

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.018

# 动水位作用下海底隧道非线性渗流场解析研究

刘翔<sup>1</sup>, 黎奎辰<sup>1</sup>, 王东池<sup>1</sup>, 张雨<sup>2</sup>, 姜谔男<sup>1</sup>, 房倩<sup>3</sup>

(1. 大连海事大学道路与桥梁研究所; 2. 北京城建集团有限责任公司; 3. 北京交通大学土木建筑工程学院)

**摘要:** 针对流体在海底隧道衬砌与注浆圈等低渗透介质中的渗流行为会偏离达西渗流的问题, 采用 Hansbo 非线性渗流模型描述衬砌与注浆圈内的渗流规律, 分别利用复变函数法与镜像法推导了动水位作用下海底隧道非线性渗流场的解析解, 构建了可考虑衬砌、注浆圈或无支护等不同支护方式解析模型; 通过与数值模拟结果及其他理论解析解、室内模型试验结果对比验证了该解析解的准确性, 并分析了非线性指数、动水位、注浆圈厚度与衬砌厚度的比值等因素对渗流场的影响。结果表明: 当非线性指数增大时, 隧道涌水量随之减少, 注浆圈承担更大的孔隙水压力, 从而降低衬砌所承担的孔隙水压力; 在周期性动水位的作用下, 隧道涌水量与孔隙水压力均会产生周期性变化; 注浆圈能够削弱动水位对衬砌的影响, 随着注浆圈厚度与衬砌厚度比值的增大, 隧道涌水量进一步减小, 注浆圈承担的孔隙水压力增大, 从而减小衬砌所承担的孔隙水压力。

**关键词:** 动水位; 非线性渗流; 衬砌; 注浆圈; 渗流场解析解; 海底隧道; 复变函数法; 镜像法

**中图分类号:** U459.5; O357.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2026)05-0155-09

## Analytical study on nonlinear seepage field of subsea tunnels under dynamic water levels

Liu Xiang<sup>1</sup>, Li Kuichen<sup>1</sup>, Wang Dongchi<sup>1</sup>, Zhang Yu<sup>2</sup>, Jiang Annan<sup>1</sup>, Fang Qian<sup>3</sup>

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University;

2. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd.; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University)

**Abstract:** In view of the problem of the seepage behavior of fluids in low-permeability media, such as the lining and grouting zone of subsea tunnels, may deviate from Darcy seepage, the Hansbo nonlinear seepage model was employed to describe the seepage behavior within the lining and grouting zone. Analytical solutions for the nonlinear seepage field of a subsea tunnel under dynamic water levels were derived using the complex variable method and the method of images, respectively. Furthermore, an analytical model applicable to different support conditions, such as lining, grouting zone, or no support, was established. The accuracy of the analytical solutions was verified through comparisons with numerical simulation results, other theoretical analytical solutions, and laboratory model test results, and the effects of factors such as the nonlinear parameter, dynamic water levels, and the ratio of grouting zone thickness to lining thickness on the seepage field were analyzed. The results show that as the nonlinear parameter increases, the tunnel water inflow decreases, and the grouting zone sustains greater pore water pressure, thereby reducing the pore water pressure sustained by the lining; under the action of periodic dynamic water levels, both the tunnel water inflow and pore water pressure vary periodically; the grouting zone can attenuate the influence of dynamic water levels on the lining, and as the ratio of grouting zone thickness to lining thickness increases, the tunnel water inflow further decreases and the pore water pressure sustained by the grouting zone increases, thereby reducing the pore water pressure sustained by the lining.

**Key words:** dynamic water level; nonlinear seepage; lining; grouting zone; analytical solution for seepage field; subsea tunnel; complex variable method; method of images

伴随着我国交通强国战略实施的深入,我国沿海地区迎来了海底隧道规划和建设的热潮<sup>[1-2]</sup>。隧道渗水和由孔隙水压过大引起的隧道结构变形、破坏等问题,是建设期与运营期需要重点关注的问题,高估或低估海底隧道渗流场可能导致设计过于保守或引发严重事故<sup>[3-6]</sup>。因此,准确计算海底隧道渗流场对提高隧道工程的安全性及经济性具有重要意义。

国内外许多学者对渗流场问题进行了研究,如 El Tani<sup>[7]</sup>克服了无压隧洞渗流方程中傅里叶级数系数求解烦琐等问题,求解出隧道渗流场解析解,但该研究并未考虑衬砌与注浆圈;Kolymbas 等<sup>[8]</sup>通过共形映射,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52108363);中国博士后基金面上项目(2023T160074)

**作者简介:** 刘翔(1992—),男,副教授,博士,主要从事海底隧道多物理场耦合研究。E-mail: xliu@dlmu.edu.cn

考虑衬砌影响得到适用于地表变水头情况下的渗流场解析解;Harr<sup>[9]</sup>通过镜像法,并假定土层为多孔弹性介质,得到适用于高水头、深埋圆形洞室的围岩孔隙水压解析解;应宏伟等<sup>[10]</sup>同样通过镜像法求解出高水头深埋注浆隧道渗流场解析解,并且可以退化为 Harr 解<sup>[9]</sup>;张治国等<sup>[11]</sup>基于镜像法和渗流理论得到了富水区山岭深埋圆形隧道衬砌、注浆圈和围岩等关键位置的隧道排水量和水头变化规律;郭玉峰等<sup>[12]</sup>基于质量守恒定律和达西定律,采用保角变换法和 Schwarz 迭代法求解了水下双线平行隧道稳态渗流场;李鹏飞等<sup>[13]</sup>基于镜像法和叠加原理,推导了平行四孔隧道渗流场解析解。

