

文章编号: 1000-4750(2009)02-0216-06

海底圆形隧道在渗流场影响下的弹塑性解

*吕晓聪¹, 许金余^{1,2}

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西, 西安 710038; 2. 西北工业大学力学与建筑工程系, 陕西, 西安 710072)

摘 要: 海底隧道不同于陆地上的一般山岭隧道, 很高的孔隙水压力会降低隧道围岩的有效应力, 造成较低的成拱作用和地层的稳定性。将具有衬砌的海底圆形隧道的各影响因素简化为轴对称, 并把渗流场以渗流体积力方式作用于应力场, 计算得到了弹塑性界面分别位于衬砌内部和岩体内部两种情况下, 海底圆形隧道在渗流场影响下的弹塑性位移和应力解析表达式。通过实例计算, 分析了渗流场作用下, 海水深度和覆岩厚度对隧道应力场的影响规律。径向应力和切向应力均在弹塑性界面处达到最大值, 且切向应力在衬砌与岩体的接触面以及弹塑性界面处均会出现跳跃。无论弹塑性界面位于岩体内还是衬砌内, 海水深度的变化对衬砌与岩体接触界面上的法向接触压力影响很小。当隧道结构和覆岩厚度一定, 弹塑性界面位于衬砌内部时, 海水深度的变化对塑性区的扩展以及弹塑性界面上法向接触压力的变化影响不大, 而当塑性区扩展到岩体内部时, 塑性区半径以及弹塑性界面上法向接触压力与海水深度的增加大致呈线性关系, 增长较快。

关键词: 海底隧道; 弹塑性解; 渗流场; 海水深度; 覆岩厚度

中图分类号: O357.3; U45 **文献标识码:** A

ELASTIC-PLASTIC SOLUTION FOR SUBSEA CIRCULAR TUNNEL UNDER THE INFLUENCE OF SEEPAGE FIELD

*LU Xiao-cong¹, XU Jin-yu^{1,2}

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China;

2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: Subsea tunnels are different from the overground mountain tunnels. Due to the high seepage pressure, the effective stress of wall rocks would be reduced, which results in lower stratum stability. In this paper, the subsea circular tunnel with liner is simplified as axially symmetrical and the effect of seepage field is simplified as seepage volume force acting on the stress fields. Elastic-plastic analytical solutions of stress and displacement are obtained respectively for two cases: the elastic-plastic interface locates in the liner or in the surrounding rock. Based on the results of a practical example, the effects of sea depth and rock cover thickness on the stress fields are analyzed with the consideration of seepage fields. Some conclusions are as follows: 1) The maximum radial stress and tangent stress occur at the elastic-plastic interface. 2) No matter the elastic-plastic interface locates in the liner or in the rock, sea depth variations have little influence on the normal contact pressure at the liner-rock interface. 3) For a tunnel structure with determinate rock cover thickness, if the elastic-plastic interface locates in the liner, sea depth variations have little influence on the radius of the plastic region and on the normal contact pressure at the elastic-plastic interface. But, if the plastic region expands into the rock, the plastic region expands linearly and the radial stress at the elastic-plastic interface increases linearly as the sea depth increases.

Key words: subsea tunnel; elastic-plastic solution; seepage field; sea depth; rock cover thickness

收稿日期: 2007-09-22; 修改日期: 2008-02-07

作者简介: *吕晓聪(1982—), 男, 山西人, 博士生, 从事结构工程和防护工程研究(E-mail: nuc6140@yeah.net);

许金余(1963—), 男, 吉林人, 教授, 博士后, 博导, 从事结构工程和防护工程研究(E-mail: jinyuxu@263.net).

海底隧道位于相对稳定的海平面下, 隧道围岩和衬砌受到渗流场的影响, 孔隙水压力会从根本上改变隧道周围的应力场和应变场, 使岩体的残余粘聚力减小。渗流场的作用不仅会明显影响围岩与衬砌的应力状态和收敛值, 而且还使塑性区进一步扩展^[1-2]。现有的隧道围岩应力解析解均是在不考虑渗流场作用的情况下得出的^[3-4], 并不适用于海底隧道的特点。文献[5]分析了岩体的渗流特性及渗流模型, 结合 Louis 公式和达西定律, 运用对数型公式分析了裂隙渗流—变形的耦合作用。文献[6]考虑了渗流场对隧道的影响, 但是没有考虑衬砌, 而且是针对一般的隧洞。文献[7]运用有限元法对裂隙岩体应力渗流耦合模型在压力隧洞工程中的应用进行了研究。文献[8-10]对海底隧道的衬砌结构选型以及围岩抗力系数计算方法进行了研究。然而, 海底隧道在渗流场作用下的应力、位移解析解的研究还未见报导。本文针对具有衬砌的海底圆形隧道在渗流场作用下的解析解进行研究, 并分析了海水深度和覆岩厚度对隧道应力场的影响规律。

