

文章编号: 1674—8247(2022)06—0006—06

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2022.06.002

西南山区高速铁路车站桩板结构高填路基动力特性分析

孔文亚¹ 黎康¹ 谢恺²

(1. 京昆高速铁路西昆有限公司, 重庆 400023; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 依托渝昆高速铁路云贵段彝良北站“V”型沟谷地区桩板结构高填路基车站建设工程, 建立了车辆—轨道—桩板结构路基三维有限元数值模型, 分析了在列车上行、下行和会车3种工况下, 桩板结构高填站场路基的动应力、动位移及竖向加速度的分布特征, 结果表明: (1) 列车动荷载主要由桩板结构向下传递至基岩, 回填土及原地表土所受荷载较小; (2) 地基竖向位移主要发生在回填土浅层土体与原地表土范围内, 基床表层位移较小, 基岩基本不产生位移; (3) 路基竖向加速度随深度增加而递减, 且在基床表层区域衰减最快; 会车工况下, 站坪竖向加速度振级大于单线荷载下所产生的站坪加速度振级。

关键词: 铁路路基; 动力特性; 数值计算; 站场路基; 桩板结构

中图分类号: U213.1

文献标识码: A

Analysis of Dynamic Characteristics of High-fill Subgrade with Pile-slab Structure in High-speed Railway Stations in Southwest Mountainous Area

KONG Wenya¹ LI Kang¹ XIE Kai²

(1. Beijing-Kunming High-speed Railway Xikun Co., Ltd, Chongqing 400023, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, based on the station construction of the high-filled subgrade with pile-sheet structure in the V-shaped valley of Yiliang North Station in the Yungui Section of the Chongqing-Kunming High-speed Railway, a three-dimensional finite element numerical model of vehicle-track-pile-slab structure subgrade is established, and the distribution characteristics of dynamic stress, dynamic displacement and vertical acceleration of high-filled subgrade with the pile-slab structure are analyzed under three working conditions of the train going up, down, and crossing. The results show that: (1) The dynamic load of the train is mainly transmitted through the pile-slab structure down to the bedrock, and the load on the backfill and the original surface soil is relatively small. (2) The vertical displacement of the foundation mainly occurs within the range of the shallow soil mass of the backfill soil and the original surface soil. The displacement of the surface layer of the subgrade bed is small, and the bedrock basically does not displace. (3) The vertical acceleration of the subgrade decreases with the increase of depth and attenuates fastest in the top layer of the subgrade bed. Under the crossing condition, the vertical acceleration vibration level of the station site is greater than the acceleration vibration level of the station site generated under the single-track load.

Key words: railway subgrade; dynamic characteristics; numerical calculation; station and yard subgrade; pile-slab structure

收稿日期: 2022-11-01

作者简介: 孔文亚(1968-), 男, 教授级高级工程师。

引文格式: 孔文亚, 黎康, 谢恺. 西南山区高速铁路车站桩板结构高填路基动力特性分析[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 6-11.

KONG Wenya, LI Kang, XIE Kai. Analysis of Dynamic Characteristics of High-fill Subgrade with Pile-slab Structure in High-speed Railway Stations in Southwest Mountainous Area[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 6-11.

我国西南山区地质条件复杂,地势起伏多变,铁路桥隧比高达86%,高速铁路车站设站困难。削山填谷、弃碴造地,形成高填路基结构,是西南山区铁路车站建设提升用地面积、消纳铁路建设弃碴的有效手段^[1-2]。

沉降控制是沟谷地区高填路基建设的关键问题^[3-5]。众多学者围绕高填路基沉降规律、计算手段、控制方法及施工工艺等开展了大量研究。沉降规律方面,高填路基的沉降过程大部分发生于施工阶段,具有“沉降大,压实快”的特点^[6],沉降空间分布具有明显的位置差异^[7];沉降计算方面,采用有限元方法计算填筑过程中产生的非线性沉降^[8-9];文献^[10]研究了山区高填路基的分步、分层有限元模拟方法;沉降控制方法方面,压密注浆、桩基加固、加筋、桩板加固等路基沉降控制方法被应用到工程建设中,取得了良好的控制效果^[11-16]。施工工法方面,高填路基主要通过控制材料、压实度和设置排水措施来保证结构填筑质量^[17],压实度通常被作为主要控制指标,多种夯实方法在高填路基建设中得到了应用^[18-20]。经历了早期基于设计的施工手段,高填路基结构施工逐渐采用监测手段来对施工进行指导^[21],该方法可根据沉降监测数据反映固结沉降变形水平,反演填筑体材料物理参数,预测填筑体变形趋势,进而对施工进行反馈。

