

寒区运营隧道温度场大型模型试验系统研究

李志强^{1,2}, 刘路路², 李哲³

(1. 潍坊学院 建筑工程学院, 山东 潍坊 261061; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189;
3. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 以大阪山隧道温度场模型试验为例, 基于相似理论对寒区运营隧道温度场相似关系进行了研究, 运用方程分析法推导了模型试验相似准则, 实现了模型试验几何条件、边界条件及材料参数的相似, 并将其应用于隧道温度场模型试验。结合现场实测数据, 从隧道洞内气温, 围岩冻结深度方面与模型试验数据进行了对比分析, 结果表明: 修正之后的模型试验结果与现场实测数据吻合效果较好, 说明本次相似关系的拟定是合理的, 可以为寒区运营隧道温度场的研究及模型试验相似材料的选取提供一定的参考价值。

关键词: 寒区隧道; 相似关系; 温度场; 模型试验

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0069-09

Study on large scale model test system of temperature field of operating tunnel in cold area

LI Zhiqiang^{1,2}, LIU Lulu², LI Zhe³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Weifang University, Shandong Weifang 261061, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

3. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Taking the temperature field model of Da Ban Mountain Tunnel as an example, the similarity theory of operating tunnel temperature is studied on the basis of similarity theory of model test. The similarity criterion of the model test is deduced by the equation analysis method, and the similarity of the geometric conditions, boundary conditions and material parameters of the model test is realized and applied to the tunnel temperature field model test. Combined with the field measured data, the temperature in the tunnel and the freezing depth of the surrounding rock are compared with the model test data. The results show that the modified model test results are in good agreement with the field measured data, indicating that the formulation of this similarity relationship is reasonable. The study can provide some reference value for the study of the temperature field of the operating tunnel in the cold region and the selection of similar materials for the model test.

Key words: Tunnel in cold region; Similarity relation; Temperature field; Model test

许多寒冷地区隧道出现在加拿大、挪威、中国、俄罗斯和日本^[1-3]。在中国西北和东北地区, 在通风条件下, 寒冷地区隧道衬砌与空气之间发生强烈的热传递, 导致结构开裂、漏水、冰覆盖和冰堵塞排水沟^[4-5], 甚至, 一些隧道每年最多不能使用 8~9 个月, 这对交通产生了负面影响。温度场对分析围岩冻结膨胀具有重要意义, 是保温层计算的重要参考。因此, 保温层设计成为解决寒冷地区隧道抗冻问题的一个紧迫重要问题^[6-8]。

为了研究运营寒区隧道衬砌、围岩温度场变化规律及保温层保温效果, 需要在隧道衬砌及内部围岩埋设一定数量测试传感器, 但是考虑到运营隧道防排水体系、混凝土结构体系、通风照明体系等已完成^[1, 3], 传感器的埋设往往存在较大困难, 目前, 针对通风条件下寒区隧道温度场建立的数学模型计算参数的选取上, 未能建立起一个具有参考价值的标准, 尤其是数值模型参数的选取主要局限在前人研究成果^[9-11, 13], 并且不少学者

收稿日期: 2021-10-09

修改稿日期: 2023-01-18

基金项目: 中国高校产学研创新基金(2021DZ023); 潍坊市科学技术发展计划(2021GX005)

第一作者: 李志强(1972—)男, 副教授, 主要从事隧道工程、路基工程方面的研究, E-mail: wfulzq@163.com

通信作者: 刘路路(1990—), 男, 博士后, 助理研究员, 主要从事路基工程方面的研究, E-mail: believelululu@163.com

采用有限元模拟得到的结果差异性较大^[6, 7, 12, 14]. 缩尺物理模型试验可以研究不同工况条件下隧道温度场分布变化特征, 并且可以为寒区运营隧道的数值模拟提供计算参数.

大阪山隧道长度 1 530 m, 采用纵向变率模型 (3 m) 模拟隧道全长^[15], 按照断面相似比 1/37 进行缩放, 将围岩及衬砌相似材料搭建成一个模型小山, 借助多排冷冻管将模拟的大气低温传递给围岩及隧道洞口, 以便达到模拟隧道温度场的目的.

模型试验采用的冷冻仪器为安徽理工大学大学煤矿深井建设技术国家工程实验室 XT5710 冻土模型试验冷冻系统, 冷冻系统分为主机动力系统与外循环系统, 制冷剂采用 95% 工业酒精, 温度可调范围为 -40~60 °C.

1 相似理论

模型试验设计如果满足相似第三定理规定的全部相似条件往往是比较困难的, 所以一般采用近似相似方法, 使得主要相似条件得到满足, 从而获得工程需要的近似相似条件. 本文主要研究通风条件下的传热模型, 主要考虑热学相关参数, 而对于力学相关参数关系不大.

