

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.156

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 土石路堤压实质量控制与碾压动力响应模拟分析

李泽闯<sup>1</sup>,程培峰<sup>1</sup>,胡志文<sup>1</sup>,郑俊杰<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 华中科技大学 岩土与地下工程研究所, 武汉 430074)

**摘要:**以国道丹阿公路省界(琿春)至东宁段改扩建工程为依托,选取具有代表性的土石混填路堤施工路段,研究得到不同松铺厚度、不同碾压遍数下土石路堤变形与压实特性,采用沉降差控制指标确定以强、中风化凝灰岩为主要填料的土石路堤压实现场施工工艺;同时采用便携式落锤弯沉仪(PFWD)对土石路堤动回弹模量 $E_{vd}$ 进行检测,将每遍碾压后土石路堤的 $E_{vd}$ 值与沉降差做线性拟合,拟合后的相关系数都在0.86以上,说明 $E_{vd}$ 值与沉降差有良好的线性相关性;并运用有限元理论建立土石路堤三维数值模型,进行振动荷载作用下路堤动力响应分析,分析了振动压路机对路基的压实效果及影响深度,发现竖向动应力沿深度方向衰减速度有先快后慢的趋势,32 t压路机振动压实过程可对下压实层有反复补强压实作用,通过方差分析得到压路机振动频率因素对土石混填路堤振动压实影响的显著程度大于振幅激振力因素。

**关键词:**土石路堤;落锤弯沉仪;压实;动力响应;数值模拟

**中图分类号:**TU435 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0033-09

## Compaction quality control and rolling dynamic response simulation analysis of earth-rock embankment

LI Zechuang<sup>1</sup>, CHENG Peifeng<sup>1</sup>, HU Zhiwen<sup>1</sup>, ZHENG Junjie<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, P. R. China; 2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

**Abstract:** The representative earth-rock embankment construction section in the reconstruction and expansion project of the National Highway Dana Highway from the provincial boundary (Hunchun) to Dongning was selected to study the deformation and compaction characteristics of the earth-rock

**收稿日期:**2020-07-31

**基金项目:**黑龙江省自然科学基金(LH2019D001);中国博士后科学基金(2018M631895);黑龙江省博士后资助经费(LBH-Z18001);中央高校基本科研业务费专项资金(2572018BJ02);黑龙江省交通运输厅科技项目(HLJ2019002)

**作者简介:**李泽闯(1990-),男,博士,主要从事岩土工程与交通运输工程研究,E-mail:lzc@nefu.edu.cn。

程培峰(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:chengpeifeng@nefu.edu.cn。

**Received:**2020-07-31

**Foundation items:** Heilongjiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LH2019D001); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M631895); Heilongjiang Provincial Postdoctoral Science Foundation (No. LBH-Z18001); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2572018BJ02); Heilongjiang Provincial Department of Transportation Science and Technology Project (No. HLJ2019002)

**Author brief:** LI Zechuang (1990-), PhD, main research interests: geotechnical engineering and transportation engineering, E-mail: lzc@nefu.edu.cn

CHENG Peifeng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: chengpeifeng@nefu.edu.cn.

embankment under different loose paving thicknesses and different rolling cycles. In particular, the differential settlement control index was used to determine compaction construction technique of earth-rock embankment with main packing filler of highly-weathered and medium-weathered tuff. Portable falling weight deflectometer (PFWD) was used to detect dynamic elastic modulus ( $E_{vd}$ ) of earth-rock embankment. The  $E_{vd}$  value and differential settlement of earth-rock embankment after each rolling are linearly fitted. All correlation coefficients are above 0.86, which indicates that the  $E_{vd}$  value has a good linear correlation with the differential settlement. The finite element theory was used to establish a three-dimensional numerical model of the earth-rock embankment to analyze the dynamic response of the embankment under the action of vibration load. The compaction effect and influence depth of the vibratory roller on the roadbed was analyzed. It is found that the attenuation rate of the vertical dynamic stress along the depth direction tends to be initially fast and turns slow thereafter. The vibratory compaction process of a 32-ton roller can repeatedly strengthen and compact the lower compaction layer. Variance analysis indicates that the influence of roller vibration frequency on vibration compaction of earth-rock mixed embankment is greater than the amplitude excitation force.

