

防排水系统对复合式衬砌渗透特性的影响及表征方法

李晓军, 刘荆辉

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用修正的初衬渗透系数表征复合式衬砌的渗透特性。建立了复合式衬砌渗流模型, 推导了复合式衬砌的渗透系数计算公式, 并分别采用模型退化方法和数值法对提出的公式进行了验证。结果表明: 当围岩渗透系数为 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 考虑环向排水管、土工布和防水板的复合式衬砌渗透系数对涌水量和外水压力的影响不容忽视; 复合式衬砌渗透系数与环向排水管间距、初衬渗透系数、初衬内外半径、土工布厚度、土工布渗透系数密切相关; 环向排水管间距越大, 复合式衬砌渗透系数越小。

关键词: 岩石隧道; 复合式衬砌; 渗透系数; 土工布; 排水管
中图分类号: TU452 **文献标志码:** A

Effect of Waterproof and Drainage System on Seepage Properties of Composite Lining and Its Characterization Method

LI Xiaojun, LIU Jinghui

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The corrected initial lining permeability coefficient is adopted to characterize the permeability of composite lining. A seepage model of composite lining is established and the correction formula of the permeability coefficient of composite lining is derived. Then, the proposed formula is verified by using the model reduced and numerical method. It is found that: when the rock surrounding permeability coefficient in the range of $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, with a consideration of drainage pipes, geotextile and waterproof sheet, the effect of the permeability coefficient of composite lining on water inflow and external water pressure should not be ignored; the permeability coefficient of composite lining is closely

related to the distance between two circular drainage pipes, the permeability coefficient of initial lining, the inner and outer radius of initial lining, the thickness and the permeability coefficient of geotextile; the larger the distance between two circular drainage pipes, the smaller the permeability coefficient of composite lining.

Key words: rock tunnel; composite lining; permeability coefficient; geotextile; drainage pipes

当前的富水岩石隧道大多采用设有防排水系统的复合式衬砌^[1]。在复合式衬砌防排水系统的设计过程中, 隧道涌水量是一项重要参数^[2], 同时衬砌外水压力是复合式衬砌设计中的一项重要荷载^[3-4], 而涌水量和外水压力与衬砌的渗透系数密切相关^[5-6]。土工布是隧道防排水系统的重要部分^[7], 地下水因土工布中的渗流阻力而导致其渗流速度降低^[8], 环向排水管间距和防水板也是影响涌水量和衬砌外水压力的重要因素^[9-10]。忽视这些因素的影响就会导致预测计算结果与实测结果存在一定差距^[9]。因此, 如何考虑土工布、环向排水管和防水板因素以及如何准确确定复合式衬砌的渗透系数是衬砌外水压力和隧道涌水量计算的关键^[9, 11]。

复合式衬砌包含初衬和二衬2层衬砌, 地下水通过两者之间的排水系统进入隧道^[10]。目前隧道涌水量和衬砌外水压力的计算通常将复合式衬砌简化为单层均质透水衬砌, 其渗透系数不考虑排水管、防水板的作用^[10, 12]。Arjnoi等^[13]假定复合式衬砌为单层均质透水衬砌, 分析了不同排水方式下的围岩渗流场分布。Ying等^[14]基于单层衬砌推导出适用于均质围岩的涌水量和衬砌外水压力解析解。张祉道^[15]、Wang等^[16]采用简化的单层衬砌渗流模型, 提

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(41877246); 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交科教便[2019]36号)

第一作者: 李晓军(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道及地下工程。

E-mail: lixiaojun@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

出了包含注浆圈的涌水量和外水压力公式。于丽等^[17]以泄水型管片衬砌为对象,分析了围岩渗透系数、隧道排水率等因素对衬砌外水压力的影响。Maleki^[18]根据单层衬砌的假定提出一个全新的隧道涌水量解析式。以上方法中的单层透水衬砌的渗透系数大多根据试验或经验确定,未能准确考虑隧道防排水系统的影响。为此,一些学者尝试采用数值法来考虑复合式衬砌渗透特性。Shin等^[19]采用数值法模拟了考虑防排水系统的复合式衬砌与围岩中的渗流场,提出了衬砌外水压力的计算方法;赵乐^[20]采用FLAC(fast Lagrangian analysis of continua)软件模拟了复合式衬砌中的渗流,分析了泄水孔纵向间距对衬砌外水压力的分布规律。赵启超^[21]采用数值法分析了两侧边沟排水条件下的衬砌外水压力分布特征。以上数值法在考虑复合式衬砌渗透特性过程中,建模计算以及结果获取都较复杂,耗时长,难以在工程应用中应用。因此,在涌水量与外水压力计算过程中,部分学者提出采用衬砌渗透系数的量化修正方法^[12]或者等效渗透系数^[22]对复合式衬砌渗透特性进行修正来考虑防排水系统因素。郑波等^[22]提出了复合式衬砌等效渗透系数的简化计算方法,将设有防水板和排水管的复合式衬砌渗透特性用等效渗透系数来表示。丁小平等^[12]根据隧道涌水量相等的原则对复合式衬砌的渗透系数进行量化修正。李宗利等^[4]应用深埋隧道渗流场对隧道透水性复合式衬砌环的渗透系数合理取值进行了探讨。以上学者对复合式衬砌渗透系数的计算与修正做了初步探讨和应用,但未提出该参数通用的计算公式,同时没有完全考虑防排水系统中的土工布、环向排水管、防水板因素,导致以上方法在实际工程的涌水量和衬砌外水压力的预测计算中仍难以应用。

