

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.017

## 高填方土石混合路基压实质量控制技术研究\*

唐志刚<sup>1</sup>, 刘广波<sup>2</sup>, 肖钦广<sup>1</sup>, 田道国<sup>1</sup>, 惠冰<sup>2</sup>

(1. 济南黄河路桥建设集团有限公司, 山东 济南 250100; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250104)

**摘要:** 土石混合路基具有各向异性的特点。文中依托实体工程, 分析土石混合路基填料的特点, 引入沉降差控制与瑞雷面波测试, 开展高填方土石混合路基压实质量控制技术研究。结果表明, 随着压路机碾压遍数的增加, 相邻两遍碾压沉降差下降, 碾压超过 5 遍时, 部分测点沉降差呈上升状态, 同时沉降速率变缓, 沉降值总体趋于稳定。现场试验得出 18 t 压路机在碾压填石路基 4 遍后效能大幅度降低, 采用 32 t 压路机进行补压后路基压实度满足设计要求; 26 t 压路机碾压 5 遍后路基压实质量满足要求。

**关键词:** 公路; 土石混合路基; 压实质量; 分层变形; 碾压变数; 瑞雷面波法

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0076-05

山区公路修建中开挖隧道与边坡会产生大量废弃岩石渣, 大量工程废渣无处堆放影响生态环境。另一方面, 山区地貌高低不平, 填挖路基相互交错, 高填方路基缺少工程性质稳定的填土。工程废弃石渣具有一定抗压承载能力, 相较于土质路基其工后沉降小, 将废弃石渣进行二次处理后用作路基填料成为山区道路发展的新研究热点。张莎莎等研究泥质软岩土路基的最佳填筑工艺, 提出了相应检测方法和标准<sup>[1]</sup>。陶庆东等分析了岩质填料的物理、力学性质对高填路基工后沉降预测及边坡安全性评价的影响<sup>[2]</sup>。蔺彪对采用静力贯入法测试土石混合路基压实度进行了可行性研究, 结果表明贯入荷载与压实度正相关<sup>[3]</sup>。孙静等通过土工离心模型试验分析了土石混合填料不同土石比、不同填筑高度和不同填筑工艺时填筑路基体内的沉降变形规律<sup>[4]</sup>。李盛等通过有限元模拟, 分析了振动轮质量、激振力、振动频率和行驶速度对路基压实度的影响, 并计算了压路机的最佳碾压参数<sup>[5]</sup>。黄虎刚结合现场检测数据和承载比试验值, 对动力锥贯入仪测得的贯入度与承载比的相关性进行分析, 研究了动力锥贯入仪用于路基压实质量检测的适用性及主要应用范围<sup>[6]</sup>。陈宇亮等通过土石混填路基动弹性模量和压实度试验, 推导动弹性模量和路基填料压实度的回归关系式, 提出了基于路基动弹性模量的土石混填路基压实质量控制方法和土石混填路基压实质量控

制标准建议值<sup>[7]</sup>。目前通过室内试验、数值模拟、现场试验对填石路基施工工艺、沉降、压实度等进行了研究, 但研究方向更偏向于填石路基的承载性能、变形机理等方面, 对实际施工中压实质量控制的研究还略有欠缺。本文针对土石混合路基颗粒分布特点, 通过沉降差控制与瑞雷面波测试, 分析土石混合路基碾压过程中分层变形特征, 提出适合工程实际的碾压工艺和设备。

## 1 工程概况

济潍(济南—潍坊)高速公路济南连接线, 西起孙家鹊山村东南侧(桩号 K3+900), 东至黄路泉村西侧(桩号 K6+425), 全长 2.525 km。其中 K4+398—425 处为高填路基断面, 高填路基长度 27 m, 处理高度 12 m(见图 1)。该高填路基采用分层填筑施工, 每层采用 18 t 振动压路机碾压 8 遍, 填筑 4 层后再用 32 t 振动压路机进行补压, 按照该施工方案循环进行, 但由于工期紧张无法按照预期完成施工。为保证工期, 提出采用 26 t 压路机分层碾压 5 遍且不进行 32 t 压路机补压的施工方案。

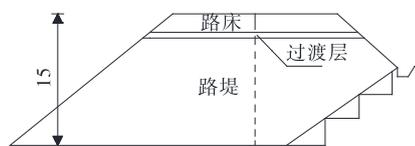


图 1 高填路基结构设计图(单位: m)

根据现场土石混合料颗粒分析结果, 该土石路

\* 基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目(2021B40)

