

文章编号: 1674—8247(2019)05—0021—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.05.005

季冻区客运专线隧道局部存水冻胀对衬砌力学性能的影响分析

王雪来¹ 崔光耀¹ 侯占鳌² 吕晓聪²

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401121)

摘 要:本文依托吉图珲客运专线五峰山隧道,运用局部存水冻胀模型,采用有限元数值模拟技术,对不同积水位置情况下,局部存水冻胀力对隧道衬砌力学性能的影响进行了分析。研究表明:(1)局部存水冻胀将对隧道结构安全造成一定的不利影响,存水位置不同,影响程度有所差别;(2)积水位置处弯矩值较未积水时显著提高,当隧道拱顶、拱肩、拱腰处积水时,隧道安全系数相较于无冻胀力作用时都会降低,且当拱顶处积水时,安全系数降低更为显著。研究成果可为季冻区隧道抗冻设计及冻害整治提供参考。

关键词:季冻区; 客运专线; 隧道; 局部存水冻胀; 力学性能

中图分类号:U458.1 **文献标志码:**A

Analysis of Influence of Local Storage Water Frost Heave in Tunnel on Passenger Dedicated Line in Seasonal Frozen Zone on Mechanical Properties of Tunnel Lining

WANG Xuelai¹ CUI Guangyao¹ HOU Zhanao² LV Xiaocong²

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. The First Construction Division Co., Ltd., of China Railway Tunnel Group, Chongqing 401121, China)

Abstract:Based on the Wufengshan Tunnel of Jituhui Passenger Dedicated Line, using the local storage water frost heave model and the finite element numerical simulation technology, this paper has analyzed the influence of the local storage water frost heave force on the mechanical properties of tunnel lining under different icing locations. The results show that the local storage water frost heave will have some adverse effects on the safety of the tunnel structure and the degree of influence varies with the different water storage location; that the bending moment value at the icing position is significantly higher than that without icing, and when the icing occurs at the vault, arch shoulder and arch waist, the safety factor of the tunnel is lower than that without the frost heave force and decreases more significantly at the vault. The research results can provide reference for the anti-freezing design and frost damage treatment of tunnels in the seasonal frozen zone.

Key words: seasonal frozen zone; passenger dedicated line; tunnel; local storage water frost heave; mechanical properties

目前,国内外在建或已建成的部分寒区隧道在施 工或运营阶段都不同程度地出现了冻害现象,影响到

收稿日期:2018-03-20

作者简介:王雪来(1998-),男,硕士研究生。

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51408008);北京市青年拔尖人才培养计划项目资助(CIT&TCD201704013);中铁隧道局集团科技创新计划项目(隧研合 2018-11)

引文格式:王雪来,崔光耀,侯占鳌,等. 季冻区客运专线隧道局部存水冻胀对衬砌力学性能的影响分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(5): 21-24.

WANG Xuelai, CUI Guangyao, HOU Zhanao, et al. Analysis of Influence of Local Storage Water Frost Heave in Tunnel on Passenger Dedicated Line in Seasonal Frozen Zone on Mechanical Properties of Tunnel Lining [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(5): 21-24.

隧道的正常运营。我国在东北等高纬度严寒地区修建的隧道中,有许多处于冻土区域,对这些隧道冰冻灾害进行调查后,发现有约80%的隧道存在冻害,可见我国对隧道防冻技术的研究迫在眉睫^[1-2]。

对于季冻区隧道的研究,主要应用局部存水冻胀模型、破碎冻融圈整体冻胀模型以及含水风化层冻胀模型三大冻胀模型来研究其冻胀机理。局部存水冻胀模型认为,隧道初支和二衬之间存在储水的空间,温度降低时,储水空间中的水将会结冰,并且由于不断的水源补给迁移至冰面将会形成巨大的冻胀力。破碎冻融圈整体冻胀模型认为,隧道衬砌一定深度范围的围岩形成冻结圈,冻结圈范围的岩石中孔隙均匀且饱和,则冻结圈范围内的水冻成冰由将整体冻胀,从而对隧道衬砌产生冻胀力。含水风化层冻胀模型认为,凡是有冻害的隧道,衬砌周边的围岩均有10~20 cm左右厚的风化层,冻胀力正是由紧贴衬砌的围岩含水风化层的冻胀而产生的^[3-6]。