以上研究均是基于达西定律推导的,但实际流体在低渗透介质中会发生非线性渗流<sup>[14]</sup>。常见的非线性渗流模型有 Hansbo、Swartzendruber 和 Slepicka 非线性渗流模型。Zhang 等<sup>[15]</sup>假设注浆圈符合 Hansbo 非线性渗流模型,土体符合达西线性渗流,利用复变函数法得到隧道涌水量及孔隙水压力解析解,并用 FLAC3D 验证了其正确性。张丙强等<sup>[16]</sup>假设土体服从 Slepicka 指数渗流模式,衬砌服从达西渗流,基于镜像法及复变函数法,求解出隧道涌水量的解析解。傅鹤林等<sup>[6]</sup>将隧道开挖扰动区考虑为非线性渗流,通过镜像法求解出考虑衬砌与注浆圈的渗流场解析解。

目前,关于非线性渗流场的研究仍较为有限,尚缺少考虑衬砌与注浆圈共同作用下海底隧道非线性渗流场的研究,尤其是考虑动水位的情况。因此,本文引入 Hansbo 非线性渗流模型,分别利用两种不同解析方法求解动水位作用下含衬砌与注浆圈的海底隧道非线性渗流场解析解,并与数值模拟结果和其他理论解析解进行对比分析,同时通过参数分析讨论了非线性参数和其他工程参数对非线性渗流场的影响结果。

1 计算模型

1.1 动水位

隧道渗流场简化计算模型如图 1 所示。以海床面为位势零面,研究对象为饱和、均质、连续且各向同性的半无限岩体。岩体内部开挖一座外半径为  $r_1$  的隧道,隧道中心至海床面的垂直距离(即隧道埋深)记为  $s$ ,围岩渗透系数为  $k_s$ ,衬砌内半径为  $r_0$ ,注浆圈半径为  $r_g$ ,分析时段内,相对于海床面的最高水位和最低水位分别记为  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$ 。海域水位会受到潮汐、风暴增水及海啸等因素的影响而随时间变化。于茜等<sup>[17]</sup>的研究表明,动水位变化可由余弦函数表示,在此基础上,本文采用周期函数来描述动水位:

$$H_t = \bar{H} + \Delta H \cos(\omega t - \varphi) \tag{1}$$

式中: $H_t$  为海床处动水位对应的总水头; $\bar{H}$  为分析时段内的平均水位; $\Delta H$  为水位变化幅值; $\omega$  为动水位变化的角频率; $t$  为时间; $\varphi$  为初始相位角。

1.2 基本假定

在求解动水位作用下海底隧道渗流场时,作如下基本假设:围岩、注浆圈和衬砌均为饱和、均质、连续且各向同性介质,衬砌内侧的孔隙水压为零。岩体和水体均不可压缩,且地下水补给充足;渗流主要沿隧道径向发生,注浆圈和衬砌内的渗流可简化为轴对称渗流问题。对于任一给定时刻,将动水位作为该时刻的边界水头,忽略介质储水效应和渗流响应的滞后,将渗流场近似视为准稳态渗流场。

围岩中的渗流遵循达西定律,衬砌与注浆圈内的渗流规律采用 Hansbo 非线性渗流模型描述。Hansbo 非线性渗流模型可表示为:

$$v = \begin{cases} k_{nj} i^{m_j} & i \leq i_{ij} \\ k_{lj} (i - i_0) & i > i_{ij} \end{cases} \tag{2}$$

式中: $v$  为渗流速度; $i$  为水力梯度; $i_{ij}$  为第  $j$  种介质由非线性渗流向线性渗流转变的临界水力梯度; $i_0$  为线性渗流段的起始水力梯度; $k_{nj}$ 、 $k_{lj}$  分别为非线性段和线性段的渗透系数; $m_j$  为非线性指数;下标  $j$  为介质类型,

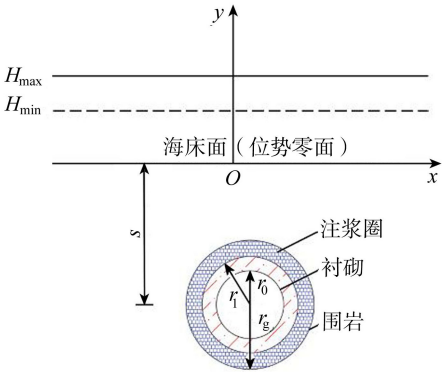


图 1 隧道渗流场简化计算模型  
Fig. 1 Simplified calculation model of tunnel seepage field

$j=1$  表示衬砌,  $j=g$  表示注浆圈。

2 海底隧道渗流场解析解

2.1 复变函数法求解

围岩渗流场的求解属于半无限平面问题,采用保角变换将复杂边界映射为同心环形边界。围岩总水头满足:

$$\frac{\partial^2 H_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_s}{\partial y^2} = 0 \tag{3}$$

式中:  $H_s$  为总水头。

经过保角变换后的控制方程为:

$$\frac{\partial^2 H_s}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 H_s}{\partial \eta^2} = 0 \tag{4}$$

式中:  $\xi, \eta$  分别为保角变换后映射平面内的横、纵坐标。映射后的环形区域内渗流场呈径向对称,因此:

$$\frac{\partial^2 H_s}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_s}{\partial \rho} = 0 \tag{5}$$