**Keywords:** earth-rock embankment; falling weight deflectometer; compaction; dynamic response; numerical simulation

公路路堑施工等活动会造成大量的砾、碎石及块石材料,为了综合考虑社会及经济效益,往往将这些砾、碎石及块石作为填筑路堤的主要材料<sup>[1]</sup>。通过调研土石混填路堤施工现场和搜集数据资料发现,当前缺乏具体的技术规范来指导土石路堤施工压实质量检查,一些施工人员采用不合适的质量检测标准和方法,导致压实过程中碾压遍数控制不严,压实条件达不到的现象,可能会造成较大的工后沉降。由此可见,确定合理的土石路堤施工工艺尤为重要。

现行规范只规定了细粒土材料填筑路堤的方法和要求,针对土石混填路堤目前还没有完善的技术手段和统一的技术要求<sup>[2]</sup>。何兆益等<sup>[3]</sup>以万州机场高填土石路堤为研究对象,提出碾压沉降量、碾压遍数和松铺厚度是控制土石混填路堤压实质量的有效指标。参照行业规范<sup>[4-6]</sup>中土石路堤施工过程中质量控制方法说明,目前,土石混填路基施工现场压实质量主要用沉降差指标(压实机械按规定参数碾压两遍,所得各点的高程差)进行检测。然而,沉降差的检测方法比较费时费力,无法快速获得结果,影响土石路堤施工进度。

近年来,便携式落锤弯沉仪(简称 PFWD)在公路路基模量与压实度检测中得到了广泛应用<sup>[7-8]</sup>。George 等<sup>[9-10]</sup>探讨 PFWD 法、CBR 法和 DCP 法测得的结果之间的相关性,提出根据 PFWD 结果推测 CBR 值,以及根据 DCP 结果来预测 PFWD( $E_{vd}$ )值。

王复明等<sup>[11]</sup>建立了土石混合填料的压实度指标与动回弹模量  $E_{vd}$  值之间的 BP 神经网络模型,证实可以用 PFWD 测试方法快速检测土石混填路基的压实质量。孙璐等<sup>[12]</sup>通过研究分析 PFWD 锤击时程曲线,构建出可反映路基压实度的回归预测模型。王龙等<sup>[13-14]</sup>借助水准仪和 PFWD 定点采集了碎石土路基的沉降差和  $E_{vd}$  值,建立了  $E_{vd}$  和沉降差指标的相关关系,证实  $E_{vd}$  值能够较好地反映路基的压实效果。张军辉等<sup>[15]</sup>提出了 PFWD 用于快速检测路基性能的方法。在研究土石混填路堤现场压实施工质量时发现,往往无法掌握碾压参数对填筑层压实度的影响规律,例如,测试数据的离散性大,沿深度方向振动应力规律把握不准<sup>[16-17]</sup>。用计算机进行仿真模拟是解决这类问题的较好方法,可模拟分析压路机振动碾压引起土石路堤动力响应现象<sup>[18-19]</sup>。周忠等<sup>[20]</sup>阐明宕渣松铺厚度、碾压遍数对碾压效果的影响规律,提出了最佳松铺厚度和碾压遍数。方磊等<sup>[21]</sup>分别模拟了振动压路机施工过程中不同的振动频率、不同激振力及不同碾压遍数情况下填石路基的压实效果,研究表明,振动能量、振动频率及遍数之间对填石路堤的压实效果有最佳组合。丁智勇等<sup>[22]</sup>利用离散元法模拟分析了填石路基的振动压实过程。目前,对于土石混填路堤压实效果及碾压过程中路堤动力响应方面的研究较少。

笔者的研究主要包括土石混填路堤的施工工艺、基于 PFWD 的  $E_{vd}$  检测和现场碾压工况数值模

拟。土石路基施工工艺研究主要为通过表面沉降差方法确定土石填料松铺厚度、碾压方式和遍数组合;基于PFWD的 $E_{vd}$ 检测主要研究用PFWD检测土石路堤回弹模量 $E_{vd}$ 值,根据 $E_{vd}$ 和沉降差测量结果相关性的量化分析,建立 $E_{vd}$ 和沉降差对应关系;现场碾压工况模拟研究主要是用有限元软件Midas GTS建立三维数值分析模型,通过输入动态振动荷载函数模拟施加32 t压路机振动碾压施工工况,通过现场沉降差测试结果验证模型的准确性,研究振动压实过程中土石路堤产生的动力响应,分析路堤中的动位移变化过程和动应力衰减规律,并探索振动频率、振幅激振力因素对碾压过程压实效果影响的显著程度。

## 1 工程概况

依托国道丹阿公路省界(琿春)至东宁段改扩建工程,位于黑龙江省东宁市中东部地区,该路线主线全长99.337 km。通过实地勘察,选取A3标段(施工里程K70+000~K95+241段)内K81+700~K81+900新线区域,线位位于山坡半坡,地势较高,拟建为一级公路。该路段所经地区地层为第四系残坡积层(Q<sup>del</sup>),主要岩性为粉质黏土、碎石、角砾;三叠系上统罗圈站组(T<sub>31</sub>)地层,主要岩性为全风化、强风化、中风化凝灰岩,其中,强、中风化凝灰岩用作填筑路堤填料。

研究区域路基左幅为挖方段落,右幅为陡坡路基填方段落,填方段为土石混填路堤,平均填高为6~12 m,选取有代表性的填料进行筛分试验,填料土石比为28:72左右,大于40 mm的粗粒平均含量为45.7%,最大粒径为8 cm,填料颗粒级配情况如图1所示。

