

文章编号:1005-0930(2024)01-0288-013 中图分类号:TU452 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.01.019

基于海底隧道衬砌孔隙水压力的涌水量预测方法及工程应用

陈云娟^{1,2}, 王乐宁³, 周宗青³, 贾润枝^{4,5},
杨卓^{4,5}, 罗平利^{4,5}, 刘梦悦¹

(1.山东建筑大学土木工程学院,山东 济南 250101;2.山东建筑大学,建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室,山东 济南 250101;3.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250101;4.中化学交通建设集团有限公司,山东 济南 250102;5.山东省公路工程技术研究中心有限公司,山东 济南 250102)

摘要:为获取海底隧道的环向涌水量,以海底隧道衬砌背后孔隙水压力分布为主线,在达西定律的基础上推导了与孔隙水压力相关的涌水量预测公式,公式与隧道尺寸、隧道初衬渗透系数相关,充分考虑了支护结构外缘水压力的影响,进而得到隧道洞内各处涌水量值,将涌水量计算值与现场测量值进行对比,进一步验证了公式的准确性.研究表明,隧道开挖时渗流场影响范围集中在隧道主洞左右各3倍洞径内,主要影响范围集中在洞周2倍洞径内.隧道开挖瞬间,洞周渗流场呈漏斗状分布,直至隧道开挖贯通.围岩性质越差,其隧道衬砌背后孔隙水压力越大,仰拱处孔隙水压力普遍大于拱顶,最大孔隙水压力一般出现在边墙与仰拱交界处.通过编译涌水量预测公式,得到隧道的涌水量,并将其与隧道现场实际情况对比,证实了公式的准确性.该涌水量预测方法为海底隧道现场施工提供了理论支撑.

关键词:海底隧道;孔隙水压力;达西定律;涌水量预测;渗流场

海底隧道作为连接隔海地区的一种重要交通干线,其涌水问题一直是施工过程中关注的重点^[1-2].隧道孔隙水压力直接作用在隧道衬砌结构外缘,导致隧道支护结构的稳定性^[3-5]降低.同时,海底隧道主洞位置埋深越大,其衬砌结构需要承担的孔隙水压力越大,过大的水压力会进一步作用于防排水体系,进而会造成大量涌水.海底隧道上方有无限充足的水源补给,其渗流模式^[6-8]与山岭隧道又有不同.

学者针对海底隧道涌水量开展了大量理论研究,提出了多种情况下的涌水量计算式.其中,傅鹤林等^[9]通过构建隧道涌水简化模型推导了隧道涌水量表达式;傅鹤林等^[10]还研究了注浆圈作用下的掌子面前方涌水量表达式;张雨^[1]基于半无限空间原理推导了隧

收稿日期:2023-05-18;修订日期:2023-08-24

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42172310);山东省高等学校“青创科技计划”(2019KJG015)

作者简介:陈云娟(1984—),女,副教授,硕士生导师.E-mail:skdeyj@126.com

通信作者:王乐宁(1998—),女,硕士研究生.E-mail:1078854897@qq.com

道掌子面前方地层孔隙水压力公式;马少坤等^[11]建立了有限含水层内带衬砌的隧道渗流模型,基于镜像法推导了水头及涌水量的解析式,研究了含水层厚度、隧道埋深比及注浆圈参数对水头分布及隧道涌水量的影响;郭鸿雁等^[12]借助 FLAC3D 软件研究分析了围岩无注浆条件下隧道外水压力随排水量的变化规律.Ying 等^[13]基于保角映射技术,研究了半无限含水层中衬砌隧道的半解析解;朱成伟等^[14]采用保角变换法和叠加法研究了双线平行隧道的稳态渗流场;Tang 等^[15]通过两次保角映射,推导了各向异性地层中水下圆形隧道渗流场的解析解;Zhang 等^[16]基于非达西渗流模型,利用复变函数法得到了水下单衬砌隧道考虑非达西渗流的渗流场解析解。

基于数学模型及经验公式推导的海底隧道涌水量理论是目前国内外学者研究的主要方向,但仍缺乏与孔隙水压力直接相关的理论研究.部分基于数值计算的涌水量研究,由于计算速度受限,导致整体计算时间较长.因此,笔者结合实际工程,在达西定律的基础上推导与孔隙水压力相关的理论解析式,同时将解析式代入数值模拟软件进行计算,准确得到对应某点处可能会出现涌水量。

1 工程概况

汕头湾海底隧道工程位于广东省汕头市濠江区和龙湖区境内,是我国也是世界上第一条 350km/h 高速铁路海底隧道.汕头湾海底隧道海域段穿海情况如图 1 所示。

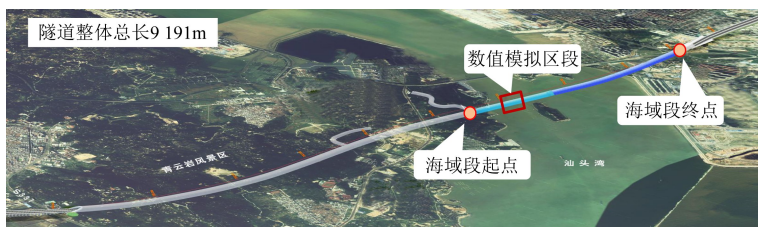


图 1 隧道整体卫星图像

Fig.1 Satellite image of the whole tunnel

隧道选址所在的汕头市濒临南海,水汽来源丰富,降水强度大且降水量充沛,4~6月、7~9月平均月降水量分别为 6 548mm、6 643mm.海域段地表水以海水为主,地下水潜水多以基岩裂隙水和第四系孔隙水为主,裂隙发育较充分.海底隧道穿越海域部分上覆海水深度最大达 17.5m,隧道埋深最大达 88.98m,前期地质勘测得的最大孔隙水压力值为 0.95MPa,过大的水压力作用在支护结构上,极易导致大量涌水、突水现象的发生.研究区段穿越风化花岗岩地段,其中全风化花岗岩区域内岩体破碎程度高、裂隙发育充分,是导致隧道涌水的重要因素。