综合而言,众学者在高填路基建设领域研究已较为深入,但针对高填路基车站动荷载响应方面的研究有所欠缺。本文依托渝昆高速铁路云贵段彝良北站建设工程,采用数值模拟研究了V型沟谷地区高速铁路高填路基车站结构承载模式,分析桩板结构高填路基动力响应特征。研究成果可为西南山区高速铁路V型沟谷地区路基设计提供借鉴。

1 工程概况

1.1 项目概况

渝昆高速铁路位于我国西南地区,是我国中长期铁路网规划“八纵八横”高速铁路主通道京昆通道中的重要组成部分,线路自重庆引出后经泸州、宜宾、昭通引入昆明枢纽,正线全长699.26 km。

1.2 车站概况

彝良北站设于昭通市彝良县白岩村,位于“V”型沟谷地区,属高原斜坡地带中山峡谷区,地形陡峻,起伏大,地面高程900~1100 m,自然横坡10°~45°,属两山夹一谷地形,所在轨面设计标高高于原地地面约15~30 m。车站设到发线4条,岛式站台1座,站内正线平行于沟谷轴线。受车站两端隧道分修影响,车

站按正线外包到发线布置。车站示意如图1所示。

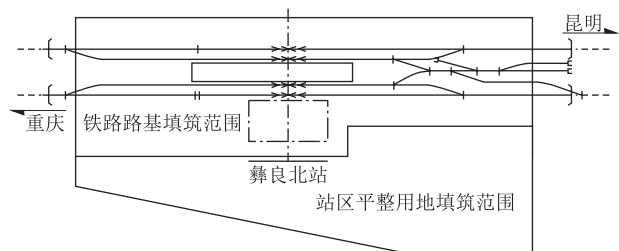


图1 彝良北站平面布置示意图

渝昆高速铁路云贵段建设隧道比例高、隧道弃碴量大,彝良北重庆端咽喉衔接彝良隧道,长24.3 km;昆明端咽喉衔接炳辉隧道,长21.5 km。车站30 km范围内,隧道共产生弃碴量约 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在沟谷地区,当线路轨面标高高于原地地面8 m以上时,一般采用高架式车站设计方案。然而,高架式车站未考虑山区铁路建设弃碴量大的工程特点,不能消纳建设开挖所产生的大量土方,建成后所提供的开发用地面积不足。因此,设计方提出彝良北站建设采用桩板结构高填路基方案。据测算,车站采用路基方案后,可消纳填方量约 $487 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少弃碴场临时用地约706亩。

2 车-轨-路垂向耦合动力学计算模型

渝昆高速铁路云贵段拟运行CRH380系列型号动车组列车,采用CRTSⅢ型板式无砟轨道结构。路基采用弃渣回填的高填路基方案,原地基表面为粗圆粒土层,下伏基岩为强风化砂岩。为保证彝良北站正线沉降满足高速铁路无砟轨道标准,采用浅埋式桩板加固路基。基于现场实际情况,借助Abaqus有限元软件建立车辆-轨道-桩板结构路基三维有限元数值模型。

2.1 车辆模型

车辆模型采用10个自由度的多刚体垂向动力模型,采用八结点线性六面体减缩积分单元。车体、转向架与轮对之间采用一系弹簧阻尼元件与二系弹簧阻尼元件进行连接。简化后的车辆模型从上至下依次为车体、转向架、轮对。模型参数取值如表1所示。

2.2 轨道路基模型

轨道结构采用CRTSⅢ型板式无砟轨道,从上至下依次为钢轨、扣件、轨道板、自密实混凝土层与支承层,支承层下表面与基床表层接触。路基从上至下分别为基床表层、基床底层、基床以下路堤,路堤下方采用回填土填筑地基。正线下方填土采用浅埋式桩板结构进行加固。

表 1 CRH380 动车参数表	
参数	数值
车体质量/kg	4×10^4
转向架质量/kg	3 200
轮对质量/kg	2 400
一系垂向刚度/(kN/m)	1.04×10^6
二系垂向刚度/(kN/m)	4×10^5
一系垂向阻尼/(N·s/m)	5×10^3
二系垂向阻尼/(N·s/m)	6×10^3

