

大成建設	正会員	泉 博 允
大成建設	正会員	木 村 洋 行
大成建設		平 野 逸 雄

1. まえがき NATM工法がトンネルの施工に用いられるようになり、一般のトンネルも含めて有限要素法を用いた解析が多く行なわれるようになってきた。本来、トンネルは3次元の要素を含んでおり、3次元解析が試みられるべきものであるが現時点では経済性や利用しやすさから2次元の問題としてとらえる場合が一般的である。この時、常に問題となるのが切羽の進行による構造的変化および地山の応力や時間に関する非線型性の影響をどのように2次元の解析に取り入れるかである。解析を2次元に簡易化する以上多くの問題点を残すがここでは切羽の進行依存度係数 β を用いたトンネルの解析について報告する。

2. 解析法 有限要素法を用いた2次元平面歪条件でのトンネルの解析を行なう場合に、主として次の点を考慮しなければならない。すなわち先進導坑や上半等の各切羽の進行状況と支保工、吹付コンクリートロックボルト、ライニング等の施工状況との関係であり、またこれらと解析対象断面(トンネル横断面)との相対位置関係および相対時間関係である。このような3次元的な施工の進行を2次元解析(解析対象断面)するにあたって、次の仮定を行った。

仮定-1 同一の構造が同一の施工パターンで解析対象断面に影響を及ぼす範囲内続くこと。

仮定-2 各切羽の掘削による解放力 $\{F\}_i$ はそれぞれの切羽が解析対象断面への影響範囲内に入っている時点での解析対象断面における地山の応力状態より算定する。

仮定-3 各計算段階(j)は各切羽の進行に従って設定しこの時の見かけ上の外力は解放力 $\{F\}_i$ と切羽の進行依存度係数 β の増分 $\Delta\beta_{ij}$ との積 $\Delta\beta_{ij}\{F\}_i$ とする。 $(\Delta\beta_{ij} < 1.0, \sum_{j=1}^n \Delta\beta_{ij} = 1.0)$

仮定-4 支保工、吹付コンクリート、ロックボルト等の剛性に関する施工の進行は解析対象断面への影響範囲内に入った時点から有効であるとする。(解析で取り扱う単位奥行当りの剛性がそのまま有効)しかしながら、解析対象断面に達する以前に施工された分の剛性に作用する応力は無視し、解析対象断面以降に施工された分の剛性に作用する応力のみが結果として有効であるとする。(自重やPS緊張力等の外力に関しては仮定-3に従うものとする。)

仮定-5 クリープ等による影響も重ね合せができるものとする。

一般の2次元解析ではある切羽の断面が瞬時に掘削されるために解放力 $\{F\}_i$ をすべて外力としているが、この解析では切羽の進行とともに徐々に解放するものと仮定しており、切羽の進行依存度係数 β の増分との積 $\Delta\beta_{ij}\{F\}_i$ を外力としている。この依存度係数 β は図-1に示すように、切羽が解析対象断面に接近した時の解析対象断面内での変位 δ_A δ_B ...と切羽が通り過ぎて最終的に収束したと見なせる変位 δ_{A0} δ_{B0} ...との比 $\delta_A/\delta_{A0} \div \delta_B/\delta_{B0} \div \dots$ としてとらえることができる。

β は地山の応力や時間に関する非線型性や切羽断面の大小や地山の初期応力の大小および支保関係等に大きく左右されるが定性的には図-2のような傾向を示すものである。種々の条件下における定量的な β の決定には実測値等との比較検討を必要とするが、前述の仮定と β を用いることにより比較的容易にトンネルの2次元解析が可能である。

3. 解析例 切羽の進行を考慮したトンネルの2次元解析例を図-3

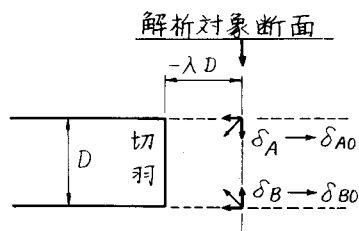


図-1 切羽の進行

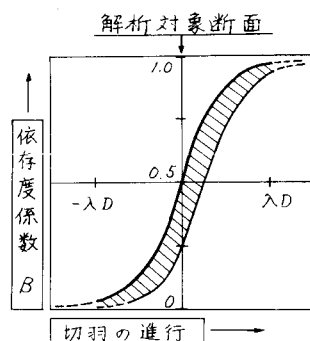


図-2 切羽の進行依存度係数 β

に示す。径が10mの円形断面で吹付けコンクリート（厚さ10cm）およびロックボルト（長さ5m、径25mm）を施工する。掘削は全断面で行なわれ、ロックボルトは1断面半径方向に32本、長手方向に2.5mピッチとし、2.5mの掘削および吹付、ロックボルトの1サイクルの施工は3日で終了するものと仮定した。図-4に2次元解析での解析領域を示す。解析にあたっては以下に示す非線形解析を行った。

