

DOI: 10.11779/CJGE201711005

任意埋深水下隧道渗流场解析解

朱成伟^{1, 2, 3}, 应宏伟^{*1, 2, 3}, 龚晓南^{1, 2, 3}

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 总结现有关于水下隧道渗流场解析研究的优点和不足, 基于稳态渗流控制方程, 结合保角变换方法, 严格推导了水下隧道渗流场的解析解。该解能求解任意埋深考虑注浆圈作用的水下衬砌隧道渗流量以及水压力分布, 并能退化到无衬砌水下隧道以及水下不透水管道两种极端情况, 应用Comsol软件建立数值模型验证了新解答的正确性。利用本文解研究了隧道埋深、衬砌渗透系数、衬砌厚度等因素对隧道渗流量、衬砌外水压以及总水头分布的影响。研究发现当隧道埋深较小时, 最大水压力出现在隧道顶部, 而埋深较大时, 则出现在隧道底部; 衬砌外圈平均水压力及分布不均匀程度随着埋深的逐渐增大先减小后增加; 其他参数不变时, 存在某个埋深或者衬砌厚度使衬砌外水压力接近均匀分布。

关键词: 水下隧道; 衬砌; 任意埋深; 渗流量; 孔隙水压; 解析解

中图分类号: TU462 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)11-1984-08

作者简介: 朱成伟(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事地下工程的科研工作。E-mail: zhuchengwei@zju.edu.cn。

Analytical solutions for seepage fields of underwater tunnels with arbitrary burial depth

ZHU Cheng-wei^{1, 2, 3}, YING Hong-wei^{1, 2, 3}, GONG Xiao-nan^{1, 2, 3}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key

Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Engineering Research

Center of Urban Underground Development Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A summary about the analytical solutions in the literatures for the seepage fields of underwater tunnels is given, whose advantages and disadvantages are pointed out. Based on the governing equation for the steady-state seepage, the analytical solutions for the seepage fields of underwater tunnels are derived rigorously using the conformal mapping method. The water inflow and water pressure distribution for the grouted lined underwater tunnel with arbitrary burial depth can be obtained according to the new solutions. The analytical solutions can be degenerated to two limit cases including the unlined underwater tunnel and the underwater pipeline. A numerical model is established using the software Comsol to validate the newly derived solutions. The effects of the burial depth of tunnel, the permeability of lining and the thickness of lining on the water inflow, the pore water pressure around the lining and the distribution of the total water head are investigated. It is found that the maximum water pressure appears at the top of the lining when the tunnel is buried shallowly, which is opposite for the case with a large burial depth. The average pore pressure and the non-uniform degree of distribution of the pore water pressure around the lining decrease first then increase as the burial depth increases gradually. And for a given working condition, there is a burial depth or thickness of lining, which can make the pore water pressure around the lining distributed uniformly.

Key words: underwater tunnel; lining; arbitrary burial depth; water inflow; pore water pressure; analytical solution

0 引言

在过去的一个世纪里, 许多水下隧道, 包括海底隧道和山岭隧道因为其所带来的交通便捷性以及社会经济性, 已经在全世界范围内受到广泛的关注, 并被大量地建设^[1-2]。根据地理因素或者建设条件的不同, 这些隧道或被设计成密封防水形式, 或被设计成限堵

排水形式^[3-4]。Cao等^[5]进一步指出许多隧道即使注浆了, 也还是会出水。因此, 水下隧道渗流量及孔压分布等问题受到广泛关注。

基金项目: 中国工程院重点咨询项目(2015-XZ-16); 国家自然科学基金项目(51338009, 51678523)

收稿日期: 2016-08-15

*通讯作者(E-mail: ice898@zju.edu.cn)

早期学者^[6-7]提出了一些估算水下隧道水压力的近似表达式。Fernández 等^[8]和 Lei^[9]基于 Harr^[10]提出的镜像法, 假定围岩为多孔弹性介质, 并通过绘制服从达西定律的二维流网获得了孔隙水压的分布规律。应宏伟等^[11]假定衬砌内只存在径向流, 采用镜像法获得了围岩内水头分布和隧道渗流量的解析解。Joo 等^[12]进一步研究了衬砌水头和隧道渗流量的关系。王建宇^[13]将圆形隧道近似为轴对称问题, 根据达西定理和竖井理论获得该问题的近似解。王秀英等^[14]进一步获得山区高水位隧道注浆圈外水头的表达式。Tani^[15]和 Kolymbas 等^[16]采用保角变换获得了不同的衬砌外边界条件(零水压或者等水头)对应问题的解析解。Huangfu 等^[17]利用 FLAC^{3D}验证该方法的正确性。Park 等^[18]总结了该领域基于保角变换的解析解。李鹏飞等^[19]和杜朝伟等^[20]综合保角变换和王建宇简化方法, 推导由围岩、注浆圈、衬砌混凝土组成的大埋深水下隧道渗流场解析解。

