

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.0381

隧道围岩内地下水渗流边界效应影响研究

刘世伟^{1,2}, 盛 谦^{1,3}, 朱泽奇^{1,2}, 龚彦峰², 崔 臻¹, 李建贺¹, 张善凯¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071 ;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 水下隧道技术湖北省工程实验室, 湖北 武汉 430063 ; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 : 根据水位条件、施工工艺和防排水设计原则将隧道渗流计算围岩透水边界条件大致划分为 4 种类型, 并分析了不同透水边界条件适应的施工工况。基于复变函数理论和保角映射方法, 推导出 4 种透水边界条件下隧道围岩内任一点孔隙水压力和隧道涌水量解析计算公式, 通过与数值解的对比, 印证了解析解的准确性。在此基础上, 根据不同透水边界条件下隧道涌水量和围岩关键点孔隙水压力随埋深直径比 (h/D) 的变化规律, 分析了透水边界条件的变化对浅埋隧道和深埋隧道的影响, 并探讨了浅埋水下隧道渗流计算中透水边界条件的选取。相关结论与认识对于隧道渗流计算和排水设计具有一定的指导作用和参考价值。

关 键 词 : 隧道围岩; 地下水渗流; 边界条件; 孔隙水压力; 涌水量

中图分类号 : U 451+.2

文献标识码 : A

文章编号 : 1000 - 7598 (2018)11 - 4001 - 09

Research on boundary effect of groundwater seepage in tunnel surrounding rock

LIU Shi-wei^{1,2}, SHENG Qian^{1,3}, ZHU Ze-qi^{1,2}, GONG Yan-feng²,
CUI Zhen¹, LI Jian-he¹, ZHANG Shan-kai¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Hubei Provincial Engineering Laboratory for Underwater Tunnel, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Tunnel surrounding rock seepage boundary conditions can be roughly divided into four types based on water level, drainage design and construction approach, and the seepage boundary conditions to adapt to different construction conditions are discussed in detail. An analytical formula to calculate pore water pressure in tunnel surrounding rock and tunnel water inflow under four kinds of boundary conditions is obtained by adopting the method of conformal mapping of complex function. Comparison between analytical solution and numerical solution confirms the correctness of the analytical solution. Based on the relationship between tunnel water inflow with buried depth diameter ratio (h/D), as well as the relationship between surrounding rock pore water pressure and h/D under different boundary conditions, the influence of boundary conditions on shallow-buried tunnels and deep-buried tunnels is analyzed. Selection of boundary conditions for shallow-buried tunnel seepage calculation is also discussed. The conclusions for tunnel seepage calculation and drainage design reported in this article provide theoretical guidance for engineering practice.

Keywords: tunnel surrounding rock; groundwater seepage; boundary conditions; pore water pressure; water inflow

1 引 言

伴随着我国交通隧道建设的发展, 地下水渗流作用的影响越来越凸显, 例如广州地铁四号线某施

工段承受地下水渗流的影响下掌子面支护压力是理论计算值的 1.5 倍^[1], 钱江隧道掌子面的实测极限支护压力超出理论计算值将近 100 kPa^[2], 上海长江隧道受高水压影响, 隧道围岩应力及结构变形较为

收稿日期: 2017-03-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2015CB057905); 国家重点研发计划 (No. 2016YFC0401803); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51409263, No. 51779253, No. 41672319)

This work was supported by the National Basic Research Program of China(973 Program) (2015CB057905), the National Key R&D Program of China (2016YFC0401803) and the National Natural Science Foundation of China(51409263, 51779253, 41672319).

第一作者简介: 刘世伟, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事隧道渗流及其稳定性方面的研究工作。E-mail: liu1989shiwei@163.com

显现^[3],广州地铁5号线某加固区间受到地下水渗流的影响而发生旋喷桩径缩和断桩现象^[4]等,地下水渗流作用已成为制约我国隧道工程安全快速施工的重要因素之一。

因地下水渗流作用而引发的问题主要包括两个方面:涌水量的预测和结构水荷载的确定。对此,国内外研究学者进行了如下研究:Lei^[5]和 Fernandez^[6]等采用镜像法推导出隧道围岩内孔隙水压力和涌水量解析计算公式;吴祖松^[7]、王秀英^[8]、杜朝伟^[9]、房倩^[10]等对海底隧道围岩稳定渗流情况下涌水量和水压力分布的解析解进行了推导,并研究了围岩渗透吸水、水深、注浆圈参数等对围岩孔隙水压力和洞内涌水量的影响;Lee^[11]采用有限元方法对地下水渗流方程和地下水渗流对掌子面的渗透力进行了数值求解,研究了隧道推进速度对渗透力的影响;Li^[12]采用数值模拟方法分析了双连拱型隧道和连管型隧道围岩内孔隙水压力的分布规律和涌水量情况,并对两种类型隧道可能发生渗漏的位置进行了预测;Chen^[13]建立了渗流弹性耦合模型,并分析了隧道围岩内孔隙水压力的分布规律;吴金刚等^[14]研究了高水压透水条件下山岭隧道围岩内渗流场的分布特征;王德明等^[15]建立了三维地质模型试验系统,借此分析了地下水渗流过程中隧道发生突水、突泥灾变机制;项彦勇^[16]分析了水体下隧道开挖,隧道内表面为等水头和等水压两种排水条件下围岩孔压的解析解。