通过隧道复合式衬砌渗流模型的建立,推导了复合式衬砌的渗透系数计算公式,该公式通过对复合式衬砌中初衬渗透系数的修正来考虑防排水系统中的土工布、防水板、环向排水管因素。对推导的公式分别采用数值法和模型退化方法进行了验证,并对修正的初衬渗透系数进行了应用计算和影响规律分析。

1 基本理论与公式推导

1.1 复合式衬砌渗流模型

复合式衬砌渗流模型包含初衬、土工布、排水系统、防水板和二衬,如图1所示。

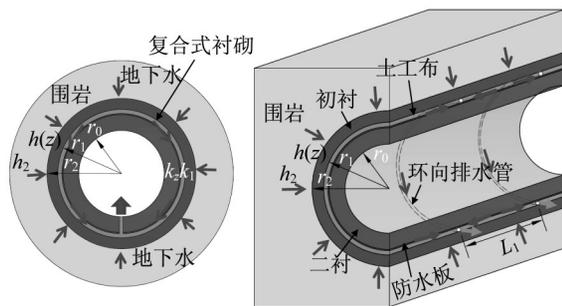


图1 复合式衬砌渗流模型

Fig.1 Seepage model of composite lining

在复合式衬砌渗流模型中,地下水渗流路径从围岩开始,经初衬、土工布再到环向排水管,该阶段的地下水渗流满足达西定律和质量守恒定律。进入环向排水管的地下水经纵向、横向排水管汇流排入隧道边沟或中心管,由于该阶段的水流非达西流,因此复合式衬砌模型的渗流过程只需考虑排水系统的环向排水管。模型中渗入衬砌的所有地下水最后全部由环向排水管排出而忽略裂缝渗漏的影响,环向排水管作为最终集水设施,不存在局部将部分水排出的情况,因此对于模型中的任意局部单元,流入量都等于流出量。相比于已有模型,本模型完全考虑了复合式衬砌中的土工布、环向排水管和防水板因素。图1中: r_0 为二衬内径, r_1 为初衬内径, r_2 为初衬外径; $h(z)$ 为初衬内侧处水头, h_2 为初衬外侧处水头; k_1 为初衬渗透系数, k_2 为土工布渗透系数; L_1 为环向排水管间距。

对本模型作如下假定:

(1) 地下水服从质量守恒定律,即由围岩进入初衬、土工布再到环向排水管的渗流量都相等,并且进入隧道的涌水全部经由环向排水管排出,忽略衬砌裂缝、接缝的漏水影响(流入初衬的地下水全部经环向排水管流出,不考虑缝隙漏水,即在初衬和土工布介质中流入量等于流出量,满足Laplace方程^[14,23])。

(2) 隧道围岩与衬砌均质连续、各向同性,地下水从围岩径向均匀透过初衬(当隧道埋深较大且地下水位较高时,隧道拱顶处与仰拱处的水头差异很小(地下水位越高,差异越小),此时认为两者水头相等,那么整个隧道圈外侧的水头相等,因此地下水均匀径向透过初衬^[16]),并且在初衬和土工布中的渗流满足达西定律,如图2所示。

(3) 土工布中的地下水均匀渗入环向排水管。在土工布中,从2条环向排水管中间位置到其中一条环向排水管处的水头压力服从线性分布,并且环

向排水管内的水压为零(隧道排水管最终与大气相通,因此排水管内水压为零^[9,20];根据防排水系统的

设计布置可知,土工布内位于 2 条环向排水管中间位置处的水压最大^[24]),如图 2c 所示。

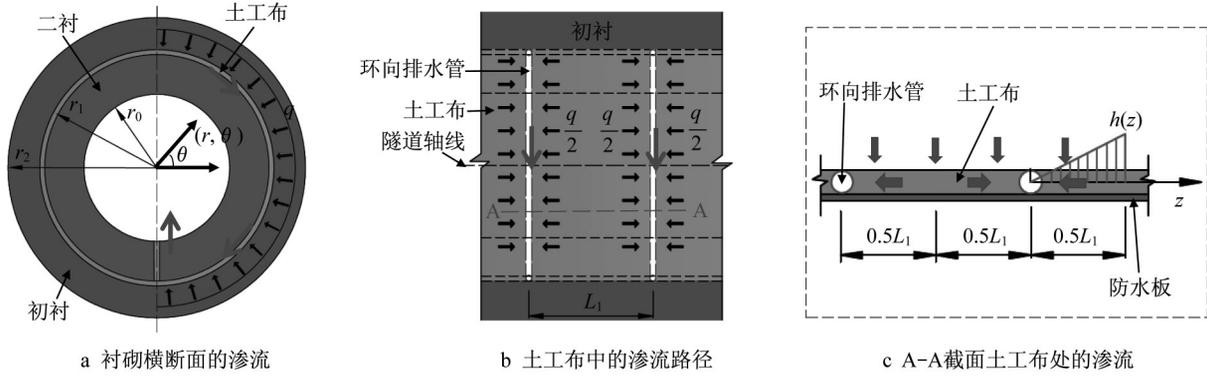


图 2 复合式衬砌中的渗流

Fig.2 Seepage details in composite lining

如图 2a 所示,以隧道中心为原点在衬砌横断面上建立极坐标。图 2b 中, q 为地下水从土工布渗入环向排水管的渗流速度。当围岩与衬砌均质连续、各向同性,地下水渗流稳定并满足达西定律时,地下水在围岩和衬砌中的渗流过程满足 Laplace 方程^[9,14,23],如下所示:

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

式中: h 为渗流场中的全水头,等于位置水头与压力水头之和; r 为隧道半径; θ 为极坐标角度。

当隧道埋深较大且地下水位较高时,隧道拱顶处与仰拱处的水头差异很小,可认为两者水头相等,那么整个隧道圈外侧的水头相等,则地下水均匀径向透过初衬^[16](即模型假定(2))。当地下水径向均匀渗入初衬时,有 $\frac{\partial h}{\partial \theta} = 0$ ^[9,15],则方程(1)简化为

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dh}{dr} \right) = 0 \quad (2)$$

由图 1 可知,渗流模型的 3 个边界条件分别为: BC1(初衬外径处)、BC2(初衬内径处)和 BC3(二衬内径处)。

$$\begin{aligned} \text{BC1: } h|_{(r=r_2)} &= h_2 \\ \text{BC2: } h|_{(r=r_1)} &= h(z) \\ \text{BC3: } h|_{(r=r_0)} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 公式推导

1.2.1 复合式衬砌中的渗流

根据渗流模型(见图 2c),将隧道轴向长度 L_1 范围内(环向排水管的中心到其两侧的中点位置)的一

段复合式衬砌定义为一个计算单元(包含环向排水管、土工布和防水板),依据该计算单元进行公式推导。

(1) 初衬中的渗流

在复合式衬砌的初衬中,渗流路径如图 2 所示。根据模型假定(1)和(2)以及式(1),并根据 Bear^[25]、张祉道^[15]和 Wang 等^[16]的研究,渗透半径为 r 的每延米渗流量

$$Q = Ak_1 i = 2\pi r k_1 \frac{dh}{dr} \quad (4)$$

式中: i 为水力梯度; A 为每延米初衬渗流环的面积, $A = 2\pi r$ 。

根据模型假定(2)和(3),从环向排水管到 2 条环向排水管中间处的水头服从线性分布。设 2 条环向排水管中间处的水头为 h_z ,那么当 $0 < z < L_1/2$ 时,加载在防水板上的水头

$$h(z) = \frac{2zh_z}{L_1} \quad (5)$$

取一段轴向长度为 dz 、环向长度为 $d\theta$ 的初衬微元,则透过该微元进入土工布的渗流量

$$Q_{L_i} = \frac{k_1(h_2 - h(z))}{r_2 - r_1} r_1 dz d\theta = \frac{k_1 \left(h_2 - \frac{2zh_z}{L_1} \right)}{r_2 - r_1} r_1 dz d\theta \quad (6)$$

对式(6)积分(边界为 $-L_1/2 < z < L_1/2, 0 < \theta < 2\pi$),得到由初衬渗入土工布的每延米渗流量 Q_1 ,计算式如下所示:

$$Q_1 = \int_{-\frac{L_1}{2}}^{\frac{L_1}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{k_1 \left(h_2 - \frac{2zh_z}{L_1} \right)}{(r_2 - r_1)L_1} r_1 d\theta dz =$$

$$\frac{2\pi k_1 r_1 \left(h_2 - \frac{h_z}{2} \right)}{r_2 - r_1} \quad (7)$$

(2) 土工布中的渗流

根据模型假定(2)和(3),对于弧长为 $d\theta$ 且纵向宽度为 L_1 的土工布微元,在该微元中渗入环向排水管的渗流速度为 q ,则有

$$q = 2 \frac{k_z h_z t}{L_1/2} = \frac{4k_z h_z t}{L_1} \quad (8)$$

式中: t 为土工布厚度。从土工布渗入环向排水管的每延米渗流量

$$Q_2 = \frac{\int_0^{2\pi} q r_1 d\theta}{L_1} = \frac{8\pi r_1 k_z h_z t}{L_1^2} \quad (9)$$

结合式(7)和式(9),可得

$$Q_1 = Q_2 = \frac{8r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{k_1}{k_z t} L_1^2 + 8(r_2 - r_1)} \frac{2\pi k_1 h_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (10)$$

1.2.2 未考虑排水系统初衬中的渗流

对于未考虑复合式衬砌的排水系统,以往简化为单层衬砌的渗流模型^[15-16],如图3所示。地下水在单层衬砌中的渗流满足控制方程式(2),同时满足方程(4),而且边界条件为 $r_1 < r < r_2$, $0 < h < h_2^*$,其中 h_2^* 为单层衬砌模型的衬砌外水压力。

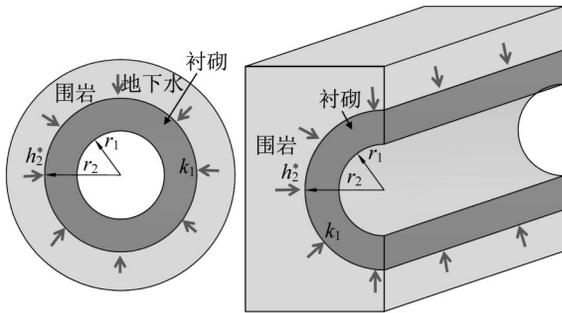


图3 未考虑排水系统的单层衬砌渗流模型

Fig.3 Single-layer lining seepage model without considering drainage system

根据前人^[15-16]的研究结果,未考虑复合式衬砌中防排水系统的单层衬砌渗流量

$$Q_w^* = \frac{2\pi k_1 h_2^*}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (11)$$

