

文章编号: 1674—8247(2019)05—0036—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.05.008

## 隧道下穿火车站站房 CRD 法加固方案优化分析

朱正国 方智淳 王道远

(石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

**摘 要:**文章以新建隧道下穿新乡火车站站房为研究背景,首先分析隧道-地层-路基三者之间的相互关系以及隧道开挖过程中交通荷载传递过程中力的传递方式。然后对隧道下穿火车站站房进行数值模拟计算,分别从地表沉降以及隧道水平收敛角度出发,得到隧道 CRD 法施工下,周边加固方案以及水平加固方案的效果;结果表明:周围加固方案要比水平加固方案相较于一般加固方案的效果明显很多,而水平加固方案甚至有可能加大隧道水平收敛,而  $\phi 600$  周边加固效果还是要优于  $\phi 300$  范围内加固效果。最后考虑到经济合理的角度,采用  $\phi 300$  周边范围加固方法进行加固。

**关键词:**下穿;隧道;站房;CRD 法;稳定性

**中图分类号:**U457<sup>+</sup>.3 **文献标志码:**B

## Optimum Analysis of Reinforcement Scheme with CRD Method for Tunnel Passing under Railway Station Building

ZHU Zhengguo FANG Zhichun WANG Daoyuan

(Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Taking the new tunnel passing under the station building of Xinxiang Railway Station as research background, firstly, the relationship among tunnel, stratum and subgrade and the transmission mode of force during tunnel excavation and traffic load transmission are analyzed, and then the numerical simulation of tunnel passing under railway station building is carried out respectively from the perspective of surface settlement and horizontal convergence of tunnel. According to simulation calculation, the effects of surrounding reinforcement and horizontal reinforcement schemes for tunnel with CRD method are obtained. The results show that the effect of the surrounding reinforcement scheme is much better than that of the horizontal reinforcement scheme, and the horizontal reinforcement scheme may even increase the horizontal convergence of the tunnel, while the reinforcement effect within  $\phi 600$  around the tunnel is better than that within  $\phi 300$ . Finally, considering the economy and rationality, the location within  $\phi 300$  around the tunnel shall be reinforced.

**Key words:** underpass; tunnel; station building; CRD method; stability

近年来,由于我国各省市的城市化进程逐渐深入发展,地上交通和地面构筑物越来越难以解决当今社会的发展诉求,对地下空间的开发与利用已经被绝大

多城市提上日程<sup>[1-2]</sup>。为满足人们工作中与生活中出行需要,我国城市轨道交通建设正在如火如荼地发展。轨道交通的建设离不开隧道工程,隧道的修建往往会

收稿日期:2019-08-30

作者简介:朱正国(1977-),男,教授。

基金项目:国家自然科学基金(51978424);河北省高校百名创新人才支持计划(Ⅲ)(SLRC2017054);河北省人才工程培养经费资助项目(A201802005)

引文格式:朱正国,方智淳,王道远.隧道下穿火车站站房 CRD 法加固方案优化分析[J].高速铁路技术,2019,10(5):36-40.

ZHU Zhengguo, FANG Zhichun, WANG Daoyuan. Optimum Analysis of Reinforcement Scheme with CRD Method for Tunnel Passing under Railway Station Building [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(5): 36-40.

