

爆破振动下海底隧道涌水量预测研究

李嘉诚, 王渭明, 吕显州, 王晓杰, 潘志新

Research on the prediction method of water gushing volume under the blasting vibration effect of a sub-sea tunnel

LI Jiacheng, WANG Weiming, LYU Xianzhou, WANG Xiaojie, and PAN Zhixin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型

Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide

汤明高, 吴川, 吴辉隆, 杨何 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 115-125

鸿图嶂隧道突涌水预测及防治措施

Prediction and prevention of sudden water gushing in the Hongtuzhang tunnel

罗依珍, 成国文, 尹利君, 邓皇适, 谭宁, 刘真真 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 64-72

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu

曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面积关系研究

A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW

郭云彤, 周妍, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 32-41



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205055

李嘉诚, 王渭明, 吕显州, 等. 爆破振动下海底隧道涌水量预测研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 127-136.
LI Jiacheng, WANG Weiming, LYU Xianzhou, *et al.* Research on the prediction method of water gushing volume under the blasting vibration effect of a sub-sea tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 127-136.

爆破振动下海底隧道涌水量预测研究

李嘉诚¹, 王渭明¹, 吕显州², 王晓杰³, 潘志新⁴

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 基准方中建筑设计股份有限公司, 山东 青岛 266590; 4. 青岛西海岸新区建筑工务中心, 山东 青岛 266590)

摘要: 爆破振动效应下海底隧道涌水量预测目前仍是一个难题。以青岛地铁 1 号线瓦屋庄站—贵州路站过海区间海底隧道为工程背景, 基于等效连续介质模型, 利用镜像法推导考虑损伤区因素的海底隧道涌水量计算公式, 通过正演与反演的方式, 结合数值模拟计算结果以及实际工程监测结果综合验证公式的正确性并分析损伤区因素对涌水量的影响机制。结果表明: 爆破振动产生的挤压作用使得隧道周边围岩孔隙水压力会在短时间内急速上升, 到达峰值后随着爆破振动的减弱及消失开始缓慢下降; 在损伤区因素影响下, 隧道涌水量随着损伤区厚度增加逐渐变大, 但不会随着损伤区渗透系数的增加而不断增加; 数值模拟计算考虑爆破损伤区与否的隧道涌水量比值为 1.4, 与文章所推公式计算结果 1.342 相比误差仅为 4.1%, 且计算结果与现场实测结果相比仅少 0.53 m³/(d·m), 相对于传统计算公式结果更接近实测结果, 说明本文计算公式适用于考虑损伤区因素的隧道涌水量计算, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 海底隧道; 涌水量; 损伤区; 渗流场; 数值模拟

中图分类号: U459.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0127-10

Research on the prediction method of water gushing volume under the blasting vibration effect of a sub-sea tunnel

LI Jiacheng¹, WANG Weiming¹, LYU Xianzhou², WANG Xiaojie³, PAN Zhixin⁴

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. JZfz Architectural Design Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266590, China; 4. Construction and Works Center of West Coast New Area, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Prediction of water inflow of a sub-sea tunnel under the blasting vibration effect is still a difficult subject. This paper takes the sub-sea tunnel between the Wawuzhuang Station and Guizhou Road Station of the Qingdao Metro Line 1 as the engineering background. Based on the equivalent continuum model, the mirror image method is used to deduce the calculation formula for the water inflow of the sub-sea tunnel considering the

收稿日期: 2022-05-18; 修订日期: 2023-02-24

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021QE187)

第一作者: 李嘉诚(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下空间与隧道工程。E-mail: 985621237@qq.com

通讯作者: 吕显州(1990-), 男, 博士, 讲师, 主要从事城市与矿山地下工程软岩变形控制与施工参数优化等方面的研究。

E-mail: lyuxianzhou0608@sdust.edu.cn

damage area factor. Through forward modeling and inversion, combined with numerical simulation results and actual engineering monitoring results, the correctness of the formula is comprehensively verified, and the influence mechanism of damage area factors on water inflow is analyzed. The results show that the squeezing effect caused by blasting vibration makes the pore water pressure of surrounding rock around the tunnel rise rapidly in a short time. After reaching the peak value, it began to decline slowly with the weakening and disappearance of blasting vibration. Under the influence of damage zone factors, the water inflow of the tunnel increases gradually with the increasing thickness of the damage zone, but it will not increase continuously with the increase of the coefficient of permeability in the damaged area. Through numerical simulation calculation, the ratio of tunnel water inflow considering blasting damage area is 1.4, and the error is only 4.1% compared with the calculation result of 1.342 deduced in this paper. The calculated results in this study are only $0.53 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ less than the field measured results, and are closer to the measured results than those with the traditional calculation formula, indicating that the calculation formula in this paper is suitable for the calculation of tunnel water inflow considering the factor of damage zone, and are of high engineering application value.

Keywords: sub-sea tunnel; water inflow; damage area; seepage field; numerical simulation

海底隧道作为一种连接隔海地区、加强两地的资源利用和整合、拓展城市发展空间的重要交通载体,在我国经济建设中发挥着越来越重要的作用。但海底隧道修建过程中往往面临极其复杂的地质与工程环境,断层破碎带发育,岩体破碎,隧道开挖后围岩承受水压力较大且水量无限补给,因此,施工中的涌水量问题必须得到足够重视。

