

地山物性のばらつきを考慮した トンネル応力解析

九州大学工学部○正 員 相川 明
九州大学工学部 正 員 樽木 武

1. はじめに

トンネルの事前設計時には有限要素法などの力学解析が行われるが、現状の解析法に関して以下のような問題点を指摘できる。すなわち、入力定数としての地山物性に、一部の供試体による実験値を用いており、地山全体の挙動を表していないこと。しかも、地山定数を推定する際の信頼性をモデルに入力できないため、解析結果の信頼性がわからないこと。また、地山分類に用いられる事前調査内容は、地山の力学的挙動に関する多くの情報を含んでいるにも関わらず、解析時にはほとんど考慮されていないこと。そのため、本来は相互補完的にあるべき力学解析と地山分類とが別々に扱われていること。また定性的な説明変数を用いて力学解析ができないことなどを挙げることができる。そこで本研究ではこれらの問題点を改善するために以下のようなことを考えるものである。

- ①. 事前調査項目を説明変数として地山定数を推定する。ただし用いる説明変数としては、地山の力学的挙動に関連するもので、事前設計時に比較的容易に入手でき、しかもできる限り客観的・定量的評価ができるものであること。
- ②. 事前情報が充分とはいえないため、材料定数の推定に関しては、さまざまな不確定性を伴うことが多い。そこで確率有限要素法を用いてこれらの不確定性を確率量としてとらえて評価する。
- ③. 説明変数をカテゴリー区分し、各カテゴリー別に分布関数とそのカテゴリーの出現率を定義する。この分布関数を確率有限要素法を用いて各グループの中心値まわりに目的関数へ写像し、出現確率を重みとして結果を重ねあわせて評価する。これにより定性的な説明変数も用いることができるようになる。

なお説明変数としては、地質(岩種)、弾性波速度、RQD、湧水状態など考えることができるが、

今回は弾性波速度のみに着目して解析をおこなった。

2. 確率有限要素法による定式化

材料定数など不確定性をもつ変量を $x = (x_1, \dots, x_n)$ 、応力・性能関数などの目的関数を $z = z(x)$ とおくと、確率有限要素法とは、剛性方程式 $KU = F$ と境界条件のもとで、①. x の確率密度関数 $f_x(x)$ を z の確率密度関数 $g_z(z)$ に写像する。②. x , z に関するある条件を満たす確率を求める。③. z に対応する x または f_x の水準を求めることである。ところが一般に関数 z は x に関して非線形であるため、期待値(設計点)まわりに Taylor 展開し、線形な関数 z^* で近似するものである。

$$z = z^*(x) \dots\dots\dots (1)$$

ここで地山定数 x がカテゴリー化された事前情報 s の関数であり、しかも確率密度関数 $f_x(x)$ が事前情報に関して加法性を有することを仮定する。

$$f_x(x) = \sum f_{x,s}(x) \cdot w(s) \dots\dots\dots (2)$$

ここに $f_{x,s}(x)$ はカテゴリー s に属する x の確率密度関数であり、 $w(s)$ はカテゴリー s の出現確率である。また $f_{x,s}(x)$ に対応する z の確率密度関数を $g_{z,s}(z)$ とおくと、式(1)により z が x の線形な関数として近似されるので、 z の確率密度関数が

$$g_z(z) = \sum g_{z,s}(z) \cdot w(s) \dots\dots\dots (3)$$

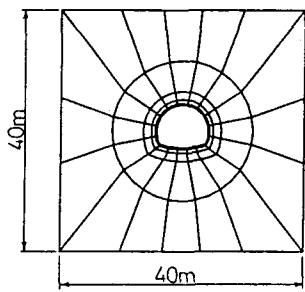
のように求められる。

3. 地山定数と説明変数の関係

不確定性を有する地山定数として密度とポアソン比の2変量を考える。日本各地のトンネル施工地点のデータをもとにポアソン比 ν と密度 ρ のクロスで分布図を作成すると図-1 ようになる。図において長方形で囲んだ範囲は、弾性波速度 $V_p = 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$ km/s を中心とする幅 1.0 km/s のフィルターで、地山定数の存在範囲を明らかにしたものである。これら5つの階級に区分すると各長方形内

