

水岩分算隧道衬砌外水压力折减系数取值方法

刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 段庆伟, 王玉杰

(中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100048)

摘 要: 针对如何确定水岩分算时隧道衬砌外水压力折减系数问题, 结合已有隧道规范中地下水处理的规定及外水压力折减系数经验取值方法, 从地下水渗流作用出发, 基于地下水水力理论, 推导了地下隧道渗水量和复合衬砌结构外水压力折减系数理论求解公式, 揭示了灌浆圈、初期支护、二次衬砌渗透系数及灌浆圈厚度等参数的变化对隧道渗水量和衬砌外水压力折减系数的影响规律。在此基础上提出了不同衬砌类型外水压力折减系数取值所应注意的问题及相应的取值方法。研究结果可为隧道工程的防排水系统设计提供借鉴和参考。

关键词: 隧道工程; 衬砌; 外水压力折减系数

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)03-0495-06

作者简介: 刘立鹏(1983-), 男, 安徽六安人, 博士, 工程师, 主要从事地下洞室及结构工程稳定性方面的研究工作。

E-mail: liulip@iwhr.com。

Method to determine reduction factor of water pressure acting on tunnel linings using water-rock independent calculation methodology

LIU Li-peng, WANG Xiao-gang, JIA Zhi-xin, DUAN Qing-wei, WANG Yu-jie

(Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to accurately determine the reduction factor of water pressure acting on tunnel linings, a method to determine the water load acting on the composite linings and the water discharge in the tunnel is derived based on the correlation theory of groundwater hydraulics from the groundwater seepage action by means of the groundwater treatment regulations in the tunnel codes and the empirical methods. The influences of variable parameters of primary support, secondary support and grouting circle on water inflow and reduction factor of external water pressure are released by using the theoretical analysis. The problems which should be paid attention to and the methods to determine the value of reduction factor of water pressure acting on different kinds of tunnel linings are studied. The results may provide references for the design of tunnel waterproofing and drainage system in high water pressure regions.

Key words: tunneling engineering; lining; reduction factor of water pressure

0 引 言

国民经济的持续稳定增长及发展需求, 极大地带动了我国各类隧道工程的发展, 如穿山交通隧道、海底隧道、输水隧洞、城市地铁等, 埋置于地下的隧道由于地下水的存在必定承受一定的外水压力作用, 根据地下水压力大小, 如何确定与高、低水压相对应的衬砌结构类型及作用于衬砌上的外水压力值是工程界所关注的重点及难点问题^[1]。关于地下水对于衬砌稳定性的作用, 目前存在水岩分算(面力)及合算(体力)观点^[2-3], 工程中一般将衬砌作用水头与初始水头比值称之为外水压力折减系数 β_e , 并在隧洞衬砌设计中采用。针对隧道工程地下水如何处理, 国内规范中多有相关规定, 但对外水压力荷载量值及计算方式等给出明文规定或确切值较少^[4-6], 仅《水工隧洞设计规

范(SL 279—2002)》给出估算方法^[7]。由于工程中难以较为准确把握规范中所阐述的地下水活动状态进而选择外水压力折减系数, 设计人员根据工程经验自水文地质条件、岩体与混凝土渗透系数等多个方面选取经验值^[3, 8]。对外水压力折减系数的取值国外亦极不统一, 大体有以下 3 种情况^[2]: ①折减系数法, 根据不同工程统计, β_e 值约在 0.15~0.9 之间。澳大利亚、美国及日本有时用此法。②全水头法($\beta_e=1$), 美国及法国常用。③可能最大水头值。美国、加拿大及巴西等国, 常将隧洞衬砌所承受的静水头计算到地表。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB013502); 国家自然科学基金项目(51179210); 中国水利水电科学研究院科研专项项目(岩集 1027)

收稿日期: 2012-05-07

根据国外经验,对于地下水头超过 60 m 的地下洞室,须采用排导方式处理地下水,并且利用灌浆圈进行堵水^[9-10]。采用复合衬砌处理地下水问题时,按照规范或经验值方法选取折减系数具有一定局限性。王秀英等^[11-13]对复合衬砌外水压力的计算方法及其分布规律进行了大量理论研究,但没有指出衬砌外水压力计算的方法,且对于不同衬砌类型如何选取外水压力折减系数没有明确说明。李鹏飞等^[14]对海底隧道复合衬砌水压力分布规律及注浆加固圈参数进行了研究,但对于不同衬砌结构时的外水压力折减系数选取以及如何系统性结合排水量及衬砌外水压力设计要求确定相应设计参数阐述不足。此处基于工程设计中较为常用的水岩分算概念,对外水压力折减系数的理解误区进行一定的探讨,研究分析了常用于深埋隧洞的复合衬砌结构各组成部分对于外水压力折减系数的影响,最终对不同衬砌系统外水压力折减系数取值方法进行阐述。

