

投稿論文(和文ノート)
**TECHNICAL
NOTE**

トンネルの安定性評価のための 限界せん断ひずみ

櫻井春輔*・川嶋幾夫**・大谷達彦***・
松村真一郎****

トンネルなどの地中構造物の施工において、計測は変位測定が主体として行われる。この測定値から直接的あるいは逆解析によって地山の最大せん断ひずみの分布を求めることができる。本ノートでは、その許容値として限界せん断ひずみを提案し、それが一軸および三軸圧縮試験の結果から近似的に求めうることを示す。

Key Words: maximum shear strain, critical shear strain, torsional shear test, uniaxial compression test, tri-axial compression test

1. はじめに

従来、構造物の設計においては、一般に許容応力度設計法が採用される。しかしながら、トンネルなどの地中構造物では、荷重にあたる地山内の初期応力が明確でなく、また測定するにしてもそれを精度よく求めるのは困難かつ高価となる。さらに、地山を構成する材料の力学特性が複雑であるため、応力～ひずみ関係を求めることが容易でない。したがって、たとえ応力解析を行ったとしてもその結果の信頼度は低いものになるため、許容応力度設計法の適用には問題が生じる。

そこで、地中構造物では、設計の信頼性を高めるために、施工中に現場計測を行い、得られたデータから地山の正確な挙動をとらえ、次の施工段階において役立てるいわゆる情報化施工が一般的に行われる。測定対象としては、応力または変位が考えられるが、変位計測は、内空変位計、地中変位計、傾斜計および各種の測量機器などを用いてかなり精度よく測定できるため、主に採用されている。しかし、変位がいくら正確に測定されたとしても、それを正しく評価できなければ、計測結果を計測管理に活かすことはできない。

このような状況において、著者の一人は、現場で計測される変位を応力に変換することなく、直接的に評価することのできる直接ひずみ評価法(DSET)を提案した¹⁾。そして、比較的容易に計測できる天端沈下と内空変位をそれぞれ、トンネルの半径および直径で除して求

められるひずみを、供試体の一軸圧縮試験から求められる限界ひずみ(一軸圧縮強度の変形係数との比)と比較することによってトンネルの安定性の評価が可能なことを示した²⁾。

しかし、その場合、トンネル周辺地山の巨視的な安定性は評価できても、局所的な安定性の評価は困難である。周辺地山の局所的な安定性を評価するためには、トンネル周辺に生ずる最大せん断ひずみの分布を求め、それを許容値と比較しなければならない。地山に発生する最大せん断ひずみは、地中変位計や傾斜計を用いることにより求められる。Fig.1に、ワシントンメトロにおいて変位計と傾斜計から直接的に求められた最大せん断ひずみの分布を示す³⁾。また、計測変位から、逆解析によって地中の最大せん断ひずみを求ることもできる⁴⁾。このとき、許容値としては、厳密には、せん断ひずみ量を用いなければならないため、一軸圧縮強度から求められる限界ひずみによって評価することには問題がある。一方、許容値としての最大せん断ひずみについては、従来あまり明らかにされていない。そこで、本研究では最大せん断ひずみの許容値として“限界せん断ひずみ”を定義し、それを許容値として用いることを提案する。そして、その特性について調べた。しかしながら、限界せん断ひずみを直接求めるには、一般に、ねじりせん断試験を行わなければならない。ここで、ねじりせん断試験は、適用できる地山材料が限定されるため、その現場への適用には問題が生ずる。そこで、限界せん断ひずみをねじりせん断試験によらず、一軸および三軸試験結果から得られる限界ひずみを用いて近似的に求める方法を検討した。なお、限界ひずみについては、これまでの研究から、不連続面の影響をあまり受けず、岩石コアの限界ひずみと原位置岩盤の限界ひずみがほぼ同じ値になることが明らかにされている⁵⁾。さらに、間隙水や温度などの環境の変化にも影響されないことが確かめられている⁶⁾。

* 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) 神戸大学大学院生自然科学研究科(博士課程)

