

文章编号: 1674—8247(2019)06—0045—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.009

季冻区既有隧道保温钢波纹板套衬保温效果分析

李俊儒¹ 王李斌¹ 王雪来¹ 侯占鳌² 崔光耀¹

(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:为进一步提高季冻区隧道保温层的保温性能,解决季冻区既有隧道冻害处治问题,本文依托吉图珲客运专线榆树川隧道,利用有限元软件 FLUENT,对隧道保温钢波纹板套衬保温性能进行数值模拟,对铺设保温钢波纹板套衬前后隧道横向、纵向温度场进行对比分析。结果表明:(1)在环境温度分别为 -8°C 、 -13°C 、 -18°C 的条件下,当隧道未铺设保温钢波纹板套衬时,所有监测点均为负温,同时衬砌及围岩温度沿隧道纵向变化不大;(2)隧道局部铺设保温钢波纹板套衬后,监测断面围岩温度提高至正温,且距监测断面左右各 7.5 m 范围二衬内表面均为正温(正温范围为 15 m,保温钢波纹板套衬铺设范围为 12 m),温度影响范围约为 50 m。采用保温钢波纹板套衬进行冻害整治是有效的,可将其应用于季冻区运营隧道严重冻害段的冻害处治工程中,可为类似工程提供参考。

关键词:季冻区;隧道;防冻胀;钢波纹板套衬;温度场

中图分类号:U456.3+3 文献标志码:A

45

Analysis of Thermal Insulation Effect of Corrugated Steel Plate Liner in Existing Tunnels in Seasonal Frozen Area

LI Junru¹ WANG Libin¹ WANG Xuelai¹ HOU Zhan'ao² CUI Guangyao¹

(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: In order to further improve the thermal insulation performance of the tunnel insulation layer and solve the frost damage problem of the existing tunnel in the seasonal frozen area, this paper uses the finite element software FLUENT to simulate the thermal insulation performance of the corrugated steel plate liner for existing tunnel in the severe cold area based on the Yushuchuan tunnel of Jilin-Antu-Hunchun passenger dedicated line, and makes a comparative analysis on the transverse and longitudinal temperature fields of the tunnel before and after the construction of the corrugated steel plate liner. The results show that: (1) when the ambient temperature is -8°C , -13°C and -18°C respectively and the tunnel is not equipped with corrugated steel plate liner, all the monitoring points are negative temperature, and the temperature of lining and surrounding rock along the longitudinal direction of the tunnel has little change; (2) after the corrugated steel plate liner is installed in the local part of the tunnel, the surrounding rock temperature of the monitoring section is increased to the positive temperature, and the inner surface of the secondary lining within 7.5 m from the left and right of the monitoring section is the positive temperature (the positive temperature range is 15 m, the construction

收稿日期:2019-10-20

作者简介:李俊儒(1998-),男,在读硕士研究生。

基金项目:国家自然科学基金项目(51408008);中铁隧道局集团科技创新计划项目(隧研合 2018-11);北京市大学生科学研究与创业行动计划项目(216051360019XN030);北方工业大学大学生科技活动项目(110051360019XN140/002)

引文格式:李俊儒,王李斌,王雪来,等. 季冻区既有隧道保温钢波纹板套衬保温效果分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(6):45-48.

LI Junru, WANG Libin, WANG Xuelai, et al. Analysis of Thermal Insulation Effect of Corrugated Steel Plate Liner in Existing Tunnels in Seasonal Frozen Area [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 45-48.

range of the corrugated steel plate liner is 12m), and the temperature influence range is about 50m. It is effective to use the corrugated steel plate liner for the treatment of freezing damage, which can be applied to the treatment of severe frost damage section of operation tunnel in the seasonal frozen area, and can provide reference for similar projects.

Key words: seasonal frozen area; tunnel; anti-frost heave; corrugated steel plate liner; temperature field

我国季冻区面积占总领土面积的 53.5%, 主要分布在东北、西部纬度、海拔较高的地区^[1-3]。随着隧道工程的飞速发展, 不可避免会穿越季冻区, 对隧道耐久性提出了考验。若寒区隧道不采取防冻胀措施, 会出现如隧道衬砌挂冰、侵限、掉块, 基底溢水、积水等冻害, 严重影响隧道的使用和运营^[4-7]。目前国内外已经建成和在建的穿越季冻区典型的隧道主要有: 青藏高原腹地的风火山隧道(海拔 4 905 m, 长 1 338 m)、张呼铁路的甲坝子隧道(位于高纬度地区、长 3 186 m)、京沈高速铁路的辽西隧道(位于高纬度地区、长 13 205 m)等^[8]。如何保证季冻区隧道施工时结构的安全性和耐久性是当前亟待解决的核心技术问题。因此, 对寒区隧道防冻胀措施的研究尤为重要。