国内外有关专家、学者对季冻区隧道的冻胀机理及抗冻措施等进行了部分研究,主要有:张祉道等人对三大冻胀模型的优缺点进行了探讨并提出的冻胀力计算公式以及建议的保温结构,可供设计工作者参考^[7];李集光通过研究隧道病害特点及区域适应性,提出了已损二次衬砌加强和增设防寒保温措施的相关处治方案^[8];程涛等人基于伴有相变的瞬态传热理论和 abaqus 有限元模型模拟了围岩冻结温度场动态分布规律以及围岩冻胀后的衬砌内力及变形特征^[9];董宇仓等人采用理论分析与数值模拟方法,对铁路隧道在不同断面形式、围岩级别以及衬砌背后不同积冰厚度和积冰位置时,衬砌结构冻胀力大小及分布规律进行了研究^[10]。综上,目前针对寒区隧道积冰位置不同对衬砌结构影响方面的研究较少。本文依托吉图珲客运专线五峰山隧道,运用有限元数值模拟技术,对不同积冰位置情况下,局部存水冻胀力对隧道衬砌力学性能的影响进行了分析,研究成果可为季冻区隧道抗冻设计及冻害整治提供参考。

1 吉图珲客运专线五峰山隧道工程概况

1.1 地质条件

吉图珲客运专线五峰山隧道位于吉林省安图县石门镇龙城屯附近,隧道进口位于龙城屯东南约300 m处,出口位于榆树川西侧的陡坡上。隧道地处敦化隆起与延吉盆地的交界部位,地质构造发育,隧址区域内受构造影响,华力西晚期岩浆岩侵入强烈,隧址区通过地层主要表层为华力西晚期第二、第三花岗岩。

1.2 结构设计

五峰山隧道断面为马蹄形,跨度13.62 m,高度10.31 m。隧道全长3 705 m,最大埋深283 m。隧道洞身段二次衬砌采用C30素混凝土,厚度40 cm。

2 冻胀力计算

衬砌结构所受的冻胀力是由衬砌结构与围岩之间积存的水体冻胀引起的,其方向始终垂直于衬砌结构。根据寒区硬岩隧道冻胀力产生的机理,范磊等人推导了冻胀力的计算公式^[11]:

$$P = \frac{\alpha t (K_{1m} + K_{im}) (K_{rm} + K_{im})}{2 (K_{1m} + 2K_{im} + K_{rm})} \quad (1)$$

式中: α ——冰的冻胀率;

t ——水体深度;

K_{rm} ——围岩的弹性抗力系数的平均值;

K_{1m} ——衬砌结构的弹性当量系数的平均值;

K_{im} ——冰的弹性当量系数的平均值。

根据设计资料,隧道衬砌采用C30素混凝土,衬砌厚度40 cm,衬砌的弹性当量系数取75 kPa/mm。隧道围岩为Ⅳ级围岩,围岩的弹性抗力系数取500 kPa/mm,冰的弹性当量系数的平均值取175 kPa/mm。冰的冻胀率取10%。具体计算参数如表1所示。

表1 计算参数

α	t/m	$K_{rm}/(\text{kPa}/\text{mm})$	$K_{1m}/(\text{kPa}/\text{mm})$	$K_{im}/(\text{kPa}/\text{mm})$
10%	0.1	500	75	175

通过局部存水冻胀力的计算公式(1),计算得到局部存水冻胀力大小为0.91 MPa。

3 衬砌力学性能影响分析

3.1 计算模型

根据设计资料,用ANSYS软件对隧道建立地层结构模型。衬砌材料按线弹性考虑。衬砌材料采用BEAM单元,围岩材料采用PLANE42单元,建立计算模型并划分网格单元。计算模型如图1所示。