2 海底隧道模型及参数设置

2.1 基于 FLAC3D 数值模型的渗流影响范围

隧道排水影响范围直接关系到隧道施工过程及后期运营对地下水环境的影响程度,因此确定数值计算中的隧道渗流场影响范围并建立尺寸合适的三维模型,不仅能够保证

结果的准确性,还能节省大量的计算时间.由铁道部第一勘察设计院《铁路供水水文地质勘测规则》^[17]提到的排水影响半径经验计算式如下

$$R = 215.5 + 510.5K \tag{1}$$

式中: R 为隧道涌水影响半径,m; K 为裂隙岩体等效渗透系数,m/d.

刘志春等^[18]以 GeoStudio 软件 SEEP/W 模块为主要研究对象,以式(1)为基础建立模型,研究发现:围岩级别越差、围岩渗透系数越大时,隧道开挖引起的渗流场变化范围越大.

为了验证基于 FLAC3D 软件的隧道开挖在流固耦合作用下渗流场的影响范围,基于式(1)建立垂直于隧道径向的长度为 1 000m,隧道进深为 5m 的试验模型,整体模型尺寸如图 2 所示.

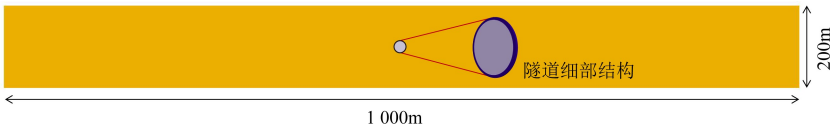


图 2 渗流场影响范围整体模型

Fig.2 Overall model of influence range of seepage field

依据汕头湾海底隧道对 2#斜井现场的岩体实际监测结果,参考不同风化程度花岗岩的多种力学参数范围,得到相应地层力学参数(表 1).

表 1 地层参数信息

Table 1 Formation parameter information

围岩	杨氏模量/MPa	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	泊松比	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
II 级	2.37×10 ⁴	13.33	49	0.20	5.79×10 ⁻⁴
IV 级	5.31×10 ³	8.48	32	0.31	1.16×10 ⁻⁴
V 级	1.72×10 ³	5.94	22	0.39	5.79×10 ⁻⁴

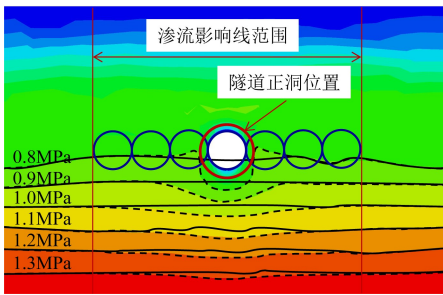


图 3 渗流场影响范围等势线

Fig.3 Isobath of influence range of seepage field

根据刘志春等^[18]研究结论,选择级别最差的全风化花岗岩进行研究.固定模型四周及底边界的位移,海面建立在海床以上 10m 处,渗流在模型整个范围内进行.对隧道实现一次性开挖贯通,开挖后立刻施作初衬.开挖前后海底隧道渗流场对比如图 3 所示,其中实线为开挖前渗流等势线,虚线为开挖后渗流等势线.

由图 3 可以看出,隧道渗流场变化范围主要集中在隧道主洞左右各 3 倍洞径范围内,当左右模型范围超出 3 倍洞径后渗流影响线与开挖前基本保持一致.

2.2 海底隧道数值模型的建立

以汕头湾海底隧道海域矿山段为研究背景,依据真实地质情况建立三维仿真模型,该

区段整体三维地质模型如图 4 所示。

选取 DK161+400~DK161+470 段作为主要研究对象,应用 FLAC3D 软件进行运算。FLAC3D 能够实现流体与力学计算的耦合,将岩体视为等效连续介质,并通过内置命令 water plane 设置水面位置,真实地模拟海平面。

依据确定的渗流场影响范围,设置隧道水平方向长度为主洞左右各 3 倍洞径,隧道洞径以围岩级别最差的 V 级围岩隧道为准,取隧道结构最外圈直径 14.68m,隧道水平方向总共取 7 倍洞径约 103m,所选区段隧道上覆海水深度取 10m,隧道中心点至海水底面高度为 75m,隧道依次穿越全风化花岗岩(20m)、强风化花岗岩(20m)及弱风化花岗岩(30m),模型总尺寸及围岩分布情况如图 5 所示。