1.1 相似准则

寒区隧道围岩传热微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \\ d \leq r \leq l, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 < z < 1, t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为隧道围岩温度, °C; α 为岩石的热扩散系数, m^2/s ; r 为围岩径向深度, m; l 为温度场影响半径, m; z 为围岩冻结深度, m

洞壁围岩与洞内气体发生对流换热, 影响范围以外的围岩温度以及围岩初始温度设为等于原始地温, 将多心圆隧道断面简化为圆形, 并且采用极坐标形式表示传热方程, 即

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \alpha_n \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), t > 0, 0 < r < \infty \quad (2)$$

在冻结锋面上有

$$\lambda_f \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=\xi} - \lambda_{mf} \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=\xi} = Q \frac{d\xi}{dt} \quad (3)$$

初始条件与边界条件为

$$\begin{cases} t=0, T(r)=T_0 \\ t>0, T(r_a)=T_a \\ T(\infty)=T_0 \\ T(r=\xi)=T_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_0 为冻土和未冻土中 r 处的温度, °C, 下标 $n=1$ 为未冻土, $n=2$ 为已冻土; t 为时间, d; α_n

为热扩散系数, m^2/d ; r 为柱坐标, m; λ_{mf} 为未冻土的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_f 为冻土的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$; ξ 为冻结壁边界位置坐标, m; Q 单位土体冻结时放出的潜热量, kJ/m^3 ; T_n 为隧道内空气温度, °C; T_d 为冻结温度, °C.

为了分析参数的影响, 设与之相似的试验模型数学表达式为

$$\frac{\partial T'_n}{\partial t'} = \alpha'_n \left(\frac{\partial^2 T'_n}{\partial (r')^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial T'_n}{\partial r'} \right), t' > 0, 0 < r' < \infty \quad (5)$$

$$\begin{cases} t'=0, T'(r')=T'_0 \\ t'>0, T'(r'_a)=T'_a \\ T'(\infty)=T'_0 \\ T'(r=\xi)=T'_d \end{cases} \quad (6)$$

经过相似转换, 可得到相似准则为

$$\begin{cases} \pi_1 = F_0 = \frac{\alpha t}{r^2}, \pi_2 = K_0 = \frac{Q}{TC} \\ \pi_3 = \frac{\xi}{r}, \pi_4 = \frac{T_0}{T_a} \\ \pi_5 = \frac{T_d}{T_a}, \pi_6 = \frac{C_l}{C_t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\pi_1 \sim \pi_7$ 为相似准则; F_0 为傅里叶准则; K_0 为科索维奇准 ($C = \alpha/\lambda$); $\pi_3 \sim \pi_5$ 均是温度准则, 统一用 θ 表示; π_6 为几何准则, 用 R 表示, 整理后准则方程为

$$F(F_0 \cdot K_0 \cdot R \cdot \theta) = 0 \quad (8)$$

1.2 几何缩比

为浇筑方便, 本次隧道模型定为单心圆隧道, 考虑到冷冻实验室的占地面积、隧道模型加工性及经济性、隧道模型试验中可操作性等因素, 最终确定隧道断面几何比为 1:37, 大阪山隧道全长 1 530 m, 按照几何比 1:37, 得到模型长度 41 m, 这个长度远远超出了冷冻系统尺寸, 是不可取的.

对于隧道细长比较大结构, 若对整体进行缩尺模型试验, 则需要采用变率模型, 其中, 变率参数的选取对模型试验结果的可信度及修正性起着重要作用, 参考长安大学谢永利课题组^[12-14]港珠澳海底隧道通风模型试验, 根据隧道通风物理试验的经验, 可取长度方向变率 $k=4$, 则隧道模型长度为 10.25 m.

由于室内试验条件限制, 10.25 m 的长度仍然存在操作困难. 根据尼古拉兹试验结果^[15-16], 黏性流体本身具有自模性, 当雷诺系数 Re 增加到某个程度, 原型隧道雷诺数 Re 处于自模区^[16]以内, 沿着程阻力相似不一定使得雷诺系数相等, 称之为“自模化状态”, 在此区域中, 由于沿程阻力系

数不受雷诺数影响, 因此, 只要是原型与模型同处于同一自模区就能自动保证流动相似. 几何相似的封闭系统中不可压缩流体, 只需两个系统雷诺数相同就能满足所有相似条件. 黏性流体流动时, 只有确保所研究的区域进入自模区, 才可保证研究的正确性.

原型雷诺数为

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1.225 \times 3.0 \times 9.15}{1.66 \times 10^{-5}} = 1.35 \times 10^6 \quad (9)$$

原型沿程阻力系数为 0.025.

式中: ρ 表示空气密度, 取值 1.225 kg/m^3 ; v 表示风速, 取洞内外自然风压在洞内产生的风速, 取值 3 m/s ; D 表示隧道直径, m ; μ 表示空气黏质系数, 取值 $1.66 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

模型隧道表面粗糙度 K 的测量采用内径千分尺测量, 在隧道进口与出口分别选取 10 个测点, 进行测量, 计算得出 $K=0.000\ 324$.