其中

$$\rho = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} = \sqrt{\frac{x^2 + (y + A)^2}{x^2 + (y - A)^2}}$$

式中:  $\rho$  为保角变换后映射平面内的无量纲径向坐标;  $A$  为保角变换的几何参数,  $A = \sqrt{s^2 - r_g^2}$ 。

环形区域的边界条件为:

$$\begin{cases} H_s|_{\rho=1} = H_t \\ H_s|_{\rho=\alpha} = H_g \end{cases} \tag{6}$$

式中:  $H_g$  为注浆圈外边界总水头;  $\alpha$  为保角变换后注浆圈外边界对应的无量纲径向坐标,  $\alpha = \sqrt{\frac{s - A}{s + A}}$ 。

求解式(5)可得:

$$H_s = H_t + (H_g - H_t) \ln \rho / \ln \alpha \tag{7}$$

隧道涌水量  $Q_s$  为:

$$Q_s = 2\pi k_s (H_g - H_t) / \ln \alpha \tag{8}$$

式中:  $k_s$  为围岩渗透系数。

2.2 镜像法求解

采用镜像法将半无限渗流场等效为无限平面内源与汇的叠加。任意点  $M$  到实际隧道和镜像隧道中心的距离分别为:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{x^2 + (y + s)^2} \\ d_2 = \sqrt{x^2 + (y - s)^2} \end{cases} \tag{9}$$

式中:  $d_1, d_2$  分别为点  $M$  到汇和源的距离。

根据达西定律和势的叠加原理,围岩总水头为:

$$H_s = \frac{Q_s}{2\pi k_s} \ln \frac{d_1}{d_2} + H_t \tag{10}$$

在注浆圈外边界处,取  $d_1 = r_g$ 。当  $r_g \ll s$  时,可近似认为  $d_2 = 2s$ 。令  $\beta = r_g / 2s$ , 则:

$$H_g = \frac{Q_s}{2\pi k_s \ln \beta} + H_t \tag{11}$$

2.3 衬砌与注浆圈渗流场解析解

衬砌与注浆圈均为低渗透介质,其内部渗流可简化为轴对称径向渗流,并采用 Hansbo 非线性渗流模型描述。则介质  $j$  内的总水头  $H_j$  满足:

$$\begin{aligned} & m_j \frac{d^2 H_j}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_j}{dr} = 0 \quad (m_j > 1, i \leq i_{vj}) \\ & \frac{d^2 H_j}{dr^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{dH_j}{dr} - i_{0j} \right) = 0 \quad (m_j > 1, i > i_{vj}) \end{aligned} \tag{12}$$

其中

$$i_{0j} = \frac{m_j - 1}{m_j} i_{vj}$$

设介质内、外边界半径分别为  $r_{in}$  和  $r_{out}$ , 相应总水头分别为  $H_{in}$  和  $H_{out}$ 。求解式(12)可得:

$$\begin{aligned} & \frac{H_{in} r_{out}^{a_j} - H_{out} r_{in}^{a_j} + (H_{out} - H_{in}) r_{in}^{a_j}}{r_{out}^{a_j} - r_{in}^{a_j}} \quad m_j > 1, i \leq i_{vj} \\ H_j = & \begin{cases} H_{in} + \frac{H_{out} - H_{in}}{\ln(r_{out}/r_{in})} \ln(r/r_{in}) + i_{0j} r_{in} - \frac{(r_{out} - r_{in}) \ln(r/r_{in})}{\ln(r_{out}/r_{in})} & m_j > 1, i > i_{vj} \\ H_{in} + \frac{H_{out} - H_{in}}{\ln(r_{out}/r_{in})} \ln(r/r_{in}) & m_j = 1 \end{cases} \end{aligned} \tag{13}$$

其中

$$a_j = \frac{m_j - 1}{m_j}$$

式中: $a_j$  为用于简化表达的指数参数。对于衬砌,  $r_{in} = r_0, r_{out} = r_1, H_{in} = H_0, H_{out} = H_1$ ; 对于注浆圈,  $r_{in} = r_1, r_{out} = r_g, H_{in} = H_1, H_{out} = H_g$ , 其中  $H_1$  为衬砌与注浆圈交界面总水头,  $H_0$  为衬砌内边界总水头,  $H_0$  计算公式为:

$$H_0 = \frac{p_0}{\gamma_w} + r_0 \sin \theta - s \tag{14}$$

式中: $p_0$  为衬砌内边界孔隙水压力;  $\gamma_w$  为水容重;  $\theta$  为衬砌内边界计算点的极角。

介质  $j$  内的涌水量  $Q_j$  为:

$$\begin{aligned} & 2\pi k_{vj} \frac{a_j (H_{out} - H_{in})}{r_{out}^{a_j} - r_{in}^{a_j}} \quad m_j > 1, i \leq i_{vj} \\ Q_j = & \begin{cases} 2\pi k_{vj} \frac{H_{out} - H_{in} - i_{0j} (r_{out} - r_{in})}{\ln(r_{out}/r_{in})} & m_j > 1, i > i_{vj} \\ 2\pi k_{vj} \frac{H_{out} - H_{in}}{\ln(r_{out}/r_{in})} & m_j = 1 \end{cases} \end{aligned} \tag{15}$$