针对隧道的涌水量预测问题,国内外学者进行了大量研究。Zhang 等^[1]以青岛海底隧道为工程背景,以镜像法为理论基础推导了多水平岩层条件下涌水量的等效计算公式,并分析了隧道深度、半径和海水深度对涌水量的影响;潘格林等^[2]以青岛地铁 2 号线为工程背景,利用复变函数理论转换岩土体边界条件和渗流区域推导出不同注浆厚度下隧道涌水量预测计算公式;马少坤等^[3]以镜像法作为理论依据,建立无限平面内直线多隧道渗流模型,得出了海底隧道水头及涌水量解析解并在此基础上分析了含水层厚度、隧道埋深比、注浆圈参数等因素对隧道涌水量的影响;张东等^[4]基于连续介质假定、达西定律及非均匀多孔介质渗透率空间分布函数建立一维到三维的达西渗流模型,得到基于渗透率空间分布函数的等效渗透率理论表达式以利于工程仿真软件涌水量快速计算;王帅等^[5]利用镜像法推导了半无限平面平行 3 孔海底隧道渗流场解析式,并进一步分析了隧道间距、初期支护厚度、注浆圈厚度 3 种因素对隧道涌水量和初期支护外侧水压力的影响规律;傅鹤林等^[6]针对隧道在富水地层断层影响区可能面临的突涌水情况,利用断层等效和镜像叠加效应简化模型,并通过保角映

射理论进行计算,从而得到了断层影响区隧道地下水头重分布并提出水头值以及涌水量计算半解析式;李术才等^[7]以青岛胶州湾海底隧道为工程背景,对隧道开挖后涌水量进行实测,通过数值模拟、现场实测与模型试验的综合对比分析,得到合理的渗透系数,提高了海底隧道涌水量计算的准确性;Butscher^[8]比较了用于计算隧道涌水量的解析解和数值模拟的结果差距,分析了影响数值模拟精度的因素以及隧道边界条件的影响;Moon 等^[9]考虑了施工过程中地下水头下降的情况,并针对此情况推导了考虑当隧道路线附近没有水库或大片水体时,隧道上方的地下水补给可能不够快,无法避免施工引起的水位大幅下降情况下的地下水流入速率估算分析方法。

综上所述,国内外对于海底隧道涌水量计算、隧道穿越不良地质对隧道的影响等研究较多,应用到工程中的各项理论也较为广泛,但少有将损伤区作为影响因素考虑在内,通过解析解的方式分析在损伤区因素的影响下隧道涌水量的变化规律。本文针对青岛地铁 1 号线瓦屋庄站—贵州路站过海区间隧道,以镜像法作为理论依托,推导了考虑围岩损伤的海底隧道涌水量计算公式,并结合工程实际建立三维模型,分析预测钻爆法施工地铁隧道的涌水量以及渗流场和水压力场变化,最后通过对比分析,验证理论计算公式的可靠性。

1 海底隧道涌水量预测理论分析

1.1 常用的海底隧道涌水量计算公式

目前,常用的海底隧道涌水量计算公式多是根据

等价圆模型建立的, 其模型如图 1 所示。

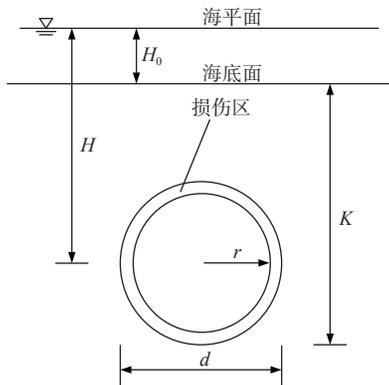


图 1 海底隧道等价圆模型

Fig. 1 Equivalent circle model of a submarine tunnel

注: H 为海底面到隧道中心的距离/m; H_0 为海平面至海底面的距离/m; K 为海底面至隧道底部围岩平均渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$); d 为隧道直径/m; r 为隧道半径/m。

因为海底隧道是处于半无限的含水地层中, 地下水补给充分, 地层中水头位置不变, 即为海底面位置, 所以在施工初期海底隧道的最大涌水量与施工后期的正常涌水量差异不明显。其最大涌水量的计算公式如表 1 所示:

表 1 国内外最大涌水量 (q_0) 传统计算公式

Table 1 Traditional calculation formula of the maximum water inflow at home and abroad

名称	公式
大岛洋志公式 ^[10]	$q_0 = \frac{2\pi Km(H + H_0 - r)}{\ln[4(H + H_0 - r)/d]}$
古德曼经验式 ^[11]	$q_0 = \frac{2\pi K(H + H_0)}{\ln[4(H + H_0)/d]}$
铁路规范经验式 ^[12]	$q_0 = \frac{2\pi K(H + H_0 + r)}{\ln(2H/r)}$

注: 表中变量解释见图 1。

对比分析表 1 可以发现, 传统涌水量计算公式仅是计算隧道开挖完整状态下隧道涌水量情况, 但钻爆法隧道施工造成隧道围岩产生损伤区, 传统公式无法将损伤区对涌水量的影响考虑在内。因此, 传统涌水量计算公式对于钻爆法隧道爆破扰动下的涌水量计算存在较大误差。

1.2 条件假设

海底隧道在开挖过程中, 爆破冲击必然会对围岩造成扰动使得原岩产生明显损伤。损伤区的渗透系数相对于未受损伤围岩将会明显增大。在计算时, 将损伤区看作一个整体, 计算模型如图 1 所示。公式推导假定条件如下:

- (1) 岩石整体为各向同性均匀连续介质;
- (2) 岩体内部渗流稳定且满足达西定律;

(3) 隧道断面形式为圆形, 且隧道中心线为假定位势零面;

(4) 渗流方式为径向渗流, 且损伤区边界处于等水头状态;

(5) 假设隧道周围围岩均匀损伤, 即假设侧向土压力系数(λ)为 1 的情况下围岩损伤, 本文计算中 $\lambda=1$;