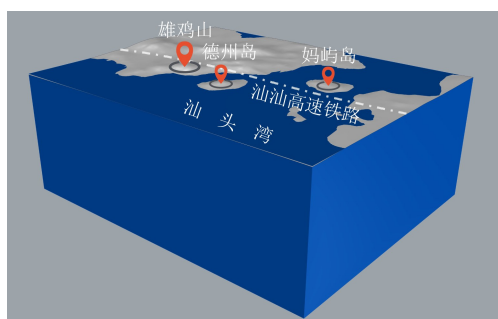


图 4 区段整体三维地质模型

Fig.4 3D geological model for whole section

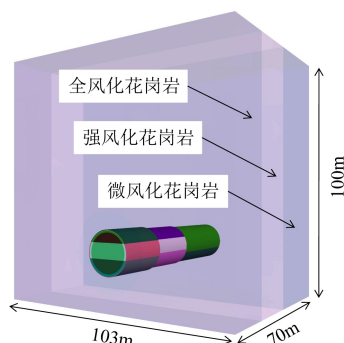


图 5 海底隧道计算模型

Fig.5 Calculation model of undersea tunnel

为准确模拟隧道开挖过程中的力学行为,模型整体采用实体单元,应用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型;初期支护的喷射混凝土为实体单元设置,应用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。IV级、V级围岩段的超前小导管及超前中管棚采用 Cable 单元。模型边界设置同 2.1 节。

依据现场施工情况,围岩初期支护采用喷射混凝土及铺设钢筋网,锚杆依据工程实际情况按需搭设,各支护参数如表 2 所示。

表 2 支护参数信息
Table 2 Information of support parameter

支护形式	杨氏模量/MPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力/MPa	摩擦角/($^\circ$)	泊松比
喷射混凝土(加钢筋网)	9.2×10^4	28.00	13.0	35	0.2

3 海底隧道渗流场规律

为充分考虑海底隧道水的渗流作用,对模型开展流固耦合运算。以隧道初始开挖面为原点沿隧道纵向每间隔 2m 设置 1 个监测点,由于海底隧道的对称性,对左右测点选其一进行监测。监测点平面如图 6 所示。

3.1 海底隧道开挖过程中渗流场规律

对模型进行地应力平衡后,根据现场施工图纸对 II 级隧道进行每 4m 一进尺的全断

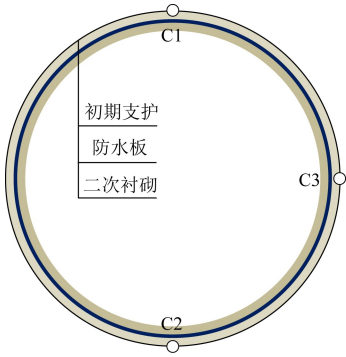


图6 隧道平面监测点布置
Fig.6 Layout of tunnel plane monitoring points

面开挖,对IV级及V级隧道分别进行每2m及1.6m一进尺的3台阶开挖,开挖后立即施作初衬.分别以 $x=0$ 及 $x=0 \cup y=20$ 为切片面将模型整体切开,隧道开挖与未开挖部分孔隙水压力云图如图7所示.

由图7可以看出,隧道开挖瞬间洞周渗流场分布打破原有等势线的水平分布状态,孔隙水压力等势线在该切面下呈“漏斗状”分布,这种分布形态贯穿整个开挖过程,直至隧道贯通.隧道掌子面后方一定距离内存在孔隙水压力增大的情况,同时伴有涌水现象,涌水主要集中在拱顶及孔隙水压力较大的仰拱位置.隧道开挖完毕后孔隙水压力云图如图8所示.

由图8可以看出,隧道贯通后孔隙水压力仍以隧道主洞为中心呈“漏斗状”分布,同时由于喷射混凝土具有一定的防水性能,能减弱部分作用在衬砌上的孔隙水压力,使得洞周孔隙水压力基本在0.6MPa以内.

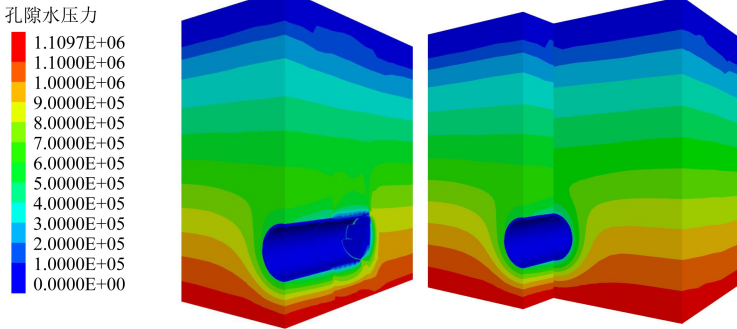


图7 海底隧道开挖过程中渗流规律

Fig.7 Seepage law in the process of undersea tunnel excavation

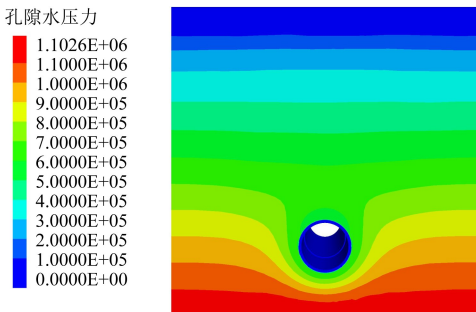


图8 海底隧道贯通后整体渗流规律
Fig.8 Overall seepage law of the undersea tunnel after completion

3.2 隧道贯通后初衬外侧孔隙水压力分布

分别提取不同围岩级别隧道衬砌背后的孔隙水压力值,其中II级围岩隧道衬砌背后孔隙水压力云图如图9(a)所示,同时提取C1~C3孔隙水压力数据绘制曲线如图9(b)所示,图9(b)中0m处为II级围岩隧道初始开挖面,30m处对应II级围岩隧道结束位置.