遇到需要下穿既有建筑结构或历史遗迹等构筑物的情形,为保证地上结构不受隧道下穿施工的干扰,亟需开展隧道下穿施工过程中的稳定性研究<sup>[3-5]</sup>。

目前,国内外很多专家学者在隧道下穿施工过程中引起的对既有建筑物的影响以及沉降变形控制研究领域取得了不少成果。Mrouch 等人利用 Peck 得到隧道下穿过程中造成的地表沉降,再根据土层整体变形反算得到既有建筑物的稳定性分析<sup>[6]</sup>。李强等人以广州地铁五号线为例,对隧道施工过程中附近已有桩的基底承载力的位移和受力变化规律进行了分析,得到了靠近桩一侧的摩阻力状态<sup>[7]</sup>。许江等人利用大型有限元分析软件,研究了城市地铁修建过程中对既有建筑物地基受力所产生的影响<sup>[8]</sup>。姚海波<sup>[9]</sup>和张晓丽<sup>[10]</sup>以隧道下穿既有地铁线路工程为背景,从施工方法比选、支护作用机理以及变形沉降机理等方面进行研究,得到了大断面隧道开挖过程中对既有线路产生的影响。许有俊以隧道下穿铁路为背景,采用三维建模方法计算隧道开挖到不同位置时,交通动荷载作用下隧道和地层在位移和应力上的动力响应结果<sup>[11]</sup>。但是由于隧道开挖周围岩体与外界作用的复杂性以及当前研究方法的局限性,关于隧道下穿既有建筑物特别是火车站站房,仍然有很多问题需要研究解决。

本文以新建隧道下穿新乡火车站站房为研究背景,利用有限元数值分析软件,对采用交叉中隔壁法(CRD 法)施工的车站站房的变形进行研究,通过研究不同加固方案下地表沉降,比选出最经济合理的加固方案,保证施工快速、稳定、安全、有效的进行。

## 1 隧道-地层-路基相互作用关系

在既有车站站房下修建隧道,都不可避免会对既有站房产生扰动,使路基产生不均匀沉降,对站房内的工作造成影响。为保证既有站房在隧道下穿施工过程中安全运营,有必要严格控制隧道下穿施工时的路基沉降。在工程的整个设计、施工、管理以及运营中对变形沉降进行严格控制,通过有效的控制方法尽量减小地表沉降值,把隧道施工对站房造成的损害降到最小,保证其能够正常运营。

在隧道下穿站房的施工中,造成地层和路基沉降变形的主要因素有两个。一是由于隧道的开挖形成地层损失,造成施工扰动、应力释放、岩体卸载暴露以及围岩地层失稳等导致地层、路基沉降变形;二是站房运营所产生的人为动荷载通过路面传递给路基,再由路基传递到地层以及浅埋隧道拱顶,进而对路基路面、地层围岩、隧道结构产生变形影响,经过许多专家学者对

交通荷载的研究发现,这部分荷载对既有建筑物特别是下方有隧道穿越的建筑物是有较大影响的。

在隧道下穿既有车站站房施工过程中,随着隧道的开挖扰动,洞周围岩开始变形,这种变形传递至地层,引起地层变化。由于是浅埋隧道,变形会很快传递至地表和路基,引起路基沉降破坏,影响建筑物结构安全。假定这一传递过程是连续的,即将隧道、地层、站房地基三者视为共同作用、共同变形。这样可以简化研究隧道下穿施工引起地层和路基变形的规律。

在隧道下穿开挖过程中,隧道、地层、站房地基三部分相互关联,从开始变形到最后趋于稳定平衡状态,三者一直处于相互作用状态。隧道开挖造成原有地层损失,这种损失会形成围岩压力,致使隧道变形,进而造成洞周围岩和土层的位移变形,这种变形传递至地表和路基,如果路基变形超过最大允许变形,将产生运营安全隐患;在隧道下穿施工的同时,站房正常运营,运营荷载会对线路进行作用,荷载通过路基传递至地层进而影响正在施工中的隧道,增加了下穿站房隧道有别于普通浅埋隧道的施工难度,给隧道施作带来安全风险。所以三者的变形受到施工开挖和运营荷载的共同作用、共同影响。三者的作用关系如图 1 所示。

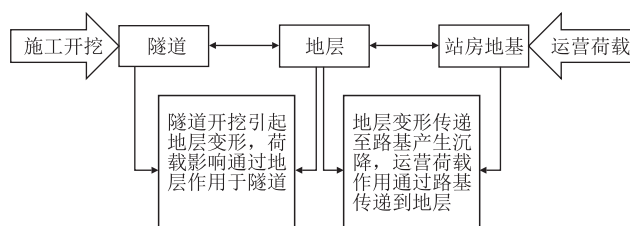


图1 隧道、地层、路基相互作用关系图

综合以上分析,隧道、地层、路基三者相互作用是通过传递进行的,而地层则像隧道和路基变形之间传递的“介质”,变形必须通过地层才得以发展。因此,想要控制路基沉降,主要的途径是对地层采取相应的处理措施,只要截断变形传递的路径,就能很好的控制变形的发展,确保铁路运营和隧道的施工安全。