防冻胀技术是严寒地区隧道修建的核心技术之一。目前, 常用的防冻胀主动保温措施和被动保温措施两类。主动保温措施有电伴热法、地源热泵法等, 主要适用于多年冻土区、冻结深度较大的季冻区^[9-10]。但主动保温措施初期建设成本普遍较高, 建设过程也较为复杂, 且耗能巨大, 后期需面对大量的运营投资问题和污染问题。被动保温措施即保温隔热, 是一种被动预防隧道冻害发生的方法, 最主要的方法是铺设保温层^[11]。既有隧道主要采用增设保温模注套衬进行冻害处治。但保温模注套衬费时耗工、厚度较大且存在混凝土剥落、掉块风险, 不适合季冻区运营铁路隧道的冻害处治。受传统措施的局限性, 在极寒地区无法实现良好的隧道防冻效果。基于此, 本文提出一种保温钢波纹板保温套衬, 具有施工速度快、保温效果好、防剥落掉块、拆换方便等优点。并依托榆树川隧道, 运用 FLUENT 数值模拟技术, 对铺设保温钢波纹板套衬前后隧道衬砌、围岩的温度场进行模拟, 得出铺设保温钢波纹板套衬前后, 隧道温度场分布规律的变化情况, 以此验证保温钢波纹板保温套衬的效果。

1 保温钢波纹板套衬

保温钢波纹板套衬主要由波纹钢板和聚氨酯泡沫组成, 其构造示意如图 1 所示。钢波纹板与平面钢板相比, 具有面外刚度大、面外屈服强度高的特点, 同时可防止洞内环境水分进入保温材料致使保温层受潮。钢波纹板采用波高 110 mm, 波长 300 mm, 板厚 6 mm

的冷轧镀锌钢波纹板, 材质 Q345, 表面热浸锌厚度不小于 84 μm 。采用法兰对接型波纹板安装工艺(即板块四周焊接竖向法兰盘, 法兰孔位对接后, 通过 M24 高强螺栓连接), 单块板尺寸为纵向长 0.954 m, 环向长 1.95 ~ 3.14 m, 单片重量 164 ~ 266 kg。

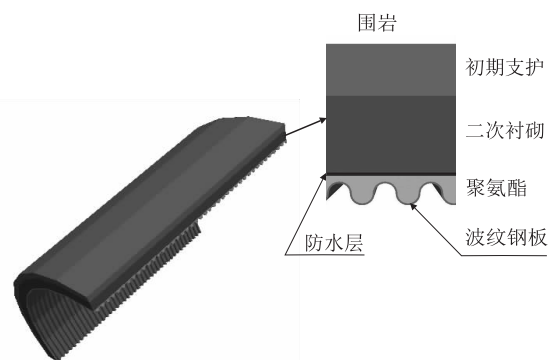


图 1 保温钢波纹板套衬构造示意图

钢波纹板与衬砌混凝土之间保温层采用硬质聚氨酯保温板, 现场自发泡工艺, 厚 50 ~ 160 mm, 抗压强度不小于 180 kPa, 导热系数不大于 0.024 W/(m · K), 吸水率不大于 3%。硬质聚氨酯具有碳化防火、阻燃、耐高温、导热系数小且不易吸水的特点, 燃烧等级为 B1, 高温下不产生有害气体。

2 隧道保温钢波纹板套衬段温度场模拟

2.1 隧道概况

榆树川隧道位于布尔哈通河低山丘陵区, 地形起伏较大, 相对高差约 132 m, 植被发育。隧道进口里程 K 351 + 624, 出口里程 K 353 + 835, 全长 2 211 m, 最大埋深约 158 m, 设计速度 250 km/h, 内轨顶面以上净空面积为 92 m², 线间距 4.6 m。

隧道所处地区年平均气温 4.6 $^{\circ}\text{C}$, 1 月平均气温 -15.2 $^{\circ}\text{C}$, 极端最高气温 36.5 $^{\circ}\text{C}$, 极端最低气温 -37.1 $^{\circ}\text{C}$, 土壤最大冻结深度 192 cm。

2.2 计算模型

取隧道里程 K 352 + 700 ~ K 352 + 900 段建立计算模型, 模拟铺设保温钢波纹板套衬前后隧道横向、纵向温度场的变化。计算模型采用 K-epsilon 湍流模型, 共计 1 052 405 块实体单元, 两侧宽约 50 m (3 ~ 5 倍洞