浅埋式桩板结构由钢筋混凝土桩基、托梁和上部承台板组成。基桩采用矩形布置,纵向桩间距 7.5 m,横向桩间距 5.0 m,桩深入其下完整基岩 5 m,承台板通长布置。站坪采用回填土填筑整平,计算区域宽 189 m、高 60 m。断面布置示意如图 2 所示。

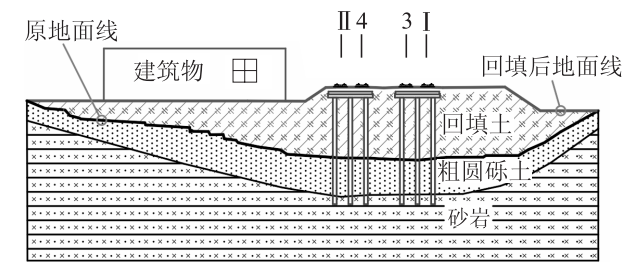


图 2 正线路基工程代表向横断面图

轨道、路基模型采用八结点线性六面体减缩积分单元,参数如表 2 和表 3 所示。扣件采用弹簧阻尼单元模拟,桩板结构与土体的相互关系设置为内置区域。路基边界采用位移约束固定。综合考虑计算精确性和计算代价后,路基模型长度设置为 30 m。将钢轨向两端各延长 30 m,以模拟实际行车情况,钢轨外延段通过接地弹簧约束。

2.3 轮轨接触与车辆 – 轨道 – 路基耦合系统

轮轨接触是车辆 – 轨道计算模型耦合的实现方法。本文轮对采用磨损型踏面,钢轨与轮对之间的接触考虑为摩擦接触。定义法向接触为“硬”接触,切向接触为罚模型,设置摩擦系数为 0.5。轨道支承层下表面与路基基床上表面的接触是完成轨道 – 路基耦合的实现方法。本文考虑支承层与路基表面不发生相对位移,列车运行中产生的变形均处于弹性范围内。

2.4 计算工况设置

考虑站场可预见荷载情况,设置上行、下行、车站会车 3 种计算工况,行车速度为 350 km/h。每条线选用两个车厢组成荷载组,单线计算时另一正线不添加动车组作为荷载。

表 2 CRTS III 型板式无砟轨道计算参数表		
部件	参数	数值
钢轨	密度/(kg/m³)	7 830
	弹性模量/Pa	2.059×10^{11}
	泊松比	0.3
扣件	刚度/(N/m)	5×10^7
	阻尼/(K·s/m)	7.5×10^4
轨道板	密度/(kg/m³)	2 500
	弹性模量/Pa	3.6×10^{10}
	泊松比	0.2
自密实混凝土	密度/(kg/m³)	2 450
	弹性模量/Pa	3.25×10^{10}
	泊松比	0.2
支承层	密度/(kg/m³)	2 500
	弹性模量/Pa	2.8×10^{10}
	泊松比	0.2

表 3 路基及地基材料表			
结构	密度/(kg/m³)	弹性模量/MPa	泊松比
基床表层	2 300	350	0.25
基床底层	1 950	250	0.35
回填土	2 100	150	0.3
桩板混凝土	2 500	30 000	0.16
粗圆砾土	2 000	60	0.25
砂岩	2 530	15 000	0.25

3 结果分析

分析行车速度为 350 km/h 的 CRH380 动车组在列车上行工况、列车会车工况、列车下行工况 3 种工况下的动应力、动位移及竖向加速度分布。研究桩板结构高填路基在 3 种荷载情况下的动力响应及站坪区域振动特征。

3.1 动应力

桩板结构两桩位中心位置路基及地基动应力随深度变化如图 3 所示。3 种工况下动应力沿深度方向的变化趋势相同,土体内部产生的动应力幅值基本一致。动应力随深度增加而减小,在基床表层区域衰减最快,从基床表层到承台板上端,3 工况下平均每米动应力衰减为 29.27%。承台板到基岩上方区域内回填土及原地表土动应力基本保持不变。在基岩位置处,由于桩底嵌入基岩,该区域动应力增大,出现沿深度方向的动应力的突变,并随深度向下衰减,从持力层到 42 m 深度处,3 工况平均每米动应力衰减为 7.06%,远小于基床表层应力衰减速度。