1 渗流场计算

设一海底圆形隧道, 隧道内半径 r_1 , 衬砌外半径 r_2 , 海水深度 h_0 , 覆岩厚度 t , 地应力 P_0 , 隧道内压力 P_1 , 塑性区半径 r_p 。衬砌弹性模量 E_1 , 泊松比 μ_1 , 粘聚力 c_1 , 摩擦角 ϕ_1 ; 岩体弹性模量 E_2 , 泊松比 μ_2 , 粘聚力 c_2 , 摩擦角 ϕ_2 ; 衬砌和岩体的渗透水压力作用面积系数分别为 α 和 β 。计算模型如图 1 所示。

假定材料的渗透系数在各个方向相同, 且渗流方向主要以径向为主, 则渗透体积力中浮力部分占的比重较小, 为研究渗流场的影响机理, 其影响可暂不考虑, 此时, 该问题可简化为轴对称恒定渗流问题, 衬砌后形成的稳定渗流场满足二阶常微分方程^[11], 即:

$$\frac{d^2 p_w}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dp_w}{dr} = 0 \quad (1)$$

假定半径 r_0 以外, 形成的稳定渗流水压力与原始渗流场水压力 p_s 相同, 则得海底隧道渗流场外水压力分布规律为:

$$p_w = \begin{cases} p_s \frac{k_d \ln \frac{r}{r_1}}{k_c \ln \frac{r_0}{r_2} + k_d \ln \frac{r_2}{r_1}} & (r_2 \geq r \geq r_1) \\ p_s \frac{k_c \ln \frac{r}{r_2} + k_d \ln \frac{r_2}{r_1}}{k_c \ln \frac{r_0}{r_2} + k_d \ln \frac{r_2}{r_1}} & (r_0 \geq r \geq r_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_c 为衬砌混凝土渗透系数; k_d 为含水围岩渗透系数; r_0 为保持渗流场稳定外水压力 p_s 的围岩半径, $p_s = \rho g h_0$, ρ 为水的密度, g 为重力加速度。

假定海底隧道的衬砌和周围岩体是均质体, 忽略单元的自重; 由于所考虑的渗流以径向为主, 故忽略渗透体积力的浮力效应, 近似按轴对称平面应变问题进行研究^[6], 则考虑渗透体积力的微单元力平衡微分方程为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{dp_w}{dr} = 0 \quad (3)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 分别为径向和切向有效应力, 拉应力为正, 压应力为负。文中应力均指有效应力, 正负号规定相同, 后面不再重复说明。

2 弹塑性界面位于衬砌内($r_2 \geq r_p > r_1$)

弹塑性界面位于衬砌内的示意图如图 1 所示。

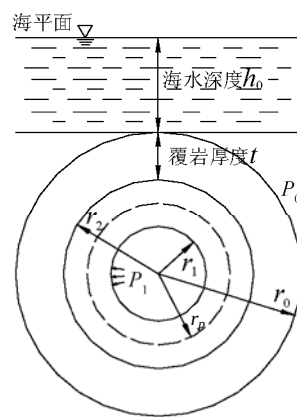


图 1 弹塑性界面位于衬砌内

Fig.1 Interface of elastic and plastic region in liner

2.1 衬砌塑性区($r_p \geq r \geq r_1$)

当考虑渗透体积力时, 将渗流场外水压力分布规律的计算式(2)代入公式(3)可以得到衬砌塑性区微单元的力平衡微分方程为^[12]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + K_1 \cdot \frac{1}{r} = 0 \quad (4)$$

式中: $K_1 = -\frac{\alpha k_d p_s}{k_c \ln \frac{r_0}{r_2} + k_d \ln \frac{r_2}{r_1}}$ 。