基具有各向异性、分布不均匀等特点。压路机碾压3遍时出现沉降不稳定现象,在路基碾压搭接处出现压实质量缺陷等(见图2)。表1为土石混合料筛分试验结果。



图2 土石混合路基压实状况

表1 土石混合料筛分试验结果

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
>60.000	100.00	2.000	20.43
60.000	94.74	1.000	11.50
40.000	79.91	0.500	5.98
20.000	57.65	0.250	3.23
10.000	42.30	0.075	0.25
5.000	30.04		

## 2 高填路基碾压沉降监测方案

通过相邻两遍碾压路基沉降差监测与瑞雷面波波速测试,对比分析新旧碾压方案的施工质量,分析新碾压方案的可行性。

### 2.1 高填路基沉降监测

#### 2.1.1 监测方案

对高填路基分层进行铺筑,为保证路基施工质量,每层路基碾压后,在路基表层放置沉降板测试路基地表沉降,通过分析碾压后路基表层沉降把控路基碾压质量(见图3)。

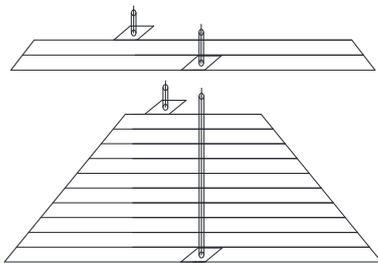


图3 高填路基施工沉降监测

按照既定碾压机械组合和工艺参数进行施工,碾压遍数以往返1次计为1遍,碾压至测试路段无

明显碾压轮迹。按JTG 3450—2019《公路路基路面现场测试规程》的要求选择监测点,沿道路纵向每隔20 m作为一个观测断面,每个观测断面沿横断面方向每隔5~10 m均匀布设沉降观测点(见图4)。

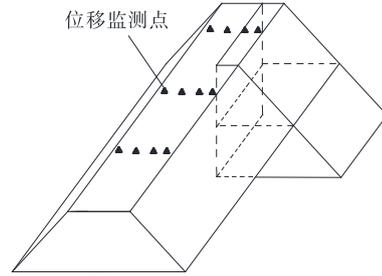


图4 高填路基沉降监测点布置

#### 2.1.2 沉降监测步骤及要求

(1) 路基碾压施工完成后,将振动压路机停放在测试路段前20 m处,启动振动压路机,并调至强振挡位。

(2) 振动压路机以不大于4 km/h的速度对测试路段进行碾压,往返1次为1遍。

(3) 碾压结束后用水准仪逐点测量固定物顶面高程 $h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{ij}$ ,精确至0.1 mm。

(4) 重复步骤2~3,测得固定物顶面高程 $h_{(i+1)1}, h_{(i+1)2}, \dots, h_{(i+1)j}, \dots, h_{(i+n)1}, h_{(i+n)2}, \dots, h_{(i+n)j}$ ,精确至0.1 mm。

#### 2.1.3 数据处理

(1) 按式(1)计算第*i*遍和第*i+1*遍的沉降差 $\Delta h_{i(i+1)j}$ 。

$$\Delta h_{i(i+1)j} = h_{(i+1)j} - h_{ij} \quad (1)$$

式中: $h_{(i+1)j}$ 为第*j*个固定物在第*i+1*遍碾压结束后的顶面高程(0.1 mm); $h_{ij}$ 为第*j*个固定物在第*i*遍碾压结束后的顶面高程(0.1 mm);*i*为碾压遍数;*j*为固定物编号, $j=1, 2, \dots, n$ 。

(2) 按式(2)计算第*i*遍和第*i+1*遍沉降差的平均值 $\Delta \bar{h}_{i(i+1)}$ 。

$$\Delta \bar{h}_{i(i+1)} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta h_{i(i+1)j}}{n} \quad (2)$$

(3) 按式(3)计算第*i*遍和第*i+1*遍沉降差的标准差 $S_{i(i+1)}$ 。

$$S_{i(i+1)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [\Delta h_{i(i+1)j} - \Delta \bar{h}_{i(i+1)}]^2}{n-1}} \quad (3)$$

(4) 计算一个测试路段沉降差的平均值、标准

差、沉降差的代表值。

## 2.2 高填路基瑞雷面波测试方案

为保证高填路基碾压密实性及均匀性,对路基进行瑞雷面波波速测试,根据测试结果对压实质量较差的区域进行补压。

如图5所示,在某测点对称布置面波传感器组成面波接收排列,在排列的一端与传感器等间距的位置进行激振产生面波,面波仪通过传感器接收面波并记录下来,通过对面波记录的分析处理即可得到测点的频散曲线,从而求得面波速度随深度的变化。通过比较激振试验前后同一测点的面波波速和频散曲线的变化进行压实效果评价。

