

文章编号: 1674—8247(2023)04—0008—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 04. 002

两类拉筋的对拉薄壁面板式路堤挡墙性能对比分析

蒋楚生¹ 李昭颖^{2,3} 肖世国^{2,3} 曾 惜¹ 邹 川¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031;
3. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘 要:为探究钢拉筋和土工格栅加筋的对拉薄壁面板式路堤挡墙的性能差异,采用 FLAC3D 数值模拟软件分析了不同填土高度的拉筋拉应力、面板水平位移和侧向土压力,同时结合施工难易程度、结构耐久性、经济性等因素对两种路堤进行比较,结果表明:(1)在高填方(填土高度 10~12 m)情况下,土工格栅式拉筋面板中部出现显著外鼓变形;钢筋式拉筋面板顶部与底部外伸位移较大、中部则向内凹,其变位模式与前者相反;(2)相比于土工格栅,钢筋承受拉力更大,面板所受侧向土压力也较大;路堤填土高度达到 6 m 以上时,钢筋在底层两端部所受拉力最大;(3)钢拉筋比土工格栅拉筋对面板的侧向变形控制能力强,侧向位移约为土工格栅拉筋的 1/10;但钢拉筋与面板节点施工控制要求较高,且长期防腐蚀性难以保障,耐久性、经济性、路堤易压实性等均弱于土工格栅拉筋,而土工格栅拉筋因其面板侧向变形控制能力较弱,一般不适于较高填方(6 m 以上)。为便于施工,可采用对拉包裹式加筋土挡墙,装饰面板独立于其后填料。

关键词:路堤;对拉薄壁面板;数值模拟;拉筋拉力;土压力

中图分类号: U213. 1^{†1} **文献标志码:** A

8

Comparison Analysis of Performance of Thin Panels Mutually Anchored by Geogrids and Steel Bars in Reinforced Embankments

JIANG Chusheng¹ LI Zhaoying^{2, 3} XIAO Shiguo^{2, 3} ZENG Xi¹ ZOU Chuan¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to investigate performance similarities and differences of thin panels mutually anchored by geogrids and steel bars in reinforced embankments, tensile stress of the reinforcements, horizontal displacements of the panels and lateral earth pressure on them are analyzed using FLAC3D numerical simulation method under varying embankment height. Meanwhile, construction operability, service durability and effective cost of the two structures are generally compared. The results show that: (1) As for embankments with 10m to 12m heights, the middle of the panel pulled by geogrids clearly bulges out; On the contrary, the middle of the panel pulled by steel bars concaves inward and displacements of its top and bottom are relatively larger than the middle. (2) Compared with the geogrids, steel bars bear higher tension force, and lateral earth pressure on their panels is correspondingly larger. The steel bars suffer the maximum tension at the two ends of the bottom layer if the embankment height reaches more than 6m. (3) The deformation of the panels anchored by steel bars

收稿日期: 2021-03-02

作者简介: 蒋楚生(1964-),男,教授级高级工程师。

引文格式: 蒋楚生,李昭颖,肖世国,等. 两类拉筋的对拉薄壁面板式路堤挡墙性能对比分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 8-12.

JIANG Chusheng, LI Zhaoying, XIAO Shiguo, et al. Comparison Analysis of Performance of Thin Panels Mutually Anchored by Geogrids and Steel Bars in Reinforced Embankments [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 8-12.

is much less than that by geogrids, and the former is about 1/10 of the latter. But for the former, construction requirements of joints between the bars and the panels are too rigorous, and their long-term corrosion protection is difficult to potentially cause worse service durability than the geogrids. Besides, in terms of effective cost of the structure and compressibility of the backfills, the former is also not as good as the latter. However, as for controlling lateral deformation of the panels, the geogrids are worse than the steel bars, and they are accordingly not more suitable for the embankments with more than 6 m heights. For construction convenience, a two-side package-pulling type reinforcement retaining wall can be used with decorative panels independent of the filling.