塑性区内的应力还须满足屈服条件, 若假设屈服条件满足 Mohr-Coulomb 准则, 并以主应力表示, $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$, 则屈服条件成为:

$$(1 + \sin \phi_1) \sigma_r - (1 - \sin \phi_1) \sigma_\theta = 2c_1 \cos \phi_1 \quad (5)$$

将方程(5)代入(4)中得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_r}{r} \frac{2 \sin \phi_1}{1 - \sin \phi_1} + \frac{2c_1 \cos \phi_1}{r(1 - \sin \phi_1)} + \frac{K_1}{r} = 0 \quad (6)$$

由微分方程(6)可解得屈服区应力为:

$$\sigma_r = B + Ar^{\frac{2 \sin \phi_1}{1 - \sin \phi_1}}$$

其中 A 为积分常数, $B = \frac{1 - \sin \phi_1}{2 \sin \phi_1} \cdot K_1 + c_1 \cot \phi_1$ 。

将边界条件 $(\sigma_r)_{r=r_1} = -P_1$ 代入上式, 求解得到塑性区径向应力 σ_{r1} 和切向应力 $\sigma_{\theta 1}$ 的计算公式:

$$\sigma_{r1} = B - (P_1 + B) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \phi_1}{1 - \sin \phi_1}} \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{1 + \sin \phi_1}{1 - \sin \phi_1} \left[B - (P_1 + B) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \phi_1}{1 - \sin \phi_1}} \right] - \frac{2c_1 \cos \phi_1}{1 - \sin \phi_1} \quad (8)$$

2.2 衬砌弹性区($r_2 \geq r \geq r_p$)

衬砌弹性区微单元的力平衡微分方程同式(4); 边界条件为 $(\sigma_r)_{r=r_p} = -P_{rp}$, $(\sigma_r)_{r=r_2} = -P_2$, P_{rp} 和 P_2 分别为弹塑性界面上和衬砌与岩体接触界面上的法向接触压力。

按平面应变问题求解平衡微分方程可得到位移和应力的计算公式为:

$$u_{r2} = C_1 r + C_2 \frac{1}{r} - \frac{1}{2} M_1 K_1 r \ln r \quad (9)$$

$$\sigma_{r2} = \frac{1}{(1 - \mu_1) M_1} \left[C_1 + (2\mu_1 - 1) C_2 \frac{1}{r^2} - \frac{M_1 K_1}{2} \ln r - (1 - \mu_1) \frac{M_1 K_1}{2} \right] \quad (10)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{1}{(1 - \mu_1) M_1} \left[C_1 + (1 - 2\mu_1) C_2 \frac{1}{r^2} - \frac{M_1 K_1}{2} \ln r - \mu_1 \frac{M_1 K_1}{2} \right] \quad (11)$$

式中:

$$C_1 = \frac{1}{r_p^2 - r_2^2} \left[M_1 (1 - \mu_1) (P_2 r_2^2 - P_{rp} r_p^2) + \frac{M_1 K_1}{2} (r_p^2 \ln r_p - r_2^2 \ln r_2) + (1 - \mu_1) \frac{M_1 K_1}{2} (r_p^2 - r_2^2) \right],$$

$$C_2 = \frac{M_1 (1 - \mu_1) (P_2 - P_{rp}) + \frac{M_1 K_1}{2} \ln \left(\frac{r_p}{r_2} \right)}{(2\mu_1 - 1) \left(\frac{1}{r_p^2} - \frac{1}{r_2^2} \right)},$$

$$M_1 = \frac{(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)}{E_1 (1 - \mu_1)}.$$

2.3 岩体弹性区($r_0 \geq r \geq r_2$)

将渗流场外水压力分布规律的计算式(2)代入公式(3)也可以得到考虑渗透体积力时, 岩体微单元的力平衡微分方程为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + K_2 \cdot \frac{1}{r} = 0 \quad (12)$$

式中: $K_2 = -\frac{\beta k_c p_s}{k_c \ln \frac{r_0}{r_2} + k_d \ln \frac{r_2}{r_1}}$ 。

边界条件为 $(\sigma_r)_{r=r_2} = -P_2$, $(\sigma_r)_{r=r_0} = -P_0$ 。

同样地, 按平面应变问题求解平衡微分方程可得到位移和应力的计算公式为:

$$u_{r3} = D_1 r + D_2 \frac{1}{r} - \frac{1}{2} M_2 K_2 r \ln r \quad (13)$$

$$\sigma_{r3} = \frac{1}{(1 - \mu_2) M_2} \left[D_1 + (2\mu_2 - 1) D_2 \frac{1}{r^2} - \frac{M_2 K_2}{2} \ln r - (1 - \mu_2) \frac{M_2 K_2}{2} \right] \quad (14)$$