1 水岩分算外水压力折减系数

П.У.Поинматкин^[2]曾就最简单的情况推导出各因素对称条件下渗透压力作用的弹性力学解:将原公式中内水压力取为 0,围岩与衬砌交界面处的外水压力为

$$P_1 = \frac{P_2 \ln \frac{r_{\text{ini}}}{r_0}}{\ln \frac{r_{\text{ini}}}{r_0} + \frac{k_L}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_{\text{ini}}}} \quad (1)$$

式中 P_1 , P_2 分别为衬砌与围岩交界面和隧道轴线处的外水压力; k_L , k_r 分别为衬砌和围岩的渗透系数; r_0 , r_{ini} , r_r 分别为衬砌后的圆形隧洞半径、毛洞半径和围岩半径。

将式(1)进行转换,得到折减系数 β_e :

$$\beta_e = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\ln \frac{r_{\text{ini}}}{r_0}}{\ln \frac{r_{\text{ini}}}{r_0} + \frac{k_L}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_{\text{ini}}}} \quad (2)$$

假定处于不同地下水位的某深埋长隧洞 ($r_{\text{ini}}=5.5$ m, $r_0=5$ m), 洞室轴线处压力水头分别为 $H=500$, 250, 100, 50 m, 则对应不同围岩与衬砌渗透系数比值时,折减系数 β_e 变化情况如下图 1 所示。

由图可知,随着围岩与衬砌渗透系数比值 k_r/k_L 的逐渐增加,外水压力折减系数 β_e 亦逐渐升高,即当衬砌渗透性越低,所需承受的外水压力越高。同时,对应相同 k_r/k_L 情况,地下水位越高,此时折减效果越不明显。

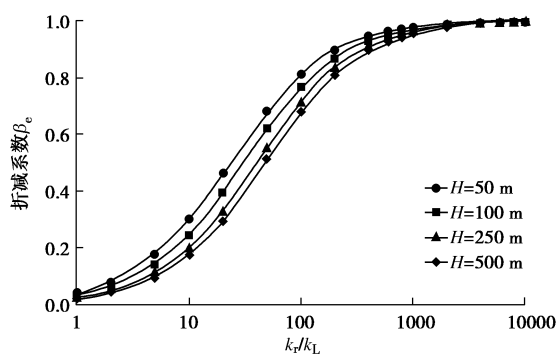


图 1 不同 k_r/k_L 情况下折减系数 β_e 变化情况

Fig. 1 Variation of β_e with different k_r/k_L

2 外水压力折减系数的讨论

规范及经验外水压力折减系数取值方法,实质为根据洞室围压地下水活动状态,近似确定围岩与衬砌之间渗透系数的比值,进而确定折减系数值。由式(2)可知,对于衬砌不透水情况,即 $k_L=0$ 情况,此时如无排水措施, $\beta_e=1$,即衬砌承受该处原始地下水头的全部外水压力作用,并不随围岩渗透性变化而变化,王建宇^[15]、宋超业等^[16]采用室内渗流试验验证了这一规律,如图 2 所示。