(6) 假定海基底为平整且均匀的介质, 透水性按实际岩层透水性计算。

1.3 爆破振动下海底隧道涌水量计算式

由于海底隧道一直处于恒定水头情况下, 开挖过程中涌水量的预测成为海底隧道设计的主要问题之一。解析法能够快速有效地进行涌水量计算, 因此受到国内外学者的广泛关注, 其中镜像法^[3, 13-15]被广泛应用于隧道涌水量计算, 其计算简图如图 2 所示, 其中图 2(a)为镜像隧道流出与实际隧道涌入等水位线示意图, 而图 2(b)为虚拟隧道与实际隧道之间任意一点到隧道的距离位置关系示意图, 为下文理论推导做铺垫。

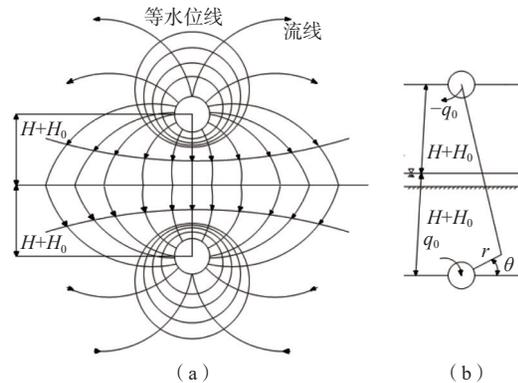


图 2 镜像法计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of image method calculation

当渗流速度较小时, 渗流满足达西定律, 即 $i = \frac{v}{k}$, 其中 i 为水力梯度, v 为渗流速度, 则流经隧道断面的流量 q_0 为:

$$q_0 = 2\pi r v = 2\pi r K \frac{d\varphi}{dr} \quad (1)$$

对式(1)积分得无限平面水头势函数为:

$$\varphi = \frac{q_0}{2\pi K} \ln r + D \quad (2)$$

式中: D ——常数;

q_0 ——真实隧道涌水量/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)。

设 $-q_0$ 为虚拟隧道涌出量/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), q_0 与 $-q_0$ 在数值上保持一致, 为区分方向, 以水涌入现实隧道为正, 水涌出虚拟隧道为负。

此时无限平面内存在 2 个稳定径向渗流的隧道,若测点距实际隧道中心点为 r , 根据几何关系可得测点到虚拟隧道中心点的距离为 $\sqrt{[2(H+H_0)-r\sin\theta]^2+(r\cos\theta)^2}$ 。根据叠加定理可得水头势函数为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_1 + \varphi_2 \\ &= \frac{q_0}{2\pi K} \ln\left\{\cos^2\theta + [2(H+H_0)/r - \sin\theta]^2\right\}^{0.5} + D \quad (3) \end{aligned}$$

根据海床面边界条件: $\varphi = H + H_0$, 且海床面任意一点到虚拟隧道和真实隧道距离相等, 代入式(3), 得到 $D = H + H_0$, 则通过式(3)可得下式:

$$h = \frac{q_0}{2\pi K} \ln\left\{\cos^2\theta + [2(H+H_0)/r - \sin\theta]^2\right\}^{0.5} + H + H_0 \quad (4)$$

式中: h ——位置水头/m;

θ ——测点到隧道中心点距离与隧道中心线夹角/(°)。

其中, 隧道中心线为零位势面且 $\theta=0^\circ$, 代入式(4)可得:

$$q_0 = -\frac{2\pi(H+H_0)K}{\ln\left\{1 + [2(H+H_0)/r_c]^2\right\}^{0.5}} \quad (5)$$

式中: r_c ——隧道半径/m。

假设隧道为大理深状态, 则 $\left[1 + (2H/r_c)^2\right]^{0.5} \approx 2H/r_c$, 式(5)可变成:

$$q_0 \approx -\frac{2\pi(H+H_0)K}{\ln[2(H+H_0)/r_c]} \quad (6)$$

将式(5)带入式(4)可得位置水头计算公式为:

$$h = \left[1 - \frac{\ln\left\{\cos^2\theta + [2(H+H_0)/r - \sin\theta]^2\right\}}{\ln\left\{1 + [2(H+H_0)/r_c]^2\right\}}\right](H+H_0) \quad (7)$$

上述计算公式在实际应用中, 尤其是钻爆法隧道开挖时往往误差较大。分析原因, 钻爆法施工时损伤区渗透系数通常增加多个数量级, 将会对涌水量计算结果产生较大影响。因此, 本文将损伤区考虑在内对涌水量计算公式进行修正, 损伤区水头损失与损伤区外围岩水头损失关系^[16]如图 3 所示, 假定损伤区与损伤区外围岩为 2 个均质区域, 其任一区域均满足达西定律。

由图 3 可知, 在进行计算时, 将损伤区假定为一个均质区域, 则损伤区单位涌水量(q_s)可由式(8)计算:

$$q_s = 2\pi r v = 2\pi r K_s \frac{d\varphi}{dr} \quad (8)$$

式(8)两边对损伤区范围 $r(r_c < r < r_s)$ 定积分可得:

$$\varphi = \frac{q_s}{2\pi K_s} \ln \frac{r_s}{r_c} + C \quad (9)$$

令 $C - \varphi = \Delta h_s$ 得:

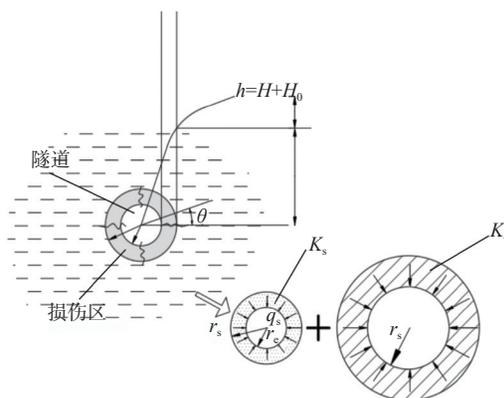


图 3 损伤区及外围岩水头损失示意图
Fig. 3 Schematic diagram of head loss of damaged area and surrounding rock

