

# プレッシャーメーター試験による岩盤の 限界ひずみに関する考察

甲村雄一<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> (株) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)  
\*E-mail: kouru@takenaka.co.jp

本研究ではプレッシャーメーター試験のデータから岩盤の限界ひずみの値を直接求める方法を提案した。また、限界ひずみを用いたトンネル周辺岩盤の安定性評価に関する考察を行った。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- 1) プレッシャーメーター試験の結果から岩盤の限界ひずみの値を直接評価する方法を提案した。本研究で求めた限界ひずみの値は、過去に桜井らが報告している値とよく一致することがわかった。
- 2) 岩盤の限界ひずみはヤング率と比較的高い相関性を示し、両者の関係は $b$ を定数として  $\varepsilon_0 = b \times E^{0.5}$  で表されることがわかった。
- 3) 限界ひずみ  $\varepsilon_0$  を弾性論より求められるトンネル天端でのひずみ  $\varepsilon_r$  で除した値である  $\varepsilon_0 / \varepsilon_r$  をトンネルの安定性の事前評価に用いることを提案した。これにより、トンネル掘削時の安定性が低いと事前に概略評価できる地点においては、観測施工を強化する等の対策の実施が可能になると考えられる。

**Key Words :** critical strain, rock mass, pressuremeter test, stability of rock mass

## 1. 緒言

直接ひずみ評価法は桜井<sup>1)</sup>により提案された方法である。この方法はトンネル等の岩盤構造物において計測された変位から地山の最大圧縮ひずみを求め、これを応力に変換することなく限界ひずみと比較し、トンネル等の岩盤構造物の安定性を評価する。応力を用いて岩盤構造物の安定性評価を行う場合には、弾性係数を仮定してひずみから応力を求める。この場合、弾性係数を正確に評価しなければ、得られる応力の値は精度の低いものとなる。直接ひずみ評価法は、このような応力の推定を必要としないため、限界ひずみを正確に評価すれば、精度の良い安定性評価ができるものと考えられる。

岩石の一軸圧縮試験時の応力-ひずみ曲線の模式図を図-1に示す<sup>2)</sup>。限界ひずみは桜井によって式(1)に示すように定義されている<sup>2)</sup>。

$$\varepsilon_0 = \sigma_c / E \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_0$ は限界ひずみ、 $\sigma_c$ は一軸圧縮強度および $E$ は応力-ひずみ曲線の初期勾配から求めたヤング率である。図-1に模式的に示したように、一軸圧縮試験時における応力-ひずみ曲線の勾配は、一般的に応力の増加とともに緩やかになる。これは応力の増加に伴って局所的な微視的な破壊が生じるため、弾性ひずみに加えて塑性

ひずみを生じるためと考えられる。すなわち、限界ひずみは一軸圧縮試験時の破壊ひずみの弾性ひずみ成分と考えられる。桜井ら<sup>3)</sup>は岩石の限界ひずみに拘束圧、間隙水および温度が与える影響について検討し、限界ひずみはこれらの影響をほとんど受けないことを報告している。また、不均質性岩質材料の限界ひずみについて実験的および解析的に検討し、三軸圧縮試験結果から求めた不均質岩質材料の限界ひずみは、少なくともそれを構成する硬い方の一軸圧縮状態における限界ひずみの値に近づくこと等を報告している<sup>4)</sup>。また、筆者は岩石の一軸圧縮破壊のメカニズムについて考察を行い、ダイラタンシー開始応力における軸ひずみを限界ひずみとすることを提案するとともに、ダイラタンシー開始応力における軸ひずみは桜井が提案した限界ひずみとほぼ等しいことを報告している<sup>5)</sup>。

限界ひずみを用いた直接ひずみ評価法は、トンネルの管理基準の設定方法として数多く用いられていることが報告されている<sup>6)</sup>。直接ひずみ評価法では岩盤の限界ひずみを精度よく推定することが重要である。岩盤は一般的に潜在的な亀裂が存在すること、風化の影響を受けて場所によって岩質が変化すること等の理由により不均質な材料である。桜井によって式(1)で定義された限界ひずみは岩盤から採取した岩石を用いて一軸圧縮試験