由于桩板结构的加固作用,在承台板位置处,荷载由土体传递至混凝土承台板,土体动应力断崖式减小,承台板以下回填土体所受附加动应力趋近于零。

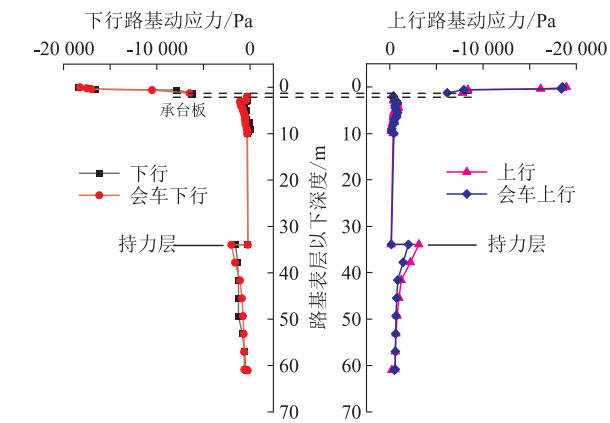


图 3 路基土体动应力分布图

在承力模式上,路基结构直接承受上部荷载,所受动应力较大,承台板以下回填土及原地表土所受动应力普遍小于基岩,在结构中不起主要承载作用,荷载主要由桩板结构与下部基岩承受。该承力模式可减小回填土及原地表土受力变形,有利于控制地基沉降。

3.2 动位移

选取轮对中心以下基床表层土体竖向位移进行分析,桩板结构两桩位中心上方基床表层土体位移随时间变化如图 4 所示。3 种工况下,上下行线路上的基床表层动位移曲线特征一致,在两车厢荷载下形成四峰曲线,第一个波峰对应列车第一个转向架通过该位置,后续连续波峰表示两车厢相邻转向架通过,时间间隔较小,最后一个波峰反映第二列车厢尾部转向架通过。各工况中转向架通过时基床表层产生的沉降幅值几乎相同。不同工况下各时刻沉降数值基本保持一致,沉降最大值在 0.12~0.18 mm 之间,满足列车正常运行需求。

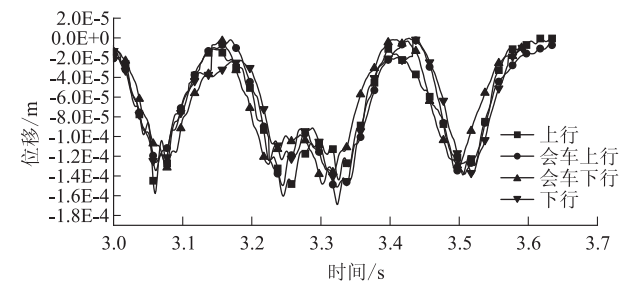


图 4 轮对中心点以下基床表层动位移图

桩板结构两桩位中心位置路基及地基结构竖向动位移沿深度变化如图 5 所示。由图 5 可知,竖向位移主要发生在 0~20 m 回填土范围和 20~30 m 原地表填土范围内,33 m 以下基岩基本不产生竖向位移。在回填土范围内,由于土体内荷载向下传递过程的

扩散效应,土体内竖向位移呈现明显的非线性特征。承台板下端到 10 m 深度处,3 工况平均每米沉降为 9.39×10^{-6} m。10 m 深度处到与原地表土衔接位置,3 工况平均每米沉降为 1.50×10^{-6} m,浅层沉降量大,深层沉降量小。原地表土相较于回填土模量低,在相同荷载条件下沉降较大,原地表土 3 工况平均每米沉降为 2.66×10^{-6} m,曲线出现斜率突变点。