综上可知, 现有文献中分析水下隧道渗流场的方法主要有以下 4 种: ①镜像法, 由于该法采用衬砌外圈等水头假定, 因此该法适用范围为深埋隧道; ②竖井法, 便于计算, 且能够考虑含多层衬砌以及注浆圈的问题, 但是该方法将半无限的围岩简化为无限区域的竖井问题会带来一定的误差, 且要求衬砌外圈为等水头线, 同样只适用于大埋深隧道; ③保角变换法, 该方法严格地从稳态渗流控制方程出发, 基于不同的边界条件获得该问题的精确解, 适用于不同埋深, 但是该方法无法解决含有衬砌或者注浆圈的问题; ④混合法, 单独应用以上 3 种方法都会有些不足, 因此一些学者综合了以上 3 种方法获得该问题的解析解。典型的有镜像法和竖井法的综合, 如应宏伟等^[11], 竖井法和保角变换法的综合, 如杜朝伟等^[20]。

但是, 以上方法还存在不足, 即凡是能够考虑衬砌或者注浆圈作用的, 则必定要采用大埋深假定, 凡是能够适用于任意埋深的, 又不能考虑衬砌或者注浆圈的作用。因此, 为了解决这一问题, 本文从稳态渗流的控制方程出发, 利用保角变换, 严格推导了该问题的解析解。并且利用该解对隧道埋深、衬砌渗透系数、衬砌厚度等因素进行参数分析。

1 数学模型

1.1 基本假定

如图 1 所示, 整个研究区域分为衬砌和围岩两个部分。衬砌内外半径分别为 r 和 R , 隧道的埋置深度为 d , 此处定义埋深为隧道中心到围岩顶面的距离。围岩顶面水深为 H , 基准水位线选在围岩顶面, 并建

立如图 1 所示的坐标系。

作如下基本假定: ①围岩与衬砌为各向同性的多孔材料; ②渗流场内水流遵循达西定律; ③衬砌内侧孔隙水压为零。

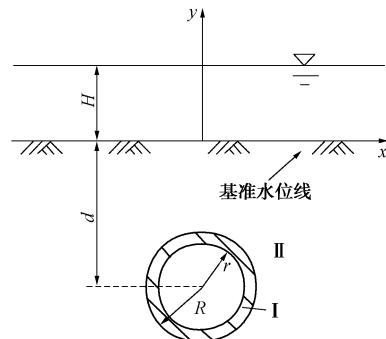


图 1 水下隧道数学模型

Fig. 1 Schematic diagram of underwater tunnel

1.2 控制方程

多孔介质中, 遵循达西定律的稳态渗流, 其控制方程为拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad , \quad (1)$$

式中, ϕ 为总水头, 等于压力水头与位置水头之和, 即

$$\phi = \frac{p}{\gamma_w} + z \quad , \quad (2)$$

式中, p 为孔隙水压, γ_w 为水的重度, z 为位置水头, 等于给定点与基准水位线的竖直距离, 在此 $z = y$ 。

1.3 边界条件

在图 1 中, 结合基本假设, 由于围岩顶面水深为 H , 所以第一个边界条件 (BC1) 为

$$\phi|_{y=0} = H \quad . \quad (3)$$

另外, 根据假定③衬砌内部孔压为 0, 所以总水头等于位置水头, 有边界条件 2 (BC2):

$$\phi|_{x^2 + (y+d)^2 = r^2} = y \quad . \quad (4)$$

2 解析解求解

2.1 衬砌区域

由于衬砌区域为环形区域, 在极坐标系下求解会更方便。将式 (1) 在极坐标系下重写为

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = 0 \quad , \quad (5)$$

式中, ρ 和 θ 为衬砌内一点在极坐标系下的坐标变量, 且极坐标系原点位于隧道中心。式 (5) 的通解为

$$\phi_I = C_1 + C_2 \ln \rho + \sum_{n=1}^{\infty} (C_3 \rho^n + C_4 \rho^{-n}) \cos n\theta +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (C_5 \rho^n + C_6 \rho^{-n}) \sin n\theta \quad , \quad (6)$$

式中, ϕ_l 为衬砌内水头, C_i ($i = 1 \sim 6$) 为常数。将 BC2 在极坐标系下的形式 $\phi_l|_{\rho=r} = r \sin \theta - d$ 代入式 (6), 可得

$$\phi_l = C_2 \ln \frac{\rho}{r} - d + \left(C_5 \rho + (1 - C_5) \frac{r^2}{\rho} \right) \sin \theta \quad , \quad (7)$$

式 (7) 中仍存在两个未知数。

2.2 保角变换

采用保角变换的方法可以简化围岩内水头表达式的推导过程。保角变换可以将半无限围岩转变为一些简单的形状^[5, 17]。如图 2 所示, 采用式 (8) 的映射函数, 平面 Z 内围岩区域转变为平面 ζ 内的环形区域。

