

复合衬砌量化修正渗透系数 隧道涌水量的计算方法

丁小平¹, 刘昭², 史宝童², 黄嫚²

(1. 宁夏公路建设管理局, 宁夏 银川 750000;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为了使用轴对称解计算设置防水板和排导系统的复合式衬砌的隧道涌水量, 假定隧道二次衬砌均匀渗水, 从隧道涌水量不变的角度, 通过反演分析得到复合衬砌的一个量化修正渗透系数 K_1^* . 通过六盘山特长隧道实际工程验证了这种方法的可行性及准确性, 为复合衬砌涌水量计算提供了有利条件.

关键词: 隧道; 复合衬砌; 渗透系数; 涌水量; 计算方法

中图分类号: U 451.4

文献标志码: A

随着我国现代化建设步伐的加快, 公路隧道、铁路隧道呈现出跨越式的发展, 各种大跨度、超长隧道不断涌现, 隧道设计中普遍采用了设置防水板和排导系统的复合式衬砌. 目前, 求解这种复合衬砌的隧道涌水量常规方法有水压力折减法、数值计算法和数学解析法等. 国内外学者在渗流场基本理论研究的基础上进行了大量研究^[1]. 郭瑞等^[2]、王建宇^[3]、张志强等^[4]分析衬砌水荷载的影响因素, 分别提出衬砌水压力荷载的简化计算方法, 得到衬砌荷载与排放流量的关系, 总结了隧道涌水量预测的影响因素. 邓捷^[5]通过现场压水试验, 预测了下穿隧道涌水量. 郭牡丹等^[6]用流固耦合理论对隧道涌水量进行数值模拟. 采用有限元方法计算隧道涌水量并不复杂, 但是具体隧道断面较多, 需要建立众多模型, 比较耗费时间. 常规轴对称均质解析解概念清楚, 计算简单, 应用比较广泛, 但其衬砌渗透系数是根据试验及经验选取, 未能准确考虑隧道立体排水系统的影响, 针对性不强. 为了简化计算, 本文假定隧道二次衬砌均匀渗水(隧道衬砌一般为防水混凝土, 隧道的排水是通过在衬砌背后设置排导系统实现), 当隧道设置排导系统时, 假设隧道涌水量不变, 通过反演分析即可得到复合衬砌的一个量化修正渗透系数, 类似工程即可直接采用轴对称解计算设置排导系统的复合式衬砌的隧道涌水量.

1 复合衬砌量化修正渗透系数

复合衬砌设置由透水层、防水板、衬砌、排水孔组成排导系统, 认为衬砌是不透水结构, 围岩渗水主要通过排导系统从排水孔中排出, 这种复合衬砌排水结构可以很好地对围岩渗水进行定向引流, 保护衬砌的稳定性.

为了保持地下水环境的稳定, 保护生态环境, 隧道涌排水设计通常“以堵为主, 限量排放”为原则, 因地制宜, 综合治理. 准确预测隧道涌水量是隧道限排标准设计的基础, 常规的有限元解法比较复杂, 难以大面积推广使用. 将设置排导系统的复合衬砌进行简化处理, 如图1所示. 假设简化后的隧道涌水量等于实际涌水量, 即可通过轴对称解反算求得简化后的衬砌渗透系数, 将简化后的衬砌渗透系数称为复合衬砌的量化修正渗透系数.

收稿日期: 2015-06-10

通信作者: 丁小平(1970-), 男, 教授, 主要从事隧道涌排水控制及公路工程管理的研. E-mail: 1005484926@qq.com.

