

神戸大学工学部 正員 桜井春輔
 (株) 間 組 正員 蓮井昭則
 (株) 応用地質調査事務所 正員 近藤達敏

1. はしがき

トンネルの挙動は地山の初期地圧、力学特性のみならず、その施工過程によって大きく影響を受ける。したがって、トンネル解析においては、掘削手順、覆工の施工時期など施工過程を考慮しなければならない。これらを忠実に考慮するためには、トンネル切羽の3次元解析が必要となる。しかし、たとえ有限要素法を用いるとしても3次元問題の解析は容易ではない。そこで、3次元的な切羽進行の影響を考慮した2次元解析の手法が種々提案されている。^{1),2)} 一方、地盤材料については、最近の研究によってその力学的特性がかなり明らかにされ、その結果、解析においても、粘弾塑性モデルなどの複雑なモデルが用いられるようになってきた。しかし、モデルが複雑になると、それだけインプットデータの数が増加し、それらをすべて現場で正しく評価する事は容易ではない。さらに、初期地圧については、その推定は一層困難である。このような状況を考えると、複雑な力学モデルを用いても、そのまま解析結果の信頼性の向上に結びつかないことは明らかである。重要なことは力学定数を現場において正しく評価することである。逆に言えば、初期地圧、及び力学定数を正しく評価できれば、弾性モデルによってもトンネルの挙動をかなり正確に予測することができるであろう。ここでは地山を弾性体と仮定し、さらに著者の一人が先に提案した等価初期地圧¹⁾の概念を用いて3次元的な掘削の手順を考慮した有限要素解析法を提案する。なお、ここで提案する解析方法による計算機プログラムは STEP (Stress-strain Analysis of Tunnel Considering Face Progression) と名づけ、すでに実務に供している。

2. 切羽進行によって解放される初期地圧—掘削相当外力—

簡単のために、円形トンネルが静水圧状態の初期応力の作用している地山に掘削される場合を考える。切羽が進行するにつれてトンネル内壁の変位は増加する。すなわち、切羽の進行は力学的には、切羽によって支持されていた地山の初期地圧が徐々に解放される事を意味する。ここで、解放される初期地圧の経時的変化は内壁に生ずる変位に比例すると考える。概略を図-1に示す。いま、簡単のために切羽進行とともに発生する変位の経時的変化を指数関数で表わし得ると仮定すれば、解放される初期地圧は次のように表わされる。

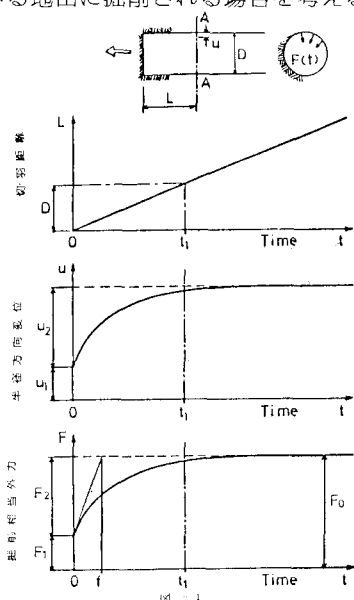
$$F(t) = F_1 + F_2 \{ 1 - \exp(-t/f) \} \quad \cdots (1)$$

ここで、 $F_1 = 0.3F_0$, $F_2 = 0.7F_0$ である。この $F(t)$ を掘削相当外力と呼ぶ。ただし、 F_0 は掘削前に地山に作用している初期地圧である。

3. 掘削手順を考慮した2次元解析

上に述べた掘削相当応力を用いることによって、3次元的な掘削手順を2次元解析に取り入れることが可能となる。ここで、ベンチ掘削を例に取り、その解析手法を説明する。

まず、次のような仮定を設ける。(1) ベンチ掘削の影響は互に独立であり、それぞれの影響を重ね合わせることができる。(2) 掘削断面が円形でない場合も面積が等しい等価円断面を考え、式(1)に示す掘削相当外力が存在する。(3) $t/f = 2L/D$ (L : 切羽からの距離, D : 等価円形断面の直径)。この仮定を考慮すれば、図-2に示す2段ベンチ掘削の場合、各ベンチの掘削相当外力 F_{ij} は次のように表わさ