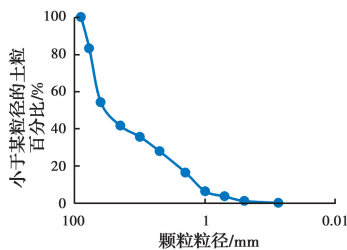


图1 土石填料颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of earth-rock fill material

鉴于填料粒径大、铺层厚的压实作业需求,研究选用32 t重型振动压路机,工作参数见表1。

表1 振动压路机部分参数

Table 1 Partial parameters of the vibratory roller

压路机	振动轮	激振频	振幅激	振动轮	振动轮
自重/kg	质量/kg	率/Hz	振力/kN	宽度/m	直径/m
32 000	21 000	28	450	2.18	1.75

## 2 土石路堤施工工艺及压实质量控制

### 2.1 碾压施工流程及工艺参数

土石路堤压实质量采用沉降差指标和外观质量<sup>[4]</sup>进行检测,压实标准为压实沉降差平均值须小于5 mm,标准差须小于3 mm;并保证路基表面没有明显孔洞,大粒径填石连接紧密无松动。并结合行业规范<sup>[6]</sup>要求,在桩号K81+700-K81+900范围内修筑土石混填路基试验路段确定工艺流程和工艺参数控制。

松铺层厚因素选定为35、45、55 cm 3种水平,沿道路纵向向上每20 m选取一个检测断面,每个断面上布设2个沉降量观测点,观测点的间距选取为3~5 m,如图2所示。选用直径30 cm、厚度15 mm的圆形钢板作为沉降量观测点(钢板采用Q345型高强度钢定制制作,板中心焊接3.5 mm的凸起点,使用圆形钢板中心作为控制点),钢板在使用前先经过压路机充分碾压,保证其正式测量时的几乎不变形。填筑层左右两处钉圆形木桩,进行挂线,标出填筑的松铺高度,各松铺厚度试验段上各选取2个测量断面,即各松铺厚度试验段有4个沉降测点。土石路堤碾压试验令振动压路机静压1遍,碾压速度为4 km/h,大致整平碾压工作面,然后振动碾压6遍,碾压速度为4 km/h,即“一静六振”碾压方法。

每遍碾压完成后,采用高精度徕卡自动读数水准仪(观测精度精确到0.1 mm)测定各沉降测点的高程,计算出各测点的沉降差,得到不同碾压遍数下分级沉降量平均值和累计沉降量平均值关系曲线图(见图3)。由图3可知,随土石填料松铺厚度增加,7次碾压的累计沉降量变大。随振动压路机碾压遍数不断增加,各松铺厚度(35、45、55 cm)下土石填料沉降规律基本一致,即碾压开始沉降量较大,之后变缓逐渐趋于稳定。

当土石混合填料松铺厚度为35、45 cm时,静压1次和振动碾压5次后,填筑路堤表面平整、无明显轮痕,沉降差分别为2.71、2.95 cm,标准差分别为



1.33 和 1.15, 压实层达到稳定状态, 压实度满足要求, 再增加碾压遍数效果不佳, 第 6 遍振动碾压为过度碾压, 个别沉降观测点出现向上位移, 即路基部分地段出现的回弹变形, 使铺层材料反而变得松散; 当土石混合填料松铺厚度为 55 cm 时, 静压 1 次和振动碾压 6 次后, 沉降量仍不满足要求。试验确定的以强、中风化凝灰岩为主构成的最大粒径为 80 mm 的土石填料(填料土石比为 28:72 左右)的最佳施工流程和工艺参数为建议土石混填路堤松铺厚度 45 cm, 松铺后压路机以 4 km/h 速度静压 1 次, 再以 4 km/h 速度振动压实 5 次, 即“一静五振”碾压方法。



图 2 土石路堤试验段施工工艺

Fig. 2 Compaction construction technology of earth-rock embankment

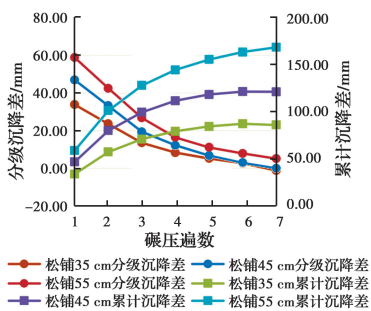


图 3 不同碾压遍数下各松铺厚度的分级沉降量和累计沉降量曲线图

Fig. 3 Graded settlement and accumulative settlement for each loose laying depth under different rolling times