Key words: embankment; mutually anchored thin panels; numerical simulation; tensile stress of reinforcements; lateral earth pressure

对拉薄壁面板式路堤由钢筋混凝土面板、拉筋和填土组成,路堤两侧面板通过横向贯通于填土的拉筋对拉连接,以保持路堤的稳定性,如图1所示。对拉薄壁面板式路堤具有成本低、土石填方量少、施工进度快、占地面积小等优点。

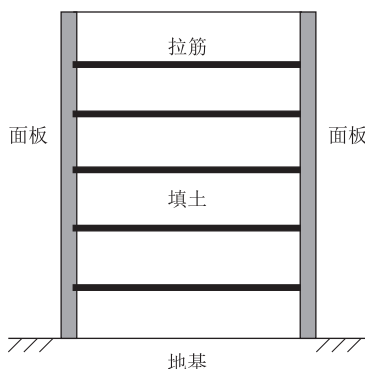


图1 对拉薄壁面板式路堤示意图

对拉薄壁面板式路堤是在加筋土挡墙基础上发展起来的,国内外学者对加筋土挡墙进行了大量的理论分析、数值模拟与试验研究。蒋楚生^[1]等基于铁路荷载自身特征,提出了铁路荷载作用下的多级加筋土挡墙的研究方向;杨长卫^[2]等借助 Hilbert-Huang 变换,提出地震作用下加筋土挡墙地震稳定性的时频分析方法;杨广庆^[3]等对加筋土挡墙筋土作用机理进行了理论分析,推导出了拉筋轴向应力特解;陈建峰^[4]等采用考虑流固耦合的二维有限元程序分析了在分级堆载下挡墙和地基的位移、土压力以及土工格栅轴向应变的变化规律。

近年来学者通过模型试验和有限元方法对拉薄壁面板式路堤进行了研究。苏俊^[5]等通过室内外试验并结合有限元数值模拟,得到了面板土压力、侧向位移及对拉钢筋拉力等分布规律;李厚民^[6]等采用有限元法分析了拉筋应力、侧向土压力和侧向位移等指标的影响因素;学者们还对填土过程中对拉式挡墙基

底压力、侧向土压力、锚索拉力的变化规律进行了探讨;分析了不同预应力水平和作用位置下对拉式挡墙背土压力及墙身位移的分布特征。

对于对拉薄壁面板式路堤,不同类型的拉筋有不同的性能,而拉筋性能对拉薄壁面板式路堤的稳定性和耐久性有至关重要的作用,针对此方面的研究鲜见报道。有鉴于此,本文依托孟加拉国帕德玛大桥铁路连接线工程某实例工点,针对4~12 m 的不同的路堤填土高度,采用 FLAC3D 数值软件分析以土工格栅和钢筋构成的对拉薄壁面板式路堤的力学行为,综合考虑结构的施工难易程度和耐久性等因素,讨论两类路堤结构的差异性。

1 工程概况与数值模型

孟加拉国帕德玛大桥铁路连接线工程 Ch 7 + 150 工点,原设计拟采用对拉薄壁面板式路堤,如图2所示。钢筋混凝土面板厚 18 cm,采用密实粗粒填料,路堤相关参数如表1所示,路堤顶面当量条形荷载为 68 kPa,分布宽度为 3.7 m。

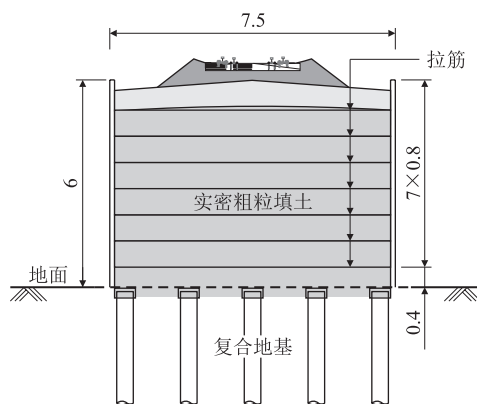


图2 工程实例横断面示意图(m)