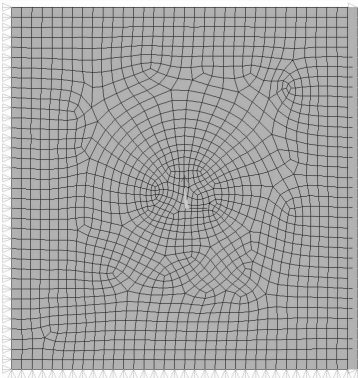


图1 计算模型图

3.2 计算工况

为研究不同积冰位置,局部存水冻胀力对隧道衬砌力学性能的影响,建立 8 组计算模型进行对比研究,如表 2 所示。

表 2 计算工况

工况	冻胀力作用位置
1	不施加冻胀力
2	拱顶
3	左拱肩
4	左拱腰
5	拱顶 + 左拱肩
6	拱顶 + 左拱腰
7	左拱肩 + 左拱腰
8	拱顶 + 左拱肩 + 左拱腰

选取计算工况各监测断面的拱顶、左拱肩、左边墙,如图 2 所示。

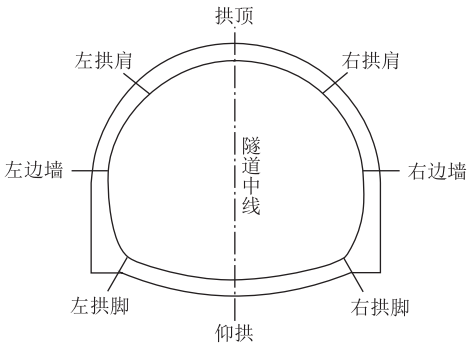


图 2 隧道监测点布置形式图

3.3 内力分析

提取不同工况衬砌结构内力(以工况 1、2、5、8 弯矩为例),如图 3 所示。提取各工况衬砌结构最大弯矩值,并与工况 1 进行对比,如表 3 所示。

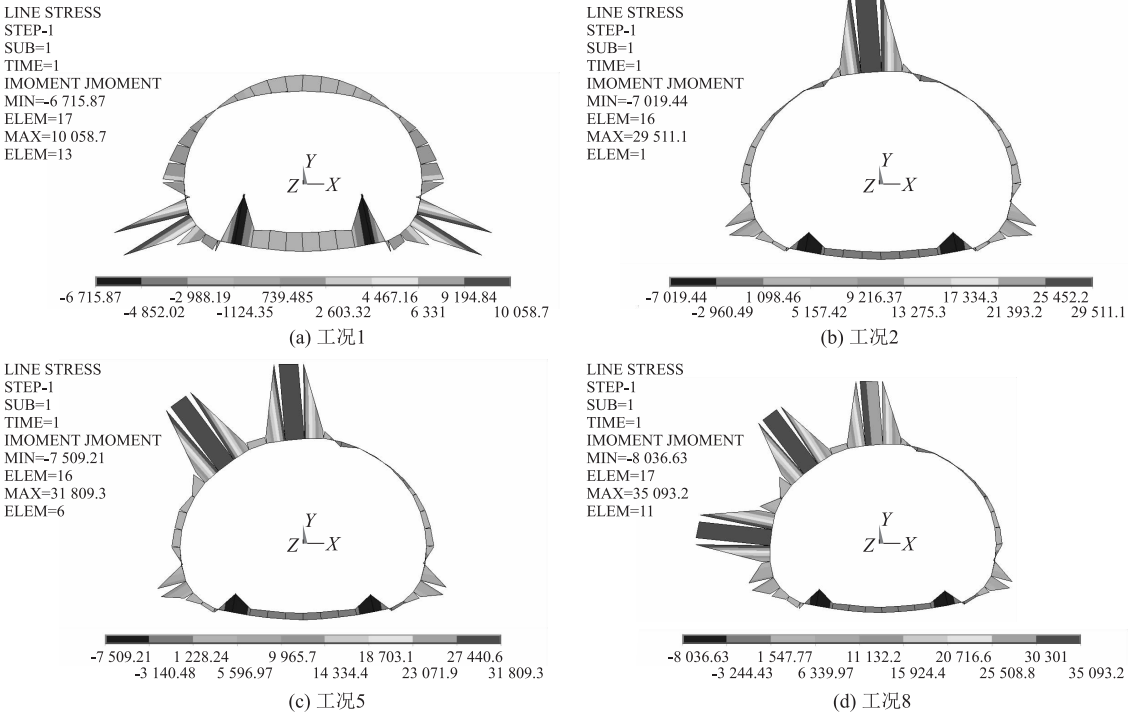


图 3 各工况隧道衬砌弯矩图

表 3 各工况最大弯矩值

工况	最大弯矩值/(N·m)	提高倍数
1	10 058.7	—
2	29 511.1	2.93
3	31 390.6	3.12
4	34 458.4	3.43
5	31 809.3	3.16
6	34 635.6	3.44
7	34 916.0	3.47
8	35 093.2	3.49

由图 3 及表 3 可知,施加局部冻胀力后,隧道衬砌

受力处弯矩突变明显,衬砌最大弯矩值与工况 1 相比有明显提高,最大提高 3.49 倍。

3.4 安全系数

