

基于稳定排水量等效原则预测 衬砌外水压力折减系数方法^{*}

高鑫¹ 冯世杰² 张廉卿³

(1. 青岛黄海学院建筑工程学院, 266427, 青岛; 2. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 450018, 郑州;
3. 中铁隧道集团二处有限公司, 065201, 三河)

摘要 [目的] 通过建立符合真实排水系统的渗流分析数值模型, 并引入二次衬砌“虚拟渗透系数”概念, 旨在深入探究数值方法与理论公式之间的关联性, 以期充分发挥理论公式在外水压力预测中的快捷实用优势。[方法] 基于水下隧道稳定排水量等效的原则, 研究引入了二次衬砌“虚拟渗透系数”的概念, 并以此为基础, 选取环向排水盲管布置间距、土工布厚度及其渗透系数作为主要研究因素, 通过调整这些因素, 建立了多个符合真实排水系统的渗流分析数值模型。[结果及结论] 真实作用在二次衬砌上的外水压力展现出显著的空间分布特征: 在纵向上, 外水压力的变化呈现出与环向排水盲管布置间距相匹配的周期性起伏规律; 在环向上, 距离纵向排水盲管越近的位置, 其外水压力越小, 且最大环向水压力呈现出拱顶最大、仰拱次之、边墙最小的分布特征。利用理论公式计算得到的外水压力折减系数普遍小于数值方法的结果, 且排水设计参数的排水能力越强, 2 种计算结果的差别越小。同时, 折减系数始终呈现出拱顶、仰拱、边墙依次减小的分布特征。当理论公式直接用于工程定量设计时, 需考虑引入一个大于 1 的综合修正系数以确保工程安全。综合修正系数的取值需结合具体工程部位, 以边墙为界进行分区, 其上结构宜取 1.48 ~ 1.97, 其下结构宜取 1.21 ~ 1.39。

关键词 地铁隧道; 衬砌水压力; 虚拟渗透系数; 稳定排水量; 理论公式; 数值方法

中图分类号 TV554⁺.14

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.050

Predicting Method for Lining External Water Pressure Reduction Coefficient Based on Equivalent Stable Drainage Volume Principle

GAO Xin¹, FENG Shijie², ZHANG Lianqing³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Qingdao Huanghai University, 266427, Qingdao, China; 2. Henan Zhongzhou Design & Research Co., Ltd., 450018, Zhengzhou, China; 3. Erchu Co., Ltd. of China Railway Tunnel Group, 065201, Sanhe, China)

Abstract [Objective] By establishing a numerical seepage analysis model that aligns with real drainage systems and introducing the concept of a 'virtual permeability coefficient' for secondary lining, the objective is to delve into the correlation between numerical methods and theoretical formulas, with expectation to leverage the efficiency and practicality of theoretical formulas in predicting external water pressure. [Method] Based on the principle of equivalent stable drainage volume in underwater tunnels, the concept of a 'virtual permeability coefficient' for the secondary lining is introduced. On this basis, key factors, including the spacing of circumferential drainage blind pipes, the thickness of geotextiles, and their permeability coefficients, are selected as primary research factors. By adjusting these factors, multiple numerical seepage analysis models consistent with real drainage systems are established. [Result & Conclusion] The actual external water pressure acting on the secondary lining exhibits significant spatial distribution characteristics. Longitudinally, the variation in external water pressure displays periodic fluctuations corresponding to the spacing of circumferential drainage blind pipes. Circumferentially, the closer the position is to the longitudinal drainage blind pipe, the lower the external water pressure, with maximum circumferential water pressure occurring at the arch vault, followed by the inverted arch, and the smallest pressure on sidewalls. The reduction coefficients of external water pressure calculated with theoretical formulas are generally smaller than those derived from numerical methods. The stronger the drainage capacity of the design parameters, the smaller the difference between the two calculation results. The reduction coefficient consistently follows a decreasing trend from the vault to the invert to the sidewalls. When applying theoretical formulas directly in quantitative engineering design, it is necessary to introduce a comprehensive correction factor greater than 1.0 to ensure engineering safety. The value of comprehensive correc-