## 2 隧道下穿站房 CRD 法加固方案比选分析

采用 CRD 法进行施工,既可以保证隧道开挖过程中隧道自身整体的稳定性,同时从经济角度考虑也可以节约成本,保证工程又快又好的进行。

### 2.1 计算模型和计算参数

采用有限元软件 ANSYS 进行建模,将赋好参数的模型再导入 FLAC 进行力的加载和施工步的设置最终得到计算结果。将隧道近似为圆形,X、Y、Z 三个方向

的尺寸为 172 m×40 m×60 m(隧道的顶端到火车站站房的表面距离为 7.42 m),模型的左、右、前、后以及下部边界采取约束法向位移的边界条件。

对隧道分别进行水平加固和周围加固两种加固两种方案对比。水平加固方案是在管幕的下方打入桩基,管幕的直径分别为 600 mm 和 300 mm,水平加固方案的整体模型和模型的局部计算示意图如图 2 所示。周边加固方案的整体模型和模型的局部计算示意图如图 3 所示。左右两边的隧道每边分为 4 个开挖部分,各个开打挖部分之间隔开 3 个开挖步。进行开挖时先对开挖左侧隧道进行开挖,右侧隧道的开挖落后左侧隧道开挖 12 m,设定的 CRD 法施工开挖顺序如图 4 所示。

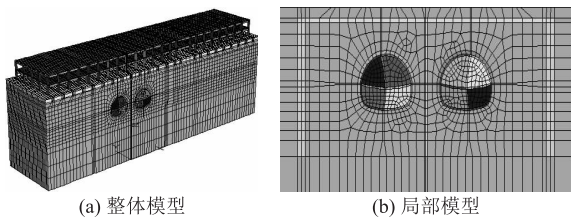


图 2 水平加固方案整体和局部计算模型图

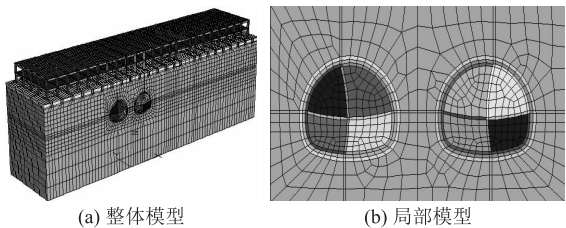


图 3 周围加固方案整体和局部计算模型图

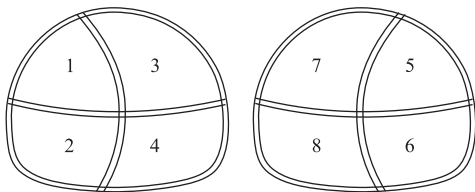


图 4 CRD 法施工左右隧道开挖顺序图

由图 2、图 3 可知,水平加固方案主要是对左右两个隧道进行一种门式框架类型的加固,整个加固区呈门型,加固区均由水平竖直区域相交而成。而对于周围加固区是根据隧道整体的形状进行一种整体的不规则的加固,其加固区随隧道形状和布置的变化而改变。

在模型计算加固时只需要将工况的参数修改为加固的参数进行计算,不加固时只需将相关的加固圈参数改为对应的地层参数即可。地层、初期支护及站房主体结构参数、管幕参数以及支撑桩参数如表 1 所示。

表 1 地层参数及其他物理力学指标

材料	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	弹性模量 $E$ /MPa	$\mu$	$C$ /KPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )
第一层	15.4	18	0.38	12	16
第二层	19.7	27	0.36	20	18
第三层	21.0	85	0.35	15	25
站房扩大基础	25.0	320 003	0.20	—	—
站房柱子	25.0	32 000	0.20	—	—
站房梁	25.0	30 000	0.20	—	—
站房楼板	24.0	22 000	0.20	—	—
站房底板	24.0	22 000	0.20	—	—
一般加固	20.0	56	0.28	25	20
管幕加固	21.0	550	0.25	—	—
水平加固支撑桩	25.0	30 000	0.20	—	—
初期支护	25.0	28 000	0.20	—	—