$$\zeta = \xi + \eta i = (Z + ia)/(Z - ia) \quad , \quad (8)$$

式中, i 为虚数单位, $a = \sqrt{d^2 - R^2}$ 。

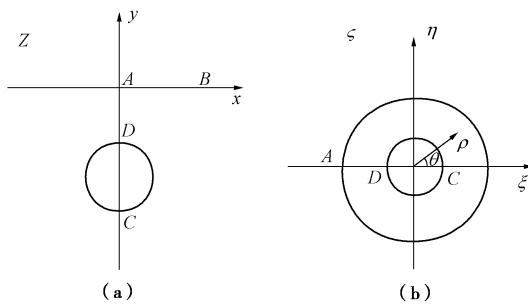


图 2 原域与映射域

Fig. 2 Original and mapping domains

由保角映射的性质, 可以将围岩在映射域内的控制方程也写成式 (5) 的形式。类似于 2.1 节的推导过程, 可以得到围岩区域水头的表达式为

$$\begin{aligned} \phi_s &= C_7 + C_8 \ln \rho + \sum_{n=1}^{\infty} (C_9 \rho^n + C_{10} \rho^{-n}) \cos n\theta + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} (C_{11} \rho^n + C_{12} \rho^{-n}) \sin n\theta \quad , \end{aligned} \quad (9)$$

式中, ϕ_s 为围岩内总水头, C_i ($i = 7 \sim 12$) 为常数。需要注意此处 ρ 和 θ 为图 2 (b) 内坐标体系下的坐标变量。将 BC1 在平面 ζ 的形式, $\phi_s|_{\rho=1} = H$ 代入式 (9) 可得

$$\begin{aligned} \phi_s &= H + C_8 \ln \rho + \sum_{n=1}^{\infty} C_9 (\rho^n - \rho^{-n}) \cos n\theta + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} (C_{11} \rho^n + C_{12} \rho^{-n}) \sin n\theta \quad , \end{aligned} \quad (10)$$

式 (10) 中有 4 个未知数。

因为多孔介质内水流为稳定流, 所以进入衬砌的渗流量应该和从衬砌内流出的渗流量相等, 即

$$\int_0^{2\pi} k_l \frac{\partial \phi_l}{\partial \rho} \Big|_{\rho=r} \cdot r d\theta = \int_0^{2\pi} k_s \frac{\partial \phi_s}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\alpha} \cdot \alpha d\theta \quad , \quad (11)$$

式中, k_l , k_s 分别为衬砌及围岩的渗透系数, $\alpha = \frac{d+R-a}{d+R+a}$ 为衬砌外圈在映射域内的半径, 即图 2 (b) 中内圈的半径。根据式 (11) 可得

$$k_l C_2 = k_s C_8 \quad . \quad (12)$$

另外, 式 (7) 和 (10) 在界面上可重写为

$$\phi_l|_{\rho=R} = C_2 \ln \frac{R}{r} + (C-1)d + Cy \quad , \quad (13)$$

式中, $C = C_5 + (1 - C_5) \frac{r^2}{R^2}$ 。

$$\begin{aligned} \phi_s|_{\rho=\alpha} &= H + C_8 \ln \alpha + \sum_{n=1}^{\infty} C_9 (\alpha^n - \alpha^{-n}) \cos n\theta + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} (C_{11} \alpha^n + C_{12} \alpha^{-n}) \sin n\theta \quad . \end{aligned} \quad (14)$$

在映射域内圈上, y 和 α 有如下的关系式:

$$y = \frac{a(\alpha^2 - 1)}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos \theta} \quad , \quad (15)$$

写成级数形式^[21], 有

$$y = -a \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n \cos n\theta \right) \quad . \quad (16)$$

根据式 (13) 和 (14) 相等, 及式 (15)、(16) 的表达式, 可获得以下系数的具体形式:

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{H + d + (a - d)C}{\ln \frac{R}{r} - \frac{k_l}{k_s} \ln \alpha}, \quad C_8 = \frac{H + d + (a - d)C}{\ln \frac{R}{r} \cdot \frac{k_s}{k_l} - \ln \alpha}, \\ C_9 &= -2aC \frac{\alpha^{2n}}{\alpha^{2n} - 1}, \quad C_{11} = C_{12} = 0. \end{aligned}$$

因此, 式 (7) 和 (10) 有如下形式:

$$\phi_l = \frac{H + d + (a - d)C}{\ln \frac{R}{r} - \frac{k_l}{k_s} \ln \alpha} \cdot \ln \frac{\rho}{r} - d + \left[C_5 \rho + (1 - C_5) \frac{r^2}{\rho} \right] \sin \theta, \quad (17)$$

$$\phi_s = H + \frac{H + d + (a - d)C}{\ln \frac{R}{r} \cdot \frac{k_s}{k_l} - \ln \alpha} \cdot \ln \rho - 2aC \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha^{2n}}{\alpha^{2n} - 1} (\rho^n - \rho^{-n}) \cos n\theta. \quad (18)$$

至此, 除了 C_5 (C), 所有的系数都已确定。 C_5 (C) 的值可以根据式 (19) 获得

$$k_l \frac{\partial \phi_l}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} = k_s \frac{\partial \phi_s}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\alpha} \quad . \quad (19)$$