^{*} 青岛黄海学院科技类重点项目(2024KJ24); 青岛地铁集团科研项目(M4-ZX-2018-17)

tion factor should be determined based on the specific structural location, with zones divided by the sidewalls. For the upper structure, a range of 1.48-1.97 is recommended, while a proper range of 1.21-1.39 for the lower structure

Key words metro tunnel; water pressure on lining; virtual permeability coefficient; stable drainage volume; theoretical formula; numerical method

0 引言

富水隧道通常采用限排型复合衬砌作为主要支护形式^[1],通过持续排出初期支护内部的地下水,有效减轻作用在二次衬砌上的外水压力。然而,由于真实排水系统空间布置形式的复杂性,难以构建与之完全相符的力学分析模型,从而无法推导出能够准确描述外水压力空间分布特征的理论公式。目前,估算二次衬砌外水压力效应主要采用以下2种方法:

1) 基于二次衬砌均匀透水假设推导出的退化轴对称理论公式^[2-3]。但实际上,二次衬砌常被设计为不透水结构,地下水主要通过预埋的排水系统定向排出,因此该假设并不成立。

2) 将复杂的空间三维排水问题简化为易于数值分析的平面二维排水问题^[4-5]。通常将间隔布置的管状排水设施等效为连续分布的透水层与泄水缝,并赋予一定的渗透系数。然而,地下水在管状设施内的流动属于有序径流,不遵循达西定律^[6],因此等效层厚度计算方法与渗透系数取值的合理性存在争议。

鉴于上述方法的不足,本文通过建立符合真实排水系统的渗流分析数值模型,并引入二次衬砌“虚拟渗透系数”概念,基于稳定排水量等效原则,旨在探究数值方法与理论公式之间的关联,充分发挥理论公式的快捷实用优势。

1 外水压力空间分布特征

富水深埋隧道的抗渗设计等级普遍不低于P12,其渗透系数远低于地层、注浆圈、初期支护及排水材料的透水能力。进入初期支护内部的地下水优先沿土工布排流至邻近的环、纵向排水盲管,然后通过墙脚横向泄水管引入洞内水沟,最终利用纵坡排至端头废水泵房。二次衬砌背后地下水排流路径如图1所示。

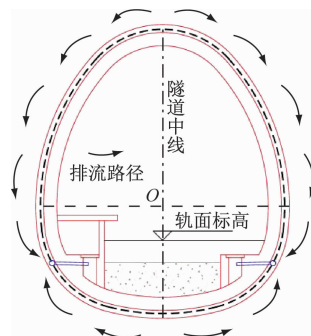


图1 二次衬砌背后地下水排流路径

Fig.1 Drainage path of groundwater behind secondary lining

鉴于环纵向排水盲管通过横向泄水管与外界大气相连,可视为最终的集水设施,其水头边界设置为零孔压^[7]。以拱顶水头高度88 m、环向排水盲管布置间距8 m、土工布厚度3 mm及其渗透系数 1.0×10^{-5} m/s为算例参数,建立渗流分析模型。模型四周设置符合实际地层水力梯度的水头边界条件,允许与外界发生液体自由交换。二次衬砌外水压力的空间分布特征如图2所示。

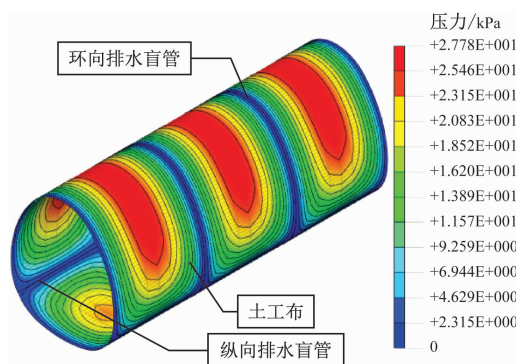


图2 外水压力空间分布特征

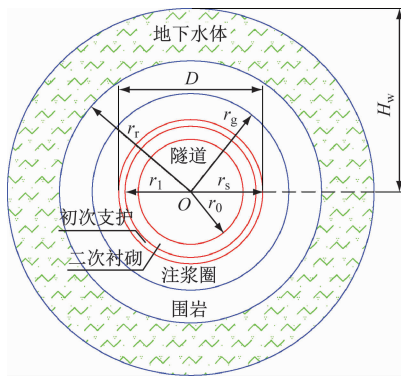
Fig.2 Spatial distribution characteristics of external water pressure

