

文章编号:1671-1637(2016)04-0133-08

## 高寒冻融环境下隧道结构服役性能预测模型

王 柱<sup>1</sup>, 董长松<sup>1</sup>, 韩常领<sup>1</sup>, 黎 岩<sup>2</sup>

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室,  
陕西 西安 710075; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘 要:**为分析高寒大温差冻融环境对公路隧道衬砌结构长期服役性能的影响,采用现场测试方法得到了姜路岭隧道洞口温度变化规律,基于室内冻融循环试验拟合了冻融环境下衬砌混凝土力学性能劣化计算公式,应用荷载结构法建立了高寒冻融环境下衬砌结构服役性能的时空预测模型。研究表明:铺设厚度为5 cm、导热系数为 $0.03 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 的保温层后,姜路岭隧道1年内经历的等效室内冻融循环次数从8下降为0.32;无保温层且混凝土饱水条件下,5、10、15、20年后拱脚处截面安全系数相对于刚服役时分别降低了0.6%、23.7%、41.1%、69.8%,二次衬砌服役20年后安全系数已不能满足结构承载的要求;铺设厚度为5 cm、导热系数为 $0.03 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 的保温层后,二次衬砌服役100年后安全系数仍能够满足承载要求。可见冻融循环的剧烈程度对衬砌结构长期服役性能影响显著,保温层能有效改善混凝土的冻融环境。

**关键词:**隧道工程;服役性能;混凝土;冻融劣化;有限元法;荷载结构法

**中图分类号:**U451.5

**文献标志码:**A

## Service performance prediction model of tunnel structure in alpine freezing-thawing environment

WANG Zhu<sup>1</sup>, DONG Chang-song<sup>1</sup>, HAN Chang-ling<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions,  
CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;  
2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of alpine freezing-thawing environment with large temperature difference on the long-term service performance of highway tunnel lining structure, the temperature variation law of Jiangluling Tunnel portal was obtained by field test method, the calculation formula for the mechanical property deterioration of lining concrete in freezing-thawing environment was obtained based on indoor freezing-thawing cycle test, and the load structure method was used to establish the spatial and temporal prediction model of service performance for lining structure in alpine freezing-thawing environment. Research result shows that after the insulation layer with the thickness of 5 cm and the thermal conductivity of  $0.03 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  is laid, the number of equivalent indoor freezing-thawing cycles for Jiangluling Tunnel in one year decreases from 8 to 0.32. When there is no insulation layer and concrete is saturated, 5, 10, 15, 20 years later, the safety coefficients of arch foot section respectively decrease by 0.6%, 23.7%, 41.1%, 69.8% compared to the original service time. After 20 years of service, the safety coefficient of second lining cannot meet structure load requirement. After the insulation layer

收稿日期:2016-05-11

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B05)

作者简介:王 柱(1976-),男,陕西咸阳人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司高级工程师,从事公路隧道研究。

with the thickness of 5 cm and the thermal conductivity of  $0.03 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  is laid, the safety coefficient of second lining still meet the load requirement after 100 years of service. The severe degree of freezing-thawing cycles has significant influence on the long-term service performance of lining structure, and the insulation layer can effectively improve the freezing-thawing environment of concrete. 12 tabs, 6 figs, 27 refs.

**Key words:** tunnel engineering; service performance; concrete; freezing-thawing deterioration; finite element method; load structure method

**Author resume:** WANG Zhu(1976-), male, senior engineer, +86-29-88322888, 657820251@qq.com.

## 0 引 言

结构服役性能指结构在设计规定服役期限内,在内外因共同作用下结构的安全性和耐久性状态及其完成既定服役功能要求的能力,包括结构的安全性和耐久性,内部因素包括结构本身性能随时间的逐渐衰减,外部因素包括环境作用和荷载作用,环境作用指能引起结构材料性能劣化的因素施加于结构上的作用,荷载作用指在结构服役期内引起结构安全性和耐久性降低的恒定荷载、瞬时荷载等。青藏高原具有高寒大温差、冻融循环剧烈等显著气候特征,冻融循环作为一种环境作用引起衬砌混凝土力学性能的劣化,降低了混凝土的耐久性寿命,而混凝土力学性能的劣化又进一步降低了衬砌结构的承载能力,影响衬砌承载的安全性。

