

文章编号:1674-599X(2022)04-0010-06

基于PFWD的公路填石路基压实质量快速检测方法研究

李盛¹, 郜梦棵¹, 刘玉龙², 钟少杰²

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙, 410114; 2.中交四航局第二工程有限公司, 湖南 长沙, 410000)

摘 要:为提高填石路基压实质量的检测效率,以广连高速公路TJ09标段的填石路基路试验段为工程背景,分别采用PFWD和水袋法对填石路基的压实质量进行检测试验。建立填石路基的回弹模量、回弹弯沉与孔隙率之间的回归模型,探究PFWD应用于填石路基压实质量的快速检测。研究表明:回弹模量与孔隙率之间相关系数 R^2 大于0.7,且两者具有良好的相关性;回弹模量的变异系数为16.7%,小于回弹弯沉的变异系数19.0%,回弹模量的离散程度比回弹弯沉的小,更稳定。PFWD的检测结果满足现行规范要求,可用于填石路基工程压实质量的快速检测。

关键词:道路工程;填石路基;快速检测;PFWD;孔隙率

中图分类号:U416

文献标志码:A

Research on the rapid detection method of compaction quality of highway rockfill subgrade based on the PFWD

LI Sheng¹, GAO Mengke¹, LIU Yulong², ZHONG Shaojie²

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Second Engineering Co., Ltd., Communications Fourth Aviation Bureau, Changsha 410000, China)

Abstract: In order to improve the detection efficiency of the compaction quality of rock fill subgrade, the portable falling weight deflectometer (PFWD) and water bag method was used, based on the representative rock fill subgrade at the TJ09 test section of the Guangzhou Lianyungang Expressway. The regression model for the resilience modulus, resilience deflection and porosity of rock fill subgrade was established. The rapid method of the PFWD was explored to detect the compaction quality of rock fill subgrade. The results show that the correlation coefficient (R_2) between the resilient modulus and porosity is greater than 0.7, and them show a good correlation. The variation coefficients of of the resilient modulus and the resilience deflection are 16.7% and 19.0%, respectively. Those indicate The dispersion degree of resilient modulus is smaller and more stable than that of rebound deflection. The PFWD is proposed as a fast method for the detection of compaction quality of stone-filled roadbed.

Key words: road engineering; stone-filled roadbed; rapid inspection; PFWD; porosity

随着中国中西部地区公路建设的快速增长,在山岭地区高速公路修建中进行深挖路堑或隧道施工都会产生大量碎石、块状石料。这些碎石、块状石料常作为路基填筑的主要材料^[1]。但填石路基的

压实质量控制一直是施工过程中的难题。现行规范《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)主要使用孔隙率和施工过程中沉降差作为填石路基压实质量控制的主要指标^[2]。孔隙率检测主要为灌

收稿日期:2021-05-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600200);国家自然科学基金项目(51878076);道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(kj180402)