## 2.2 基于 PFWD 的 $E_{vd}$ 检测

为了研究 PFWD 仪器快速无损检测方法的测试效果, 在沉降监测点周围附近布设 PFWD 测点

(距离沉降监测点 < 10 cm 范围内), 并用喷漆做上标记, 如图 2 所示。

在上述每遍压实结束后, 使用 PFWD 测试相应点的  $E_{vd}$  值。为消除塑性变形对测试结果的影响, 每个点位进行 6 次锤击测试, 前 3 次为预压, 不记录测试数据, 第 4 次锤击后记录每次测试的荷载和位移时程曲线, 并由此计算该点位的动态模量值。分析得到土石路堤试验段松铺厚度 45 cm 时 4 个测点的  $E_{vd}$  值, 绘制出每遍碾压后  $E_{vd}$  的箱型图(见图 4), 对  $E_{vd}$  数据进行统计分析, 图中箱体中的“×”为每遍数据中的平均值。

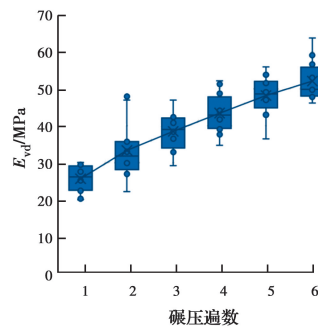


图 4 6 次压实作用下各测点的  $E_{vd}$  箱型图

Fig. 4  $E_{vd}$  box plot of each measuring point under the six rolling times

由不同碾压遍数的各测点  $E_{vd}$  值箱型图可见 PFWD 现场测试  $E_{vd}$  值离散性较大。第 1 遍碾压后得到的  $E_{vd}$  数值箱体较扁, 端线较短, 说明数据集中; 第 2 遍碾压后得到的  $E_{vd}$  数值中出现一个异常点; 第 3、4 遍碾压后,  $E_{vd}$  数值箱形图的最大值、上四分位数、中位数、下四分位数和最小值的间距较接近, 说明  $E_{vd}$  分布是比较对称第 2、5、6 遍碾压后, 端线较长, 说明  $E_{vd}$  数据较离散。从图 4 可看出,  $E_{vd}$  的中位数和平均值随碾压遍数的增加持续增加。

为找出 PFWD 所测得的动回弹模量  $E_{vd}$  与沉降差的关系, 考虑取不同松铺厚度(35、45、55 cm)碾压 6 遍的土石路堤压实沉降差与  $E_{vd}$  值测试结果, 绘制散点图, 根据一元线性回归法对试验数据进行回归分析, 如图 5 所示。从线性拟合结果来看,  $E_{vd}$  值与沉降差有较好的线性相关性(3 种松铺厚度条件下拟合方程的相关系数  $R^2$  均大于 0.86), 可以建立其线性方程式。由此可见动回弹模量  $E_{vd}$  值不仅能够反映土石路堤的刚度大小, 还与沉降差指标存在线性对应关系, 即通过拟合方程式可得到  $E_{vd}$  相对应的沉降差值, PFWD 可作为路堤质量检测的辅助手段。

鉴于 PFWD 检测速度快特点,对于土石路堤压实质量控制,宜用沉降差控制法对大面积代表性的测点进行检测,合格后,再进行测点密布的 PFWD 检测,用于精细化质量控制,发现小面积不合格现象,立即进行补强处理。此检测方法会节省大量检测时间,可在有限的施工周期使施工成本达到最优化。

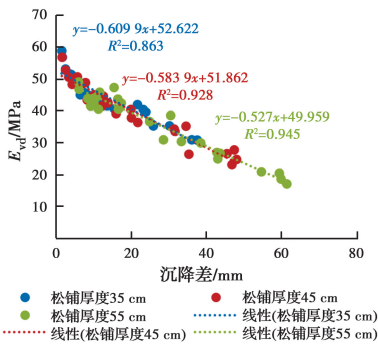


图 5 土石路堤沉降差与  $E_{vd}$  值回归曲线

Fig. 5 Regression curve of differential settlement and  $E_{vd}$  of earth-rock embankment

### 3 土石路堤动力响应模拟分析

#### 3.1 数值分析模型建立

为了分析振动压路机对路堤土石填料的压实特性,选取 K81+700~K81+900 中典型位置,建立如图 6 所示的三维有限元模型,忽略剖面形状对碾压作用的影响,将模型形状设定为长方体。将填筑的土石路堤进行简化,共分为 2 层,如图 6 所示,①为待压实层(紫色、蓝色和黄色标注区域),厚度为 0.45 m,沿荷载移动方向上设荷载作用带(蓝色标注区域),作用带沿路基横向的宽度为压路机碾压轮宽(2.18 m),荷载作用带沿路基纵向长度为振动压路机行驶距离(5.024 m)。②为压实层(橙红色标注区域),厚度为 6.55 m。模型宽度为 6.5 m。取 Drucker-Prager 模型作为土体的本构模型,边界条件用地面曲面弹簧约束。

经数值模拟分析,施加前 5 次荷载(1 次静载 + 4 次振动荷载)后,数值模型地表形态与实际工程地表变形情况相符后,以此作为模型计算初始条件,模型所用的物理力学参数部分为实验室直接测得,部分由其他工程类比而来(表 2)。采用振动叠加法分析振动荷载条件下土石路堤内动力响应(位移和应力)的过程,即对土石路堤最后一次振动碾压过程进行时程分析。

