

岩石の限界ひずみに対する環境要因の影響について

櫻井春輔*・川嶋幾夫**・大谷達彦***

岩盤構造物の施工においては、計測値を評価するための基準値が必要である。この基準値として、著者の一人は先に限界ひずみを提案した。しかし、岩盤は間隙水や温度変化などの環境の影響を受けるため、限界ひずみを基準値として用いるには限界ひずみとこれらの要因との関係を明らかにしなければならない。そこで、本研究では、まず三軸圧縮応力下における限界ひずみを定義し、さらに、含水状態、間隙水圧、および温度について限界ひずみに及ぼすそれらの影響を調べた。その結果、限界ひずみは、これらの環境要因の変化に対してほとんど影響を受けない安定した基準値であることがわかった。

Keywords : critical strain, moisture content, pore water pressure, temperature

1. はじめに

岩盤の安定性を評価する方法として、著者の一人は先に、直接ひずみ評価法(DSET)を提案した¹⁾。この方法は、岩盤に発生するひずみを、その許容値と比較することにより評価するものであり、その許容値として“限界ひずみ”の適用を提案した。そして、原位置試験と室内岩石試験の結果を比較することにより、不連続面を有するマスとしての岩盤の限界ひずみが岩石コアから得られる限界ひずみとほぼ同じ値であることを明らかにした²⁾。そして、さらに岩石コアから求めた一軸圧縮応力状態での限界ひずみの値をいくつかのトンネルの計測管理に適用したところ満足すべき結果を得た³⁾。しかし、岩盤は、一般に三軸圧縮応力状態にあり、一軸圧縮応力状態において求めた限界ひずみを許容値として用いることは厳密に問題がある。そこで、三軸圧縮応力状態における限界ひずみを検討することが必要となる。

また、岩盤は、間隙水が浸透するとその強度は低下すると考えられる。そのため、間隙水の状態と限界ひずみとの関係についても調べておく必要がある。さらに、わが国は、高温岩体も少なくない。そのうえ、最近各種ガスの地下貯蔵のために地下空洞が利用される。この地下貯蔵においては、貯蔵物が発熱または、吸熱することが考えられる。このような場合には、空洞周辺の岩盤の温度が問題となる。

このような状況において限界ひずみを岩盤の安定性評価の基準値として用いるには、限界ひずみに及ぼす環境要因(拘束圧、間隙水、温度など)の影響について調べ、その特性について十分に把握しておく必要がある。

そこで、本研究では、限界ひずみを三軸圧縮応力状態に拡張し、拘束圧、間隙水および温度が岩石の限界ひずみにどのように影響を及ぼすかを明らかにすることを目的として実験的研究を行った。

2. 限界ひずみの定義

限界ひずみは、著者の一人によって一軸圧縮強度を変形係数で除した値として定義された¹⁾。しかしながら、岩盤内の応力はほとんどが三軸圧縮応力状態にあるので、限界ひずみを三軸圧縮応力状態において考えておく必要がある。ここでは、三軸圧縮応力状態の限界ひずみ(ϵ_0)を、次式のように定義する。

$$\epsilon_0 = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / E \quad (1)$$

ここで、

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 軸差応力によって表した最大強度
 E : 変形係数

3. 拘束圧の影響

三軸圧縮応力状態における限界ひずみの特性を調べるために室内実験を行った。実験には、多孔質凝灰岩である田下石の円柱供試体($\phi 50 \text{ mm} \times$ 高さ 100 mm)を用いた。載荷軸方向の荷重はロードセルで、載荷軸方向および周方向のひずみはそれぞれ2枚の対称の位置に貼付したひずみゲージで測定した。

Fig.1, 2 および 3 は、飽和状態において排水条件のもとでの三軸圧縮試験の結果であり、強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 、変形係数および限界ひずみに対する側圧の影響を示す。これらの図から、側圧が増加すれば、強度、変形係数はともに大きくなることがわかる。しかし、その強度と変形係数の比として求められる限界ひずみは、側圧が大き

* 正会員 工博, Ph.D 神戸大学教授 工学部建設学科
 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