式 (19) 意味着从式 (17) 或者式 (18) 获得的渗流速度在交界面应该相等。因为 C_5 (C) 是常数,

所以只需要选取一点满足式 (19) 即可获得 C_5 (C) 的表达式。方便计算起见, 选取平面 Z 上位于对称轴上的点 $C(0, -d-R)$ 。从平面 Z 上的 y 轴映射到平面 ξ 的 ξ 轴, 在 ξ 轴上, ρ , ξ , y 有如下关系式:

$$\rho|_{\theta=0} = \xi = \frac{y^2 - a^2}{(y - a)^2} \quad . \quad (20)$$

在点 C , 将式 (17)、(18) 和 (20) 代入式 (19), 得

$$\begin{aligned} C_5 &= \frac{\Gamma_2 + (k_1 - \Gamma_1) \frac{r^2}{R^2}}{\Gamma_1 \frac{R^2 - r^2}{R^2} + k_1 \frac{R^2 + r^2}{R^2}}, \\ \Gamma_1 &= -\frac{k_s(a-d)}{\ln \frac{R}{r} \cdot \frac{k_s}{k_1} - \ln \alpha} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\rho'}{\alpha} \right) + 2k_s a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\alpha^{n-1}(\alpha^{2n} + 1)}{\alpha^{2n} - 1} \rho', \\ \Gamma_2 &= k_s \frac{H+d}{\ln \frac{R}{r} \cdot \frac{k_s}{k_1} - \ln \alpha} \left(\frac{1}{R} + \frac{\rho'}{\alpha} \right), \quad \rho' = -\frac{2a}{(d+R+a)^2}. \end{aligned}$$

至此, 获得了平面 Z 衬砌内水头表达式以及平面 ξ 围岩内水头表达式, 为了得到平面 Z 围岩内水头表达式, 将 (21)、(22) 代入式 (18) 得

$$\rho = \frac{\sqrt{(x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2}}{x^2 + (y - a)^2}, \quad (21)$$

$$\theta = \arccos \frac{x^2 + y^2 - a^2}{\sqrt{(x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2 x^2}}. \quad (22)$$

根据定义可以获得隧道渗流量和孔隙水压表达式:

$$Q = 2\pi k_l \frac{H+d+(a-d)C}{\ln \frac{R}{r} - \frac{k_1}{k_s} \ln \alpha}, \quad (23)$$

$$p = \gamma_w (\phi_s - y). \quad (24)$$

2.3 考虑注浆圈作用

按照上文思路可以得到考虑注浆圈作用的解析解, 由于推导类似但较为复杂, 这里直接给出结果。

$$\phi_l^* = C_2^* \ln \frac{\rho}{r} - d + \left[C_5^* \rho + (1 - C_5^*) \frac{r^2}{\rho} \right] \sin \theta, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \phi_g^* &= C_2^* \ln \frac{R}{r} - d + \frac{k_1}{k_g} C_2^* \ln \frac{\rho}{R} + \\ &\frac{1}{2} \left\{ \left[C_5^* + (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} + \frac{k_1}{k_g} \left(C_5^* - (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} \right) \right] \rho + \right. \\ &\left. R^2 \left[C_5^* + (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} - \frac{k_1}{k_g} \left(C_5^* - (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} \right) \right] \frac{1}{\rho} \right\} \sin \theta, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\phi_s^* = H + \frac{k_1}{k_s} C_2^* \ln \rho - 2a^* D \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha^{*2n}}{\alpha^{*2n} - 1} (\rho^n - \rho^{-n}) \cos n\theta, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Q^* &= 2\pi k_s \frac{H+d+(a-d)D}{\frac{k_s}{k_1} \ln \frac{R}{r} + \frac{k_s}{k_g} \ln \frac{R_g}{R} - \ln \alpha^*}, \quad (28) \\ C_2^* &= \frac{H+d+(a-d)D}{\ln \frac{R}{r} + \frac{k_1}{k_g} \ln \frac{R_g}{R} - \frac{k_1}{k_s} \ln \alpha^*}, \quad C_5^* = \frac{\Gamma_3 + \Gamma_4 \Gamma_6 - \Gamma_8}{\Gamma_7 - \Gamma_4 \Gamma_5} \\ \Gamma_3 &= k_s \left(\frac{1}{R_g} + \frac{\rho^*}{\alpha^*} \right) \frac{H+d}{\frac{k_s}{k_1} \ln \frac{R}{r} + \frac{k_s}{k_g} \ln \frac{R_g}{R} - \ln \alpha^*}, \\ \Gamma_4 &= k_s \left(\frac{1}{R_g} + \frac{\rho^{**}}{\alpha^*} \right) \frac{a^* - d}{\frac{k_s}{k_1} \ln \frac{R}{r} + \frac{k_s}{k_g} \ln \frac{R_g}{R} - \ln \alpha^*} - \\ &2k_s a^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\alpha^{*n-1}(\alpha^{*2n} + 1)}{\alpha^{*2n} - 1} \rho^{**}, \\ \Gamma_5 &= \frac{1}{2} \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} + \frac{R^2 + r^2}{R^2} \frac{k_1}{k_g} + \frac{R^2 - r^2}{R_g^2} - \frac{R^2 + r^2}{R_g^2} \frac{k_1}{k_g} \right), \\ \Gamma_6 &= \frac{1}{2} \left[\frac{r^2}{R^2} \left(1 - \frac{k_1}{k_g} \right) + \frac{r^2}{R_g^2} \left(1 + \frac{k_1}{k_g} \right) \right], \\ \Gamma_7 &= \frac{1}{2} k_g \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} + \frac{R^2 + r^2}{R^2} \frac{k_1}{k_g} - \frac{R^2 - r^2}{R_g^2} + \frac{R^2 + r^2}{R_g^2} \frac{k_1}{k_g} \right), \\ \Gamma_8 &= \frac{1}{2} k_g \left[\frac{r^2}{R^2} \left(1 - \frac{k_1}{k_g} \right) - \frac{r^2}{R_g^2} \left(1 + \frac{k_1}{k_g} \right) \right], \\ a^* &= \sqrt{d^2 - R_g^2} \quad \alpha^* = \frac{d+R_g - a^*}{d+R_g + a^*} \quad \rho^{**} = -\frac{2a^*}{(d+R_g + a^*)^2} \\ D &= \frac{1}{2} \left[C_5^* + (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} + \frac{k_1}{k_g} \left(C_5^* - (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} \right) \right] + \\ &\frac{1}{2} \left[C_5^* + (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} - \frac{k_1}{k_g} \left(C_5^* - (1 - C_5^*) \frac{r^2}{R^2} \right) \right] \frac{R^2}{R_g^2}. \end{aligned}$$

