

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

[1] はじめに

粘弾性地山中に構造物を構築する場合、それに作用する経時圧力や終局圧力の推定は構造物の安定性および、費用軽減上非常に重要である。最近になって Time Factor を考慮して円形トンネルはもちろん、楕円形や正方形トンネルに作用する終局圧力が求められ成果を挙げている。しかし、写像関数の求め得ない任意形状のトンネルあるいは平面歪の仮定の成立しない三次元的地下構造物（たとえば地下発電所など）に作用する土圧に対しては解が求められておらず、また現場においてはこのような状況がむしろ一般的であろう。このような土圧解析に対してトンネルや空洞の開削を初期応力の解放という力学的側面より取り扱うことにより、任意形状の地中構造物に作用する土圧を容易に求めることができる。

本報告ではその一般解法を示し、本解析結果と他の研究者による実験結果および写像関数を用いて求めた結果とを比較してこの解法を検証し、トンネル覆土に作用する土圧に対して重要な役割を演じる切端部の挙動を考慮することにより現場のソールドトンネルに作用する土圧を本解析法で求め、若干の考察を加えた。

[2] 解法の概要

Fig. (1) において空洞境界 Γ 上に任意応力が作用する場合、任意点 x に生ずる変位は次の様な積分方程式の形で表示できる。

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^t \int_{\Gamma} \Pi(x, \xi; t, \tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \varphi(\xi, \tau) d\xi dS_{\xi} \quad (1)$$

ここに u は変位ベクトルであり φ は密度、 Π は粘弾性に拡張した Green のテンソルである。ポアソン比の時間的変化の構造物に与える影響は小さいことより、今これを一定とすれば Π は変数分離の形となる。空洞の開削は初期応力の解放ということによって力学的に表現でき、空洞開削後 $t=0$ にて構造物を構築しその後の地山のの変位を拘束すれば密度 φ を未知量とする次式を得る。

$$\{\varphi(t_0+t_i) - \varphi(t_0)\} \left\{ \Pi(x, \xi) \varphi(\xi) dS_{\xi} - \int_{\Gamma} \Pi(x, \xi) \varphi(t_i - \tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \varphi(\xi, \tau) d\xi dS_{\xi} \right\} = 0 \quad (2)$$

ここに $\varphi(t)$ はクリープ関数であり、密度 φ は初期応力の関数で既知量である。式 (2) を解いて次式を得る。

$$\varphi(x, t_i) = \varphi(x) \cdot \varphi(t_i), \left[\varphi(t_i) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varphi(p) - \varphi(t_0)/p}{p} e^{pt_i} dp, \varphi^*(p) = \int_0^{\infty} \varphi(t) e^{pt} dt, \varphi(t_0) = \varphi(t_0+t_i) \right] \quad (3)$$

$$\text{これより容易に } \sigma_{kk}^0(x, t_i) = \sigma_{kk}^0(x) \cdot \varphi(t_i), \quad [\text{ここに } \sigma_{kk}^0(x) \text{ は解放する応力}] \quad (4)$$

が導かれる。上式の物理的意味は構造物に作用する応力が求めようとする所の初期応力とクリープ関数によって決定される構造物全体としての形状やポアソン比の影響を全く受けないことを示している。一般に地山の变形は $t \rightarrow \infty$ で一定値に収束することより $\varphi(t)$ やリウフゼーソンの関数 $R(t)$ は次の様な収束関数の和として表現出来

$$\varphi(t) = \beta + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n (1 - e^{-\alpha_n t}), \quad R(t) = \alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n (1 - e^{-\gamma_n t}) \quad (5)$$

式 (5) を式 (4) に代入することより、構造物に作用する経時応力次式の様に求まる。

$$\sigma_{kk}^0(x, t_i) = \sigma_{kk}^0(x) \cdot \left\{ \left(\alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \right) \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m (1 - e^{-\alpha_m t_i}) e^{-\alpha t_i} - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_n \alpha_m \beta_m e^{-\alpha t_i} (e^{-\alpha_m t_i} - e^{-\gamma_n t_i}) / (\gamma_n - \alpha_m) \right\} \quad (6)$$