の分布についてはポアソン比と密度の間の相関は無視しうる(有意水準5%)ことがわかった。すなわち、階級に分けることにより2変量を独立に扱うことができる。また階級に分けたポアソン比と密度には正規分布をあてはめることができる(有意水準5%)。

4. 確率有限要素法の適用



解析例に用いるモデルを左図に示す。領域内は、四辺形8節点アイソパラメトリック要素により分割した。モデルの下端は固定とし、側方は水平のみ固定する。ここでは簡単のため、不確定要因は空間的にはばらつかず、モデルは弾性の平面ひずみを仮定する。

右下コーナー部の応力評価点において各階級別に最大主応力の分布関数を求めたものが図-2である。また弾性波速度の推定誤差を考慮するためには、各カテゴリーの応力分布関数にそれぞれの発生確率をかけることにより、対象地山での応力分布関数が求められる。ここでは $V_p=3.0\text{km/s}$ と 5.0km/s の発生確率をそれぞれ20%, $V_p=4.0\text{km/s}$ の発生確率を60%と仮定して応力分布関数を求めた(図-3)。

5. まとめ

本研究は地山定数を事前調査項目をもとにいくつかのグループに分類し、そのグループ別に分布関数を定義し、そのグループの出現率を外性的に与えることにより、計算結果の精度を評価するものである。このことは、カテゴリー化された説明変数でFEM解析を行う意味を持ち、FEM解析の適用範囲を拡大するものである。また分布関数をグループ分けすることにより、一般に非線形な強い相関関係にある地山定数を独立に扱うことができ、しかも正規分布近似できることから破壊確率を求める場合などの計算の簡略化が期待できる。なお弾性波速度以外の事前情報とクロスで評価することにより精度を向上させることができ、地山分類との関連性のもとで有限要素解析を可能にするものである。

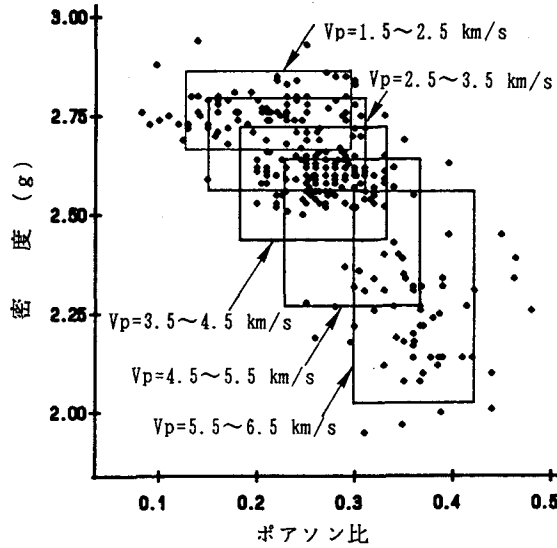


図-1 弾性波速度と地山定数の関係

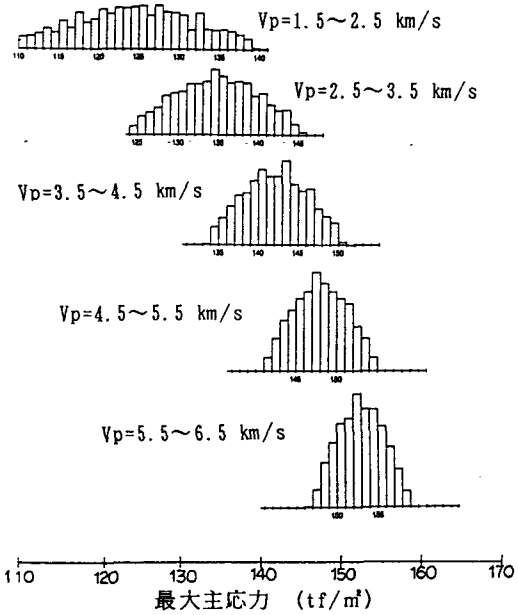


図-2 各階級別の最大主応力の分布関数

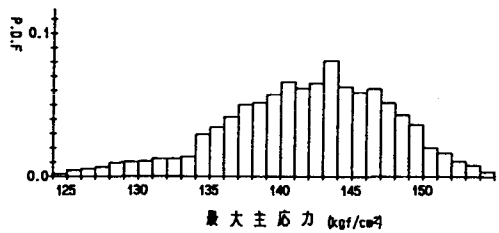


図-3 発生確率を考慮した最大主応力の分布関数