式(10)和式(11)分别为考虑与未考虑防排水系统的涌水量与衬砌外水压力数学关系式,基于2种条件下的涌水量相等和总水头降落与各分层水头降落之和(表征为衬砌平均内外水压力)的相等原则

(即 $Q_1 = Q_2 = Q_w^*$, $h_2 = h_2^*$),对未考虑防排水系统的初衬渗透系数进行修正。设复合式衬砌渗透系数为 k_0 ,根据式(10)、(11)可得 k_0 的计算式为

$$k_0 = \lambda k_1 = \frac{8k_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{k_1}{k_z t} L_1^2 + 8(r_2 - r_1)} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{k_0}{k_1} = \frac{8r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{k_1}{k_z t} L_1^2 + 8(r_2 - r_1)} \quad (13)$$

式中: λ 为初衬渗透系数的修正系数。

2 公式验证

以下将从模型退化方法和数值法2个方面,对复合式衬砌的渗透系数计算式(12)进行验证。

2.1 模型退化方法验证

相比于现有复合式衬砌渗透特性研究,本修正公式考虑了环向排水管、土工布和防水板因素,因此采用模型退化方法^[26-27]对修正公式进行验证,即先对提出的修正公式求极限,将公式退化成不考虑这些因素的一般情况,然后与考虑这些因素的一般特征进行差异对比。当退化后的公式与当前隧道一般特征相同或者差异很小时,则公式得以验证。本修正公式考虑了土工布、环向排水管与防水板因素,以下模型退化验证也将从对应参数下所有极限条件的退化展开。

(1) 环向排水管间距趋于无限大

当环向排水管间距 L_1 趋于无限大时,相当于隧道复合式衬砌没有设置环向排水管,渗透系数计算式(12)退化为

$$\lim_{L_1 \rightarrow \infty} k_0 = \lim_{L_1 \rightarrow \infty} \frac{8k_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{k_1}{k_z t} L_1^2 + 8(r_2 - r_1)} = 0 \quad (14)$$

式(14)表明,当环向排水管间距趋近无限大时,修正后的衬砌渗透系数趋近于零,即相当于复合式衬砌退化为不透水衬砌。该结果与复合式衬砌的防排水机制相符^[24],即透过初衬的地下水在防水板和二衬的防水作用下,只能通过环向排水管流出,而如果没有设置环向排水管,则相当于隧道采用不透水的全封堵方式^[19]防水,即修正后的衬砌渗透系数为零。以上分析进一步说明全封堵型隧道^[5,19]衬砌渗透特性为式(12)的特例。

(2) 环向排水管间距趋于零

当环向排水管间距 L_1 无限趋近于零时,式(12)退化为

$$\lim_{L_1 \rightarrow 0} k_0 = \lim_{L_1 \rightarrow 0} \frac{8k_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{k_1}{k_2 t} L_1^2 + 8(r_2 - r_1)} = \left(\frac{r_1}{r_2 - r_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) k_1 \quad (15)$$

式(15)与该条件下复合式衬砌的防排水机制^[24]相一致,即当环向排水管的间距无限趋近于零时,隧道的防排水系统相当于隧道结构不设土工布、防水板和二衬,只有初衬起到防水作用,地下水透过初衬后直接进入隧道。为了进一步探究退化后的复合式衬砌渗透系数取值,根据公路隧道常用洞径 r_1 和初衬厚度 C 计算模型退化后修正系数 $\frac{r_1}{r_2 - r_1} \ln \frac{r_2}{r_1}$ 的值,如图4所示。

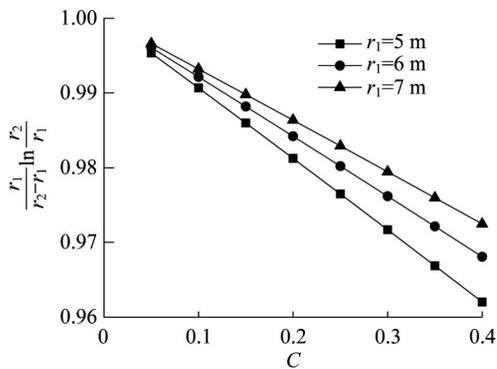


图4 模型退化的修正系数与初衬厚度关系

Fig.4 Relationship between reduced correction coefficient and initial lining thickness

由图4可知,该值为0.96~1.00,与1.00的偏差小于4%,近似等于1.00,因此可认为 $\lim_{L_1 \rightarrow 0} k_0 = k_1$,即模型退化为只有初衬起防水作用。

(3) 土工布渗透系数趋于无限大

当土工布渗透系数 k_2 无限大时,式(12)退化为

$$\lim_{k_2 \rightarrow +\infty} k_0 = \lim_{k_2 \rightarrow +\infty} \frac{8k_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{k_1}{k_2 t} L_1^2 + 8(r_2 - r_1)} = \left(\frac{r_1}{r_2 - r_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) k_1 \quad (16)$$

式(16)的结果与退化后复合式衬砌的防排水机制^[24]相符,即当土工布渗透系数 k_2 趋于无限大时,防排水系统中的土工布相当于排水管的延伸而完全起排水通道作用,复合式衬砌中只有初衬起防水作用。

(4) 土工布渗透系数趋于零

当土工布渗透系数 k_2 趋于零时,相当于土工布不透水,即相当于在复合式衬砌的初衬与排水管之间设置了一道隔水层,使得隧道不透水。式(12)退化为

$$\lim_{k_2 \rightarrow 0} k_0 = \lim_{k_2 \rightarrow 0} \frac{8k_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\frac{k_1}{k_2 t} L_1^2 + 8(r_2 - r_1)} = 0 \quad (17)$$