径),长约200 m,其中保温钢波纹板套衬设施段长12 m(设施前将该段长度定义为流体)。计算模型分为5个区域,即1个流体域与4个固体域。流体域与固体域之间依据对流换热原理,固体域之间依据热传导原理,不考虑辐射传热。围岩、衬砌初始温度设置为12℃。根据现场洞内温度实测数据,将环境温度分别设置为-8℃、-13℃、-18℃。进口速度取自然风速0.5 m/s。

2.3 材料计算参数

隧道内设施保温钢波纹板套衬后,各材料热学参数如表1所示。

表1 材料热学参数			
材料	密度 ρ /(kg/m^3)	热传导系数 λ /($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$)	定压比热 C_p /($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{k})$)
空气	1.225	0.026	1 006
围岩	2 300	1.5	840
衬砌	2 500	1.8	1 390
聚氨酯	50	0.024	2 500
波纹钢板	7 800	50	450

2.4 现场监测

取保温钢波纹板套衬设施段的中间断面(K 352+783)作为监测断面,对比分析设施保温套衬前后隧道横向温度场随时间的变化规律。沿隧道右边墙径向分别设置边墙外沿、二衬内表面、二衬内部、二衬外表面、初支内表面和围岩温度(距离初支70 cm、140 cm、210 cm 分别设置3个测点)共8个测点,如图2所示。

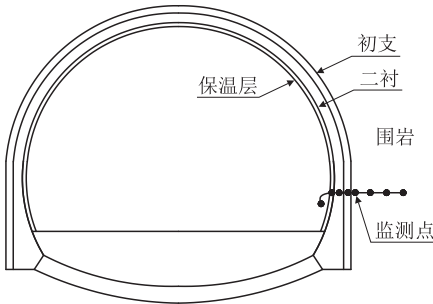


图2 边墙沿围岩方向测点布置示意图

同时,以隧道中心线为起始,沿隧道纵向设置监测面,对比分析设施保温套衬前后隧道纵向温度场随时间变化的演化规律。

2.5 隧道横向温度场计算结果及分析

(1) 计算结果及分析

分别提取3种不同环境温度下监测断面温度场云图,如图3、图4所示。对比分析设施保温钢波纹板套

衬前后隧道横向温度场分布规律,3种环境温度下设施保温套衬前后的各测点温度如表2所示。

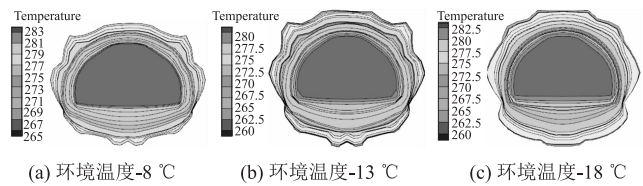


图3 设施保温套衬前隧道横向温度场分布云图

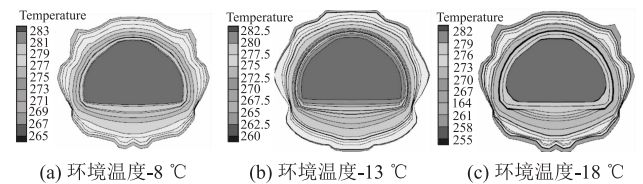


图4 设施保温套衬后隧道横向温度场分布云图

表2 设施保温套衬前后各监测点温度

测点位置	环境温度 -8℃		环境温度 -13℃		环境温度 -18℃	
	设施前 /℃	设施后 /℃	设施前 /℃	设施后 /℃	设施前 /℃	设施后 /℃
边墙外沿	-7.5	-7.3	-11.9	-12.1	-16.8	-17.0
二衬外表面	-5.7	-2.2	-10.3	-4.1	-12.5	-5.2
二衬内部	-3.8	2.3	-7.5	3.0	-9.2	0.5
二衬内表面	-3.3	4.5	-6.1	3.7	-6.1	1.3
初支内表面	-1.7	5.3	-3.0	4.9	-2.8	2.2
距初支70 cm	1.9	6.4	1.2	5.7	-0.5	3.5
距初支140 cm	2.7	6.9	2.7	6.2	2.3	4.1
距初支210 cm	4.8	7.6	4.6	6.7	3.7	4.9

由图3、图4及表2可知,设施保温钢波纹板套衬后,初支和二衬各测点温度均有明显提升。在环境温度-13℃的情况下,未设施保温钢波纹板套衬时,监测断面的二衬内表面温度为-6.1℃;设施保温钢波纹板套衬后,二衬内表面温度为3.7℃,相对于设施前提升了9.8℃。由此可见保温钢波纹板套衬的保温效果显著。