模型雷诺数为

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1.225 \times 4.8 \times 0.4}{1.66 \times 10^{-5}} = 1.417 \times 10^5 \quad (10)$$

模型相对粗糙为

$$\frac{K}{D} = \frac{0.000\ 324}{0.4} = 0.000\ 81$$

由莫迪图可知, 模型进入自模区.

所以模型与原型在隧道断面流动上是保持相似的^[12], 考虑冷冻设备尺寸问题, 模型隧道长度定为 3 m, 由《大阪山病害处治施工图设计》可知, 进洞段地址条件较差, 进口段为 II 类围岩且储水较大, 对于 II 类围岩, C25 初支混凝土 $\geq 40 \text{ cm}$, 路面变形缝沉降围岩为绢云母绿泥石钙质片石, 主洞二次衬砌为 68 cm 后模筑 C25 混凝土, 隧道原型与模型主要设计参数如表 1. 图 1 为隧道模具, 图 2 为养护成型隧道模型.

表 1 隧道原型与模型主要设计参数

Tab. 1 Design parameters of tunnel prototype and model

参数	原型/cm	模型/cm	相似比
隧道内半径	457.58	12.2	1 : 37
隧道初衬厚度	68	1.84	1 : 37
隧道二衬厚度	40	1.08	1 : 37

1.3 温度缩比

根据科索维奇准则 $K_o = \frac{Q_p}{T_p C_p} = \frac{Q_m}{T_m C_m}$, 可得

$$\frac{C_q}{C_T C_C} = 1, \begin{cases} C_q = \frac{Q_p}{Q_m} \\ C_q = \frac{T_p}{T_m} \\ C_q = \frac{C_p}{C_m} \end{cases} \quad (11)$$



图 1 隧道模具

Fig. 1 Tunnel mould



图 2 养护成型隧道

Fig. 2 Curing formed tunnel

因为模型与原型衬砌材料都采用 C25 混凝土, 材料相同, 故 $C_c = 1$, $C_q = 1$, 得 $C_T = 1$ 即 $T_p = T_m$. 所以模型中衬砌混凝土各点的温度与原型中对应几何相似点的温度值相等. 模型围岩材料内部温度分布值要结合围岩材料的测试导热系数, 具体计算过程参考 2.3 围岩材料配置.

2 材料配置

2.1 衬砌混凝土材料的选取

大阪山隧道的衬砌为 C25 混凝土, 由《大阪山病害处治施工图设计》可知, C25 初支混凝土 $\geq 40 \text{ cm}$, 主洞二次衬砌为 68 cm 后模筑 C25 混凝土, 经过几何缩尺之后, 初衬厚度为 1.84 cm, 二衬厚度为 1.08 cm. 由于混凝土中粗骨料效应, 模型试验中无法采用常规的混凝土进行浇筑, 拟采用 C25 细粒混凝土进行代替, 细粒混凝土的选取主要参考其导热系数与 C25 混凝土的接近程度.

对于细粒混凝土的配置, 主要考虑到衬砌之间需固定 5 mm 保温层, 保温层与模板之间距离缩短为 17.5 mm, 根据粗骨料不能超过浇筑厚度的 1/2 的原则, 采用 8 mm 方孔筛对粗骨料进行筛分, 然

后冲洗, 晾晒. 并且要保证所选用石子在水中浸泡不少于 24 h 直到含水量基本没有变化, 所有冲洗并晾晒石子中的含水量对配比没有太大影响.

细粒混凝土的配合比:

水: 水泥: 砂子: 石子 = 0.38 : 1 : 1.11 : 2.72

试验相关材料参数见表 2.

表 2 试验材料参数

Tab. 2 Parameters of experiment material

材料	参数		
	表观密度,	导热系数	比热容
水	1 000	0.58	4.19
砂子	1 700	0.87	0.84
石灰	1 100	0.23	0.92
石子	2 200	1.16	0.84
黏土	1 500	0.93	0.84

经查阅资料, 标准 C25 混凝土导热系数为 2.461 W/m · K, 对模型衬砌混凝土的导热系数进行 10 组测试, 取平均值 2.410 W/m · K, 与模型标准 C25 混凝土导热系数近似相等.

2.2 保温材料的选取

根据 1/37 几何缩比, 若采用现场聚氨酯保温材料, 则模型衬砌表面与内部保温材料厚度为 1.35 mm, 该厚度在模型试验操作性差, 误差大, 并且聚氨酯保温材料具有较高的脆性, 与模型隧道的密贴程度较差, 增加了接触热阻的影响, 对试验结果的影响程度较大. 所以考虑采用代替材料, 通过查阅相关材料, 并进行相应的试算, 橡塑保温材料柔软度较高, 导热系数小, 裁剪方便. 其铺设方式与现场隧道一致, 衬砌表面 1 cm 橡塑保温层, 衬砌内部 0.5 cm 橡塑保温层.