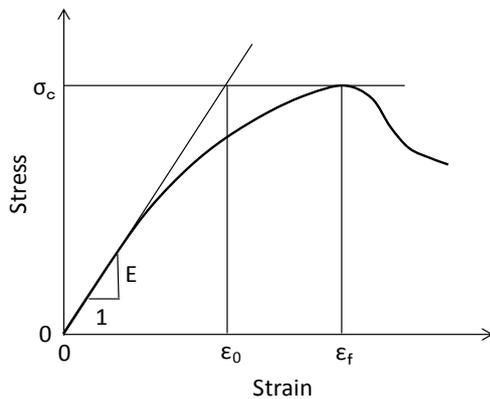


図-1 一軸圧縮試験で得られる応力-ひずみ曲線の模式図<sup>2)</sup>

により得られる限界ひずみである。岩石の一軸圧縮試験に用いる供試体は、一般的に目視で観察されるような明瞭な亀裂を含まない岩石から作製されることが多い。また、一軸圧縮試験では、風化の影響等により明らかに不均質な供試体は一般的に除外されることが多い。すなわち、岩石の限界ひずみと岩盤の限界ひずみは必ずしも一致するとは限らないと考えられる。本研究では、このような不均質な材料である岩盤の限界ひずみを、原位置試験により直接求めることを試みた。具体的にはプレッシャーメーター試験で得られる圧力-半径曲線のデータから、限界ひずみを直接求め、桜井が報告している限界ひずみのデータと比較して考察した。また、限界ひずみと弾性論によって求められるトンネル天端におけるひずみを用いて、トンネル掘削前に安定性の概略評価を行う方法について考察を行った結果についても報告する。

## 2. プレッシャーメーター試験による岩盤の限界ひずみの評価

### (1) 評価方法

本研究で用いたプレッシャーメーター試験のデータは、原位置岩盤試験データベース (2008 年度版)<sup>7)</sup> に収録されているものである。プレッシャーメーター試験の圧力-半径曲線の模式図を図-2 に示す。プレッシャーメーター試験は一般に岩盤の弾性係数を求める目的で行われるものであり、圧力-半径曲線が直線を示す部分の勾配を利用して弾性係数を求める。ここでは図-2 に示した降伏圧力  $P_y$  の状態で岩盤の圧縮破壊が開始するものと考え、限界ひずみを式 (2) で定義する。

$$\varepsilon_0 = (r_y - r_0') / r_0' \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_0$  は限界ひずみ、 $r_y$  は降伏圧力における半径および  $r_0'$  は圧力-半径曲線が直線を示す部分を外挿して求めた圧力が 0 における半径である。

鉛直方向に掘削した円形ボーリング孔を加圧する場合、

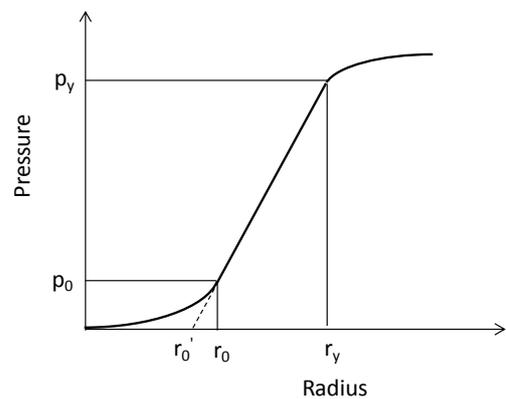


図-2 プレッシャーメーター試験で得られる応力-ひずみ曲線の模式図

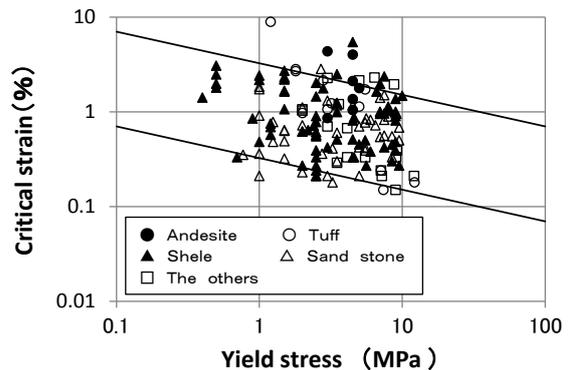


図-3 プレッシャーメーター試験で得られた限界ひずみ

ボーリング孔周辺の水平面内に生じる応力は、岩盤の初期応力に式 (3) ~ 式 (4) の値を加えることで求めることができる<sup>8)</sup>。なお、圧縮応力を正とする。