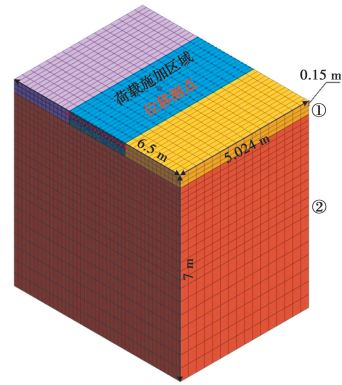


图 6 压路机碾压的土石路堤有限元模型

Fig. 6 Finite element model of earth-rock embankment

表 2 材料参数汇总表

Table 2 Summary statement of material parameters

材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $C/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
待压实层 (碾压第 6 遍前)	140	22	0.25	200	38
压实层	180	23	0.24	300	41

#### 3.2 振动压路机振动轮对土石路堤的作用力

振动轮是振动压路机最重要的部件,通过使振动轮内偏心块高速旋转形成相应的激振力,从而使振动滚轮对铺筑填料施加动荷载,以达到压实目的。当振动碾压时,振动轮作用在路堤上的荷载近似等于振动轮自重与偏心块旋转产生的竖向冲击力之和<sup>[20]</sup>,该振动作用力可表示为式(1)。

$$P(t) = G + F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

式中: $P$  为振动作用力; $G$  为振动轮自重, $F_0$  为振幅激振力; $\omega$  为振动轮的角速度; $t$  为时间。

$F_0 \sin \omega t$  即为竖向动态冲击力。 $\omega$  为振动轮的角速度, $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为频率,即  $F = F_0 \sin 2\pi ft$ , 振动作用力即为静荷载和正弦函数的叠加。对于 32 t 振动压路机(表 1)参数,即

$$P(t) = 210 + 450 \times \sin 56\pi t \quad (2)$$

式中: $P(t)$  的单位为 kN。

在碾压路堤过程中振动轮和填筑料表层接触面可近似成矩形,假定接触范围内振动作用力为均匀分布,即  $p(t) = P(t)/BL$ ,  $p(t)$  为接触均匀应力, kPa; $B$  为振动轮接地宽度; $L$  为振动轮的宽度。参照杨士敏和傅香如<sup>[23]</sup> 研究,压路机接地宽度  $B = (D/2) \sin \beta$ , 其中, $D$  为振动轮的直径, $\beta$  为振动轮转角, $\beta = 8.836B$ ,由上式算得  $B = 0.314$  m。由此算得

$$p(t) = 306.784 + 657.395 \times \sin 56\pi t \quad (3)$$

由于振动压路机在振动碾压工作过程中不可能

$$\begin{cases} p(t) = 306.784 + 657.395 \times \sin 56\pi t, & 306.784 + 657.395 \times \sin 56\pi t \geq 0 \\ p(t) = 0, & 306.784 + 657.395 \times \sin 56\pi t < 0 \end{cases} \quad (4)$$

振动压路机激振频率为 28 Hz, 振动 1 次的所需的时间为 0.035 7 s, 接地宽度  $B$  (即 0.314 m) 区域内路基在碾压一遍过程中受到压路机振动次数为 8 次。路堤压实过程中, 压路机以  $v$  的速度行驶, 接地宽度  $B$  范围内压路机施加的振动荷载可简化为均布荷载  $p(\Delta t)$ , 其中  $\Delta t$  为时间维度 ( $\Delta t = B/v$ )。经计算, 当行驶速度为 4 km/h 时,  $\Delta t$  为 0.283 s。假设压路机振动荷载为垂直均布矩形荷载, 模型沿荷载移动方向长度设为  $16B$ , 即 5.024 m, 则在荷载作用带沿荷载移动方向上细分为 16 个小矩形 (矩形面积  $0.314 \text{ m} \times 2.18 \text{ m}$ ), 振动荷载初始状态作用到第 1 个小矩形的面积上所有节点上, 随着时间推移, 荷载  $p(t)$  沿作用带逐渐向前移动, 荷载在每个小矩形上的作用时间为 0.283 s。

用施加节点动力的方式施加振动荷载时程曲线, 则数值模拟荷载作用带上每个小矩形所需施加振动荷载为

$$p(t) = 306.784 + 657.395 \times \sin 56\pi t \quad (\text{单位: kPa})$$

$$t \in [0, 0.020 617 \text{ s}] \cup [0.032 955 \text{ s}, 0.056 331 \text{ s}] \cup [0.068 669 \text{ s}, 0.092 045 \text{ s}] \cup [0.104 383 \text{ s}, 0.127 760 \text{ s}] \cup [0.140 097 \text{ s}, 0.163 474 \text{ s}] \cup [0.175 812 \text{ s}, 0.199 188 \text{ s}] \cup [0.211 526 \text{ s}, 0.234 903 \text{ s}] \cup [0.247 240 \text{ s}, 0.270 617 \text{ s}] \cup [0.282 955 \text{ s}, 0.283 \text{ s}] \quad (5)$$