注: r_s 为损伤区外边界距隧道中心距离。

$$q_s = -\frac{2\pi K_s \Delta h_s}{\ln(r_s/r_c)} \quad (10)$$

式中: K_s ——损伤区渗透系数/($m \cdot d^{-1}$);

Δh_s ——损伤区水头损失/m。

隧道损伤区外围岩单位涌水量计算公式可由式(5)和式(6)转化为:

$$q_e = -\frac{2\pi K \Delta h_e}{\ln\left[1 + (2(H+H_0)/r_s)^2\right]^{0.5}} \approx -\frac{2\pi K \Delta h_e}{\ln[2(H+H_0)/r_s]} \quad (11)$$

式中: q_e ——损伤区外围岩单位涌水量/($m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-1}$);

Δh_e ——损伤区外水头损失。

H 为隧道中心至海底面高度, H_0 为海底面至水位线水头高度, 则有:

$$H + H_0 = \Delta h_e + \Delta h_s \quad (12)$$

因为渗流的连续性, 联立式(10)——(12)可得损伤区损失水头为:

$$\Delta h_s = \frac{H + H_0}{1 + \frac{\ln[2(H+H_0)/r_s]}{\ln(r_s/r_c)} (K_s/K)} \quad (13)$$

为便于公式观察, 设置参数 A , 表达形式如下:

$$A = \frac{\ln[2(H+H_0)/r_s]}{\ln(r_s/r_c)} \quad (14)$$

因为在损伤区边界有渗流量相等, 因此将式(11)代入式(8)可得:

$$q_s = q_e = -\frac{2\pi K (H+H_0)}{\ln\left[1 + (2(H+H_0)/r_s)^2\right]} \left[\frac{A(K_s/K)}{1 + A(K_s/K)} \right] \quad (15)$$

根据式(15)与式(5)可得考虑损伤区因素隧道单位涌水量与不考虑损伤区因素隧道单位涌水量比值为:

$$\frac{q_s}{q_0} = \frac{\ln\left[1 + \frac{2(H+H_0)}{r_c}\right] A(K_s/K)}{\ln\left[1 + \frac{2(H+H_0)}{r_c}\right] 1 + A(K_s/K)} \quad (16)$$

观察式(16)可以发现,公式右侧右半部分随着损伤区渗透系数的不断增大逐渐趋近于1,说明在损伤区厚度一定的情况下随着渗透系数的增加隧道涌水量将趋于一个稳定值,并不会无限增加下去;但是观察公式关于损伤区厚度部分可以发现,在隧道上部水头条件以及损伤区渗透系数增加量一定的情况下,随着损伤区厚度增加,涌水量不断增加。

1.4 公式退化验证

当损伤区为0时,即 $r_c = r_s$ 、 $K_c = K_s$,则式(16)可退化为:

$$\frac{q_s}{q_0} = \frac{A}{1+A}$$

又因为本文公式是在大埋深条件下假设计算,则可根据洛必达法则得出 A 趋近于无穷,所以 $\frac{A}{1+A} \approx 1$,则可以得到 $q_s = q_0$ 。由式(16)可知本文所推公式可退化为无损伤区时传统涌水量计算公式,形式是正确的。

2 损伤区厚度渗透系数的确定

2.1 损伤区厚度确定

国内外研究者的大量研究表明,药包爆破产生的冲击波对围岩造成较大破坏形成损伤压碎区,其厚度为2~3倍炮孔半径,而冲击波在迅速衰减后形成的应力波仍会对围岩造成较大伤害形成损伤区,其厚度则远大于压碎区厚度,为8~150倍炮孔半径^[17],因本文所涉及工程实际受到流固耦合效应以及应力重分布作用,会加剧损伤区的发展。为保证安全,本文损伤区厚度取150倍炮孔半径进行计算。

2.2 损伤区渗透系数

爆破作用后受应力重分布的影响,岩体中原有裂隙将扩展并产生新裂隙。上述两种作用使得围岩渗透系数发生变化,刘永胜^[18]分析了其爆炸应力波作用拉剪应力状态下岩体中的渗透系数的增加倍数公式,并将所得公式计算规律与Bossart等^[19]在瑞典的Mont Terri Rock Laboratory中进行的岩石渗透性试验结果进行对比,发现式(17)所得结果规律符合试验所得结果规律。因此,为便于计算,本文取此式(17)作为损伤区渗透系数计算公式。

$$\frac{K_s}{K} = \frac{\left[b_0 - \frac{(1-2\mu-\cos 2\beta)}{2(1-\mu)K_n} P_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \right]^3}{b_0^3} \quad (17)$$

式中: b_0 ——裂隙初始宽度,取0.002 m;

K_n ——裂纹的法向刚度;

P_0 ——等效炮孔壁压力/MPa;

α ——应力波衰减系数, $\alpha=2-\mu/(1-\mu)$;

β ——初始裂纹角度/(°);

μ ——泊松比。

分析式(17)可知,当 $\beta=0^\circ$ 时,公式有最大值。为保证安全,本文取最大值进行计算,且渗透系数增加倍数是距离 r 的 -3α 次函数,为便于计算,本文取损伤区渗透系数的计算平均数 K_s 为:

$$K_s = \frac{\int_0^{R_s} \left[b_0 - \frac{(1-2\mu-\cos 2\beta)}{2(1-\mu)K_n} P_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \right]^3 \cdot K_0 dr}{R_s} \quad (18)$$

将各系数代入式(18)可得损伤区渗透系数约为1.8 m/d,将由式(18)计算的结果代入式(16)可得损伤区单位涌水量与不考虑损伤区因素隧道单位涌水量比值约为1.342。