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{1}{(1 - \mu_2) M_2} \left[D_1 + (1 - 2\mu_2) D_2 \frac{1}{r^2} - \frac{M_2 K_2}{2} \ln r - \mu_2 \frac{M_2 K_2}{2} \right] \quad (15)$$

式中:

$$D_1 = \frac{1}{r_2^2 - r_0^2} \left[M_2 (1 - \mu_2) (P_0 r_0^2 - P_2 r_2^2) + \frac{M_2 K_2}{2} (r_2^2 \ln r_2 - r_0^2 \ln r_0) + (1 - \mu_2) \frac{M_2 K_2}{2} (r_2^2 - r_0^2) \right],$$

$$D_2 = \frac{M_2(1-\mu_2)(P_0-P_2) + \frac{M_2 K_2}{2} \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right)}{(2\mu_2-1)\left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_0^2}\right)},$$

$$M_2 = \frac{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)}{E_2(1-\mu_2)}.$$

2.4 弹塑性解的确定

1) 在衬砌弹性区范围内:

$$\sigma_{r_2} + \sigma_{\theta_2} = \frac{2C_1 - M_1 K_1 \ln r - M_1 K_1 / 2}{M_1(1-\mu_1)};$$

又因为 σ_{r_2} 和 σ_{θ_2} 在弹塑性界面处满足屈服条件: $(1+\sin\phi_1)\sigma_{r_2} - (1-\sin\phi_1)\sigma_{\theta_2} = 2c_1 \cos\phi_1$;

由上面两式消去 σ_{θ_3} 后, 得到:

$$-P_{rp} = (\sigma_{r_2})_{r=r_p} = c_1 \cos\phi_1 + \frac{1-\sin\phi_1}{2} \frac{2C_1 - M_1 K_1 \ln r_p - M_1 K_1 / 2}{M_1(1-\mu_1)};$$

2) 在弹塑性界面上, 径向应力满足:

$$(\sigma_{r_1})_{r=r_p} = -P_{rp} = B - (P_1 + B) \left(\frac{r_p}{r_1}\right)^{\frac{2\sin\phi_1}{1-\sin\phi_1}};$$

3) 在岩体与衬砌的接触面处($r=r_2$):

$$(u_{r_2})_{r=r_2} = (u_{r_3})_{r=r_2};$$

联立上述三组方程可确定 r_p , P_{rp} 和 P_2 。

3 弹塑性界面位于岩体内部($r_p \geq r_2$)

弹塑性界面位于岩体内的示意图如图 2 所示。

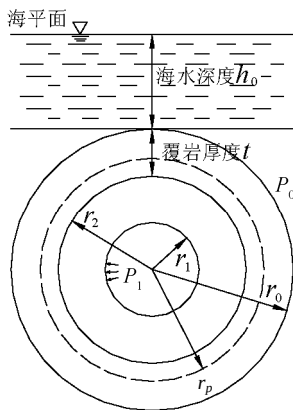


图 2 弹塑性界面位于岩体内

Fig.2 Interface of elastic and plastic region in rock

3.1 衬砌塑性区($r_2 \geq r \geq r_1$)

衬砌塑性区微单元的力平衡微分方程和屈服条件与式(4)和式(5)相同。该区内的径向应力和切向应力计算公式与式(7)和式(8)相同。

3.2 岩体塑性区($r_p \geq r \geq r_2$)

岩体塑性区微单元的力平衡微分方程与式(12)相同。边界条件为 $(\sigma_{r_2})_{r=r_2} = -P_2$, 由此可得到应力的计算公式:

$$\sigma_{r_2} = B' - (P_2 + B') \left(\frac{r}{r_2}\right)^{\frac{2\sin\phi_2}{1-\sin\phi_2}} \quad (16)$$

$$\sigma_{\theta_2} = \frac{1+\sin\phi_2}{1-\sin\phi_2} \left[B' - (P_2 + B') \left(\frac{r}{r_2}\right)^{\frac{2\sin\phi_2}{1-\sin\phi_2}} \right] - \frac{2c_2 \cos\phi_2}{1-\sin\phi_2} \quad (17)$$

