

(10) 一軸圧縮荷重下での岩石の応力緩和特性 — Fenner-Pacher線図と関連して —

東京大学工学部 正会員 大久保誠介
正会員 西松 裕一
東京大学大学院 学生会員 福井 勝則
○上野 高明

1. はじめに

トンネル、地下空洞等の安定性と支保設計について検討する際に、Fenner-Pacher線図がよく用いられる¹⁾。この線図によって示される概念は比較的理解しやすく、得られる結果は従来の経験と定性的にはよく一致することが多い。しかしながら、一步進んで定量的に議論しようとする、種々の問題にぶつかる。そのうち、根本となる地山特性曲線の推定が困難であることが最大の問題点としてあげられる。最近になって、有限要素法、個別要素法等による弾塑性解析^{2, 3)}により、地山特性曲線を求めようとする試みがいくつか見受けられるが、未だ確立したものとは言えない。

本研究では、比較的簡単な場合について、実験的に地山特性曲線を評価・検討した。すなわち、天盤を介して一定の荷重を受けている鉤柱（岩柱）に、種々の剛性を持つ支保を打設した時を想定し、実験的に挙動を調べてみることにした。岩石試験片に一定荷重を加え、適当な時期に支保に相当するバネを試験片と並べて挿入すれば、想定した状況下での挙動を調べることができると考えた。しかしながら、これは相当に困難な実験であるので、実際には最近開発した制御方法^{4, 5)}を応用して模擬実験を実施した。

2. 実験方法

天盤を介して一定の荷重を受けている鉤柱に、ある剛性を持つ支保を打設した時を想定すると、鉤柱は(1)式に従い変形する。

$$Y + \alpha \cdot \lambda_0 \cdot F = C \quad \dots (1)$$

ただし、 Y 、 F 、 λ_0 は、それぞれ変位、岩盤荷重、岩盤のコンプライアンスである。 α は支保と岩盤のコンプライアンスの比である。 $\alpha = 0$ は支保剛性が無限大の時に相当し、鉤柱の変位が一定に保たれた状態で荷重が次第に緩和していく。また、 $\alpha = \infty$ は無支保の場合に相当し、鉤柱は一定の荷重を受け続け、クリープ変位が次第に増加していく。実際の支保剛性は有限であるので、図1に示すように、岩盤荷重の減少と変位の増加がともに生じる。

実験では、岩石試験片にまず0点からA点まで一定の歪速度（ 10^{-4} s^{-1} ）で載荷し、その後A点よりB点までCを一定に保った時の荷重の経時変化を計測した（一般化した応力緩和実験）。実験には、新たに開発したデジタル制御方式のサーボ試験機を用いた。データの採取間

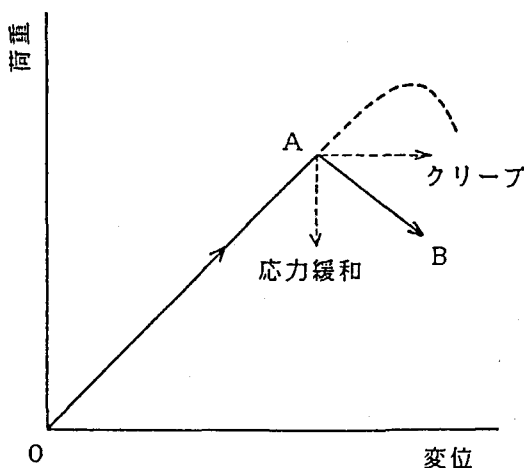


図1 一般化した応力緩和実験の概念図。

0からAまで載荷し、その後Cを一定に保つ。

隔は60msとし、実験開始後3時間で実験を打ち切った。応力緩和を開始する応力レベルを破壊強度の52%, 73%, 94%、 α の値を0.0, 0.3, 1.0と変化させ、各条件(計9条件)にて5本ずつ実験を行った。なお、岩石試料として三城目安山岩を用い、高さ5cm、直径2.5cmの円柱形に整形して実験を実施した。三城目安山岩の物性値を表1に示す。