3 爆破振动影响下海底隧道涌水量数值模拟计算

3.1 工程概况

青岛地铁1号线有一段下穿胶州湾湾口海峡的区间,此跨海区间段为瓦屋庄站—贵州路站。该段区间的起始点里程号为K23+522,其终点里程号为K31+723。跨海区间线路全长约为8.2 km,其中海域段隧道就达到了3.45 km。陆域段隧道顶板埋深11~130 m,海域段隧道顶板埋深约40 m,采用钻爆法施工。其中海域段隧道为本文的主要研究对象,其中本项目隧道主要穿越地层为微风化凝灰岩,为弱-微透水性,在同一层面上透水性较均匀,地下水受海水潮汐影响变化幅度不大,有稳定的水头补给。

3.2 数值模型建立及参数选取

基于围岩本构模型、渗透特性演化模型,采用FLAC3D软件模拟流固耦合效应下海底隧道的真实爆破过程,以此分析在爆破震动影响下隧道涌水量情况,并进一步验证所推公式正确性。根据现场实际,隧道穿越的地层围岩级别主要为Ⅲ级,同时根据隧道施工影响消减范围确定模拟范围,建立模型尺寸为155 m×70 m×80 m($X \times Y \times Z$),为对比验证公式计算的准确性,隧道模型采用等效圆模型,数值模拟模型如图4所示。

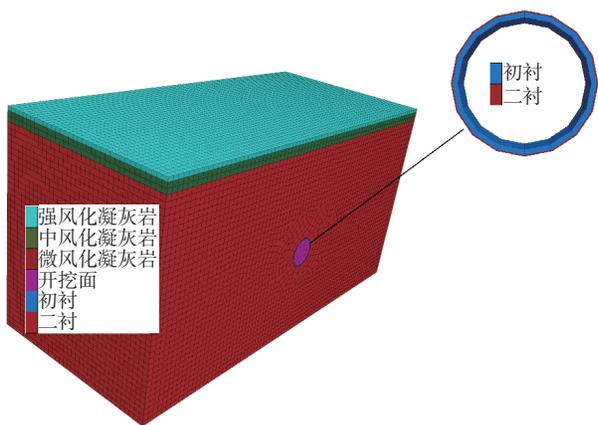


图 4 数值模型网格图

Fig. 4 Numerical model grid diagram

根据工程勘察、设计情况,确定计算模型中地层的组成及围岩、支护等的力学、水理计算参数,如表 2、表 3 所示。

3.3 模拟方法与模拟工况

3.3.1 模拟方法

本文选择 FLAC3D 软件自带的瑞利阻尼进行爆破振动数值模拟。在进行数值模拟时,瑞利阻参数的选择是十分重要,对于岩土类的材料来说,材料的临界阻尼比范围一般在 2% ~ 5% 之间。当数值模拟使用弹塑性的模型进行动力计算时,会有相当多的能量消散在材料发生的塑性流动阶段,所以在进行大应变的动力分析计算时,仅仅只需设置一个很小的阻尼比

表 2 岩体物理力学计算参数

Table 2 Physical mechanical calculating parameters of rock mass

地层名称	厚度/m	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
强风化凝灰岩	1.80	0.15	0.40	2 000.00	0.01	40.00	1.00
中风化凝灰岩	3.50	20.00	0.30	2 600.00	12.00	50.00	3.40
微风化凝灰岩	74.70	45.00	0.28	2 700.00	25.00	70.00	5.00
初期衬砌	0.10	30.00	0.28	1 800.00			
二次衬砌	0.45	46.00	0.20	2 500.00			

注:表中空格表示此项无数据。下同。

表 3 岩体水理参数

Table 3 Hydraulic parameters of rock mass

地层名称	渗透系数/(m·d ⁻¹)	渗透率/m ²	孔隙率	体积模量/GPa	切变模量/GPa
强风化凝灰岩	0.055 0	6.4×10 ⁻¹¹	0.39	0.25	0.053
中风化凝灰岩	0.043 0	5×10 ⁻¹¹	0.30	16.70	7.700
微风化凝灰岩	0.018 0	2.1×10 ⁻¹¹	0.12	34.10	17.600
初砌	0.000 8	9.3×10 ⁻¹⁶		22.70	11.700
二衬	0.000 3	3.22×10 ⁻¹⁶		35.20	18.100

就能满足要求,而且材料在达到塑性以后,随着应力-应变滞回圈的扩大,其能量的消散也将会逐渐明显。因此,本文选用 2% 作为临界阻尼比,通过采用 FLAC3D 软件建立模型,输入地层基本物理力学参数,然后进行无阻尼计算,采用模型的自振频率作为爆破震动时瑞利阻尼的中心频率,模型自振频率计算得到的位移时程线如图 5 所示。由图 5 可知,地层模型完成一个振荡周期所需的时间约为 0.003 3 s,因此可以计算出

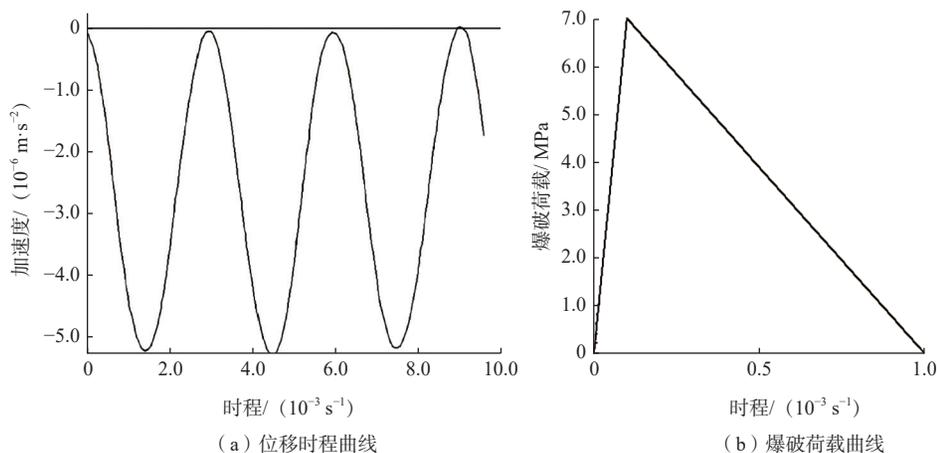


图 5 自振频率计算所得位移时程曲线及爆破荷载曲线

Fig. 5 Displacement time history curve and blasting load curve calculated from natural vibration frequency