式中: $B' = \frac{1-\sin\phi_2}{2\sin\phi_2} \cdot K_2 + c_2 \cot\phi_2$ 。

3.3 岩体弹性区($r_0 \geq r \geq r_p$)

岩体弹性区微单元的力平衡微分方程与式(12)相同。边界条件 $(\sigma_{r_3})_{r=r_p} = -P_{rp}$, $(\sigma_{r_3})_{r=r_0} = -P_0$; 按平面应变问题求解平衡微分方程得到的位移和应力计算公式与式(13)一式(15)形式相同, 只需把式(13)一式(15)中的 r_2 和 P_2 分别用 r_p 和 P_{rp} 替代即可。

3.4 弹塑性解的确定

1) 在岩体弹性区范围内:

$$\sigma_{r_3} + \sigma_{\theta_3} = \frac{2D_1 - M_2 K_2 \ln r - M_2 K_2 / 2}{M_2(1-\mu_2)};$$

又因为 σ_{r_3} 和 σ_{θ_3} 在弹塑性界面处满足屈服条件: $(1+\sin\phi_2)\sigma_{r_3} - (1-\sin\phi_2)\sigma_{\theta_3} = 2c_2 \cos\phi_2$;

由上面两式消去 σ_{θ_3} 后, 得到:

$$(\sigma_{r_3})_{r=r_p} = -P_{rp} = c_2 \cos\phi_2 + \frac{1-\sin\phi_2}{2} \frac{2D_1 - M_2 K_2 \ln r_p - M_2 K_2 / 2}{M_2(1-\mu_2)};$$

2) 衬砌与岩体接触面处的径向应力:

$$(\sigma_{r_1})_{r=r_2} = -P_2 = B - (P_1 + B) \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\frac{2\sin\phi_1}{1-\sin\phi_1}};$$

3) 在弹塑性界面上, 径向应力满足:

$$(\sigma_{r_2})_{r=r_p} = -P_{rp} = B' - (P_2 + B') \left(\frac{r_p}{r_2}\right)^{\frac{2\sin\phi_2}{1-\sin\phi_2}};$$

联立上述三组方程可确定 r_p , P_{rp} 和 P_2 。

4 算例

为了进一步了解渗流场对海底隧道的影响规律, 下面通过实例的具体计算来说明。

某一海底圆形隧道, 隧道内半径 $r_1 = 4 \text{ m}$, 衬砌外半径 $r_2 = 5 \text{ m}$, 地应力 $P_0 = 10 \text{ MPa}$, 隧道内压力 $P_1 = 0 \text{ MPa}$ 。

衬砌材料参数: $E_1 = 2 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\mu_1 = 0.167$, $c_1 = 5 \text{ MPa}$, $\phi_1 = 45^\circ$, $\alpha = 1$, $k_c = 1.5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$;

岩体材料参数: $E_2 = 2 \times 10^3 \text{ MPa}$, $\mu_2 = 0.25$, $c_2 = 1 \text{ MPa}$, $\phi_2 = 45^\circ$, $\beta = 1$, $k_d = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$;

图 3 和图 4 是海水深度 $h_0 = 50 \text{ m}$, 覆岩厚度 $t = 40 \text{ m}$ 时, 考虑渗流场和不考虑渗流影响时的弹塑性解的比较。不考虑渗流场影响的塑性区半径为 4.90 m (这与文献[3]中的计算结果一致), 考虑渗流场影响的塑性区半径为 5.52 m 。由图 3 和图 4 可以看出, 考虑渗流场影响的应力计算结果比不考虑时大, 而且渗流场对切向应力的影响比对径向应力的影响大, 切向应力的相对误差达 28.6% 。在渗流场作用下, 径向和切向应力分布不再以远处的应力为渐近线, 在某一半径处径向应力的绝对值将大于切向应力; 径向应力在弹塑性界面处达到最大值, 切向应力在衬砌与岩体的接触面以及弹塑性界面处均会出现跳跃, 其最大值也出现在弹塑性界面处。