$$\sigma_r = p_0 \cdot \frac{a^2}{r^2} \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = -p_0 \cdot \frac{a^2}{r^2} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_r$  は半径方向応力、 $\sigma_\theta$  は接線方向応力、 $p_0$  はボーリング孔内に作用する圧力、 $a$  はボーリング孔半径および  $r$  はボーリング孔中心からの距離である。ボーリング孔壁では  $r = a$  であるから、式 (3) および式 (4) は式 (5) となる。

$$\sigma_r = p_0, \quad \sigma_\theta = -p_0 \quad (5)$$

ボーリング孔壁に圧力を載荷する前においては、ボーリング孔壁においては明らかに  $\sigma_r = 0$  であり、 $\sigma_\theta$  は岩盤の初期地圧に応じた応力を生じている。また、鉛直方向には土被りに応じた応力が生じているものと考えられる。この状態からボーリング孔内に圧力を加えることで、ボーリング孔壁には式 (5) の応力が増加する。式 (5) において  $\sigma_\theta$  は引張応力である。岩石や岩盤は圧縮強度に比べて引張強度が小さいため、接線方向の応力が引張強度に達すると引張破壊するものと考えられる。式 (2) で限界ひずみを求める場合の応力状態は、最大主応力が

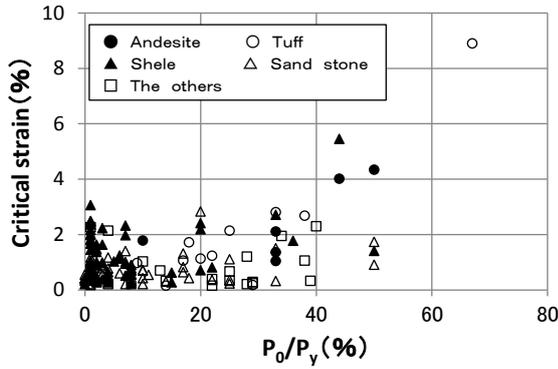


図4  $P_0/P_v$  と限界ひずみとの関係

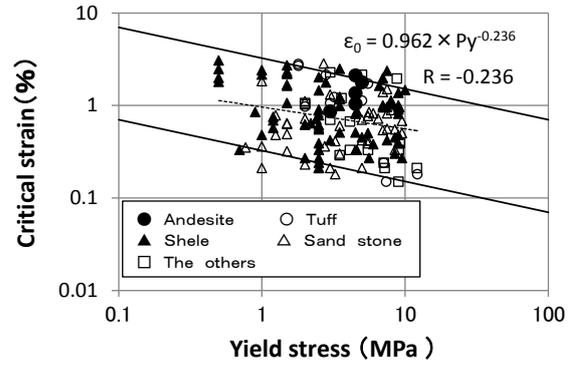


図5 プレッチャーメーター試験で得られた限界ひずみ

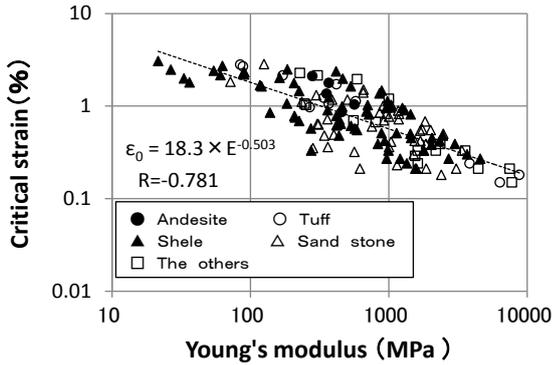


図6 ヤング率と限界ひずみとの関係

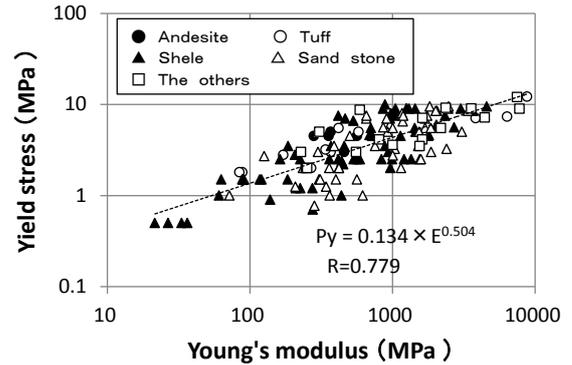


図7 降伏応力と限界ひずみとの関係

降伏圧力に相当し半径方向に  $\sigma_r = p_0$ 、中間主応力が試験実施深度における鉛直方向応力、最小主応力が接線方向応力であり最小値は岩盤の引張強度という状態を考えている。よって、孔内載荷試験における降伏応力と岩盤の一軸圧縮強度とは厳密には一致するとは限らないと考えられる。よって、本研究で求める限界ひずみは、式(1)に示した桜井の定義した限界ひずみとは厳密には一致しないと考えられることを断っておく。