为分析不同拉筋路堤的力学性能,充分考虑筋-土相互作用,采用有限差分软件 FLAC3D 进行数值模拟分析。拉筋分别采用单向拉伸 HDPE (高密度聚乙

烯)土工格栅和HRB400型 $\phi 32$ 钢筋。数值模拟中不考虑复合地基的影响。考虑不同填土高度(4 m、6 m、8 m、10 m和12 m)建立数值模型,典型数值模型(以填土高度4 m为例)如图3所示。模型长36 m,宽1.6 m,高28 m,路堤顶宽7.5 m。模型采用六面体网格,水平方向为 x 轴,施加水平位移约束,竖直方向为 y 轴,模型底部施加竖向位移约束,约束模型中所有节点的 z 方向位移。土工格栅竖向间距为0.8 m,钢筋竖向与横向间距均为0.8 m,不同填土高度下的拉筋层数如表2所示。墙身材料为C35混凝土,采用弹性本构,土体采用理想弹塑性本构模型、非关联流动法则和Mohr-Coulomb屈服准则,拉筋采用线弹性结构单元模拟,拉筋两端与面板之间设置为刚性连接。

表1 主要物理力学参数表

	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$
基床表层	5	35	30	0.26	20
填土	0	29	20	0.28	19.5
墙体面板	—	—	31 500	0.2	25
回填土	5	35	30	0.26	20
地基土	20	30	50	0.3	19

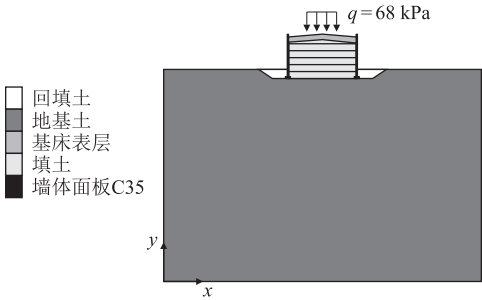


图3 数值分析整体模型图

表2 不同路堤填土高度时拉筋层数表

填土高度/m	4	6	8	10	12
拉筋层数/层	5	7	10	12	15

2 面板水平变形特征

土工格栅拉筋时面板的水平位移沿高度分布曲线如图4所示。由图4可知,当路堤填土高度从4 m增加到6 m时,面板最大水平位移从2.1 mm增加到2.6 mm,增幅达23.8%;当填土高度超过6 m后,面板最大水平位移增幅减小。沿面板高度方向,水平位移呈下小上大的非线性分布模式。

钢筋拉筋时面板的水平位移沿高度分布曲线如

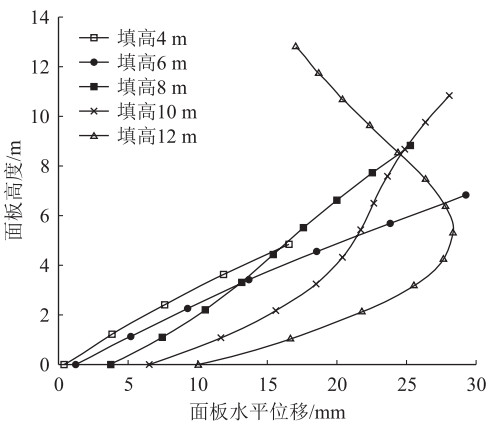


图4 土工格栅拉筋面板水平位移沿墙高的变化曲线图

图5所示。由图5可知,当路堤填土高度从4 m增加到6 m时,面板最大水平位移从2.1 mm增加到2.6 mm,增幅达23.8%;当填土高度超过6 m后,面板最大水平位移增幅减小。沿面板高度方向,水平位移呈下小上大的非线性分布模式。