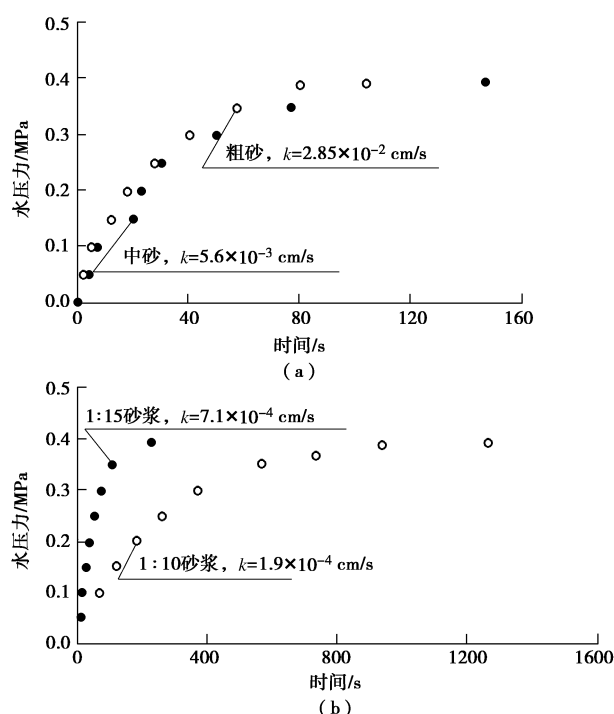
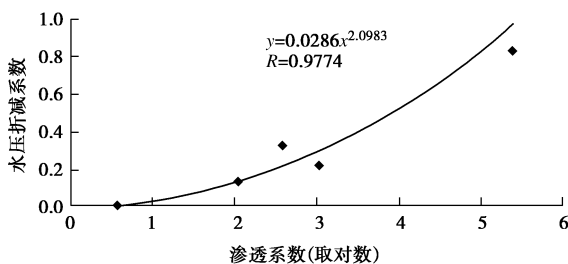


图 2 水压形成过程^[15]

Fig. 2 Evolution of water pressure with different time^[15]

由图 2 可知,对于各种不同介质,作用在衬砌结构上的外水压力最终达到原始水头相应的量值,所不同的是历经时间不同。对于排堵结合型衬砌系统,由于排水系统的排导作用,使得衬砌上的外水压力存在降低现象(图 3),进而实现外水压力折减目的。

图3 外水压力折减系数与渗透系数的关系^[16]Fig. 3 Relationship between water pressure and different permeabilities^[16]

即对于全封堵衬砌系统, 如果衬砌渗透系数非常小, 最终作用于衬砌上的外水压力无折减现象, 故而不存在折减系数概念。而对于具有排水系统的衬砌系统, 此时才存在外水压力折减系数概念。

3 复合衬砌对外水压力折减系数及渗漏量的影响

上述量值的提出实际为作用于单层衬砌上的外水压力折减系数, 对于具有多个组成部分的复合衬砌而言, 毛洞中相同地下水活动状态或围岩裂隙发育情况下, 由于灌浆圈等堵水体的存在, 使得作用于衬砌上的外水压力大小不同, 相应折减系数 β_e 不同。复合衬砌体系主要由注浆加固圈、初期支护、防排水系统和二次衬砌结构4个部分组成。注浆加固圈和初期支护起封闭地下水、控制隧道涌水量和保证施工期间洞室稳定性作用。由于灌浆圈的堵水作用, 复合衬砌系统降低了衬砌外水压力值, 此时若仍根据《水工隧洞设计规范 SL 279—2002》中所给定值选取外水压力折减系数, 则明显浪费工程成本, 且对外水压力很高的情况, 所取最小折减系数亦难以达到衬砌设计安全要求。故而, 采用复合衬砌结构时外水压力折减系数应根据具体情况详尽研究。无内水压力时复合衬砌结构各部分外水压力:

$$\left. \begin{aligned} P_{L2} &= \frac{P_e \ln \frac{r_{L2}}{r_0}}{\frac{k_{L2}}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_g} + \frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}}, \\ P_{L1} &= \frac{P_e \left(\frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0} \right)}{\frac{k_{L2}}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_g} + \frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}}, \\ P_g &= \frac{P_e \left(\frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0} \right)}{\frac{k_{L2}}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_g} + \frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

渗水量为

$$Q = \frac{2\pi k_{L2} H_e}{\frac{k_{L2}}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_g} + \frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}} \quad (4)$$

式中 k_r , k_g , k_{L1} , k_{L2} 分别为围岩、灌浆层、初期支护、二次衬砌层渗透系数; r_r , r_g , r_{L1} , r_{L2} , r_0 分别为围岩、灌浆层、初期支护、二次衬砌及洞室半径; P_e 为初始渗流场隧洞轴线处外水压力; H_e 为隧洞中心作用水头, 地下水位线至洞轴间高程差值并不一定为压力水头值, H_e 应等于实际洞轴位置压力水头值^[2]; P_{L1} , P_{L2} , P_g 分别为初期支护与灌浆圈、二期衬砌与初期支护、灌浆圈与围岩交界面外水压力值。