由图9可以看出,II级围岩隧道由于其围岩性质较好,岩体内存在的裂隙数量少,因此作用在衬砌背后的孔隙水压力相对较小.根据隧道具体结构可以看出,孔隙水压力最

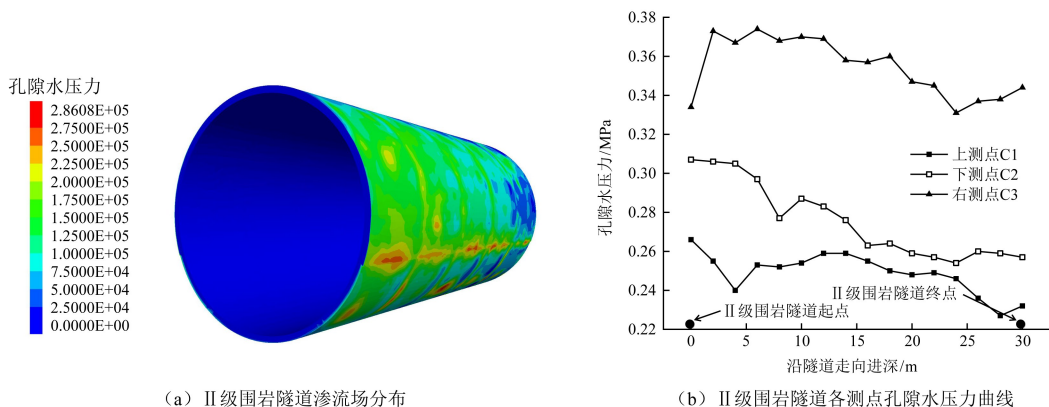


图9 II级围岩隧道渗流规律

Fig.9 Seepage law of II-grade surrounding rock tunnel

大位置出现在边墙与仰拱的交界处,最大值约为 0.378MPa;仰拱处由于其埋深更大,该处的孔隙水压力普遍大于拱顶,差值均值约为 0.02MPa.

IV级围岩隧道衬砌背后孔隙水压力云图及监测点曲线如图 10 所示,图 10(b)中 30m 处为 IV级围岩隧道初始开挖面,50m 处对应 IV级围岩隧道结束位置.

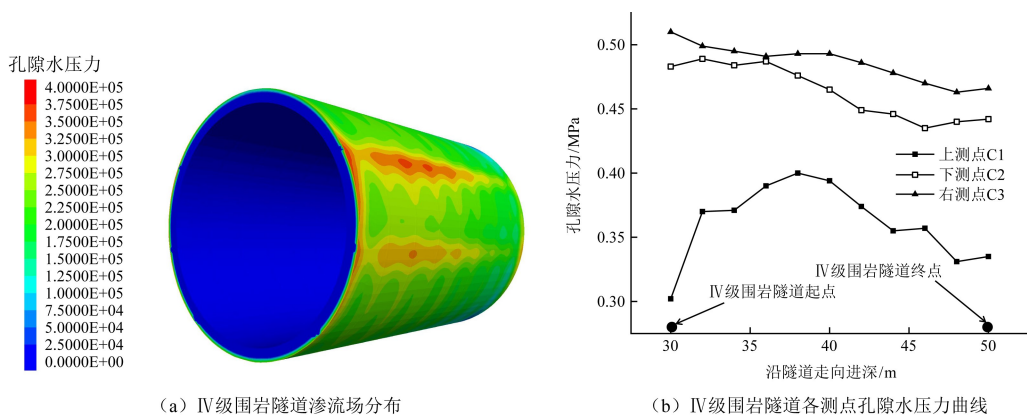


图 10 IV级围岩隧道渗流规律

Fig.10 Seepage law of IV-grade surrounding rock tunnel

由图 10 可以看出,IV级围岩隧道围岩性质差,岩体内发育大量的节理裂隙,因此作用在衬砌背后的孔隙水压力相对较大.根据孔隙水压力云图可以看出孔隙水压力最大位置出现在边墙与仰拱的交界处,最大值约为 0.564MPa;由图 10(b)可以明显看出,右边墙的孔隙水压力普遍大于其他位置,同时由于仰拱处理深更大,该处的孔隙水压力也普遍大于拱顶,差值均值约为 0.08MPa.

V级围岩隧道衬砌背后孔隙水压力云图及监测点曲线如图 11 所示,图 11(b)中 50m 处为 V级围岩隧道初始开挖面,70m 处对应 V级围岩隧道结束位置.