混凝土冻融循环产生的破坏作用主要有冻胀开裂和表面剥蚀。水在混凝土毛细孔中结冰造成的冻胀开裂使混凝土的弹性模量、抗压强度、抗拉强度等力学性能严重下降。对于冻融环境下混凝土耐久性的研究,主要集中于混凝土材料的冻融损伤机理<sup>[1-4]</sup>、冻融循环作用下混凝土力学性能劣化规律<sup>[5-10]</sup>、破坏准则<sup>[11-12]</sup>等方面。针对寒区隧道工程,罗彦斌等采用室内冻融试验的方法对 C20 和 C25 喷射混凝土的抗冻性进行了研究<sup>[13]</sup>,使用压力试验机对经历不同冻融循环次数的试件进行了抗压和抗拉强度测试,采用共振法和超声波法对经历不同冻融循环次数的喷射混凝土进行了动弹性模量测试;董长松等采用快冻法对姜路岭隧道 C45 二次衬砌混凝土进行了室内冻融循环试验研究,得到了混凝土质量、相对动弹性模量、劈裂抗拉强度和抗压强度随冻融循环次数的变化规律,并拟合了函数关系<sup>[14]</sup>;项伟等通过冻融循环试验揭示了岩石-喷射混凝土组合试样的宏观物理力学性质及微观破坏机制<sup>[15]</sup>。

从已有研究可知,既有成果主要集中于冻融环境下混凝土力学性能劣化机理与规律等方面,对于

混凝土冻融劣化条件下结构长期服役性能响应尚缺乏深入研究,缺少现场冻融环境特征、混凝土劣化、结构服役性能演化的完整预测模型,无法深入揭示结构性能的时空演化规律。本文基于工程气象条件和混凝土冻融劣化规律,系统建立了高寒大温差冻融环境下隧道衬砌结构服役性能的时空预测模型,应用该预测模型分析揭示了有、无保温层条件下衬砌结构长期服役性能的演化规律,以期对寒区隧道设计和养护提供指导。

## 1 工程概况与冻融环境观测

青海省共和至玉树公路姜路岭隧道<sup>[16-18]</sup>是中国首座穿越青藏高原多年冻土区的公路隧道,全长 2 980 m,分离式双洞结构,设计速度为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,净宽为 10.25 m,净高为 7.15 m;所在区域全年冰冻期长达 7 个月,年最低平均气温为  $-10.3^\circ\text{C}$ ,极端最低气温为  $-48.1^\circ\text{C}$ ,具有大温差冻融循环剧烈的显著特点;洞口海拔大于 4 200 m,洞身同时穿越季节冻土段、多年冻土段和非冻土段;多年冻土年平均地温在  $-1.5^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$  之间,属高温不稳定多年冻土。

在姜路岭隧道洞口外约 100 m 处设置气象观测站(图 1),实时采集气象数据。通过气象站监测数据绘制的一年中洞口气温随时间的变化曲线见图 2,可以看出,上半年内正、负气温循环主要集中在 3 月 20 日~6 月 15 日之间(图 3),其余时间段内气温维持在负温或正温,未出现冻融循环现象。冻融循环温度统计见表 1,时间间隔指最低温至最高温的历时。

## 2 结构服役性能预测模型构建

### 2.1 室内试验环境下混凝土力学性能劣化规律

按照相关标准规范要求,混凝土力学性能随冻融次数的劣化规律可通过冻融循环试验和力学性能试验获得。对于姜路岭隧道 C45 衬砌混凝土,采用快冻法获得其冻融劣化规律。

试验所用水泥为青海祁连山 P·O 42.5 普通硅



图 1 自动气象观测站

Fig. 1 Automatic weather observation station

酸盐水泥;细集料取自 K357+700 砂场,为规格小于 9.5 mm 的砂,级配良好;粗集料取自 K356+500 碎石场,为规格是 5.0~16.0 mm、16.0~31.5 mm

表 1 冻融循环温度统计

Tab. 1 Temperature statistics of freezing-thawing cycles

观测日期	最低温/℃	最高温/℃	时间间隔/h	观测日期	最低温/℃	最高温/℃	时间间隔/h
2011-03-20	-8.34	3.51	12	2011-05-06	-1.05	7.33	12
2011-03-21	-7.88	3.10	10	2011-05-07	-0.86	4.94	12
2011-03-26	-9.19	0.89	11	2011-05-08	-1.22	6.84	13
2011-03-27	-9.70	1.48	9	2011-05-09	-1.59	9.98	10
2011-04-02	-4.85	4.98	10	2011-05-11	-1.58	4.39	11
2011-04-03	-3.72	3.37	15	2011-05-12	-4.79	6.51	9
2011-04-04	-5.19	2.04	9	2011-05-13	-4.73	1.96	9
2011-04-07	-9.52	0.50	9	2011-05-14	-4.84	3.05	9
2011-04-08	-8.64	3.16	9	2011-05-15	-3.88	6.46	11
2011-04-10	-9.25	0.75	11	2011-05-16	-2.09	5.26	10
2011-04-13	-9.96	1.55	8	2011-05-17	-3.01	0.20	7
2011-04-14	-7.66	0.23	9	2011-05-18	-4.35	7.20	15
2011-04-15	-8.78	1.12	12	2011-05-22	-0.91	6.71	9
2011-04-21	-7.03	3.06	13	2011-05-23	-0.28	7.49	11
2011-04-22	-4.79	5.41	11	2011-05-24	-0.82	6.32	10
2011-04-23	-3.85	3.61	11	2011-05-25	-2.85	5.10	12
2011-04-25	-9.50	1.34	13	2011-05-29	-0.80	9.60	14
2011-04-26	-6.68	2.10	10	2011-05-30	-0.29	10.84	9
2011-04-27	-8.18	5.06	11	2011-05-31	-0.66	4.07	8
2011-04-28	-5.10	6.50	11	2011-06-01	-0.99	10.46	11
2011-04-29	-3.04	5.74	8	2011-06-03	-1.06	2.65	9
2011-04-30	-3.46	3.35	8	2011-06-05	-0.47	6.39	7
2011-05-03	-4.43	0.74	11	2011-06-07	-2.42	9.30	11
2011-05-04	-5.64	5.00	11	2011-06-09	-1.02	7.95	7
2011-05-05	-1.37	2.57	8	2011-06-14	-0.92	7.52	10

