

大阪大学工学部 正員 伊藤 富雄
 同上 正員 〇久 武勝保
 大阪大学大学院 学生員 上田 博之

1 はじめに

本研究は、弾性及び粘弾性地山内のトンネル掘削による地表沈下について、境界要素法による三次元解析を行ない、地質特性、幾何学条件、及び施工条件が沈下に与える影響について考察を加えたものである。

2 境界要素法による三次元解析の概要

三次元弾性体の境界上の応力ベクトル t_j と変位ベクトル u_j の関係は、 N 個の境界要素(境界面上で一定であると仮定すれば、次式で表わされる^{1)~3)}。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2}u_j(x^m) + \sum_{i=1}^N \Delta T_{ij}(x^m, y') u_j(y') &= \sum_{i=1}^N \Delta U_{ij}(x^m, y') t_j(y'), (m=1 \sim N) \\ \Delta T_{ij}(x^m, y') &= \int_{\Delta S_i} T_{ij}(x^m, y) dS_y, \quad \Delta U_{ij}(x^m, y') = \int_{\Delta S_i} U_{ij}(x^m, y) dS_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 x, y は座標点、 ΔS_i は要素 i の面積であり、 T_{ij} 、 U_{ij} は応力、変位の Kelvin の基本特異解である。いま、図-1のごとく、弾性地山内に半径 a のトンネルを掘削した場合について、図-2(A)は切端からの離れによるトンネル横断沈下を式(1)により求めたものであり、図-2(B)は(A)の沈下曲線をそれぞれの曲線の最大値で無次元化して示したものである。ただし、 γ, ν, G は地山の単位重量、ポアソン比、せん断弾性定数であり、地山の初期応力は重力により生じるとする。これらより、切端の接近及び通過に伴ない、沈下の絶対量は増加するが、沈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。したがって、図-3に示すトンネル縦断沈下の無次元曲線 $f(x_3)$ を求めておけば、これと二次元平面変解析による沈下 $u_2^*(x_1, x_3)$ を用いて、三次元弾性地山での沈下 $u_2(x_1, x_3)$ は次式で求められる。

$$u_2(x_1, x_3) = u_2^*(x_1, x_3) f(x_3)$$

次に、粘弾性地山内にトンネルを速度 V で掘削すれば、沈下が観測され始める時間を基準($t_0=0$)にして、経時沈下は次式で求められる^{4),5)}。

$$u_2(x_1, t; t_0) = \int_0^{t_0} u_2^*(x_1, t; t_0 - \tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f(\tau - t_0) d\tau \quad (2)$$

ここに、トンネル縦断沈下の開始点から切端直上地表点までの距離を L とし、 $t_0=L/V$ 、 u_2^* は二次元粘弾性解析による沈下である。すなわち、三次元弾性解析によるトンネル縦断沈下の無次元曲線 $f(x_3)$ を求めておけば、これと二次元粘弾性解析による沈下 u_2^* により、切端の位置及び掘進速度を考慮した三次元粘弾性地山での経時沈下が上式で求められるわけである。

3 考察

式(1)、(2)により、弾性及び粘弾性地山の沈下を求め、考察を加える。図-4は、トンネルの深さ h が、トンネル軸方向地表面の弾性沈下に与える影響を示したもので、これらより、トンネル縦断沈下曲線の勾配はトンネルが浅い程大となり、また L は h の影響を顕著に受けることがわかる。そこで、 L と h の関係を示すと図-5のようになり、

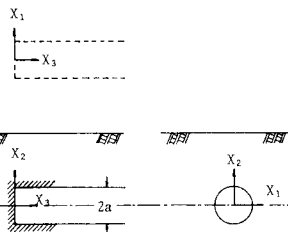


図-1 トンネルの幾何学関係

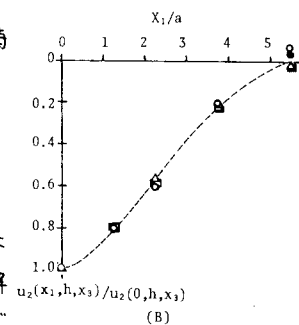
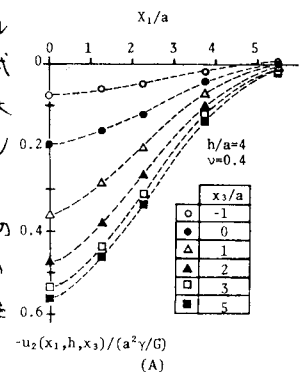


図-2 トンネル横断沈下

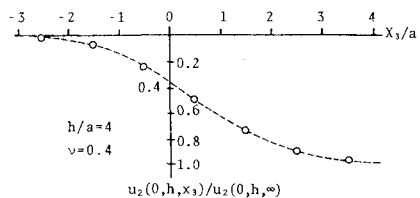


図-3 トンネル縦断沈下特性

これから、 L は大々ともに線形的に増大することがわかる。図-6 は、弾性沈下に及ぼすポアソン比の影響を示したものであり、 ν が小なる程トンネル縦断沈下曲線の勾配は大となり、また最大沈下量も大となる。さて、地山のせん断変形に関するクリップ関数 $\phi(t)$ は、多くの場合対数関数 $\phi(t) = \alpha + \beta \ln(1+t)$ 、($t: \text{日}$) で近似でき、また β/α の値は 0.2 から 3 の範囲にある