根据渗流连续条件:

$$Q_s = Q_l = Q_g \tag{16}$$

式中: $Q_l$ 、 $Q_g$  分别衬砌与注浆圈的涌水量。

由于径向水力梯度在介质内边界处最大, 可根据内边界水力梯度是否达到  $i_{vj}$  判断渗流状态。介质  $j$  由非线性段进入线性段时的临界渗流量  $Q_{vj}$  为:

$$Q_{vj} = 2\pi r_{in} k_{vj} (i_{vj} - i_{0j}) \tag{17}$$

文考虑以下两种渗流状态:

$$Q_s = \begin{cases} Q_{gn} = Q_{ln} & Q_s \leq Q_{lg} \\ Q_{gl} = Q_{ln} & Q_{lg} < Q_s \leq Q_{tl} \end{cases} \tag{18}$$

式中: $Q_{gn}$ 、 $Q_{gl}$  分别为注浆圈处于非线性段和线性段时的涌水量;  $Q_{ln}$  为衬砌处于非线性段时的涌水量;  $Q_{tl}$ 、 $Q_{lg}$  分别为衬砌与注浆圈的临界涌水量。

联立式(16)~(18), 可求得注浆圈外边界总水头  $H_g$  和注浆圈与衬砌交界面总水头  $H_1$ 。

### 3 解析解验证

#### 3.1 退化验证

选取 Zhang 等<sup>[15]</sup>研究中的计算参数: 隧道半径 7.4 m, 埋深 52.4 m, 水头 20 m, 衬砌厚度 0.6 m, 注浆圈厚

度 5.4 m,土体渗透系数  $5.0\times10^{-6}$  m/s,衬砌渗透系数  $5.0\times10^{-8}$  m/s,注浆圈渗透系数  $5.0\times10^{-7}$  m/s,衬砌内孔隙水压力 0 kPa。

当  $m=1$  时,本文方法可退化为遵循达西线性渗流的传统方法。取注浆圈半径为 13.4 m,开挖半径为 7.4 m,衬砌厚度分别为 0.5 m 和 0.6 m 两种情况,绘制隧道涌水量与水头变化规律,并与潘以恒等<sup>[18]</sup>线性渗流结果进行对比分析,结果如图 2 所示。可见,两种方法计算结果基本一致,说明本文方法不仅可考虑非线性渗流,也可考虑线性渗流,具有普适性。

3.2 数值分析验证

将海底隧道简化为无衬砌情况,不同相对渗透率( $k_r$ )时 Zhang 等<sup>[15]</sup>解析模型计算所得的海底隧道涌水量( $Q_s$ )与本文数值解和解析解结果对比如图 3 所示。由图 3 可见,在退化为无衬砌情况下,参数  $m_g=1.5$ 、 $i_{lg}=10$  和  $m_g=2.5$ 、 $i_{lg}=15$  两种情况本文计算结果与 Zhang 等<sup>[15]</sup>的计算结果基本吻合,误差不超过 1%。随着相对渗透率的增大,隧道涌水量逐渐减小。相对渗透率对隧道涌水量影响的解析解与数值模拟结果吻合较好,本文解析方法可以较好地计算海底隧道涌水量。值得注意的是,当前版本 FLAC3D 只考虑了线性渗流,本文根据李毅等<sup>[19]</sup>给出的基于 FLAC3D 的单元变渗透系数法来模拟非线性渗流,将非线性渗流考虑为一系列线性渗流的组合来实现对非线性渗流的模拟。

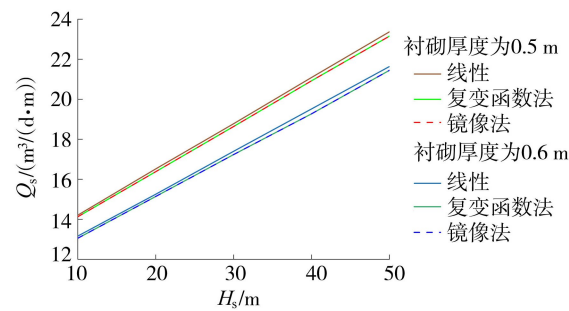


图 2 线性渗流对比分析

Fig. 2 Comparative analysis of linear seepage

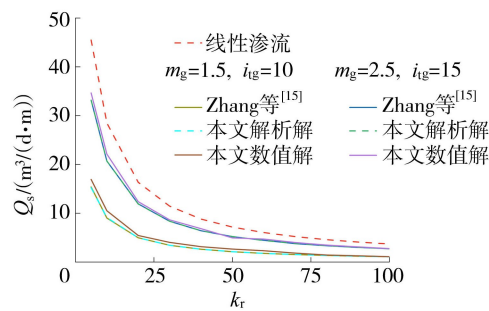


图 3 不同相对渗透率时隧道涌水量解析解与数值解对比

Fig. 3 Comparison between analytical and numerical solutions for tunnel water inflow under different relative permeabilities