采用热阻法进行保温层厚度的相似计算, 计算模型按照圆筒壁导热方式进行, 在圆筒壁的稳态导热中, 不同半径处的热流密度与半径成反比. 但是, 通过整个圆筒壁面的热流量为常量, 不随半径而异, 所以得到热流量方程为

$$\Phi = 2\pi r l q = \frac{2\pi \lambda l (t_1 - t_2)}{\ln(r_1/r_2)} \quad (12)$$

式中: Φ 热流量, W; r_1 、 r_2 为圆筒壁内外半径, m; t_1 、 t_2 为圆筒壁内外壁面温度, °C; Φ 为圆筒长度, m; Φ 为导热系数, W/m · K.

根据热阻定义, 得到整个圆筒壁的导热热阻为

$$R = \frac{\Delta t}{\Phi} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda l} \quad (13)$$

对衬砌表面保温材料而言:

设聚氨酯保温材料导热系数为 λ_j , 衬砌表面保

温材料内半径为 λ_{j1} , 衬砌表面保温材料外半径为 γ_0 , 长度为 l , 则热阻 R_j 为

$$R_j = \frac{\ln(r_0/r_{j1})}{2\pi \lambda_j l} \quad (14)$$

式中: $\lambda_j = 0.018$ W/m · K; $\gamma_{j1} = 12.2$ cm; $\gamma_0 = 12.335$ cm; $l = 300$ cm.

设橡塑保温材料导热系数为 γ_x , 衬砌表面保温材料内半径为 γ_{x1} , 衬砌表面保温材料外半径同为 γ_0 , 长度同为 l , 则热阻 R_x 为

$$R_x = \frac{\ln(r_0/r_{x1})}{2\pi \lambda_x l} \quad (15)$$

式中, $\lambda_j = 0.034$ W/m · K; $\gamma_{j1} = 12.2$ cm; $\gamma_0 = 13.2$ cm; $l = 300$ cm.

经计算得

$$\frac{R_x}{R_j} = \frac{0.133}{0.033} = 4.03 \quad (16)$$

在平壁导热中, 与之对应的表达式为

$$\Phi = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{A\lambda}} = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad (17)$$

为了保证代替保温材料与按照几何缩比得到的 1.35 mm 聚氨酯保温层具有相同的保温效果, 必须保证两者具有相同的热阻, 从热阻效果来看, 1 cm 橡塑保温层 1.35 mm 聚氨酯保温层的保温效果高出 4.03 倍.

根据能量守恒定理, 在外界热量不发生损失的情况下, 通过两种保温材料下的热流量相等, 最终得到 1.35 mm 聚氨酯(原型几何缩比后的模型厚度)保温层背后的温度分布, 可得

$$t_{j1} = t_{j2} + \frac{t_{x1} - t_{x2}}{R_x} R_j \quad (18)$$

式中: t_{j1} 为聚氨酯保温层表面温度, °C; t_{j2} 为聚氨酯保温层背后温度, °C; R_j 为聚氨酯保温材料热阻, m² · K/W; t_{x1} 为橡塑保温层表面温度, °C; t_{x2} 为橡塑保温层背后温度, °C; R_x 为橡塑保温材料热阻, m² · K/W.

对衬砌内部保温层而言:

$$R_j = \frac{\ln(r_0/r_{j1})}{2\pi \lambda_j l} \quad (19)$$

式中: $\lambda_j = 0.018$ W/m · K; $\gamma_{j1} = 14.04$ cm; $\gamma_0 = 14.175$ cm; $l = 300$ cm.

$$R_x = \frac{\ln(r_0/r_{x1})}{2\pi \lambda_x l} \quad (20)$$

式中: $\lambda_j = 0.034$ W/m · K; $\gamma_{j1} = 14.04$ cm; $\gamma_0 = 14.54$ cm; $l = 300$ cm.

经计算得

$$\frac{R_x}{R_j} = \frac{0.055}{0.028} = 1.96 \quad (21)$$

在平壁导热中, 与之对应的表达式为

$$\Phi = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{A\lambda}} = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad (22)$$

从热阻效果来看, 得出 0.5 cm 橡塑保温层比 1.35 mm 聚氨酯保温层的保温效果高出 1.96 倍。

同衬砌表面保温层计算方法相同, 最终可获得按照几何缩比得到的 1.35 mm 聚氨酯保温层背

后的温度分布。

2.3 围岩材料的选取

由《大阪山病害处治施工图设计》可知, 大阪山隧道一带广泛分布片岩类、灰岩类、大理岩类等地层, 固定某一类岩石的导热系数存在较大误差, 所以采用主要岩石导热系数的平均值作为现场隧道围岩的导热系数, 取值为 2.641 W/m·K。