2.2 地表沉降分析

为更好的对比加固的效果,在一般加固的基础上进行  $\phi 600$  水平加固、 $\phi 600$  周围加固以及  $\phi 300$  周围加固 3 种加固方案,各加固方案下不同施工阶段中的地表沉降曲线如图 5~图 8 所示。

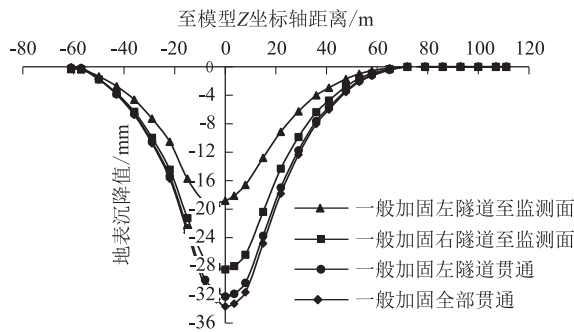


图 5 一般加固地表沉降曲线图

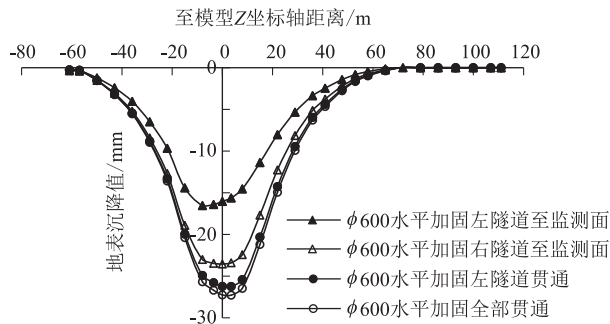


图 6  $\phi 600$  水平加固地表沉降曲线图

各加固方案地表沉降最大值对比表如表 2 所示。

表 2 各加固方案地表沉降最大值对比表

加固方案	地表沉降最大值/mm	差值百分比/%
一般加固	33.7	—
$\phi 600$ 水平加固	27.3	19.0
$\phi 600$ 周边加固	10.6	68.5
$\phi 300$ 周边加固	14.3	57.6