由图 11 可以看出,V级围岩隧道围岩性质极差,岩体内充分发育大量的节理裂隙,同

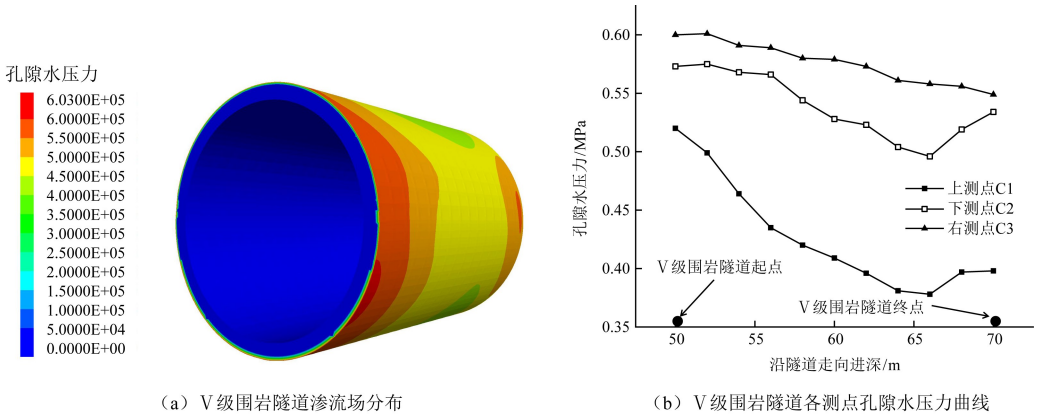


图 11 V 级围岩隧道渗流规律

Fig.11 Seepage law of V-grade surrounding rock tunnel

时在水流的不断冲刷下裂隙不断扩展,因此作用在衬砌背后的孔隙水压力也更大.根据隧道孔隙水压力云图可以看出,孔隙水压力最大位置出现在边墙与仰拱的交界处,最大值约为 0.603MPa;由图 11(b)可以明显看出,右边墙的孔隙水压力普遍大于其他位置,同时由于仰拱处理深更大,该处的孔隙水压力也普遍大于拱顶,差值均值约为 0.09MPa.

综合比较 3 种围岩级别隧道衬砌背后孔隙水压力可以看出,孔隙水压力最大值往往出现在边墙处,随围岩性质变差,其衬砌结构上的孔隙水压力不断增大;围岩性质越差,其仰拱与拱顶孔隙水压力差值越大,因此可以认为在隧道埋深相同的情况下,隧道衬砌结构孔隙水压力受裂隙发育影响显著.

4 基于渗流场的涌水量预测理论

现有海底隧道涌水量计算方法可划归为两类^[12]:经验公式法和数值计算法.前者基于水下动力学原理推导,为传统概念的理论计算方法,如英法海峡隧道及日本青函海底隧道等采用的马卡斯特经验公式;后者利用逐步兴起的数值仿真软件计算,如加拿大 GEO-SLOPE 公司开发的 GeoStudio 软件,COMSOL 公司开发的 COMSOL multiphysics 软件以及美国 Itasca 公司开发的 FLAC3D 有限差分软件等.

整体来看,数值计算基于地质环境、流体固体的耦合效应等,能够完成一些经验公式难以考虑到的复杂运算,但要求的水文地质勘测参数精度较高.同时由于数值计算法需要在计算模型的整个区域考虑渗流平衡,以达到计算软件所允许的最大不平衡力比,这导致需要更多的时间,以便充分地对特定区域的渗流效应进行计算.

4.1 基于渗流场的涌水量预测新理论

采用理论公式法虽然计算方便,但预测结果精度不够;而数值计算法虽能够比较真实地反应工程的实际情况,却需要耗费大量的计算时间.因此考虑将数值计算法得到的孔隙水压力值作为研究涌水量预测值的关键中间量,同时基于达西定律推导与该值相关的理论公式,利用软件进行二次开发公式编译,最终建立涌水量与渗流场之间的理论关系.

将能够动态变化的孔隙水压力值作为研究涌水量预测值的关键中间量,直接建立涌

水量与渗流场之间的理论关系.由于海底隧道处于稳定渗流场中,水流稳定且有无限水源补给,因此依据水下动力学原理,其中通过某一断面的稳定流量依据达西定律推断公式如下

$$Q = 2\pi r \cdot v = 2\pi r \cdot k_2 \frac{dh}{dr} \quad (2)$$

式中: v 为水的流速; k_2 为周围岩体的渗透系数.

对海底隧道做如下假定^[19-20]:

(1) 假定围岩为均质、各向同性的等效连续介质模型;

(2) 海底隧道处于相对稳定的渗流场中;

(3) 隧道排水时衬砌能够均匀渗水.

海底隧道等效模型如图 12 所示,图中 r_n 、 r_w 分别为隧道内外径, h_n 、 h_w 分别为隧道内外径对应位置的相应水头, R 为远场稳定水头影响半径, H 为该处水头, P 为等效作用在衬砌背后的孔隙水压力.

设 Q_1 为 $r_n \leq r \leq r_w$ 时通过隧道相应位置水的流量,当 r 在 r_n 到 r_w 范围内时,其水头在 h_n 到 h_w 内变化.将达西定律变形后左右两侧分离变量积分为

$$\int_{h_n}^{h_w} \frac{2\pi k_1}{Q_1} dh = \int_{r_n}^{r_w} \frac{1}{r} dr \quad (3)$$

$$Q_1 = 2\pi \cdot k_1 \frac{h_w - h_n}{\ln r_w - \ln r_n} \quad (4)$$

同理,假定当 $r_w \leq r \leq R$ 时,隧道围岩内水头在 h_w 到 H 范围内变化,海底隧道围岩内涌水量 Q_2 计算如下

$$Q_2 = 2\pi \cdot k_2 \frac{H - h_w}{\ln R - \ln r_w} \quad (5)$$

在理想状态下当隧道半径远小于覆岩厚度,即隧道埋深较大时,根据水流连续性方程,一般认为通过不同过流断面处的流量相同,即 $Q_1 = Q_2$,联立式(4)、式(5)可得衬砌外水头如下

$$h_w = \frac{H \ln\left(\frac{r_w}{r_n}\right) + h_n \frac{k_1}{k_2} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)}{\frac{k_1}{k_2} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) + \ln\left(\frac{r_w}{r_n}\right)} \quad (6)$$

由于开挖后隧道内部无水头,即衬砌内侧水头为 0,将 $h_n = 0$ 代入式(6),并将得到的 h_w 代入渗流公式可得

$$Q = \frac{2\pi \cdot H}{\frac{1}{k_2} \ln \frac{R}{r_w} + \frac{1}{k_1} \ln \frac{r_w}{r_n}} \quad (7)$$