拟采用配置材料来代替围岩材料, 要求配置围岩材料导热系数尽可能接近现场围岩。如图 3 所示

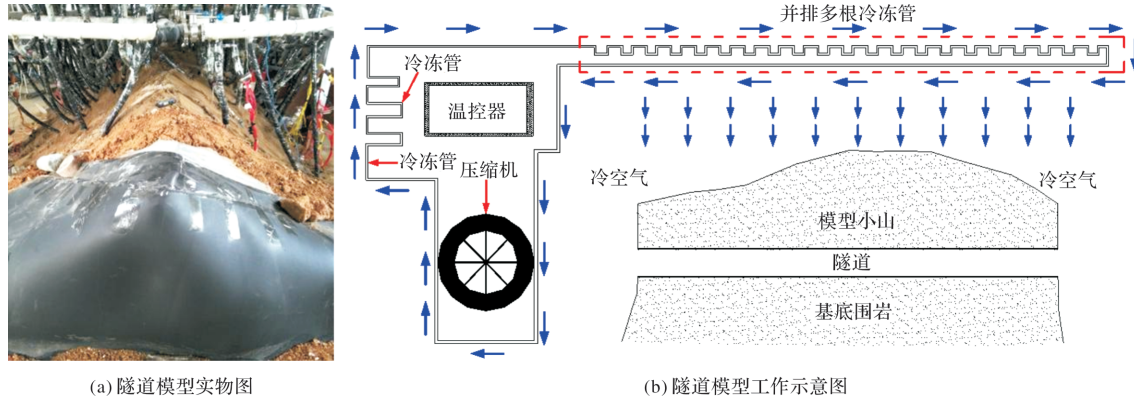


图 3 隧道模型冷冻试验系统

Fig. 3 Tunnel model freezing test system

围岩材料配合比:

水: 砂子: 石灰: 石子: 黏土 = 0.35: 1.5: 0.2: 0.6: 2.0。

相关材料参数见表 2。

根据科索维奇准则 $K_o = \frac{Q_p}{T_p C_p} = \frac{Q_m}{T_m C_m}$, 可得

$$\frac{C_Q}{C_T C_C} = 1, \begin{cases} C_Q = \frac{Q_p}{Q_m} \\ C_T = \frac{T_p}{T_m} \\ C_C = \frac{C_p}{C_m} \end{cases} \quad (23)$$

因为模型与原型围岩材料不同, 原型围岩导热系数为 2.523 W/m·K, 热扩散系数为 0.114 m²/d, 模型围岩导热系数为 1.551 W/m·K, 热扩散系数为 0.034 m²/d, 得

$$C_C = \frac{C_p}{C_m} = \frac{\alpha_p / \lambda_p}{\alpha_m / \lambda_m} = \frac{23.17}{45.62} = 0.51 \quad (24)$$

$C_C = 0.51$, $C_Q = 1$, 得 $C_T = 1.96$ 即 $T_p = 1.96 T_m$ 。所以模型中围岩材料各点的温度分布与原型中对应几何相似点的温度值为 1.96 倍关系。

3 模型、现场数据对比效果评价

将模型试验得到的温度数据进行如下处理: 将纵向温度数据采用归一化法及径向温度数据按照几

何比还原到现场隧道, 与现场实测数据对比分析。

3.1 隧道洞内气温对比分析

大阪山隧道出口风速大于进口风速, 且出口温度低于进口温度, 与模型的温度分布类似, 为了方便与模型试验数据对比分析, 作图中将大阪山出口位置记作 0 m, 进口位置记作 130 m。大阪山 11 月、12 月洞口温度和试验空气温度在 -8.4℃、-10.6℃ 下与模型隧道洞口温度接近。经现场实测, 大阪山隧道 11 月、12 月洞口风速 2.0~3.0 m/s, 取模型试验通风风速 2.6 m/s 下试验数据, 故对这两组数据进行对比分析。

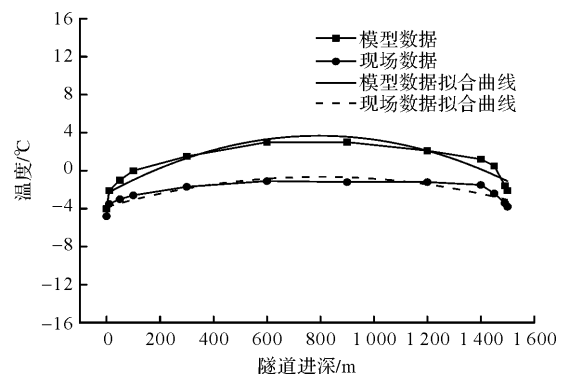


图 4 现场 11 月与模型洞内气温变化曲线

Fig. 4 Tunnel air temperature between model and field in November

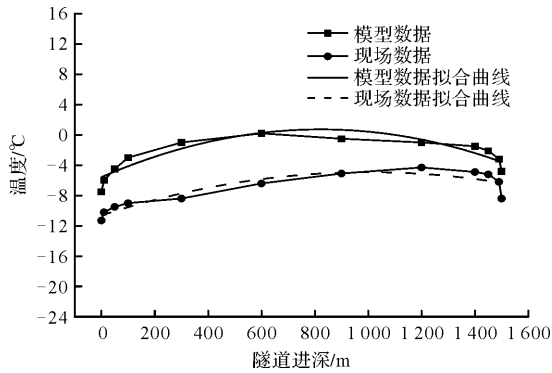


图5 现场12月与模型洞内气温变化曲线

Fig. 5 Tunnel air temperature between model and field in December

由图4~5可以看出:模型与现场洞内气温变化曲线都呈二次抛物线型规律,对现场与模型温度数据分别拟合得到方程为

$$T = al^2 + bl + c \quad (25)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; l 为隧道进深, m ; a 、 b 、 c 为方程系数. 表3为大阪山11月、12月下方程系数 a 、 b 、 c 的取值.