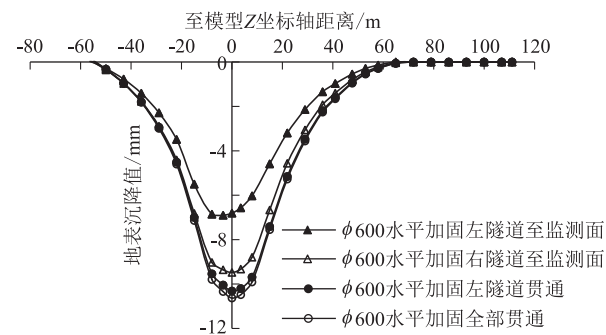


图 7 φ600 周边加固地表沉降曲线图

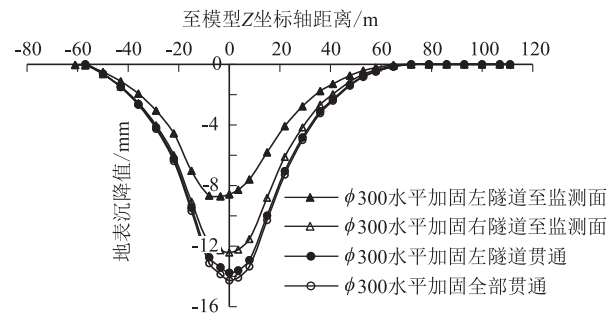


图 8 φ300 周边加固不同施工阶段地表沉降曲线图

由图 5 ~ 图 8 可知,各加固方案整体沉降规律一致,开挖过程中,一开始随着隧道左侧的开挖,地表沉降逐渐加大,但是随着右侧隧道的开挖,地表最大沉降逐渐靠向右侧,右侧隧道监测面处的沉降值明显大于左侧隧道。同时,地表的最大沉降产生在左右隧道中心线之间,这是因为这片区域内的土体在左侧隧道开挖时就受到很大影响,随着开挖的进行,右侧隧道的开挖对这片区域的土体影响依旧很大,左右两侧的开挖对其应力产生力的叠加效应,所以在隧道全部贯通后,地表沉降的最大值产生在此范围内。同时,无论是水平加固方案还是周围加固方案,相较于一般加固方案,其对于地表沉降都是有效的,只是不同加固方案,所造成的影响有差异。

结合表 2、对比图 6、图 7 可知,在 φ600 范围内加固,水平加固下地表最大沉降为 27.3 mm,相比于一般加固方案,差值为 19%;而相同范围内的周边加固方案,地表最大沉降为 10.6 mm,相较于一般加固方案,差值为 68.5%,可见周边加固方案明显优于水平加固方案。再根据表 2、对比图 7、图 8 可知,相同的周边加固方案下,采用 φ600 的加固方案由于其加固范围更加广,所以其对于地表沉降控制的效果要好于 φ300 的加固方案,但 φ300 加固方案下,地表最大沉降为 14.3 mm,相较于一般加固方案,差值百分比为 57.6%,加固效果同样显著。

综合以上分析,在隧道下穿车站站房的 CRD 法施工下,周边加固方案明显优于水平加固方案和一般加固方案,但从经济角度考虑,φ300 周边加固、φ600 周边加固均能满足施工需要,所以采用 φ300 周边加固方案更为合理。

2.3 水平收敛分析

上述方案下左右两隧道伴随开挖情况下的水平收敛变化曲线如图 9、图 10 所示。

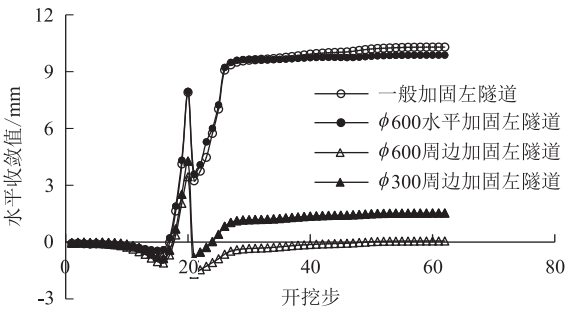


图 9 左侧隧道水平收敛值图

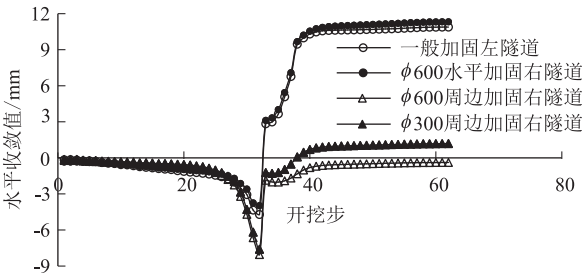


图 10 右侧隧道水平收敛值图

各个加固方案左、右隧道水平收敛值如表 3 所示。

表 3 各加固方案左右隧道水平收敛值对比表

加固方案	左隧道水平收敛值/mm	差值百分比/%	右隧道水平收敛值/mm	差值百分比/%
一般加固	10.3	—	10.9	—
φ600 水平加固	9.9	3.9	11.3	-3.7
φ600 周边加固	0.1	99.0	-0.4	103.7
φ300 周边加固	1.5	85.4	1.2	89.0

由图 9、图 10 及表 3 可知:无论是周边 φ600 范围内的加固还是 φ300 范围的加固,其控制横向收敛变形的效果都是明显的,而水平加固方案几乎没有起到作用,甚至在右隧道,水平加固后隧道的水平收敛值还要大于一般加固情况,因此水平加固不可取。而周边加固方案,无论是 φ600 还是 φ300 范围其效果都很显著,考虑到经济因素,选择 φ300 周边加固方案。

3 结论

(1)在隧道下穿车站站房的施工中,实际上是隧



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)