由图2的结果表明:作用在二次衬砌上的外水压力沿纵向呈现周期性起伏,周期等于环向排水盲管布置间距,且在相邻排水盲管中间位置达到最大值。由于仰拱位置距离墙脚纵向排水盲管较近,最大环向水压力呈现出拱顶最大、仰拱次之、边墙最小的分布特征。分析表明,环向排水盲管的纵向间距显著影响二次衬砌外水压力的空间分布,因此空间三维排水问题不能简单等效为平面二维排水问题。

2 退化轴对称理论公式

地下水在深埋圆形洞室复合式衬砌上的渗流

作用可用退化轴对称力学模型表征,如图 3 所示。



注: r_r 、 r_g 、 r_s 、 r_l 、 r_0 —地层、注浆圈、初期支护、二次衬砌外径及洞室内径; D —隧道外径; H_w —远场水利势。

图 3 退化轴对称力学模型表征

Fig. 3 Degraded axisymmetric mechanical model representation

假定地层为各向同性、均匀、连续介质, H_w 为定值,地下水运动满足 Darcy 定律和质量守恒定律^[8]。根据地下水动力学知识、保角变换原理^[9],推导出作用在二次衬砌上外水压力折减系数与稳定排水量的数学表达式:

$$\beta_s = \frac{\ln \frac{r_l}{r_0}}{\frac{k_l \ln \frac{r_r}{r_g}}{k_r} + \frac{k_l \ln \frac{r_g}{r_s}}{k_g} + \frac{k_l \ln \frac{r_s}{r_l}}{k_s} + \ln \frac{r_l}{r_0}} \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{2\pi k_l H_w}{\frac{k_r \ln \frac{r_l}{r_0}}{k_l} + \frac{k_r \ln \frac{r_s}{r_l}}{k_s} + \frac{k_r \ln \frac{r_g}{r_s}}{k_g} + \ln \frac{r_r}{r_g}} \quad (2)$$

式中:

k_r 、 k_g 、 k_s 、 k_l ——地层、注浆圈、初期支护及二次衬砌的渗透系数,单位 m/s ;

β_s ——外水压力折减系数;

Q_s ——稳定排水量,单位 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

根据排水面积相等原则,计算出与数值模型等效的圆形洞室内径为 4.67 m。利用式(1)、式(2),分别绘制外水压力折减系数与稳定排水量随二次衬砌渗透系数变化曲线,如图 4 所示。

理论公式仅表征作用在二次衬砌上的平均外水压力,未考虑拱顶、边墙与仰拱等具体部位的影响。外水压力折减系数随二次衬砌渗透系数的增大而减小,稳定排水量则呈现相反的变化规律。因此,为获得可直接用于工程设计的外水压力折减系数与稳定排水量,关键在于将真实排水系统的排水能力合理等效为二次衬砌的渗透系数。

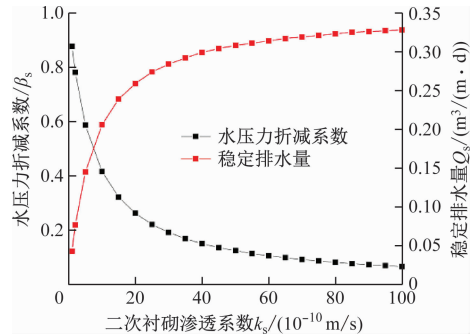


图 4 渗透系数变化曲线

Fig. 4 Permeability coefficient variation curve

综上所述,理论公式表述简洁,参数易获取,是一种便捷实用的外水压力预测方法,但仅能定性分析规律,无法定量指导设计。而数值方法求解的外水压力空间分布特征符合实际情况,但分析过程耗时费力。因此,亟须构建数值方法与理论公式之间的关联,以充分发挥理论公式的实用化优势,同时保证外水压力预测结果的可靠性。