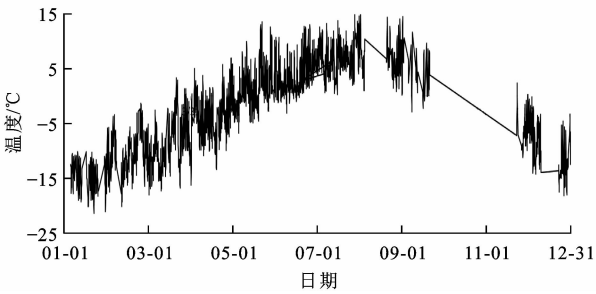


图 2 全年气温变化曲线

Fig. 2 Annual temperature variation curve

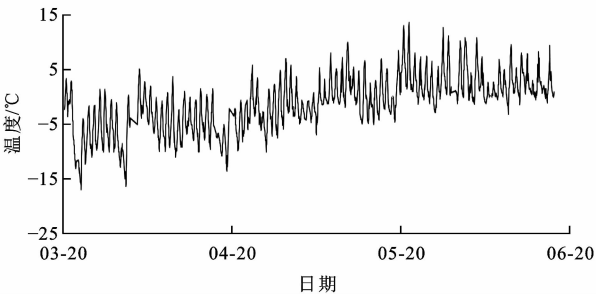


图 3 3 月 20 日~6 月 15 日洞口气温变化曲线

Fig. 3 Temperature variation curve from  
March 20th to June 15th

的碎石;外加剂为山西凯迪建材有限公司 KDSP-1 型高效减水剂,掺量为 1.2%;水泥、砂、粗集料、水与外加剂配合比为 485:665:1 084:160:5.82。

采用 TDRF-I 型砧快速冻融试验设备进行快速冻融循环试验,采用 DYE-2000 型数字式压力试验机测试抗压强度,采用 DT-16 动弹仪测量动弹性模量。依照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行快速冻融循环试验后,按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)进行力学性能试验。

混凝土动弹性模量变化规律、抗拉强度损失规律、抗压强度损失规律分别为

$$P_N = 96.299e^{-0.004N} \quad (1)$$

$$f_{1N} = 2.7466e^{-0.014N} \quad (2)$$

$$f_{2N} = 47.181e^{-0.008N} \quad (3)$$

式中: $N$  为冻融循环次数; $P_N$ 、 $f_{1N}$ 、 $f_{2N}$  分别为  $N$  次冻融循环后混凝土的相对动弹性模量、抗拉强度和抗压强度。

式(1)~(3)的决定系数分别为 0.943 5、0.966 6、0.964 4。不同循环次数下混凝土试件的表观结构见图 4。

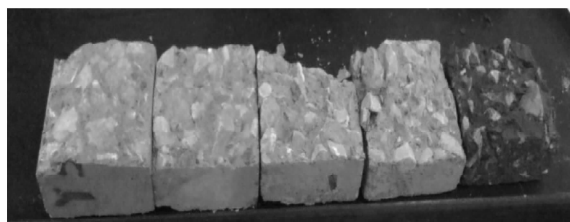


图 4 不同循环次数下混凝土试件的表观结构

Fig. 4 Apparent structures of concrete specimens under different cycle times

## 2.2 现场环境下混凝土力学性能劣化规律

室内试验时冻融循环的最高温度、最低温度不变、降温时间和升温时间不变,且具有周期性的规律。从疲劳的角度看,室内冻融循环对混凝土的作用是周期性等幅疲劳温度荷载,而现场温度波动对混凝土的作用是一种变幅随机疲劳温度荷载。由静水压假说可知,室内恒幅周期性的冻融温度循环在混凝土内部产生近似恒幅周期性的静水压脉冲荷载,现场变幅随机的温度循环在混凝土内部产生变幅的静水压脉冲荷载。现场温度波动趋势具有周期性,则混凝土内部产生的静水压幅值应分布在一定的范围内,因此,室内外冻融环境的区别本质上是在混凝土内部进行恒幅周期性静水压加载和随机多级静水压加载之间的区别。