表3 方程系数取值

Tab. 3 Value of function coefficient

月份	数据	方程系数			方程相关系数
		a	b	c	
11月	模型数据	-9.64×10^{-6}	0.015	-2.42	0.926 8
	现场数据	-4.95×10^{-6}	0.008	-3.81	0.841
12月	模型数据	-9.35×10^{-6}	0.015	-5.58	0.801 2
	现场数据	-5.68×10^{-6}	0.011	-5.58	0.843 2

现场隧道洞口温度变化温差较大,洞内温度变化幅度较小,虽然洞口模型数据与现场数据接近,但是洞内气温明显高于现场,存在一定误差,所以采用修正系数对隧道模型洞内气温方程进行修正,修正方程为

$$T = [mal^2 + bl + c] - n \quad (26)$$

式中:11月份模型方程修正系数 m 、 n 分别为 -4.78×10^{-6} 、2.51;12月份模型方程修正系数 m 、 n 分别为 -5.96×10^{-6} 、4.12.

将修正好的模型数据与现场数据进行 Pearson 相关性分析,如图6~7所示,11月、12月现场数据与修正模型数据相关系数 r 分别达到 0.987、0.808,属于高度相关,说明在一定程度上可以通过试验空气温度 -8.4°C 、 -10.6°C 下隧道模型洞内气温来预测现场隧道洞内气温分布.

虽然开展低温气流对模型山体进行降温试验,但效果还是低于实际工况下的大气环境,毕竟模型山体会与周围环境进行热交换,导致实际降温

效果远远低于实际环境,这就导致模型洞内温度和现场温度存在差别.

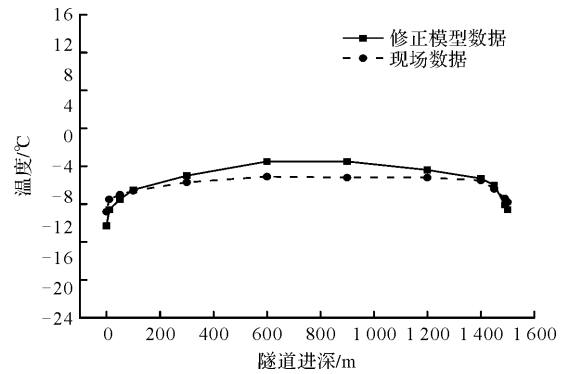


图6 修正模型与现场隧道洞内气温变化曲线(现场11月)

Fig. 6 Air temperature between modified model and field in November

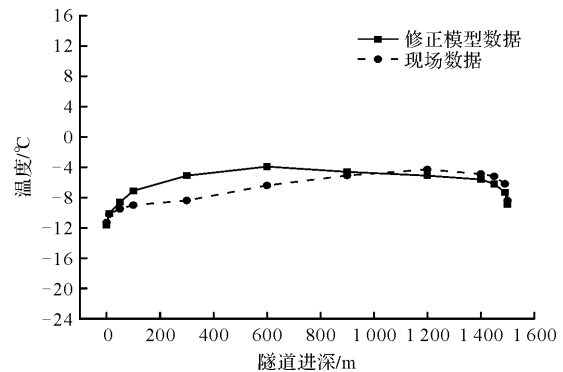


图7 修正模型与现场隧道洞内气温变化曲线(现场12月)

Fig. 7 Air temperature between modified model and field in December

3.2 隧道围岩冻结深度对比分析

将按照断面几何相似比反推的模型围岩冻结深度与吴紫汪等^[17]现场测试的大阪山11月、12月围岩冻结深度进行对比分析.为了方便与模型试验数据对比分析,作图分析时将大阪山出口位置记为0 m,进口位置记为1 530 m.

由图8~9可以看出,大阪山隧道11月洞内650~1 500 m范围内未出现冻结区域,模型隧道550~1 170 m范围内未出现冻结区域;大阪山隧道12月全长出现冻结区域,而模型隧道洞中仍存在约250 m的未冻结区域.