(2) 模拟结果与现场实测温度对比

以隧道环境温度-13℃的情况为例,分别提取K 352+783断面设施保温钢波纹板套衬后,现场测试及数值模拟沿围岩方向的温度数据,并对分析其变化规律,如图5所示。

由图5可知,隧道环境温度-13℃时,各测点的温度模拟值与实测值大致相同,说明模拟结果与现场温度实测结果基本吻合,数值模拟的结果可靠。

2.6 隧道纵向温度场计算结果及分析

以环境温度-8℃的情况为例,对比分析设施保温钢波纹板套衬前后隧道纵向温度场分布规律,并提

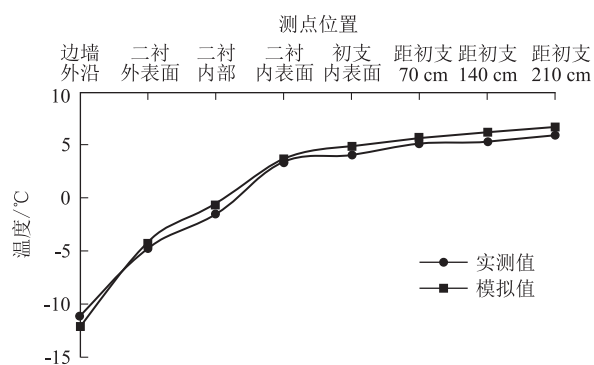


图5 环境温度 -13°C 时各测点温度实测值与模拟值对比分析

取铺设保温套衬前后隧道二衬内表面温度监测数据,分析其保温效果,如图6所示。

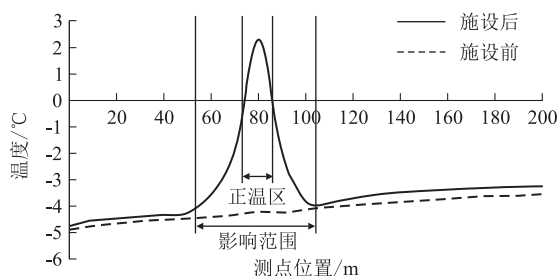


图6 铺设保温套衬前后隧道二衬内表面温度变化趋势

由图6可知,铺设保温钢波纹板套衬前,衬砌及围岩温度沿隧道纵向变化不大,二衬内表面温度均为负温。局部铺设保温钢波纹板套衬后,距监测断面左右各7.5 m范围二衬内表面均为正温(正温范围为15 m,保温钢波纹板套衬铺设范围为12 m),温度影响范围约为50 m。由此可见,保温钢波纹板套衬保温效果显著,采用保温钢波纹板套衬进行隧道冻害防治有效明显。

3 结论

本文依托榆树川隧道,运用FLUENT数值模拟软件,对铺设保温钢波纹板套衬前后隧道衬砌、围岩的温度场进行模拟,对比分析铺设保温钢波纹板套衬前后隧道温度场分布规律,研究结果如下:

(1)由隧道横向温度场模拟结果可知,在环境温度为 -8°C 、 -13°C 、 -18°C 的条件下,当隧道未铺设保温钢波纹板套衬时,所有监测点均为负温,隧道局部铺设保温钢波纹板套衬后,监测断面围岩温度提高至正温,即保温钢波纹板套衬保温效果显著。将模拟结果与现场温度实测进行对比后可见,本文模拟结果与现场温度实测结果基本吻合,即数值模拟的结果是可

靠的。

(2)由隧道纵向温度场模拟结果可知,在环境温度为 -8°C 、 -13°C 、 -18°C 的条件下,铺设保温钢波纹板套衬前,衬砌及围岩温度沿隧道纵向变化不大,二衬内表面温度均为负温。局部铺设保温钢波纹板套衬后,距监测断面左右各7.5 m范围二衬内表面均为正温(正温范围为15 m,保温钢波纹板套衬铺设范围为12 m),温度影响范围约为50 m,保温效果显著。

综合横向、纵向温度场模拟结果可见,保温钢波纹板套衬的保温效果良好。即采用保温钢波纹板套衬进行冻害整治是有效的,可将其应用于季冻区运营隧道严重冻害段的冻害处治工程中,对类似工程具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
ZHOU Youwu. Permafrost in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 赖远明, 张明义, 李双洋. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LAI Yuanming, ZHANG Mingyi, LI Shuangyang. Theory and application of Cold Regions Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 李万宝. 鸡鸣驿隧道冻害机理及处治措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LI Wanbao. Study on the Mechanism of Freezing Damage and Treatment Measures of Jimingyi Tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [4] 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 Heaving Mechanical Behavior of Tunnel Lining[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [5] 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.
- [6] 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 the Surrounding Rock Stress and Anti-freezing Measures of Cold Zone Tunnel Based on Temperature Change[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [7] 关宝树. 我对隧道冻害的基本认识[J]. 铁道标准设计, 2012, 56(S1): 1-8.
GUAN Baoshu. My Basic Understanding of Tunnel Frost Damage[J]. Railway Standard Design, 2012, 56(S1): 1-8.

