

(1) 変位計測結果に基づく地山物性値の推定とその適用

応用地質株式会社	正会員	○進士	正人
応用地質株式会社	正会員	細田	宏
応用地質株式会社	正会員	満	弘之

Evaluation of Rock Properties based on the Convergence Measurements

Masato SHINJI, Hiroshi HOSODA and Hiroyuki MITSU, OYO Corporation

Summary

Stabilities of the tunnel depends on the material properties and the in-situ stresses of the rock media. Therefore, it is indispensable to estimate precisely properties of rock materials in order to construct tunnels economically and safely. however, it is difficult to obtain any reasonable properties of rock media before the construction.

In this paper, the authors propose a practical technique that can be obtained by convergence measurements during tunnel excavation.

Finally, the authros concludes the technique proposed in this paper to be validated for evaluation the stability of rock media surrounding tunnel considering the back analysis method proposed by Sakurai, et al(1983), as a result of applying the technique to the actual data of field measurements during tunnel constructions

1. まえがき

トンネルのような地下に建設される構造物を施工する場合、地山物性の評価、初期応力の把握は、構造物の安定に直接結びつくきわめて重要な情報である。この情報を収集するため、施工中に現場において現場計測を行うことによって、設計時に予想した挙動と現場の計測結果とを絶えず比較検討しながら施工を進め、必要に応じて設計・施工を変更するという方法が、情報化施工である。

トンネルにおける情報化施工のために行なわれる動態観測は、その目的並びに重要度に合わせてA計測、B計測に分けられる。A計測は通常、トンネルに対して縦断面的に小間隔で行われる計測であり、内空変位計測、天端沈下計測、切羽面のスケッチなどがある。B計測は、地質区分あるいは地山区分の境界においてトンネルに対して横断面的に実施される重点計測であり、地中変位計測、ロックボルト軸力計測、支保工応力計測等がある。それぞれの計測ともトンネル支保工（鋼製支保工、吹き付けコンクリート）の適否並びに地山の挙動を明確にすることを目的としており、両者を実施することによって地山も含めたトンネル全体の挙動を明確に測定することができる。

本論文では、特にトンネルにおける動態観測の評価を目的として、トンネル縦断面方向に数多く実施される内空変位計測、天端沈下計測結果（A計測結果）を用いてトンネルの安定性を簡単にかつより精度よく求める方法を提案する。これは、近藤(1981)、足立、ほか(1987)が提案した方法にさらに改良を加え、最適化手法を用いて、地山の弾性係数はもちろん、すべての初期応力成分の分布も変位計測結果から推定できるようにし、そして、桜井が提案している地中変位・内空変位計測結果に基づく逆解析を組み合わせて、トンネル全体の安定性の評価を行うことを目的

としたものである。そして、その方法と、地中変位計測結果、内空変位計測結果及び天端沈下計測結果に基づく桜井が提案する逆解析手法を用いて、トンネル全体の安定性を評価するシステムを提案する。最後に、このシステムの妥当性を実測例を用いて検討する。

2. 基礎式の誘導

図-1に示すあらかじめ σ_{x0} 、 σ_{y0} 、 τ_{xy0} の初期応力が与えられた弾性板に、半径 a の円を開けたときの任意点の半径方向 u 並びに円周方向 v の変位量は次式によって与えられる。

$$u = \frac{(1-\nu)a}{2E} \left[(\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) \left(\frac{a}{r} \right) + (\sigma_{x0} - \sigma_{y0}) \left\{ 4(1-\nu) \left(\frac{a}{r} \right) - \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right\} \cos 2\theta \right. \\ \left. + 2\tau_{xy0} \left\{ 4(1-\nu) \left(\frac{a}{r} \right) - \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right\} \sin 2\theta \right] \dots\dots(1)$$

$$v = \frac{(1+\nu)a}{2E} \left[(\sigma_{x0} - \sigma_{y0}) \left\{ 2(1-2\nu) \left(\frac{a}{r} \right) + \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right\} \sin 2\theta \right. \\ \left. + 2\tau_{xy0} \left\{ 2(1-2\nu) \left(\frac{a}{r} \right) + \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right\} \cos 2\theta \right] \dots\dots(2)$$

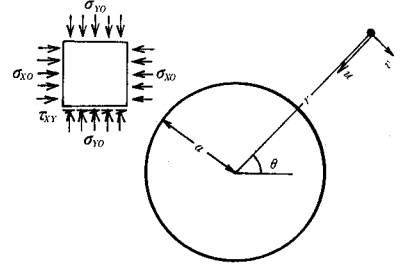


図-1 初期応力を受ける有孔弾性板

ここで、 E は、2次元弾性板の弾性係数、 ν は、ポアソン比である。また、 r は、トンネル中心からの距離($r > a$)、 θ は、 σ_{x0} 方向からの傾き(反時計回りを正とする)である。