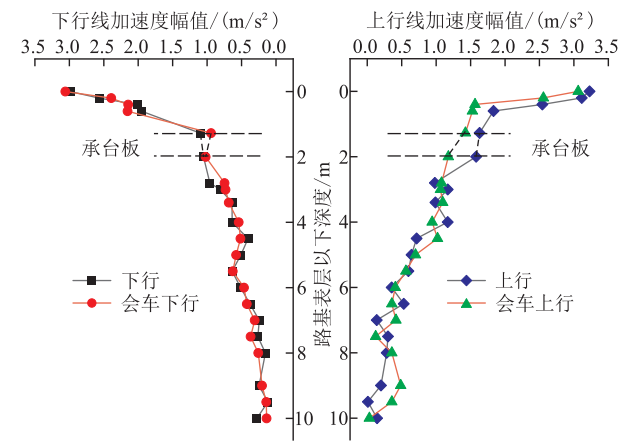


图 5 竖向动位移沿深度分布图

3.3 动加速度及站坪环境振动

路基表面竖向加速度沿深度分布如图 6 所示。3 种工况下基床表层竖向加速度幅值为 $3.0 \sim 3.5 \text{ m/s}^2$ 。路基竖向加速度随深度增加呈递减趋势,且在基床表层区域衰减最快,在承台板下方土体加速度衰减较慢。由于桩板结构的存在,承台板区别于土体散粒材料,能量传递过程中损失较小,能够较好地传递上部加速度,附近土体在深度方向上的竖向加速度几乎不变。上行与下行工况下基床表层竖向加速度幅值与会车工况下的基床表层竖向加速度幅值基本保持一致。

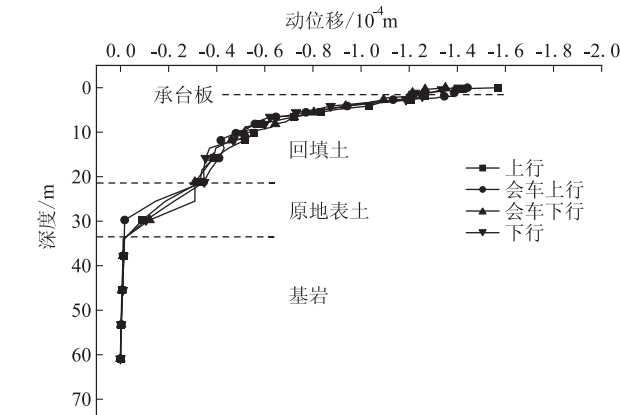


图 6 路基表面竖向加速度沿深度分布图

3 种工况下基床表层表面和站坪表面土体竖向加

速度各时刻最大值如图7所示。路基区域3种工况下最大加速度均位于线路中心位置,并向两侧迅速衰减。路基坡脚以外站坪区域地表加速度较小,站坪竖向加速度最大值出现在下行工况坡角位置为 0.227 m/s^2 ,并在短距离内迅速衰减至 $10\sim 3\text{ m/s}^2$ 量级。对高速铁路路基段CRH380列车运行时引起周边地面的振动进行现场测试,测试结果与本文下行工况下计算所得竖向加速度对比如表4所示。从表4可以发现,桩板结构高填路基在承受列车动荷载下,回填站坪区域加速度响应与一般路堤结构地面振动响应水平相当。

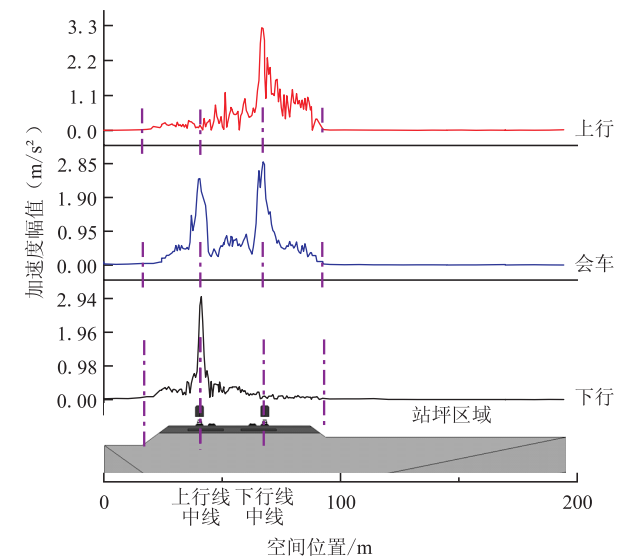


图7 基床表层竖向加速度幅值分布图

表4 加速度幅值对比表(m/s^2)

位置	本文加速度幅值	文献加速度幅值
坡角处	0.227	0.2~0.3
距坡角30 m处	0.017 5	0.006~0.012

为研究不同工况下站场区域振级分布情况,分析各加速度幅值下的振级水平,采用式(1)计算各工况下的竖向加速度振级(V_{AL})。不同荷载下,竖向加速度振级分布如图8所示。

$$VAL = 20\lg(a_{rms}/a_0)$$

(1)

式中: V_{AL}——竖向加速度振级(dB);
 a_{rms} ——竖向振动加速度幅值(m/s^2);
 a_0 ——基准加速度,取 $1\times 10^{-6}\text{ m/s}^2$ 。