振动荷载曲线图如图 7 所示。

### 3.3 振动压路机碾压路堤压实过程分析

3.3.1 沉降影响分析 通过模型计算, 碾压变形数值模型的沉降量 (1.12 mm) 与实测沉降差值 (2.95 mm) 接近, 计算精度高, 说明能较好地反映实际碾压情况。

经过 Midas GTS 计算之后, 图 7 为第 6 次碾压后的荷载施加区域中心点处的地表位移测点的沉降图。由图 7 可知, 在压路机振动荷载作用下, 路堤需要克服土体的阻尼而振动, 总体趋势来看, 动位移随时间增加平稳震荡并逐渐减小。路堤中动位移出现明显的多个峰值, 振动压路机行驶 0.048 5 s 时, 监测点出现第一个动位移峰值, 碾压层表面的动力响应最大, 动位移为 4.615 mm, 路堤地表中心动位移幅值

对被压实填筑层施加拉力, 由此可知压路机对填筑层施加的振动应力  $p(t)$  为

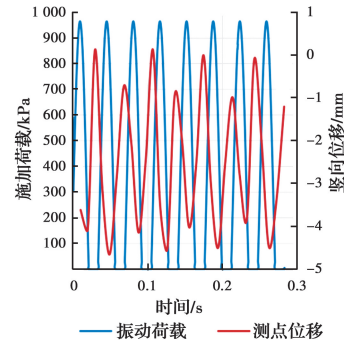


图 7 振动荷载曲线和第 6 次碾压后的地表测点竖向动沉降时程曲线图

Fig. 7 Vibration load curve and vertical dynamic settlement time history curve of the surface measuring point after the 6th rolling

大于下方测点的动位移。压路机通过后, 碾压层中动位移没有恢复到初始动位移, 出现不可恢复的变形量为 1.19 mm。由荷载峰值 964 kPa 与动位移峰值的位置关系可出, 动位移峰值皆晚于荷载峰值出现, 存在一定的时间滞后性。由图 7 可以看出, 在碾压过程中, 测点出现向上位移现象, 说明往复的振动作用, 在填筑层内部产生动应力, 减小颗粒间摩阻力, 使颗粒由静止的初始状态变为向上和向下的运动状态, 即迫使被压土石混填材料做垂直强迫振动。

分析竖向动应力沿深度衰减规律有利于研究土石路堤在 32 t 振动压路机振动碾压下的压实效果。数值结果表明, 竖向动应力 (应力值取自位移测点下深度为 0.15 m 处位置竖向应力) 随深度的增加而逐渐减小, 衰减速率由快变慢, 如图 8 所示。竖向动应力在深度 0.85 m 内衰减迅速, 从 0.15 m 处传至 0.85 m 处衰减了 78.4%, 竖向动应力在深度 0.85 m 以后衰减幅度变缓, 从 0.85 m 处传至 1.25 m 动应力仅衰减了 10.9%。说明动应力传递存在一个有效深度, 可认为 YZ32D 压路机影响深度在 0.85 m 范围内, 研究确定了松铺厚度为 45 cm, 可看到吨位压路机在碾压上层土体时, 还能对深度在 0.85 m 以内的先前层补强压实, 说明振动荷载可提高土石路基压实质量, 会减少路基工后沉降。

张志峰等<sup>[24]</sup>研究得到“振动轮引起的竖向应力



随土壤深度的增加迅速衰减,近似负幂函数衰减”;金书滨等<sup>[25]</sup>发现,动土应力值在竖向衰减很快,呈指数衰减,上述研究成果与图 8 中竖向动应力衰减规律相似,说明笔者建立的土石路堤三维数值模型符合实际情况。

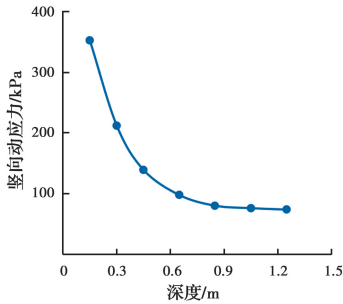


图 8 竖向动应力随深度分布图

Fig. 8 Relationship between vertical dynamic stress and depth

3.3.2 振动频率和振幅激振力对压实效果的影响

振动频率和振幅激振力作为振动压路机的主要参数,对压实质量有很大的影响。为分析振幅激振力和振动频率影响因素对压实效果的影响,设计 2 因子(振幅激振力和振动频率)3 水平的完全因子设计,振动频率选取 24、28、32 Hz 三水平,振幅激振力选用 390、450、510 kN,分为 9 种工况试验,通过建模计算,得到碾压过程中地表 0.15 m 深度处的竖向动应力峰值和地表沉降量峰值如表 3 所示。