*** 正会員 修(工) 元神戸大学大学院生(現在 西松建設 横浜支店)

**** 正会員 工修 基礎地盤コンサルタント(株)関西技術センター

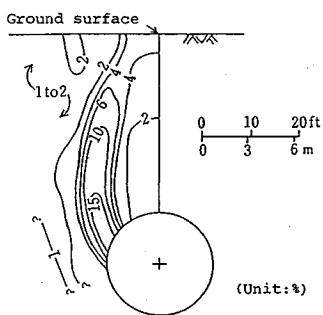


Fig.1 Maximum shear strain distribution³⁾

2. 限界せん断ひずみの定義とその特性

ここで、最大せん断ひずみに対する許容値として限界せん断ひずみ (γ_0) を、次式で定義する (Fig.2 参照)。

ここで、 τ_{max} は最大せん断強度、 G_{50} は 50% 強度に対するせん断弾性係数である。式(1)から限界せん断ひずみを求めるには、最大せん断強度とせん断弾性係数が必要となる。このせん断弾性係数は、ねじりせん断試験によって求めることができる。このとき、最大せん断強度はピーク強度、 G_{50} はせん断応力～せん断ひずみ関係のピーク強度の 1/2 における割線せん断弾性係数として求められる。過去に実施された破碎部粘土のねじりせん断試験の結果から、式(1)により求めた限界せん断ひずみを、最大せん断強度との関係でプロットすると Fig.3 のようになる。

また、トンネル周辺の地山は三軸圧縮応力状態にあるので、拘束圧の影響について明らかにしておかなければならぬ。そのため、同じ材料の供試体について、拘束圧を変化させたねじりせん断試験（排水条件）を行い、限界せん断ひずみ～拘束圧関係を求めた。それを、Fig.4 に示す。なお、このときの供試体の材料は破碎部粘土である。この図から、限界せん断ひずみは拘束圧が変化してもほとんど変化せず、一定であることがわかる。

3. 近似的に限界せん断ひずみを求める方法

トンネル掘削時に内空変位計、地中変位計および傾斜計などにより、トンネル周辺地山内の変位が求められる。これらの変位を微分することにより地山内のひずみ分布を求めることができる¹⁾。そして、その値を限界せん断ひずみと比較することによって、トンネル周辺地山の安定性を評価することができる。

このとき、限界せん断ひずみを地山材料の許容ひずみとするには、その特性について調べる必要がある。そのためには、多くの地山材料について異なる条件下において実験を行わなければならない。ここで、前項に示したように限界せん断ひずみを直接的に求めるには、ねじり

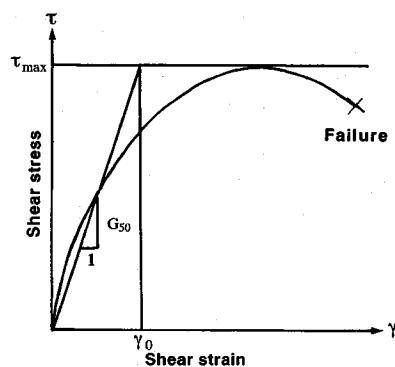


Fig.2 Definition of critical shear strain

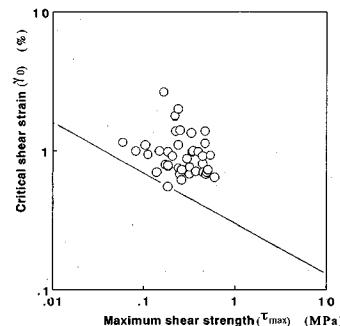


Fig.3 Relationship between critical shear strain and maximum shear strength
(Torsional shear test)

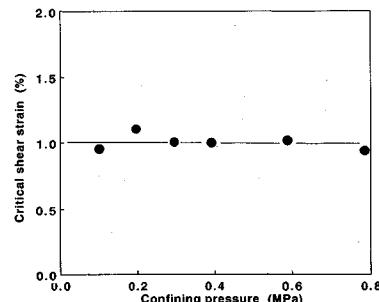


Fig.4 Effect of confining pressure on critical shear strain

せん断試験によらねばならない。しかしながら、ねじりせん断試験を行うことができる地山材料は、粘土、砂など土質材料に限定され、岩質材料に適用することは困難である。そのため、ほとんどの地山材料について適用され、既に種々の土や岩に対し数多くの実験結果が公表されている、一軸および三軸圧縮試験によって近似的に限界せん断ひずみを求めることができれば、工学的に非常に有効である。そこで、ここでは、一軸および三軸圧縮試験の結果から限界せん断ひずみを求ることを考える。

(1) 一軸および三軸圧縮試験における限界せん断ひずみ

限界せん断ひずみの値は、ピーク強度に対するひずみ

値よりもかなり小さい値であるので、等方弾性を仮定して近似的に一軸および三軸圧縮試験の結果から限界せん断ひずみを求めることができる。このとき、一軸圧縮試験あるいは排水条件の三軸圧縮試験であれば、間隙水圧は発生しないので、軸（軸差）応力～軸ひずみ関係においてピーク強度の $1/2$ のところで変形係数を E_{50} を求めることができる⁵⁾。したがって、最大せん断強度は、一軸圧縮強度あるいは軸差強度を用いて、次式のように求まる。

$$\tau_{\max} = \sigma_c / 2 \text{ あるいは } (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2 \dots \dots \dots \quad (2)$$