复合衬砌不同部分的外水压力折减系数:

$$\left. \begin{aligned} \beta_{L2} &= \frac{\ln \frac{r_{L2}}{r_0}}{\frac{k_{L2}}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_g} + \frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}}, \\ \beta_{L1} &= \frac{\frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}}{\frac{k_{L2}}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_g} + \frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}}, \\ \beta_g &= \frac{\frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}}{\frac{k_{L2}}{k_r} \ln \frac{r_r}{r_g} + \frac{k_{L2}}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_{L1}} + \frac{k_{L2}}{k_{L1}} \ln \frac{r_{L1}}{r_{L2}} + \ln \frac{r_{L2}}{r_0}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, β_{L1} , β_{L2} , β_g 分别为初期支护与灌浆圈、二期衬砌与初期支护、灌浆圈与围岩交界面外水压力折减系数。

3.1 复合衬砌组成部分对折减系数的影响

假设圆形无压隧洞内半径 $r_0 = 5.0$ m, 二次衬砌外半径 $r_{L2} = 5.5$ m, 初期支护外半径 $r_{L1} = 6.0$ m, 灌浆层外半径 $r_g = 12$ m, 隧道中心水头为 100 m, 即 $r_r = H_e = 100$ m, 分析该情况下复合衬砌不同组成部分渗透性变化对外水压力折减系数以及渗水量的影响。

(1) 灌浆层渗透系数的影响

设岩体渗透系数 $k_r = 5.0 \times 10^{-6}$ m/s, 初期支护渗透系数 $k_{L1} = 1.0 \times 10^{-8}$ m/s, 二次衬砌渗透系数 $k_{L2} = 1.0 \times 10^{-9}$ m/s, 则不同岩体与灌浆层渗透系数比值 ($n_{rg} = k_r/k_g$) 下复合衬砌各部分外水压力折减系数及渗水量变化情况如图4所示。

由图4可知, 随着围岩与灌浆层渗透系数比值的逐渐增加, 即灌浆层渗透性的逐渐降低, 初期支护及二次衬砌上外水压力折减系数逐渐降低, 同时, 渗水量亦逐步减小。由于初期支护及二次衬砌具有一定的堵水性, 进而作用于灌浆层与围岩交界面上的外水压

力折减系数变化较小,并不反映出如图 1 所示的单一衬砌结构时的变化规律。

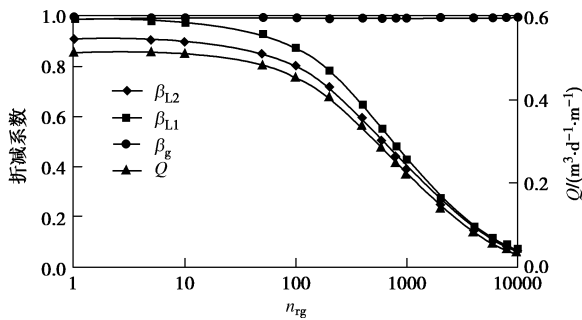


图 4 折减系数与渗水量随灌浆层渗透系数变化

Fig. 4 Variation of reduction factor and discharge with different permeabilities of grouting

(2) 初期支护层渗透系数的影响

保持其他参数不变, $k_g = 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, 不同岩体与初次支护层渗透系数比值 n_{rL1} 下, 复合衬砌各部分外水压力及渗水量变化情况如图 5 所示。

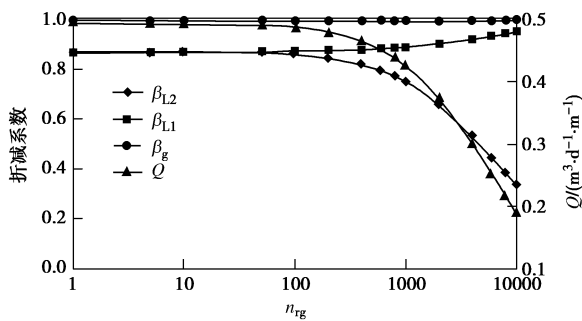


图 5 折减系数与渗水量随初期支护层渗透系数变化

Fig. 5 Variation of reduction factor and discharge with different permeabilities of primary lining

由图 5 可知, 随着围岩与初期支护渗透系数比值的逐渐增加, 作用于初期支护上的外水压力逐渐增加, 折减系数逐渐升高, 而二次衬砌上的外水压力折减系数逐渐降低, 灌浆层与围岩交界面上的外水压力折减系数变化较小。同时, 围岩渗水量逐渐降低, 并表现出与灌浆层渗透性减弱时相近的变化趋势。