表 3 9 种工况下土石路堤动力响应情况表

Table 3 Dynamic response of earth-rock embankment under 9 kinds of working conditions

序号	振动频率/Hz	振幅激振力/kN	地表下 0.15 m 深度处的竖向动应力峰值/kPa	地表沉降量峰值/mm
1	28	450	352.599	4.615
2	28	390	322.106	4.182
3	28	510	383.093	4.996
4	24	450	230.648	3.777
5	24	390	169.642	3.637
6	24	510	200.609	4.287
7	32	390	487.723	5.594
8	32	450	532.125	7.088
9	32	510	576.526	7.641

对试验结果进行方差分析,计算自由度、均方、 $F$  值和检验  $P$  值,判断各因素对压实度影响的显著程度,结果见表 4。

表 4 振动频率和振幅激振力因素的方差分析表

Table 4 Variance analysis of vibration frequency and excitation force factors

序号	响应(试验结果)	变差来源	$F$ 值	$P$ 值
1	地表下 0.15 m 深度处的竖向动应力峰值	振动频率/Hz	188.35	0.000
		振幅激振力/kN	6.72	0.053
2	地表竖向沉降量峰值	振动频率/Hz	36.84	0.003
		振幅激振力/kN	5.67	0.068

对试验结果进行  $F$  检验和  $P$  检验。经查询  $F$  分布表,对于给定的显著水平  $\alpha=0.05, F_{0.05}(1,2)=18.51$ 。从表中数据可以看出对于应力和沉降值的响应结果来看,振动频率的  $F$  值均大于 18.51,  $P<0.05$ ,按照  $\alpha=0.05$  水平,说明不同振动频率引起的竖向动应力和沉降值的总体均值间的差异有统计学意义,即有 99.5% 的把握判断振动频率对压实有显著的影响。而振幅激振力因素的  $F$  值均小于 18.51,且  $P>0.05$ ,说明压路机的振幅激振力对于土石路堤的应力和沉降增加无显著影响。也反映出压实工作振动频率较高的条件下,单位长度条件下填筑土体接受的机械动能将会升高,对碾压效果影响很大。

轩振华等<sup>[26]</sup>发现,随着振动频率的增加,碾压沉降量也在增加,证实了表 3 中不同振动频率下的地表位移规律的正确性。方磊等<sup>[21]</sup>通过数值模拟填石路堤压实过程得到发现“振动频率较小时,路基的压实效果不好”和“同一振动频率下,激振力并非愈大愈好”,说明采用的  $F$  检验和  $P$  检验方法合理适用,且检验结果与实际情况相符。

由表 3 数据和现实情况可知,较高的振动频率和振幅激振力能够产生较大的沉降量,但也可能会引起被压实材料出现离析现象。因此,土石路堤施工前需要修筑试验路段,确定土石填料碾压振动频率和振幅激振力的合理范围。关于振动压实机械参数的设置,宜在合理范围内采用较高的振幅激振力和振动频率进行土石路堤碾压,可达到良好的压实质量。

4 结论

1) 通过沉降差控制法提出土石路堤压实的施工工艺,并发现每遍碾压后土石填料铺筑层的动回弹模量  $E_{vd}$  与沉降差存在较好的线性相关性(相关系数

$R^2$ 均大于 0.86),进而提出 PFWD 可作为辅助手段配合沉降差法评价土石路堤压实质量,即在土石路堤填筑压实质量检测时宜用沉降差控制法对大面积代表性的测点进行检测,合格后,再进行测点密布的 PFWD 检测,用于精细化质量控制,并兼顾外观质量控制(碾压后的路堤表面没有明显孔洞,大粒径填石连接紧密无松动,说明土石路堤质量满足要求)。

2)利用有限元理论通过输入动态振动波模拟压路机碾压的振动荷载,研究振动压实过程土石路堤中产生的动力响应,得到振动压路机施工作业过程中产生的机械振动将会为填筑材料提供反复的冲击荷载作用,填筑材料的颗粒在此类作用下由静止变为运动的状态,振动压实过程中土石路堤中动位移峰值皆晚于荷载峰值出现,存在一定的时间滞后性;振动压实迫使被压土石混填材料做垂直强迫振动。振动压实过程中土石路堤的竖向动应力沿深度方向衰减速度先快后慢。

3)通过  $F$  检验和  $P$  检验分析压路机振幅激振力和振动频率对土石路堤压实效果(变形与应力值)影响的显著程度,得到压路机振动频率因素对土石混填路堤振动压实影响的显著程度大于振幅激振力因素。