式(17)表明,当土工布的渗透系数趋于零时,复合式衬砌渗透系数为零,隧道模型退化为完全不透水的全封堵型隧道^[5,19]。全封堵型隧道的衬砌渗透特性为式(12)的特例。

2.2 数值法验证

采用FLAC3D软件分别计算2种衬砌工况下涌水量和外水压力:即采用式(12)修正初衬渗透系数的工况和直接模拟包含防排水系统的复合式衬砌渗透特性工况,通过对比这2种工况下的涌水量和外水压力的偏差进行验证。因此,对应建立通过单层衬砌排水的衬砌修正渗流模型和通过排水系统排水的复合式衬砌渗流模型(2个数值模型的衬砌不同,其余边界、围岩参数都相同)。

2.2.1 数值模型

复合式衬砌渗流模型考虑完整的防排水系统,包含围岩、初衬、排水管、土工布、防水板和二衬。衬砌修正渗流模型包含围岩和初衬,并采用式(12)修正初衬渗透系数以考虑防排水系统的影响,即相当于用修正初衬渗透系数表征复合式衬砌的渗透特性。2个数值模型的围岩尺寸均为100 m×100 m×20 m(围岩左右边界距隧道中心都为5倍洞径),如图5所示。隧道模型的参数如表1所示(参考云南某特长隧道工程)。

2个模型的边界条件如下:底部水力边界均为不透水边界,顶面边界透水并施加恒定的静水压,水位线以下围岩介质始终保持饱和;左、右两侧水力边界为透水且孔隙水压力为恒定的线性分布;前、后水力边界均为不透水边界。2个模型的边界条件不同之处在于:复合式衬砌渗流模型的防水板和二衬为不透水边界,并且环向排水管处的水压力恒定为零,而衬砌修正渗流模型的衬砌为透水边界,并且衬砌内侧的水压力恒定为零。

2.2.2 计算工况和结果

水头 H 100 m、150 m、200 m、250 m和300 m分别对应工况1、工况2、工况3、工况4和工况5。根据

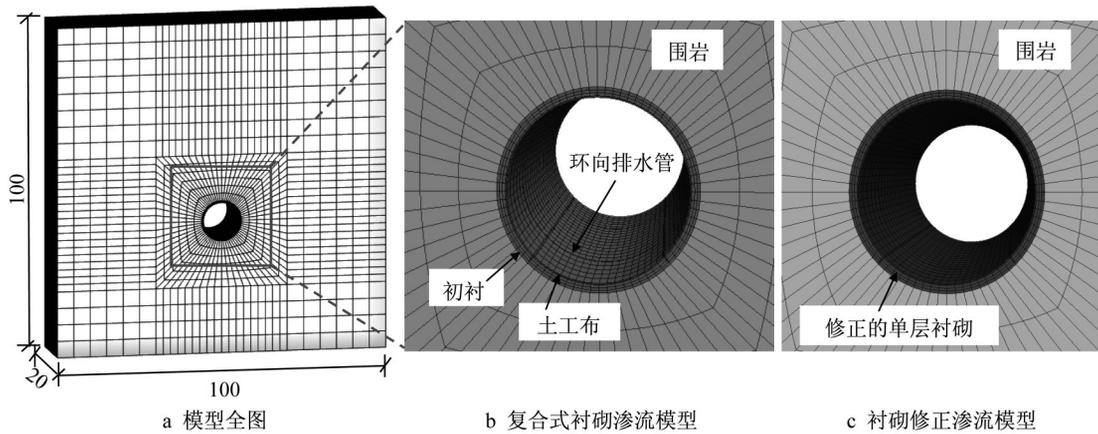


图5 数值模型(单位:mm)

Fig.5 Numerical model(unit:mm)

表1 模型参数

Tab.1 Model parameters

模型参数	参数值
围岩作用水头/m	150
围岩渗透系数/(m·s ⁻¹)	2.00×10 ⁻⁷
初衬外径/m	6.1
初衬渗透系数/(m·s ⁻¹)	5.00×10 ⁻⁸
初衬内径/m	5.6
二衬内径/m	5.0
土工布厚度/m	0.003
土工布渗透系数/(m·s ⁻¹)	3.33×10 ⁻⁴
环向排水管间距/m	10
环向排水管直径/m	0.1