提取各监测点的弯矩、轴力值,由公式(2)、公式(3)计算衬砌结构安全系数^[12],计算结果如表 4 所示。

$$KN \leq \varphi \alpha R_s b h \tag{2}$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_l b h}{6 e_0 / h - 1} \tag{3}$$

式中: b ——截面宽度,取 1 m;

h ——截面厚度;
 R_a ——混凝土抗压极限强度;
 R_t ——混凝土抗拉极限强度;
 K ——安全系数;
 φ ——构件纵向弯曲系数;
 α ——轴向力偏心影响系数。

表 4 各工况最小安全系数

工况	最小安全系数	与工况 1 对比 安全系数减小量	最小安全系数 出现位置
1	10.33	—	左拱腰
2	4.62	55.28%	拱顶
3	9.47	8.33%	左拱腰
4	9.79	5.23%	左拱腰
5	5.28	48.89%	拱顶
6	5.15	50.15%	拱顶
7	9.06	12.29%	左拱腰
8	5.98	42.11%	拱顶

绘制各种工况的安全系数包络图(以工况 1、2、5、8 为例),如图 4 所示。

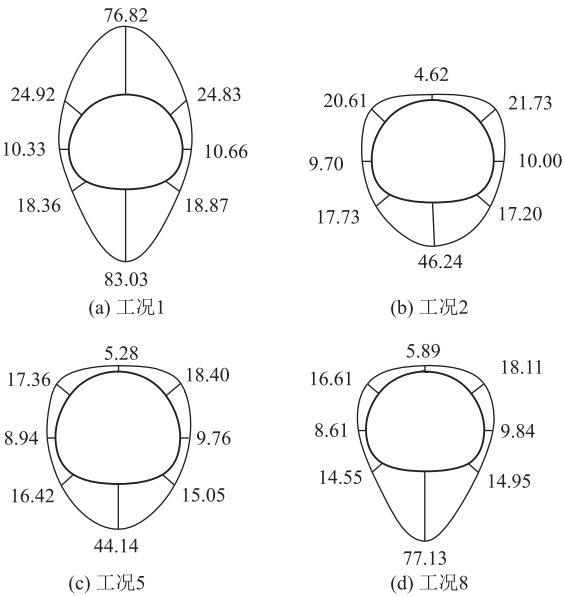


图 4 各工况隧道衬砌安全系数包络图

由表 4 及图 4 可知,当冻胀力分别作用在隧道拱顶、拱肩、拱腰时,隧道安全系数相较于无冻胀力作用时都会降低,当冻胀力作用于拱顶时,安全系数降低更为显著。当存水位置位于隧道拱顶时,影响最大,结构安全系数最小值由 10.33 降至 4.62,下降 55.28%。