** 学生会員 修(工) 神戸大学大学院 自然科学研究科(博士課程)

*** 学生会員 神戸大学大学院 工学研究科(修士課程)

注) Deereは、限界ひずみの逆数を“Modulus ratio”として定義し、岩盤の良否判定に用いている⁴⁾。しかし、その物理的意味は明確でない。

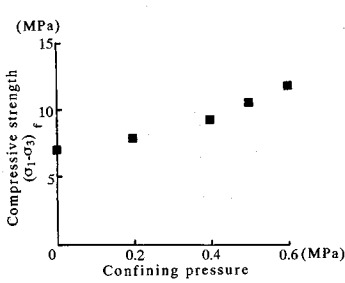


Fig.1 Effect of confining pressure on compressive strength

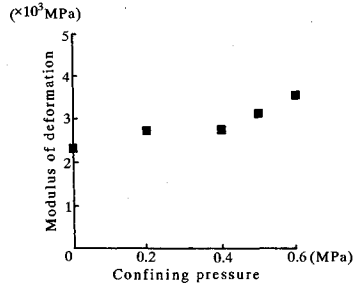


Fig.2 Effect of confining pressure on modulus of deformation

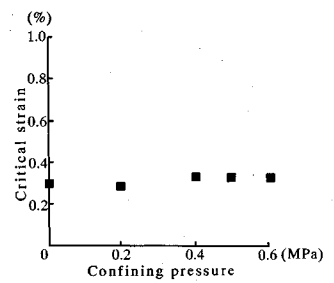


Fig.3 Effect of confining pressure on critical strain

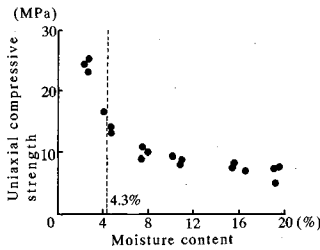


Fig.4 Effect of moisture content on uniaxial compressive strength

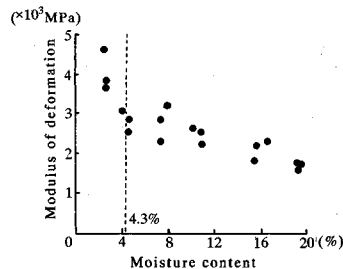


Fig.5 Effect of moisture content on modulus of deformation

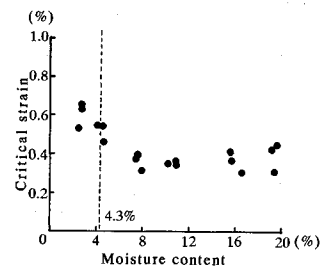


Fig.6 Effect of moisture content on critical strain

なるとやや増加するが、強度や変形係数に比べるとその影響が小さい。そのためここで与えた拘束圧の範囲内では、三軸圧縮応力下の限界ひずみは、一軸圧縮試験で求めたものと大差ないといえる。

4. 間隙水の影響

(1) 含水状態について

まず、含水状態が、岩石の限界ひずみにどのように影響を及ぼすかについて検討する。

実験には、拘束圧の影響を調べた場合と同じく田下石の円柱供試体を用いた。まず、供試体を真空脱気水槽内で強制脱気して飽和状態にし、その後、デシケータ内にあんか（サーモスタット付）を封入した乾燥装置で、デシケータ内の圧力を 20 mmHg、温度を 40°C 保ち、供試体を乾燥させ、高温で加熱することなく、所定の含水状態に調整した。

含水状態は、飽和度を 20% 刻みに 100（飽和）、80、60、40、20、0（絶乾）% に設定して、それぞれ 3 個ずつ一軸圧縮試験を行った。このとき、室乾状態についても併せて実験を行った。この室乾状態の含水比は約 4.3% であった。

実験結果を、Fig.4 に一軸圧縮強度と含水比の関係、Fig.5 に変形係数と含水比の関係について示す。これらの図から一軸圧縮強度、変形係数とも含水比が高くなるほど低下していることがわかる。また、含水比が小さい（室乾よりも乾燥している）状態では、含水比の減少により一軸圧縮強度および変形係数が急激に増加する。

Fig.6 に限界ひずみと含水比の関係を示す。この図から明らかなように、室乾状態を境にし、これより含水比が小さい場合は、含水比の減少ともない限界ひずみは増大している。しかし、これより含水比が大きい場合は限界ひずみはほとんど変化しないことがわかる。一般に、岩盤の含水状態は室乾と飽和の間にあると考えられるので、この範囲内では限界ひずみは含水状態によって変化せず、ほぼ一定値と考えてさしつかえない。

なお、ここで室乾状態以下の含水比において限界ひずみが増大する理由を明らかにするため、走査型電子顕微鏡によって異なる含水比のもとの岩石のミクロな構造を調べた。結果を Photo 1 (a), (b), (c) に示す。

Photo 1 (a), (b) は、それぞれ飽和状態および室乾状態に対するものであり、岩石のミクロな構造において、この両者に差は見られない。一方、Photo 1 (c) は、絶乾状態のものである。これと Photo 1 (a), (b) を比較すれば明らかなように、絶乾状態では飽和や室乾状態において見られるような表面における水和物が消失し、角のとがった粗い表面状態に変化していることがわかる。すなわち、室乾状態を境にして、含水比がさらに低下すると、岩石はもはや元の岩石ではなく構造的に異なる岩石となり、したがって限界ひずみも当然異なると考えられる。