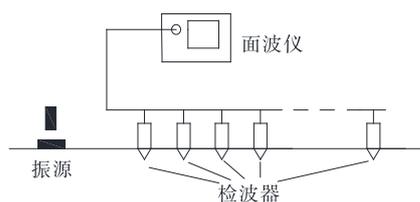


图5 瑞雷面波勘探原理示意图

根据该路基施工情况,在路基靠近边坡侧布置测点,每个断面边坡激振前后监测点位置、偏移距、道间距、观测参数保持一致。采用线性等道距排列方式,道间距为3 m,偏移距为2 m,采用外触发式落重激振。面波仪测线布设位置见图6。

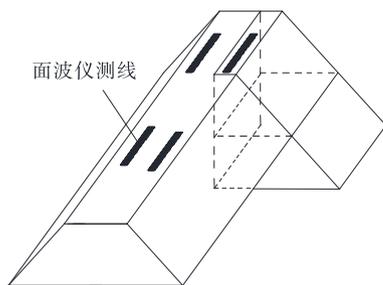


图6 面波仪测线布设

## 3 试验结果分析

### 3.1 路基碾压沉降分析

该路基采用18 t压路机碾压8遍并进行32 t压路机补压的沉降差见图7~10。由图7~10可知:按原碾压方案(采用18 t压路机碾压8遍,填筑4层后再用32 t振动压路机进行补压)施工,随着压路机碾压遍数的增加,相邻两遍碾压沉降差快速下降。碾压4遍前各层沉降差曲线变化趋势与斜率基本相同,且路基每次碾压后的沉降差不大;碾压5~8遍时,沉降差曲线出现反复,整体上随着碾压遍数

的增加沉降差下降,但部分测点出现上升情况,同时曲线斜率变缓,沉降慢慢趋于稳定,第8遍碾压完成时各测点相邻两遍沉降差在5 mm以内;进行32 t压路机补压后,4个测点的沉降差分别为8.62 mm、5.4 mm、4.4 mm、4.02 mm,总体沉降值不大,满足工程要求。

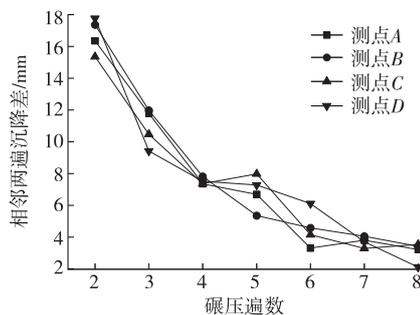


图7 18 t压路机第一层碾压沉降差

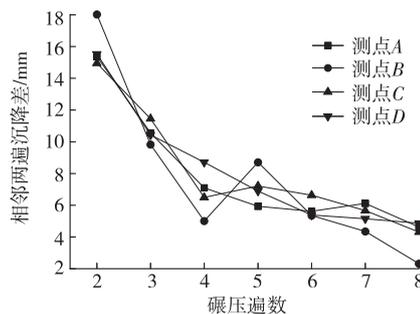


图8 18 t压路机第二层碾压沉降差

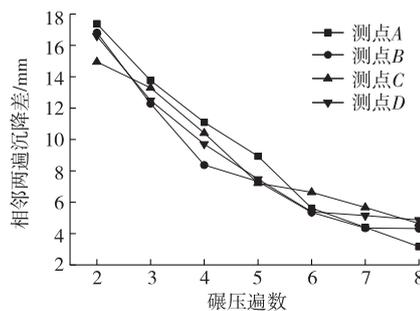
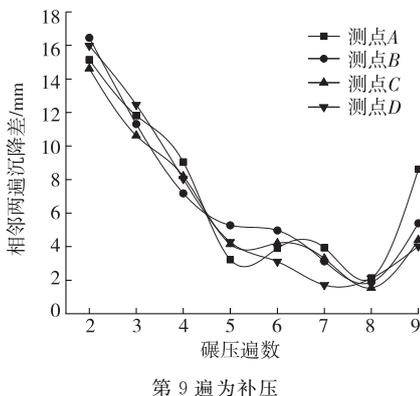


图9 18 t压路机第三层碾压沉降差



第9遍为补压

图10 18 t压路机第四层碾压沉降差及补压沉降差

该路基采用 26 t 压路机碾压 5 遍的沉降差见图 11~14。由图 11~14 可知:按新碾压方案(采用 26 t 压路机碾压 5 遍)施工,各测点沉降差变化趋势相同,线性关系强,整体变化趋势仍然为随着碾压遍数增加沉降差下降,曲线斜率逐渐变缓,到碾压第 5 遍时,各测点沉降差都在 5 mm 以内,满足工程要求。

