

文章编号: 1674—8247(2021)04—0039—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.008

玄武岩纤维在铁路轨道工程中的应用与发展趋势

徐 浩 曾永平 蔡文锋 杨吉忠
(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:玄武岩纤维是一种新型的无机环保绿色的高性能纤维材料,具有高强度、耐腐蚀、电绝缘性能好等显著优点,可应用于土建工程中。随着我国铁路的快速发展及其对节能、绿色、环保的要求,玄武岩纤维将广泛应用于铁路轨道工程中。本文总结了玄武岩纤维在轨道工程中的应用现状,指出了玄武岩纤维及其混制品在基础理论、应用和标准体系方面存在的不足,在此基础上提出了玄武岩纤维及其混制品应用于铁路轨道工程的发展趋势。
关键词:玄武岩纤维; 轨道工程; 应用现状; 发展趋势
中图分类号:U213.2 **文献标志码:**A

Application and Development Trend of Basalt Fiber in
Railway Track Engineering

XU Hao ZENG Yongping CAI Wenfeng YANG Jizhong
(China Railway Eryuan Engineering Group Co.,Ltd.,Chengdu 610031, China)

Abstract: Basalt fiber, as a new type of inorganic, environmental-friendly, and high-performance fiber material, can be used in civil engineering due to its obvious advantages such as high strength, corrosion resistance, and sound electrical insulation. With the rapid development of China’s railway and its requirements for energy saving, green and environmental protection, basalt fiber will be widely used in railway track engineering. With a summary of the application status of basalt fiber in track engineering, this paper proposes the development trend of the application of basalt fiber and its mixed products in railway track engineering on the basis of the insights into the shortcomings of basalt fiber and its mixed products in terms of basic theory, application, and standard system.
Key words: basalt fiber; track engineering; application status; development trend

1 玄武岩纤维的应用情况

玄武岩是一种基性喷出岩,体积密度为 2.8 ~ 3.3 g/cm³,抗压强度可达 300 MPa。玄武岩的化学组成一般为 SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO、Fe₂O₃、FeO、TiO₂、K₂O、Na₂O 等及少量杂质,其中 SiO₂ 的含量最高,一般含量在 45% ~ 52% 之间。以格鲁吉亚玄武岩为例,其

化学组成如表 1 所示。

表 1 格鲁吉亚玄武岩化学组成表

| 成分 | 质量分数/% | 成分 | 质量分数/% |
|--------------------------------|--------|-------------------|--------|
| SiO ₂ | 51.65 | MgO | 6.1 |
| Al ₂ O ₃ | 15.85 | Na ₂ O | 3.58 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.26 | K ₂ O | 1.68 |
| FeO | 6.52 | TiO ₂ | 1.19 |
| CaO | 9.35 | 烧失量 | 0.65 |

收稿日期:2020-06-15
作者简介:徐浩(1989-),男,高级工程师。
基金项目:中国科协青年人才托举工程(2019QNRC001);中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究计划(KYY2017055(17-20))
引文格式:徐浩,曾永平,蔡文锋,等.玄武岩纤维在铁路轨道工程中的应用与发展趋势[J].高速铁路技术,2021,12(4):39-42.
XU Hao, ZENG Yongping, CAI Wenfeng, et al. Application and Development Trend of Basalt Fiber in Railway Track Engineering[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4):39-42.

玄武岩纤维是以天然玄武岩为原材料,经过高温熔融后拉制而成的纤维^[1-2],其物理、力学性能如表2所示。作为一种新型的纤维材料,玄武岩纤维具有绿色环保、力学性能优良、复合能力强、化学稳定性好、电绝缘性能强、声绝缘性好等显著优点,可广泛应用于国防军工、航天航空、土建工程、海洋工程等领域^[3-6]。

表2 玄武岩纤维物理、力学性能表

| 性能 | 数值 | 性能 | 数值 |
|-------------------------|-------------|---------------|--------------------|
| 密度/(g/cm ³) | 2.6~2.8 | 断后伸长率/% | 3.1 |
| 抗拉强度/MPa | 3 000~4 840 | 热传导系数/(W/m·k) | 0.031~0.038 |
| 弹性模量/GPa | 93~110 | 比体积电阻/(ohm·M) | 1×10 ¹² |
| 使用温度/℃ | -260~650 | 吸音系数/% | 0.9~0.99 |