4 结论

- (1)局部存水冻胀可对隧道结构安全性造成一定的不利影响,存水位置不同,影响程度有所差别。
- (2)施加局部冻胀力后,隧道衬砌受力处弯矩突

变明显,衬砌最大弯矩值与工况 1 相比有明显提高,最大提高 3.49 倍。

(3)当隧道拱顶、拱肩、拱腰处结冰时,隧道安全系数相较于无冻胀力作用时都会降低,当拱顶处结冰时,结构安全系数降低更为显著,安全系数最小值由 10.33 降至 4.62,下降 55.28%。

参考文献:

[1] 廖立. 基于温度变化的寒区隧道围岩应力与防冻措施研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.
LIAO Li. Study on Surrounding Rock Stress of and Anti-freezing Measures for Tunnel in Cold Region Based on Temperature Change [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.

[2] 白国权. 高海拔严寒地区隧道温度场分布规律及衬砌冻胀力数值模拟研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.
BAI Guoquan. Numerical Simulation of Temperature Field Distribution Rule and Lining Frost Heave Force of Tunnel in High Altitude and Severe Cold Regions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.

[3] 徐胜利. 高寒地区高速铁路隧道衬砌病害整治技术研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(5):17-22.
XU Shengli. Research on Treatment Technology of Tunnel Lining Disease of High-speed Railway in Cold Area [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 17-22.

[4] 郑一峰,张晓皖,刘凡. 基于 ANSYS 的严寒地区公路隧道二次衬砌纵向变形特性分析[J]. 甘肃科学学报,2017,29(2):90-94.
ZHENG Yifeng, ZHANG Xiaowan, LIU Fan. Analysis of Longitudinal Deformation Characteristics of Secondary Lining of Highway Tunnel in Severe Cold Region Based on ANSYS[J]. Journal of Gansu Sciences, 2017, 29(2): 90-94.

[5] 张玉伟,谢永利,李又云,等. 基于温度场时空分布特征的寒区隧道冻胀模型[J]. 岩土力学,2018,39(5):1625-1632.
ZHANG Yuwei, XIE Yongli, LI Youyun, et al. A Frost Heave Model of Cold Tunnel Based on Space-time Distribution of Temperature Field in Cold Region Tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1625-1632.

[6] 张玉伟,李又云,谢永利,等. 基于破碎冻融圈的寒区隧道冻胀模型及影响因素分析[J]. 现代隧道技术,2017,54(6):93-102.
ZHANG Yuwei, LI Youyun, XIE Yongli, et al. A frost Heave Model and Its Influencing Factors in Cold Zone Tunnels Based on Broken Freeze-thaw Cycles [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(6): 93-102.

[7] 张祉道,王联. 高海拔及严寒地区隧道防冻设计探讨[J]. 现代隧道技术,2004,56(3):1-6.
ZHANG Zhidao, WANG Lian. Discussion on Antifreezing Design of Tunnels in High Altitude and Severe Cold Regions [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 56(3): 1-6.

[8] 李集光. 严寒地区铁路隧道衬砌冻胀病害处治技术[J]. 公路交通技术,2018,34(3):106-112.
LI Jiguang. The Treatment of Frosting and Enlargement of Railway Tunnel Lining in Cold Area [J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(3): 106-112.

道、地层、站房地基三者之间的相互作用与力的相互传递。三者的相互作用关系为:开挖→隧道变形→地层变形→站房地基沉降;运营荷载→路基沉降→地层变形→隧道变形。

(2)从地层沉降角度分析 CRD 法下各加固方案的特点,发现无论是水平加固方案,还是不同范围的周边加固方案,对地层沉降都有明显改善,但周边加固方案效果更明显。

(3)从隧道水平收敛角度分析加固方案的特点,发现水平加固不仅对隧道施工中水平收敛没有效果,反而加大了右隧道施工中其水平收敛值,而周边加固方案效果依然显著。考虑到经济情况,最终选择 $\phi 300$ 周边加固方案。