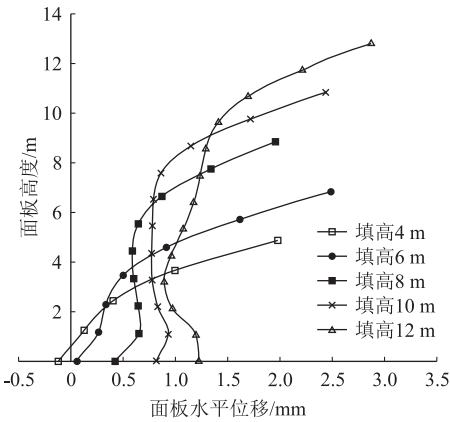


图5 钢筋拉筋面板水平位移沿墙高的变化曲线图

当拉筋为钢筋时,随着填土高度增加,面板顶部的最大水平位移在1.98~2.87 mm之间,约为土工格栅时的1/10。钢拉筋明显有利于控制路堤侧向变形。当填土高度达到12 m时,尽管两种拉筋的面板变位均呈非线性模式,但钢拉筋面板整体侧向变位模式呈顶端大、底端小的特征,与土工格栅时的“鼓肚子”模式恰好相反。

3 面板与拉筋的受力特征

3.1 拉筋拉力

不同填土高度下各层土工格栅的最大拉应力及其位置分布如图6、图7所示。由图6、图7可知,路基填土高度低于12 m时,各层拉筋最大拉力随填土高度的增加而增大,顶层拉筋受力最大;当填土高度

达到 12 m 时,中下层拉筋拉力最大,该受力特征与图 4 中面板的水平位移结果相协调,即弹性薄壁面板的水平位移越大,相应位置的拉筋拉力越大;且填土高度从 6 m 增至 12 m 时,拉筋最大拉应力的变化较小,基本保持在 4~4.5 MPa 范围内。顶层拉筋最大拉应力出现在坡顶荷载边缘的下方,其下各层最大拉应力位置逐渐靠近路堤中线,中间层位拉筋在路基中线处受力最大,下层拉筋均为端部所受拉力最大。

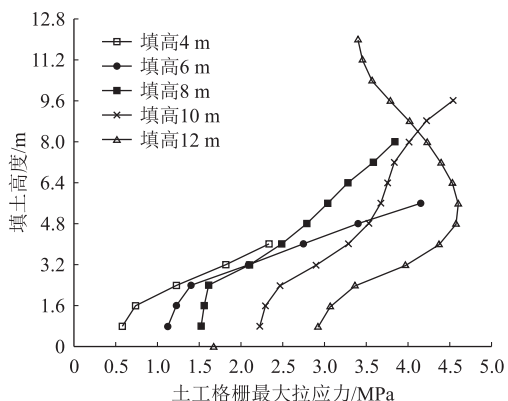


图6 各层土工格栅最大拉应力图

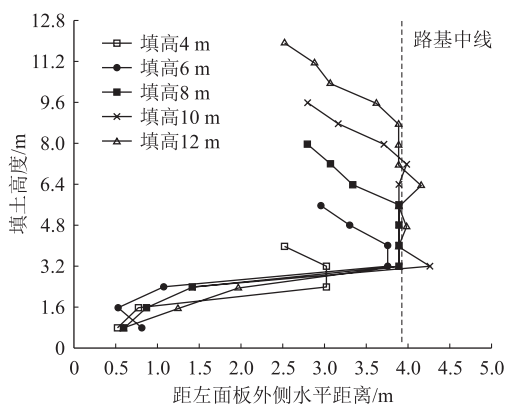


图7 各层土工格栅最大拉应力位置分布图

不同填土高度下各层钢筋的最大拉应力及其位置分布如图 8、图 9 所示。由图 8、图 9 可知,在填土高度较低(4 m)时,拉筋最大拉应力从上而下逐渐减小,填土高度大于 6 m 后,沿深度方向最大拉应力先减小后增大,底层拉筋的拉力最大。

相较于土工格栅,钢筋承受更大的拉应力,对于较高的填方,其上、下部分别采用较小、较大直径钢筋的布设模式更为合理。同时,顶层钢拉筋在路堤中线附近所受拉力最大,除顶部 1~2 层拉筋外,钢筋最大拉应力位置分布与图 7 所示的土工格栅相似,即中上层拉筋在路基中线附近受力最大,中下层拉筋均在端部拉应力最大,且后者在路堤填土高度较大时愈加显著。