现有的研究中对隧道围岩孔隙水压力计算和涌水量预测等方面取得了许多研究成果,然而在透水边界条件对隧道围岩地下水渗流影响方面的成果相对较少。Kolymbas^[17]、Ming^[18]、Park^[19]采用保角变换方法推导了隧道内表面渗流边界条件为零孔隙水压力和固定水头两种条件下隧道的涌水量计算公式。但是上述计算公式的推导是在假设水位位于地表以上的情况下进行的,当水位位于地表以下时,该公式中的相关符号代表的物理意义与实际有本质区别,水位位于地表以下时采用该公式得出的计算结果可靠性较差。而且根据现场实测结果可知,衬砌背后孔隙水压力通常不为0,不同工况条件下隧道内表面的水压力边界较为复杂,将隧道边界设置为零孔压进行计算具有一定的误差。除此之外,现有的研究成果中,透水边界条件对浅埋隧道和深埋隧道的影响目前尚无明确的结论。为此,本文依据现有的研究成果,对隧道渗流计算模型的透水边界条件进行归纳分类。采用复变函数理论和保角变换法分别推导出不同透水边界条件下隧道围岩内孔隙

水压力和隧道涌水量的计算公式。基于此,揭示不同透水边界条件下围岩孔隙水压力和涌水量随埋深直径比的变化规律,分析不同透水边界条件对浅埋隧道和深埋隧道的影响。

2 问题的描述

在半无限地层中开挖半径为 r_0 的圆形隧道,隧道中心距地层表面的距离为 h ,隧道中心距水位线的距离为 H ,根据水位线与地表的关系可将隧道渗流计算分为水体下开挖隧道和半无限含水地层中开挖隧道(水位线位于地表为其特殊情况)两种工况条件,如图1所示。假设隧道围岩为连续、均质、各向同性多孔介质,地下水渗流为稳定渗流条件,围岩内的渗透系数各向同性为 k 。根据达西定律,地下水稳定渗流控制方程可表示为

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

式中: $h(x,y)$ 为围岩内过水断面上任一点的总水头,由于地下水渗流速率较小,相对于总水头的量值而言,速度水头大小可以忽略不计。因此,水位线以下隧道围岩内的总水头,即为测压管水头,可表示为

$$h(x,y) = z + \frac{p(x,y)}{\gamma_w} \quad (2)$$

式中: $p(x,y)$ 为水位下围岩中任一点的孔隙水压力; γ_w 为水的重度; z 为位置水头,根据基准面上下某点距离基准面的距离来确定的。根据现有的研究文献分析可知,基准线选取主要有以下两种情况:第1种情况为选取水平面为基准线^[17],第2种情况为选取地层表面为基准线^[5]。本次研究的主要对象为公式(2)等号右边的第2项,也即压力水头的分布变化,其反映的是过水断面上各点平均孔压所对应的压强高度,与围岩内初始孔隙水压力和隧道开挖扰动影响等因素有关,因此可知,围岩内孔隙水压的求解不受基准线选取的影响。为了简化计算,本文中选取地下水位线作为半无限含水层中开挖隧道工况下的参考基准线,选取地层表面作为水体下开挖隧道工况条件的参考基准线分别进行计算,如图1所示。

隧道围岩渗流计算中透水边界条件主要分为隧道外透水边界和隧道内表面透水边界两大类。其中隧道外透水边界通常以水位线位置来确定,并采用总水头表征,分为两种情况考虑,如图1所示。在排水隧道设计时,根据隧道施工工艺和排水设计原

则的不同，隧道渗流计算过程中内表面透水边界的选取不同，在无支护（毛洞）或滞后支护和无防水结构的临时支护条件下，隧道内表面渗流边界条件通常按照零孔隙水压力处理；实际隧道施工为了保障围岩的稳定性通常采取管片衬砌支护和注浆等措施，此时采用上述模型进行计算时，内边界的孔压并不为 0，且沿圆周方向呈非均匀分布，依据全水头定义并结合本文中参考基准线的假设可知，在衬砌及时支护和同步注浆等工况条件下进行二维渗流计算时，通常按照固定水头边界条件进行考虑；当计算模型内表面存在内水压力时，如衬砌与地层之间为封闭式排水系统或引、排水隧道计算，此种情况下上述计算模型内表面可设定为孔隙水压力为非零常量。

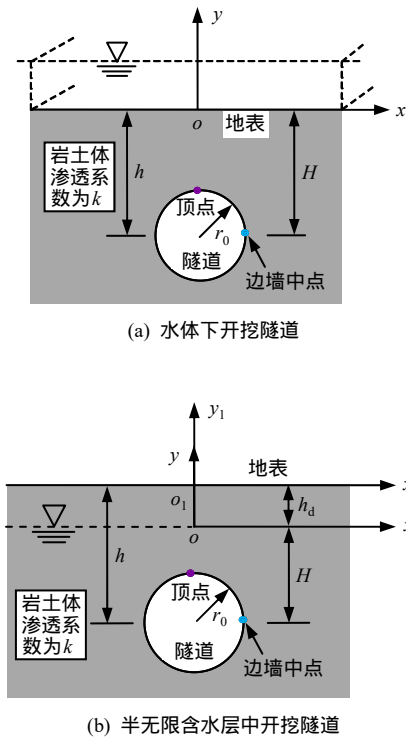


图 1 半无限含水层中隧道和下水隧道简化计算模型
Fig.1 Models of in-aquifer tunnel and underwater tunnel excavation