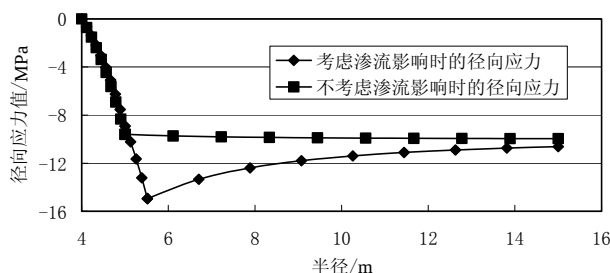


图 3 考虑渗流和不考虑渗流时的径向应力比较
Fig.3 Comparison of radial stresses with and without considering seepage field

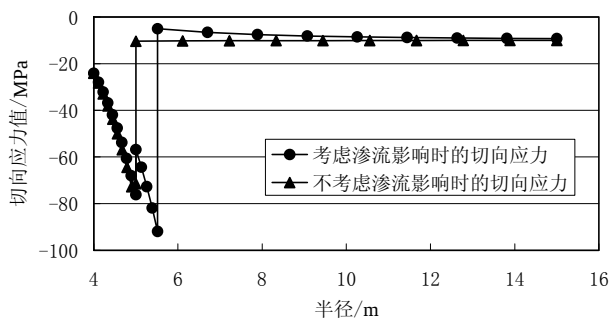


图 4 考虑渗流和不考虑渗流时的切向应力比较
Fig.4 Comparison of tangent stresses with and without considering seepage field

图 5 和图 6 是覆岩厚度 $t = 40 \text{ m}$ 时, 塑性区半径 r_p 、弹塑性界面上法向接触压力 p_{rp} 以及衬砌与

岩体接触面上法向接触压力 p_2 随海水深度的变化规律曲线。由图 5 和图 6 可知: 当隧道的结构和覆岩厚度一定时, 衬砌与岩体接触面上法向接触压力 p_2 受海水深度变化的影响很小。当弹塑性界面位于衬砌内部时, 海水深度的变化对塑性区的扩展以及弹塑性界面上法向接触压力 p_{rp} 的变化影响不大; 而当塑性区扩展到岩体内部时, 塑性区半径以及弹塑性界面上法向接触压力 p_{rp} (径向应力)与海水深度的增加大致呈线性关系, 增长较快。

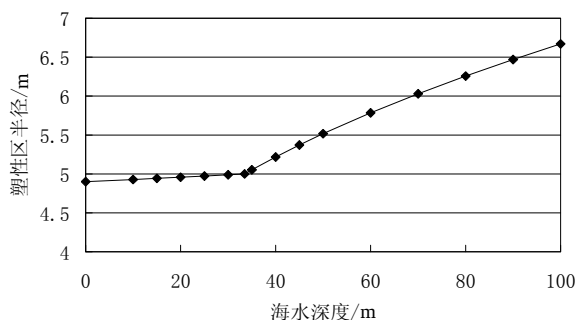


图 5 $t=40 \text{ m}$ 时, 不同海水深度时的塑性区半径
Fig.5 Relationship of plastic radius and h_0 when $t=40 \text{ m}$

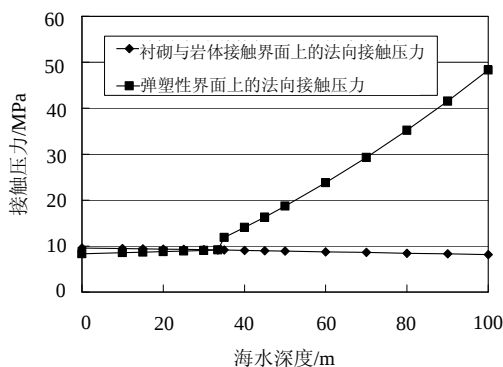


图 6 $t=40 \text{ m}$ 时, p_2 和 p_{rp} 随海水深度的变化规律
Fig.6 Relationship of p_2 , p_{rp} and h_0 when $t=40 \text{ m}$

对于拟建的海底隧道, 跨海线路走向方案大致确定后, 为了保证隧道施工和使用安全, 在隧道纵剖面设计时, 要综合考虑覆岩厚度的拟选和隧道结构设计参数。但是, 由于海底隧道的覆岩厚度决定其隧道的长度, 密切关系到隧道建设的经济和安全问题, 坡度决定后, 最小覆岩厚度越小, 海底隧道越短、静水压力越低、作用在衬砌上的势能荷载就越小。同时, 由日本最小涌水量算法可知^[13], 在给定深度的海水下, 对于特定的地质条件和确定的隧道开挖断面形状, 隧道最小涌水量所对应的覆岩厚度为经济安全的最小覆岩厚度。因此, 当覆岩厚度满足隧道最小涌水量要求时, 优先选择改变隧道