応力-歪関係で用いるせん断弾性係数Gおよび体積弾性係数Kを応力の不変量 σ_m （等方応力）、 τ_{oct} （八面体せん断応力）で表示した。

$$G = \frac{\{1 - (\theta \cdot \tau_{oct})^{\frac{1}{n}}\}^2}{1 + (\frac{1}{n} - 1) (\theta \cdot \tau_{oct})^{\frac{1}{n}}} \cdot \frac{1}{a} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} &= G_0 = C_0 \cdot \sigma_m^{d_0} + e_0 \quad (\text{初期せん断弾性係数}) \\ \frac{1}{\theta} &= (1 - \sigma_m / \sigma_{m0})^{\frac{1}{i}} \tau_{oct0} \quad (\text{破壊規準}) \\ K &= C_1 \cdot \sigma_m^{d_1} + e_1 \quad (2) \end{aligned}$$

また、クリープに関しては次式によった。

$$\epsilon_{octc} = \frac{A}{1-m} (\exp(\alpha \cdot \tau_{oct}) - 1) \cdot (T)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

(1)(2)(3)式に用いた各定数を表-1に示す。図-5に解析で用いた切羽の進行依存度係数 β を示す。ここではクリープ特性と支保を無視した条件で3次元解析（軸対称）を行ない、図-1に示す δA ・ δA_0 より $\delta A / \delta A_0$ として β を決定した。（図-8参照）

4 解析結果 図-6に切羽の進行に伴う半径方向の変位を、図-7にロックボルトの軸力の分布を実線で示す。2次元の解析結果と比較検討するために、図-8に示す3次元解析（軸対称）を行ないこの結果も鎖線で図-6、図-7に示した。変位では2次元の解析が小さい値を示すが軸力では切羽がD～2Dと進んだ時点で逆転する結果を示している。両者の一致は β の取り方に依るが比較的良好な一致をみたことにより図-5の β の値はこの種の条件下では有効であると判断される。

5 あとがき 今後、導坑や上半等の切羽が複合する一般的な場合の実測値と解析値との比較検討を行ない、依存度係数 β の定量的な把握を行ないたいと考えている。

参考文献 1) 岩盤掘削解析の一試案、第14回土質工学研究発表会（1979）

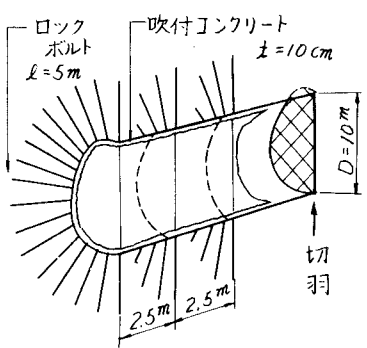


図-3 解析例

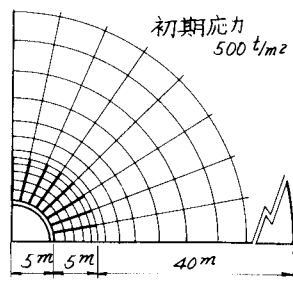


図-4 2次元解析

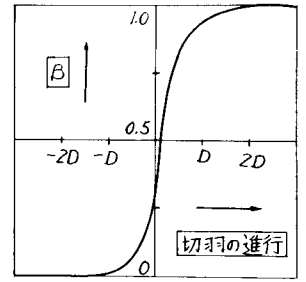


図-5 切羽の進行依存度係数 β

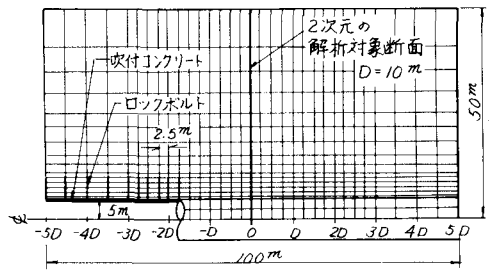


図-8 3次元解析（軸対称）

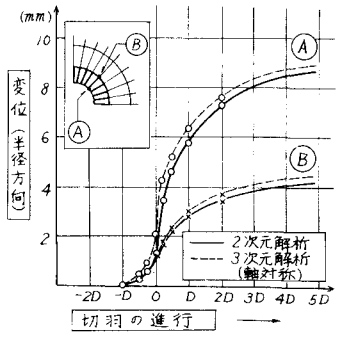


図-6 変位

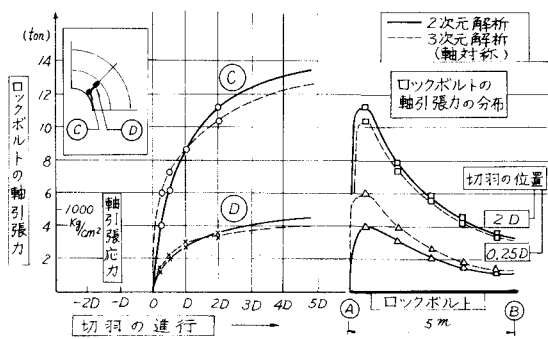


図-7 ロックボルトの軸力

初期せん断弾性係数 G_0	C_0	4.5
	d_0	1.6
	e_0	2.0×10^{-5}
破壊規準	τ_{oct0}	70.0
	σ_{m0}	12.0
	i	2
体積弾性係数K	C_1	7.47
	d_1	1.6
	e_1	3.3×10^{-5}
クリープ定数	A	8.0×10^{-5}
	m	0.70
	α	4.0×10^{-3}
補正係数	n	0.25

表-1 物性値（TM系単位）