3 研究思路与技术路线

隧道稳定排水量是判断地下水资源是否过度流失的重要指标,决定运营期间排水设备与维修设施的成本投入。隧道衬砌设计时需计入的外水压力作用,通常会考虑一个小于 1.0 的折减系数,以兼顾结构的安全性与经济性。因此,本文基于稳定排水量等效原则,引入二次衬砌“虚拟渗透系数”的概念。虚拟渗透系数实现路径如图 5 所示,并结合图 2 制定技术路线:

1) 建立不同排水设计参数下的渗流分析数值模型,计算并提取各个分析工况的稳定排水量;

2) 不断调整理论式(2)中二次衬砌渗透系数的取值,当理论计算结果与数值方法完全相等时,即为二次衬砌的“虚拟渗透系数”;

3) 利用理论式(1)计算不同二次衬砌“虚拟渗透系数”对应的外水压力折减系数,分别与数值计算结果进行对比分析。

4 虚拟渗透系数

以青岛地铁 1 号线过海区间单洞单线蛋形隧道为依托工程,数值模型所需地层、支护与排水设计参数详见表 1。

4.1 真实稳定排水量

通过选择环向排水盲管布置间距、土工布厚度

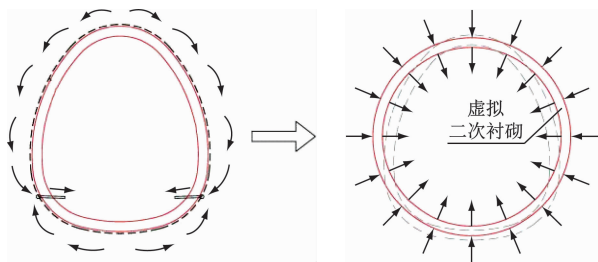


图5 虚拟渗透系数实现路径

Fig. 5 Realization path of virtual permeability coefficient

及其渗透系数为研究变量,计算并绘制稳定排水量随不同排水设计参数的变化曲线,如图6所示。

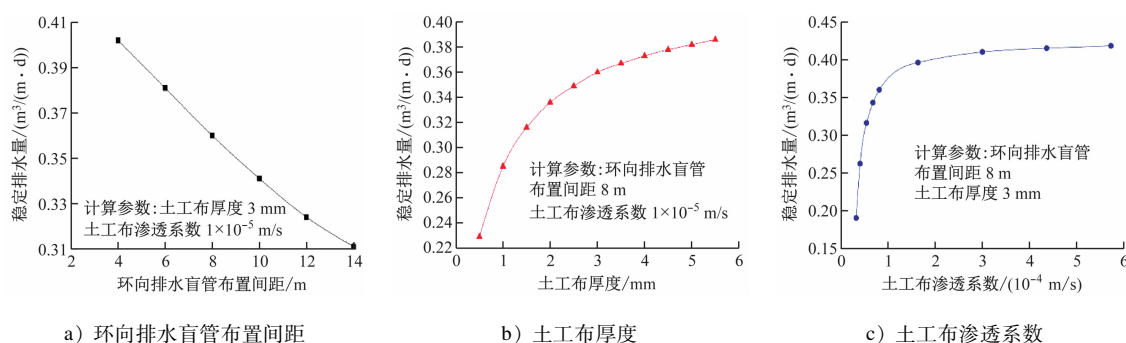


图6 稳定排水量随不同排水设计参数的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of stable water discharge with different drainage design parameters