目前,应用于交通土建的玄武岩纤维产品主要有玄武岩纤维混凝土、玄武岩纤维复合筋、玄武岩纤维织物/复合材等。玄武岩纤维混凝土是在普通混凝土中掺加短切玄武岩纤维而成,具有良好的耐酸、耐碱和耐水性,吸水率仅为0.2%~0.3%,同时具有很强的抗冲击性能和良好的动态能量耗散性能。玄武岩纤维混凝土的合理掺量范围较低,同时与水泥基材料的粘结性能有待提高。以C60混凝土为例,玄武岩纤维混凝土与素混凝土的性能对比如图1所示,可见玄武岩纤维混凝土的强度随玄武岩纤维掺量的增大先增大后减小,因此玄武岩纤维混凝土存在一个合理的纤维掺量范围^[7]。

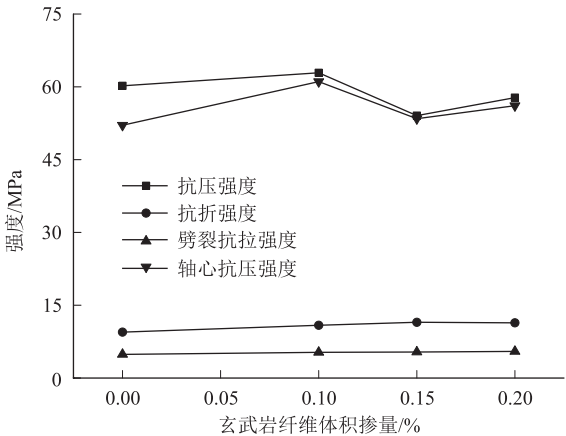


图1 玄武岩纤维力学性能试验结果图

玄武岩纤维复合筋是将玄武岩连续纤维通过拉挤成型的一种新型复合材料,与普通钢筋相比,具有高强度、高绝缘性、轻质量、耐腐蚀等优势,玄武岩纤维复合筋的强度约为普通钢筋的2倍,弹性模量为40 GPa,密度约为普通钢筋的1/4,玄武岩纤维复合筋与普通钢筋的对比如表3所示。由于高分子材料本身特性的影响,玄武岩纤维复合筋与水泥基材料的粘结度没有普通钢筋好。玄武岩纤维布具有很大的抗拉强度,可

粘结在混凝土表面用于结构补强及加固。

表3 玄武岩纤维复合筋与普通钢筋的性能对比表

| 名称 | 玄武岩纤维复合筋 | 钢筋 |
|-----------------------------|---------------------|---------|
| 密度/(g/cm ³) | 1.9~2.1 | 7.8~7.9 |
| 抗拉强度/MPa | ≥700 | ≥500 |
| 屈服强度/MPa | ≥600 | ≥300 |
| 抗压强度/MPa | ≥500 | - |
| 抗拉弹性模量/GPa | ≥40 | 210 |
| 伸长率/% | ≥1.8 | ≥1.8 |
| 热膨胀系数/(10 ⁻⁶ /℃) | 纵向 | 9~12 |
| | 横向 | 21~22 |
| 耐碱性/% | ≥75 | 差 |
| 磁化率 | ≤5×10 ⁻⁷ | 较高 |

由于玄武岩纤维及其复合材料具有高强、高耐久性、温度适应范围广等显著特点,在道路工程、隧道工程、建筑工程、岩土工程和市政工程等交通土建工程中已有应用实例,如河北张石高速公路行唐县西阳庄大桥的南北两端,采用玄武岩纤维复合筋增强路面,开发了连续配筋施工技术,实现了真正的无焊接接点,减少水泥路面板块的收缩裂缝,同时也解决了北方冬雪天气时,高速路面除冰盐对钢筋的腐蚀问题,提高了高速公路路面的质量和耐久性。2007年,兰州地震局采用玄武岩纤维复合筋取代钢筋用于天水地震台建设工程,解决了地震台建筑材料无磁性的要求。2016年成都绿地中心基坑边坡采用了玄武岩纤维增强筋,可解决传统钢筋锚杆易腐蚀的问题。玄武岩纤维混凝土的耐候性强于普通混凝土,天津市利用玄武岩纤维混凝土管道对污水处理系统输水管道进行了优化。