式中, ϕ_l^* , ϕ_g^* , ϕ_s^* 和 Q^* 分别为注浆隧道衬砌、注浆圈和围岩总水头以及隧道渗流量表达式。 k_g 和 R_g 分别为注浆圈渗透系数和半径。类似地, 可以获得多道衬砌水下隧道渗流场的解析解, 这里不再赘述。

3 验 证

因为渗流量以及孔隙水压的表达式均来自于式 (18), 因此有必要对式 (18) 进行验证。验证从解析解退化以及与数值结果比较两个角度着手。

3.1 解析解退化

考虑两个极限情况。

情况一: 衬砌内外半径相等, 即 $r=R$, 意味着隧道没有衬砌, 只是一个毛洞。在这种情况下, $C=1$,

式(18)可以退化为

$$\phi_s = H - \frac{H+a}{\ln \alpha} \cdot \ln \rho - 2a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha^{2n}}{\alpha^{2n}-1} (\rho^n - \rho^{-n}) \cos n\theta, \quad (29)$$

式(29)和 Park 等^[18]式(13)一致。

情况二: 衬砌不透水, 即 $k_l=0$, 此时整个围岩内不存在水流, 因此各点的水头都等于 H 。在这种情况下, 根据 Γ_1 , Γ_2 , ρ' 的表达式可得 $C=0$ 。因此式(18)可以退化为 $\phi_s = H$, 和预期一致。

3.2 数值软件验证

(1) 收敛试验

采用数值软件 Comsol 进行研究之前, 需要做一些收敛试验工作。首先是网格划分收敛试验。表 1 给出了本次试验的参数。选取点 $(0, -5)$ 和 $(0, -20)$ 作为观察点。Comsol 自带 9 种网格划分水平(从最粗到最细), 所以一共进行了 9 次试验。试验结果表明网格划分精细程度对结果影响较小。所以从精度和效率角度考虑, 本文采取了“相对精细”这一水准。

表 1 收敛试验输入参数

Table 1 Input data for convergence tests

围岩特性		隧道特性	
水深/m	20	埋深/m	10
宽度/m	1000	外径/m	5
厚度/m	1000	内径/m	4.5
剪切模量/MPa	6	杨氏模量/GPa	34.5
渗透系数/(m·s ⁻¹)	1.0×10^{-7}	渗透系数/(m·s ⁻¹)	1.0×10^{-8}
泊松比	0.25	泊松比	0.2
孔隙比	0.25	孔隙比	0.025
饱和度	1.0		

另外还进行了围岩宽度从 50~5000 m 的收敛试验。试验结果表明 1000 m 的围岩宽度能够保证计算精度和效率。

(2) 解析解与数值解对比

基于上节的分析以及表 1 的数据对该问题进行了数值计算, 结果如图 3 所示。图 3 是隧道周围围岩总水头分布的等值线图。图中实线为解析解结果, Δ 为 Comsol 的计算结果, 隧道中心位于点 $(0, -10)$, 从

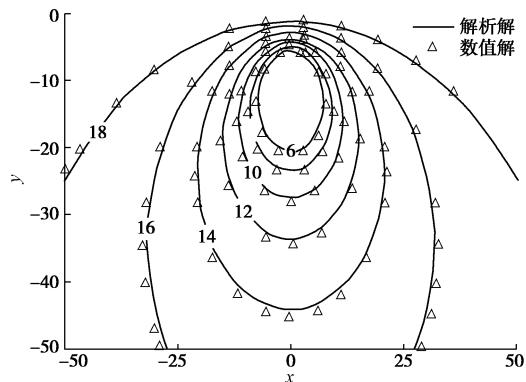


图 3 总水头等值线图

Fig. 3 Contour map of total head

图中可以看出由于隧道距离围岩顶面较近, 只有一倍衬砌外半径的距离, 因此总水头等值线在此处最密, 而距离隧道中心越远的地方越疏, 这一点符合常识。另外还可以看出隧道顶部相比较于隧道底部, 解析解和数值解的吻合度更高, 总体上本文解析解结果和数值计算结果吻合较好。