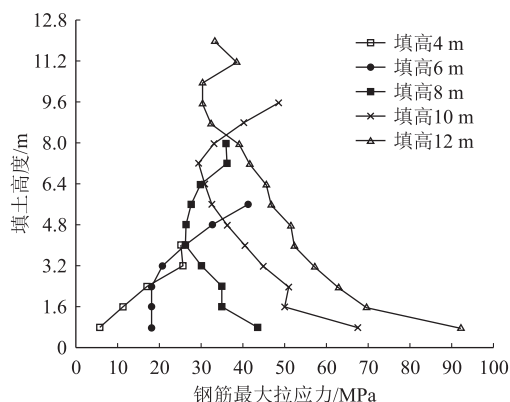


图8 各层钢筋最大拉应力图

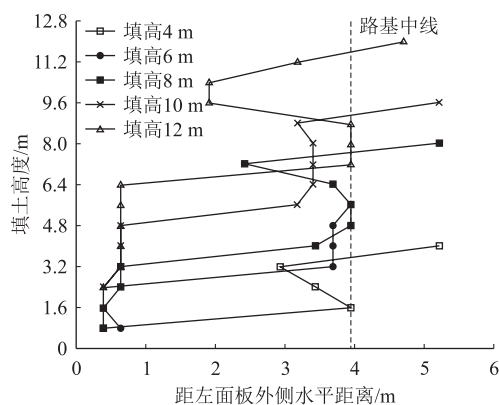


图9 各层钢筋最大拉应力位置分布图

3.2 面板侧向土压力

土工格栅和钢筋拉筋时不同填土高度下面板内侧的侧向土压力分布曲线如图 10、图 11 所示。由图 10、图 11 可知,两类拉筋下面板侧向土压力均呈非线性分布模式,沿深度方向土压力先增大后减小,峰值接近于面板底部。

填土高度为 4~6 m 时,钢筋与土工格栅拉筋时面板上的最大土压力相近;随着填土高度的增大,二者差异逐渐显现,当填土高度达到 12 m 时,钢拉筋时的最大土压力约比土工格栅高出 40%,此时对面板的抗弯与抗裂性能需有更高的要求。