つぎに、三軸圧縮応力状態において飽和と室乾について調べた結果を Fig.7 に示す。この図は、飽和状態について Fig.3 に示した結果に、室乾供試体に対する結果を併せて示したものである。この図から、室乾状態におい

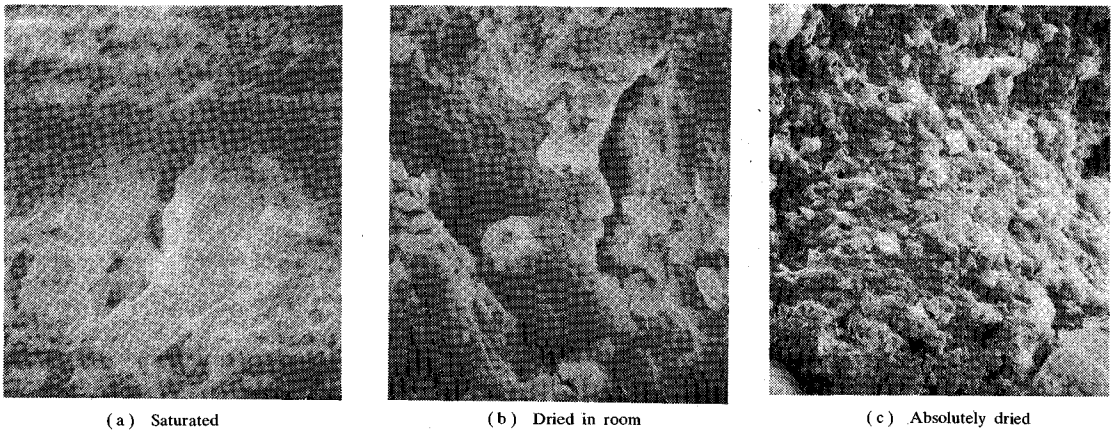


Photo 1 Microstructure of specimens (×2000)

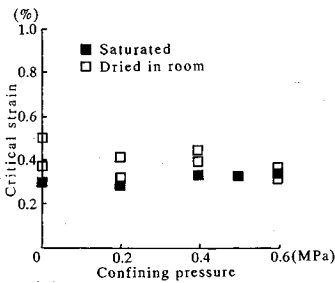


Fig.7 Effect of confining pressure on critical strain

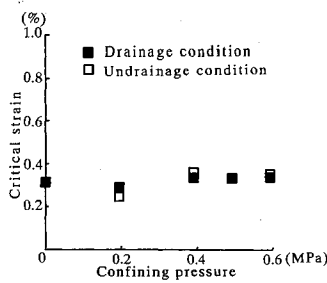


Fig.8 Effect of confining pressure on critical strain

でも飽和状態と同じように、側圧による影響は小さく、限界ひずみは一軸圧縮応力状態のものと同程度で、かつ飽和と室乾ともほぼ同じ値となっていることがわかる。これらの結果から限界ひずみは、含水状態の変化に対しても影響を受けないことがわかる。

(2) 間隙水圧について

限界ひずみと間隙水圧との影響を調べるために、非排水条件の三軸圧縮試験を行った。用いた供試体は、先と同じく田下石である。実験結果を Fig.8 に限界ひずみと側圧の関係において示す。ここで、□は非排水条件で行った実験結果であり、■は排水条件のものである。なお、非排水試験の側圧は、軸方向載荷開始時におけるものである。また非排水試験における限界ひずみは、以下の要領で計算したEを用いて求めた。

$$E = \frac{(\Delta\sigma_a - \Delta u) - \frac{2(\Delta u)^2}{\Delta\sigma_a - 2\Delta u}}{\Delta\epsilon_a + \frac{2\Delta\epsilon_1 \cdot \Delta u}{\Delta\sigma_a - 2\Delta u}} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\sigma_a$: 載荷軸方向の応力の変化量

Δu : 間隙水圧の変化量

$\Delta\epsilon_a, \Delta\epsilon_1$: それぞれ載荷軸方向および周方向のひずみの変化量

この図から限界ひずみは、間隙水圧が発生する非排水

条件においても、排水条件の場合と大差なく、側圧の影響もほとんど受けないことがわかる。これは、3節において得た結論とも整合するものである。

以上の結果から明らかなように、限界ひずみは、間隙水圧および側圧の変化を受ける場合でも、その影響が小さいため一軸圧縮試験による値をもって代表させることができる。

5. 温度の影響

ここでは、稲田らが花崗岩、安山岩、砂岩および凝灰岩を対象に行った実験の結果⁵⁾を用いて考察する。その実験結果を限界ひずみと温度の関係において整理すると Fig.9 および Fig.10 を得る。Fig.9 は飽和状態、Fig.10 は乾燥状態における結果である。なお、その際間隙が大きく、それを充満する氷の影響が著しいと考えられる凝灰岩について、氷点下のデータは除いた。これらの図から、花崗岩、安山岩、砂岩および凝灰岩の限界ひずみは温度によってほとんど影響を受けないことがわかる。また、Fig.9 と Fig.10 を比較することにより、飽和状態だけでなく乾燥状態の岩石についても限界ひずみは温度の影響を受けず、ほぼ一定の値となることがわかる。限界ひずみは、前節に示したように、含水状態の変化に対してほとんど影響を受けないが、ここでの結果は限界ひ