トンネルで実施される現場計測において、A計測と呼ばれる天端沈下測定、内空変位測定は、最も頻繁に実施される計測項目である。ここでは、簡略化のために内空変位測定パターンのうち、水平測線の位置は、トンネル中心を通る位置と仮定した。図-2において、点A、B、Cで示す3点の半径方向並びに円周方向の変位量をそれぞれ u_A 、 v_A 、 u_B 、 v_B 、 u_C 、 v_C とする。それぞれの変位量は、(1)並びに(2)式において、それぞれ $r=a$ 、 $\theta=\pi/2$ 、 $\theta=\pi$ 、 $\theta=0$ として以下の様に表される。

$$u_A = \frac{(1+\nu)a}{2E} \{ (\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) - (\sigma_{x0} - \sigma_{y0})(3-4\nu) \} \dots\dots(3)$$

$$v_A = \frac{(1+\nu)a}{E} \tau_{xy0}(4\nu-3) \dots\dots(4)$$

$$u_B = u_C = \frac{(1+\nu)a}{2E} \{ (\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) + (\sigma_{x0} - \sigma_{y0})(3-4\nu) \} \dots\dots(5)$$

$$v_B = v_C = \frac{(1+\nu)a}{E} \tau_{xy0}(3-4\nu) \dots\dots(6)$$

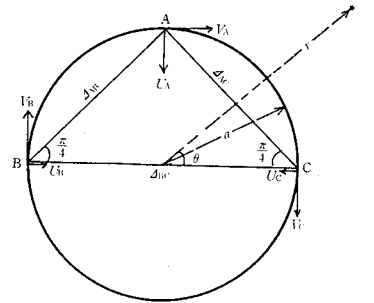


図-2 円形トンネルにおける測点配置

ここで、現場計測である内空変位並びに天端沈下を図-2に示すように測定した場合を考える。式(3)並びに式(6)からそれぞれの変位量は以下の様に与えられる。

$$\begin{aligned}
\Delta_{BC} &= u_B + u_C \\
&= \frac{(1+\nu)a}{E} \{ (\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) + (\sigma_{x0} - \sigma_{y0})(3-4\nu) \} \\
&= \frac{(1+\nu)a}{E} \{ 4(1-\nu)\sigma_{x0} - 2(1-2\nu)\sigma_{y0} \} \dots\dots(7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{AC} &= \cos\frac{\pi}{4} \cdot \{ (u_A + v_A) + (u_C - v_C) \} \\
&= \cos\frac{\pi}{4} \cdot \frac{(1+\nu)a}{E} \{ (\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) + 2(4\nu-3)\tau_{xy0} \} \dots\dots(8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{AB} &= \cos\frac{\pi}{4} \cdot \{ (u_B + v_B) + (u_A - v_A) \} \\
&= \cos\frac{\pi}{4} \cdot \frac{(1+\nu)a}{E} \{ (\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) - 2(4\nu-3)\tau_{xy0} \} \dots\dots(9) \\
\Delta_A &= \frac{(1+\nu)a}{E} \{ -(1-2\nu)\sigma_{x0} + 2(1-\nu)\sigma_{y0} \} \dots\dots(10)
\end{aligned}$$

式(7)から(10)を未知量である初期応力並びに弾性係数を一組としてマトリックス表示すると次式を得る。

$$(1+\nu)a[A]\{\sigma_0\} = \{\Delta\} \dots\dots(11)$$

ここで、 $[A]$ は、ポアソン比、並びに角度によって定められるマトリックスであり次式で表される。

$$[A] = \begin{bmatrix} 4(1-\nu) & -2(1-2\nu) & 0 \\ \cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} \cdot 2(4\nu-3) \\ \cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} & -\cos\frac{\pi}{4} \cdot 2(4\nu-3) \\ -(1-2\nu) & 2(1-\nu) & 0 \end{bmatrix} \dots\dots(12)$$

$\{\sigma_0\}$ は、地山の初期応力を弾性係数で除したものであり、桜井(1983)は、このベクトル量を「初期応力パラメータ」と名づけた。初期応力パラメータは、次式のように与えられる。

$$\{\sigma_0\} = \left\{ \frac{\sigma_{x0}}{E} \quad \frac{\sigma_{y0}}{E} \quad \frac{\tau_{xy0}}{E} \right\}^T \dots\dots(13)$$

ここで、添え字のTは、転置行列であることを示す。

また、 $\{\Delta\}$ は、現場において測定される測定値であり、次式のように表される。

$$\{\Delta\} = \{\Delta_{BC} \quad \Delta_{AC} \quad \Delta_{AB} \quad \Delta_A\}^T \dots\dots(14)$$