4 综合因素分析

由受力分析结果可知,土工格栅与钢筋拉筋对拉薄壁面板式路堤存在显著差异。实际上,除受力性能,还可从结构的耐久性、施工易操作性、经济性等多个角度对两者进行分析。

(1) 路堤结构耐久性

铁路路堤使用年限一般较长,路堤结构的耐久性在工程实际中应予以重视。在对拉薄壁面板式路堤

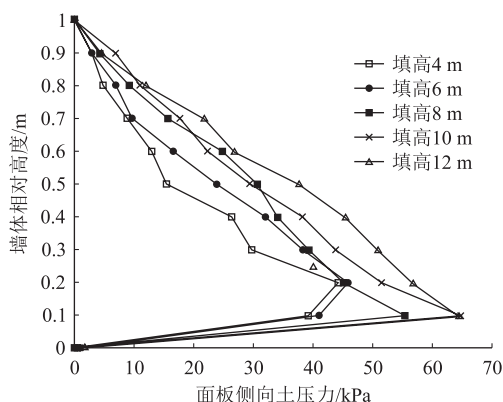


图10 土工格栅拉筋时面板侧向土压力图

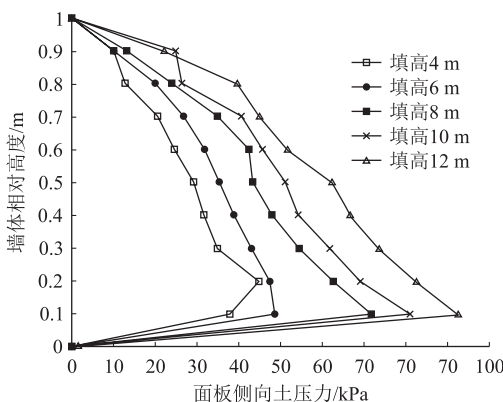


图11 钢拉筋时面板侧向土压力图

设计服役期内,拉筋的耐久性相对于组成该结构其他两种材料(钢筋混凝土面板、填料)较弱,因此拉筋的长期性能对结构的耐久性起着至关重要的作用。就常用的HDPE土工格栅与钢筋这两类加筋材料而言,后者存在长期锈蚀的难题,即便在最好的土体中使用高质量的镀锌钢,其腐蚀仍会很严重。为此,采用钢拉筋时为其进行有效且耐久的防锈蚀处理,一般采用反开挖方式埋入钢筋,即在拉筋位置开挖沟槽,进行整平并夯实后放置钢筋,拉筋两端穿过墙身预留的锚孔并固定,整个施工过程比土工格栅更为繁琐。从耐久性角度分析,HDPE土工格栅加筋对拉薄壁面板式路堤结构优于钢拉筋式。

(2) 路堤易压实性

钢拉筋式路堤在施工分层碾压时易造成钢筋弯曲变形,导致面板附加受力与变位。填方越高,这个问题就越突出,且面板附近位置此问题也很突出。相反,具有良好柔韧性的HDPE土工格栅材料,更易与填土变形协调,填方路堤的可压实性更强。

(3) 经济性

考虑钢制加筋耐久性的要求,通常需要采用抗拉

强度较高的钢筋,其材料本身造价比HDPE土工格栅类材料高。

(4) 拉筋与面板结点受力合理性

钢筋与面板结点一般采用螺栓式连接,其结点强度是影响路堤结构性能的关键环节。从长远看,高负载的连接结点是该结构的一个隐患。相对于HDPE土工格栅拉筋而言,钢筋拉筋结点对路堤变形的适应性较差,更容易发生破坏前迹象不显著的脆性破坏。

(5) 面板变形控制性

钢拉筋比HDPE土工格栅拉筋对面板的侧向变形控制能力更强,前者面板的侧向位移约为后者的1/10。因此,在列车荷载作用前后的路堤“视觉安全性”(变形越小越安全)方面,前者显著高于后者。

5 结论

针对HDPE土工格栅与钢筋构成的两类对拉薄壁面板式路堤结构,从结构变形与受力特征、综合性能等角度分析了二者的差异性,得出主要结论如下:

(1) 当拉筋采用土工格栅时,随着填土高度增加,面板水平位移模式从线性发展为非线性分布,前者最大水平位移出现在面板顶部,后者则在面板的中下部,面板呈“鼓肚子”变位模式。然而,当拉筋为钢筋时,随着填土高度增加,面板顶部的最大水平位移约为前者的1/10,钢拉筋明显有利于控制路堤侧向变形。在较大路堤填土高度时,面板整体侧向变位模式呈两端大、中间小的特征,与前者恰好相反。

(2) 相比于土工格栅,钢筋承受更大的拉应力,对于较高的填方,其上部、下部分别采用较小、较大直径钢筋的布设模式更为合理。对于两类拉筋,中上层拉筋在路基中线附近受力最大,中下层拉筋均在端部拉应力最大,且后者在路堤填土高度较大时愈加显著。

(3) 两类拉筋时面板侧向土压力均呈非线性分布模式,沿深度方向土压力先增后减,峰值接近于面板底部。在填土高度为4~6m时,钢筋与土工格栅拉筋时面板上的最大土压力相近;而随着填土高度的增大,钢拉筋时最大土压力显著高于土工格栅时的值。

(4) 从路堤结构耐久性、易压实性、经济性、拉筋与面板结点受力合理性而言,HDPE土工格栅拉筋式路堤性能优于钢拉筋式路堤;从面板变形易控制性来看,土工格栅拉筋较适用于填土高度较低(不超过6m)的路堤结构,而钢拉筋则在高填方路堤中相对具有优越性,但施工比较难以控制,且须做好长期防锈与结点连接处理;为方便施工,可采用对拉包裹式加筋土挡墙,装饰面板独立于其后填料。

(下转第62页)