由图6的研究结果表明:稳定排水量随环向排水盲管布置间距的增大而减小,随土工布及其渗透系数的增大而增大。前者近似线性变化,后两者呈现曲线走势。量值普遍小于 $0.45 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$,满足近年来新建或待建水下隧道设计允许的 $0.2 \sim 0.5 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$ 排水量控制标准^[10],说明本文依据

稳定排水量等效原则计算外水压力所选的排水设计参数是合理可行的。

4.2 虚拟渗透系数

根据技术路线的要求,绘制虚拟渗透系数与不同排水设计参数的关系曲线,如图7所示。

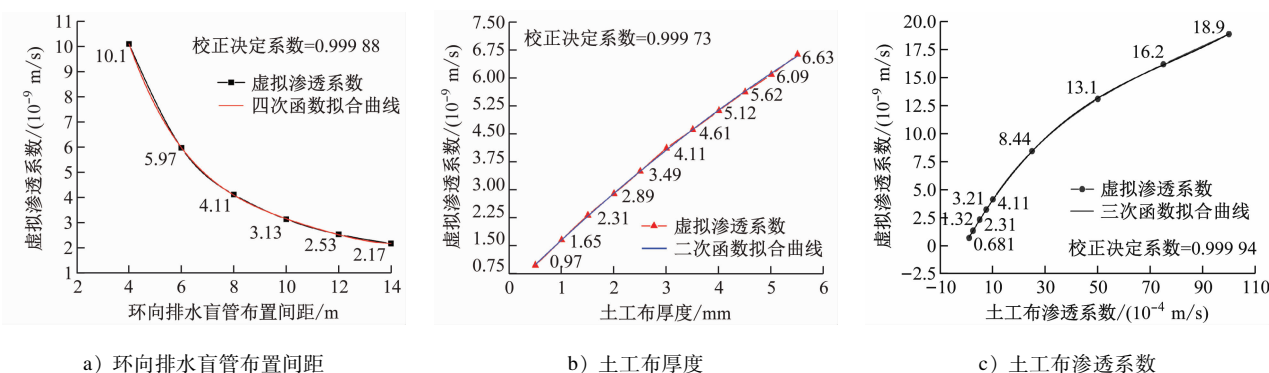


图7 虚拟渗透系数与不同排水设计参数的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between virtual permeability coefficient and different drainage design parameters

从图7可以看出:基于稳定排水量等效原则,不同排水设计参数下虚拟渗透系数变化曲线的走势完全不同。借助多次函数进行拟合,其随环向排水

盲管布置间距、土工布厚度及其渗透系数变化曲线的拟合公式分别为四次、二次与三次函数,如下式所示:

$$k_* = \begin{cases} -9.603l + 1.22l^2 - 0.072l^3 + \\ 1.6 \times 10^{-3}l^4 + 33.22 \\ 1.39t - 0.0445t^2 + 0.3060.412k_t - \\ 3.95 \times 10^{-3}k_t^2 + 1.684 \times 10^{-5}k_t^3 + 0.323 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

k_* ——虚拟渗透系数,单位 m/s ;

l ——环向排水盲管布置间距,单位 m ;

t ——土工布厚度,单位 mm ;

k_t ——土工布渗透系数,单位 m/s 。

式(3)拟合公式的校正决定系数依次分别是 0.999 88、0.999 73、0.999 94,说明拟合公式的精确可靠,初步建立起数值方法与理论公式之间的关

联;同时,图 7 虚拟渗透系数与不同排水设计参数之间密切相关的变化曲线,也再次印证了将复杂空间三维排水问题简化为平面二维排水数值模型的方式的不合理性,坚决不能忽视地下水在空间排水系统内部的有序排流及其在管状设施中的非达西流行为,说明仅依据简单的几何换算便将不同排水设施等效成空间无序的透水层与泄水缝的简化思路是不可取的。

