

トンネル掘削による地表変位の積分方程式法による3次元解析

大阪大学工学部 正員 伊藤 富雄
大阪大学工学部 正員 久武 勝保
大阪大学大学院 学生員 〇上 田 博之

1 まえがき

近年、市街地に土曜りの浅いトンネルを掘削する機会が多くなり、不等次下による地上構造物への影響が問題となり、ている。本解析は、トンネル掘削による地表変位の3次元特性を、積分方程式法に、明らかにしたものである。

2 積分方程式法による3次元解析

3次元弾性体の境界を N 個の要素に分割し、その要素上での応力ベクトル t_i と変位ベクトル u_i が一定であり、また境界が滑らかであると仮定すれば、 t_i と u_i の関係は次のように離散化された形で表わすことができる。¹⁾

$$\frac{1}{2} \delta_{ij} u_j(P_m) + \sum_{n=1}^N u_j(Q_n) \Delta T_{ij}(P_m, Q_n) = \sum_{n=1}^N t_j(Q_n) \Delta U_{ij}(P_m, Q_n) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{ij}(P_m, Q_n) &= \int_{\Omega_n} T_{ij}(P_m, Q) dS(Q) \\ \Delta U_{ij}(P_m, Q_n) &= \int_{\Omega_n} U_{ij}(P_m, Q) dS(Q) \quad (m=1 \sim N) \end{aligned}$$

P_m, Q_n は境界上の要素の重心点の位置を示し、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 U_{ij}, T_{ij} は変位と応力に関するケルビンの基本解である。したがって、トンネル掘削による変位、応力が無限遠で 0 になるという境界条件は完全に満足される。本解析では、式(1)の多元連立方程式を解いて、地表面及びトンネル内面の変位を求めた。

また、領域内の任意点 P の変位は、式(1)の解を用いて、次式により求めることができる。

$$u_i(P) = \sum_{n=1}^N t_j(Q_n) \Delta U_{ij}(P, Q_n) - \sum_{n=1}^N u_j(Q_n) \Delta T_{ij}(P, Q_n) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{ij}(P, Q_n) &= \int_{\Omega_n} T_{ij}(P, Q) dS(Q) \\ \Delta U_{ij}(P, Q_n) &= \int_{\Omega_n} U_{ij}(P, Q) dS(Q) \end{aligned}$$

3 本解析手法の信頼性の検討

図1は、本解析手法の信頼性を検討するため、等圧初期応力 P が作用する弾性地山に、半径 a の垂直円形トンネルを掘削した場合の、トンネル内面及び切端前方の仮想トンネル境界の変位について、本解析結果と有限要素法の結果と比較したものである。ただし、 G は地山のせん断弾性定数、 ν はポアソン

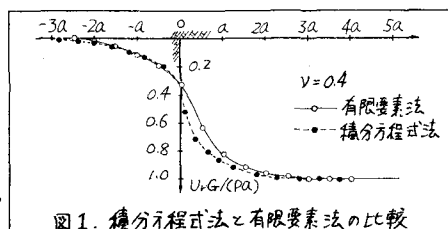


図1. 積分方程式法と有限要素法の比較

比である。面結果ともほぼ同様の傾向を示しているが、定量的には積分方程式法の結果が大きいとなった。これは有限要素法の解析領域に起因するものと考えられる。

4 地表変位の3次元特性

本解析では、地山の初期応力は重力により生じるとし、地山の単位重量を γ とする。また、図2に解析で用いたトンネルと地表面の幾何学的関係を示す。

図3(A)は、トンネル横断面での次下曲線を示し、図3(B)は、(A)の次下曲線をそれぞれの次下曲線の最大値で無次元化したものである。これから、切端の接近及び通過に伴い、次下の絶対量は増大するが、次下曲線のモードは切端の位置に依存しないことがわかる。

図4は、トンネル縦断地表面の次下を、切端から十分離れ、平面歪の成立する位置での次下で無次元化したものである。今、この曲線を適当な関数で表わしてあげれば、図3の結果から、2次元平面歪解析による横断次下を計算するだけで地表任意点の次下量を知ることができる。³⁾

次に、図5は、トンネル縦断地表面のトンネル軸方向変位の解析結果である。図4及び図5から、トンネル軸方向の変位開始点が次下開始点とはほぼ一致すること、最大軸方向変位の生じる位置で次下曲線の勾配が最大となること、そして軸方向変位 u_z に収束する点で次下曲線も一定値に収束することがわかる。

最後に、トンネル横断面でのトンネル横断方向変位の解析結果を図6に示す。水平相対変位による被害報告はあまりなされていないが、図3及び図6を見ると、水平相対変位が不等次下と同じオーダーで生じているので、トンネル横断方向に埋設された構造物に大きな応力が作用する可能性があり、注意が必要である。

参考文献

1) Cruse, T.A.: Int. J. Solid Structures, vol. 5, 1969. 2) Ranken, R.E. and J. Ghaboussi: Technical Reports of Federal Railroad Administration, No. FRA OR&D 1584, 1975. 3) 伊藤, 竹山, 久武, 中村: 第16回土質工学研究発表会, 1981.

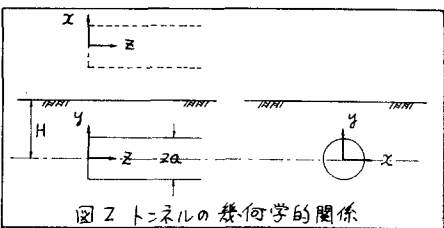


図2 トンネルの幾何学的関係

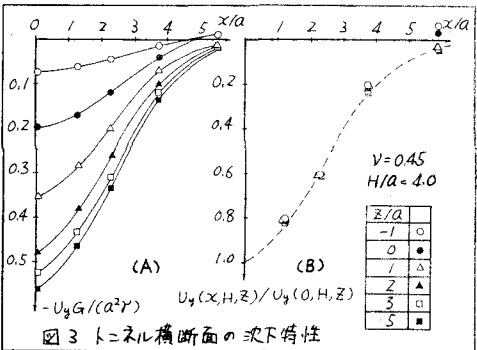


図3 トンネル横断面の次下特性

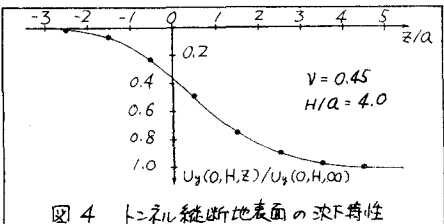


図4 トンネル縦断地表面の次下特性

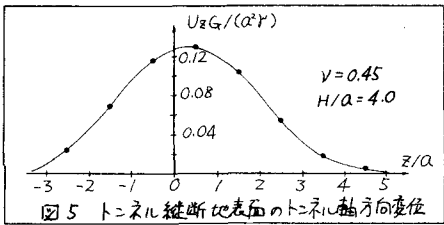


図5 トンネル縦断地表面のトンネル軸方向変位

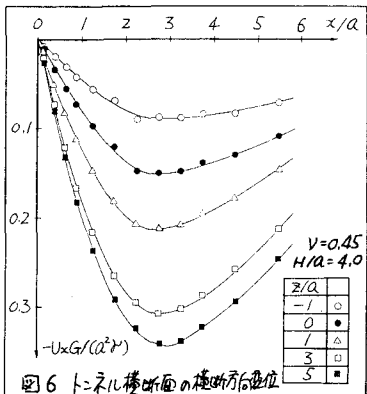


図6 トンネル横断面の横断方向変位