式(11)は、測定値である既知量のほうが初期応力パラメータである未知量よりも多くなる。従って、最小自乗法を用いて最適化すれば初期応力パラメータは、以下のように求められる。

$$\{\sigma_0\} = \frac{1}{(1+\nu)a} \cdot [A]^T [A]^{-1} [A]^T \{\Delta\} \dots\dots(15)$$

この式に変位量 $\{\Delta\}$ を入力することによって、初期応力パラメータ $\{\sigma_0\}$ は、一意的に定まる。ここで、初期応力パラメータのなかで、初期応力の鉛直成分 σ_{y0} を $\sigma_{y0} = \gamma \times H$ すなわち（地山の単位体積重量） $\times$ （土被り高さ）と仮定すれば地山の弾性係数を推定することができる。弾性係数が定まれば他の初期応力成分 $\{\sigma_{x0}, \tau_{xy0}\}$ が求められる。

3. 数値シミュレーションによるトンネル形状の簡易推定法に与える影響に関する検討

2章で示した逆解析手法においては、トンネルを円形断面であると仮定して、地山弾性係数

を推定している。しかしながら、ほとんどの場合、トンネルの断面形状は円形ではない。そこで、本章では、トンネルの形状の相違が逆解析結果に与える影響を有限要素法による数値解析によって比較した。ここでは、形状の影響のみを検討の対象としているため、初期せん断応力は0と仮定した。

図-3に、数値シミュレーションに用いた有限要素分割図を示す。今回用いた有限要素分割図は、実際のトンネルの解析に用いたものである。有限要素は、解析の精度並びにその取扱の便利さを考慮した上で、8節点アイソパラメトリック要素を用いた。数値シミュレーションの手順はつぎの手順に従って実施した。

- (1) 地山の初期応力・弾性係数・ポアソン比を仮定する
- (2) 有限要素解析を行う。
- (3) 天端沈下量・内空変位量を求める。
- (4) (3)で求めた測定量をインプットデータとして地山物性値の簡易推定を行う。

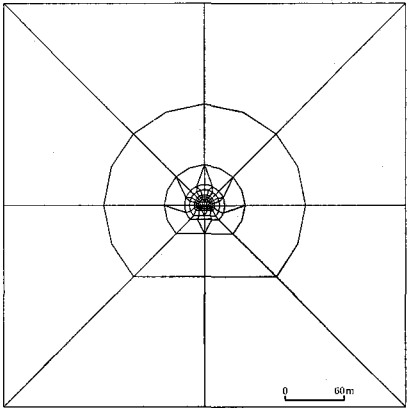


図-3 数値シミュレーションに用いた要素分割図

数値シミュレーションの入力値としては、弾性

係数 E は、 $10,000\text{kgf/cm}^2$ とし、ポアソン比は、0.3および0.4の場合を想定した。さきにも述べたように初期せん断応力は、0とした。水平方向の初期応力 σ_x 及び鉛直方向の初期応力 σ_y はすべて圧縮状態とし、 $10\text{kgf/cm}^2 \sim 50\text{kgf/cm}^2$ の範囲の値とし、側圧係数 σ_x/σ_y を種々変化させた。また、それぞれの検討は上半断面掘削時と全断面掘削時の2つのケースにおいて実施した。

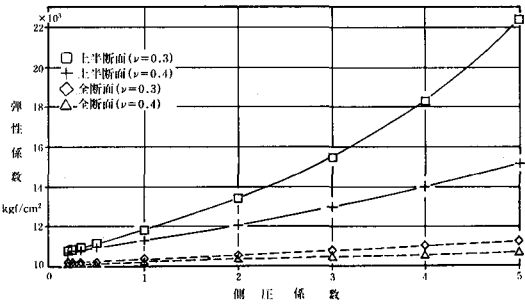


図-4 側圧係数と見掛け弾性係数との関係

本研究によって得られる弾性係数について述べる。図-4に、シミュレーションに用いた側圧係数と本研究によって得られた弾性係数の関係を示す。図から明らかなように、上半断面における本研究によって得られた弾性係数は、側圧係数が5程度になるとシミュレーションに用いた弾性係数の2倍以上も見かけ上大きくなる。しかし、全断面になり、トンネルの形状が円形に近くなると、簡易推定法によって得られる弾性係数は、約10%以内の誤差で推定が可能となる。

上に述べたように、この逆解析法は、円形断面のトンネルを対象としたものである。従って、実際のトンネル断面に適用すると、求められる弾性係数は、真の弾性係数と異なる値となる。そこで、有限要素解析に用いた E と逆解析の結果として得られた E^* の比を「低減率 R 」とし、円形断面のトンネルに関する逆解析結果から得られる弾