由图8可知,3种工况下站坪区域加速度振级小于路基区域加速度振级,且均在荷载中心处产生出现最大加速度振级。在土体表面,会车不造成两线路间岛式站台区域加速度振级增加,但对站坪影响较大。会车工况下,靠近坡脚50 m范围内站坪竖向加速度振级普遍大于单线荷载下产生的站坪加速度振级,并

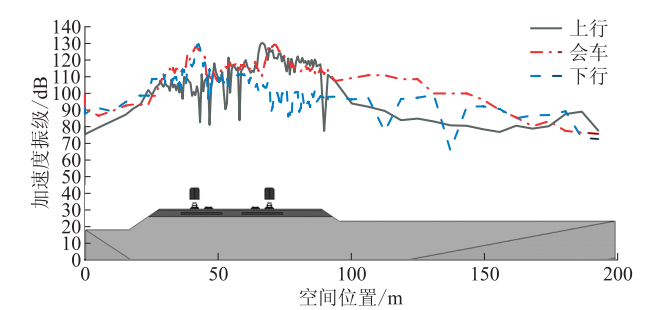


图8 竖向加速度振级分布图

随距离的增加逐渐趋于一致。

4 结论

沟谷地区铁路车站设站问题已成为西南山区高速铁路建设的关键问题。本文结合彝良北站“V”型沟谷地区高速铁路车站工程,研究高填桩板结构路基及站坪动力响应,取得的结论包括:

- (1)高填桩板结构路基在列车作用下,荷载主要由桩板向下传递至基岩,回填土所受荷载较小,动应力在基床表层迅速衰减,应力分布利于基岩上方回填土及原地表土沉降控制。
- (2)列车作用下高填桩板结构基床表层竖向动位移较小。竖向位移主要发生在回填土浅层土体与原地表土范围内,回填土深层土体变形较小,基岩基本不产生沉降。
- (3)3种工况下,基床表层竖向加速度幅值为 $3.0\sim 3.5\text{ m/s}^2$ 。路基竖向加速度随深度增加而递减,且在基床表层区域衰减最快。会车不造成两线路间岛式站台区域加速度振级增加,但会造成距坡脚50 m范围内的站坪竖向加速度振级大于单线荷载下产生的站坪竖向加速度振级。

参考文献:

[1] 张庆飞,吕改杰,冯宇淞,等.V型沟谷高填路基沉降变形特征及稳定性分析[J].山西建筑,2021,47(22):1-4.
ZHANG Qingfei, LV Gaijie, FENG Yusong, et al. Analysis of High Fill Subgrad in V-Shaped Valley for Settlement Deformation and Stability [J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(22): 1-4.

[2] 陈强,李凤成,于兴国,等.基于FLAC3D的V型沟谷高填方路基稳定性分析[J].四川建筑,2019,39(6):133-135.
CHEN Qiang, LI Fengcheng, YU Xingguo, et al. Stability Analysis of V-shaped Valley High Fill Subgrade Based on FLAC3D [J]. Sichuan Architecture, 2019, 39(6): 133-135.

[3] 张占荣,刘庆辉,杨艳霜,等.高填土路堤沉降计算方法分析[J].铁道标准设计,2011,55(2):5-8.

