、これらの値には若干の拘束圧依存性が見られるため、それらの値を拘束圧の関数とすれば、さらに実験結果と整合性のある解析曲線が得られると思われる。

3. 結論 本研究で得られた知見をまとめると以下のようなになる。
- ①岩石のひずみ軟化時の応力～ひずみ関係は、ワイブル分布関数を用いて表現でき、その形は式(4)ようになる。
 - ②岩石の最大強度、残留強度が求まれば、軟化時の応力～ひずみ関係は、 λ 、 m 、 ϵ_{ip} の3つのパラメータで表現可能となる。
 - ③軟岩を対象とした今回の解析手法は硬岩についても適用することが可能である。

あとがき 本報告は、軟化時の応力と軸ひずみの間に、ワイブル分布関数の適用を試みたものであるが、全軸ひずみに対する塑性軸ひずみの発生に、ワイブル分布が適用できるとの報告⁽²⁾がある。表1の実験試料に関しては、それらの関係についても検討を行った。その結果、上記の関係のみならず、塑性体積ひずみと塑性軸ひずみとの間にもワイブル分布の適用が可能ながことが判明したがこの件に関しては別途報告する。

参考文献

(1) Yoshinaka R. and T. Yamabe('80), Soils and Found. Vol. 20, No.4, PP.113~126 (2) 福島, 木下, 日本鉱業会誌/90 1042('74-12)PP769~773

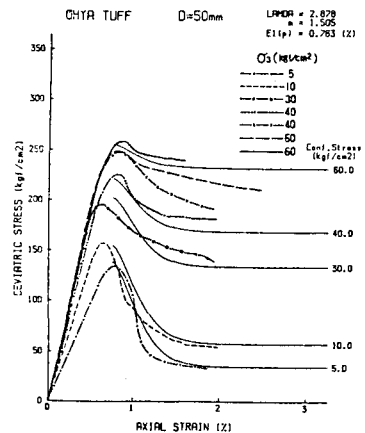


図6 計算曲線と実験曲線の比較(大谷石)

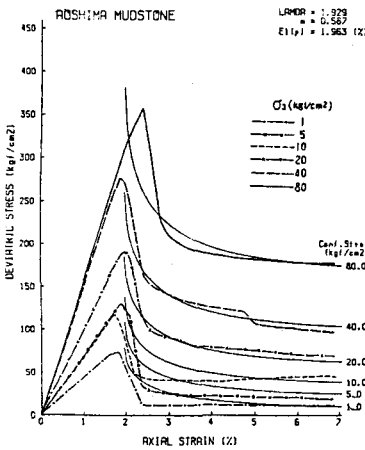


図7 計算曲線と実験曲線の比較(青島互層)

Sample name	ϕ (mm)	Q_u (kgf/cm²)	e_0	ω_0 (%)
Ohya tuff	$\phi = 50$ mm	130.9	0.42	17.3
	$\phi = 100$ mm	113.6		
Aoshima mudstone		95.5	0.18	6.1
Kamihoshikawa siltstone	$\phi = 50$ mm	21.0	0.94	32.6
	$\phi = 100$ mm	17.2		
Noguchi mudstone	block 1	47.2	0.41	18.8
	block 8	50.8	0.43	17.6
Tomoka siltstone		32.0	1.59	66.3
Nishiyama siltstone		54.8	1.17	42.9
Nakazato siltstone		37.4	0.70	25.3
sand stone (hard rock)		1110.0	—	—

表1 物理諸量

Sample name	λ	m	ϵ_{ip} (%)
Ohya tuff	$\phi = 50$ mm	2.88	1.51
	$\phi = 100$ mm	1.61	1.39
Aoshima mudstone		1.93	0.57
Kamihoshikawa siltstone	$\phi = 50$ mm	1.80	1.63
	$\phi = 100$ mm	2.24	1.12
Noguchi mudstone	block 1	2.53	0.96
	block 8	2.99	0.94
Tomoka siltstone		0.90	0.72
Nishiyama siltstone		1.30	0.84
Nakazato siltstone		0.59	1.13
sand stone (hard rock)		1.18	1.67

表2 各種パラメータ