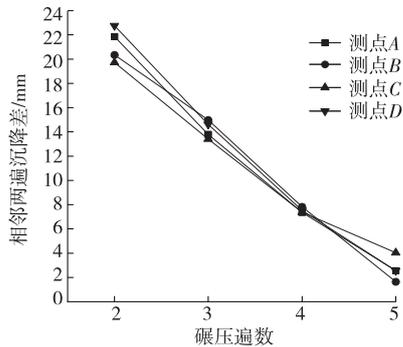


图 11 26 t 压路机第一层碾压沉降差

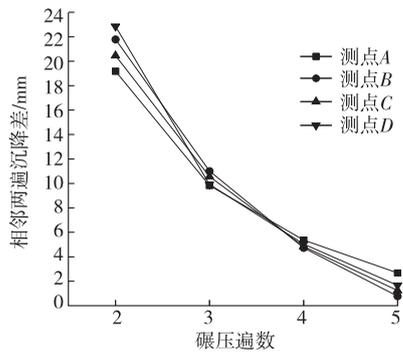


图 12 26 t 压路机第二层碾压沉降差

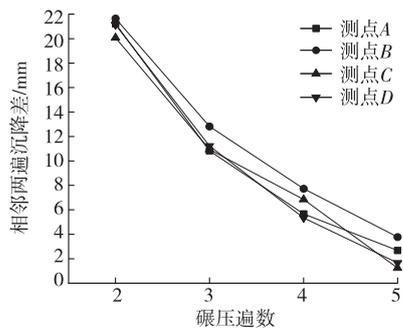


图 13 26 t 压路机第三层碾压沉降差

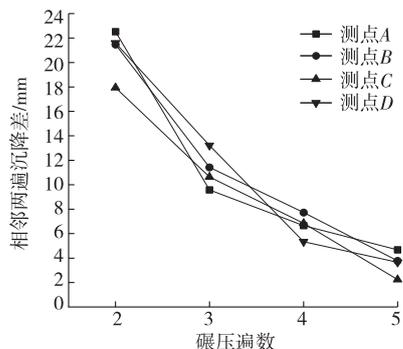


图 14 26 t 压路机第四层碾压沉降差

图 15、图 16 分别为 18 t、26 t 压路机不同碾压遍数下路基沉降差平均值拟合结果。由图 15、图 16 可知:1) 采用 18 t 压路机碾压时,第 2~4 遍沉降差平均值拟合曲线的斜率为第 5~8 遍的 3.9 倍,18 t 压路机前 4 遍的碾压效能较高,随着路基压实度的增加,18 t 压路机对路基的碾压效果受限,第 5 遍碾压后沉降差变化趋势不稳定。2) 采用 26 t 压路机碾压时,沉降差平均值拟合曲线的斜率较大,分别为 18 t 压路机第 2~4 遍、第 5~8 遍沉降差平均值拟合曲线斜率的 1.5 倍、5.9 倍,26 t 压路机的碾压效率较高,每次碾压的效能高,碾压 5 遍后压实度便可达到设计要求。