4 讨 论

由式(18)和(23)可知, 影响围岩水头分布以及隧道涌水量的参数主要有隧道埋深 d , 衬砌及围岩的渗透系数 k_l , k_s , 衬砌的内外半径 r 和 R , 水深 H 等。本节主要讨论埋深、渗透系数以及衬砌厚度 3 个参数带来的影响。

4.1 埋深对涌水量的影响

埋深对隧道涌流量影响较大, 不同学者基于不同的假定对涌流量的计算方法也有相应的研究。本节选择了目前 3 种较为典型的计算方法与之对比, 结果如图 4 所示, 埋深 d 范围为 $R \sim 40R$ 。

由图 4 可知, 随着埋深的减小, 4 种方法所得的相对涌流量 $Q/[2\pi k_s(H+d)]$ 都在增加。但是文献[13]与其他 3 种方法差别较大。无论隧道浅埋还是深埋, 本文法和文献[11]差别不大。在较大埋深时(如 $R/d < 0.4$), 文献[20]与本文法相差不大, 但是当 $R/d > 0.4$, 文献[20]与本文法差距逐渐变大。因此可以认为基于竖井理论的文献[13]法高估了隧道的涌流量; 基于大埋深假定的文献[20]法在隧道深埋时($R/d < 0.4$)有较好的精度, 但是在浅埋时预测值偏大; 基于镜像法的文献[11]法计算值和本文精确解吻合较好, 只是在埋深极小时有一定误差。

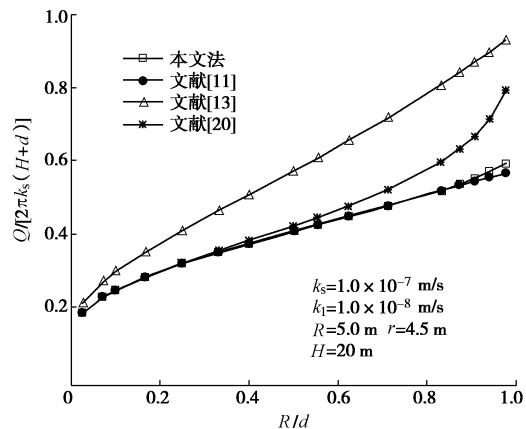


图 4 渗水量与埋深的关系

Fig. 4 Relationship between water inflow and burial depth

4.2 埋深对孔隙水压的影响

本文解得到的衬砌外圈水压力的分布和隧道埋深的关系见图 5。由图 5 可知, 衬砌外圈水压力随 θ 角

呈简谐曲线分布形式。衬砌外水压力以及分布不均匀程度均随着埋深的增加呈现先减小后增加的趋势。注意到, 当隧道埋深较浅时(如 $d = 1.02R$ 或者 $d = 1.2R$), 衬砌外最大水压力出现在隧道顶部; 而对于深埋隧道(如 $d = 5R$ 或者 $d = 10R$), 衬砌外最大水压力则出现在隧道底部。这个现象意味着存在某个埋深使得衬砌外为等水压, 这对于隧道设计具有参考意义。而且当隧道覆土较薄时, 拱顶和拱底的水压力差值很大, 如图 5 所示, 这会使得隧道顶部的水力坡降(渗透力)远远大于隧道底部; 另外可以发现当 $d = (1\sim 2)R$ 时, 隧道底部的水压力变化不大。

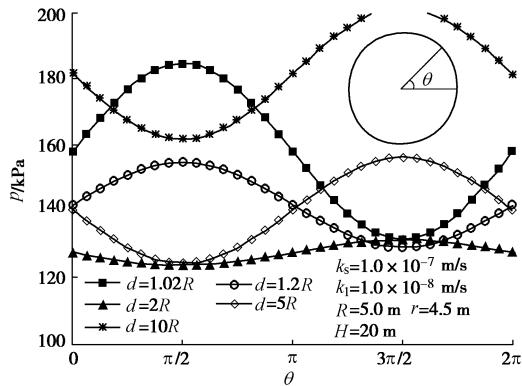


图 5 埋深对衬砌外水压分布的影响

Fig. 5 Effect of burial depth on distribution of pore water pressure around lining

4.3 渗透系数对孔隙水压的影响

由式(22)可知, 影响水头大小的主要不是围岩或者衬砌渗透系数本身, 而是两者的比值影响着水头的分布。因此在以下讨论中, 假定围岩渗透性不变, 通过改变衬砌渗透系数的大小来研究渗透系数的作用, 结果如图 6 所示。