系统的自振频率为 333.33 Hz, 同时也是瑞利阻尼的中心频率。模拟时, 采用应力时程曲线, 采用三角形荷载的加载方式, 如图 5 所示。

3.3.2 模拟工况

为突出模拟效果, 遵从实际工程, 采用 FLAC3D 软件中的大变形模式来模拟爆破振动对围岩的影响。同时, 以开挖、渗流、爆破 3 个主要因素为出发点, 对 3 种工况下的数值计算结果进行对比分析。具体工况如表 4 所示。

表 4 工况模拟详情

Table 4 Details of working condition simulation

工况	计算条件
1	无爆破、无渗流条件下隧道开挖施工模拟
2	无爆破时, 渗流条件下隧道开挖施工模拟
3	流固耦合效应下隧道钻爆开挖施工模拟

工况 1 是在模拟时不添加动力(爆破)模型和流体

(渗流)模型, 仅使用力学模型进行简单的开挖静力分析; 工况 2 是在模拟时不添加动力(爆破)模型, 通过流体模型及力学模型来产生流固耦合效应, 进行隧道开挖的模拟分析; 工况 3 是通过添加动力模型、流体模型及力学模型, 模拟三者耦合情况下的隧道开挖情况, 进行理论分析和规律总结。

3.4 数值模拟计算结果分析

3.4.1 孔隙水压力计算结果分析

隧道在开挖过程中, 孔隙水压力也会对隧道造成很大的影响。因此, 对隧道周边围岩的水压力场进行有效的监控和计算是十分必要的。通过数值模拟计算, 得到 2 种工况下隧道周边水压力场变化情况(图 6), 可以看出, 在工况 2 条件下, 隧道开挖支护后, 使得周边围岩孔隙水压力呈漏斗状的衰减状态, 尤其是隧道周边一定区域内地出现了明显的水压降低现象, 隧道衬砌呈无水压状态。

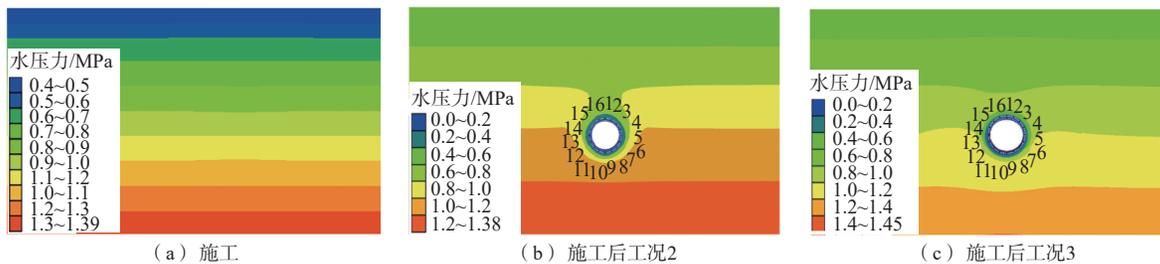


图 6 施工前后水压力场对比

Fig. 6 Comparison of water pressure field before and after construction

在工况 3 条件下, 可以发现爆破振动作用对隧道周边围岩孔隙水压力的产生和分布影响甚大, 在隧道爆破振动响应区外, 围岩的孔隙水压变化趋势与工况 2 相同, 均呈漏斗状; 在隧道周边的爆破振动响应区内, 围岩的孔隙水压呈增大现象, 产生超孔隙水压力, 分析认为爆破振动效应使得隧道周边围岩的渗透率及渗透系数随之增大, 通过应力场与渗流场耦合作用, 使得孔隙水压力进一步增大。

在数值模拟计算中通过设置监测点, 得到 2 种工况下隧道周边水压力随时间步的变化情况(图 7), 可以看出, 工况 2 条件下隧道开挖支护后进行收敛平衡计算时, 隧道周边的孔隙水压力一直呈下降趋势; 从数值中可以看出, 拱底处下降幅度最大, 拱顶处下降幅度最小, 且孔隙水压力下降幅度由隧道上部越往下越大。工况 3 条件下隧道进行开挖支护, 随着爆破施工的进行, 断面监测点位置的孔隙水压力最初有一段时间呈减小状态, 说明爆破振动还未影响到此处, 只

发生明显的流固耦合效应; 当爆破振动发生在监测断面时, 部分区域因爆破挤压作用, 发生挤压变形, 使得孔隙水压力在短时间内急速上升, 到达峰值后随着爆破振动的减弱及消失开始缓慢下降至初始孔隙水压力大小, 但若爆破荷载作用导致围岩破坏, 当爆破荷载作用结束时, 孔隙水压力小于初始孔隙水压力, 出现负增长现象。

3.4.2 涌水量计算结果分析

通过前期地质勘测来设定地层类型, 根据工程实际情况, 建立数值模型, 模拟爆破后隧道周边围岩的变化, 然后提取围岩周边数据, 通过数值模拟计算隧道周边围岩监测点的涌水速率。

隧道涌水量计算过程中, 根据设计断面, 海域段单洞等价圆直径按 10.34 m 计算, 海域海水位取历史最高水位进行计算。数值模拟在洞周选取 16 个监测点, 由于实际工程中海底隧道采用台阶法开挖, 且支护及时, 因此隧道全断面涌水量测试具有一定困难,