鉴于玄武岩纤维产品的优点及其在交通土建工程中的应用现状,考虑铁路轨道结构及相关部件都是水泥基材料,因此玄武岩纤维在铁路轨道工程的应用值得研究。

2 玄武岩纤维在铁路轨道中的应用现状

铁路轨道主要是由钢筋混凝土材料组成的复合结构物,承受反复的列车荷载、环境荷载和腐蚀环境作用等耦合荷载,对铁路轨道结构的强度、抗冲击、抗裂、耐腐蚀等都提出了较高的要求。玄武岩纤维的优点正好与铁路轨道工程结构的上述要求契合,因此相关研究人员开始研究玄武岩纤维在铁路轨道中的应用。

玄武岩纤维在铁路轨道工程中的应用目前正处于起步阶段,在铁路轨道的轨枕和轨道板上进行了应用初探。胡显奇^[8]等研究了玄武岩纤维用于铁路轨枕和轨道板的可能性,测试了掺玄武岩纤维后混凝土构

件的力学性能、工作性和耐久性,并试制了两块玄武岩纤维混凝土轨道板应用于武广客运专线试验段,目前应用效果良好,结果表明:以普通硅酸盐水泥替代超细水泥的混凝土配合比可以达到无砟轨道结构混凝土早期强度的要求,掺加玄武岩纤维掺合料可进一步提高其抗折强度及强韧性,同时不破坏轨道绝缘性能。杨堃^[9]也对玄武岩纤维轨枕的性能、制造等进行了阐述,认为玄武岩纤维轨枕具有更好的耐久性、绝缘性和弹性。黄欣^[10]等针对 CRTS II 型板式无砟轨道轨道板,设计了玄武岩纤维复合筋轨道板,并测试了玄武岩纤维复合筋与混凝土的粘结能力和抗弯性能。杨洋^[11-16]等针对无砟轨道轨道板的绝缘性能要求,提出了采用玄武岩纤维复合筋替代普通钢筋,并测试了玄武岩纤维复合筋轨道板的绝缘性能、力学性能和疲劳性能,认为玄武岩纤维复合筋轨道板能满足轨道电路和力学性能要求。冯照平^[17]等对玄武岩纤维复合筋无砟轨道板进行了数值仿真和试验验证研究,认为玄武岩纤维复合筋轨道板具有较好的延性和承载能力。陈鲤波^[18]则研究了玄武岩纤维布和纤维复合筋在高速铁路人行道盖板中的应用,并测试了含玄武岩纤维布和纤维筋人行道的强度。

近年来,随着玄武岩纤维产业的快速发展,针对玄武岩纤维材料本身出台了一些标准,然而玄武岩纤维在铁路中的应用目前尚无专门的技术标准,仅在 TB 1042-2010《铁路混凝土工程施工质量验收标准》中规定应对纤维的杂质含量、长度、直径、长径比、抗拉强度、弹性模量等指标进行检测。

3 玄武岩纤维在铁路轨道中的应用前景及存在问题

铁路轨道不仅直接承受列车动荷载,还承受温度、雨水、紫外线等环境荷载,为保证信号的传输,铁路轨道还需具有绝缘性能。然而,铁路轨道在服役过程中出现了诸如混凝土开裂、绝缘性能降低等病害,为此国内外研究人员一直在探寻解决上述问题的措施。根据我国中长期铁路网规划,到 2025 年,铁路网规模将达到 17.5 万 km,其中高速铁路里程将达到 3.8 万 km,因此玄武岩纤维及其制品的优异性能,在铁路轨道的混凝土及复合材料制品中具有广阔的应用前景。

玄武岩纤维混凝土具有高强度,良好的抗冲击性能、动态能量耗散性能,同时还可以减小温度荷载产生的裂缝宽度,有利于提高无砟轨道构件耐久性,增强轨道结构整体刚度,可利用玄武岩纤维混凝土制造混凝土轨枕或合成轨枕、轨道板、道床板和底座板。玄武岩