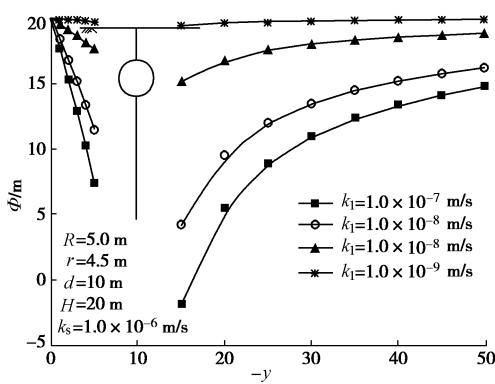


图 6 渗透系数对总水头的影响

Fig. 6 Effect of permeability on total head

图 6 为不同衬砌渗透系数时隧道对称轴线上总水头随深度的分布情况。由图 6 可知, 所有曲线在围岩顶面水头均等于 20 m, 且越靠近隧道, 水头越小。衬

砌渗透系数对水头的大小影响很大, 随着衬砌渗透系数的增加, 隧道拱顶和拱底的总水头差逐渐变大, 并且在给定深度, 水头也逐渐下降。当 $k_l/k_s > 1\%$ 时, 衬砌外水头差较大, 只有当 $k_l/k_s < 0.1\%$ 时, 衬砌外圈才近似满足等水头假定。另外, 由式(23)可知, 衬砌渗透系数的减小可以有效地降低隧道的渗流量。

图 7 为衬砌外孔隙水压力分布与衬砌渗透系数的关系。从图 7 中可以看出, 衬砌外水压力和分布不均匀程度随着衬砌渗透系数的减小而增大。

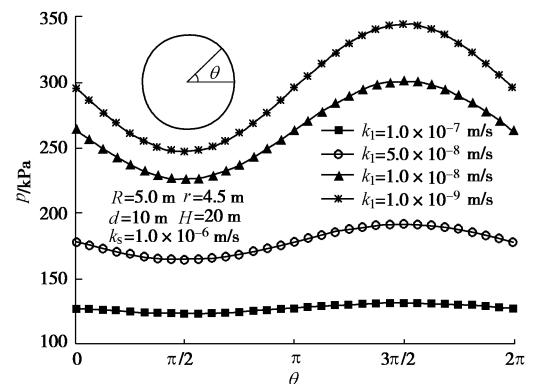


图 7 渗透系数对衬砌外水压分布的影响

Fig. 7 Effect of permeability coefficients on distribution of pore water pressure around lining

4.4 衬砌厚度对孔隙水压的影响

保持外径 R 不变, 改变内径 r 的值, 以改变衬砌厚度, 根据式(22)获得图 8 所示不同衬砌厚度下, 衬砌外圈水压力分布的示意图。由图 8 可知, 在衬砌外给定的一点, 随着衬砌厚度的增加(r 减小), 水压力增加。与 4.2 节的结果类似, 当其他参数不变时, 也存在某个衬砌厚度使得衬砌外水压力值接近均布。

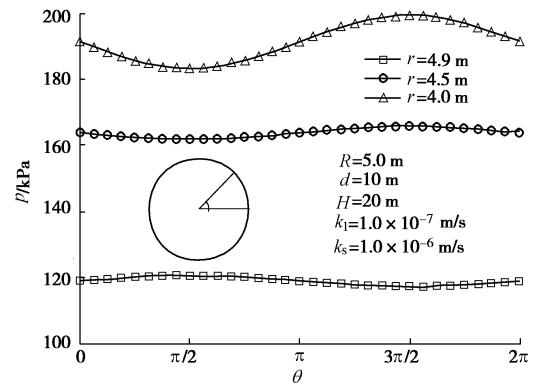


图 8 衬砌厚度对衬砌外水压分布的影响

Fig. 8 Effect of thickness of lining on distribution of pore water pressure around lining

5 工程应用

工程实例一: 某海底隧道洞径 $r = 5$ m, 衬砌外半

径 $R = 6$ m, 注浆圈外半径 $R_g = 11$ m, 隧道埋深 $d = 35$ m, 海水深度 $H = 30$ m。围岩的渗透系数为 5.0×10^{-6} m/s, 注浆圈的渗透系数为 1.0×10^{-7} m/s, 衬砌的渗透系数为 5.0×10^{-8} m/s。陈俊儒等^[22]利用 FLAC^{2D}对该工程问题进行数值模拟, 得出每延米涌水量为 $3.39 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$, 根据式(32)可得本文解析解结果为 $3.50 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$, 接近且略高于数值模拟结果。

工程实例二: 王育奎等^[23]根据相似理论, 以某海底隧道右线IV级围岩中的断面 YK6+905 为原型, 进行模型试验以及数值计算研究。试验参数如下: 几何尺寸相似常数为 1:100, 重度相似常数为 1:1.33, 隧道毛洞半径 6.1 cm, 隧道埋深 $d=32.3$ cm, 海床渗透系数为 0.05 m/d , 围岩顶部水深 H 分别为 32.1, 44.8 cm。结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 3 种方法都高估了渗流量, 其中本文法预测值为试验值的 2 倍左右, 优于文献[13]值。本文法和文献[11]法预测值较为接近, 是因为该工程埋深较大。解析解和试验结果的差别主要来自于试验洞室拱形开口和圆形洞室解析假定的差别^[23]。

表 2 不同方法得到的涌水量 Q

Table 2 Values of water inflow by different methods

H/m	涌水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)			
	模型试验	本文值	文献[11]	文献[13]
42.7	4.58	9.89	9.98	14.13
59.6	7.32	12.04	12.23	17.32