基于 Miner 法则,推导得到与现场冻融循环次数相对应的等效室内试验冻融循环次数<sup>[19]</sup>为

$$N_{eq} = \sum_i \kappa_i^\zeta N_i \quad (4)$$

$$\kappa_i = T_i/T \quad (5)$$

式中: $N_{eq}$  为等效室内冻融循环次数; $N_i$  为第  $i$  次试验现场混凝土冻融循环次数; $\kappa_i$  为第  $i$  次试验现场冻融循环产生的静水压与室内快冻试验冻融循环产生的静水压的比例系数; $\zeta$  为混凝土材料参数,对 C45 混凝土取为 0.946; $T_i$  为第  $i$  次试验现场环境降温速率; $T$  为室内快冻试验降温速率,取为  $12.5\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

现场冻融循环次数可通过隧址区气象资料或隧道洞口气象观测站数据获得。姜路岭隧道 3 月中旬至 6 月中旬、8 月中旬至 11 月中旬现场冻融循环各 50 次,计算得到等效室内冻融循环次数为

$$N_{eq} = 2 \sum_{i=1}^{50} \kappa_i^\zeta N_i = \sum_{i=1}^{50} \kappa_i^\zeta \times 1 \approx 8 \quad (6)$$

$t$  年后,二次衬砌混凝土经历  $8t$  次等效室内冻融循环,由式(1)~(3)得到现场冻融环境下混凝土相对动弹性模量、抗拉强度、抗压强度随时间的劣化规律分别为

$$P_t = 96.299e^{-0.004 \times 8t} = 96.299e^{-0.032t} \quad (7)$$

$$f_{1t} = 2.7466e^{-0.014 \times 8t} = 2.7466e^{-0.112t} \quad (8)$$

$$f_{2t} = 47.181e^{-0.008 \times 8t} = 47.181e^{-0.064t} \quad (9)$$

式中: $P_t$ 、 $f_{1t}$ 、 $f_{2t}$  分别为  $t$  年后混凝土的相对动弹性模量、抗拉强度和抗压强度。

为了防冻保温,往往需根据温度场分布状况在寒区隧道设置保温层<sup>[20-21]</sup>。保温层内表面温度变化几乎与空气温度相同,而二次衬砌混凝土表面温度变化幅度远小于空气温度的变化幅度。可通过现场实测、数值仿真或解析计算<sup>[22-26]</sup>等方法获取二次衬砌混凝土表面温度变化情况,然后计算等效室内冻融循环次数。

计算时取较不利的情况:最低负温为  $-9\text{ }^\circ\text{C}$ , 12 h 后升至最高正温  $6\text{ }^\circ\text{C}$ , 12 h 后又降至  $-9\text{ }^\circ\text{C}$ , 现场冻融循环温度多数在此范围内。采用数值模拟方法计算不同保温材料及厚度下二次衬砌混凝土的表面温度变化(图 5)及冻融参数(表 2)。

## 2.3 材料参数确定

围岩及二次衬砌混凝土的物理力学参数见表 3。动弹性模量一般高于静弹模,且两者大致呈比例关系<sup>[27]</sup>。以无保温层为例,二次衬砌混凝土的相对动弹性模量在 5、10、15、20 年后分别为 78.1%、69.9%、

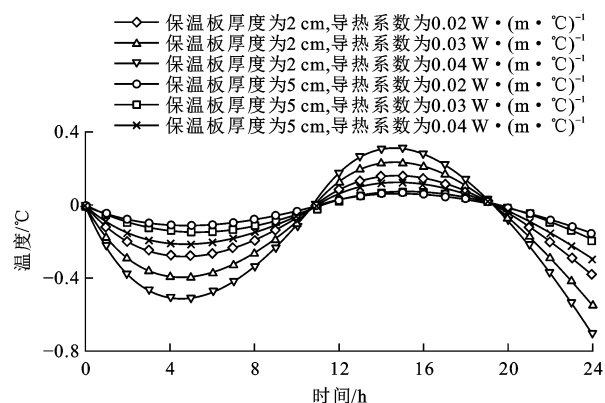


图 5 单日温度变化

Fig. 5 Single day temperature change

表 2 有保温层时的冻融参数

Tab. 2 Freezing-thawing parameters with insulation layer

保温板 厚度/ cm	保温板 导热系数/ [W·(m·°C) <sup>-1</sup> ]	最低温/ °C	最高温/ °C	静水压 比例 系数	$N_{eq}$	
					1 年	100 年
2	0.02	-0.38	0.16	0.004 8	0.64	64
2	0.03	-0.55	0.23	0.006 9	0.91	91
2	0.04	-0.71	0.31	0.009 1	1.17	117
5	0.02	-0.15	0.06	0.001 9	0.26	26
5	0.03	-0.19	0.07	0.002 3	0.32	32
5	0.04	-0.30	0.12	0.003 7	0.50	50