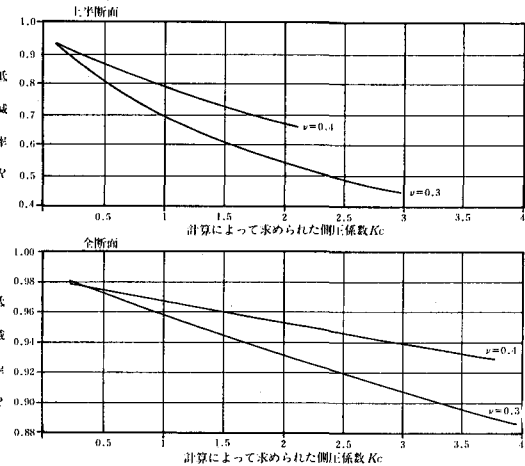


図-5 見掛けの側圧係数から真の弾性係数を求める図

性係数を真の弾性係数に換算した。図-5に、逆解析結果によって得られた側圧係数と低減率の関係を示す。図からわかるように、この両者の関係は、単調な変化を示す曲線となるため、低減率Rは簡単に求めることができ、これによって真の弾性係数が推定できる。

4. 現場計測結果への適用

このトンネルは、凝灰岩中に建設された約1000mの2車線道路トンネルである。このトンネルの坑口から約100メートルから600メートルの間に分布する砂質凝灰岩は、激しい膨張性並びにスレーキング性を有していることが指摘されていた。そこで設計においては、この砂質凝灰岩の部分を特殊(E)パターンとすることとした。施工中においては、一間毎の切羽観察、20m間隔でのA計測を行うこととした。また、測点No.175、No.170+10、No.161+5の3地点においてB計測を行い、特に測点No.170+10並びにNo.161+5においては、計測だけではなく、有限要素法を用いた逆解析及び順解析を実施し、精密な地山の安定性の評価並びに支保工の適非、将来の予測を行った。またA計測の結果は本研究で提案する簡易推定法を用いて整理し地山の弾性係数を推定した。図-6に、これまでのA計測の結果およびB計測による結果、並びに補助工法および湧水状況を整理した結果を示す。図から明らかなように、測点No.170+10並びにNo.161+5において、本研究で提案する簡易推定法によって求められる弾性係数は、精密なB計測によって推定された弾性係数とほぼ一致することが明かとなった。従って、A計測結果から推定される弾性係数から地山のひずみの推定が可能となること、すなわちA計測の結果もB計測の結果と同様に、設計・施工にフィードバックすることが可能であることが明かとなった。

このように、A計測とB計測を有機的に結合することによって、このトンネルの膨張性を有する区間を安全に施工することができた。

5. まとめ

内空変位計測並びに天端沈下計測の計測結果を用いて地山の弾性係数を弾性理論解を用いて簡便に推定する方法を述べた。そして、実際の適用例によってその方法の有効性を検討した。その結果、簡易推定法によって得られる結果は、支保効果を含んだ見かけの弾性係数であるが、B計測結果に基づく逆解析による弾性係数とも十分整合性がとれることが明らかとなった。

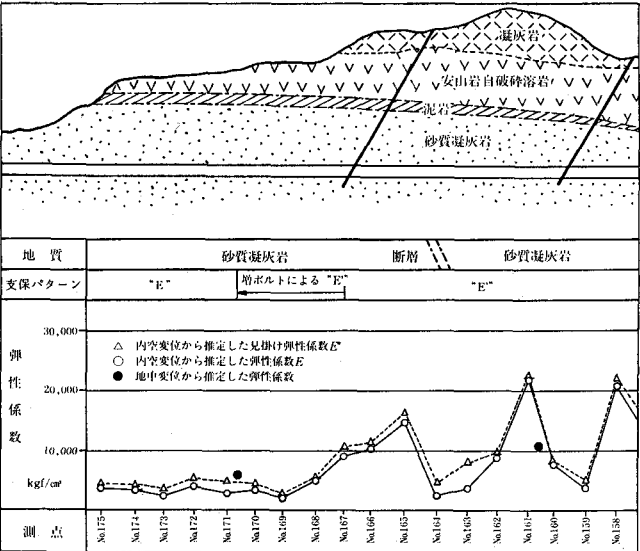


図-6 実際のトンネルにおける適用例

参考文献

桜井 春輔、武内 邦文(1983)：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法、土木学会論文集、第337号、pp.113～145。 足立 紀尚、矢野 隆夫(1987)：トンネル掘削に伴う変位計測結果の簡易推定法、土木学会論文集、第388号／III-8、pp.207～216。 近藤 達敏(1981)：トンネル掘削時の半径方向実測変位に基づいて周辺地山のひずみ分布を求める実際的手法の考察、応用地質調査事務所年報、No.3、pp.149-164。