(3) 二次衬砌层渗透系数的影响

保持其他参数不变, $k_g = 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $k_{L1} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, 不同岩体与二次衬砌层渗透系数比值 n_{rL2} 下, 复合衬砌各部分外水压力及渗水量变化如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着围岩与二次衬砌渗透系数比值的逐渐增加, 即二次衬砌渗透性的减弱, 作用于二次衬砌、初期支护上的外水压力逐渐增加, 即外水压力折减系数逐渐升高。同时, 随着二次衬砌渗透性逐渐降低, 渗水量亦逐渐降低, 并表现出与灌浆层、初期支护时相近的变化规律。

(4) 灌浆层厚度的影响

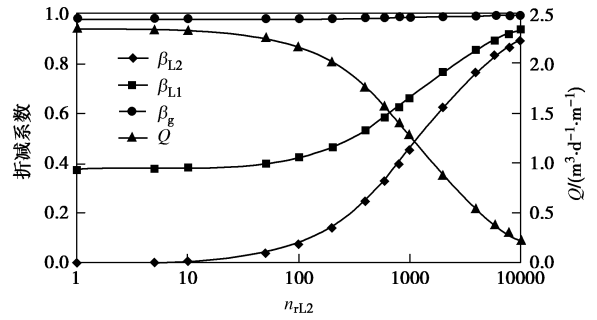


图 6 折减系数与渗水量随二次衬砌层渗透系数变化

Fig. 6 Variation of reduction factor and discharge with different permeabilities of secondary lining

保持第 (1) 条中其他参数不变, $k_g = 5.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, 不同灌浆层厚度下, 复合衬砌各部分外水压力及渗水量变化情况如图 7 所示。

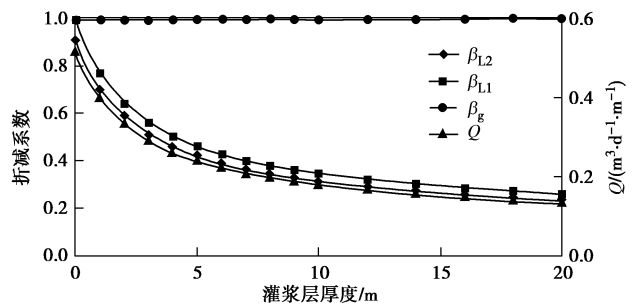


图 7 折减系数与渗水量随灌浆层厚度变化

Fig. 7 Variation of reduction factor and discharge with different thicknesses of grouting

由图 7 可知, 随着灌浆层厚度的增加, 衬砌支护、二次衬砌上的外水压力折减系数以及渗水量逐渐降低, 即外水压力作用逐渐降低。同时由图可知, 此时外水压力折减系数与渗水量变化规律与复合衬砌其他部分渗透性降低时所反应规律不同, 厚度增加至一定量值后外水压力及渗水量减小幅值降低, 结合工程造价成本, 无限制增加灌浆层厚度的方法并不可取。

3.2 衬砌外水压力与渗水量间的关系

复合衬砌渗水量基本上随着灌浆层、初期衬砌、二次衬砌渗透系数的降低而降低, 同时随着灌浆层厚度的增加而降低, 但复合衬砌各部分对于渗水量降低幅值影响不同。此外, 复合衬砌各组成部分的渗透性对于外水压力的影响亦不相同。工程设计中应结合排水量与外水压力两个方面要求, 选择合适的复合衬砌结构。此处将不同 n_{rg} , n_{rL2} 情况下, 渗水量与二次衬砌外水压力进行关联分析, 具体如图 8 所示。

由图 8 可知, 一般情况下保持围岩与二次衬砌渗透系数不变, 灌浆圈渗透系数越高时, 此时对应的渗水量越高, 二次衬砌外水压力越低。同样, 保持围岩与灌浆层渗透系数比值不变时, 二次衬砌渗透系数的降低, 对应的渗水量越低, 外水压力值越高。同时,