表 3 物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters

结构	容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性抗力系数/ (MPa·m <sup>-1</sup> )	泊松 比	内摩擦 角/(°)	惯性矩/ m <sup>4</sup>
V 级浅埋	19.0	150	0.35	25	—
V 级二次衬砌	25.0	—	0.20	—	0.010 425

55.4%、42.0%。C45 混凝土的初始弹性模量为 33.5 GPa,可以得到二次衬砌混凝土的静弹性模量在 5、10、15、20 年后分别为 26.2、24.2、18.6、14.1 GPa。混凝土室内快速冻融试验测得的混凝土抗压强度为立方体抗压强度,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),轴心抗压强度  $F_1$  与立方体抗压强度  $F_2$  的关系为

$$F_1 = 0.88\alpha_1\alpha_2 F_2 \quad (10)$$

式中: $\alpha_1$  为棱柱体强度与立方体强度之比,对强度等级为 C45 的混凝土,该值取为 0.76; $\alpha_2$  为高强度混凝土的脆性折减系数,对强度等级为 C45 的混凝土,该值取为 0.98。有、无保温层时二次衬砌混凝土的力学性能分别见表 4、5。

#### 2.4 荷载与安全系数计算

采用《公路隧道设计规范》(JTG D70—2014)给

表 4 无保温层时二次衬砌混凝土的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of second lining  
concrete without insulation layer

时间	相对动弹性模量/%	弹性模量/GPa	轴心抗压强度/MPa
初始	100.0	33.5	28.8
5 年后	78.1	26.2	24.1
10 年后	69.9	24.2	15.5
15 年后	55.4	18.6	9.8
20 年后	42.0	14.1	3.2

表 5 有保温层时二次衬砌混凝土的力学性能

Tab. 5 Mechanical properties of second lining  
concrete with insulation layer

时间	相对动弹性模量/%	弹性模量/GPa	轴心抗压强度/MPa
初始	100.0	33.5	28.8
20 年后	93.6	31.4	28.7
100 年后	79.9	26.8	25.8

定的方法计算围岩荷载,拟定初期支护与二次衬砌的荷载分担比例,并进行结构安全性校核。

按照隧道设计规范并结合地质条件、施工方法等因素综合确定荷载等效高度,判定公式为

$$H = ph \quad (11)$$

$$q = \gamma h = 0.45 \times 2^{-1} \gamma [1 + 0.1(B - 5)] \quad (12)$$

式中: $H$  为深、浅埋隧道分界深度; $h$  为荷载等效高度; $p$  为系数,一般取为 2.0~2.5,对于 IV~VI 级围岩, $p$  取为 2.5; $q$  为等效垂直均布压力; $\gamma$  为围岩容重; $s$  为围岩级别; $B$  为隧道开挖跨度。

浅埋隧道顶部垂直压力、隧道拱顶与底部的水平围岩压力分别为

$$r = \gamma a_1 \quad (13)$$

$$e_1 = \gamma a_1 \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (14)$$

$$e_2 = \gamma (a_1 + a_2) \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (15)$$

式中: $r$  为浅埋隧道顶部垂直压力; $e_1$ 、 $e_2$  分别为隧道拱顶与底部的水平围岩压力; $a_1$  为浅埋隧道埋深,指隧道顶部至地面的距离; $a_2$  为隧道开挖高度; $\varphi$  为围岩计算摩擦角。荷载计算结果见表 6。

表 6 荷载计算结果

Tab. 6 Load calculation result

围岩级别	V
埋深/m	10
竖向荷载/(kN·m <sup>-2</sup> )	190.000
水平荷载/(kN·m <sup>-2</sup> )	32.748