## (2) 評価結果

式(2)でプレッシャーメーター試験により岩盤の限界ひずみを求める場合、降伏圧力の状態まで圧力を加える必要がある。本研究に使用した原位置岩盤試験データベース(2008年度版)<sup>7)</sup>にはプレッシャーメーター試験のデータが978個収録されている。このうち、降伏圧力が確認され限界ひずみを求めることができたデータ数は156個であった。ボーリング孔内を加圧する圧力には試験装置上の限界があるものと考えられ、最大値は10MPa程度であった。これよりも岩盤の圧縮強度が大きい場合には、プレッシャーメーター試験では限界ひずみの評価は難しいものと考えられる。

横軸を降伏応力(=降伏圧力)、縦軸を限界ひずみとして限界ひずみを求めたすべてのデータを両対数グラフにプロットしたものを図-3に示す。図には桜井<sup>1)、2)</sup>が報告している岩石の一軸圧縮強度と限界ひずみの関係の上限值および下限値をグラフから読み取った値を実線

で示した。本研究で得られた限界ひずみのデータは、プレッシャーメーター試験により原位置岩盤のボーリング孔を載荷して求めたものである。この場合、加圧面には亀裂や部分的に風化した部分も含まれると考えられるため、岩盤としての限界ひずみが求められると考えられる。一方、桜井<sup>1)、2)</sup>が報告しているデータは一軸圧縮試験によって求められた岩石の限界ひずみであるが、両者はおおむね一致することがわかる。また、降伏応力が10MPa程度まではプレッシャーメーター試験で限界ひずみの評価が可能であると考えられる。

## 3. 考察

### (1) プレッシャーメーター試験から求めた限界ひずみの値に関する考察

図-3では実線で示した桜井<sup>1)、2)</sup>が報告している上限値よりも限界ひずみの値が大きいデータが含まれている。この原因を検討するために、限界ひずみを求めた際の  $P_0/P_v$  と限界ひずみの値の関係を求めたものを図-4に示す。 $P_0$ は図-2に示したプレッシャーメーター試験における圧力-半径曲線が直線を示し始める圧力、 $P_v$ は降伏圧力である。 $P_0/P_v$ が40%以上となると限界ひずみの値が大きな値を示すデータが存在する。 $P_0$ が大きな値を示す理由としては、ボーリング掘削時のボーリング孔壁の乱れの影響等が考えられる。すなわち、 $P_0/P_v$ の値が大