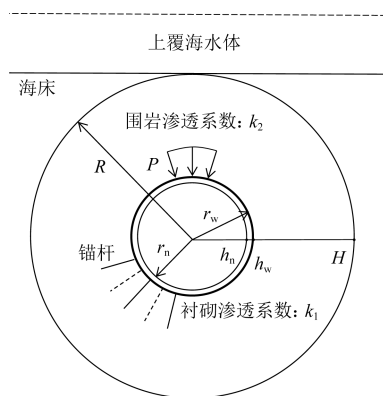


图 12 海底隧道渗流模型

Fig.12 Seepage model of submarine tunnel

衬砌背后孔隙水压力求解如下

$$P = \gamma_w h_w = \gamma_w H = \frac{\ln\left(\frac{r_w}{r_n}\right)}{\frac{k_1}{k_2} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right) + \ln\left(\frac{r_w}{r_n}\right)} \quad (8)$$

联立式(7)、式(8),最终建立与孔隙水压力相关的涌水量环向预测值公式

$$Q = \frac{2\pi}{\gamma_w} \cdot \frac{k_1}{\ln r_w - \ln r_n} \times P \quad (9)$$

涌水量环向预测值公式(式(9))将覆岩厚度、海水深度等因素的影响充分转换到孔隙水压力中,搭建起孔隙水压力与涌水量预测结果之间的“桥梁”.不仅能够借助数值模拟得到的孔隙水压力对涌水量进行计算,同时避免了直接对渗流排水进行计算存在的工作量大、计算周期长等问题.由于式(9)基于数值模拟得到的孔隙水压力进行计算,因此准确掌握前期各项水文地质参数、尽可能地提高模拟计算精度至关重要.

4.2 涌水量公式计算结果

根据式(9)整理公式涉及的隧道参数信息(表3),其中隧道内外径分别指施作初衬后、未施作初衬前隧道的净空尺寸.

表3 隧道参数信息
Table 3 Information of tunnel parameter

围岩级别	隧道外径 r_w/m	隧道内径 r_n/m	初衬渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)
微风化花岗岩(Ⅱ级)	7.14	6.99	
强风化花岗岩(Ⅳ级)	7.34	7.09	5×10^{-3}
全风化花岗岩(Ⅴ级)	7.47	7.19	

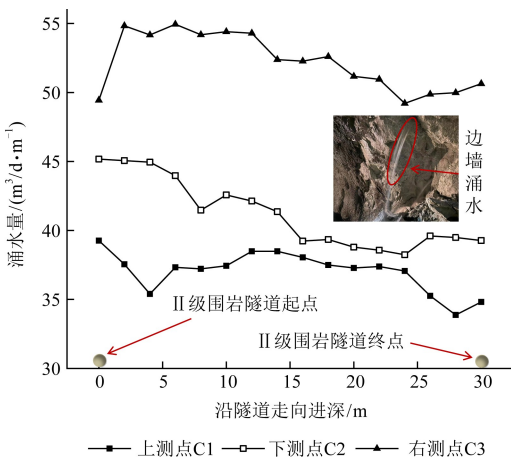


图13 Ⅱ级围岩隧道涌水量监测

Fig.13 Monitoring curve of II-grade tunnel water inflow

通过编写 FISH 语言,利用 FLAC3D 编译公式(9),引入 gp.pore pressure 计算得到涌水量.依次提取沿隧道轴向初始开挖面 0~30m 范围内 C1~C3 监测点数据,如图 13 所示.

根据式(9),隧道各点处涌水量与衬砌背后的孔隙水压力呈正相关.结合图 13 可以看出,Ⅱ级围岩隧道涌水量最大值出现在隧道边墙处,最大涌水量约为 $54m^3/d \cdot m^{-1}$,与现场涌水实际情况对比发现,实际施工过程中隧道边墙涌水量普遍大于其他位置.

提取沿隧道轴向初始开挖面 30~50m 范围内 C1~C3 监测点数据,如图 14 所示.

由图 14 可以看出,IV 级围岩隧道涌水量最大值出现在隧道边墙处,最大涌水量约为 $46.2\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^{-1}$;边墙与仰拱涌水量相差不大,与现场涌水实际情况对比发现,实际施工过程中隧道边墙涌水量最大。

提取沿隧道轴向初始开挖面 50~70m 范围内 C1~C3 监测点数据,如图 15 所示。

由图 15 可以看出,V 级围岩隧道涌水量最大值出现在隧道边墙处,最大涌水量约为 $53.97\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^{-1}$;边墙与仰拱涌水量相差不大,但拱顶涌水量普遍小于其他测点,与现场涌水实际情况对比发现,实际施工过程中隧道边墙涌水量普遍大于其他位置。