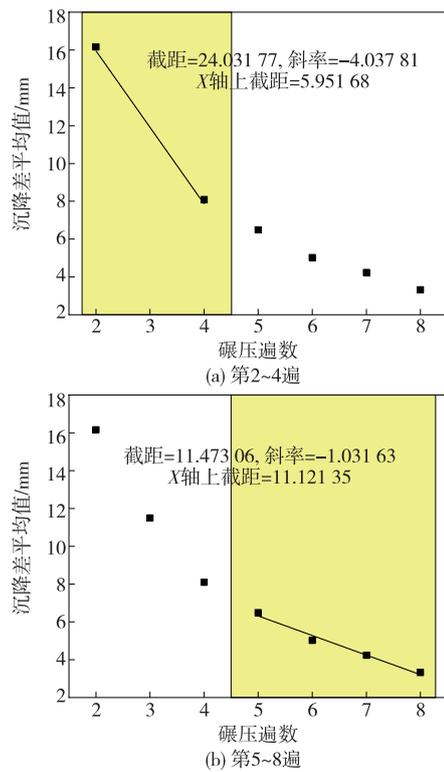


图 15 18 t 压路机碾压沉降平均值的线性拟合结果

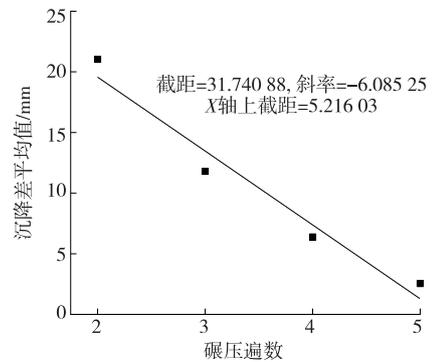


图 16 26 t 压路机碾压沉降平均值的线性拟合结果

### 3.2 路基面波测试分析

图 17、图 18 为该路基面波波速分布。由图 17、图 18 可知:1) 18 t 压路机碾压断面 2 m 深度处的波速为 170 m/s 左右,左侧波速为 150 m/s 左右,右侧波速为 200 m/s 左右,左侧断面密实性比右侧断面略差,但整个断面的波速分布较均匀,无较大缺陷区域。2) 26 t 压路机碾压断面 2 m 深度处的波速为 200 m/s 左右,波速分布均匀,无任何缺陷区域,路基碾压质量较高。

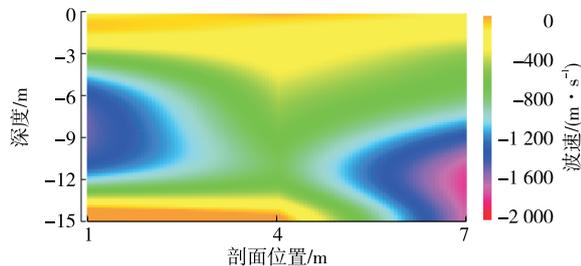


图 17 18 t 压路机碾压断面面波波速分布

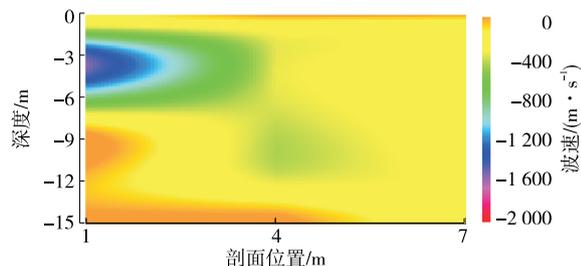


图 18 26 t 压路机碾压断面面波波速分布

根据现场施工情况,两种碾压方案的碾压质量均满足工程要求。但采用 18 t 压路机碾压的路段,部分区域含水率略高,碾压质量不易控制,这可能是导致碾压 4 遍后沉降不稳定及面波波速略低的原因。

### 4 结论

本文根据土石混合路基填料的特点,引入沉降

差控制与瑞雷面波测试,开展高填方土石混合路基压实质量控制技术研究,得出如下结论:

(1) 随着压路机碾压遍数的增加,相邻两遍碾压沉降差快速下降,碾压次数超过 5 遍时,部分测点沉降差出现上升情况,同时沉降差曲线斜率变缓,沉降值慢慢趋于稳定。

(2) 18 t 压路机在碾压填石路基 4 遍后效能大幅度降低,但采用 32 t 压路机进行补压后能保证路基压实质量。26 t 压路机碾压 5 遍后即可达到路基压实度要求。

(3) 两种碾压方案下,土石混合路基波速分布均匀,无缺陷区域,密实性较好,两种方案均满足工程要求。

### 参考文献:

[1] 张莎莎,杨晓华,杜耀辉,等.泥质软岩土石弃渣路基填筑工艺及质量检测方法[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(1):8-13.

[2] 陶庆东,何兆益,贾颖.土石混合体路基填料分形特性与压实破碎特征试验研究[J].中外公路,2020,40(2):243-248.

[3] 蔺彪.静力贯入法检测土石混合料路基压实度研究[J].公路工程,2019,44(5):201-206.

[4] 孙静,孙琳.土工离心模型试验研究土石混合填料的沉降变形特性[J].中外公路,2019,39(2):14-18.

[5] 李盛,田文迪,刘玉龙,等.公路填石路基压实工艺优化方法及效果评价[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2360-2371.

[6] 黄虎刚.动力锥贯入仪用于路基压实质量检测的适用性分析[J].公路与汽运,2022(4):68-71.

[7] 陈宇亮,徐远明,王新武.基于动弹性模量的土石混填路基压实质量控制技术[J].交通科学与工程,2011,27(1):20-22+29.

收稿日期:2022-04-07

(上接第 75 页)

[8] 王海有,朱东辉,傅清亮,等.MS-6 型微表处集料级配范围及最佳沥青用量范围[J].石油沥青,2010,24(2):41-44.

[9] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

[10] 王立久,刘慧.矿料级配设计理论的研究现状与发展趋势[J].公路,2008,53(1):170-175.

[11] 交通部公路科学研究院.微表处和稀浆封层技术指南[M].北京:人民交通出版社,2006.

收稿日期:2022-06-14