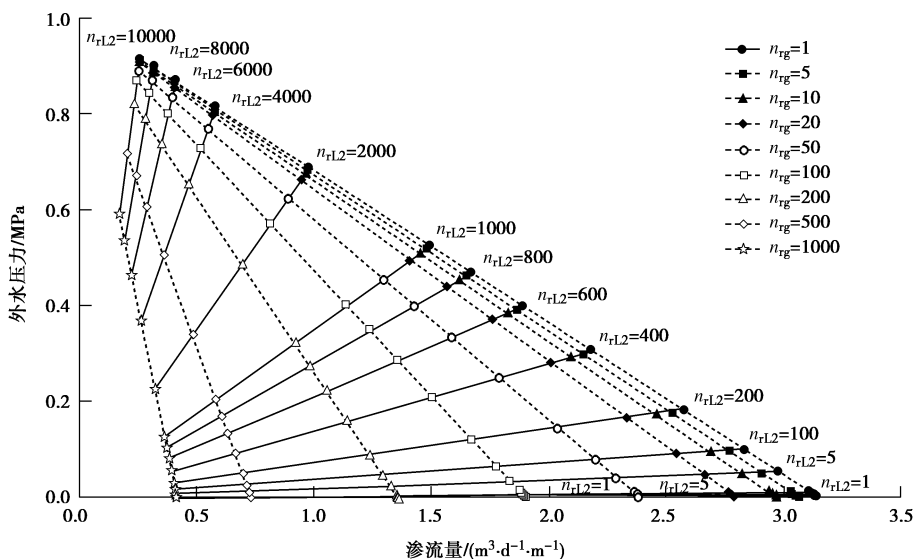


图8 外水压力与渗水量关系

Fig. 8 Relationship between external water pressure and discharge

可根据工程中选取的洞室半径、衬砌、灌浆层厚度等,利用式(6)、(7)绘制如上流量与外水压力折减系数关系图,结合二次衬砌外水压力值、排水量值选取对应的二次衬砌及灌浆层渗透系数。假设某工程洞室设计尺寸与文中尺寸参数一致,要求排水量为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,外水压力为 0.2 MPa ,则此时灌浆层渗透系数比值 n_{rg} 可于 $500\sim 1000$ 内选取,二次衬砌渗透系数比值 $n_{r1,2}$ 为 $1000\sim 2000$ 。

4 外水压力折减系数的选取方法

根据上述研究结果可知,对于不同的防排水系统而言,外水压力折减系数取值方法不同。

(1) 全封堵型系统

全封堵型排水系统,由于衬砌不透水性,隧道建设过程或运营期,随着时间的推移,外水压力逐渐增加,压力水头增加至隧洞埋深位置常年稳定水头,进而衬砌承受所处位置的全压力水头作用。对于全堵型防水系统,不存在外水压力折减系数。

(2) 排堵结合型系统

由于具有排水系统,对于具体工程需进行综合的研究分析,而不能简单根据《水工隧洞设计规范(SL 279—2002)》中围岩地下水活动状况选取外水压力折减系数。首先,根据洞室设计几何尺寸,绘制如图8外水压力与渗水量关系图,可将二次衬砌视为透水材料,结合洞室稳定性及结构设计要求,选择对应的初期支护、二次衬砌、灌浆层厚度以及初期支护与二次衬砌渗透系数,结合排水量及外水压力要求,选定对应灌浆层与二次衬砌渗透系数。由于二次衬砌与初期支护间所设置的排水系统的排水降压作用,二次衬砌

实际所承受外水压力值将低于图8所示结果,进而保证衬砌结构具有一定的安全裕度。

5 结 论

文章中研究分析了复合衬砌系统各组成部分对外水压力折减系数的影响,并针对不同衬砌类型推荐了外水压力折减系数的取值方法,主要研究结论如下:

(1) 对于全封堵型衬砌系统,并不存在外水压力折减系数概念,处于渗流场中的衬砌历经较长时间后,承受所处位置稳定渗流场的全外水压力作用。排堵结合型衬砌系统,由于衬砌或排水系统的排导作用,降低作用于衬砌上的外水压力,存在外水压力折减系数。

(2) 对于复合衬砌深埋隧道,由注浆加固圈、初期支护、防排水系统和二次衬砌4个部分组成的排堵结合衬砌系统具有有限排水量和限水压力两层含义,通过注浆圈堵水和隧道排水系统,可达到小排量低外水压力的设计要求。

(3) 复合衬砌系统各组成部分对于外水压力折减系数及隧道渗水量的影响不尽相同,降低灌浆层、初期支护、二次衬砌层渗透系数,可有效降低作用于初期支护及二次衬砌上的外水压力及折减系数,而灌浆层与围岩交界面外水压力及折减系数变化较小。