3.3 工程案例分析

厦门翔安海底隧道工程海水深约 25 m,覆土厚度为 40 m,为全强风化岩层,外半径为 7.25 m,围岩渗透系数取  $2.05\times10^{-6}$  m/s<sup>[20]</sup>。根据设计要求,注浆圈厚度为 5 m,渗透系数须达到  $10^{-7}$  m/s 量级;初期支护 50 cm,综合考虑其排水效应,渗透系数取为  $1\times10^{-8}$  m/s;二次衬砌为 C45 强度等级高性能耐腐蚀钢筋混凝土,厚度为 70 cm,其渗透系数取为  $1\times10^{-8}$  m/s,  $m_g=1.5$ ,  $i_{lg}=10$ 。室内模型试验得到的隧道涌水量为  $2.52\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ <sup>[20]</sup>,采用竖井法<sup>[21]</sup>、保角变换法<sup>[22]</sup>、本文复变函数法和镜像法计算得到的隧道涌水量分别为 2.71、2.70、2.48、2.49  $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 。与室内模型试验结果相比,本文复变函数法和镜像法的相对误差分别为 1.6%和 1.2%,吻合较好;竖井法和保角变换法的相对误差分别为 7.0%和 7.1%。其原因可能在于上述两种方法均将衬砌与注浆圈内的渗流视为线性达西渗流,而本文方法考虑了两者的非线性渗流特性。可见本文提出的两种解析方法能够较准确地计算实际工程中的隧道涌水量,具有一定的工程应用价值。

4 参数分析

本节讨论 Hansbo 非线性渗流模型参数、动水位及支护结构尺寸对隧道渗流场的影响,主要包括注浆圈非线性指数  $m_g$ 、临界水力梯度  $i_{lg}$ 、动水位幅值  $\Delta H$  以及注浆圈厚度与衬砌厚度的比值(厚度比)  $\lambda$ 。

由于基于复变函数法与镜像法所计算的渗流场结果相同,因此采用镜像法开展参数分析。假定隧道半径为 7.4 m,埋深为 52.4 m,水头为 20 m,衬砌厚度为 0.6 m,注浆圈厚度为 5.4 m,土体渗透系数为  $5.0\times10^{-6}$  m/s,衬砌渗透系数为  $5.0\times10^{-8}$  m/s,注浆圈渗透系数为  $5.0\times10^{-7}$  m/s,衬砌内孔隙水压力为 0 kPa。

4.1 非线性指数与临界水力梯度对渗流场的影响

非线性指数  $m_g$  和临界水力梯度  $i_{lg}$  是反映注浆圈非线性渗流特性的 Hansbo 非线性渗流模型参数。图 4 给出了  $m_g$  对隧道涌水量  $Q_s$  的影响。当  $i_{lg}$  保持不变时,  $Q_s$  随  $m_g$  增大而减小,且下降幅度逐渐减缓。图 5 给

出了  $i_{lg}$  对  $Q_s$  的影响,其变化规律与  $m_g$  基本一致。结果表明,增大  $m_g$  和  $i_{lg}$  均可增强注浆圈的阻水作用,降低  $Q_s$ ;但当参数增大至一定程度后, $Q_s$  的变化趋于平缓,继续增大参数对堵水效果的改善有限。

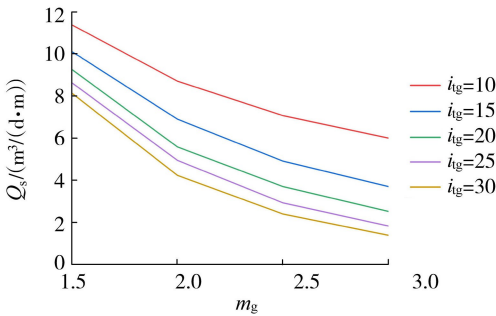


图4 非线性指数对隧道涌水量的影响  
Fig. 4 Effect of nonlinear exponent on tunnel water inflow

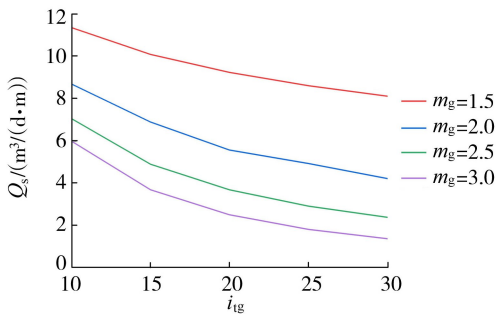


图5 临界水力梯度对隧道涌水量的影响  
Fig. 5 Effect of critical hydraulic gradient on tunnel water inflow

$m_g$  对衬砌拱底孔隙水压力  $p_1$  与注浆圈拱底孔隙水压力  $p_g$  的影响如图 6 所示。当  $i_{lg}$  保持不变时,随着  $m_g$  增大,注浆圈的非线性阻水作用增强,其内部水头损失增大, $p_1$  相应减小,从而增强对衬砌的保护作用。 $i_{lg}$  越大, $p_1$  随  $m_g$  的变化幅度越大,表明较大的  $i_{lg}$  能够强化  $m_g$  增大对衬砌的减压作用。随着  $m_g$  继续增大, $p_1$  和  $p_g$  的变化幅度均逐渐减小并趋于稳定。

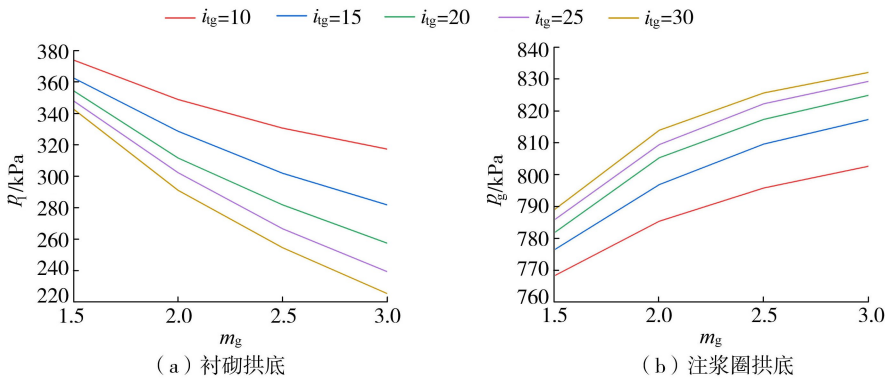


图6 非线性指数对衬砌与注浆圈拱底孔隙水压力的影响

Fig. 6 Effect of nonlinear exponent on pore water pressure at inverts of lining and grouting zone