纤维还具有耐高温、耐腐蚀、耐生物侵蚀等性能,玄武岩纤维布可用于无砟轨道的养护维修及加固,降低环境对无砟轨道材料的影响,延长无砟轨道的服役寿命。

玄武岩纤维具有良好的电绝缘性能,采用玄武岩复合钢筋代替轨道板和道床板内的钢筋,可提高轨道的电气绝缘性能^[19]。为了提高扣件系统的耐久性和电绝缘性能,采用加玄武岩纤维的聚酰胺材料可提高轨距挡板的绝缘性能,因此可利用玄武岩纤维掺加其他复合材料生产扣件系统零部件,从而提高扣件系统的耐久性和绝缘性能。

尽管玄武岩纤维在铁路轨道工程中具有良好的应用前景,但仍存在如下问题:

(1) 基础研究严重缺乏

无论是玄武岩纤维混凝土,还是玄武岩纤维复合制品,要应用于铁路轨道工程均需开展相关材料与构件的基础研究工作。尽管目前各高校和企业针对玄武岩纤维混凝土和玄武岩纤维复合筋开展了一些基础研究,但不够全面,应在研究玄武岩纤维材料、玄武岩纤维混凝土和玄武岩纤维复合制品的基本性能和耐久性的基础上,开展玄武岩纤维改性及复合材料优化研究并开展构件的基本力学性能和耐久性研究,奠定玄武岩纤维及其混制品的理论基础,建立理论体系。

(2) 玄武岩纤维在铁路轨道中的应用研究处于起步阶段

铁路轨道工程作为支撑列车安全运行的基础,服役环境复杂多变,在开展玄武岩纤维在铁路轨道工程中的应用研究时,应充分考虑铁路轨道工程的受力特点和服役环境,如列车重复荷载、温度、环境侵蚀等耦合荷载作用及无砟轨道板的电气绝缘性,从微观、细观和宏观不同维度,对玄武岩纤维及其复合材料力学性能(移动、冲击、疲劳荷载作用等)、耐久性能(高温、低温、水损坏、冻融等)等基本性质开展系统深入研究,建立适用于铁路轨道工程的设计理论和方法。

(3) 尚无针对铁路轨道工程的玄武岩纤维标准体系

目前现有的玄武岩纤维标准仅针对材料本身,且严重缺失。在铁路轨道工程中使用玄武岩纤维材料及相关产品,必须建立相关行业的设计、施工、检测验收及运营标准,目前此部分标准尚属空白。

4 结论

玄武岩纤维及其混制品具有高强度、耐腐蚀等优异性能,目前在国防军工、航天航空、土木建筑工程等领域应用,但在铁路轨道工程中的应用还处于起步阶

段。本文总结了玄武岩纤维及其混制品在铁路轨道工程的应用现状及存在的不足,为满足玄武岩纤维及其混制品在铁路轨道工程中的应用,应从以下几个方面开展研究:

(1) 加强玄武岩纤维及其混制品的基础理论研究

玄武岩纤维及其混制品已在铁路轨道工程中有了应用初探,但基础理论研究严重滞后。为科学应用玄武岩纤维及其混制品,应加强玄武岩纤维及其混制品在不同荷载、环境下的基本力学性能研究,完善玄武岩纤维及其混制品理论体系。

(2) 加强应用研究

结合铁道轨道工程的受力特点和服役环境,开展玄武岩纤维及其混制品的力学性能、结构设计理论和设计方法研究,并进行试验验证,确保玄武岩纤维及其制品满足铁路轨道工程的应用要求。

(3) 加快标准体系建立

产品的应用必须有相关标准作为指导,因此应结合铁路轨道工程的特点,尽快建立适用于铁路轨道工程的玄武岩纤维及其混制品标准体系,从而指导玄武岩纤维及其制品的应用。

参考文献:

- [1] 吴刚, 吴智深, 胡显奇, 等. 玄武岩纤维在土木工程中的应用研究现状及进展[C]//第五届全国 FRP 学术交流会论文集. 中国土木工程学会 FRP 及工程应用专业委员会:中国土木工程学会, 2007: 6.
WU Gang, WU Zhishen, HU Xianqi, et al. Current Research and Development of the Application of Basalt Fiber in Civil Engineering [C]// Collection of Essays of the Fifth National FRP Academic Exchange Conference. Professional Committee for FRP and Engineering Application, China Civil Engineering Society: China Civil Engineering Society, 2007: 6.
- [2] 吴智深, 吴刚, 汪昕, 等. 玄武岩纤维在土建交通基础设施领域研究与应用若干新进展[J]. 工业建筑, 2009(S): 1-14.
WU Zhishen, WU Gang, WANG Xin, et al. New Progress in R & D of Basalt Fibers and BFRP in Infrastructure Engineering [J]. Industrial Construction, 2009(S): 1-14.
- [3] 顾兴宇, 陆佳颖, 王文达. 玄武岩纤维筋与钢筋在路面应用中的分析比较[J]. 公路, 2009, 54(12): 54-57.
GU Xingyu, LU Jiaying, WANG Wenda. Analysis and Comparison in Application of Basalt Fibre Reinforcement and Steel Reinforcement to Pavement[J]. Highway, 2009, 54(12): 54-57.
- [4] 胡显奇, 申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 7-13.
HU Xianqi, SHENTU Nian. The Applications of the CBF in War Industry & Civil Fields [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 7-13.
- [5] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166-180.
- [6] SINGHA K. A Short Review on Basalt Fiber [J]. International Journal of Textile Science, 2012, 1(4): 19-28.
- [7] 刘晓丽, 骆冰冰, 毕巧巍. 高强玄武岩纤维混凝土的力学性能研究[J]. 山西建筑, 2011, 37(7): 98-99.
LIU Xiaoli, LUO Bingbing, BI Qiaowei. Study on the Mechanical Properties of High-strength Basalt Fiber Concrete [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(7): 98-99.
- [8] 胡显奇, 陈兴芬, 吴玉树, 等. 玄武岩纤维在铁路轨枕中的应用研究[C]//第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集. 中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会纤维混凝土委员会:中国土木工程学会, 2008: 6.
HU Xianqi, CHEN Xingfen, WU Yushu, et al. The Application Research of Basalt Fiber Reinforced Concrete in Railway Sleeper [C]//Collection of Essays of the 12th National Conference on Fibrous Concrete. Committee of Fibrous Concrete, Branch of Concrete and Prestressed Concrete of China Civil Engineering Society: China Civil Engineering Society, 2008: 6.
- [9] 杨堃. 玄武岩纤维轨枕的性能与研制[J]. 新材料产业, 2017(2): 36-38.
YANG Kun. Performance and Development of Basalt Fiber Sleepers [J]. Advanced Materials Industry, 2017(2): 36-38.
- [10] 黄欣, 禹雷. 基于 CRTS II 型无砟轨道板纤维金属复合筋梁受弯性能研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(S1): 1061-1067.
HUANG Xin, YU Lei. Experimental Study on Bending Performances of Fiber Steel Tender Beam Base on CRTS II Ballastless Track Slab [J]. Building Structure, 2011, 41(S1): 1061-1067.
- [11] 杨洋. 新型纤维复合筋增强无砟轨道板及其基本性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
YANG Yang. A New Type of Ballastless Track Slab Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bar and Its Basic Performance [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [12] 吴刚, 杨洋, 杨琼东, 等. 新型钢-连续纤维复合筋增强无砟轨道板及其基本性能研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10): 136-144.
WU Gang, YANG Yang, YANG Qiongdong, et al. A New Type of Ballastless Track Slab Reinforced by steel-FRP Composite Bar and Its Basic Properties [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10): 136-144.
- [13] YANG Yang, WU Gang, WU Zhishen. Fatigue Performance of Ballastless Track Slabs Reinforced with BFRP and SFCB[J]. Journal of Composites for Construction, 2016.
- [14] YANG Yang, WU Gang, WU Zhishen, et al. Structural Performance of Ballastless Track Slabs Reinforced with BFRP and SFCB [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 71: 103-112.
- [15] YANG Yang, WU Gang, WU Zhishen, et al. An Experimental Study of the Insulation Performance of Ballastless Track Slabs Reinforced by New Fiber Composite Bars[J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 7-18.
- [16] YANG YANG, WU GANG. Evaluation of Fatigue Performance of Ballastless Track Slabs Reinforced with BFRP and SFCB [J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 72(1): 1-38.