基金项目: 宁夏六盘山隧道科技项目(KYHT2013-18)

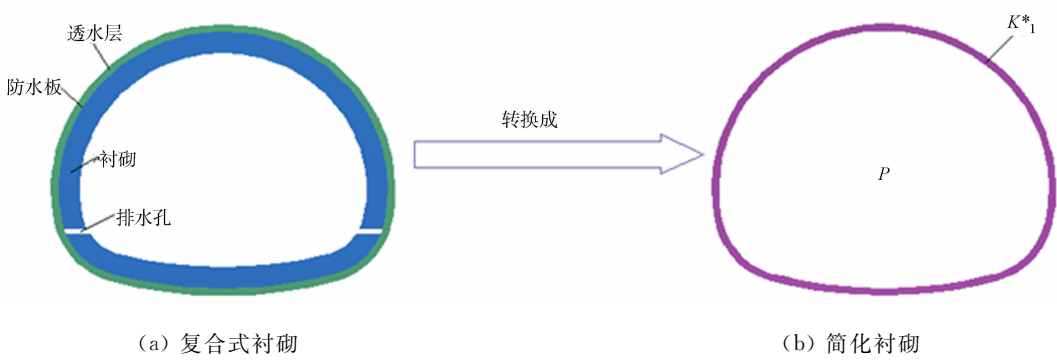


图 1 复合衬砌量化修正渗透系数简化示意图

Fig. 1 Simplified diagram of quantitative correction coefficient of permeability

2 复合衬砌量化修正渗透系数计算方法

复合衬砌量化修正系数的计算分为两个步骤:首先,通过有限元数值算法分析计算透水层、排水板、排水孔等排导系统的复合衬砌涌水量;然后,通过轴对称解反算简化后的衬砌量化修正渗透系数.当隧道位置水头小于隧道埋深^[3,7],隧道施作衬砌但不注浆情况下,利用退化轴对称解给出每延米隧道排水量的轴对称解计算公式,即

$$Q = \frac{2\pi H k_1}{\ln \frac{r_i}{r_0} + \frac{k_1}{k_r} \cdot \ln \frac{r^2}{r_1}}, \tag{1}$$

经转换可得

$$k_1 = \frac{Q \ln \frac{r_i}{r_0}}{2\pi H - Q \frac{H}{k_r \ln \frac{H}{r_1}}} \tag{2}$$

式(2)中: Q 为隧道涌水量; r_0 为衬砌内半径; r_1 为外半径; H 为隧道水头高度; k_1 为衬砌渗透系数; k_r 为围岩渗透系数.

当简化衬砌涌水量为 $Q^* = Q$ 时,即可求得简化后衬砌的量化修正渗透系数,即

$$k_1^* = k_1 = \frac{Q^* \ln r_i / r_0}{(2\pi H - Q) / (k_r \ln H / r_1)}. \tag{3}$$

3 复合衬砌涌水量

为了能够采用轴对称解计算隧道涌水量,首先要将复合式衬砌断面换算成圆形断面,一般是通过周长相等的方式按照如下公式进行转化,即

$$r = \frac{l}{2\pi}. \tag{4}$$

式(4)中: r 为简化复合衬砌半径; l 为复合衬砌实际周长.

通过轴对称解式(1),带入围岩渗透系数、量化渗透系数、计算得到的简化衬砌内外半径、隧道水头高度等,即可求得隧道涌水量.

4 涌水量简化计算

4.1 六盘山超长隧道简介

六盘山隧道穿越六盘山国家自然保护区的实验区,六盘山隧道设计为单洞分离式隧道,左右线间隔为 31~48 m,属超长隧道.左线隧道起迄桩号分别为 ZK6+270,ZK15+760,隧道长度为 9 490 m,隧道纵坡为 1.676/-2.782;右线隧道起迄桩号分别为 K6+230,K15+710,隧道长度为 9 480 m,隧道的纵

坡为 1.68/—2.7。项目隧道穿越褶皱构造,层状砂岩岩体裂隙发育,在断层破碎带和赋水段,有突发性涌水的可能,特别是在 K12~K13 附近,经过将台水库,及清凉水库(这两座水库为隆德县饮用水源)。