また、せん断弾性係数 G は、等方弾性を仮定して次式で求まる。

$$G = \frac{E_{50}}{2(1+\nu)} \dots \dots \dots \quad (3)$$

このとき、限界せん断ひずみは式(2)、式(3)を式(1)に代入することにより、次のように求められる。

ここで、 ε_0 は $\varepsilon_0 = \sigma_c/E_{50}$ または $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_{50}$ として一軸あるいは三軸圧縮試験で得られる限界ひずみである。

(2) 実験による検証

式(4)の妥当性を調べるために、同じ砂を用いてねじりせん断試験(排水条件)および三軸圧縮試験(排水条件)を行った。この砂の力学試験結果をTable 1に、粒度分布をFig.5に示す。なお、ここでは載荷当初の変形特性を対象にしているので、有効側圧は、ねじりせん断試験、三軸圧縮試験ともに 0.3 kgf/cm^2 (0.03 MPa)とした。また、その他の実験条件もなるべく等しくした。ねじりせん断試験により求めたせん断応力～せん断ひずみ関係をFig.6に、三軸圧縮試験により求めた軸差応力～軸ひずみ関係および体積ひずみ～軸ひずみ関係をFig.7に示す。このとき、ねじりせん断試験においては、 $\tau_{\max}=0.088 \text{ MPa}$, G_{50} (割線)=5.8 MPaとなり、限界せん断ひずみは $\gamma_0=1.5\text{ \%}$ と求められる。一方、三軸圧縮試験においては $(\sigma_1-\sigma_3)_r=0.55 \text{ MPa}$, E_{50} (割線)=39 MPa, ν (割線)=0.36となるので、式(2)～(4)を用いて、 $\tau_{\max}=0.27 \text{ MPa}$, $G=14 \text{ MPa}$ と計算でき、限界せん断ひずみは $\gamma_0=1.9\text{ \%}$ となる。このように、三軸圧縮試験から求めた限界せん断ひずみが、ねじりせん断試験から求めた限界せん断ひずみと大差ない値になることがわかった。これより、限界せん断ひずみはねじりせん断試験によらずとも、一軸(三軸)圧縮試験の結果から、式(4)によって近似的に求めることができると考えられる。

(3) 一軸(三軸)圧縮試験から近似的に求めた限界せん断ひずみ

いま、式(4)が成立するすれば、限界ひずみ ε_0 と一軸圧縮強度 σ_c との関係が著者の一人によって既に発表されているので、それを用いることにより、 ε_0 と

Table 1 Physical properties of sands tested

	Tri-axial compression test	Torsional shear test
Density of soil particle (ρ_s) (g/cm^3)	2.724	2.724
Natural moisture content (θ_n) (%)	21.52	21.40
Void ratio (e)	0.679	0.670

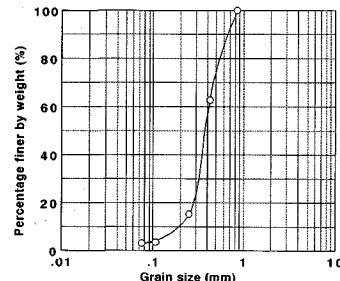


Fig.5 Grain size accumulation curve

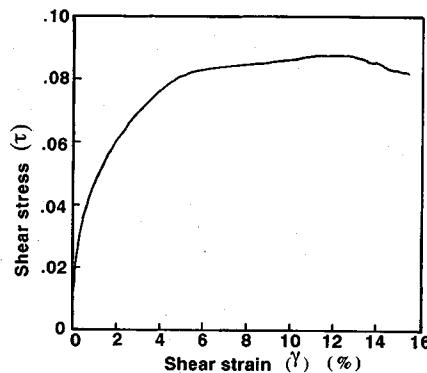


Fig.6 Shear stress - shear strain curve
(Torsional shear test)

σ_c の関係を容易に限界せん断ひずみ (γ_0) とせん断強度 (τ_{\max}) の関係に変換できる。なお、その変換において必要となるポアソン比については、粘土・シルト、砂・砂質土、軟岩、硬岩についてそれぞれ、0.4, 0.3, 0.2, 0.1と仮定した。このようにして求めた限界せん断ひずみ～最大せん断強度関係を Fig.8 に示す。この図にはねじりせん断試験により直接的に求めた値もプロットしている。図からわかるように、一軸および三軸圧縮試験による、限界ひずみ～一軸圧縮強度（軸差強度）関係から式 (4) を用いて求めた限界せん断ひずみは、ねじりせん断試験から直接求めた限界せん断ひずみと同じ帶状に分布していることがわかる。また、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験から求めた限界せん断ひずみは、ねじりせん断試験から求めたそれよりも同程度かそれより若干大きい値になっている。このため、その最下縁の値は両者ほぼ一致しており、計測管理における管理基準値として、一軸および三軸圧縮試験から式 (4) によって求められる限界せん断ひずみの分布の最下縁の値を採用することができる。