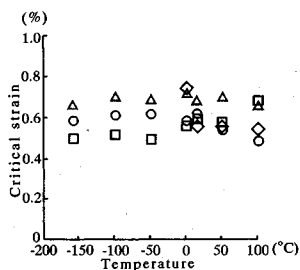


Fig.9 Effect of temperature on critical strain (Saturated specimens)

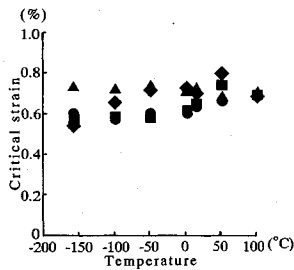
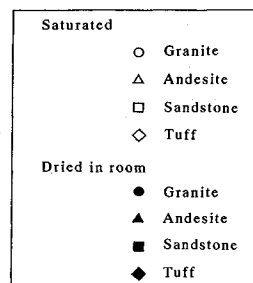


Fig.10 Effect of temperature on critical strain (Dried specimens)



ずみが温度と含水状態がともに変化する場合でもほぼ一定値であることを示している。

6. ま と め

本研究では、岩盤のひずみの許容値として、限界ひずみに着目し、まず、一軸圧縮応力状態で定義された限界ひずみを三軸圧縮応力状態に拡張した。ついで、それにおよぼす拘束圧、含水比、間隙水圧および温度の影響について調べた。その結果、次のことが明らかになった。

①三軸圧縮応力状態における限界ひずみを、軸差応力～軸ひずみ関係から求められる $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と E の比として定義すると、その値は側圧の増減による影響が小さく一軸圧縮応力状態の値をもって代表させることができる。

②限界ひずみは一般の岩盤構造物の含水状態（室乾と飽和の間）では、含水比の影響をほとんど受けず一定値である。また、間隙水圧の変動に対しても、影響を受けない値として取り扱うことができる。

③温度の変化に対しても、限界ひずみは影響を受けない値である。さらに、温度と含水状態が共に変化するような場合でも、限界ひずみはほぼ一定の値をとる。

なお、マスとしての不連続性岩盤の限界ひずみは岩石コアの値とほぼ一致することがすでに明らかにされているので、本研究で得られた岩石試料に対する知見はそ

のままマスとしての岩盤に対しても成り立つと考えられる。以上のように、限界ひずみは、種々の環境要因からの影響をほとんど受けない基準値であり、岩盤の安定性を評価する場合の管理基準値として優れた特性を有するものであると考えられる。また、その値が室内試験によって容易に求められるので実務への適用も容易である。

謝辞：電子顕微鏡写真の撮影に際しては、神戸大学工学部応用化学科中前勝彦教授並びに同大学院学生直原敦氏に御援助を賜った。ここに厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 櫻井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文報告集，第317号，pp.93～100，1982年。
- 2) Sakurai, S. : Displacement Measurements Associated with the Design of Underground Openings, Proc. Int.Sympo. Field Measurements in Geomechanics, Zürich, Vol.2, pp.1163～1178, 1983.
- 3) 櫻井春輔：NATMにおける現場計測と管理基準値，土と基礎，34-2 (337)，pp.5～10，1986年
- 4) D.U. Deere : Geological Considerations, Rock Mechanics in Engineering Practice, Edited by K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz, pp.1～20, 1968.
- 5) 稲田善紀・国土新彦：高温および低温が岩石の圧縮破壊特性に及ぼす影響，材料，Vol.41, No.463, pp.410～416, 1992年

(1992.8.3受付)

EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON CRITICAL STRAIN OF ROCKS

Shunsuke SAKURAI, Ikuo KAWASHIMA and Tatsuhiko OTANI

In order to assess the stability of tunnels, Sakurai proposed the direct strain evaluation technique (DSET), in which the "critical strain" (uniaxial compressive strength divided by modulus of deformation) plays an important role as an allowable value for assessing the strain distribution occurring around a tunnel. It has already been demonstrated that the critical strain of jointed rock masses can be obtained easily from laboratory tests. However, the effects of environmental factors such as confining pressure, moisture content and temperature on the critical strain have not clearly understood yet. In this paper, therefore, all of these environmental factors are investigated in the laboratory by performing uniaxial and triaxial compressive tests on cylindrical specimens of tuff. It is then concluded that the effects of all these environmental factors are negligibly small, and the critical strain can be assumed to be nearly constant under any confining pressure, moisture content and temperature.