4.2 模型简化

隧道围岩渗流计算,是一个三维问题,为了简化计算,本节假设简化后排水面积不变,将三维问题转化成二维问题进行求解^[8]。隧道防排水系统主要包括环向排水管、纵向排水管、横向排水管、中心水沟和衬砌背后土工织物(起导水和保护防水板作用),根据各级围岩排水系统参数建立数值模型求解隧道立体排水系统涌水量 Q^* ,计算中为求解方便,采用等效排水面积概念对以下排水设施进行了等效简化,形成衬砌背后透水层模拟排水系统排水。

1) 土工布等效简化。根据王俊林等^[9]对土工织物透水特性的试验研究,无纺布的渗透系数一般在 $0.01 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,在相同试验条件下,3~4 cm 厚的针刺无纺布的平均渗透系数约为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,计算中取透水层渗透系数 $0.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于防水板的隔水作用,可认为二次衬砌材料不透水,但为了避免计算结果出现奇异,计算中取衬砌渗透系数 $k_f = 0.1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2) 环向排水管等效简化。环向排水管主要用来引排围岩渗水、基岩裂隙水、局部涌水、突水。正常段每道放置一根,局部水量大时可酌情增加到 2~3 根。V, IV 级围岩间距按 4, 6 m 一道设计; III, II 级围岩间距按 8, 10 m 一道设计。

环向排水管等效厚度 t_1 为

$$t_1 = \frac{\pi d_{\text{环}}^2}{4} \cdot \frac{n_1}{s_1} \quad (5)$$

式(5)中: t_1 为环向排水管等效厚度; $d_{\text{环}}$ 为环向排水管直径; s_1 为环向排水管间距; n_1 为环向排水管每排数量。

3) 纵向排水管等效简化。纵向排水管全隧道埋设,纵向坡度与隧道相同,主要引排环向排水管及衬砌背后积水,纵向排水管等效厚度 t_2 为

$$t_2 = \frac{\pi d_{\text{纵}}^2}{4} \cdot \frac{n_2}{l_{\text{周}}} \quad (6)$$

式(6)中: t_2 为反滤层厚度; $d_{\text{纵}}$ 为纵向排水管直径; $l_{\text{周}}$ 为衬砌相对周长(不考虑仰拱); n_2 为纵向排水管根数。

初支与二衬之间的防排水体系等效透水层厚度为

$$\delta = t_0 + t_1 + t_2 \quad (7)$$

式(7)中: δ 为防排水系统等效透水层厚度,其他符号意义同上。

4) 横向排水管等效简化。横向排水管主要连接纵向排水管与隧道中心排水沟,其设置间距根据开挖后地下水情况设置,不大于 10 m,纵坡不小于 3%,施工时应采取措施对其进行防护,防止施工时引起横向引水管破损。

在二维平面问题中横向排水管可等效成一个排水缝,并认为排水缝渗透系数等于无穷大,但为了避免计算结果出现奇异,排水孔渗透系数为

$$k = 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

其宽度为

$$D = \frac{\pi d^2}{4n} \quad (8)$$

式(8)中: D 为平面问题中的排水缝宽; d 为实际工程中排水孔的直径; n 为排水孔的纵向间距。

4.3 两种复合式衬砌作用下的围岩渗流场分析

在 SL 279—2002《水工隧洞设计规范》中,衬砌结构表面的水压力计算公式为

$$P_e = \beta_e \gamma_w H_e \quad (9)$$

式(9)中: P_e 为作用在衬砌结构外表面的地下水压力, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$; β_e 为外水压力折减系数; γ_w 为水的重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$,一般采用 $9.81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$; H_e 为地下水位线至隧洞中心的作用水头, m, 内水外渗时取内水压力。

常规水压力计算采用水工隧道规范或王建宇等推导的轴对称解析解^[3],得到相等的拱顶、边墙、仰拱的孔隙水压力.在实际隧道开挖过程中,各部位的孔隙水压力是不一致的,这样就容易造成计算出现较大误差.为了提高计算精度,利用有限元软件分析两种常用的复合式衬砌的排水方式下孔隙水压力的分布规律.