(4) 复合衬砌各组成部分渗透系数及厚度对于降低外水压力及渗水量作用具有一定的有效范围,无限制增加某层厚度或降低其渗透系数的方法并不可取,应结合复合衬砌系统概念,合理确定各部分的渗透性及厚度值。

(5) 针对具体工程,可根据外水压力与排水量之间的关系,进行不同灌浆层厚度、渗透系数等值的确定。

定工作,而实际作用于二次衬砌上的外水压力由于排水系统的存在低于计算值。

参考文献:

- [1] 孙 钧. 海底隧道工程设计那个若干关键技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(8): 1513 - 1521. (SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(8): 1513 - 1521. (in Chinese))
- [2] 张有天. 隧洞及压力管道设计中的外水压力修正系数[J]. 水力发电, 1996, **22**(12): 30 - 34. (ZHANG You-tian. Correction factor of external water pressure in design of tunnel and penstock[J]. Water Power, 1996, **22**(12): 30 - 34. (in Chinese))
- [3] 王建秀, 杨立中, 何 静. 深埋隧道衬砌水荷载计算的基本理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(9): 1339 - 1343. (WANG Jian-xiu, YANG Li-zhong, HE Jing. Introduction of the calculation of external water pressure of tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **21**(9): 1339 - 1343. (in Chinese))
- [4] TB 10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. (TB 10003—2005 Code for design on tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [5] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [6] GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003. (GB 50157—2003 Code for design of metro[S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese))
- [7] TB 10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. (TB 10003—2005 Code for design on tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [8] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术, 2003, **40**(3): 5 - 9. (WANG Jian-yu. Once more on hydraulic pressure upon lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, **40**(3): 5 - 9. (in Chinese))
- [9] 王梦恕, 皇甫明. 海底隧道修建中的关键问题[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, **22**(4): 1 - 4. (WANG Meng-shu, HUANGFu Ming. Key problems on subsea tunnel construction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, **22**(4): 1 - 4. (in Chinese))
- [10] 刘招伟, 张顶立, 张民庆. 圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(10): 1728 - 1734. (LIU Zhao-wei, ZHANG Ding-li, ZHANG Min-qing. Grouting technique for high-pressure and water-enriched area in Maoba syncline at Yuanliangshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(10): 1728 - 1734. (in Chinese))
- [11] 王秀英, 王梦恕, 张 弥. 计算隧道排水量及衬砌外水压力的一种简化方法[J]. 北京交通大学学报, 2004, **28**(1): 8 - 10. (WANG Xiu-li, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. A simple mechod to calculate tunnel discharge and external water pressure on lining[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, **28**(1): 8 - 10. (in Chinese))
- [12] 王秀英, 王梦恕, 张 弥. 山岭隧道堵水限排衬砌外水压力研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 125 - 127. (WANG Xiu-li, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. Research on regulating water pressure acting on mountain tunnels by blocking ground water and limiting discharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 125 - 127. (in Chinese))
- [13] 张民庆, 黄鸿健, 苗德海, 等. 岩溶隧道水压力的研究与确定[J]. 铁道工程学报, 2008(5): 53 - 58. (ZHANG Min-qing, HUANG Hong-jian, MIAO De-hai, et al. Study on and determination of water pressure of the karst tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(5): 53 - 58. (in Chinese))
- [14] 李鹏飞, 张顶立, 赵 勇, 等. 海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 280 - 288. (LI Peng-fei, ZHANG Ding-li, ZHAO Yong, et al. Study of distribution law of water pressure action on composite and reasonable parameters of grouting circle for subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 280 - 288. (in Chinese))
- [15] 王建宇. 隧道围岩渗流和衬砌水压力荷载[J]. 铁道建筑技术, 2008, **39**(2): 1 - 6. (WANG Jian-yu. Problems on external water pressure on tunnel lining[J]. Railway Construction Technology, 2008, **39**(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [16] 宋超业, 周书明, 谭志文. 海底隧道衬砌水荷载计算[J]. 现代隧道技术, 2008, **39**(增刊): 134 - 138. (SONG Chao-ye, ZHOU Shu-ming, TAN Zhi-wen. The calculation of water pressure action on the lining for subsea tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, **39**(S0): 134 - 138. (in Chinese))