实际的隧道施工过程较为复杂，应当根据具体的工况条件选取合适的渗流边界条件进行计算。而选取不同透水边界条件对衬砌外水压力、围岩孔隙水压力分布以及涌水量计算结果的影响程度，以及在深埋和浅埋隧道设计中考虑地下水渗流影响时，透水边界条件的选取对深、浅埋隧道的影响程度等问题均关乎隧道设计与施工的安全稳定和经济合理性，现有文献尚未针对上述问题进行合理的解答，因此，首先需要确定隧道围岩内孔隙水压力和涌水

量计算公式，并对不同透水边界条件下排水型隧道涌水量和围岩孔隙水压力分布规律进行分析，确定流体边界条件对浅埋和深埋隧道的影响，为施工、支护和排水结构的设计提供一定的理论指导。

3 隧道围岩内孔隙水压力解析分析

3.1 计算模型透水边界条件表征

假设隧道在开挖前后计算模型中基准线处测压管水头保持不变^[6, 17, 20-21]，如图 1 所示。根据式(2)，隧道内、外透水边界条件采用测压管水头表示形式如下：

(1) 隧道外透水边界

在水体下开挖隧道施工工况条件下，水位位于地表以上，地表为隧道外透水边界，在不考虑大气压的情况下，地表处的压力水头为 $H - h$ ，位置水头为 0，如图 1(a)所示，此处测压管水头为压力水头，表示为

$$h(y = 0) = H - h \tag{3}$$

在半无限含水地层中开挖隧道施工工况条件下，地下水位位于地表以下 h_d 处，地下水位线为隧道外透水边界，在不考虑大气压的情况下，水位线处水压力 $p = 0$ ，如图 1(b)所示，此处测压管水头即为位置水头，表示为

$$h(y = 0) = 0 \tag{4}$$

(2) 隧道内表面透水边界

在无衬砌支护或为具有一定透水性衬砌支护时，上述二维计算模型的内表面视为地下水渗流的自由面，此时隧道内表面水压力为 0，即测压管水头为位置水头，表示为

$$h(r = r_0) = y \tag{5}$$

然而 Celestino 等^[22]认为在有衬砌或注浆施工情况下，隧道内表面水压力通常不为 0。Celestino 将隧道内表面水压力假设为一个常量，且认为隧道内表面的孔隙水压力通常不会超过该处的初始静水压。Mohamed^[20]认为，隧道内表面的孔隙水压力等于隧道顶点初始静水压力与一个系数常量的乘积，其中该系数不为 0 且小于等于 1。

上述两种情况可归纳为等水压排水条件^[16]，则隧道内表面的透水边界条件采用测压管水头形式可表示为

$$h(r = r_0) = y + \beta(H - r_0) \tag{6}$$

式中： β 为水压比例系数，表示稳定渗流情况下，隧道内表面恒定压力水头与隧道顶点初始静水压力

水头的比值。根据文献[20]和零孔压排水条件分析可知，水压比例系数 β 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

隧道内表面透水边界为固定水头 h_a 时，内表面排水条件表示为

$$h(r=r_0) = h_a \quad (7)$$

根据上述分析可知，依据水位位置条件、施工工艺和隧道防排水设计原则不同，隧道渗流计算透水边界条件的组合形式可分为：水体下-等水压排水、水体下-等水头排水、含水层中-等水头排水、含水层中-等水压排水 4 种类型进行分析。

3.2 隧道围岩内孔隙水压力解析解

保角变换法是求解拉普拉斯方程在复杂边界条件问题中常用的方法之一，Verruijt^[23]提供了一种保角变换映射函数：

$$w = w(z) = \frac{z + Ai}{z - Ai} \quad (8)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= (L - \sqrt{L^2 - r^2}) / r \\ A &= L(1 - \alpha^2) / (1 + \alpha^2) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

可将 z 平面内半径为 r 的隧道圆周和距隧道中心为 L 的水平线映射到 w 平面内的两个圆周上，如图 2 所示。

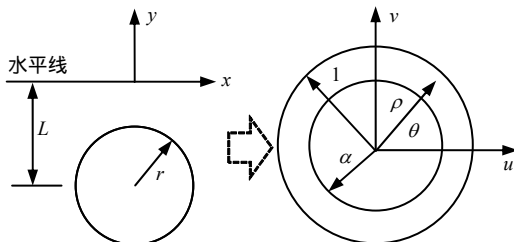


图 2 w 平面内的映射图像
Fig.2 w -plane map image

根据上述保角变换方法，式(1)经过变换后在 w 平面内可表示为

$$\frac{\partial^2 h}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial v^2} = 0 \quad (10)$$