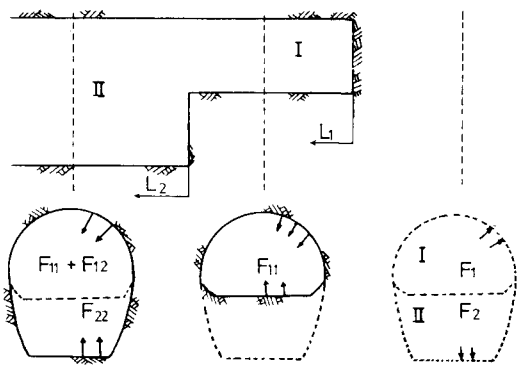


れる。

$$F_{ij} = F_i \left(\frac{A_i}{A} \right) \alpha_j \quad i, j=1, 2 \dots (2)$$

ここで、 $\alpha_j = 0.3 + 0.7 \{ 1 - \exp(-2L_j/D_j) \}$,
 F_i は全掘削相当外力、 A_i は掘削断面 i の面積、 A はトンネルの全断面積、 L_i は i 番目のベンチ掘削の切羽からの距離、 D_i は掘削断面の直径を表わす。

式 (2) に示す掘削相当外力を作用させる事によって、トンネルの任意断面の応力・ひずみ及び変位解析を2次元的に行うことができる。なお、覆工がある場合も計算ステップを増すことによって容易に解析に取り入れることができる。



4. 提案する解析方法の妥当性の検討

ここで提案する解析方法は多くの仮定の上に成り

立つものである。したがって、その適用性を検討しておかねばならない。ここではベンチ掘削を考慮した3次元の有限要素解析の結果と、ここで提案する2次元解析の結果を比較検討する。3次元解析にはBaudendistelの結果³⁾を用いる。図-3に解析モデルを示す。なお、弾性定数は $E = 10,000 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.3$, 初期地圧は鉛直 $\sigma_v = 50 \text{ kg/cm}^2$, 水平 $\sigma_H = \nu / (1 - \nu) \cdot \sigma_v = 21.4 \text{ kg/cm}^2$ 、掘削相当外力は生ずる地山の変位に比例すると考えているので、トンネル周辺に生ずる変位によって比較する。計算結果を図-4に示す。ここで、横軸はトンネル全断面と等価な円形断面の直径を D として切羽からの距離を表わしている。また、縦軸はベンチ掘削 I, II, III がすべて終了したときの最終変位に対する比を表わしている。なお、 R_I , S_I , B_I はベンチ I を掘削したときの、トンネル R, S, B 点の変位である。これらの図から、ここで提案する2次元解析は十分な精度で3次元的なベンチ掘削による影響を考慮し得ることがわかる。

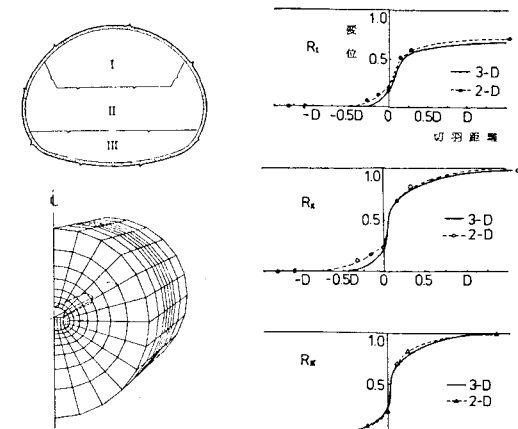


図-3

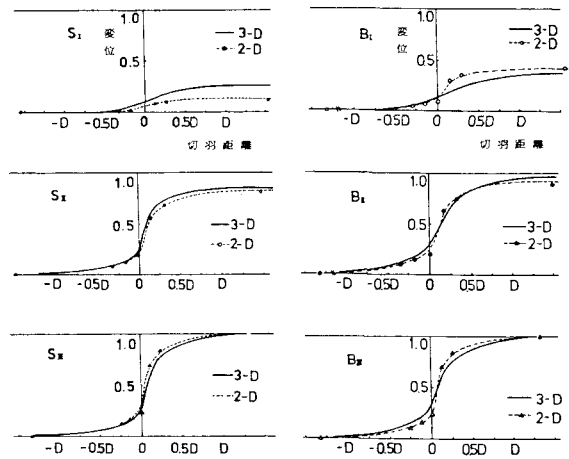


図-4

5. 解析例

紙面の都合で省略する。当日発表する。

参考文献

- 1) S. Sakurai : Approximate Time-Dependent Analysis of Tunnel Support Structure Considering Progress of Tunnel Face , Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. , Vol.2, 1978
- 2) 近藤達敏 : NATM工法における変位予測手法 , 応用地質調査事務所年報, No.1, 1978
- 3) M. Baudendistel : Zum Entwurf von Tunneln mit Grobem Ausbruchquerschnitt , Rock Mechanics, Suppl.8, 1979