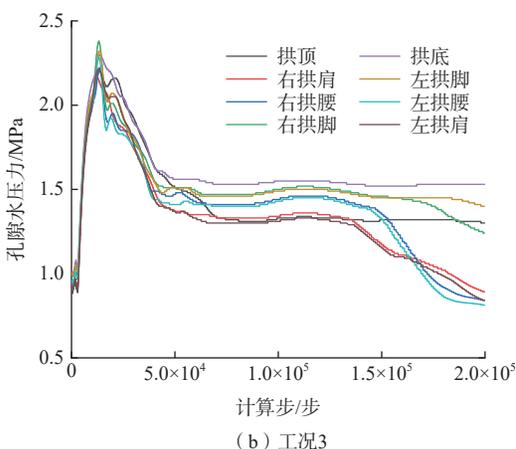
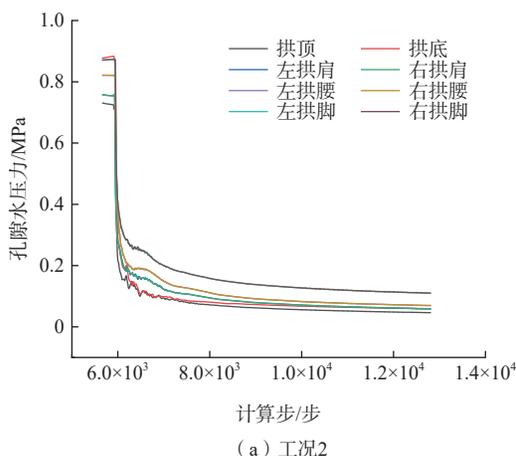


图 7 孔隙水压力场随时间步的变化

Fig. 7 Changes of pore water pressure field over time

但可以测试开挖之后、初衬施做之前每一爆破循环下隧道涌水量。为还原现实情况,特将监测点设置于二衬外部,用于监测刚爆破完成的流速,如图 6 中监测点位置所示。通过对监测点位置的流速进行监测计算,并将结果取平均值,从而计算隧道每延米的涌水量^[7, 20-21],其计算公式如下:

$$q_0 = 2\pi r \cdot \frac{\sum q_n}{n_j l_0} \quad (19)$$

式中: r ——等价圆半径/m;

q_n ——数值模拟涌水值/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$);

n_j ——监测点的数量;

l_0 ——海底隧道纵深单位长度/m。

通过数值模拟方法,对模拟段隧道的涌水量进行监测(监测点设置于二衬外侧围岩)和汇总计算,与文献 [10-12] 通用的公式以及现场检测结果和本文所推公式进行对比分析,由于隧道爆破施工仅改变一定范围内的地层渗透系数,但传统公式中涌水量计算仅能体现地层渗透系数而无法体现一定范围内渗透系数的变化,因此本文传统公式的计算仅按地层平均渗透系数计算,其结果如表 5 所示。

通过以上 4 种方法计算海域隧道计算的最大涌水量可以看出,大岛洋志公式计算出的单位涌水值最小,古德曼经验式次之,其次是铁路工程水文地质

表 5 海底隧道涌水量计算结果

Table 5 Calculating results of water inflow from submarine tunnels

起止里程	$q_0/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$						
	大洋岛志公式 ^[10]	古德曼经验式 ^[11]	规范经验式 ^[12]	工况 2 数值模拟结果	工况 3 数值模拟结果	现场实测结果	本文公式计算结果
K28+410—K28+480	1.86	2.59	2.88	3.24	4.54	4.01	3.48

勘察规程中推荐的经验式值,数值模拟计算的结果以及本文所推公式结果均比理论计算公式要大。分析原因,传统涌水量计算公式仅分析渗透系数对涌水量的影响,忽略了岩层中本身存在的孔隙和裂痕以及流固耦合效应对涌水的影响^[22],因此相对数值模拟结果较小。其中工况 3 条件下隧道单位涌水量是最大的,在爆破荷载作用下,围岩损伤区域的孔隙、裂隙均会增大,导致涌水量结果大于传统经验计算结果。而数值模拟结果相对于现场实测结果较大,分析原因为实际工程岩体中裂隙分布错综复杂,并非所有裂隙均会对涌水量产生影响,但数值模拟中仅受孔隙率影响即所有孔隙均假定会对涌水量产生影响,因此数值模拟结果相对现场实测结果较大。

其中工况 3 对应考虑爆破损伤区情况下涌水量,工况 2 代表不考虑爆破损伤区情况下涌水量,工况 3 涌水量与工况 2 涌水量比值为 1.4,本文公式计算结果 1.342 与其相比仅差 4.1%,说明本文计算公式符合考虑损伤区因素下涌水量增加规律。但本文公式计算涌水量结果相对数值模拟以及现场实测结果偏小,分析原因,围岩应力场以及渗流场在爆破荷载作用下产生应力重分布,导致损伤区范围增加,从而导致比值增大。但本文涌水量计算结果相对传统涌水量计算公式更接近于现场实测结果,且数值相对实测结果仅少 $0.53 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$,因此,本文公式在爆破施工下的海底隧道涌水量计算中具有良好的工程应用价值。

4 结论与建议

(1) 根据镜像法推导出考虑损伤区因素下海底隧道每延米涌水量与不考虑损伤区因素下隧道每延米涌水量比值; 新推计算公式所得结果与数值模拟结果仅相差 4.1%, 且本文涌水量计算结果相对传统涌水量计算公式更接近于现场实测结果, 数值相对实测结果仅少 $0.53 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$, 由此可知, 本文所推公式是符合考虑损伤区因素下隧道涌水量增加规律的, 并且具有较高的工程应用价值。

