

京都大学工学部 正員 足立 紀 尚

" " 〇 田 村 武

1. はじめに 図-1に示すように、一様な土被り圧と水圧を外力として受ける海底トンネルの掘削に際して、水抜き孔の開閉が周辺の変形挙動にいかなる影響を及ぼすか簡単な軸対称平面歪みモデルにより解析を行った。その結果、排水量、粘着力および内部まざつ角等の関連性が定性的に明らかになった。

2. 解析方法 つぎのような仮定群を設ける。(図-2参照)①注入域をも含め領域全体は有効応力に対して同一の力学定数をもつ弾塑性体とする。②塑性域は注入域の内部にある。 $(p \leq p_g)$ ③塑性条件は図-3に示すMohr-Coulomb式を用いる。歪み硬化は考えないが別に塑性ポテンシャル $q=0$ を設けておく。④間けき水は岩盤の変形とは無関係に独立にDarcyの法則に従って流れるとするが、透水係数は地山で k 、注入域で k_g そして塑性域で k_p とそれぞれ異なるものとする。⑤境界条件としては内圧 $P'(a)$ 、外圧 $P'(b)$ 、内周、外周における間けき水圧を $U(a)=0$ 、 $U(b)$ と指定する。それに内部での付加条件として水抜孔($r=p_g$)により定常流量 Q に対して $m_d Q$ だけが排水されるものとする。ただし $0 \leq m_d \leq 1$ 。 $m_d=1$ は完全排水、 $m_d=0$ は全く排水しない場合に相当する。

上の仮定のもとに各領域ごとの間けき水圧分布 $U(r)$ 、変形条件、つりあい式そして塑性条件を考慮すると以下のうにして最終的に塑性半径 p_p のみを未知数とする代数方程式が誘導される。

(i)間けき水圧分布 Darcyの法則 $U_r = -\frac{k}{w} \frac{dU}{dr}$ (U_r : 半径方向の流速, w : 水の単位体積重量) 連続の式 $-Q = 2\pi r U_r$, $r=a, b$ での境界条件, 各領域での透水係数, 排水率 m_d を用いて積分すると未知数である塑性半径 p_p を含んだまま外側から順につぎのようになる。

$$U_1(r) = g \left[\ln r / p_d + (1-m_d) \ln p_g / p_g + n_g (1-m_d) \ln p_g / p_p + n_p (1-m_d) \ln p_g / a \right]$$

$$U_2(r) = (1-m_d) g \left[\ln r / p_g + n_g \ln p_g / p_p + n_p \ln p_p / a \right]$$

$$U_3(r) = (1-m_d) g \left[n_g \ln r / p_p + n_p \ln p_p / a \right]$$

$$U_4(r) = (1-m_d) g n_p \ln r / a$$

ただし, $n_g = k/k_g$, $n_p = k/k_p$ であり,

$$g = \frac{\omega Q}{2\pi k} = U(b) / \left[\ln b / p_d + (1-m_d) \ln p_d / p_g + n_g (1-m_d) \ln p_g / p_p + n_p (1-m_d) \ln p_p / a \right]$$

なる関係がある。

(ii)塑性半径 つりあい方程式 $\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0$

適合条件式 $\frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_\theta) = \varepsilon_r$ ・降伏条件・塑性ポテンシャルを考慮してつぎのような塑性半径 p_p に関する代数方程式を得る。

$$\frac{G+3K}{4G+3K} \left[C_1 - U_3(p_p) \right] + 3G \left[\frac{C_2}{p_p^2} - \frac{p_g}{2(4G+3K)} \right] - D_1 p_p \frac{2S \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} - \frac{1 - \sin \phi'}{2S \sin \phi'} \left(p_g^2 - \frac{2C \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) = 0$$

ここに K, G はそれぞれ体積、せん断弾性定数であり

$$D_1 = \left[P'(a) - \frac{1 - \sin \phi'}{2S \sin \phi'} \left(p_g^2 - \frac{2C \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \right] a \frac{2S \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$$

$$C_1 = U_1(b) + \frac{4G+3K}{G+3K} \left\{ P'(b) - 3G \left[\frac{C_1}{b^2} - \frac{p_g}{2(4G+3K)} \right] \right\}$$

$$C_2 = -\frac{p_g^2 b^2}{3G(b^2 - p_p^2 \sin \phi')} \left\{ C \cos \phi' + P'(b) \sin \phi' + \frac{G+3K}{4G+3K} [U_1(b) - U_3(p_p)] \sin \phi' \right. \\ \left. + 3G \left[\frac{p_g \sin \phi' - p_g^2}{2(4G+3K)} - 3G \frac{a}{p_p^2} \right] \right\} - \alpha$$

$$\alpha = (p_1 - p_2)/p_g^2 + (p_2 - p_g)/p_g^2, \quad p_i = \frac{\omega Q_i}{2\pi k_i} \quad (i=1 \sim 4) \text{ 等である。}$$