针对上述拉普拉斯方程直接求解较为困难，采用直接代入验证方法可知，在 w 平面内线性方程(10)的通解可采用级数形式表示，Park^[19]计算得出了在 w 平面内全水头解一般表达形式：

$$h = C_1 + C_2 \ln \rho + \sum_{n=1}^{\infty} (C_3 \rho^n + C_4 \rho^{-n}) \cos n\theta \quad (11)$$

式中： ρ 和 θ 分别为 w 平面内复变量 w 的模和辐角度； C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 均为常系数。

结合不同的边界条件可以求得 w 平面中围岩内总水头的分布表达式，进而根据式(2)可求出围岩内孔隙水压分布表达式。在实际应用中还需要将求解结果变换到 z 平面内方可应用，而由 w 平面变换到 z 平面对于多数技术人员而言比较困难。为此，本文中根据上述透水边界条件分析，结合公式(11)和文献[19]中的求解方法，求得 w 平面内不同透水边界条件下围岩孔隙水压力的具体解，并采用文献[20]中的逆变换方法得出 z 平面内不同透水边界条件下隧道围岩内孔隙水压力的表达式分别为

3.2.1 水体下开挖隧道

水体下开挖隧道计算工况，如图 1(a)所示，采用保角变换方法时相关计算参数为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= (h - \sqrt{h^2 - r_0^2}) / r_0 \\ A_1 &= h(1 - \alpha_1^2) / (1 + \alpha_1^2) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

结合式(3)、(6)、(11)可知，水体下-等水压排水条件下，隧道围岩内孔隙水压 P_1 为

$$\begin{aligned} P_1 &= -\gamma_w y + \gamma_w (H - h) - \\ &\gamma_w \frac{-\beta(H - r_0) + A_1 + H - h}{\ln \alpha_1} \ln \rho - \\ &2\gamma_w A_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_1^{2n}}{\alpha_1^{2n} - 1} (\rho^n - \rho^{-n}) \cos n\theta \end{aligned} \quad (13)$$

同理，水体下-等水头 (h_a) 排水条件下，围岩内孔隙水压 P_2 为

$$P_2 = -\gamma_w y + \gamma_w \left(H - h + \frac{h_a - H + h}{\ln \alpha_1} \ln \rho \right) \quad (14)$$

式中： ρ 和 θ 分别为 w 平面内复变量 w 的模和辐角度，可由下式确定：

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{\sqrt{(x^2 + y^2 - A_1^2)^2 + 4A_1^2 x^2}}{x^2 + (y - A_1)^2} \\ \theta &= \arccos \frac{x}{x^2 + (y + h)^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3.2.2 半无限含水层中开挖隧道

半无限含水地层中开挖隧道计算工况如图 1(b)所示，采用保角变换方法时相关计算参数为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= (H - \sqrt{H^2 - r_0^2}) / r_0 \\ A_2 &= H(1 - \alpha_2^2) / (1 + \alpha_2^2) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

同理可以求出隧道内边界为等水压和等水头两种排水条件下的围岩孔隙水压力分布表达式。为了便于与水体下开挖隧道计算结果进行对比，设置新坐标系 $x_1 o_1 y_1$ ，如图 1(b)所示，新坐标系与水体下开

挖隧道计算工况下的坐标系设置相同 均位于地表。基于直角坐标系坐标变换原则，可得出新坐标系中围岩内孔隙水压力分布表达式如下：

含水层中-等水压排水条件下，隧道围岩内孔隙水压 P_3 为

$$P_3 = -(y_1 + h - H)\gamma_w + \gamma_w \frac{\beta(H - r_0) - A_2}{\ln \alpha_2} \ln \rho - 2A_2\gamma_w \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_2^{2n}}{\alpha_2^{2n} - 1} (\rho^n - \rho^{-n}) \cos n\theta \quad (17)$$

含水层中-等水头 (h_a) 排水条件下，隧道围岩内孔隙水压 P_4 为

$$P_4 = -(y_1 + h - H)\gamma_w + \frac{h_a\gamma_w}{\ln \alpha_2} \ln \rho \quad (18)$$

其中：

$$\rho = \frac{\sqrt{(x_1^2 + (y_1 + h - H)^2 - A_2^2)^2 + 4A_2^2 x_1^2}}{x_1^2 + (y_1 + h - H - A_1)^2} \quad (19)$$

$$\theta = \arccos \frac{x}{x_1^2 + (y_1 + 2h - H)^2}$$

3.3 解析解验证

为了验证上述解析解的准确性，以一算例进行分析，并将解析计算结果与数值分析结果进行对比，设地层为连续、均质、各项同性砂土层，隧道中心距地表的距离 $h = 20$ m，隧道直径 $D = 8$ m，水的重度 $\gamma_w = 10$ kN/m³，岩土体的渗透系数 $k = 0.428$ cm/s。隧道内外透水边界条件分别为：水位位于地表上方 2 m 处，隧道内表面水压系数为 0.5 时；水位位于地表上方 2 m 处，隧道内表面固定水头为 -10 m 时；水位线位于地表以下 2 m 处，隧道内表面水压系数为 0.5 时；水位线位于地表以下 2 m 处，隧道内表面固定水头为 -10 m 时。