围岩及二次衬砌混凝土的荷载分担比例见表 7,本文计算中 V 级围岩荷载分担比例取为 60%。

表 7 荷载分担比例  
Tab. 7 Load sharing ratios

围岩级别	V
围岩与初期支护分担比例	20%~40%
二次衬砌分担比例	60%~80%

结构安全性校核公式为

$$K_1 = \frac{n_{li}}{n} \geq K_2 \quad (16)$$

$$n_{li} = \begin{cases} \sigma\beta R_1 bc & m/n \leq 0.2c \\ \frac{1.75\sigma R_2 bc}{6m/cn - 1} & m/n > 0.2c \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $K_1$  为强度安全系数;  $K_2$  为强度安全系数的规定值;  $n$  为截面所受轴力;  $n_{li}$  为截面所受轴力的极限值;  $\sigma$  为构件纵向系数, 对于隧道衬砌取为 1;  $\beta$  为轴力的偏心影响系数;  $R_1$ 、 $R_2$  分别为混凝土的极限抗压、抗拉强度;  $b$  为截面宽度;  $c$  为截面厚度;  $m$  为截面所受弯矩。钢筋混凝土结构的强度安全系数见表 8。

表 8 钢筋混凝土结构的强度安全系数

Tab. 8 Strength safety coefficients of reinforced concrete structure

破坏原因	强度安全系数
钢筋达到计算强度	2.0
混凝土达到极限抗压强度	2.0
混凝土达到极限抗剪强度	2.0
混凝土达到极限抗拉强度	2.4

## 2.5 有限元分析模型构建

采用荷载结构法进行内力计算, 计算程序采用有限元软件 ANSYS, 分别采用梁 Beam3 单元和弹簧 Combin14 单元模拟二次衬砌和围岩抗力, 通过换算将面力转换为节点力后将荷载施加于各个节点之上。有限元计算模型见图 6, 数字为单元序号。

表 9 无保温层时二次衬砌的轴力与弯矩

Tab. 9 Axial forces and bending moments of second lining without insulation layer

时间		初始	5 年后	10 年后	15 年后	20 年后
拱顶	轴力/kN	-507.564	-515.335	-517.607	-524.507	-530.975
	弯矩/(kN·m)	-145.712	-133.275	-129.740	-119.408	-110.398
拱腰	轴力/kN	-703.385	-708.941	-710.566	-715.500	-720.125
	弯矩/(kN·m)	87.172	86.973	86.812	85.923	84.415
边墙	轴力/kN	-870.102	-873.128	-874.141	-877.696	-881.810
	弯矩/(kN·m)	-5.651	-20.574	-24.285	-33.145	-37.576
拱脚	轴力/kN	-938.266	-945.824	-947.732	-952.424	-955.008
	弯矩/(kN·m)	201.156	187.539	182.948	167.157	149.776
仰拱	轴力/kN	-791.706	-805.519	-809.360	-820.143	-828.606
	弯矩/(kN·m)	-255.276	-235.818	-230.086	-212.820	-197.205

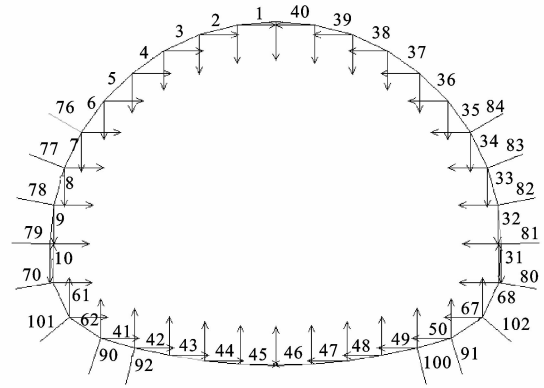


图 6 有限元计算模型

Fig. 6 Finite element calculation model

## 3 结构服役性能演化规律分析

以姜路岭隧道 V 级浅埋段为例进行有、无保温层条件下结构服役性能分析, 并进行对比研究。姜路岭隧道 V 级浅埋段采用 50 cm 厚的 C45 钢筋混凝土二次衬砌, 埋深为 10 m, 二次衬砌表面铺设 5 cm 厚的保温层, 导热系数为  $0.03 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

### 3.1 无保温层时服役性能

无保温层时二次衬砌各位置的轴力与弯矩、安全系数分别见表 9、10, 可知: 衬砌劣化程度越大, 衬砌各位置的安全系数越小, 5、10、15、20 年后, 拱脚处截面安全系数相对于衬砌刚服役时分别降低了 0.6%、23.7%、41.1%、69.8%, 说明二次衬砌的强度储备越来越低; 仰拱及拱脚处的安全系数最小, 在二次衬砌服役 20 年后其安全系数已小于规范规定的钢筋混凝土结构的安全系数, 此时二次衬砌已不能满足隧道衬砌结构承载的要求, 因此, 对于饱和混凝土而言, 当衬砌表面不铺设保温板时二次衬砌的服役年限约为 20 年。

表 10 无保温层时二次衬砌的安全系数

Tab. 10 Safety coefficients of second lining without insulation layer

时间	拱顶	拱腰	边墙	拱脚	仰拱
建成初期	5.83	12.10	17.27	4.94	2.71
5年后	5.75	10.25	13.58	4.91	2.64
10年后	4.88	7.03	8.94	3.77	2.55
15年后	4.29	4.89	5.76	2.91	2.35
20年后	2.28	2.27	2.50	1.49	1.34