#### 参考文献:

- [1] ZAWISZA E, GRUCHOT A. A geotechnical assessment of usability of a rocksoil mixture for earth structures [J]. *Agrofor*, 2018, 2(3): 66-71.
- [2] LU Z, HU Z, YAO H L, et al. Field evaluation and analysis of road subgrade dynamic responses under heavy duty vehicle [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2018, 19(12): 1077-1086.
- [3] 何兆益, 吴国雄, 朱洪洲. 山区高填方土石混填路堤压实质量控制研究[J]. *公路交通科技*, 2002, 19(3): 28-31.  
HE Z Y, WU G X, ZHU H Z. Study on compaction effect control of high embankment in mountain area highway [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2002, 19(3): 28-31. (in Chinese)
- [4] 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
Specifications for design of highway subgrades: JTG D30-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [5] 公路工程质量检验评定标准: JTG F80/1—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.  
Inspection and evaluation quality standards for highway engineering: JTG F80/1-2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017. (in Chinese)
- [6] 公路路基施工技术规范: JTG/T 3610—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.  
Technical specifications for construction of highway subgrades: JTG/T 3610-2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [7] 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: 1-13.
- [8] ZHA X D. Subgrade dynamic backcalculation based on PFWD [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 723: 220-229.
- [9] GEORGE V, RAO N C, SHIVASHANKAR R. PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2009, 10(3): 189-199.
- [10] GEORGE V, KUMAR A. Studies on modulus of resilience using cyclic tri-axial test and correlations to PFWD, DCP, and CBR [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2018, 19(11): 976-985.
- [11] 王复明, 渠建伟, 王运生. 便携式落锤弯沉仪 PFWD 在土石填料压实质量控制中的应用 [J]. *铁道建筑*, 2008, 48(9): 67-70.  
WANG F M, QU J W, WANG Y S. Application of PFWD (portable falling weight deflectometer) to quality control over compactness of filled soil-stone [J]. *Railway Engineering*, 2008, 48(9): 67-70. (in Chinese)
- [12] 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 L, WANG D Z. 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)
- [13] 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 L, XIE X G, JIANG L D. 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)
- [14] 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 L, XIA H R. 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)
- [15] 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 J H, DENG Z H, LIU J, 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)
- [16] 娄霜. 模拟路基动力响应的原位激振试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 629-636.
- LOU S. In-situ dynamic experimental study for simulating dynamic response of subgrades [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 629-636. (in Chinese)
- [17] 刘飞禹, 杨风云. 移动荷载作用下加筋路堤和轨道系统的三维动力响应[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 101-108, 120.
- LIU F Y, YANG F Y. 3-D dynamic response of reinforced embankment and track system subjected to moving traffic load [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4): 101-108, 120. (in Chinese)
- [18] XU F, YANG Q, LIU W J, et al. Dynamic stress of subgrade bed layers subjected to train vehicles with large axle loads [J]. Shock and Vibration, 2018: 1-12.
- [19] HU P, ZHANG C S, WEN S, et al. Dynamic responses of high-speed railway transition zone with various subgrade fillings [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 108: 17-26.
- [20] 周忠, 秦长国, 徐永福, 等. 宕渣路堤碾压过程的数值模拟[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 45-49.
- ZHOU Z, QIN C G, XU Y F, et al. Numerical simulation of rolling process of overburden embankment [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6): 45-49. (in Chinese)
- [21] 方磊, 姜在田, 项伟圆. 影响填石路堤压实施工因素的数值模拟[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2005, 41(6): 658-663.
- FANG L, JIANG Z T, XIANG W Y. A simulation of the effect factors for construction of filling-stone subgrade [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2005, 41(6): 658-663. (in Chinese)
- [22] 丁智勇, 李国政, 张通化, 等. 振动作用下填石路基压实特性的数值模拟[J]. 路基工程, 2019(6): 114-118.
- DING Z Y, LI G Z, ZHANG T H, et al. Numerical simulation on compacting features of rock-fill subgrade under the action of vibration [J]. Subgrade Engineering, 2019(6): 114-118. (in Chinese)
- [23] 杨士敏, 傅香如. 工程机械地面力学与作业理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010: 188-189.
- YANG S M, FU X R. Ground mechanics and operation theory of construction machinery [M]. Beijing: China Communications Press, 2010: 188-189. (in Chinese)
- [24] 张志峰, 郝飞, 冯忠绪. 振动轮下土壤的动态响应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 94-97.
- ZHANG Z F, HAO F, FENG Z X. Its influencing factors on stress distribution of soil under vibration drum [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(7): 94-97. (in Chinese)
- [25] 金书滨, 张长胜, 刘政, 等. 大吨位压路机碾压大粒径填石路基的动力响应[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(9): 1743-1748.
- JIN S B, ZHANG C S, LIU Z, et al. The dynamic response of large diameter fill subgrade by large tonnage rollers [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(9): 1743-1748. (in Chinese)
- [26] 轩振华, 赵海, 宋春雨, 等. 粉土路基碾压施工模拟分析[J]. 中外公路, 2012, 32(3): 30-34.
- XUAN Z H, ZHAO H, SONG C Y, et al. Simulation analysis of rolling construction of silty subgrade [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(3): 30-34.

(编辑 胡玲)