5 折减系数对比分析

图 8 为基于数值分析与理论公式两种方法的外水压力折减系数对比变化曲线。

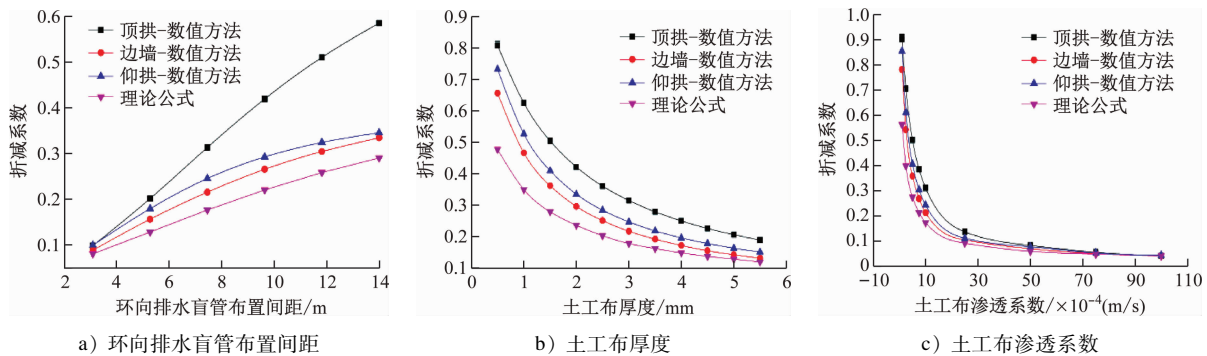


图 8 基于数值分析与理论公式两种方法的外水压力折减系数对比变化曲线

Fig. 8 Variation curve of external water pressure reduction coefficient based on numerical analysis and theoretical formula

由图 8 可以看出,理论公式计算得到的外水压力折减系数普遍小于数值方法的结果。排水设计参数越有利于地下水的排放,两种计算结果的差别越小。靠近墙角纵向排水盲管的工程部位,两种计算结果越接近。折减系数总是呈现出拱顶 > 仰拱 > 边墙的分布特征。这说明理论上的均匀渗水比实际上的定点排水更有利于缓解作用在二次衬砌上的外水压力,且外水压力沿洞身高度方向上的分布更加均匀。若工程中仍根据理论公式(1)计入外水压力作用,会导致结构设计结果偏于冒进。正确做法应考虑一个大于 1.0 的综合修正系数以确保工程安全。这就是目前限量排水型衬砌考虑外水压力折减系数影响时仍以工程类比法为主,鲜少依靠理论公式计算结果进行结构尺寸与配筋设计的原因。

再次结合图 8 可知,在特定排水设计参数下,综合修正系数同样遵循拱顶 > 仰拱 > 边墙的变化规律。其取值需结合具体工程部位。以常见环向排水盲管布置间距、土工布厚度及其渗透系数为例,

不同关键部位的综合修正系数详见表 2。结合图 8 可知:在特定的排水设计参数下,综合修正系数同样遵循拱顶 > 仰拱 > 边墙的变化规律,其取值需要结合具体的工程部位。以工程中常见的环向排水盲管以 8 ~ 12 m 的间距布置、土工布厚度为 2.5 ~ 4.5 mm 及其渗透系数处于 $7.5 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 的范围内为例,不同关键部位的综合修正系数具体数值见表 2。

表 2 综合修正系数统计

Tab. 2 Comprehensive correction coefficient statistics

综合修正系数			
位置	环向排水盲管间距	土工布厚度	土工布渗透系数
拱顶	1.78 ~ 1.97	1.69 ~ 1.78	1.48 ~ 1.80
边墙	1.16 ~ 1.22	1.16 ~ 1.24	1.14 ~ 1.25
仰拱	1.25 ~ 1.39	1.32 ~ 1.40	1.21 ~ 1.42

由表 2 可以看出:不同排水设计参数下,拱部综合修正系数离散型较强,而边墙与仰拱变化相对较小;结合图 2 外水压力分布云图,建议工程中以边墙

为界分区,其上结构考虑 1.48 ~ 1.97 的综合修正系数,其下结构宜考虑 1.21 ~ 1.39 的综合修正系数。同时,建议在隧道运营期间密切关注稳定排水量的动态变化,及时分析监测数据并反馈信息,实时掌握地下水作用在二次衬砌上外水压力的分布情况,正确评估排水系统的工作性能与隧道衬砌的安全服役状态。