各工况分别计算2个模型的隧道涌水量和衬砌外水压力,如图6、7所示。

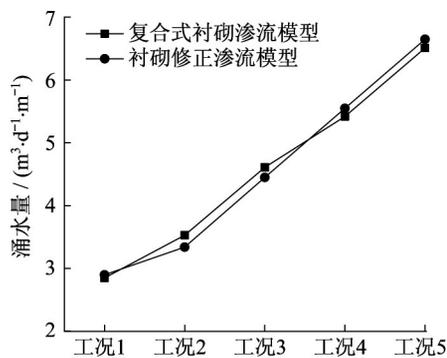


图6 2个模型涌水量对比

Fig.6 Comparison of groundwater inflow between two calculation models

由图6可知,复合式衬砌渗流模型与衬砌修正渗流模型的涌水量曲线吻合较好,涌水量最大差值为5.4%,最小差值为1.8%,结果较为一致。

由图7可知,复合式衬砌渗流模型与衬砌修正渗流模型的衬砌外水压力曲线吻合较好,最大差值为10.6%,最小差值为2.0%,结果较为一致。

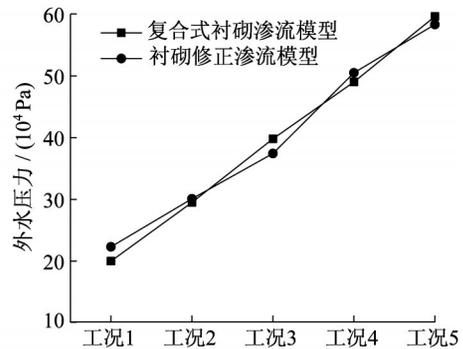


图7 2个模型外水压力对比

Fig.7 Comparison of external water pressure between two calculation models

3 公式应用与影响分析

围岩渗透系数 k_r 是涌水量和衬砌外水压力等预测计算的关键参数^[28],不同地质条件下的隧道渗透系数大多不一样。因此,根据不同围岩渗透系数和表1中的隧道参数,采用文献[16]、[27]的解析解分别计算未修正的渗透系数(未考虑环向排水管、土工布和防水板的初衬渗透系数)和修正的渗透系数(考虑环向排水管、土工布和防水板的修正初衬渗透系数)下涌水量和衬砌外水压力。通过对比2种条件下的差异以分析修正的渗透系数对隧道涌水量和外水压力的影响,即分析土工布、环向排水管间距和防水板因素对结果的影响。

3.1 涌水量的影响

根据文献[16]、[27]的涌水量解析解,分别计算修正与未修正渗透系数下的涌水量,如图8所示。

由图8可知,由文献[16]、[27]计算得到的4条涌水量曲线都是随着围岩渗透系数增大而逐渐上升,且斜率逐渐增大,尤其当围岩渗透系数大于 $1 \times$

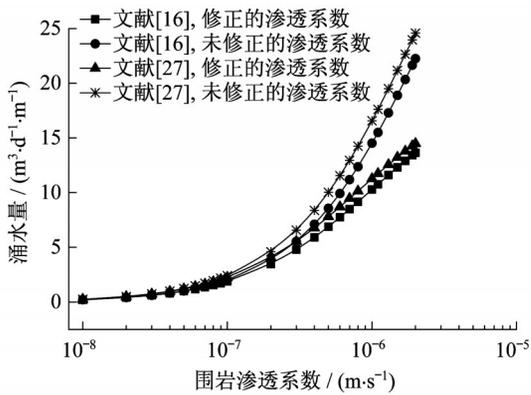


图8 涌水量

Fig.8 Groundwater inflow

$10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,涌水量显著增加。对比修正与未修正的渗透系数下涌水量可知,前者均小于后者。究其原因在于修正的渗透系数条件下考虑了环向排水管、土工布和防水板因素,导致地下水在透过土工布时因渗流路径延长而水头降落增加^[8]。当围岩渗透系数在 $1\times 10^{-8}\sim 1\times 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,最大偏差值小于6.8%,说明该范围内修正的初衬渗透系数对隧道涌水量影响并不明显。当围岩渗透系数在 $1\times 10^{-7}\sim 1\times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,偏差值约为6.8%~41.2%,说明修正的初衬渗透系数对涌水量的影响在该区间显著,应当重视土工布、环向排水管间距和防水板因素的影响。

3.2 衬砌外水压力的影响

计算2种渗透系数下的外水压力,如图9所示。

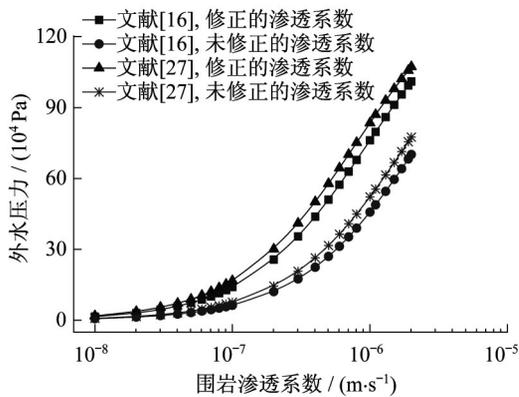


图9 外水压力

Fig.9 External water pressure

由图9可知,文献[16]、[27]计算得到的4条曲线都随着围岩渗透系数增大而上升,并且斜率也逐渐增大。修正的渗透系数下外水压力均大于未修正的。由图9可知:①当围岩渗透系数为 $1\times 10^{-8}\sim 1\times 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,2条曲线的绝对偏差较小,但相对偏

差达到55%;②当围岩渗透系数为 $1\times 10^{-7}\sim 1\times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,外水压力的绝对偏差开始增大,并在 $1.3\times 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 处达到最大(相差约30.5 m水头),相对偏差为37%~55%;③当围岩渗透系数大于 $2\times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,绝对偏差开始减小,相对偏差继续减小。以上规律说明,围岩渗透系数在 $1\times 10^{-7}\sim 1\times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,修正的初衬渗透系数对外水压力的影响在该区间显著,不容忽视。

4 参数分析

复合式衬砌渗透系数计算公式中的参数包括初衬内外半径、初衬渗透系数、环向排水管间距、土工布厚度与渗透系数。根据表1中的参数值,分别绘制初衬渗透系数 k_1 为 5×10^{-9} 、 1×10^{-9} 、 5×10^{-10} 、 1×10^{-10} 、 $5\times 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 5种工况下的修正系数与各参数的关系曲线,如图10所示。