提取图8~9冻结深度数据,进行非线性回归分析^[18],可以看出,进、出口围岩冻结深度随着隧道进深增加成二次抛物线型衰减,回归方程见图8~9.通过相似比反推的模型隧道冻结区深度明显低于现场隧道,但是,冻结深度的变化规律与模型隧道相似,现场数据与反推模型数据存在近似的倍数关系,所以,我们采用修正系数对模型隧道冻结深度进行处理,两种工况模型的修正

系数分别为 1.35、1.2，模型修正数据见表 4~5。

对修正好的模型数据进行 Pearson 相关性分析^[19-20]，11 月、12 月现场数据与修正模型数据相关系数 r 分别为 0.955、0.993，属于高度相关，

说明在一定程度上我们可以通过试验空气温度 $-8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下模型隧道围岩冻结深度来预测现场隧道 11 月、12 月围岩的冻结深度。

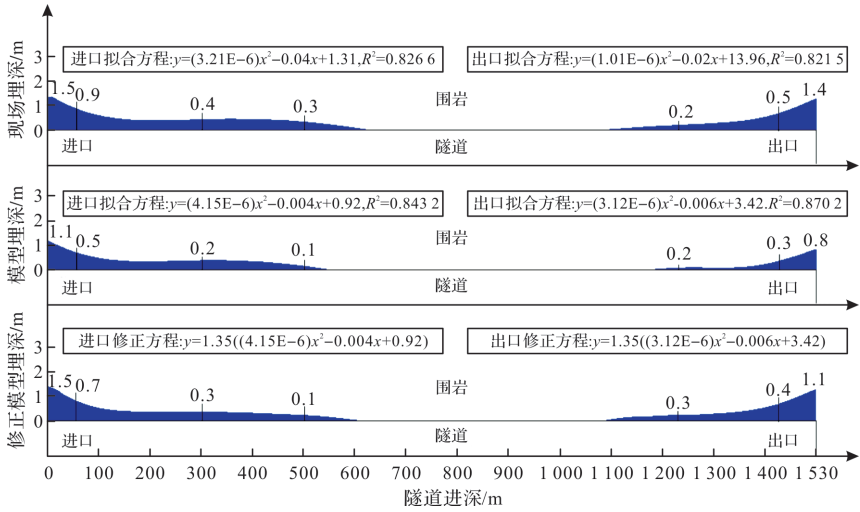


图 8 现场隧道 11 月及模型侧拱围岩冻结深度

Fig. 8 Frozen depth of side arch between model and field in November

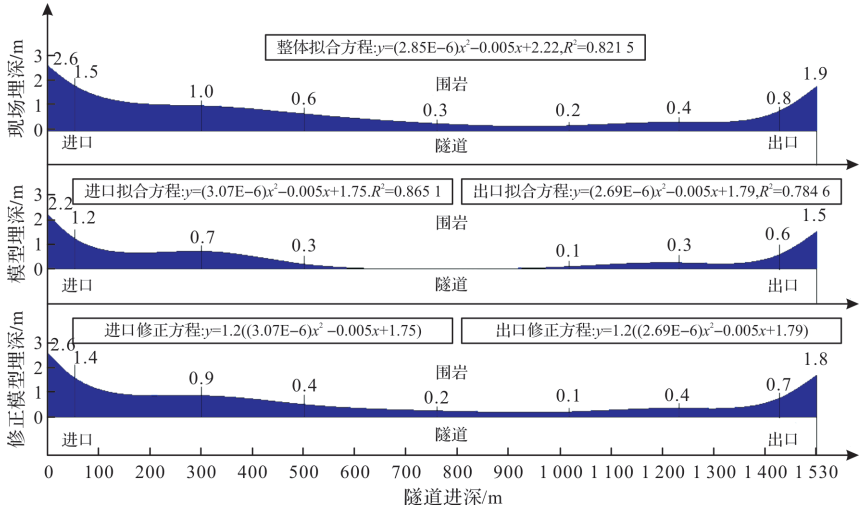


图 9 现场隧道 12 月及模型侧拱围岩冻结深度

Fig. 9 Frozen depth of side arch between model and field in December

表 4 大阪山隧道 11 月及修正模型边墙围岩冻结深度

Tab. 4 Freezing depth of surrounding rock of side wall of Osaka mountain tunnel in November and revised model

冻结深度/m	隧道进深/m								
	0	50	300	500	765	1 030	1 230	1 430	1 530
现场	1.5	0.9	0.4	0.3	0	0	0.2	0.5	1.3
修正模型	1.5	0.7	0.3	0.1	0	0	0.3	0.4	1.1

表 5 大阪山隧道 12 月及修正模型边墙围岩冻结深度

Tab. 5 Freezing depth of surrounding rock of side wall of Osaka mountain tunnel in December and revised model

冻结深度/m	隧道进深/m								
	0	50	300	500	765	1 030	1 230	1 430	1 530
现场	2.6	1.5	1	0.6	0.3	0.2	0.4	0.8	1.9
修正模型	2.6	1.4	0.9	0.2	0	0.1	0.4	0.7	1.8

4 结论

(1)基于相似理论,推导出寒区运营隧道温度场模型试验相似指标,得出模型的几何、温度等相似比,配置一定的相似材料,建立了寒区运营隧道模型试验平台验。

(2)采用纵向归一化及径向几何比还原法,结合现场实测数据,从隧道洞内气温,围岩冻结深度方面与模型试验数据进行了对比分析,修正的模型试验结果与现场实测数据比较符合,说明本次相似关系的拟定是合理的。研究结果能够为从事寒区运营隧道方面的模型试验研究提供指导,并且可以为数值计算参数的选取提供一定的参考依据。