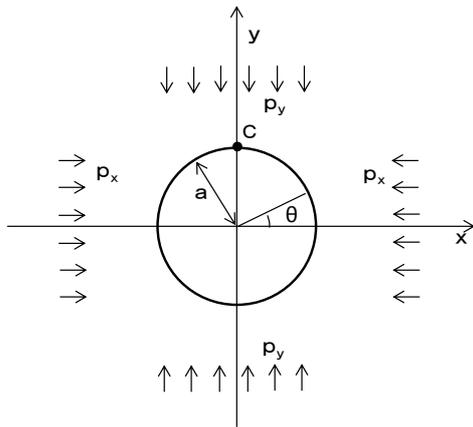


図-8 トンネルの模式図<sup>9)</sup>

きいということは、岩盤は本来の状態ではなく、ボーリング時に孔壁が乱された状態での試験結果と考えられる。よって、 $P_0/P_y$ の値が大きいデータは信頼性が低いものと判断し、 $P_0/P_y$ の値が40%以上のデータを除外して図-3を描き直したものを図-5に示す。除外したデータは156個のデータのうち8個である。限界ひずみの値は桜井<sup>1)、2)</sup>が報告している上限値と下限値との間にほぼ収まっている。なお、今回求めた限界ひずみは、原位置の岩盤で直接計測した値であり、岩盤の風化や不連続面の影響も含んだ値であると考えられる。このことから、岩盤の風化や不連続面が岩盤の限界ひずみに及ぼす影響は比較的小さく、桜井<sup>1)、2)</sup>が報告している岩石の限界ひずみの上限値と下限値との間のばらつきの範囲内であることが推察される。

図-5には、限界ひずみと降伏応力との関係を、両対数グラフ上で直線式となるように近似した直線式を破線で示した。相関係数Rは-0.236と小さく、限界ひずみと降伏応力との相関性は低いことがわかる。一方で、図-5の横軸をヤング率に書き直したものを図-6に示す。ヤング率が大きくなるにしたがって、限界ひずみの値は小さくなる傾向がみられ、変形係数の約0.5乗に比例する関係を示していることがわかる。また、両者の相関係数は-0.781と比較的高い。一方で、ヤング率と降伏応力との関係を求めたものを図-7に示した。降伏応力はヤング率の約0.5乗に比例している。また、相関係数は0.779と比較的高い。降伏応力 $P_y$ がヤング率Eの約0.5乗に比例することから(6)式が成り立つ。

$$p_y = b \times E^{0.5} \quad (6)$$

ここでbは定数である。一方、限界ひずみ $\epsilon_0$ と降伏応力 $P_y$ の間には、応力-ひずみ関係の定義から(7)式の関係式が成り立つものと考えられる。

$$p_y = E \times \epsilon_0 \quad (7)$$

(6)式および(7)式の右辺を等しいとすると(8)式が成り立つ。

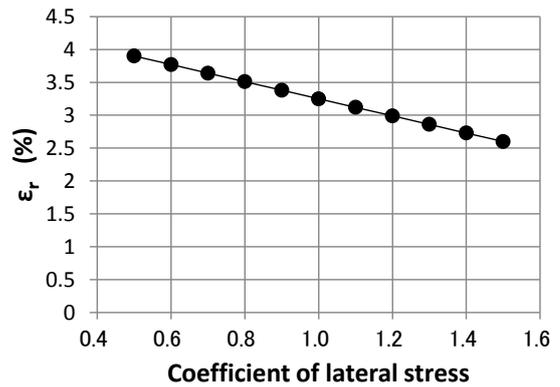


図-9 側圧係数と $\epsilon_r$ との関係

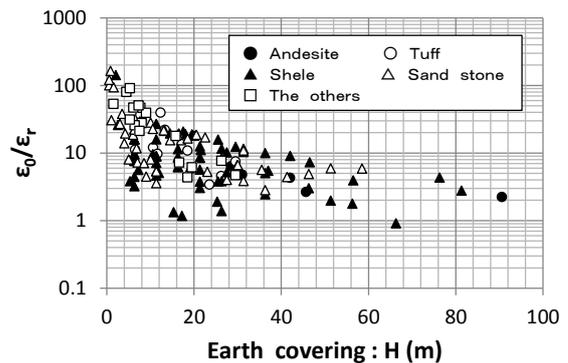


図-10  $\epsilon_0/\epsilon_r$ と土被りとの関係

$$E \times \epsilon_0 = b \times E^{0.5} \quad (8)$$

(8)式の両辺をEで除すことにより(9)式が得られ、前述したとおり限界ひずみはヤング率の約0.5乗に比例することがわかる。

$$\epsilon_0 = b \times E^{-0.5} \quad (9)$$

プレッシャーメーター試験は、本来、岩盤のヤング率を評価するための試験である。これと同時に限界ひずみの値も評価する場合、その妥当性の評価のためには(9)式に示すヤング率との比較的高い相関性を利用することが得策と考えられる。