图10a为修正系数与环向排水管间距 L_1 之间的关系曲线。由图10a可知:当初衬渗透系数大于 $1\times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,随着环向排水管间距的增加,修正系数逐渐减小,并且初衬渗透系数越大的曲线,修正系数减小得越快;当初衬渗透系数小于 $1\times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,修正系数随着环向排水管间距增大而逐渐减小并趋于不变;初衬渗透系数越小,对应的修正系数越大。

图10b为修正系数与土工布参数 k_2t 之间的关系曲线。由图10b可知:当初衬渗透系数大于 $1\times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随着 k_2t 的增加,对应曲线都逐渐增大,且初衬渗透系数越大的曲线变化越显著;当初衬渗透系数小于 $1\times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,曲线随着 k_2t 的增大逐渐趋于水平,表明该条件下土工布参数 k_2t 对修正系数的影响很小;初衬渗透系数越小,对应的修正系数越大,修正的初衬渗透系数也越大。

图10c为修正系数与初衬内径 r_1 之间的关系曲线。由图10c可知:当初衬渗透系数小于 $1\times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,随着初衬内径由5.7 m逐渐增加到6.0 m(即初衬的厚度由0.4 m减小到0.1 m),对应的曲线逐渐上升,修正系数逐渐增大;当初衬渗透系数大于 $1\times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,随着初衬内径增加对应曲线下降,修正系数也显著减小;初衬渗透系数越小,对应修正系数越大,而且修正系数与初衬内径曲线也越平缓。

图10d为修正系数与初衬外径 r_2 之间的关系曲线。由图10d可知:随着初衬外径由5.7 m逐渐增加

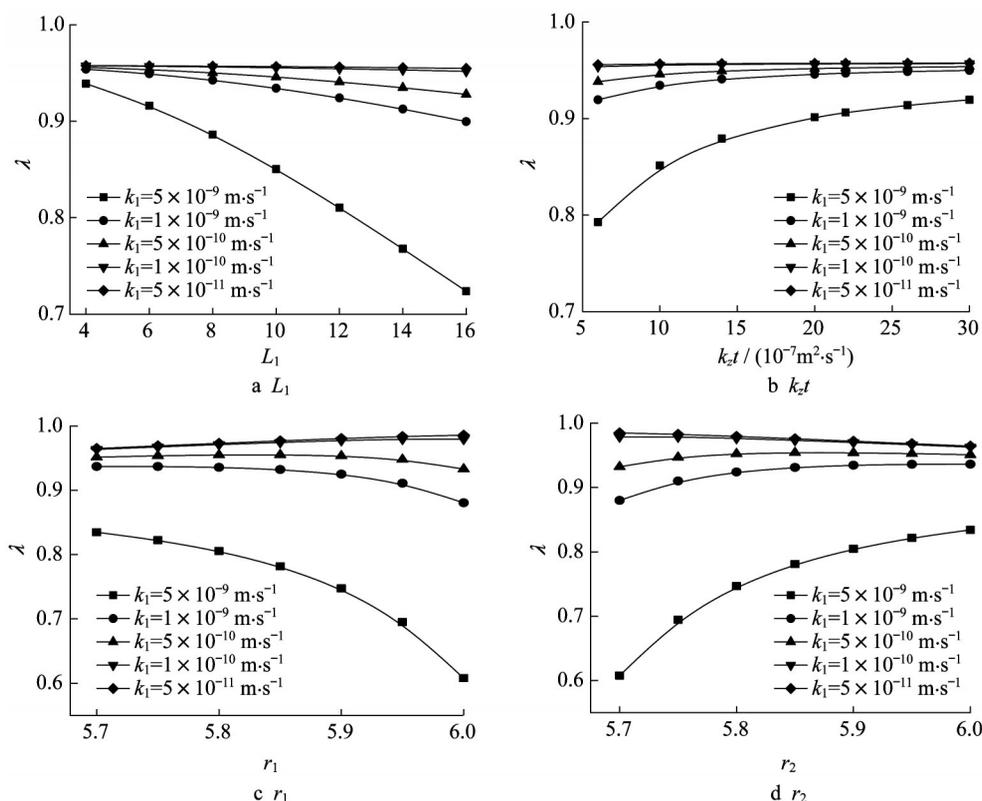


图10 不同初衬渗透系数下修正系数与各参数的关系

Fig.10 Relationship between correction coefficient and parameters at different initial lining permeability coefficients

到6.0 m,当初衬渗透系数小于 $1 \times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,对应曲线的修正系数逐渐减小;当初衬渗透系数大于 $1 \times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,则修正系数随着初衬外径的增加而逐渐增大;初衬渗透系数越大,修正系数越小,曲线斜率也越大。

5 结论

(1) 提出的公式适用于埋深较大、地下水位较高的岩石隧道复合式衬砌渗透系数的计算。

(2) 当围岩的渗透系数为 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,修正与未修正的衬砌渗透系数对涌水量的影响差异约为6.8%~41.2%,外水压力的影响偏差超过37%,因此土工布、环向排水管 and 防水板的影响不容忽视。

(3) 复合式衬砌渗透特性可用修正的初衬渗透系数来表征。当环向排水管间距和初衬渗透系数越大时,对应的复合式衬砌渗透系数越小;当土工布参数 $k_2 t$ 越大时,对应的复合式衬砌渗透系数越大。

作者贡献说明:

李晓军:提供研究思路,指导论文撰写。

刘荆辉:公式的推导与分析,试验操作,试验数据分析。

参考文献:

- [1] 丁浩,蒋树屏,李勇.控制排放的隧道防排水技术研究[J].岩土工程学报,2007,29(9):1398.
DING Hao, JIANG Shuping, LI Yong. Study on waterproof and drainage techniques of tunnels based on controlling drainage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1398.
- [2] ARASH N H, FARHADIANB H, KATIBEH H. A comparative study on evaluation of steady-state groundwater inflow into a circular shallow tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 73: 15.
- [3] 王建秀,朱合华,唐益群,等.石灰岩损伤演化的化学热力学及动力学模型[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(9):1126.
WANG Jianxiu, ZHU Hehua, TANG Yiqun, et al. Chemical thermodynamic and chemical kinetic model for dissolution damage evolution in limestone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(9): 1126.
- [4] 李宗利,裴向辉,吕从聪,等.隧道透水性衬砌环渗透系数合理取值与工程措施探讨[J].岩土工程学报,2014,36(6):1167.
LI Zongli, PEI Xianghui, LÜ Congcong, et al. Reasonable permeability coefficient and engineering measures of concrete lining circle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1167.
- [5] BUTSCHER C. Steady-state groundwater inflow into a circular

- tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32: 158.
- [6] TAN Yuqi, SMITH J V, LI Chunqing, *et al.* Predicting external water pressure and cracking of a tunnel lining by measuring water inflow rate[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 115.
- [7] SHIN J H. Numerical modeling of coupled structural and hydraulic interactions in tunnel linings [J]. *Structure Engineering and Mechanics*, 2008, 29: 1.
- [8] MURILLO C A, SHIN J H, KIM K H, *et al.* Performance tests of geotextile permeability for tunnel drainage systems[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(3): 827.
- [9] 何本国, 张志强, 傅少君, 等. 考虑盲管排水和防水板隔水的隧道支护体系分担水荷载解析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(Z2): 3936.
HE Benguo, ZHANG Zhiqiang, FU Shaojun, *et al.* An analytical solution of water loading on tunnel supporting system with drainage of blind tube and isolation effect of waterproof membranes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Z2): 3936.
- [10] 张顶立, 孙振宇. 海底隧道主动控制式防排水系统及其设计方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(1): 1.
ZHANG Dingli, SUN Zhenyu. An active control waterproof and drainage system of subsea tunnels and its design method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(1): 1.
- [11] LU Congcong, LI Zongli. Rational permeability coefficient of a permeable lining for composite tunnel lining structures[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(8): 1930.
LU Congcong, LI Zongli. Rational permeability coefficient of a permeable lining for composite tunnel lining structures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(8): 1930.
- [12] 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.
- [13] ARJNOI P, JEONG J H, KIM C Y, *et al.* Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(4): 376.
- [14] 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.
- [15] 张祉道. 隧道涌水量及水压计算公式半理论推导及防排水应用建议[J]. *现代隧道技术*, 2006, 43(1): 1.
ZHANG Zhidao. Semi-theoretical derivation for the formulas of water inflow and water pressure acting on a tunnel and their application to the waterproofing and drainage of tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2006, 43(1): 1.
- [16] WANG Xiuying, TAN Zhongsheng, WANG Mengshu, *et al.* Theoretical and experimental study of external water pressure on tunnel lining in controlled drainage under high water level [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(5): 552.
- [17] 于丽, 方霖, 董宇苍, 等. 基于围岩渗透影响范围的隧道外水压力计算方法模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2288.
YU Li, FANG Lin, DONG Yucang, *et al.* Research on the evaluation method of the hydraulic pressure on tunnel lining according to the range of seepage field [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2288.
- [18] MALEKI M R. Groundwater seepage rate (GSR): a new method for prediction of groundwater inflow into jointed rock tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 505.
- [19] SHIN H S, YOUN D J, CHAE S E, *et al.* Effective control of pore water pressures on tunnel linings using pin-hole drain method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(5): 555.
- [20] 赵乐. 基于堵水限排高压富水区山岭隧道防排水技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
ZHAO Le. Study on waterproof and drainage technology of mountain tunnel in high pressure and rich water area based on blocking groundwater and limiting discharge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [21] 赵启超. 高压富水区大断面公路隧道衬砌结构受力特征及防排水技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHAO Qichao. Study on mechanical characteristics and waterproof and drainage technology of lining structure of large section highway tunnel in high pressure and rich water area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [22] 郑波, 王建宇, 吴剑. 基于等效渗透系数计算衬砌水压力方法研究[J]. *现代隧道技术*, 2011, 48(6): 43.
ZHENG Bo, WANG Jianyu, WU Jian. Study of the calculation of external water pressure on tunnel lining based on the equivalent permeability coefficient of the composite lining [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, 48(6): 43.
- [23] 吴吉春, 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
WU Jichun, XUE Yuqun. *Groundwater dynamics*[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2009.
- [24] 王毅才. 隧道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
WANG Yicai. *Tunnel engineering* [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [25] BEAR J. *Dynamics of fluids in porous media*[M]. New York: American Elsevier Publishing Company, 1972.
- [26] 应宏伟, 朱成伟, 龚晓南. 考虑注浆圈作用水下隧道渗流场解析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(6): 1018.
YING Hongwei, ZHU Chengwei, GONG Xiaonan. Analytic solution on seepage field of underwater tunnel considering grouting circle [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2016, 50(6): 1018.
- [27] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. *现代隧道技术*, 2003, 40(3): 5.
WANG Jianyu. Once more on hydraulic pressure upon lining [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2003, 40(3): 5.
- [28] FARHADIAN H, KATIBEH H. Groundwater seepage estimation into Amirkabir tunnel using analytical methods and DEM and SGR method [J]. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2015, 9(3): 296.