全包防水是在隧道初期支护与二次衬砌之间设盲沟、反滤层(无纺布)、防水板.半包防水,只在边墙与拱顶的初期支护与二次衬砌之间设盲沟、反滤层、防水板,在仰拱处不设盲沟、反滤层、防水板.两种排水措施都是通过在二衬边墙底部设置有排水孔(纵向间距一般为 10 m 左右),将围岩渗出的水经盲沟、反滤层排入排水沟.衬砌渗透系数为 $k_1=1\text{ pm}\cdot\text{s}^{-1}$,无纺布的渗透系数约为 $1\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,透水层渗透系数 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,排水孔渗透系数为 $k=1\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,围岩渗透系数为 $0.32\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,透水层厚度为 5 mm,排水孔厚度为 2 mm,隧道埋深为 400 m,地下水位高度为 350 m.

半包防水与全包防水衬砌上的水压力分布规律如图 2,3 所示.半包防水作用在拱顶、排水孔附近、仰拱衬砌上的水压力值分别为 $681.2,0,757.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,排水孔涌水量为 $3.66\times10^{-6}\text{ m}^3\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$;全包防水作用在拱顶、排水孔附近、仰拱衬砌上的水压力值分别为 $713.4,0,820.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,排水孔涌水量为 $0.26\times10^{-6}\text{ m}^3\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$.通过对比两种防水措施下的计算结果可知:半包防水时,作用在仰拱上水压力值较大,主要是因为仰拱处未设透水层,而对于设置了全环透水层的全包防水衬砌,作用在衬砌上的水压力相对较小,且水压力在仰拱、拱顶、边墙等部位的大小逐渐变化,与轴对称均质解析解计算的水压力有所不同.

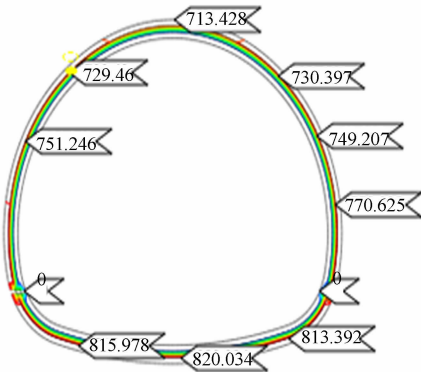


图 2 半包排水孔隙水压(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)
Fig. 2 Pore water pressure of semi-circle drainage (unit: $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)

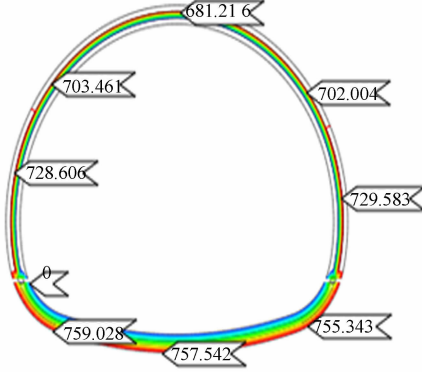


图 3 全包排水孔隙水压(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)
Fig. 3 Pore water pressure of full circle drainage (unit: $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)

4.4 数值计算模型

六盘山隧道的围岩主要为粉砂质泥岩,主要分为Ⅳ级深埋段、Ⅳ级加强段和Ⅴ级深埋段.围岩采用半包排水的衬砌设计,衬砌厚度为 0.5 m.由于防水板的隔水作用,可认为二次衬砌材料的渗透系数是零值^[10-12](在计算中,不考虑喷混凝土层的阻水作用),但为了避免计算结果出现奇异,取衬砌渗透系数 $k_1=1\text{ pm}\cdot\text{s}^{-1}$;无纺布的渗透系数约为 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,取透水层渗透系数为 $1\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.围岩渗透系数根据水文实验结果选取,排水孔宽度及透水层厚度可以根据式(7),(8)求得,隧道埋深分别为 292,450.6,124.5 m.