6 结语

本文基于单洞单线水下隧道的背景,对数值方法与理论公式之间的关联性进行了深入研究与分析,得出以下结论与建议:

1) 实际二次衬砌所受的外水压力展现出明显的空间分布特性,在纵向上,其变化呈现出与环向排水盲管布置间距相匹配的周期性起伏规律;而在环向上,则表现为拱顶处最大,边墙次之,仰拱最小的分布格局。此分布特征无法简单等同于通过理论推导所得公式或简化的二维平面排水问题模型。

2) 针对不同排水设计参数的情况,外水压力折减系数的理论计算结果普遍低于数值方法的计算结果,且始终呈现出拱顶、仰拱、边墙依次减小的分布特征。随着排水设计参数的排水能力增强,两种计算方法所得结果之间的差异逐渐缩小。

3) 当理论公式计算结果直接应用于工程的定量设计时,需引入一个大于 1 的综合修正系数进行修正。在特定排水设计参数下,同样遵循拱顶、仰拱、边墙依次减小的变化规律。对边墙以上的结构,建议综合修正系数取值范围为 1.48 ~ 1.97;而对边墙以下的结构,则建议取值范围为 1.21 ~ 1.39。

参考文献

- [1] 蒋雅君,李彬,杨其新,等. 隧道排水系统工作能力对衬砌水压力的影响探讨[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 179.
JIANG Yajun, LI Bin, YANG Qixin, et al. Discussion on influence of working capacity of drainage system on water pressure acting on tunnel lining[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(12): 179.
- [2] 袁金秀,刘炳华,高新强,等. 高压隧道衬砌背后水压力预测模型研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7): 48.
YUAN Jinxiu, LIU Binghua, GAO Xinqiang, et al. Research on the prediction model of water pressure on tunnel lining under high hydraulic pressure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(7): 48.
- [3] 马宁. 海底隧道复合式衬砌水压力分布规律及结构受力特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
MA Ning. Study on distribution law of water pressure on the composite lining and the stress characteristics of structure of subsea

- [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] 丁小平,刘昭,史宝童,等. 复合衬砌量化修正渗透系数隧道涌水量的计算方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 461.
DING Xiaoping, LIU Zhao, SHI Baotong, et al. Calculation on the calculation method of tunnel water inflow based on quantitative correction coefficient of permeability composite lining[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2015, 36(4): 461.
- [5] 麻凤海,高冠一. 隧道过海段水压力及渗流量计算方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 290.
MA Fenghai, GAO Guanyi. Calculation method of water pressure and seepage flow for subsea tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 290.
- [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.
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.
- [7] 李建军,刘荆辉. 防排水系统对复合式衬砌渗透特性的影响及表征方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 995.
LI Xiaojun, LIU Jinghui. Effect of waterproof and drainage system on seepage properties of composite characterization method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(7): 995.
- [8] 任世林. 四线临海隧道开挖渗流演变及参数影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 1985.
REN Shilin. Analysis on seepage evolution and parameter influence of four-line seaside tunnel excavation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 1985.
- [9] 罗介池. 福格村隧道隧址区渗流场研究与涌水量预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
LUO Jiechi. Study on seepage field and water inrush forecast of Fuge Village Tunnel site [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [10] 戴新,贺维国,王东伟,等. 深埋矿山法海底隧道排水设计探讨:以珠江口铁路隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(4): 695.
DAI Xin, HE Weiguo, WANG Dongwei, et al. Drainage design of a deep-buried subsea tunnel using mining method: a case study of Pearl River Estuary railway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(4): 695.

· 收稿日期:2022-11-18 修回日期:2023-03-29 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-18 Revised:2023-03-29 Published:2025-03-10
· 第一作者:高鑫,高级工程师,副教授,352110640@qq.com
通信作者:冯世杰,工程师,2725231013@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license