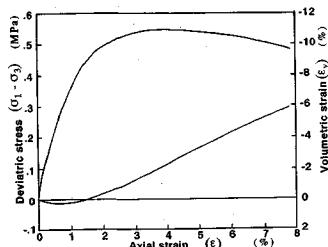


Fig.7 Deviatoric stress - axial strain curve and Volumetric strain - axial strain curve
(Tri-axial compression test)

4. まとめ

本ノートでは、トンネルの周辺地山の安定性を最大せん断ひずみによって評価することができるとする立場から、その許容値として限界せん断ひずみを定義した。さらに、その特性について調べ、それが拘束圧に影響を受けないことがわかった。限界せん断ひずみは厳密にはねじりせん断試験によって求めなければならない。しかし、その実施は時間と費用がかかり、さらに適用できる地山材料が限定されるため、その現場への適用には問題がある。そこで、本研究では、現場においても容易に適用できる一軸（三軸）圧縮試験を用いて限界せん断ひずみを求ることを試みた。その結果、一軸（三軸）圧縮試験から式（4）を用いて求めた限界せん断ひずみはねじりせん断試験から求めた値と大差なく、実用上は一軸（三軸）圧縮試験から求めた限界せん断ひずみを用いることができることがわかった。したがって、現場において一軸（軸差）圧縮強度は容易に推定できることから、Fig.8に示す限界せん断ひずみ～一軸圧縮強度関係を用いてせん断ひずみに対する許容値である限界せん断ひずみを、その分布の最下縁の値として容易に推測することができる。

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、

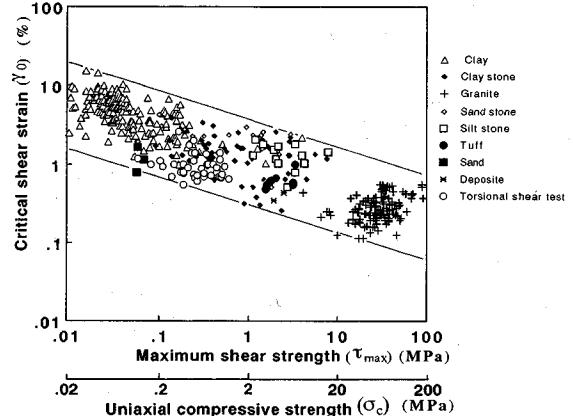
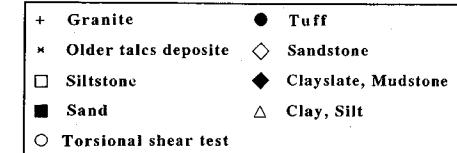


Fig.8 Relationship between critical shear strain and maximum shear strength or uniaxial compressive strength

土木学会論文報告集、第317号、pp.93~100、1982。

- 2) 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。
- 3) W.H.Hansmire and E.J.Cording : Soil tunnel test section : Case history summary, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.11, pp.1301~1320, 1985.
- 4) 櫻井春輔・武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法、土木学会論文報告集、Vol.337, pp.137~145, 1983.
- 5) 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.
- 6) 櫻井春輔・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.460/III-22, pp.177~180, 1993.

(1993.5.6受付)

CRITICAL SHEAR STRAIN FOR ASSESSING THE STABILITY OF TUNNELS

Shunsuke SAKURAI, Ikuo KAWASHIMA, Tatsuhiko OTANI and Shin-ichiro MATSUMURA

In order to assess the stability of tunnels, Sakurai proposed a method called Direct Strain Evaluation Technique (DSET). According to this method, strain occurring in rocks around tunnels is compared with its allowable value, and if the occurring strain is still smaller than the allowable value, tunnels are deemed stable. Considering that the failure of materials can be evaluated in terms of the maximum shear strain, this study defined critical shear strain as an allowable value for the maximum shear strain. The critical shear strain must be determined by a torsional shear test. However the test is often too complex and time consuming to operate. In this paper, therefore, it is demonstrated that the critical shear strain can be determined from uni-axial or tri-axial compression tests which are commonly used in engineering practice.