参考文献:

- [1] 姜忻良, 贾勇, 赵保建, 等. 地铁隧道施工对邻近建筑物影响的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3047-3052.
JIANG Xinliang, JIA Yong, ZHAO Baojian, et al. Analysis on Influence of Metro Tunnel Construction on Adjacent Buildings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3047-3052.
- [2] 郑俊杰, 包德勇, 龚彦峰, 等. 铁路隧道下穿既有高速公路隧道施工控制技术研究[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(8): 80-84.
ZHEN Junjie, BAO Deyong, GONG Yanfeng, et al. Research on Construction Control Technology of Railway Tunnel underneath Passing Existing Expressway Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(8): 80-84.
- [3] 张顶立, 黄俊. 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1703-1707.
ZHANG Dingli, HUANG Jun. Analysis and Prediction of Vault Settlement in Metro Tunnel Construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1703-1707.
- [4] 于宁, 朱合华. 盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1330-1334.
YU Ning, ZHU Hehua. Analysis of Surface Deformation Caused by Shield Tunnel Construction and 3D-FEM Simulation [J]. Rock and

Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1330-1334.

- [5] 黄茂松, 张宏博, 陆荣欣. 浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1379-1383.
HUANG Maosong, ZHANG Hongbo, LU Rongxin. Impact of Shallow Tunnel Construction on Pile Foundation of Buildings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1379-1383.
- [6] Mroueh H, Shahrou I. A Full 3-D Finite Element Analysis of Tunneling-Adjacent Structures Interaction [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(3): 245-253.
- [7] 李强, 王明年, 李德才, 等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 184-190.
LI Qiang, WANG Mingnian, LI Decai, et al. Effects of Subsurface Construction of Metro Station Tunnel on Existing Pile Foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 184-190.
- [8] 许江, 顾义磊, 康骥鸣. 隧道与地表构筑物相互影响的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 889-892.
XU Jiang, Gu Yilei, Kang Jiming. Study on Interaction of Tunnel and Upper Structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 889-892.
- [9] 姚海波. 大断面隧道浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物施工技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
YAO Haibo. Research on Construction Technology of Large Section Tunnel Crossing under Existing Metro Structures by Shallow Tunneling Method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.
- [10] 张晓丽. 浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物关键技术研究与实践[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
ZHANG Xiaoli. Key Technologies and Practice of Shallow Buried Underground Excavation Method for Passing under Existing Metro Structures [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [11] 许有俊, 葛绍英, 孙凤. 盾构隧道下穿地铁车站结构沉降特性研究[J]. 施工技术, 2018, 47(7): 113-118.
XU Youjun, GE Shaoying, SUN Feng. Study on the Settlement Characteristics of Shield Tunnel Underpassing Metro Station Structures [J]. Construction Technology, 2018, 47(7): 113-118.

(编辑: 车晓娟 张红英)

(上接第 24 页)

- [9] 程涛, 张东明, 孙福申, 等. 季冻区山岭公路隧道冻胀力学特征数值模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 34-40.
CHENG Tao, ZHANG Dongming, SUN Fushen, et al. Numerical Simulation of Mechanical Characteristics of Mountain Road Tunnel under Frost Heaving in Seasonal Frozen Region [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(4): 34-40.
- [10] 董宇苍. 隧道衬砌冻胀力学行为研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
DONG Yucang. Research on Frost Heave Mechanical Behavior of

Tunnel Lining [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.

- [11] 范磊, 曾艳华, 何川, 等. 寒区硬岩隧道冻胀力的量值及分布规律[J]. 中国铁道科学, 2007, 29(1): 44-49.
FAN Lei, ZENG Yanhua, HE Chuan, et al. Magnitude and Distribution of Frost Heave Force for Cold Region Strong Tunnels [J]. China Railway Science, 2007, 29(1): 44-49.
- [12] TB 1003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 1003-2016 Code for Design of Railway Tunnel[S].

(编辑: 车晓娟 张红英)