参考文献 References

- [1] 吴江滨,张顶立,王梦恕.铁路运营隧道病害现状及检测评估[J].中国安全科学学报,2003,13(6):52-55,83.
WU J B, ZHANG D L, WANG M S, et al. Current situation and detection evaluation of railway operation tunnel diseases[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2003, 13(6): 52-55, 83.
- [2] 邓友生,刘俊聪,彭程谱,等.铁道路基冻害防治方法研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(1):1-8.
DENG Y S, LIU J C, PENG C P, et al. Study on prevention and cure methods of railway subgrade frost damage[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(1): 1-8.
- [3] 高焱,朱永全,赵东平,等.列车活塞风影响下寒区隧道温度场的变化规律[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(1):118-124.
GAO Y, ZHU Y Q, ZHAO D P, et al. The variation law of temperature field in cold tunnel under the influence of train piston wind[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 118-124.
- [4] 袁超,李树忱,李术才,等.寒区老旧隧道病害特征及治理方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3354-3361.
YUAN C, LI S C, LI S C, et al. Study on the disease characteristics and treatment methods of old tunnels in cold regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3354-3361.
- [5] 崔光耀,麻建飞,王雪来,等.季冻区破碎围岩隧道冻胀力计算方法及工程应用[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(2):294-299.
CUI G Y, MA J F, WANG X L, et al. Calculation method and engineering application of frost heaving force of broken surrounding rock tunnel in seasonally frozen area[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2021, 51(2): 294-299.
- [6] ZHOU X, REN X, YE X, et al. Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high temperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103843.
- [7] LU T, ZHANG G, LIU S, et al. Numerical investigation of the temperature field and thermal insulation design of cold-region tunnels considering airflow effect[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 191: 116923.
- [8] KANG F, LI Y. Numerical study on airflow temperature field in a high-temperature tunnel with insulation layer[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115654.
- [9] CHEN H M, YU H S, SMITH M J. Physical model tests and numerical simulation for assessing the stability of brick-lined tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53: 109-119.
- [10] LI Y, SUN Y, QIU J, et al. Moisture absorption characteristics and thermal insulation performance of thermal insulation materials for cold region tunnels[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117765.
- [11] LYU Z, XIA C, LIU W. Analytical solution of frost heaving force and stress distribution in cold region tunnels under non-axisymmetric stress and transversely isotropic frost heave of surrounding rock[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 178: 103117.
- [12] 谭贤君,陈卫忠,于洪丹,等.考虑通风影响的寒区隧道围岩温度场及防寒保温材料敷设长度研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1400-1409.
TAN X J, CHEN W Z, YU H D, et al. Study on the temperature field of tunnel surrounding rock and the laying length of cold insulation materials in cold regions considering the influence of ventilation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1400-1409.
- [13] 夏才初,张国柱,肖素光.考虑衬砌和隔热层的寒区隧道温度场解析解[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1767-1773.
XIA C C, ZHANG G Z, XIAO S G, et al. Analytical solution of temperature field of tunnel in cold region considering lining and insulating layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1767-1773.

- [14] 胡熠. 多场耦合条件下高海拔寒区隧道温度场及安全性评价研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- HU Y. Study on temperature field and safety evaluation of tunnel in high altitude cold region under multi-field coupling condition [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [15] 任锐, 谢永利. 海底隧道半横向通风方式模型试验与数值仿真[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 63-68.
- REN R, XIE Y L. Model test and numerical simulation of semi-transverse ventilation mode for subsea tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition) 2011, 31(1): 63-68.
- [16] 方磊. 长大公路隧道通风物理模型试验研究[D]. 西安:长安大学, 2005.
- FANG L. Physical model test of ventilation in long highway tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [17] 吴紫汪, 何春雄, 赖远明, 等. 高海拔寒冷地区隧道工程冻害防治技术研究[R]. 西宁, 青海省交通厅, 2001.
- WU Z W, HE C X, LAI Y M, et al. Study on prevention technology of freezing damage in tunnel engineering in high altitude and cold regions [R]. Xining, Qinghai Provincial Department of Transportation, 2001.
- [18] 蔡国军, 刘晓燕, 刘路路, 等. 基于孔压消散改进模型的土体孔隙水压力预测[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 492-496.
- CAI G J, LIU X Y, LIU L L, et al. Prediction of pore water pressure based on improved pore pressure dissipation model in soil[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 43(4): 492-496.
- [19] 王晓磊. 黄河三角洲埕北典型海域工程地质环境及粒度指示性分析[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- WANG X L. Engineering geological environment and grain size indicator analysis of Chengbei typical sea area in the Yellow River Delta [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [20] 章璇, 周宇渤, 珠正. 基于最小二乘法的土体热物理性质与常规物理性质指标相关性分析[J]. 科技通报, 2018, 34(11): 48-52.
- ZHANG X, ZHOU Y B, ZHU Z. Correlation analysis of soil thermophysical properties and conventional physical properties based on least square method[J]. Science and Technology Bulletin, 2018, 34(11): 48-52.

(编辑 沈 波)