ところで $\varphi(t)$ と $R(t)$ との間には $\varphi^*(p) R^*(p) = 1/p^2$ なる関係があることより $\varphi(t)$ あるいは $R(t)$ の一方が求まれば他方は上式をラプラス変換することより求めることができる。終局圧力は式 (6) に $t_i \rightarrow \infty$ とすることより

$$\sigma_{kk}^0(x, \infty) = \sigma_{kk}^0(x) R(\infty) \{\varphi(\infty) - \varphi(t_0)\} \quad (7)$$

と大変簡単な式となる。

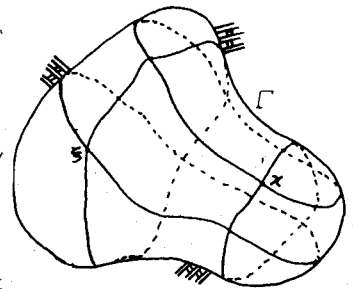
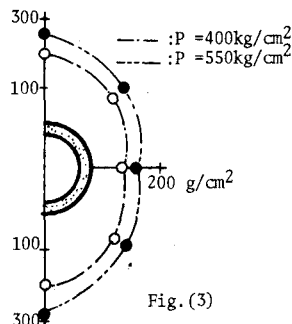
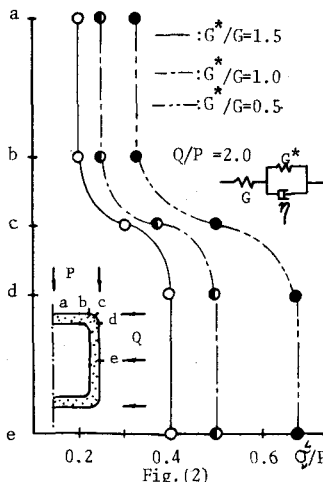


Fig. (1)

[3] 解の検証と考察

Fig. (2) は 3 要素モデルで地山挙動を仮定した場合、正方形ライニングに作用する終局応力を写真図教の利用によって求めた結果と本解析結果との比較を表わしたものである。また、Fig. (3) は村山が粘土を用いて行った円形ライニングに作用する圧力の模型実験において、壁面のマサツの影響を考慮した値と本解析結果との比較であり非常に良好の結果を示している。つまり本解析法を用いれば複雑な写真図教を用いなくても終局応力および終局応力は式



	direction of σ_1	direction of σ_2	direction of σ_3
x	64° 14'	32° 43'	71° 15'
y	119° 37'	94° 20'	30° 00'
z	41° 09'	122° 22'	67° 27'

(6) (7) より容易に導かれることがわかる。次

に一般的な例として、Fig. (4) (A) に示す直方体構造物を構築した場合の終局応力の一部を (B) に示してある。これより外力 σ_0 が充分遠方より作用してあれば直線壁に対しては一定の土圧が作用することがわかる。ところで以上の解析は空洞掘削後セメント境界全部に同時に構造物を構築する場合のものであるが、一般の施工過程を考慮すればこの条件は普通満足されない。このことから、シールドトンネルの土圧に対して言及すれば、トンネル切端のすぐ近くでライニングが施されるために切端部近くのトンネル挙動を考慮することなしに土圧論じることができない。そこで、トンネル進行に伴って得られる地表および地中の沈下曲線が Fig. (5) に示す様にほぼ同じ形態を示すことより、測定容易な地表沈下を測定しておればトンネル挙動がほぼ推定される。このことより、トンネル直径 D と初期直線沈下を終了した時の測点から切端までの距離 L との関係を示したものが Fig. (6) であり、これより切端より D から $5D$ の間の領域にて弾性的変位 U_e が終了し、少なくとも D 以下では U_e が完全には解放されしていないことがわかる。以上のことを考慮してシールドトンネルのライニングに作用した現場実測値と本解析結果とを比較して示したものが Fig. (7) である。トンネルの切端部近くでは上述の様に切端部における地山抵抗によって弾性的変位さえも完全には解放されおらず、この状態のもとでライニングが施されトンネル掘削が進むために地山変形を全く許容せずにライニングを施す場合の値(---)と弾性的変位のみが終了した後にライニングを施す場合の値(---)との中間の土圧値を示すこととなる。

参考文献 (1) Kupradze, V. D.; Potential Methods in the Theory of Elasticity, Jerusalem, 1965. (2) 梶井, 他; 西暦, 1974. (3) 村山, 他; 土木学会論文集, 168号, 1969. (4) 内藤, 他; 土と基礎, 10, 20 No. 1, 1972. (5) Peck, R. B.; 7-H I.C.S.M.F.E, 1969, (Mexico)