的结构设计来保证整个海底隧道的安全。

5 结论

本文推导了海底圆形隧道在渗流场影响下的弹塑性解析解。通过实例计算,分析了渗流场作用下,海水深度和覆岩厚度对隧道应力场的影响规律。主要结论有:

(1) 考虑渗流场影响的应力和塑性区半径计算结果比不考虑时大,而且渗流场对切向应力的影响比对径向应力的影响大。在渗流场作用下,径向和切向应力分布不再以远处的应力为渐近线,在某一半径处径向应力的绝对值将大于切向应力;径向应力在弹塑性界面处达到最大值,切向应力在衬砌与岩体的接触面以及弹塑性界面处均会出现跳跃,其最大值也出现在弹塑性界面处。

(2) 无论弹塑性界面位于岩体内还是衬砌内,海水深度的变化对衬砌与岩体接触界面上的法向接触压力影响很小。

(3) 当隧道结构和覆岩厚度一定,弹塑性界面位于衬砌内部时,海水深度的变化对塑性区的扩展以及弹塑性界面上法向接触压力的变化影响不大,而当塑性区扩展到岩体内部时,塑性区半径以及弹塑性界面上法向接触压力(径向应力)与海水深度的增加大致呈线性关系,增长较快。

(4) 在给定深度的海水下,对于特定的地质条件和确定的隧道开挖断面形状,当覆岩厚度满足隧道最小涌水量要求时,优先选择改变隧道的结构设计来保证整个海底隧道的安全。

参考文献:

- [1] 杨家岭,邱祥波,陈卫忠.海峡海底隧道及其最小岩石覆盖厚度问题[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增1):2132—2137.
Yang Jialing, Qiu Xiangbo, Chen Weizhong. Subsea tunnel through channel and its minimum rock cover [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2132—2137. (in Chinese)
- [2] Palmstrom A, Skogheim A. New Milestones in subsea blasting at water depth of 55m [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(1): 65—68.
- [3] 任青文,邱颖.具有衬砌圆形隧洞的弹塑性解[J].工程力学,2005,22(2):212—217.
Ren Qingwen, Qiu Ying. Elastic-plastic solution of circular tunnel with liner [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 212—217. (in Chinese)
- [4] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
Cai Meifeng. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [5] Lamas L N. An experimental study of hydro-mechanical properties of granite joints[C]//Fuji Ted. Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, 1995: 733—738.
- [6] 李宗利,任青文,王亚红.考虑渗流场影响深埋圆形隧洞的弹塑性解[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1291—1295.
Li Zongli, Ren Qingwen, Wang Yahong. Elastic-plastic analytical solution of deep-buried circle tunnel considering fluid flow field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1291—1295. (in Chinese)
- [7] 陈卫忠,杨建平,杨家岭.裂隙岩体应力渗流耦合模型在压力隧洞工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2384—2391.
Chen Weizhong, Yang Jianping, Yang Jialing. Hydro-mechanical coupled model of jointed rock mass and its application to pressure tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2384—2391. (in Chinese)
- [8] Dahlo T S, Nilsen B. Stability and rock cover of hard rock subsea tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 151—158.
- [9] 荣耀,蔡晓鸿.海底隧道开裂衬砌的渗漏量计算分析[J].南昌工程学院学报,2006,25(3):7—10.
Rong Yao, Cai Xiaohong. Leakage computation of the subsea tunnel crack lining [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2006, 25(3): 7—10. (in Chinese)
- [10] 李术才,徐帮树,李树忱.海底隧道衬砌结构选型及参数优化研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3894—3902.
Li Shucai, Xu Bangshu, Li Shuchen. Lining structure type of subsea tunnel and its support parameters optimizing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3894—3902. (in Chinese)
- [11] 陈明祥.弹塑性力学[M].北京:科学出版社,2007.
Chen Mingxiang. Elasticity and plasticity [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 涂忠仁,孙钧,蔡晓鸿.海底隧道围岩抗力系数计算方法研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):1002—1007.
Tu Zhongren, Sun Jun, Cai Xiaohong. Researches on calculation methods of rock resistant coefficients of submarine tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1002—1007. (in Chinese)
- [13] Eisenstein Z D. Large undersea tunnels and the progress of tunneling technology [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(3): 283—292.