- ZHANG Zhanrong, LIU Qinghui, YANG Yanshuang, et al. Analysis of Settlement Calculation Method for High Fill Embankment [J]. Railway Standard Design, 2011, 55(2): 5-8.
- [4] 葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 745-753.
- GE Miaomiao, LI Ning, ZHANG Wei, et al. Settlement Behavior and Inverse Prediction of Post-Construction Settlement of High Filled Loess Embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 745-753.
- [5] 曹宏伟. 土工格栅在高填路堤中的应用[J]. 科学技术创新, 2022(24): 85-88.
- CAO Hongwei. Application of Geogrid in High Fill Embankment[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(24): 85-88.
- [6] 刘宏, 张倬元, 韩文喜. 高填方地基土工离心模型试验技术研究[J]. 地质科技情报, 2005, 24(1): 103-106.
- LIU Hong, ZHANG Zhuoyuan, HAN Wenxi. Centrifugal Model Technique of High Embankment [J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(1): 103-106.
- [7] 贾亮, 贺世开, 朱彦鹏, 等. 高填方路堤工后沉降监测试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(3): 15-19.
- JIA Liang, HE Shikai, ZHU Yanpeng, et al. Experimental Study on Monitoring of Post-Construction Settlement of High-Filled Embankment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(3): 15-19.
- [8] 李宁, 张海凤, 周川滨. 高填路基层填筑过程非线性有限元分析[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 42-45.
- LI Ning, ZHANG Haifeng, ZHOU Chuanbin. Nonlinear Finite Element Analysis of Layered Filling of High Subgrade [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 42-45.
- [9] ZHANG Yan, WANG Yong. Numerical Simulation Study on Self-Settlement Process of High Embankment [J]. Advanced Materials Research, 2013: 1221-1224.
- [10] 李占锋. 山区高填路堤沉降特征研究[J]. 公路工程, 2019, 44(2): 169-172, 216.
- LI Zhanfeng. Study on Settlement Characteristics of High Fill Embankment in Mountain Area [J]. Highway Engineering, 2019, 44(2): 169-172, 216.
- [11] 王刚, 陈金海, 王明星. 用压密注浆法加固高速公路高填方路段路基(堤)[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2): 51-52.
- WANG Gang, CHEN Jinhai, WANG Mingxing. Strengthening the Subgrade (embankment) in the High-fill Section of the Expressway by Compaction Grouting Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research Andk Development, 2002, 19(2): 51-52.
- [12] 白国栋. 东水站软土地基加固的效果及启示[J]. 铁道建筑, 1998, 38(2): 15-18.
- BAI Guodong. Effect and Enlightenment of Soft Soil Foundation Reinforcement in Dongshui Station [J]. Railway Engineering, 1998, 38(2): 15-18.
- [13] 孙成木. 深层搅拌桩在高填路基加固中的应用[J]. 铁道勘察, 2005, 31(2): 55-56.
- SUN Chengmu. Deep Stirring Piles for the Thick Filled Subgrade [J]. Railway Investigation and Surveying, 2005, 31(2): 55-56.
- [14] 尹万杰, 曾思坡, 邵昊. 强夯结合顶层加筋处理高填路基[J]. 城市建筑, 2012(17): 274.
- YIN Wanjie, ZENG Sipo, TAI Hao. Dealing with High Fill Roadbed Dynamic Compaction in Combination with the Top and Muscles [J]. Urbanism and Architecture, 2012(17): 274.
- [15] 王长丹, 陈凯祥, 陕耀, 等. 深厚软土区有轨电车桩板结构路基沉降变形离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3444-3452.
- WANG Changdan, CHEN Kaixiang, SHAN Yao, et al. Centrifugal Test on Settlement of Tram Pile Plate Structure Embankment in Deep Soft Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3444-3452.
- [16] 李安洪, 姚裕春. 复杂艰险山区高速铁路路基变形控制技术[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S2): 43-50.
- LI Anhong, YAO Yuchun. The Control Technology for Subgrade Deformation of High-Speed Railway in Complex and Dangerous Mountain Area [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S2): 43-50.
- [17] 黄泽浪. 高填路基施工在山区高速公路路基改造工程中的应用[J]. 交通世界, 2020(36): 68-69.
- HUANG Zelang. Application of High-fill Subgrade Construction in Expressway Subgrade Reconstruction Project in the Mountainous Area [J]. Transpo World, 2020(36): 68-69.
- [18] 吴发展, 吴飞. 宝坪高速公路高填路基强夯施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 1334-1337.
- WU Fazhan, WU Fei. Foundation Treatment Construction Technology of Dynamic Compaction for High Fill Subgrade of Baoping Expressway [J]. Construction Technology, 2020, 49(S1): 1334-1337.
- [19] 王远雄. 高速公路高填路基施工中冲击碾压技术的运用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(4): 90-91.
- WANG Yuanxiong. Application of Impact Rolling Technology in the Construction of Expressway High-fill Subgrade [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(4): 90-91.
- [20] 王鹏凯. 路基沉降控制及施工技术研究[J]. 交通世界, 2016(11): 52-53.
- WANG Pengkai. Study on Subgrade Settlement Control and Construction Technology [J]. TranspoWorld, 2016(11): 52-53, 81.
- [21] 马贵红, 吴仕林. 高填路基施工沉降监测与变形控制技术[J]. 云南水力发电, 2021, 37(10): 26-32.
- MA Guihong, WU Shilin. Construction Settlement Monitoring and Deformation Control Technology of High Fill Subgrade [J]. Yunnan Water Power, 2021, 37(10): 26-32.