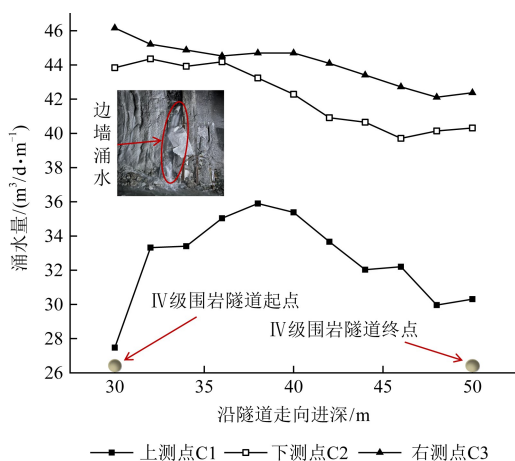


图 14 IV 级围岩隧道涌水量监测

Fig.14 Monitoring curve of IV-grade tunnel water inflow

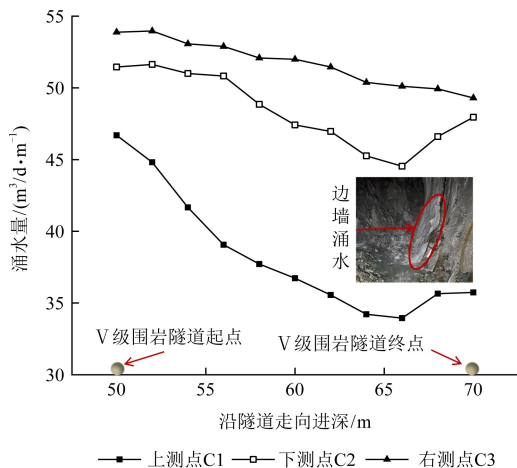


图 15 V 级围岩隧道涌水量监测

Fig.15 Monitoring curve of V-grade tunnel water inflow

综合图 13、图 14 及图 15 可以看出,隧道左右边墙处的涌水量普遍稍大于其他位置,现场工程情况验证了这一结论。由于 II 级围岩隧道初衬厚度极小,虽然围岩自身稳定性强,但涌水量结果依然偏大,实际工程中可以考虑适当增加初衬厚度来降低涌水量。

$y=60\text{m}$ 时右测点 C3 处,考虑初衬后的涌水量约为 $51.99\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^{-1}$ 。利用马卡斯特涌水量解析式(式(10))计算毛洞涌水量。式中 K 取 V 级围岩渗透系数 $0.5\text{m}/\text{d}$, H_0 为海床至隧道圆心的距离,按实际模型取为 75m , h 为海水深度,按实际模型取 10m , r_0 为隧道半径,取 V 级围岩隧道外径(表 3)。根据计算发现隧道在该点处的毛洞涌水量约为 $89.34\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^{-1}$,远大于考虑初衬后的涌水量结果,对比表明初衬的防水性在防排水体系中发挥了重要作用。

$$Q = \frac{2\pi K(H_0 + h)}{\ln\left(\frac{2H_0}{r_0} - 1\right)} \quad (10)$$

研究发现,由于式(9)中 $\frac{k_1}{\ln r_w - \ln r_n}$ 仅与隧道所在围岩级别及该区段隧道尺寸有关,因

此在同一围岩级别隧道区段,其涌水量与衬砌背后孔隙水压力呈正相关.鉴于此,综合 3.2 节可以得出,边墙是整个隧道结构中涌水量最大的位置,隧道仰拱处的涌水量普遍大于拱顶.

5 结论

基于汕头湾海底隧道流场分布规律,推导了与孔隙水压力相关的海底隧道涌水量新方法,通过研究得到的主要结论如下:

(1)通过建立汕头湾海底隧道的超大跨度数值模型,研究了海底隧道开挖的渗流场影响范围.研究表明隧道开挖引起的渗流场变化主要集中在 3 倍洞径范围内,超出此范围开挖对隧道渗流场影响不大;

(2)基于渗流场影响范围建立海底隧道海域段三维仿真模型并进行流固耦合运算.研究表明隧道开挖瞬间渗流等势线明显下降,开挖过程中隧道洞周渗流场保持“漏斗状”分布,直至隧道完全贯通;

(3)隧道围岩级别越差的区段,其衬砌背后孔隙水压力也越大,隧道左右边墙处的孔隙水压力普遍大于其他位置,隧道仰拱处孔隙水压力普遍大于拱顶;

(4)对推导的涌水量预测公式进行计算并验证,计算结果表明,隧道边墙处的涌水量普遍大于其他位置,同时将公式计算结果与现场实际情况对比,验证了公式的准确性.

参考文献

- [1] 张雨.海底隧道水力流态特性研究及工程应用[D].北京:北京交通大学,2021
Zhang Yu.Study on the hydraulic flow regime characteristics in subsea tunnels and its engineering application[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2021
- [2] 张顶立,孙振宇,宋浩然,等.海底隧道突水演化机制与过程控制方法[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4): 649-667
Zhang Dingli, Sun Zhenyu, Song Haoran, et al. Method water inrush evolutionary mechanisms of subsea tunnels and process control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 649-667
- [3] Gao Chenglu, Zhou Zongqing, Yang Weimin, et al. Model test and numerical simulation research of water leakage in operating tunnels passing through intersecting faults[J]. Tunneling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 94: 103134
- [4] Guo Yufeng, Wang Huaning, Jiang Mingjing. Efficient iterative analytical model for underground seepage around multiple tunnels in semi-infinite saturated media[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2021, 147(11): 04021101
- [5] 周鸣亮,程文,张东明,等.运营期盾构隧道结构病害的自动化检测与三维可视化[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(5): 1265-1279
Zhou Mingliang, Cheng Wen, Zhang Dongming, et al. Automated 3D inspection and visualization of structural defects in shield tunnel linings[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(5): 1265-1279
- [6] Park K H, Owatsiriwong, Lee J G.. Analysis solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007, 22(4): 1-4
- [7] 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 Huaning, Jiang Mingjing. Parallel twin tunnels Analytical solutions of seepage field for underwater shallow-buried[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1088-1096
- [8] 金波,胡明,方棋洪.考虑渗流效应的深埋海底隧道围岩与衬砌结构应力场研究[J].力学学报,2022,54(5): 1322-1330
Jin Bo, Hu Ming, Fang Qihong. Research on stress field of surrounding rock and lining structure of deep-buried subsea tunnel considering seepage effect[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(5): 1322-1330