6 结 论

(1) 通过求解稳态渗流控制方程, 获得任意埋深下考虑衬砌及注浆圈作用的水下隧道总水头、水压力以及隧道渗流量的严格解析解。

(2) 衬砌外水压随 θ 角成简谐曲线分布, 隧道埋深较小时, 最大水压力出现在隧道顶部; 埋深较大时, 最大水压力出现在隧道底部。衬砌外圈平均水压力及分布不均匀程度随着埋深的增加先减小后增加。对于给定的隧道参数, 存在某个埋深使得衬砌外水压力接近均布。

(3) 衬砌渗透系数对总水头分布影响很大, 当 $k_l/k_s > 1\%$ 时, 衬砌外水头差较大, 只有当 $k_l/k_s < 0.1\%$ 时, 衬砌外圈才近似满足等水头假定。衬砌外平均水压力和分布的不均匀程度均随着衬砌渗透系数的减小而增大。对于衬砌外给定一点, 其总水头随着衬砌厚度的增加而增大, 当其他参数不变时, 存在某个衬砌厚度使得衬砌外水压力接近均布。

参 考 文 献:

[1] COLI M, PINZANI A. Tunnelling and hydrogeological issues:

- a short review of the current state of the art[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(3): 839 - 851.
- [2] NILSEN B. Characteristics of water ingress in Norwegian subsea tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(3): 933 - 945.
- [3] LEE I M, NAM S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 31 - 40.
- [4] ARJNOI P, JEONG J H, KIM C Y, et al. Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 376 - 389.
- [5] CAO Y, JIANG J, XIE K H, et al. Analytical solutions for nonlinear consolidation of soft soil around a shield tunnel with idealized sealing linings[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 144 - 152.
- [6] BOUVARD M, PINTO N. Aménagement Caprivi-Cahoeira étude en charge[J]. La Houille Blanche, 1969(7): 747 - 760.
- [7] SCHLEISS A J. Design of pervious pressure tunnels[J]. Water Power and Dam Construction, 1986, 38(5): 21 - 26.
- [8] FERNANDEZ G, ALVAREZ J T A. Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(1): 108 - 128.
- [9] LEI S. An analytical solution for steady flow into a tunnel[J]. Groundwater, 1999, 37(1): 23 - 26.
- [10] HARR M E. Groundwater and seepage[M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [11] 应宏伟, 朱成伟, 龚晓南. 考虑注浆圈作用水下隧道渗流场解析解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(6): 1018 - 1023. (YING Hong-wei, ZHU Cheng-wei, GONG Xiao-nan. Analytical solution on seepage field of underwater tunnel considering grouting circle[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 2016, 50(6): 1018 - 1023. (in Chinese))
- [12] JOO E J, SHIN J H. Relationship between water pressure and inflow rate in underwater tunnels and buried pipes[J]. Géotechnique, 2014, 64(3): 226.
- [13] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力 [J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 5 - 9. (WANG Jian-yu. Once more on hydraulic pressure upon lining[J]. Modern Tunneling Technology, 2003, 40(3): 5 - 9. (in Chinese))
- [14] 王秀英, 王梦恕, 张 弥. 计算隧道排水量及衬砌外水压

- 力的一种简化方法[J]. 北方交通大学学报, 2004, **28**(1): 8 - 10. (WANG Xiu-ying, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. A simple method to calculate tunnel discharge and external water pressure on lining[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, **28**(1): 8 - 10. (in Chinese))
- [15] EL TANI M. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, **18**(1): 49 - 55.
- [16] KOLYMBAS D, WAGNER P. Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, **22**(1): 23 - 27.
- [17] HUANGFU M, WANG M S, TAN Z S, et al. Analytical solutions for steady seepage into an underwater circular tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, **25**(4): 391 - 396.
- [18] PARK K H, OWATSIRIWONG A, LEE J G. Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: a revisit[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(2): 206 - 209.
- [19] 李鹏飞, 张顶立, 赵勇, 等. 海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 280 - 288. (LI Peng-fei, ZHANG Ding-li, ZHAO Yong, et al. Study of distribution law of water pressure acting on composite lining and reasonable parameters of grouting circle for subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 280 - 288. (in Chinese))
- [20] 杜朝伟, 王梦恕, 谭忠盛. 水下隧道渗流场解析解及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊2): 3567 - 3573. (DU Chao-wei, WANG Meng-shu, TAN Zhong-sheng. Analytic solution for seepage field of subsea tunnel and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3567 - 3573. (in Chinese))
- [21] VERRUIJT A. Complex variable solutions of elastic tunneling problems[R]. Delft: Delft University of Technology, 1996.
- [22] 陈俊儒, 王星华. 海底隧道涌水量的预测及其应用研究[J]. 现代隧道技术, 2008, **45**(5): 18 - 27. (CHEN Jun-ru, WANG Xing-hua. Prediction and research on water inflow for a subsea tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2008, **45**(5): 18 - 27. (in Chinese))
- [23] 王育奎, 徐帮树, 李树才, 等. 海底隧道涌水量模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(9): 1477 - 1482. (WANG Yu-kui, XU Bang-shu, LI Shu-cai, et al. Laboratory method tests on water flow rate of submarine tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1477 - 1482. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京理正软件股份有限公司
封 3 重庆地质仪器厂
封 4 南瑞集团水利水电技术分公司