作者简介:李盛(1980—),男,长沙理工大学教授。

水法,需现场开挖试坑。该法的填石料开挖难度大,要降低测量误差值,则需增大试坑面积,费事费力。沉降差检测方法不能快速获得检测结果,影响填石路基的施工进度。目前,国内外学者对填石路基压实质量的快速检测方法展开了大量研究。李泽闯等人^[3]采用便携式落锤弯沉仪(portable falling weight deflectometer, 简称为PFWD)检测土石路堤的回弹模量,将检测的每段经碾压过的土石路堤的回弹模量值与实际测量的沉降差进行线性拟合并检验,发现所得参数的相关系数都在0.86以上,表明回弹模量与沉降差之间具有良好的线性关系。张军辉等人^[4]采用PFWD、动态圆锥贯入仪(dynamic cone penetrometer, 简称为DCP)等仪器对既有路基性能进行了检测,对比各检测手段的特点和精度,提出采用PFWD对路基性能进行快速检测的方法。孙璐等人^[5]针对含砾石的黏土路基和含碎石的黏土路基的性能监测,给出了PFWD和贝克曼梁的经验回归公式和神经网络模型。ZHANG等人^[6]提出了黏弹性算法,提高了运用PFWD方法进行弹性模量反算的准确性。张恺等人^[7]对不同花岗岩风化料路基进行了PFWD检测,并将其检测结果与贝克曼梁法及承载板法进行了对比研究,发现路基动静模量与动静弯沉之间存在相关关系。陈龙旭等人^[8]采用现场对比试验和数值分析方法研究了回弹弯沉和动态回弹模量之间的关系,研究结果表明PFWD与贝克曼梁法的检测结果具有良好的相关性。孙璐等人^[9]挖掘了PFWD荷载及弯沉时程曲线的动态信息,构建了路基压实度的回归模型,并将其与传统检测方法进行比较,证明了所建立模型的有效性。王龙等人^[10]采用PFWD检测了路基变形模量,建立了碎石土路基沉降差与变形模量之间的关系,发现PFWD可快速、有效地评价碎石土路基的压实状态。查旭东^[11]提出PFWD现场快速检测步骤,建立了PFWD模量与承载板回弹模量、贝克曼梁及FWD模量之间的相关关系。王龙等人^[12]对PFWD冲击荷载的影响参数以及参数配置进行研究,计算出了不同PFWD配置下的基层结构适宜检测的深度。程坤^[13]使用幂函数对PFWD模量与压实度进行相关性分析,发现当判定系数大于0.7时,两者的相关性良好。

这些研究都表明:PFWD与孔隙率常规控制指标具有一定相关性,但对填石路基压实质量快速检

测方法的可靠性研究则鲜见。因此,本研究拟依托广连高速公路TJ09标填石路基试验段为工程背景,采用PFWD、水袋法等方法对该路基进行检测,分析PFWD测量的回弹模量、回弹弯沉与孔隙率之间的相关性。对比分析这两种方法在填石路基压实质量检测过程中的优缺点,验证PFWD在填石路基压实质量快速检测中的可行性,以期类似工程提供借鉴。

1 检测方法与测试原理

PFWD是在落锤式弯沉仪(falling weight deflectometer, 简称为FWD)的基础上研发的一种新型快速检测设备。具有易携带、操作简单、测试速度快、数据处理精确、自动化程度高、使用范围广等特点。PFWD由加载系统、数据采集系统和数据传输系统三部分组成,如图1所示。工作原理为固定质量(10 kg或15 kg)的落锤提升至固定高度后释放,自由下落的落锤冲击承载板产生冲击荷载。在冲击荷载作用下,承载板产生竖向位移,压力传感器和位移传感器记录荷载和位移。PFWD产生的荷载为落锤式冲击荷载,作用时间短,一般在20 ms内,路基来不及产生塑性变形,可近似认为仍处于弹性状态,其产生的竖向变形以回弹变形为主。因此,可通过线弹性理论对路堤模量进行计算,采用圆形垂直刚性分布荷载作用的下弹性半空间理论,分析路基动态回弹模量,计算公式为:

$$E_p = \frac{\pi p a (1 - \mu^2)}{2l} \quad (1)$$

式中: E_p 为路基模量值; p 为实测承载板的压力峰值; a 为承载板半径; μ 为泊松比; l 为承载板中心的实测弯沉峰值。

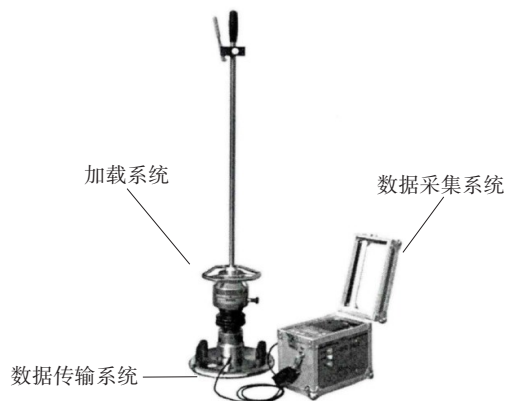


图1 PFWD系统

Fig. 1 The PFWD system

使用PFWD进行现场快速检测,主要分为准备、测试和结束三个步骤,其工作流程如图2所示。

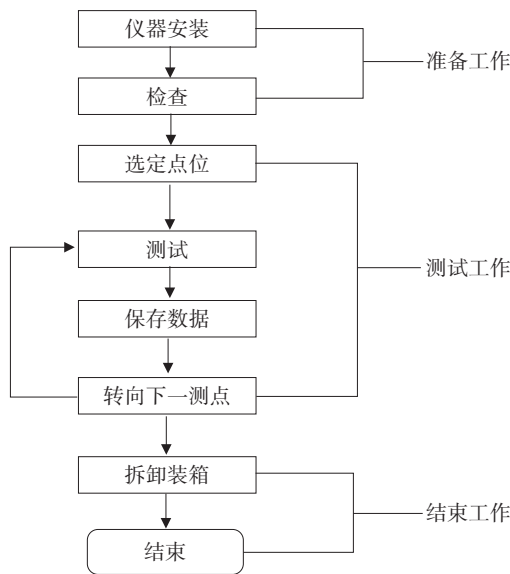


图2 PFWD测试流程

Fig. 2 The PFWD test flow chart

2 工程概况及压实器械

广连高速公路起于广州市从化区鳌头镇五丰村,连接佛清从高速公路北段,北经广州从化区、清远清城区、佛冈县、英德市、阳山县和连州市,终点为清远连州市大路边镇凤头岭(粤湘界),顺接湖南省衡临高速公路。其中,TJ09(K136+211.6~K154+652.5)标段路线起于阳山县青莲镇峡头村桂岩附近,向西北经新田,设新田隧道,经庙化至中心村盐田,设盐田隧道,跨越省道S525后经倒流洞、麻子塘,于青莲镇区北侧设青莲互通线后转北,跨越青莲河后至深塘村鱼梁头,设高峰隧道穿越山岭,路线全长18.441 km,三座隧道总长度达5.510 km,为该标段长度的29.9%。该标段存在大量岩质隧道和路堑边坡爆破作业,形成大量的大粒径碎砾石。为节约工程造价,缩短施工周期,这些碎砾石在破碎处理后,作为该试验填石路基的填筑原材料。

本研究试验路段为K148+510~K148+680的填

石路基段,其填石料主要为硬质岩石,是弱风化灰岩隧道的弃渣,其单轴饱和抗压强度平均值为65 MPa,其平均填方高度为6~10 m。选取有代表性的填料进行筛分试验,填料颗粒级配见表1~2。

表1 粗粒筛分结果

Table 1 Results of coarse screening

粒径/mm	小于该粒径土质量百分比/%	占总土质量分数/%
200.000	100.00	100.00
60.000	100.00	100.00
40.000	58.80	58.80
20.000	26.94	26.94
10.000	13.75	13.75
5.000	6.30	6.30
2.000	3.99	3.99

表2 细粒筛分结果

Table 2 Results of fine screening

粒径/mm	小于该粒径土质量百分比/%	占总土质量分数/%
2.000	100.00	3.99
1.000	48.58	1.94
0.500	38.07	1.52
0.250	31.53	1.26
0.075	16.19	0.65

该试验路段采取分层填筑的压实方式,具体填筑参数见表3,压实机械型号及参数见表4。

表3 试验段路基填筑参数

Table 3 Subgrade filling parameters of test section

位置	路面至底面距离/m	填料类型	最大粒径	摊铺层厚/mm
上路床	0~0.3	碎石	<100 mm 且 <2/3 层厚	150~300
下路床	0.3~1.2	碎石	<100 mm 且 <2/3 层厚	200~300
上路堤	1.2~1.9	硬质石料	≤150 mm 且 <2/3 层厚	300~400
下路堤	>1.9	硬质石料	<2/3 层厚	400~600

表4 压路机型号及参数

Table 4 Roller models and parameters

型号	质量/t	振动轮尺寸/mm	激振力/kN	振幅/mm	振动频率/Hz	碾压速度/(km·h ⁻¹)
柳工CLG6226E	26	1 600(直径)×2 130(宽)	400	2.0	33	4~6

3 填石路基压实质量快速检测方法

3.1 现场试验段检测

为控制其填筑压实质量,检测填石路基试验路段的填筑沉降差。先采用PFWD对已完成路基进行无损检测,再采用水袋法检测其孔隙率,将孔隙率作为该路段的控制指标和验收标准。