表1 三城目安山岩の物性値

圧縮強度(kg/cm ²)	726
Young率(kg/cm ²)	8.33・10 ⁴
圧裂引張強度(kg/cm ²)	66.2
見掛け比重	2.16

3. 実験結果及びFenner-Pacher線図について

一般化した応力緩和実験における応力緩和の経時変化を図2、図3に示した。なお、応力緩和量は、実験開始1s後の値を0とした。図より、応力の緩和量 σ_{RE} は時間 t の対数に比例し、次式であらわせることがわかる。

$$\sigma_{RE} = \alpha \cdot \log(t) \quad \dots (2)$$

α が同じであると、応力緩和を開始する応力レベルが大きいほど、応力緩和量が大きくなっているのが図2よりわかる。また、応力緩和を開始する応力レベルが同じであるとする、 α が大きくなるほど応力緩和量は少なくなるのが図3よりわかる。

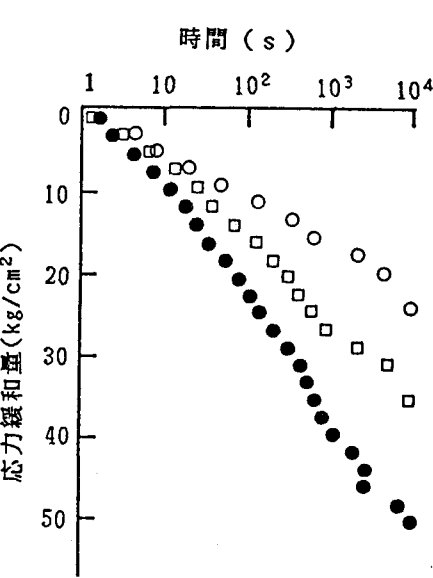


図2 応力緩和量に及ぼす応力レベルの影響。
 α は0.3とし、応力緩和開始時の
応力レベルは上より、52, 73,
94%である。

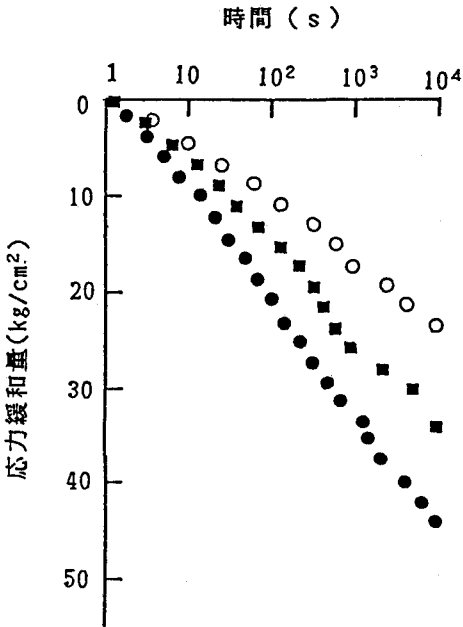


図3 応力緩和量に及ぼす α の影響。
応力緩和開始時の応力は破壊強度の
73%とした。 α は、上より、
1.0, 0.3, 0である。

図4は、一般化した応力緩和実験開始後 10^2 s, 10^4 sの応力-歪線図上の位置を示したものである。図より、応力緩和を開始する応力レベルが52, 73%の実験においては、実験開始後同一時間が経過した時の応力-歪線図上での位置を線で結ぶと、載荷時の応力-歪線図と平行となることがわかる。また、応力緩和を開始する応力レベルが94%の場合、同一時間が経過した時の位置を結ぶと、強度破壊点近傍の応力-歪線図を下に平行移動したごとくになる。言い換えれば、一定時間後には応力-歪線図を相似形のまま縮小した線上に移動するとも言える。

今回の研究で想定している、鉤柱と支保における支保荷重と変位との関係を、以上の実験結果に基づき模式的に描いたものが図5である。まず、図5の(a)は、比較的地圧の小さい時で、図4の(b), (c)に対応している。採掘からある時間経過した時の到達点は、縦軸の切片を通常の応力緩和時の応力緩和量とし、横軸の切片をクリープ変位とする直線上にあると考えた。この直線は時間経過とともに、斜め上方に移動していき、その移動速度は経過時間に反比例するものとした。ここで、ABで表わされる剛性を持つ支保を経過時間 10^3 s後に打設した時のことを考えてみる。この場合、最初の 10^3 sの間は、OAにそってクリープ変形が進み、その後ABにそって支保荷重の増加が生ずる。 10^4 s後、 10^5 s後の支保荷重と、鉤柱の変位はそれぞれC点、D点であると予測される。