- ZENG Qingyuan, YANG Ping. The "Set-in-right-position" Rule for Forming Structural Matrices and the Finite Truss-element Method for Space Analysis of Truss Bridges [J]. Journal of the China Railway Society, 1986, 8(2): 48–59.
- [7] 郭向荣, 何玮, 朱志辉, 等. 横风作用下货物列车通过大跨度铁路斜拉桥的走行安全性研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(2): 41–47.
- GUO Xiangrong, HE Wei, ZHU Zhihui, et al. Running Safety of Freight Train Passing Long-span Cable-stayed Railway Bridge under Cross Wind [J]. China Railway Science, 2016, 37(2): 41–47.
- [8] 骆宁安, 杨文武, 韩大建. 大跨度桥梁脉动风场的随机模拟[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 57–60.
- LUO Ning'an, YANG Wenwu, HAN Dajian. Stochastic Simulation of Wind Turbulence Field for a Long-span Bridge [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2002, 30(3): 57–60.
- [9] 郭向荣, 曾庆元. 京沪高速铁路南京长江斜拉桥方案车桥耦合风速分析[J]. 铁道学报, 2001, 23(5): 75–80.
- GUO Xiangrong, ZENG Qingyuan. Analysis of Critical Wind Speed for Running Trains on a Schemed Yangtze River Bridge at Nanjing on Beijing-Shanghai High Speed Railway Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(5): 75–80.
- [10] 王厚雄, 高注, 王蜀东, 等. 挡风墙高度的研究[J]. 中国铁道科学, 1990, 11(1): 14–23.
- WANG Houxiang, GAO Zhu, WANG Shudong, et al. A Study on the Height of Wind Break Wall [J]. China Railway Science, 1990, 11(1): 14–23.
- [11] 张健. 铁路防风栅抗风性能风洞试验研究与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 13–17.
- ZHANG Jian. Wind-tunnel Test Investigations and Analysis on Wind Break Performances of Wind Fences on Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(1): 13–17.
- [12] 吕娜, 刘伟, 谢海清, 等. 叶片式导风屏障挡风性能优化研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 78–82, 88.
- LV Na, LIU Wei, XIE Haiqing, et al. Study on Optimization of Wind-proof Performance of Vane-type Wind Deflector [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 78–82, 88.

(上接第12页)

参考文献:

- [1] 蒋楚生, 赵晓彦, 李庆海, 等. 铁路多级加筋土挡墙研究现状及应用展望[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 44–48.
- JIANG Chusheng, ZHAO Xiaoyan, LI Qinghai, et al. Current Situation and Application Prospect of Multi-stage Reinforced Soil Wall for Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 44–48.
- [2] 杨长卫, 周峰, 杨国涛, 等. 加筋土挡墙地震稳定性时频分析研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(9): 41–48.
- YANG Changwei, ZHOU Feng, YANG Guotao, et al. Seismic Stability Time-frequency Analysis Theory Resolution of Reinforced Retaining Wall [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(9): 41–48.
- [3] 杨广庆, 周亦涛, 周乔勇. 加筋土挡墙拉筋轴向应力分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 650–654.
- YANG Guangqing, ZHOU Yitao, ZHOU Qiaoyong. Distribution Rules of Axial Stress of Reinforcement in Reinforced Earth Retaining Wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 650–654.
- [4] 陈建峰, 柳军修, 石振明. 软土地基加筋土挡墙数值模拟及稳定性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1928–1935.
- CHEN Jianfeng, LIU Junxiu, SHI Zhenming. Numerical Simulation and Stability Discussion of Reinforced Earth Retaining Wall in Soft Soil Foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1928–1935.
- [5] 苏骏. 双面加筋挡土墙的试验研究及数值模拟分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- SU Jun. Experimental Study and Numerical Simulation Analysis of Double-sided Reinforced Retaining Wall [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [6] 李厚民, 熊健民, 余天庆. 互锚式薄壁挡土墙影响因素分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(S2): 897–901.
- LI Houmin, XIONG Jianmin, YU Tianqing. Finite Element Analysis of Mutual Anchoring Thin Retaining Wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 897–901.