4.2 动水位对渗流场的影响

为分析周期性动水位作用下隧道涌水量的变化规律,取平均水头  $H=20\text{ m}$ ,水位变化幅值  $\Delta H=10, 15\text{ m}$ ,周期  $T=4, 8\text{ s}$ ,初始相位角  $\varphi=0, \pi/2$ 。图 7 比较了相同周期性动水位作用下,不同非线性指数  $m_g$  对隧道涌水量  $Q_s$  的影响;图 8 进一步分析了动水位幅值  $\Delta H$ 、动水位变化的角频率  $\omega$  和初始相位角  $\varphi$  的影响。结果表明,周期性动水位作用下, $Q_s$  随水位呈周期性变化。与 Hansbo 非线性渗流相比,线性达西渗流条件

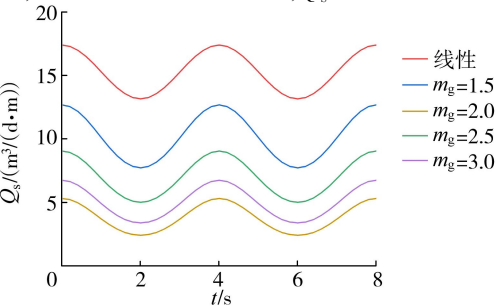


图7 周期性动水位作用下非线性指数对隧道涌水量的影响

Fig. 7 Effect of nonlinear exponent on tunnel water inflow under periodic dynamic water levels

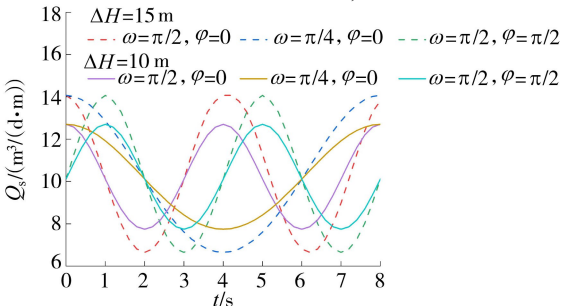


图8 不同幅值、周期和初始相位的动水位对隧道涌水量的影响

Fig. 8 Effects of amplitude, period, and initial phase of dynamic water levels on tunnel water inflow

下的  $Q_s$  及其波动幅度均较大。随着  $m_g$  增大,  $Q_s$  及其波动幅度逐渐减小, 表明注浆圈的非线性阻水作用增强。

周期性动水位作用下, 不同非线性指数  $m_g$  对衬砌拱底孔隙水压力  $p_l$  和注浆圈拱底孔隙水压力  $p_g$  的影响如图 9 所示 (图中各工况采用相同的周期性动水位输入, 仅改变  $m_g$ ), 可以看出,  $p_l$  和  $p_g$  均随动水位呈周期性变化。与线性渗流相比, 考虑非线性渗流后,  $p_g$  增大, 而  $p_l$  减小; 随着  $m_g$  增大, 这一差异更加明显, 表明注浆圈的非线性渗流特性能够削弱外部动水位向衬砌的传递, 从而降低  $p_l$ 。

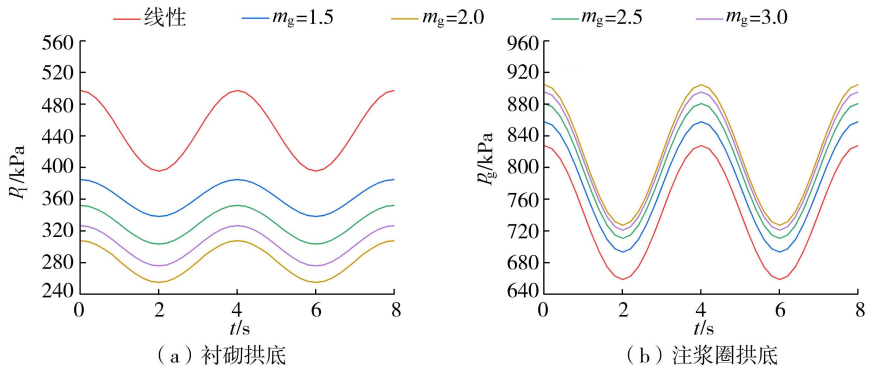


图 9 周期性动水位作用下不同非线性指数对衬砌和注浆圈拱底孔隙水压力的影响

Fig. 9 Effects of different nonlinear exponents on pore water pressures at inverts of lining and grouting zone under periodic dynamic water levels

4.3 厚度比对渗流场的影响

根据海底隧道的实际情况, 注浆圈厚度较大, 因此有必要探究厚度比  $\lambda$  变化对隧道渗流场的影响。  $\lambda$  对隧道涌水量  $Q_s$  的影响计算结果如图 10 所示, 随着  $\lambda$  的增大,  $Q_s$  会随之降低, 并且考虑非线性渗流时的降低幅度会比线性渗流时的大。图 11 为  $\lambda$  对隧道衬砌拱底孔隙水压力  $p_l$  和注浆圈拱底孔隙水压力  $p_g$  的影响, 随着  $\lambda$  的增大,  $p_g$  也随之增大,  $p_l$  则会降低。因此, 随着  $\lambda$  的增大, 注浆圈会为衬砌分担更多的孔隙水压力, 对衬砌起到保护作用。