由式 (13) (17) 可知，等水压排水条件下，围岩孔压计算公式中含有无限级数项，使得计算过程复杂且计算成本较高。为了简化计算，本文中计算时级数项选取至第 4 项，即 $n = 4$ 时。解析解与数值解计算结果如图 3、4、5 以及表 1 所示，其中图 3 为上述 4 种不同透水边界条件下隧道顶点上方围岩内孔隙水压本文解析解与数值解的对比分析。图 4 为上述 4 种不同透水边界条件下隧道水平直径处围岩内孔隙水压力数值解与解析解的对比分析。图 5 为距隧道中心半径为 10 m 的边界处围岩内孔隙水压解析解与数值解的对比分析，半径为 10 m 边界处计算点位置如图 5 实心圆标点所示。此外，在图 3、4、5 中，有本文解析解得出的结果由不同的曲线表

示，数值计算的结果由离散的标示符表示。

表 1 为 $\beta = 0.5$ 、水位位于地表以上 2 m 和地表以下 2 m 时，隧道顶点上方 10 m 处孔隙水压的数值解和解析解。由表分析可知，等水压排水条件下，当 $n = 4$ 时，解析解计算结果存在一定的误差；但从图 3、4、5 分析可知，不同排水条件下，解析解和数值解变化趋势一致，能够较好反映围岩内孔压的分布规律。

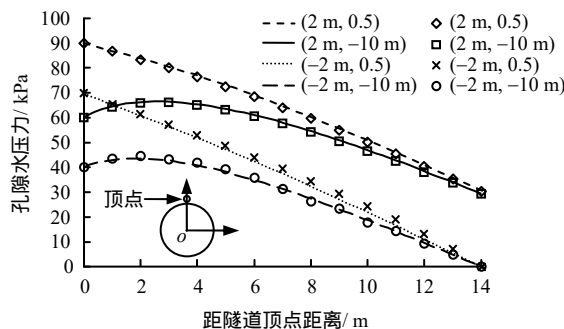


图 3 隧顶点上方孔隙水压力分布
Fig.3 Pore water pressure distributions at the top of excavated tunnel

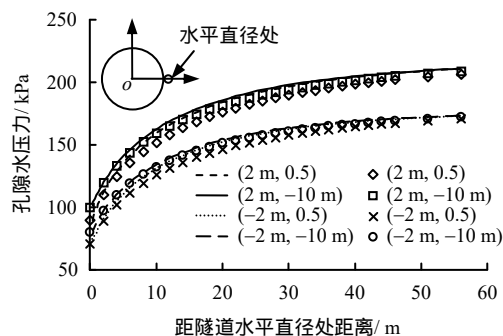


图 4 隧道水平直径处孔隙水压力分布
Fig.4 Pore water pressure distributions as a function of distance to horizontal diameter

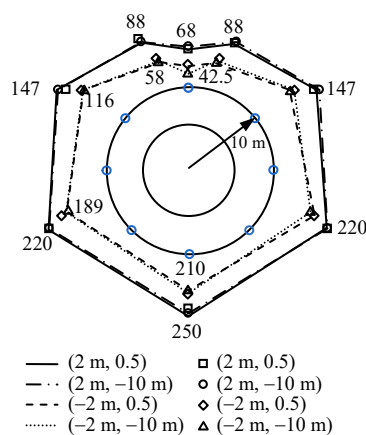


图 5 隧道圆周向孔隙水压力分布 (单位: kPa)
Fig.5 Pore water pressure distribution around circular tunnel (unit: kPa)

表 1 等水压排水条件下孔压解析解与数值解
Table 1 Numerical and analytical solutions for pore pressure under condition of equal water pressure drainage

工况条件	数值解 / kPa	解析解(精确) / kPa	解析解 (n=4) / kPa	误差 / %
水体下	50.16	50.90	48.35	5.00
含水层中	24.38	22.51	20.83	7.46

4 透水边界条件的影响

4.1 对隧道围岩孔隙水压力的影响

隧道顶点和水平直径处为本次研究的两个关键点位置，如图 1 所示。计算中以解析解验证案例的相关参数为依据，在等水压排水条件下， $n=4$ ，不同透水边界条件下隧道顶拱围岩内的孔隙水压力和水平直径处围岩内的孔隙水压力随着埋深直径比 (h/D) 的变化规律如图 6 和图 7 所示。图中，-2 m 和 2 m 分别表示水位线位于地表以下和地表以上 2 m，-10 m 和 -20 m 表示隧道内表面的总等水头大小，0.2 和 0.5 表示 β 系数（如式 (6) 所示）的大小。

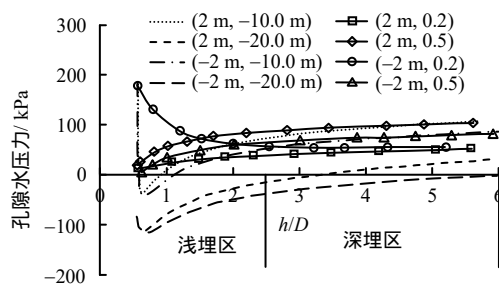


图 6 隧道顶点孔隙水压力随 h/D 的变化特征
Fig.6 Characteristics of pore water pressure at top with the change of h/D