- [9] 傅鹤林,安鹏涛,伍毅敏,等.考虑排水体系时隧道突涌水分析[J].铁道科学与工程学报,2022,19(11):3335-3342
Fu Helin, An Pengtao, Wu Yimin, et al. Analysis of tunnel water inrush considering drainage system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(11): 3335-3342
- [10] 傅鹤林,安鹏涛,李凯,等.隧道掌子面附近涌水量预测研究[J].铁道工程学报,2021,38(9):41-47
Fu Helin, An Pengtao, Li Kai, et al. Research on the prediction of water inflow near tunnel face [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(9): 41-47
- [11] 马少坤,陈彩洁,段智博,等.基于镜像法的有限含水层内隧道渗流场解析解及其验证[J].工程力学,2023,40(5):172-181
Ma Shaokun, Chen Caijie, Duan Zhibo, et al. Analytical solution and verification on seepage field of tunnel in finite aquifer based on image method [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 172-181
- [12] 郭鸿雁,纪亚英,方林,等.基于流固耦合分析的富水隧道外水压力与限量排放标准研究[J].岩土工程学报,2019,41(增1):165-168
Guo Hongyan, Ji Yaying, Fang Lin, et al. External water pressures and limited emission standards of water-rich tunnels based on fluid-solid coupling analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 165-168
- [13] Ying Hongwei, Zhu Chengwei, Shen Huawei, et al. Semi-analytical solution for groundwater ingress into lined tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 76: 43-46
- [14] 朱成伟,应宏伟,龚晓南,等.水下双线平行隧道渗流场解析研究[J].岩土工程学报,2019,41(02):355-360
Zhu Chengwei, Ying Hongwei, Gong Xiaonan, et al. Analytical solutions to seepage field of underwater twin parallel tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 355-360
- [15] Tang Y, Chand H, Zhu D Z. Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a circular tunnel in anisotropic soils [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(9): 8
- [16] Zhang Y, Zhang D L, Fang Q, et al. Analytical solutions of non-Darcy seepage of grouted subsea tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 96: 10
- [17] TBJ 15-96, 铁路供水水文地质勘测规则[S].
TBJ 15-96, Rules for hydrogeological survey of railway water supply [S].
- [18] 刘志春,孙明磊,高新强.裂隙岩体隧道排水影响范围数值试验研究[J].国防交通工程与技术,2011,9(2):12-17
Liu Zhichun, Sun Minglei, Gao Xinqiang. Numerical experimentation research of drainage influence range in fractured rock tunnel [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2011, 9(2): 12-17
- [19] 陈新宇.大连湾盾构海底隧道围岩稳定性分析及涌水量预测[D].大连:大连交通大学,2018
Chen Xinyu. Analysis of surrounding rock stability and water inflow prediction for shield tunneling through Dalian Bay [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018
- [20] 张雨,张顶立,徐瞳,等.水下隧道开挖面三维渗流场解析及涌水量预测分析[J].西南交通大学学报,2021,56(6):1260-1267
Zhang Yu, Zhang Dingli, Xu Tong, et al. Analysis of three-dimensional seepage field and prediction of water inflow in excavation face of underwater tunnels [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1260-1267

Prediction Method of Water Inflow Based on Pore Water Pressure in Undersea Tunnel Lining and Its Engineering Application

CHEN Yunjuan^{1,2}, WANG Lening³, ZHOU Zongqing³, JIA Runzhi^{4,5},
YANG Zhuo^{4,5}, LUO Pingli^{4,5}, LIU Mengyue¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering(Shandong Jianzhu University), Ministry of Education, Jinan 250101, China; 3. Qilu College of Transportation, Shandong University, Jinan 250101, China; 4. China National Chemical Communications Construction Group Co., LTD., Jinan 250102, China; 5. Shandong Highway Engineering Technology Research Center Co., LTD., Jinan 250102, China)

Abstract

In order to obtain the hoop water inflow of the undersea tunnel, the pore water pressure distribution behind the undersea tunnel lining is taken as the key factor, a prediction formula relating to pore water pressure is then derived, employing Darcy's law as the basis. This formula takes into account the tunnel's dimensions and the permeability coefficient of the tunnel lining, while also thoroughly incorporating the influence of water pressure behind the supporting structure. Subsequently, water inflow values for each part of the tunnel are computed and compared against field data to validate the formula's accuracy. The results show that the influence range of seepage field caused by tunnel excavation in FLAC3D is concentrated in three times diameter of the tunnel, and the main influence range is concentrated in two times diameter around the tunnel. During excavation, the seepage field around the tunnel presents a funnel-shaped distribution until the excavation is completed. The lower the surrounding rock quality, the higher the pore water pressure behind the tunnel lining. The pore water pressure at the invert typically surpasses that at the arch, and the maximum pore water pressure generally occurs at the junction between the side wall and the invert. By comparing the water inflow calculated by prediction formula with the actual situation of the field, the accuracy of the formula is confirmed. The water inflow prediction formula has certain guiding significance for the water inflow prediction during the construction of the undersea tunnel.

Keywords: undersea tunnel; pore water pressure; Darcy's law; water inflow prediction; seepage field