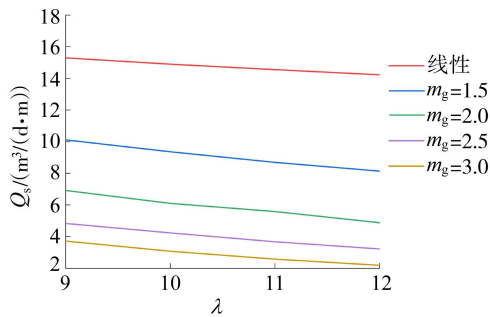


图 10 厚度比对隧道涌水量的影响

Fig. 10 Effect of thickness ratio on tunnel water inflow

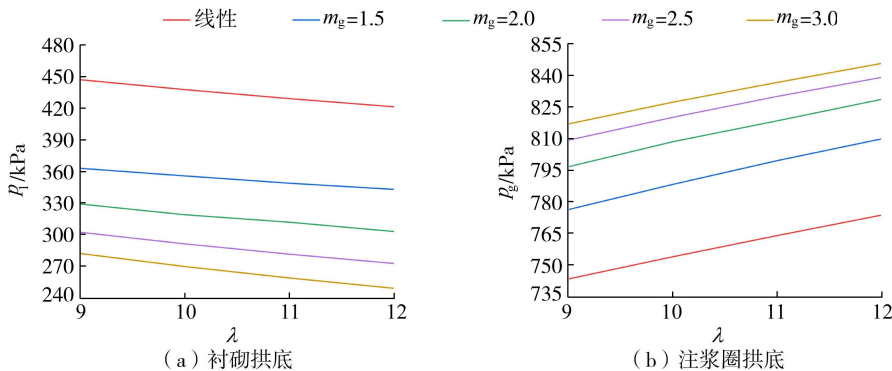


图 11 厚度比对衬砌与注浆圈拱底孔隙水压力的影响

Fig. 11 Effect of thickness ratio on pore water pressure at inverts of lining and grouting zone

5 结 论

- a. 采用 Hansbo 非线性渗流模型描述注浆圈和衬砌内的渗流规律,分别基于保角变换的复变函数法和镜像法,推导了动水位作用下海底隧道非线性渗流场解析解。通过与已有解析解、数值模拟结果及室内模型试验结果对比,验证了所推导的解析解的准确性。
- b. 达西线性渗流与 Hansbo 非线性渗流条件下得到的海底隧道渗流场存在明显差异。与线性达西渗流相比,考虑非线性渗流时,隧道涌水量减小,注浆圈承担的孔隙水压力增大,而传递至衬砌的孔隙水压力减小,表明注浆圈能够承担更多水头损失,并对衬砌起到保护作用。
- c. 随着 Hansbo 非线性渗流模型参数与厚度比的增大,注浆圈的阻水作用增强,隧道涌水量减小;同时,注浆圈承担的孔隙水压力增大,衬砌承担的孔隙水压力减小。当上述参数增大至一定程度后,其对涌水量和孔隙水压力的影响逐渐减弱。在周期性动水位作用下,隧道涌水量以及衬砌与注浆圈孔隙水压力均呈周期性变化,注浆圈能够削弱动水位波动对衬砌的影响。

参考文献:

[ 1 ] 王义盛,赵小鹏,袁锐,等. 风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液性能及微观形貌分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):65-71. ( Wang Yisheng,Zhao Xiaopeng,Yuan Rui,et al. Analysis on performance and micromorphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2023,51(4):65-71. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 朱伟,钱勇进,王璐,等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):138-149. ( Zhu Wei,Qian Yongjin,Wang Lu,et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2023,51(1):138-149. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. ( Gan Lei,Wu Jian,Dai Shouye,et al. Seepage and stability analysis of an embankment with construction cracks in a tunnel-crossing section[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2022,50(1):85-90. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 王媛,周峰,陈龙,等. 盾构隧道管片接缝密封垫防水耐久性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):129-137. ( Wang Yuan,Zhou Feng,Chen Long,et al. Experimental study on waterproof durability of sealing gaskets for segment joints of shield tunnels[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2023,51(1):129-137. ( in Chinese ) )

[ 5 ] Di Qiguang,Li Pengfei,Zhang Mingju,et al. Experimental study on the effect of seepage flow on tunnel face stability in saturated ground[J]. Ocean Engineering,2024,299:117074.

[ 6 ] 傅鹤林,安鹏涛,伍毅敏,等. 开挖扰动及非达西渗流对隧道涌水的影响分析[J]. 铁道工程学报,2022,39(7):80-85. ( Fu Helin,An Pengtao,Wu Yimin,et al. Analysis of the influence of excavation disturbance and non-Darcy seepage on tunnel water inflow[J]. Journal of Railway Engineering Society,2022,39(7):80-85. ( in Chinese ) )

[ 7 ] El Tani M. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2003,18(1):49-55.

[ 8 ] Kolymbas D,Wagner P. Groundwater ingress to tunnels: the exact analytical solution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2007,22(1):23-27.

[ 9 ] Harr M E. Groundwater and seepage[M]. New York:McGraw-Hill,1962.