### 3.2 有保温层时服役性能

有保温层时二次衬砌各位置的轴力与弯矩、安全系数分别见表 11、12,可知:当铺设保温层时,服役 100 年后二次衬砌各位置处的安全系数依然大于 2.00,二次衬砌仍然能够满足承载要求,因此,对于饱和混凝土而言,当衬砌表面铺设保温板时二次衬砌的服役年限可达 100 年。

表 11 有保温层时二次衬砌的轴力与弯矩

Tab. 11 Axial forces and bending moments of second lining with insulation layer

时间		建成初期	20年后	100年后
拱顶	轴力/kN	-507.564	-509.732	-514.668
	弯矩/(kN·m)	-145.712	-142.198	-134.323
拱腰	轴力/kN	-703.385	-704.935	-708.464
	弯矩/(kN·m)	87.172	87.161	87.010
边墙	轴力/kN	-870.102	-870.889	-872.843
	弯矩/(kN·m)	-5.651	-10.110	-19.421
拱脚	轴力/kN	-938.266	-940.513	-945.235
	弯矩/(kN·m)	201.156	197.661	188.831
仰拱	轴力/kN	-791.706	-795.641	-804.371
	弯矩/(kN·m)	-255.276	-249.887	-237.500

表 12 有保温层时二次衬砌的安全系数

Tab. 12 Safety coefficients of second lining with insulation layer

时间	拱顶	拱腰	边墙	拱脚	仰拱
建成初期	5.83	12.10	17.27	4.94	2.71
20年后	4.85	12.00	16.84	5.08	2.19
100年后	4.44	10.88	14.55	4.81	2.05

## 4 结 语

(1)高寒大温差冻融环境下,冻融循环的剧烈程度决定了混凝土材料的劣化进程和程度,隧道衬砌结构长期服役性能受混凝土材料力学性能劣化的影响十分显著。

(2)保温层能有效改善混凝土的冻融环境,大幅度减小等效冻融循环次数。姜路岭隧道二次衬砌表面铺设厚度为 5 cm、导热系数为  $0.03 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  的保温层后,1 年内经历的等效冻融循环为 0.32 次,较无保温层条件下经历的 8 次等效冻融循环大幅减少。

(3)无保温层且混凝土饱水条件下,姜路岭隧道二次衬砌服役 20 年后,其安全系数已不能满足结构承载的需要,5、10、15、20 年后拱脚处截面安全系数相对于衬砌刚服役时分别降低了 0.6%、23.7%、41.1%、69.8%;铺设厚度为 5 cm、导热系数为  $0.03 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  的保温层后,姜路岭隧道二次衬砌服役 100 年后各位置处的安全系数仍能够满足承载要求。

(4)对于高寒冻土隧道,在衬砌结构长期服役过程中围岩呈周期冻融变化,直接影响衬砌结构所受荷载状况,需要进一步研究相应的计算模型。

### 参考文献:

#### References:

- [1] COLLINS A R. The destruction of concrete by frost[J]. Journal of the Institution of Civil Engineers, 1944, 23(1): 29-41.
- [2] LITVAN G G. Frost action in cement paste[J]. Materials and Structures, 1973, 6(4): 293-298.
- [3] PENTTALA V, AL-NESHAWY F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1407-1420.
- [4] CAI H, LIU X. Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(9): 1281-1287.
- [5] SHANG H S, SONG Y P. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10): 1857-1864.
- [6] HASAN M, UEDA T, SATO Y. Stress-strain relationship of frost-damaged concrete subjected to fatigue loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(1): 37-45.
- [7] PHEERAPHAN T, LEUNG C K Y. Freeze-thaw durability of microwave cured air-entrained concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 427-435.
- [8] 覃丽坤,宋玉普,陈浩然,等.冻融循环对混凝土力学性能的影响[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增1):5048-5053.  
QIN Li-kun, SONG YU-pu, CHEN Hao-ran, et al. Influence of freezing and thawing cycles on mechanical properties of concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 5048-5053. (in Chinese)
- [9] 曹大富,富立志,杨忠伟,等.冻融循环下砼力学性能与相对动弹模量关系[J].江苏大学学报:自然科学版,2012,33(6): 721-725.  
CAO Da-fu, FU Li-zhi, YANG Zhong-wei, et al. Relationship between mechanical properties and relative dynamic elasticity modulus of concrete after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(6): 721-725. (in Chinese)
- [10] 曹秀丽,曹志翔,喻 骁.冻融循环对混凝土质量损失及相对