## (2) 限界ひずみのトンネル天端沈下評価の事前評価への適用に関する考察

桜井<sup>2)</sup>は限界ひずみを用いたトンネルの天端沈下について検討する際、式(10)によってトンネル周辺地山のひずみを定義している。

$$\epsilon_r = \delta_c / a \quad (10)$$

ここで、 $\epsilon_r$ はトンネル半径方向のひずみ、 $\delta_c$ は天端沈下量およびaはトンネル半径である。桜井<sup>2)</sup>はいくつかのトンネルで実施された天端沈下によるひずみを式(10)で求め、室内試験によって得られた限界ひずみの値との比較を行っている。天端沈下から式(10)で求められるひずみが室内試験で求められる限界ひずみの下限値以下の場合にはトンネルに何ら異常は現れず、地山は

安定した状態にあることを報告している<sup>2)</sup>。一方、式(10)で求められるひずみが限界ひずみの上限に達すると必ず何らかの異常が現れていることを報告している<sup>2)</sup>。トンネル掘削時の観測施工においては、図-5 および図-6 に示した限界ひずみと式(10)で求められるトンネル地山周辺のひずみを比較することにより、トンネル周辺地山の安定性を評価すればよい。ここでは、トンネル掘削前に限界ひずみによりトンネル周辺地山の安定性を評価する方法について以下に考察する。

図-8に示すようにx方向およびy方向に $p_x$ および $p_y$ の応力が作用する岩盤に、半径aのトンネルを掘削する場合のトンネル天端Cについて考える。トンネル天端Cにおける半径方向の変位 $u_r$ は弾性論によると式(11)で求められる<sup>9)</sup>。

$$u_r = \frac{1-\nu^2}{E} \left[ (p_x + p_y)a - 2(p_x - p_y)a \right] - \frac{1+\nu}{2E} \left[ (1-2\nu)(p_x + p_y) - (p_x - p_y) \right] a \quad (11)$$

ここで、 $\nu$ はポアソン比、Eはヤング率およびaはトンネル半径である。式(11)の両辺を半径aで除すことにより、トンネル天端付近の地山のひずみは式(12)で求めることができる。

$$\varepsilon_r = u_r/a = \frac{1-\nu^2}{E} \left[ (p_x + p_y) - 2(p_x - p_y) \right] - \frac{1+\nu}{2E} \left[ (1-2\nu)(p_x + p_y) - (p_x - p_y) \right] \quad (12)$$

すなわち、弾性論によればトンネル天端付近の地山のひずみはポアソン比 $\nu$ 、ヤング率Eおよび地山の初期応力 $p_x$ 、 $p_y$ の関数である。ここで、式(12)において $\nu = 0.3$ 、 $E = 100\text{MPa}$  および地山の鉛直方向の初期応力を、土被り100m、岩盤の単位体積重量 $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ と仮定し $p_y = 100\text{m} \times 25\text{kN/m}^3 = 2.5\text{MN/m}^2 = 2.5\text{MPa}$ として、地山の水平方向の初期応力 $p_x$ を側圧係数が0.5~1.5の範囲で変化させて $\varepsilon_r$ の値を求めた結果を図-9に示す。側圧係数が1.0の時の $\varepsilon_r$ は3.25%であった。これに対して、側圧係数が0.5の場合には $\varepsilon_r = 3.9\%$ および側圧係数が1.5の場合には $\varepsilon_r = 2.6\%$ であり、側圧係数が1.0の場合に比較してそれぞれ20%の差であり、 $\varepsilon_r$ に側圧係数が及ぼす影響は比較的小さいことがわかる。側圧係数が1.0で $p_x = p_y = p$ の場合、式(12)は式(13)に書き換えられる。

$$\varepsilon_r = u_r/a = \frac{1+\nu}{E} \cdot p \quad (13)$$

式(13)においてポアソン比 $\nu = 0.3$ とし、ヤング率Eはプレッシャーメーター試験で求められた値とする。また、岩盤の単位体積重量 $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ として $p = \gamma H$  (Hは土被り(m))としてプレッシャーメーター試験ごとに式(13)で $\varepsilon_r$ を求め、限界ひずみ $\varepsilon_0$ を $\varepsilon_r$ で除した値