[ 10 ] 应宏伟,章丽莎,谢康和,等. 坑外地下水位波动引起的基坑水土压力响应[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(3):492-497. ( Ying Hongwei,Zhang Lisha,Xie Kanghe,et al. Pore-water and earth pressure responses to groundwater fluctuations outside a foundation pit[J]. Journal of Zhejiang University ( Engineering Science ),2014,48(3):492-497. ( in Chinese ) )

[ 11 ] 张治国,汪嘉程,赵其华,等. 富水山岭地区邻近补水断层隧道结构上的水头分布解析求解[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3378-3394. ( Zhang Zhiguo,Wang Jicheng,Zhao Qihua,et al. Analytical solution for head distribution on a tunnel structure adjacent to a water-filled fault in a water-rich mountainous region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(S2):3378-3394. ( in Chinese ) )

[ 12 ] 郭玉峰,王华宁,蒋明镜. 水下浅埋双孔平行隧道渗流场的解析研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(6):1088-1096. ( Guo Yufeng,Wang Huanning,Jiang Mingjing. Analytical solutions for the seepage field of underwater shallow-buried parallel twin tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(6):1088-1096. ( in Chinese ) )

[ 13 ] 李鹏飞,刘江,张素磊. 平行 4 孔山岭隧道渗流场解析解及影响参数分析[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(12):1996-2005. ( Li Pengfei,Liu Jiang,Zhang Sulei. Analytical solution for the seepage field of parallel four-tube mountain tunnels and

analysis of influencing parameters[J]. Tunnel Construction,2022,42(12):1996-2005. (in Chinese))

[14] Wu Jie,Li Pengfei,Yao Aijun,et al. Three-dimensional analytical solutions for non-Darcy seepage ahead of a grouted subsea tunnel face[J]. Computers and Geotechnics,2023,159:105509.

[15] Zhang Yu,Zhang Dingli,Fang Qian,et al. Analytical solutions for non-Darcy seepage in grouted subsea tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,96:103182.

[16] 张丙强,王启云,卢晓颖. 软土地层浅埋圆形隧道非达西渗流场解析研究[J]. 岩土力学,2018,39(12):4377-4384. (Zhang Bingqiang,Wang Qiyun,Lu Xiaoying. Analytical solution for the non-Darcian seepage field of a shallow circular tunnel in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(12):4377-4384. (in Chinese))

[17] 于茜,潘海东,吕咸青. 南海主要分潮振幅变化趋势再探[J]. 海洋学报,2022,44(5):62-70. (Yu Qian,Pan Haidong,Lyu Xianqing. Trends in the amplitudes of major tidal constituents in the South China Sea;a revisit[J]. Haiyang Xuebao,2022,44(5):62-70. (in Chinese))

[18] 潘以恒,罗其奇,周斌,等. 半无限平面含注浆圈深埋隧道渗流场解析研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(6):1114-1122. (Pan Yiheng,Luo Qiqi,Zhou Bin,et al. Analytical study on the seepage field of a deep-buried tunnel with a grouting circle in a half-plane[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2018,52(6):1114-1122. (in Chinese))

[19] 李毅,伍嘉,李坤. 基于 FLAC3D 的饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学,2012,33(2):617-622. (Li Yi,Wu Jia,Li Kun. Saturated-unsaturated seepage analysis based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(2):617-622. (in Chinese))

[20] 杜朝伟. 海底隧道衬砌水压力及结构受力特征研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.

[21] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术,2003,40(3):5-10. (Wang Jianyu. Once more on hydraulic pressure acting on tunnel linings[J]. Modern Tunnelling Technology,2003,40(3):5-10. (in Chinese))

[22] 朱成伟,应宏伟,龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析解[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):1984-1991. (Zhu Chengwei,Ying Hongwei,Gong Xiaonan. Analytical solutions for seepage fields of underwater tunnels with arbitrary burial depths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(11):1984-1991. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-17 编辑:熊水斌)

(上接第 113 页)

[12] 汤青峰,彭立云,蒋永红,等. 基于 SWMM 的城市河网情景调控与分析研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(5):15-26. (Tang Qingfeng,Peng Liyun,Jiang Yonghong,et al. SWMM-based scenario regulation and analysis of urban river networks [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(5):15-26. (in Chinese))

[13] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):329-334. (Yan Yu,Yuan Saiyu,Tang Hongwu,et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):329-334. (in Chinese))

[14] 何健,冯胜男,韩幸烨. 闸泵调度对扬州市主城区河网水动力水质改善效果的模拟分析[J]. 江苏水利,2022(6):6-11.

[15] 徐存东,訾亚辉,黄嵩,等. 基于 MIKE 21 的圩区河网水动力调控方法研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(7):161-170. (Xu Cundong,Zeng Yahui,Huang Song,et al. Research on the hydrodynamic regulation method of river network in polder area based on MIKE 21[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(7):161-170. (in Chinese))

[16] 孙文宇,姚成,刘志雨,等. 秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):26-33. (Sun Wenyu,Yao Cheng,Liu Zhiyu,et al. Hydrological and hydrodynamic model of Qinhuai River and real-time correction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):26-33. (in Chinese))

[17] 李健,金中武,蔺秋生. 香溪河水质的平面二维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2012,27(6):720-726. (Li Jian,Jin Zhongwu,Lin Qiusheng. Application of two-dimensional water quality model in Xiangxi River[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2012,27(6):720-726. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-31 编辑:熊水斌)