(下转第38页)

价,但应注意伸缩缝以及防落梁的配套设计,使结构的减隔震体系在地震荷载作用下能够协调工作。

5 结论

本文针对高烈度震区某大跨连续梁工点开展了非线性时程反应分析,重点对双曲面球型减隔震支座的减震效果以及黏滞阻尼器的位移控制进行了分析研究,得到以下结论:

(1) 双曲面球型减隔震支座在不同设防烈度以及场地类别下均可大幅减小墩底地震内力响应,纵向墩底弯矩减震率在 90% 左右,横向墩底弯矩减震率在 85% 左右,减震效果显著,但会增加墩梁相对位移,纵横向墩梁相对位移随着设防烈度的增大和场地条件变差呈非线性增大趋势。

(2) 黏滞阻尼器在不影响双曲面球型减隔震支座减震效果的情况下可有效控制墩梁相对位移达到设计要求,但对于高烈度震区且场地条件较差时,为了优化阻尼器配置且控制造价,可以考虑增大减隔震支座的位移限值,但要注意对伸缩缝和防落梁进行配套设计。

参考文献:

[1] GB 50111 - 2006 铁路工程抗震设计规范[S].
GB 50111 - 2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering [S].
[2] 吴陶晶, 李建中, 管仲国. 减隔震装置作用机理及其在大跨度连续梁桥中的应用[J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 102 - 107.
WU Taojing, LI Jianzhong, GUAN Zhongguo. Mechanism of Seismic Isolation Devices and Applications in a Long-Span Continuous Bridge

[J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 102 - 107.
[3] 彭天波, 李建中, 范立础. 双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 176 - 180.
PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Development and Application of Double Spherical Aseismic Bearing [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(2): 176 - 180.
[4] 李晓波. 高速铁路连续梁纵向减震装置机理性研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(12): 50 - 56.
LI Xiaobo. Research on the Mechanism of Longitudinal Seismic Mitigation Devices for High-speed Railway Continuous Bridges [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(12): 50 - 56.
[5] 叶爱君, 管仲国. 桥梁抗震[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
YE Aijun, GUAN Zhongguo. Seismic Design of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
[6] 全伟, 王东升. 高烈度震区高速铁路简支梁抗震体系研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(5): 838 - 846.
QUAN Wei, WANG Dongsheng. Earthquake Resistance System Research of High-speed Railway Simply Supported Bridge under High-Intensity Seismic Region [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(5): 838 - 846.
[7] 王志强, 葛继平. 粘滞阻尼器和 Lock-up 装置在连续梁桥抗震中应用[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(1): 5 - 9.
WANG Zhiqiang, GE Jiping. Application of Viscous Damper and Lock-up Devices in the Seismic Design of Continuous Girder Bridges [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(1): 5 - 9.
[8] 罗登发, 郭占元, 戴胜勇, 等. 双曲面球型减隔震支座在铁路桥梁上的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 53 - 55.
LUO Dengfa, GUO Zhanyuan, DAI Shengyong, et al. Application of Hyperboloid Spherical Isolation Bearing on Railway Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 53 - 55.



(上接第 42 页)

[17] 冯照平, 禹雷. 玄武岩纤维金属复合筋增强 CRTS II 型轨道板的试验研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 10 - 14.
FENG Zhaoping, YU Lei. Study on the Test of the CRTS II Slab Reinforced with Basalt-Fiber-Steel-Tendon [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(8): 10 - 14.
[18] 陈鲤波. 高速铁路用高强高韧性水泥基复合材料人行道盖板设计与应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
CHEN Libo. Study on the Design and Application of High Strength

and High Toughness Cement Base Material Pavement [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
[19] 林红松, 张雷, 颜华. 弹条 II 型扣件系统综合性能提升措施研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(10): 61 - 64.
LIN Hongsong, ZHANG Lei, YAN Hua. Research on the Comprehensive Property Promotion Measures of Type II Elastic Fastening System [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(10): 61 - 64.