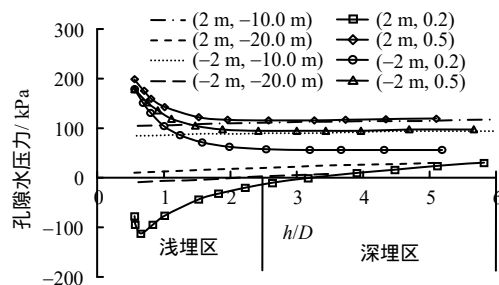


图 7 水平直径处孔隙水压力随 h/D 的变化特征
Fig.7 Characteristics of pore water pressure at horizontal diameter with the change of h/D

根据图 6 和图 7 分析可知，不同透水边界条件下，随着 h/D 的增加，隧道顶拱上部和水平直径处围岩的孔隙水压力变化特征不同；同时随着 h/D 的

增加，围岩内孔隙水压的变化逐渐趋于稳定。隧道内表面的透水边界条件对围岩内孔隙水压的影响相对较大。其他条件相同时，水位越高，对围岩孔压的影响越大。当 $h/D > 2.5$ 时，边界条件的变化对隧道顶拱和水平直径处的孔隙水压影响程度相对较小，且随着 h/D 继续增大这种影响作用不断减弱；当 $h/D < 2.5$ 时，边界条件的变化对隧道顶拱和边墙处的孔隙水压影响程度较大，且随着 h/D 的减小这种影响作用不断增强。

同时文献[24]根据隧道围岩的破坏机制将 $h/D = 2.5$ 作为浅埋隧道和深埋隧道的判据。不同透水边界对浅埋隧道和深埋隧道均有一定的影响，结合上述判据分析可知，相对于深埋隧道而言，透水边界对浅埋隧道围岩孔压的影响更加明显。因此，在进行浅埋隧道设计时，尤其是水体下隧道设计施工中，应当重视透水边界条件变化对围岩孔压或衬砌外水荷载的影响。

4.2 对隧道涌水量的影响

根据上述不同边界条件下隧道围岩内孔隙水压力表达式，并结合达西定律可以求出隧道内每延米的涌水量为

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= -k \int_0^{2\pi} \frac{\partial p_1}{\partial r} r d\varphi = \frac{2\pi k [A_1 + H - h - \beta(H - r_0)]}{\ln \left(\frac{h}{r_0} + \sqrt{\frac{h^2}{r_0^2} - 1} \right)} \\
 Q_2 &= -k \int_0^{2\pi} \frac{\partial p_2}{\partial r} r d\varphi = \frac{2\pi k (-h_a + H - h)}{\ln \left(\frac{h}{r_0} + \sqrt{\frac{h^2}{r_0^2} - 1} \right)} \\
 Q_3 &= -k \int_0^{2\pi} \frac{\partial p_3}{\partial r} r d\varphi = \frac{2\pi k [A_2 - \beta(H - r_0)]}{\ln \left(\frac{H}{r_0} + \sqrt{\frac{H^2}{r_0^2} - 1} \right)} \\
 Q_4 &= -k \int_0^{2\pi} \frac{\partial p_4}{\partial r} r d\varphi = \frac{-2\pi k h_a}{\ln \left(\frac{H}{r_0} + \sqrt{\frac{H^2}{r_0^2} - 1} \right)}
 \end{aligned} \tag{20}$$

式中： Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 分别为围岩孔压为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 时隧道每延米的涌水量。

采用验证计算案例中的相关参数，不同边界条件下隧道涌水量随着 h/D 的变化曲线如图 8 所示，图例中相关符号和数字的意义同上。由图分析可知，其他条件一定时，不同透水边界条件下隧道的涌水量随着 h/D 的变化趋势基本相同，即随着 h/D 的增加，隧道涌水量逐渐减小并逐渐保持稳定，符合隧道渗流涌水的一般规律；同时随着 h/D 的减小，

隧道涌水量增加速率不断增大。当 $h/D > 2.5$ 时，不同透水边界条件下隧道的涌水量变化速率逐渐减小，不同边界条件对隧道的涌水量的影响区域缓和；当 $h/D < 2.5$ 时，不同渗透边界条件下隧道涌水量大小不同，透水边界条件对隧道涌水量的影响随着 h/D 的减小越来越显著。埋深对隧道涌水量的影响相对较大，隧道埋深较浅时，涌水量变化较为明显，此时透水边界条件的影响较深埋隧道显著。

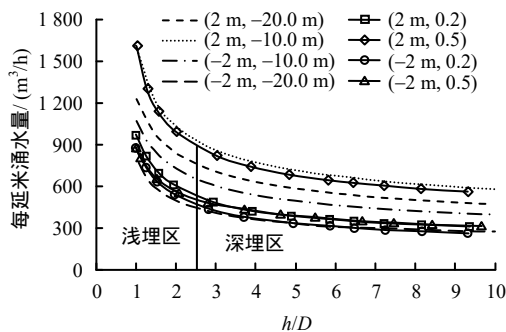


图 8 隧道涌水量随 h/D 的变化特征
Fig.8 Tunnel water inflow characteristics with the change of h/D