- 动弹模量影响的试验研究[J]. 铁道建筑, 2013(3): 125-127.
- CAO Xiu-li, CAO Zhi-xiang, YU Xiao. Test research on influence of freeze-thaw cycle to concrete quality loss and relative dynamic elastic modulus[J]. Railway Engineering, 2013(3): 125-127. (in Chinese)
- [11] 覃丽坤, 宋玉普, 陈浩然, 等. 双轴拉压混凝土在冻融循环后的力学性能及破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1740-1745.
- QIN Li-kun, SONG Yu-pu, CHEN Hao-ran, et al. Mechanical property and failure criterion of concrete under biaxial tension and compression after freeze-thaw cycling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1740-1745. (in Chinese)
- [12] 唐光普, 刘西拉, 施士升. 冻融条件下混凝土破坏面演化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2572-2578.
- TANG Guang-pu, LIU Xi-la, SHI Shi-sheng. Evolution model of concrete failure surface under freeze-thaw condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2572-2578. (in Chinese)
- [13] 罗彦斌, 陈建勋, 段献良. C20 喷射混凝土冻融力学试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 113-119.
- LUO Yan-bin, CHEN Jian-xun, DUAN Xian-liang. Mechanical testing on frozen-thaw C20 shotcrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 113-119. (in Chinese)
- [14] 董长松, 张晓旭, 张弛, 等. 多年冻土区隧道衬砌混凝土冻融循环试验研究[J]. 公路, 2015(11): 244-247.
- DONG Chang-song, ZHANG Xiao-xu, ZHANG Chi, et al. Test and research on freeze-thaw cycle of tunnel lining concrete in permafrost regions[J]. Highway, 2015(11): 244-247. (in Chinese)
- [15] 项伟, 刘珣. 冻融循环条件下岩石-喷射混凝土组合试样的力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2510-2521.
- XIANG Wei, LIU Xun. Experimental study of mechanical properties of combined specimen with rock and shotcrete under freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2510-2521. (in Chinese)
- [16] 夏才初, 范东方, 韩常领. 寒区隧道不同类型冻土段隔热(保温)层铺设厚度计算方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 131-139.
- XIA Cai-chu, FAN Dong-fang, HAN Chang-ling. Piecewise calculation method for insulation layer thickness in cold region tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(5): 131-139. (in Chinese)
- [17] 姚红志, 张晓旭, 董长松, 等. 多年冻土区公路隧道保温隔热层铺设方式及材料性能对比分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 106-113.
- YAO Hong-zhi, ZHANG Xiao-xu, DONG Chang-song, et al. Comparison analysis on heat insulating material and laying way of highway tunnel in permafrost regions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 106-113. (in Chinese)
- [18] 夏才初, 范东方, 李志厚, 等. 隧道多年冻土段隔热层厚度解析计算结果的探讨[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 118-124.
- XIA Cai-chu, FAN Dong-fang, LI Zhi-hou, et al. Discussion on analytical calculation for thermal-insulation layer thickness of tunnel in permafrost area [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 118-124. (in Chinese)
- [19] 刘西拉, 唐光普. 现场环境下混凝土冻融耐久性预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2412-2419.
- LIU Xi-la, TANG Guang-pu. Research on prediction method of concrete freeze-thaw durability under field environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2412-2419. (in Chinese)
- [20] LAI Y M, WU Z, ZHU Y, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold regions tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(1): 89-96.
- [21] LAI Yuan-ming, LIU Song-yu, WU Zi-wang, et al. Approximate analytical solution for temperature fields in cold regions circular tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(1): 43-49.
- [22] TOUTAIN J, BATTAGLIA J L, PRADERE C, et al. Numerical inversion of Laplace transform for time resolved thermal characterization experiment [J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(4): 1-3.
- [23] HAJI-SHEIKH A, BECK J V. Temperature solution in multi-dimensional multi-layer bodies[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(9): 1865-1877.
- [24] SINGH S, JAIN P K, UDDIN R. Finite integral transform method to solve asymmetric heat conduction in a multilayer annulus with time-dependent boundary conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(1): 144-154.
- [25] 赖远明, 吴紫汪, 张淑娟, 等. 寒区隧道保温效果的现场观察研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 81-86.
- LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHANG Shu-juan, et al. In-situ observed study for effect of heat preservation in cold regions tunnels[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 81-86. (in Chinese)
- [26] 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 Cai-chu, ZHANG Guo-zhu, XIAO Su-guang. Analytical solution to temperature fields of tunnel in cold region considering lining and insulation layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1767-1773. (in Chinese)
- [27] 安光明, 杨球玉, 杨立建, 等. 某核电厂岩体动静弹性模量的对比研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增1): 565-569.
- AN Guang-ming, YANG Qiu-yu, YANG Li-jian, et al. Comparison between static and dynamic elastic moduli of rock mass in a nuclear power plant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 565-569. (in Chinese)