(下转第81页)

Method of Tunnel Water Inrush in Complex Karst Areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1469 – 1476.

[4] 郭玉法, 鲍庆煜. 岩溶隧道涌水量的预测方法研究[J]. 铁道勘察, 2007, 33(5): 73 – 75.

GUO Yufa, BAO Qingyu. Research on Forecasting Methods for Gushing Water Volume in Karst Tunnels[J]. Railway Investigation and Surveying, 2007, 33(5): 73 – 75.

[5] 李苍松, 何发亮, 陈成宗. 渝怀线武隆隧道岩溶涌水量计算新方法[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5): 41 – 46.

LI Cangsong, HE Faliang, CHEN Chengzong. New Calculation Method of Water Inflow Quantity in Wulong Tunnel on Chongqing-Huaihua Railway [J]. China Railway Science, 2005, 26(5): 41 – 46.

[6] 张学文. 富水饱和砂土隧道施工降水技术探讨[J]. 科技创新与生产力, 2012, 33(4): 92 – 95.

ZHANG Xuewen. Discussion on Technology of Precipitation of Tunnel Construction of Sandstone of Saturation and Water-rich[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2012, 33(4): 92 – 95.

[7] 李志军, 王光伟, 王建军. 真空轻型井点降水技术在富水粉细砂岩隧道施工中的应用[J]. 施工技术, 2014, 43(S1): 410 – 413.

LI Zhijun, WANG Guangwei, WANG Jianjun. The Application of Light Well Point Dewatering Technology with Vacuum in Tunnel Construction with Water-rich Fine Sandstone [J]. Construction Technology, 2014, 43(S1): 410 – 413.

[8] 田仁东. 浅埋软岩铁路隧道富水段综合施工技术[J]. 国防交通工程与技术, 2015, 13(S1): 127 – 128.

TIAN Rendong. Comprehensive Construction Technology for Water-rich Section of Shallow Buried Soft Rock Railway Tunnel [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2015, 13(S1): 127 – 128.

[9] 刘德强, 宋战平, 姜忻良. 岩溶隧道帷幕注浆止水技术及施工: 以宜(昌)万(州)铁路金子山隧道为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(3): 38 – 42.

LIU Deqiang, SONG Zhanping, JIANG Xinliang. Technology and Construction of Water Stopping of Curtain Grouthing in Karst Tunnel: Taking Jinzishan Tunnel of Yichang-Wanzhou Railway for Example [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, 5(3): 38 – 42.

[10] 赵继增. 青岛胶州湾海底隧道涌水断层全断面帷幕注浆技术研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(6): 116 – 120.

ZHAO Jizeng. Study of Full-face Curtain Grouting on Water-burst Fault F4-4 Subsea Tunnel in Qingdao Jiaozhou Bay [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(6): 116 – 120.

(编辑: 苏玲梅 张红英)

(上接第48页)

[8] 马海龙. 季节性寒区隧道温度场分布规律与防寒保温技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.

MA Hailong. Study on the Distribution Law of Temperature Field and Thermal Insulation Technology on Tunnel in the Seasonal Cold Regions[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.

[9] 邱军领, 赖金星, 张广龙, 等. 季节性寒区隧道主动加热保温防冻方法及其试验[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 982 – 987.

QIU Junling, LAI Jinxing, ZHANG Guanglong, et al. A Case Study on Antifreeze of Tunnel in Seasonal Cold – region Using the Electric Heat Tracing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 982 – 987.

[10] 王亚琼, 杨明, 王志丰. 寒区隧道局部渗漏水冻害处治的产热集水装置及应用[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 204 – 209.

WANG Yaqiong, YANG Ming, WANG Zhifeng. Water – captation and Heating Equipment for Treating Frost Damage Caused by Local Water Leakage in Cold – region Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 204 – 209.

[11] 袁金秀, 王道远, 马海龙. 季节性冻土区隧道保温层御寒保温技术研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(8): 100 – 105.

YUAN Jinxiu, WANG Daoyuan, MA Hailong. Study on Thermal Insulation Technology of Insulation Layer of Tunnels in Seasonal Frozen Soil Area [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(8): 100 – 105.

(编辑: 刘会娟 张红英)