を図-10に示す。土被りHが大きくなるほど $\varepsilon_r$ の値は大きくなるため、 $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ の値は小さくなる傾向があることがわかる。 $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ の値が小さいほど、トンネル周辺岩盤の安定性は低いと考えられる。今回使用したプレッシャーメーター試験のデータのうち、式(13)による $\varepsilon_r$ よりも限界ひずみの値が小さく、 $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ の値が1を下回ったものは1個のみであった。また、 $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ の値が1以上2未満のデータ数は6個であった。なお、 $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ の値が1を上回っていても1に近づくほどトンネル周辺岩盤の安定性は相対的に低いと考えられる。

以上のように、 $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ の値により、トンネル掘削前にトンネル周辺岩盤の安定性を概略評価することができるものと考えられる。また、トンネル周辺岩盤の安定性が相対的に低いと推察される地点では掘削時の観測施工を強化する等の対策の実施が掘削前の段階で可能になると考えられる。

## 4. 結言

本研究ではプレッシャーメーター試験のデータから岩盤の限界ひずみの値を直接求める方法を提案した。また、限界ひずみを用いたトンネル周辺岩盤の安定性評価に関する考察を行った。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- 1) プレッシャーメーター試験の結果から岩盤の限界ひずみの値を直接評価する方法を提案した。本研究で求めた限界ひずみの値は、過去に桜井らが報告している値とよく一致することがわかった。
- 2) 岩盤の限界ひずみはヤング率と比較的高い相関性を示し、両者の関係はbを定数として $\varepsilon_0 = b \times E^{0.5}$ で表されることがわかった。
- 3) 限界ひずみ $\varepsilon_0$ を弾性論より求められるトンネル天端でのひずみ $\varepsilon_r$ で除した値である $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ をトンネルの安定性の事前評価に用いることを提案した。これにより、トンネル掘削時の安定性が低いと事前に概略評価できる地点においては、観測施工を強化する等の対策の実施が可能になると考えられる。

## 参考文献

- 1) 桜井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文集，No.317, pp.93-100, 1982.
- 2) 桜井春輔：NATMにおける現場計測と管理の基準値、土と基礎, Vol.34-2, pp.5-10, 1986.
- 3) 桜井春輔、川嶋幾夫、大谷達彦：岩石の限界ひずみに対する環境要因の影響について，土木学会論文集，No.463, III-22, pp.177-180, 1993.
- 4) 桜井春輔、川嶋幾夫、土田晃、小池信司、篠田 知堅、芥川真一：不均質性岩盤の限界ひずみについて，土木学会論文集，No.535, III-34, pp.185-190, 1996.

- 5) 甲村雄一：岩石の限界ひずみに関する考察，土木学会論文  
集 C(地圏工学)，Vol.68, No.3, pp.526-534. 2012.
- 6) 社団法人日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，丸  
善，pp.126-128, 2001.
- 7) 社団法人地盤工学会：原位置岩盤試験データベース（2008  
年度版），丸善，2009.
- 8) 土木学会：原位置岩盤試験法の指針，丸善，pp.216-217,  
2000.
- 9) 鹿島建設土木設計本部編：トンネル，鹿島出版会，pp.24-29,  
2003.

## A STUDY ON CRITICAL STRAIN OF ROCK MASS USING PRESSUREMETER TEST

Yuichi KOHMURA

In this study, the method of evaluating critical strain of rock mass using pressuremeter test was proposed. And the stability of the rock mass around tunnel using critical strain was considered. The results obtained through this study are as follows:

1) The method of evaluating critical strain of rock mass using pressuremeter test was proposed. It was found that the value of critical strain evaluated by this research is well in agreement with the value which Sakurai and others had reported in the past.

2) Critical strain ( $\varepsilon_0$ ) and deformation modulus (E) show relatively high correlation, and the relation of both are expressed in  $\varepsilon_0 = b \times E^{-0.5}$ , where b is constant.

3) The method of evaluating the stability of the rock mass around tunnel using  $\varepsilon_0/\varepsilon_r$  (where  $\varepsilon_0$  is critical strain,  $\varepsilon_r$  is strain of the tunnel crown calculated by elastic theory) was proposed.