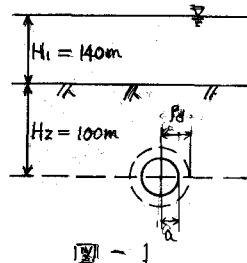


図-1

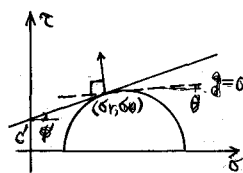
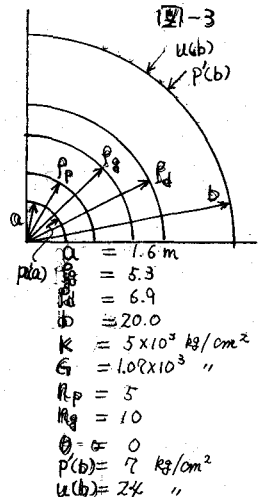


図-2



(iii) 応力と変位 このようにして求めた塑性半径を用いて各領域での応力、変位が計算される。代表的に塑性域における半径方向の変位を記すと

$$u_r(r) = A_1 r^{-\left(\frac{1+\sin\theta}{1-\sin\theta}\right)} + \frac{MD_1}{\frac{1+\sin\theta}{1-\sin\theta} + \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}} r^{\left(\frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right)} + \frac{1-\sin\theta}{2} \left\{ \frac{M(1-\sin\phi')}{2\sin\phi'} \left(\frac{1}{2} - \frac{2C'\cos\phi'}{1-\sin\phi'} \right) + N \right\} r$$

ここに

$$M = \frac{3G + (3K+G)\sin\phi'}{G(3K+G)(1-\sin\theta)(1-\sin\phi')} - \frac{\sin\phi'}{G(1-\sin\phi')} \quad N = \frac{(3K+4G)C'\cos\phi'}{G(3K+G)(1-\sin\theta)(1-\sin\phi')} - \frac{C'\cos\phi'}{G(1-\sin\phi')}$$

$$A_1 = \frac{p_p}{p_p} \left\{ \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'} \right\} \left\{ \frac{3}{2} \left[\frac{0 - u_3(p_p)}{4G+3K} - \frac{C_3}{p_p^2} + \frac{g_3}{2(4G+3K)} \right] p_p - \frac{1-\sin\theta}{2} \left[\frac{M(1-\sin\phi')}{2\sin\phi'} \left(\frac{1}{2} - \frac{2C'\cos\phi'}{1-\sin\phi'} \right) + N \right] \frac{p_p}{p_p} \right. \\ \left. - \frac{MD_1}{\frac{1+\sin\theta}{1-\sin\theta} + \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}} \frac{1+\sin\phi'}{p_p(1-\sin\phi')} \right\}$$

とする。

3. 解析例と考察 実際の計算例では図-2に記された数値を用いた。ただし、内圧 $\dot{p}(a)$ はライニングの前後に対してそれぞれ 0, 2, 1.0 kg/cm² を想定した。図-4には粘着力 C' 、内部まさつ角 ϕ' をパラメーターにとつた場合、排水率 m_d に対する塑性半径 p_p の変化の様子が示されている。なお、実線、破線は前述したライニングの前後に対応している。もちろん $m_d \rightarrow 1$ につれて p_p は減少するが $m_d = 1$ の付近でその変化率が大きくなる。すなわち、水抜孔閉そくの付近よりも完全排水付近の状態の方が敏感である。一点鎖線は塑性半径が注入域を超えて発達することを表わすが計算の仮定に入らないので考えない。内部まさつ角が大きい程、塑性域は小さくなることも当然であるが、これに対しては m_d の小さい部分の方が顕著に示される。図-5には半径方向にそつて種々の量の分布が描かれているが、ここで $u_{r0}(r)$ は掘削以前にすでに地山に発生していた初期の半径方向の変位成分であり、 $u_r(r) - u_{r0}(r)$ が同じ m_d に対する掘削のための変位を表わす。応力 σ_θ は弾、塑性境界付近で、 σ_r は地山部分で最大になっている。間引き圧分布 $u(r)$ は注入域での透水係数の小さいことを反映して勾配の異なる2本の線に分けられるが、注入域での係数の決定は重要な問題であろう。図-6は m_d に対してトンネル半径の変化を示したものである。同様に実線は $\dot{p}(a) = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ 、破線は $\dot{p}(a) = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ に対応している。もし、施工に際し掘削直後では水抜き孔を用いてなるべく排水をし、ライニング完了とともに完全に排水を止めたとすると、同じ粘着力 C' に対応する m_d の大きい実線上の点 (A_1, A_2 あるいは A_3) より破線上の $m_d = 0$ の点 (A'_1, A'_2 あるいは A'_3) へ移行することになる。このとき実際の測定では数mm程度の半径の収縮が起つてはいるはずである。これを別の見方をして各 C' に対応してどのように移行をしたかを書き直したのが図-7である。ここでは同時に内部まさつ角 $\phi' = 25^\circ, 35^\circ$ についても示されている。トンネル半径の収縮が実測されたならば、逆におのずと C' および ϕ' の許容範囲も限定されてくるであろう。なお、これらの図で一点鎖線は $m_d = 0.8$ 、 $\dot{p}(a) = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ に対応するものであり、完全な排水ができない場合には、これと実線の間中に位置するものと思われる。