计算参数如表 1 所示.表 1 中: k_r 表示围岩渗透系数; δ 表示透水层厚度; D 表示排水孔直径; k 表示排水孔渗透系数.

表 1 复合衬砌量化修正渗透系数计算参数

Tab. 1 Calculation Parameters of quantitative correction coefficient of permeability

围岩级别	$k_r/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	δ/mm	D/mm	$k/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
Ⅳ级深埋段	0.320	5.41	2.35	1.00
Ⅳ级加强段	0.345	6.07	3.52	1.00
Ⅴ级深埋段	0.369	6.72	4.70	1.00

根据 3 个断面地层情况将分析模型分为 3 层:强风化粉砂岩、中风化粉砂质泥岩、中风化粉砂岩,分

层厚度根据实际地层分布选取. 计算模型如图 4 所示.

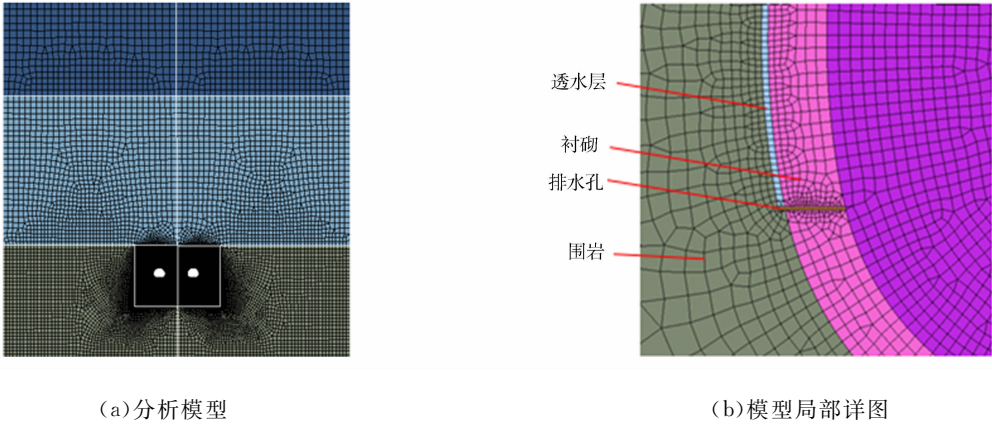


图 4 复合衬砌量化修正渗透系数计算模型

Fig. 4 Analysis model of quantitative correction coefficient of permeability

4.5 复合衬砌量化修正渗透系数分析

将数值分析得到的 3 种不同工况下对应的涌水量 Q_1, Q_2, Q_3 带入到式(3), 可得 3 种工况下量化修正渗透系数, 如表 2 所示.

表 2 复合衬砌量化修正渗透系数

Tab. 2 Results of quantitative correction coefficient of permeability

围岩级别	$k_r/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	r_o/m	r_i/m	H/m	$Q/\times 10^{-5}\text{ m}^3\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$	$K_l^*/\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$
Ⅳ级深埋段	0.320	5.85	6.35	200	6.06	8.25
Ⅳ级加强段	0.345	5.85	6.35	200	7.60	12.60
Ⅴ级深埋段	0.369	5.85	6.35	200	8.13	13.40

4.6 基于量化修正渗透系数涌水量预测

为了验证基于量化修正渗透系数隧道涌水量预测方法的可靠性, 重新选取参数采用 MIDAS-GTS 建立有限元分析模型, 计算隧道涌水量, 并与采用量化修正渗透系数的轴对称解计算的涌水量进行对比分析. 水头高度分别为 300, 350, 400 m, 衬砌内径为 5.85 m, 衬砌外径为 6.35 m, 衬砌、透水层、排水孔渗透系数不变, 计算得到 3 个断面涌水量, 如表 3 所示.

由表 3 可知: 基于量化修正渗透系数的轴对称解求得涌水量与有限元法计算的涌水量比较接近, 所以, 复合衬砌采用量化修正渗透系数预测涌水量是可行的.