図5(b)は、大きな地圧が加わっている時のもので、図4の(a)に対応している。この場合には、到達点を結んだ曲線は次第に湾曲してゆくものと考えられる。図の場合、 10^4 s後の到達点を結んだ曲線は横軸と交わるが、 10^5 s後のものは横軸と交わらない。これは、無支保の時には 10^5 sまでに破壊をしてしまうことを意味している。言い換えれば、この場合のクリープ寿命は 10^5 s以下であるともいえる。

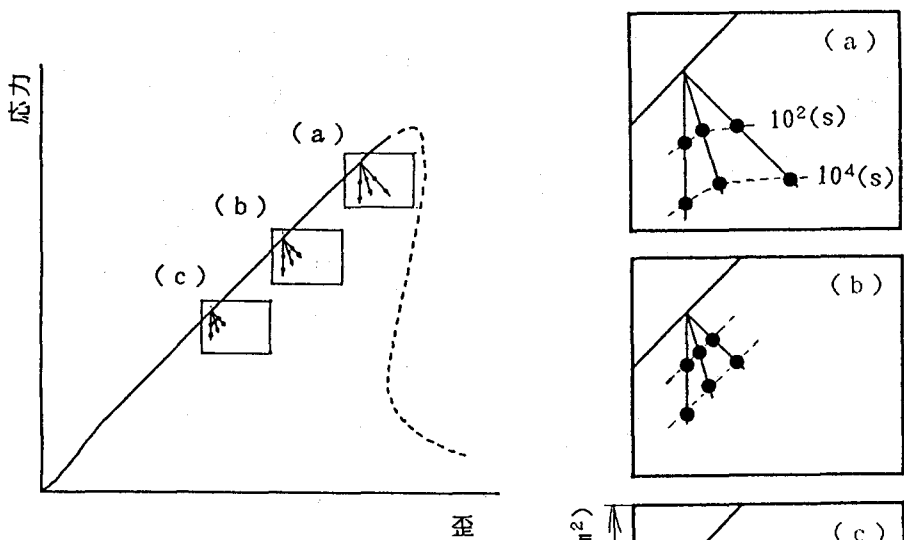
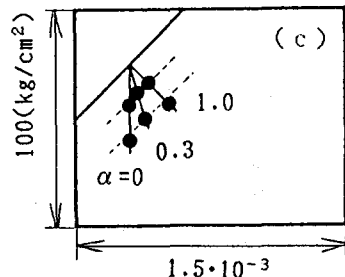


図4 一般化した応力緩和実験の結果。
実験開始後 10^2 , 10^4 s経過した時の
応力-歪線図上での位置. a, b, cは
それぞれ実験開始時の応力レベルを94,
73, 52%とした時の結果を拡大した
ものである。



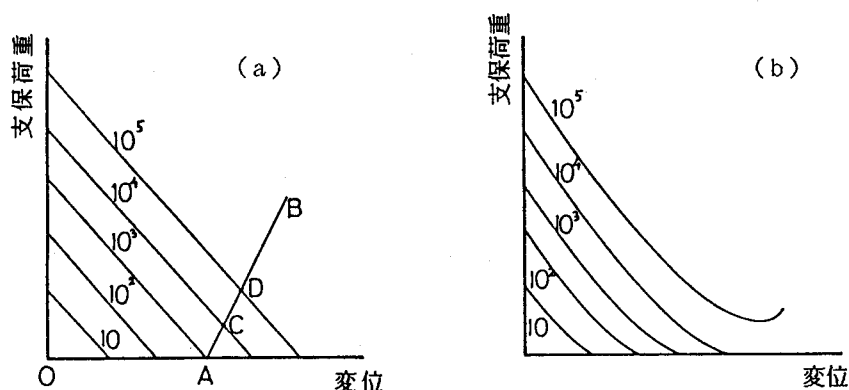


図5 支保荷重と鉋柱の変位。(a) 地圧の小さい時。(b) 地圧の大きい時。
図中の数字は経過時間(s)を表わす。

Fenner-Pacher線図は、時間に拘わらない一定の地山特性曲線が存在するという概念に基づいている。この概念は、Wawersikの考えた準静的応力-歪線図⁶⁾とほぼ一致している。しかし、今回の実験の範囲においては、時間に依存する岩石の変形は止まることなく変形し続けた。従って、時間依存性変形を考慮すれば、図5に示すような岩盤特性曲線が考えられる。図5では、時間の経過に従い岩盤特性曲線が移動し、地下構造物の使用期限によって、用いるべき岩盤特性曲線が異なっているとも言える。