とが、 $\beta/\alpha = 1$ なる粘弾性地山内にトンネルを速度 V で掘削する場合について、トンネル縦断地表点の経時沈下を示したものが図-7 である。なお、図中の矢印は測点直下に切端が達したことを示している。これから、沈下開始後同一時刻における沈下量は、 V が大なる程大となり、また、これは初期の時間において著しい。しかし、切端が測点直下に達した時の沈下量と V の関係を示すと、図-8 のようになり、これから、 V が大なる程沈下は小になり、図-6(B) に示す弾性解析で得られる切端直上の沈下の値に収束することがわかる。したがって、沈下を少なくするには、早く掘って早くトンネル内面を拘束することが重要である⁹⁾ という現場の経験に本解析結果は一致する。

参考文献 1) Cruse, T. A.: *Int. J. Solids Structures*, Vol. 5, 1969. 2) Lachat, J. C. and J. O. Watson: *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, Vol. 10, 1976. 3) 伊藤・久武・上田: 土木学会関西支部年講, 1981. 4) 伊藤・竹山・久武・中村: 第16回土質工学研究発表会, 1981. 5) 伊藤・久武・竹山: 土木学会論文報告集, 投稿中. 6) Ito, T. and M. Hisatake: *Proc. 4th Int. Cong. on Rock Mech.*, Vol. 1, 1979. 7) 伊藤・久武: 土木学会論文報告集, 第307号, 1981. 8) Ito, T. and M. Hisatake: *Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, 1981. 9) 宮下: 鉄道技術研究報告, No. 768, 1971.

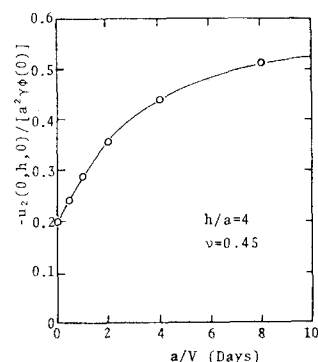


図-8 切端が測点直下に達した時の沈下量とトンネル掘進速度 V の関係

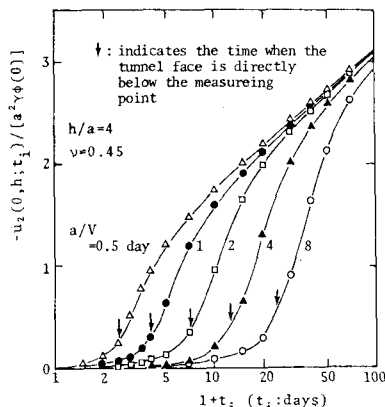


図-7 トンネル縦断地表点の経時沈下に及ぼすトンネル掘進速度 V の影響

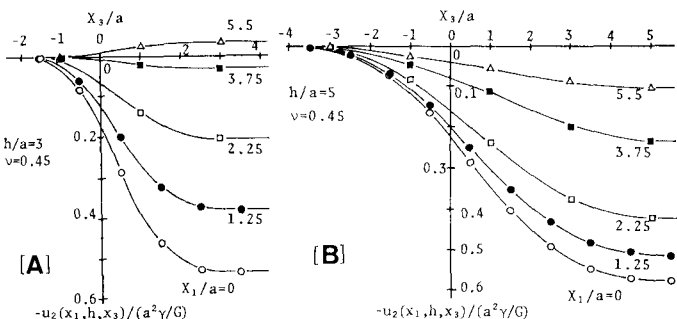


図-6 トンネル縦断方向地表面の沈下に及ぼすトンネルの深さの影響

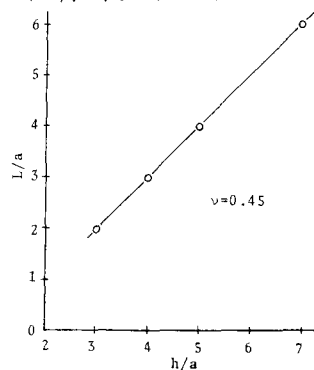


図-5 トンネル縦断沈下の開始点が切端直上地表点との距離 L と h の関係

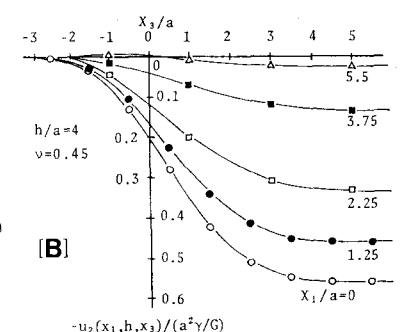
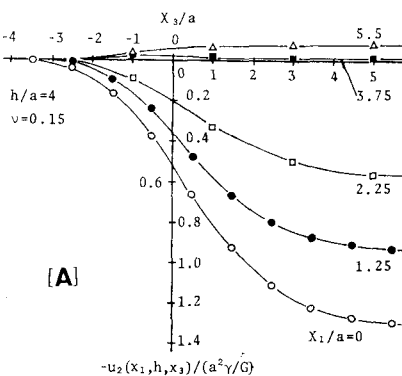


図-6 トンネル縦断方向地表面の沈下に及ぼすポアソン比の影響