表 3 涌水量对比

Tab. 3 Comparative analysis of the tunnel water inflow

工况	$k_r/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	H/m	$K_l^*/\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$	$Q_1/\times 10^{-5}\text{ m}^3\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$	$Q_2/\times 10^{-5}\text{ m}^3\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$
1	0.320	300	8.25	9.13	8.57
2	0.345	350	12.60	13.60	12.10
3	0.369	400	13.40	17.80	14.50

上述方法是基于双线隧道, 根据涌水量相等的原则, 进行反算得到的衬砌量化修正渗透系数, 当应用于单线隧道时, 亦可采用相同的思路进行分析, 但是衬砌量化修正渗透系数应该按照上述步骤重新进行计算分析.

5 结论

1) 将设置有排导系统的复合衬砌进行简化处理, 得到了一个均匀透水的简化衬砌的量化修正渗透系数, 为复合衬砌涌水量的预测提供了有效的方法.

2) 提出了复合衬砌量化修正渗透系数 K_l^* 的概念及计算方法, 进而得到了依据整体衬砌的轴对称解计算复合衬砌涌水量的计算方法.

3) 通过六盘山隧道实际工程 3 个工况涌水量预测验证, 发现 3 种围岩级别的工况下, 量化修正渗

透系数法计算的涌水量与有限元法计算的涌水量比较接近,表明在一定条件下,这种新方法预测涌水量是可行的.

4) 分析两种复合衬砌涌水量的大小关系,并且得到了作用在衬砌仰拱、拱顶、边墙等部位的水压力大小的变化特征,与常规计算的水压力分布有所不同.

参考文献:

[1] KRAHN J. Seepage modeling with SEEP/W[EB/OL]. [2011-2-26]. <http://www.geo-Slope.com>.
[2] 郭瑞,周晓军. 水底隧道复合式衬砌水压力影响因素分析[J]. 铁道标准设计,2014,58(4):78-82.
[3] 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(2):1-6.
[4] 吴治生,张杰. 岩溶隧道涌水影响因素、预测方法及危害分析[J]. 铁道工程学报,2011(11),58-61.
[5] 邓捷. 拖乌山湿地下穿隧道涌水量预测分析[J]. 公路交通科技,2011(12):210-212.
[6] 郭牡丹,王述红. 基于流固耦合理论的隧道涌水量预测[J]. 东北大学学报:自然科学版,2011,32(5):745-748.
[7] 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]. 北方交通大学学报,2004,28(1):8-10.
[8] 杜朝伟,王梦恕,谭忠盛. 水下隧道渗流场解析解及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2011(9):3567-3573.
[9] 王俊林,马艳. 土工织物透水特性试验研究[J]. 中国水土保持,2007(8):27-28.
[10] 张志强,何本国,何川. 水底隧道饱水地层衬砌作用荷载研究[J]. 岩体力学,2010(8):2445-2470.
[11] 朱祖熹,路明,柳献. 隧道防排水设计与施工[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:313-338.
[12] 蒋忠信. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):121-127.

Calculation on the Calculation Method of Tunnel Water Inflow
Based on Quantitative Correction Coefficient of
Permeability Composite Lining

DING Xiao-ping¹, LIU Zhao², SHI Bao-tong², HUANG Man²

(1. Ningxia Highway Construction Authority, Yinchuan 750002, China;
2. CCCC First Highway Consultants Company Limited, Xi'an 710075, China)

Abstract: Assuming that the two uniform seepage tunnel lining and constant water inflow, the water inflow was calculated in the tunnel with composite lining waterproofing sheet and drainage system by the water inflow axisymmetric solution. Through the back analysis, a quantitative correction coefficient of permeability of composite lining K^* is obtained, the feasibility and accuracy of this method is verified by the actual project Liu-pan mountain long tunnel, providing favorable conditions for the composite lining inflow calculation.

Keywords: composite lining; tunnel; coefficient of permeability; water inflow; calculation method

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)