综合分析不同透水边界条件下孔隙水压和涌水量随 h/D 的变化特征可知，在排水条件下，与深埋隧道相比，透水边界条件对浅埋隧道渗流计算结果影响较大，因此，正确评估隧道的透水边界条件对浅埋渗流计算非常重要。就海底隧道而言，多属于浅埋隧道，且具有无穷的水源补给特点，在不同施工工艺条件下，其地下水渗流更易受边界条件的影响。目前国内海底隧道施工主要以矿山工法和盾构工法为主，根据矿山工法支护相对滞后开挖的施工特点，采用该工法进行海底隧道施工设计时，隧道渗流计算边界条件宜设置为零孔隙水压力流体边界条件，这与现有文献[25-27]中进行厦门海底隧道渗流计算中边界条件取值相同；而对于盾构工法施工中隧道开挖、管片支护和壁后注浆几乎是同步执行，预制管片抗渗性能良好，管片外水压不为 0 且沿隧道圆周呈非均匀分布特点，因此盾构法施工设计时宜采用固定水头渗流边界条件；海底隧道在运营过程中，考虑到排水设施的影响，围岩内孔隙水压力相对减小，此种情况下的渗流分析宜选取孔隙水压力为非零常量边界条件进行计算；排水隧道（如重庆主排水隧道工程等）存在高压内水压力作用，采用上述模型进行分析时宜选取孔隙水压力为非零常量边界条件进行计算。由此可知在进行海底隧道渗流计算和排水设计时应当充分考虑施工工况的不同，选取合理的渗流边界条件进行计算。

5 结 论

(1) 根据水位位置、施工工艺和排水设计原则不同，将隧道渗流计算透水边界划分为水体下-等水头排水、水体下-等水压排水、含水层中-等水头排水、含水层中-等水压排水 4 种组合透水边界条件并进行分析。基于此，采用复变函数理论和保变换及其逆变换求得每种透水边界条件下隧道围岩内孔隙水压力和涌水量解析解，孔压解析解与数值解对比结果吻合较好，且文中第 2 类透水边界条件对应的涌水量计算公式与隧道内气压为 0 时 Lei 的解析解^[5]计算结果一致，表明文中得出的孔隙水压力和涌水量计算公式具有较好的可靠性。

(2) 分析了不同渗透边界条件下孔隙水压力和涌水量随着 h/D 的变化规律，研究表明透水边界对浅埋和深埋隧道均有不同程度的影响，相对于深埋隧道而言，浅埋隧道渗流计算结果受透水边界条件的影响较大。因此在浅埋隧道（尤其是水下隧道）进行结构设计计算时，透水边界条件的影响应当给予充分考虑。根据研究结果对目前国内几种典型的隧道施工工况对应的渗透边界选取进行了分析和建议。

然而由于地下隧道施工工况以及地下水流动情况较为复杂，本文为了便于解析计算结果的得出，采用了含水层地下水位不变和地层渗透特性均一性等假设，得出的结论还是初步的，但相关解析结果在一定程度上能够反映厦门等海底隧道渗流场的变化规律，且文中的透水边界和相关结论无法详尽囊括，有待借助于相关工程实践进一步验证和完善。

参 考 文 献

- [1] 高健, 张义同, 乔金丽. 渗透力对隧道开挖面稳定性影响分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1547 - 1553.
GAO Jian, ZHANG Yi-tong, QIAO Jin-li. Face stability analysis of tunnels with consideration of seepage force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1547 - 1553.
- [2] 王浩然, 黄茂松, 吕玺琳, 等. 考虑渗流影响的盾构隧道开挖面稳定上限分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1696 - 1704.
WANG Hao-ran, HUANG Mao-song, LÜ Xi-ling, et al. Upper-bound limit analysis of stability of shield tunnel face considering seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1696 - 1704.
- [3] 原华, 张庆贺, 胡向东, 等. 大直径越江盾构隧道各向