在总长为170 m试验路段的左幅每隔30 m选取一个截面,每截面的左路肩和3个行车道处各布置一个PFWD测点,每截面共4个测点,全试验路段共20个测点,每测点取3组稳定数值,取其平均值作为该点实测值。现场检测结果见表5,测点示意图如图3所示。

表5 现场检测结果

Table 5 Field test results of test section

桩号	序号	PFWD 检测数据		孔隙率/%
		模量/MPa	回弹弯沉/ (0.01 mm)	
K148+535	1	137.563	67.717	17.8
	2	153.811	60.564	16.4
	3	149.637	62.253	15.4
	4	108.337	85.985	19.4
K148+565	5	151.672	61.418	16.9
	6	125.338	74.322	17.5
	7	155.653	59.870	15.9
	8	134.988	69.009	16.7
K148+580	9	111.698	83.398	18.3
	10	98.839	94.248	21.4
	11	87.556	106.394	19.7
	12	109.420	85.134	20.8
K148+605	13	151.672	61.418	17.9
	14	153.228	60.794	15.3
	15	167.694	55.555	14.8
	16	158.566	58.748	15.2
K148+635	17	122.774	76.184	17.6
	18	144.931	64.275	17.3
	19	141.561	65.753	18.4
	20	119.865	75.855	19.9

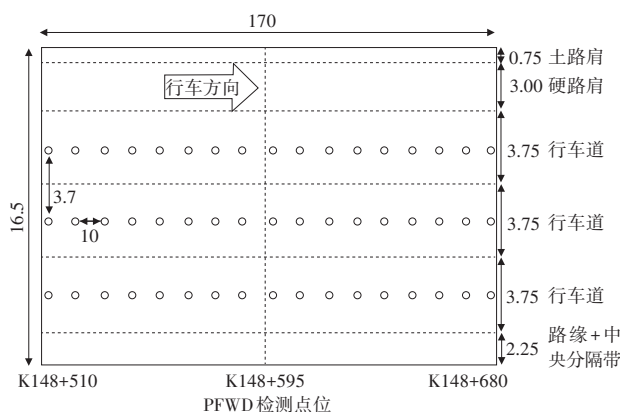


图3 PFWD测点分布(单位:m)

Fig. 3 Distribution of the PWD measuring points(unit:m)

3.2 试验数据分析

计算 PFWD 检测模量和回弹弯沉的变异系数, 具体见表 6。由表 6 可知, 模量的变异系数比回弹弯沉的变异系数小, 这说明模量实测数据的离散程度更小, 更稳定。应用 Origin 数据分析软件分别对 PFWD 模量、回弹弯沉与孔隙率进行回归分析。分别采用线性回归、指数回归和对数回归模型进行拟合。回弹弯沉与孔隙率相关关系如图 4 所示, 模量与孔隙率相关关系如图 5 所示。回弹弯沉与孔隙率的拟合公式见表 7, 模量与孔隙率的拟合公式见表 8。

表6 模量及回弹弯沉变异系数

Table 6 Modulus and coefficient of variation of rebound deflection

检查项目	检测点数/个	标准差	变异系数
模量	20	22.46	0.167
回弹弯沉	20	13.58	0.190

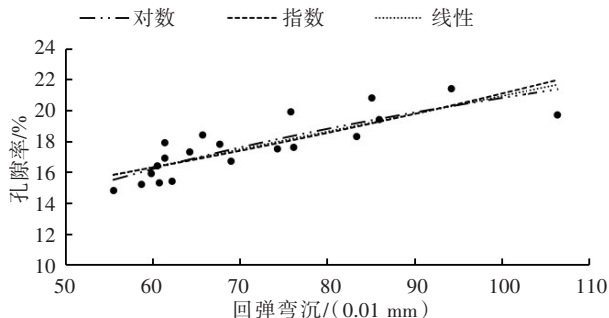


图4 回弹弯沉与孔隙率相关关系

Fig. 4 Correlation between rebound deflection and porosity

表7 回弹弯沉与孔隙率拟合公式

Table 7 The fitting formula of rebound deflection and porosity

回归方式	拟合公式	相关性 R^2
线性回归	$n = 0.115\,3l + 9.393\,7$	$R^2=0.681\,2$
指数回归	$n = 11.06\,6e^{0.006\,4l}$	$R^2=0.672\,9$
对数回归	$n = 9.021\,8\ln(l) - 20.742$	$R^2=0.716\,8$