4. まとめ

本研究では、最近開発した応力帰還制御を応用して、支保を施した鉋柱の時間依存性挙動を実験的に再現することを試みた。図4に示したように、時間とともに、載荷時の岩石の応力-歪線図上より出発し内側に移動していくこと、またその移動速度は次第に小さくなっていくことがわかった。図4の結果を適用して、図5に示すような岩盤特性曲線が時間とともに移動するという考え方を提案した。この考え方が正しいとすると、地下構造物の施工にあたっては、使用期限がどのぐらいかを考えて岩盤特性曲線を選ぶ必要がある。例えば放射性廃棄物を地下に埋めるような長期間の耐久性が必要な場合には十分に考慮すべき事柄であると思われる。

Fenner-Pacher線図は、支保効果を説明するのによく使用される。しかしながら、その根拠に関する基礎的な研究はさほどなされて来たとは言えず、ことに実験による検証は殆ど行われてこなかった。このため、定量的な議論に使用することは困難であった。本研究では、最も簡単な場合ではあるが、時間依存性挙動を十分に考慮した実験を行った。今後実験時間の延長を計るとともに、強度破壊点以降での実験も併せ行い、検討を続けていくつもりである。

参考文献

- 1) C.Fairhurst, J.J.K.Daemen, Underground space, 4, 297-311(1980)
- 2) 福島啓一, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演要旨集, 236-240(1985)
- 3) 木山英郎, 藤村尚, 西村強, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演要旨集, 397-402(1987)
- 4) 大久保誠介, 西松裕一, 日鉋誌, 100[1161], 1052-1056(1984)
- 5) S.Okubo, Y.Nishimatsu, Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr., 22, 323-330(1985)
- 6) W.R.Wawersik, C.Fairhurst, Int.J.Rock Mech. and Min.Sci., 7, 561-575(1970)

(10) RELAXATION OF ROCK UNDER UNIAXIAL COMPRESSION
-- with reference to Fenner-Pacher curve --

Seisuke OKUBO*, Yuichi NISHIMATSU*

Katsunori FUKUI**, Takaaki UENO**

Fenner-Pacher curve is often used in illustration of support effects for underground structures such as tunnels and roadways. It is easy to understand and empirically agrees well to the actual behavior of rock mass. From the quantitative view point, however, its most serious problem is the difficulty to draw the rock characteristic line.

In this study, the stress-feedback method is used to investigate the relaxation of Sanjome andesite, which shows the class II property. Unlike ordinary relaxation test, this report investigates the property of time-dependent decrease of stress under increasing strain. Concretely, the stress-strain relation was kept as follows:

$$Y + (\alpha/E) F = C$$

where α is the amount of stress-feedback and E is the Young's modulus of the rock sample in the elastic region. This method models the time-dependent property of supported rock, at which the increase of deformation of rock causes the increase of load to the support.

The experimental work was conducted under nine different conditions : starting stress of relaxation at 52%, 73%, and 94% of the uniaxial compressive strength, with different α of 0.0, 0.3, 1.0. $\alpha = 0.0$ means the ordinary relaxation, where no increase of strain occurs during the test. All results show that the stress linearly decreases on logarithmic time scale no matter what condition is.

By plotting all results on a stress-strain curve, it can be said that the stress-strain curve 'shrinks' as time goes by. In other words, rock characteristic line changes with the lapse of time. Therefore, it may be required that the time dependence of the line is taken into consideration on designing and planning underground constructions. More studies are expected to prove this assumption.

*Faculty of Engineering, The University of Tokyo

**Graduate Student, The University of Tokyo