- 异性渗流应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2130 - 2137.
- YUAN Hua, ZHANG Qing-he, HU Xiang-dong, et al. Analysis of coupled anisotropic seepage and stress of large diameter river-crossing shield tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2130 - 2137.
- [4] 吉小明, 谭文. 饱和含水砂层地下水渗流对隧道围岩加固效果的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3655 - 3662.
- JI Xiao-ming, TAN Wen. Study of influence of groundwater seepage on reinforcement effect of tunnel surrounding rock in saturated water-bearing sand layer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3655 - 3662.
- [5] LEI SHIZHONG. An analytical solution for steady flow into a tunnel[J]. **Ground Water**, 1997, 37(1): 23 - 26.
- [6] FERNANDEZ G. Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel – part 1: guideline for estimate of ground water inflow rate[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25(5): 560 - 566.
- [7] 吴祖松, 梁波, 王元清, 等. 水下圆形隧道注浆加固区渗流特征理论研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 89 - 94.
- WU Zu-song, LIANG Bo, WANG Yuan-qing, et al. Research on seepage characteristics theory of grouted reinforced area of underwater round tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.2): 89 - 94.
- [8] 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.
- [9] 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(Supp.2): 3567 - 3573.
- [10] 房倩, 张顶立, 黄明琦. 基于连续介质模型的海底隧道渗流问题分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3776 - 3784.
- FANG Qian, ZHANG Ding-li, HUANG Ming-qi. Analysis of seepage problem induced by subsea tunnel excavation based on continuum medium model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3776 - 3784.
- [11] LEE IN-MO. Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2004, 19(3): 273 - 281.
- [12] LI DIYUAN. Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24(3): 260 - 268.
- [13] CHEN YING. Coupled seepage elasto plastic damage analysis of saturated porous media and its application to water conveyance tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2014, 44(3): 80 - 87.
- [14] 吴金刚, 谭忠盛, 皇甫明. 高水压隧道渗流场分布的复变函数解析解[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(9): 31 - 34, 68.
- WU Jin-gang, TAN Zhong-sheng, HUANG Fu-ming. Analytic solution of complex function to distribution of seepage field of tunnel with high water pressure[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2010, 27(9): 31 - 34, 68.
- [15] 王德明, 张庆松, 张霄, 等. 断层破碎带隧道突水突泥灾变演化模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2851 - 2860.
- WANG De-ming, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, et al. Model experiment on inrush of water and mud and catastrophic evolution in a fault fracture zone tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2851 - 2860.
- [16] 项彦勇. 隧道力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- XIANG Yan-yong. Introduction to tunnel mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [17] KOLYMBAS DIMITRIOS. Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, 22(1): 23 - 27.
- [18] MING HUANGFU. Analytical solutions for steady seepage into an underwater circular tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25: 391 - 396.
- [19] PARK KYUNG-HO. 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: 206 - 209.
- [20] MOHAMED EL TANI. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18(1): 9 - 55.
- [21] MOHAMED EL TANI. Helmholtz evolution of a semi-infinite aquifer drained by a circular tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25: 54 - 62.
- [22] CELESTINO T B, GIAMBASTIANI M, BORTOLUCCI A A. Water inflows in tunnels: back analysis and role of different lining systems[C]//Proceedings of The World Tunnel Congress Ita-Aites 2001. Milan: [s. n.], 2001: 547 - 554.
- [23] VERRUIJT A. Deformations of an elastic half plane with a circular cavity[J]. **International Journal of Solids & Structures**, 1998, 35(21): 2795 - 2804.
- [24] 钟小春. 盾构隧道管片土压力的研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
ZHONG Xiao-chun. Research on earth pressure for shield tunnel lining[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [25] 郭小红. 厦门翔安海底隧道风化槽衬砌结构稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
GUO Xiao-hong. Research on lining stability of Xiamen Xiang'an subsea tunnel in weathered trough[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [26] 陈卫忠, 于洪丹, 郭小红, 等. 厦门海底隧道海域风化槽段围岩稳定性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(5): 873 - 884.
CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, GUO Xiao-hong, et al. Study on stabilities of surrounding rocks through weathered slot in Xiamen subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(5): 873 - 884.
- [27] 李廷春, 李术才, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(3): 397 - 401.
LI Yan-chun, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong, et al. Coupled fluid-mechanical analysis of Xiamen subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 397 - 401.

上接第 3982 页

- [10] 国家安全生产监督管理总局. MT/T 593.1 - 2011 人工冻土物理力学性能试验[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
State Administration of Work Safety. MT/T 593.1 - 2011 Artificial frozen soil physics mechanics performance test[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.
- [11] 单仁亮, 杨昊, 郭志明, 等. 负温饱水红砂岩三轴压缩强度特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(增刊 2): 3657 - 3664.
SHAN Ren-liang, YANG Hao, GUO Zhi-ming, et al. Experimental study of strength characters of saturated red sandstone on negative temperature under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.2): 3657 - 3664.
- [12] 单仁亮, 郭志明, 刘校东, 等. 低温冻结岩土三轴试验机的改进研究[J]. **煤炭工程**, 2015, 47(4): 96 - 98.
SHAN Ren-liang, GUO Zhi-ming, LIU Xiao-dong, et al. Improvement of low-temperature permafrost triaxial testing machine[J]. **Coal Engineering**, 2015, 47(4): 96 - 98.
- [13] 尹珍珍, 陈有亮, 王鹏. 上海人工冻结黏土单轴无侧限抗压强度试验研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(3): 788 - 792.
YIN Zhen-zhen, CHEN You-liang, WANG Peng. Uniaxial unconfined compressive strength test on artificially frozen clay in Shanghai[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 788 - 792.
- [14] 单仁亮, 白瑶, 随顺猛, 等. 淡水冰三轴压缩力学特性试验研究[J]. **应用基础与工程科学学报**, 2018, 26(4): 901 - 917.
SHAN Ren-liang, BAI Yao, SUI Shun-meng, et al. Experimental research on mechanical characteristics of freshwater ice under triaxial compression[J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2018, 26(4): 901 - 917.
- [15] 单仁亮, 白瑶, 黄鹏程, 等. 三向受力条件下淡水冰破坏准则研究[J]. **力学学报**, 2017, 49(2): 467 - 477.
SHAN Ren-liang, BAI Yao, HUANG Peng-cheng, et al. Experimental research on failure criteria of freshwater ice under triaxial compressive stress[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2017, 49(2): 467 - 477.