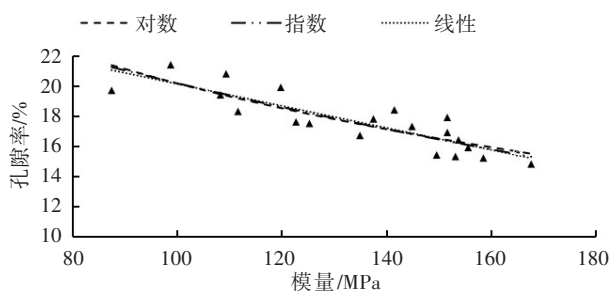


图5 模量与孔隙率相关关系

Fig. 5 Correlation between modulus and porosity

表8 模量与孔隙率拟合公式

Table 8 Fitting formula of modulus and porosity

回归方式	拟合公式	相关性 R^2
线性回归	$n = -0.0731E + 27.442$	$R^2=0.7493$
指数回归	$n = 30.43e^{-0.004E}$	$R^2=0.7482$
对数回归	$n = -9.061 \ln(E) + 61.894$	$R^2=0.7274$

从表7可知,相较于线性回归模型和指数回归模型,对数回归模型的回弹弯沉 l 与孔隙率 n 之间相关系数 R^2 最大,为0.7186,这说明回弹弯沉和孔隙率之间呈正相关关系,即回弹弯沉越大,孔隙率越大,路基压实质量也越差。 R^2 大于0.7,表明回弹弯沉值与孔隙率之间存在良好的相关关系。从表8可知,三种回归模型的回归系数 R^2 均大于0.7,这表明PFWD测得的模量值 E 与路堤孔隙率 n 具有较强的相关关系。其中,线性回归方程的 R^2 最大,这表明PFWD测得模量值与孔隙率之间采用线性模型拟合最为准确。PFWD所测得的模量值 E 与路堤孔隙率 n 之间呈负相关的关系,即模量值 E 越大,路基的孔隙率 n 越小,路基压实质量越好。

3.3 填石路基压实质量快速检测方法确定

填石路基压实质量是路基整体质量控制的关键,现行规范《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)采用孔隙率作为路基压实质量的控制指标。水袋法检测需要4~5人,耗时约30 min;而PFWD检测只需2人,耗时仅为5 min。在实际工程实践中,由于填石路基填石料特性,传统的水袋法开挖试坑难度大,费时费力,需要较多操作人员,检测效率低下;PFWD监测法更为便捷。因此,建议填石路基压实质量的快速检测优先选择PFWD。若采用回弹弯沉值作为质量控制指标,则建议采取拟合程度最高的对数回归模型进行检测,当产生不合格测量结果时,应用水袋法进行补测,验证其准确性,

并根据水袋法结果修正回归公式,提升PFWD检测方法的准确率。

4 结论

本研究以广连TJ09标段填石路基试验段为工程背景,分别采用PFWD和水袋法对路基的压实质量进行检测,建立了PFWD检测结果和其他检测指标参数与孔隙率之间的回归公式,验证了PFWD检测填石路基压实质量的可行性。

1) 运用PFWD检测回弹弯沉值进行路基压实质量快速检测,应使用拟合程度最高的对数回归模型,提高其反算的准确性。

2) 三种回归模型下PFWD测得的回弹模量值与水袋法测量的孔隙率均有较好的相关关系(相关系数 $R^2>0.7$),均可用于填石路基压实质量的快速检测。

3) 该试验段实际检测回弹模量和回弹弯沉数据的变异系数分别为16.7%、19.0%,这表明回弹模量 E 的变异程度小于回弹弯沉的变异程度,结合回弹模量 E 和回弹弯沉与现行填石路基压实控制指标孔隙率的拟合程度,建议采用PFWD检测回弹模量 E 应用于填石路基压实质量的快速检测。