(2) 爆破振动产生的挤压作用使得隧道周边围岩孔隙水压力会在短时间内急速上升, 到达峰值后随着爆破振动的减弱及消失开始缓慢下降; 爆破振动效应使岩体发生破坏并影响渗透系数。当爆破振动未使围岩发生完全破坏时, 爆破作用结束后围岩孔隙水压力逐渐恢复到初始大小; 但当围岩在爆破荷载作用下发生完全破坏则会产生孔隙水压力负增长现象。

(3) 在损伤区因素影响下, 隧道涌水量随着损伤区厚度增加逐渐变大, 但不会随着损伤区渗透系数增加不断增加。因此, 在隧道开挖时, 对隧道损伤区应进行必要的支护, 以减小损伤区的发展对涌水量的影响, 从而减少因涌水量增加导致隧道工程建设的风险。

参考文献 (References) :

- [1] ZHANG Lewen, ZHAO Dukun, WU Jing, et al. Prediction of water inflow in Tsingtao subsea tunnel based on the superposition principle[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 97: 103243.
- [2] 潘格林, 王渭明, 贺广良, 等. 富水弱胶结地层地铁隧道裂隙水涌水量分析[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(4): 171 - 177. [PAN Gelin, WANG Weiming, HE Guangliang, et al. Fissure water inflow of a metro tunnel in a water-rich poorly consolidated stratum[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(4): 171 - 177. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张东, 刘晓丽, 王恩志. 非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 35 - 42. [ZHANG Dong, LIU Xiaoli, WANG Enzhi. A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 35 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王帅, 王渭明, 王晓杰, 等. 平行三孔海底隧道渗流场解析解及影响参数[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(13): 1481 - 1487. [WANG Shuai, WANG Weiming, WANG Xiaojie, et al. Analytical solution of seepage field in three-hole parallel tunnel and influence parameters[J]. *China Sciencepaper*, 2018, 13(13): 1481 - 1487. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 傅鹤林, 李鲇, 成国文, 等. 基于保角映射的断层影响区内隧道涌水量预测[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 86 - 92. [FU Helin, LI Jie, CHENG Guowen, et al. Prediction of tunnel water inflow in fault affected area based on conformal mapping[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(1): 86 - 92. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李术才, 赵岩, 徐帮树, 等. 海底隧道涌水量数值计算的渗透系数确定方法[J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1497 - 1504. [LI Shucan, ZHAO Yan, XU Bangshu, et al. Study of determining permeability coefficient in water inrush numerical calculation of subsea tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1497 - 1504. (in Chinese with English abstract)]
- [8] BUTSCHER C. Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32: 158 - 167.
- [9] MOON J, FERNANDEZ G. Effect of excavation-induced groundwater level drawdown on tunnel inflow in a jointed rock mass[J]. *Engineering Geology*, 2010, 110(3/4): 33 - 42.
- [10] 张继勋, 杨帆, 杨玲, 等. 改进的水封石油洞库群渗水量预估研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(2): 14 - 18. [ZHANG Jixun, YANG Fan, YANG Ling, et al. Improved water seepage prediction in seal petroleum cavern group[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2017, 39(2): 14 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 辛冬冬. 海底隧道涌水量预测方法研究及其爆破振动影响分析[D]. 济南: 山东大学, 2018. [XIN Dongdong. Study on the prediction method of water inflow in subsea tunnel and its impact analysis of blasting vibration[D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]

- [12] 刘世伟, 盛谦, 朱泽奇, 等. 隧道围岩内地下水渗流边界效应影响研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 4001 – 4009. [LIU Shiwei, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Research on boundary effect of groundwater seepage in tunnel surrounding rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4001 – 4009. (in Chinese with English abstract)]
- [13] HARR M E. Groundwater and seepage[M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [14] 吴建, 周志芳, 李鸣威, 等. 隧洞涌水量预测计算方法研究进展[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(4): 890 – 902. [WU Jian, ZHOU Zhifang, LI Mingwei, et al. Advance on the methods for predicting water inflow into tunnels[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 890 – 902. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张兵海, 崔炜, 张石磊, 等. 临近水库的隧洞二维渗流场解析解及工程应用研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(3): 126 – 134. [ZHANG Binghai, CUI Wei, ZHANG Shilei, et al. Study on analytic solution of 2-D seepage field of tunnel adjacent to reservoir and its engineering application[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(3): 126 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [16] FERNANDEZ G, MOON J. 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.
- [17] 王洪立, 徐帮树, 陈涛. 青岛胶州湾隧道开挖中爆破损伤范围研究[C]//中国岩石力学与工程学会. 第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 520 – 526. [WANG Hongli, XU bangshu, CHEN Tao. Study on blas-induced damage zone for excavation Qingdao Jiaozhou Gulf subsea tunnel[C]//China Society for Rock Mechanics & Engineering. Proceedings of the 10th National Conference on rock mechanics and engineering. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 520 – 526. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘永胜. 海底隧道钻爆开挖围岩稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. [LIU Yongsheng. Study on surrounding rock stability of subsea tunnel during drilling and blasting excavation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [19] BOSSART P, MEIER P M, MOERI A, et al. Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory[J]. *Engineering Geology*, 2002, 66(1/2): 19 – 38.
- [20] 王丹. 海底隧道含水断层涌水量分析及突水风险预测方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2017. [WANG Dan. Study of analysis of water inflow and risk prediction method of water intrush from water bearing faults in subsea tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 董贵法. 冲击荷载下弱风化花岗岩力学特性及渗透性试验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018. [DONG Guifa. Experimental study on mechanical properties and permeability of weakly weathered granite under impact load[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 姬永红, 项彦勇. 水底隧道涌水量预测方法的应用分析[J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(4): 84 – 87. [JI Yonghong, XIANG Yanyong. An analysis of application of the methods of predicting water influx to under-water tunnels[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 32(4): 84 – 87. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真