4) PFWD设备拆卸组装迅速,携带方便,不受检测场地及运输的影响,测试速度快,包括设备组装时间在内,2人仅需5 min即可完成测试工作,有效地提高了路基压实检测效率。

参考文献

- [1] 张军辉,丁乐,张安顺.建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J].中国公路学报,2021,34(10):135-154. (ZHANG Junhui, DING Le, ZHANG Anshun. Application of recycled aggregates from construction and demolition on waste in subgrade engineering: a review [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (10): 135-154. (in Chinese))
- [2] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015. (CCCC Second Highway Consultants CO., LTD.. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [3] 李泽闯,程培峰,胡志文,等.土石路堤压实质量控制与

- 碾压动力响应模拟分析[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(4): 33-41. (LI Zechuang, CHENG Peifeng, HU Zhiwen, et al. Compaction quality control and rolling dynamic response simulation analysis of earth-rock embankment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4): 33-41. (in Chinese))
- [4] 张军辉, 邓宗煌, 刘杰, 等. 南方湿热地区既有路基快速检测方法研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 6-10. (ZHANG Junhui, DENG Zonghuang, LIU Jie, et al. Research on rapid detection method of existing roadbed in hot and humid region of South China [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 6-10. (in Chinese))
- [5] 孙璐, 王登忠, 张惠民. 基于便携式落锤动力弯沉的路基弯沉预测模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 970-974. (SUN Lu, WANG Dengzhong, ZHANG Huimin. Predictive models of subgrade deflection using data from portable falling deflectometer [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 970-974. (in Chinese))
- [6] ZHANG R, REN T Z, KHAN M A, et al. Back-calculation of soil modulus from PFWD based on a viscoelastic model [J]. Advances in Civil Engineering, 2019(11): 1316341.
- [7] 张恺, 姚占勇, 庄培芝, 等. 便携式落锤弯沉仪在花岗岩风化料路基检测中的应用[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 19-21. (ZHANG Kai, YAO Zhanyong, ZHUANG Peizhi, et al. Application of portable falling weight deflection instrument in detection of granite weathered subgrade [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(3): 19-21. (in Chinese))
- [8] 陈龙旭, 雷润杰, 喻雅琴, 等. 便携式落锤弯沉仪在湘西风化红砂岩路基模量检测中的应用[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(3): 5-7, 64. (CHEN Longxu, LEI Runjie, YU Yaqin, et al. Application of PFWD in resilient modulus detection of weathered red sandstone subgrade in Xiangxi [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2018, 44(3): 5-7, 64. (in Chinese))
- [9] 孙璐, 王登忠. 基于便携式落锤弯沉仪动态弯沉的路基压实度无损检测与评估[J]. 公路交通科技, 2012, 29(12): 41-47. (SUN Lu, WANG Dengzhong. Nondestructive detection and evaluation of subgrade compaction using data from portable falling deflectometer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(12): 41-47. (in Chinese))
- [10] 王龙, 解晓光, 姜立东. 基于PFWD碎石土路基压实快速检测与均匀性评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 66-71. (WANG Long, XIE Xiaoguang, JIANG Lidong. Compaction quality fast detection and compaction uniformity evaluation of gravel soils subgrade based on PFWD [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2): 66-71. (in Chinese))
- [11] 查旭东. PFWD快速检测路基模量研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(1): 26-30. (ZHA Xudong. Study of rapid test of subgrade modulus with PFWD [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(1): 26-30. (in Chinese))
- [12] 王龙, 夏浩然. PFWD冲击荷载的影响深度及参数配置[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(9): 62-67. (WANG Long, XIA Haoran. Analysis on the action depth of PFWD impact load and parameters configuration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 62-67. (in Chinese))
- [13] 程坤. 基于PFWD的路基施工质量快速检测技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017. (CHENG Kun. Research on rapid testing technology of subgrade construction quality based on PFWD [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017. (in Chinese))
- (责任编辑: 刘国奇; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)