

高速公路高填斜坡填石路堤的强夯处理试验研究

张铁富, 王靖涛, 王小川

(华中科技大学, 武汉 430074)

摘 要:在分析斜坡地带高填石路堤的常规压路机械压实施工工艺缺陷的基础上, 探讨了强夯法处理地基的加固机理、有效加固深度、试验检测方法及工法特点, 结合洛阳—三门峡高速公路填石路堤的施工实践, 提出对常规压路机械施工的填石路堤进行强夯处理的压实施工新工艺, 对保证修建斜坡地带高速公路高填石路堤的施工质量有重大的意义。

关 键 词: 高填斜坡地带; 填石路堤; 沉降变形; 强夯

中图分类号: TU 472.3; U 416.03

文献标识码: A

Test research on dynamic compaction at high filling sloping area of expressway

ZHANG Tie-fu, WANG Jing-tao, WANG Xiao-chuan

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new construction technique of dynamic compaction for the conventional compacted rock filling embankment is discussed by analyzing the settlement causes of high rock filling construction practice in Luoyang-Sanmenxia Expressway; it is important to ensuring construction quality of high rock filling embankment in sloping area of expressways.

Key words: high filling sloping area; rock filling embankment; settlement; dynamic compaction

1 概 述

高速公路特殊的交通功能要求路基(堤)必须密实、均匀, 以减少路堤沉降、提高路堤的稳定性与耐久性, 保证路面处于良好的运营服务水平。填方路堤施工是高速公路工程施工中一个非常重要的环节, 需要精心组织、精心施工, 确保工程质量。通常, 当填方路堤的填筑材料粒径大于 2 mm 的颗粒含量大于 70 %, 粒径小于 0.074 mm 的颗粒含量少于 15 %时, 就称为石质路堤, 即填石路堤。填石路堤要做到密实、均匀、稳定, 施工难度很大, 解决好填石路堤的压实方法、质量控制和施工检测, 是当前高速公路工程建设的重要研究课题。

我国的高速公路工程建设中, 有许多路段通过丘陵、山区的石方或洪积土地带, 路基修筑时需采用山体爆破后的石块作为路堤填方材料。高速公路的技术标准高, 线型顺直, 路堤填筑一般都要比较高, 经常出现斜坡地带的高填石路堤。由于山体爆破后的石块缺乏良好的级配而不易被碾压密实, 同时在地形复杂的高填斜坡、沟谷地带, 填石路基同

一断面上的填筑高差较大, 基底施工工作面不易形成而使填筑层过厚, 大石块之间不易嵌锁紧密又使得石块间点面接触较多而容易出现松动等。因此采用常规的压路机械进行高填斜坡地带填石路堤的压实作业, 尽管路基填料的密度已满足规范要求, 但由于碾压功能有限, 很难将石块填料之间业已形成的不稳定嵌锁骨架破坏, 以至于在已压实的路堤内存留有一定量的空隙, 最终将可能使这种高填斜坡地带的填石路堤产生不可忽视的沉降量。在分析高填斜坡地带填石路堤产生沉降变形原因的基础上, 结合洛三高速第四合同 k50+100~k50+500 段填石路堤的施工经验, 提出一种有效的高填斜坡地带高速公路填石路堤的压实施工新工艺, 即先采用常规的压路机械进行填石路堤的分层压实作业, 待填筑到一定高度时, 再对填石路堤进行强夯处理, 采用大能量、密夯点的方法将石块填料之间骨架破坏, 最大限度地降低石块填料之间的空隙量以消除路堤沉降隐患, 能有效地提高路基的整体强度, 解决高填斜坡地带高速公路填石路堤的工后差异沉降问题。

2 斜坡地带高填石路堤的常规压路机械压实施工工艺及其缺陷

有关调查资料显示,我国已建成通车运营的某些具有高填斜坡地带填石路堤的高速公路不同程度地存在路面纵向裂缝,重者发生路面错台,甚至坍塌;轻者沿路线方向出现连续裂缝,需要重新修复或处理。产生上述问题的原因在于路堤的工后差异沉降变形,而沉降变形是由所填石材料材料特性(石料类型、级配、最大石料粒径和形状)和压实处理方法(确压机型、摊铺厚度和压遍数)决定的。

在常规压路机械压实施工工艺中:

首先在施工中加强料场填石材料的粒径及级配等质量控制。通常石料的级配越好,压实所能达到的密实度和弹性模量就越高。为使施工路堤工后沉降量达到最小,施工中加强了料场填石材料的粒径及级配等质量控制。施工单位根据现场情况采用洞室爆破、光面爆破或小型解小爆破,要求填石材料符合以下指标:最大粒径 ≤ 300 mm,不均匀系数 $C_u > 6$,曲率系数 $C_c = 1 \sim 2$ 。

其次要分层铺筑填石材料,每层松铺厚度不超过 40 cm。铺筑时先低后高,先两侧后中央卸料,并用大型推土机摊平。在推平过程中,人工配合机械,把直径大于 0.4 m 的石块推出路基边线之外,个别不平处,由人工用细石填、石屑找平。

压实机械碾压要先轻后重,即先用 25 t 轮式振动压路机碾压 1~2 遍,再用激振力为 50 t 的拖式振动碾碾压成型,每层碾压 7~8 遍,振幅一般在 1.5~2.0 mm 范围内,振动频率在 25~30 Hz (1 500~1 800 次/s) 之间,压路机的行驶速度在 4.5 km/h 左右。50 t 拖式振动碾碾压到 7~8 遍时,最后两遍的路堤沉降量要求在 0~5 mm 内,且变化很小,采用挖坑灌砂法或灌水法检测压实度平均达 96.3%,满足规范要求,压实路堤的平均干密度 2 100 kg/m³。质量控制采用以标准碾压遍数和沉降观测为主,结合该层的横坡纵坡、轮迹及外观,质量全部符合要求时,可办理交工验收。

虽然填石路堤的常规压实作业方法能使路堤的压实度满足规范要求,但是由于高填斜坡地带填石路堤断面压实的不均匀性和振动压实机械作用性能的局限性,填石路堤中存在的颗粒骨架孔隙就不可能被消除,最终导致高填路堤产生不可忽视的差异沉降变形,进而发展成路面的裂缝破坏。常规压路机械压实施工工艺存在如下缺陷:

(1) 现行公路工程技术规范要求填石路堤使用

的压实机具吨位偏低,碾压功能有限,压实功不足。常规的振动压路机械很难使石块之间嵌锁密实,填石路堤中因存有一定量的空隙而并未处于半无限体弹性状态,在填石路堤自重与行车荷载作用下还会产生残余变形。

(2) 公路工程技术规范要求路堤的压实度标准为:0~0.8 m 不少于 96%,0.8~1.5 m 不少于 95%,1.5 m 以下不少于 93%,而大于 6 m 以上的填石路堤均会产生较大的自重荷载,使填筑路堤发生沉降。有关资料显示,如果将 1.5 m 以下压实度由 90% 提高到 93% 以上,则在路堤施工结束时能完成 3.23% 的工后沉降率,那么 6 m 以上的填石路堤发生沉降变形的可能性将大大减小。

(3) 斜坡地带高填石路堤。在纵向与横向断面上存在着自然客观的差异沉降变形。通常,斜坡地带填石路堤的基底难以压实,为了形成压实作业层的工作面,需不断调整作业层的松铺厚度,以避免同一断面上密实度不均匀。据有关资料显示,当填石路堤大于 6 m 以上时,压实不足或均匀性不好,碾压层厚度与填料分布不均匀,受填石自重压实变形影响的,将形成自然的拉伸与压缩应变区,若两点的沉降量梯度大于 0.6% 以上,就产生差异沉降,进而发展成裂缝。

(4) 路堤采用的山体爆破石块,难免存在着大于 1/2~2/2 层厚的石块,且级配不好,而常规压实机械的振动压实功能不足,必然会形成较多石块的点面接触,这种不稳定石块骨架间存在的空隙,不能使石块间达到紧密嵌挤咬合状态,因此容易产生不均匀的沉降变形。

3 高填斜坡地带填石路堤的强夯处理施工工艺

洛阳到三门峡高速公路穿越豫西山区,全长 135.5 km,是河南省地形最复杂、施工难度最大的高速公路之一。其第四合同段 k50+100~k50+500 处的填石路堤是洛三路填方高度最大的一段,平均填高 40 余 m,最大填高达 57 m,原地面为 25°~30° 斜坡,采用附近山林爆破后的风化砂岩、泥岩和页岩作为路堤填料。该段为典型的斜坡地带高填高速公路填石路堤。

经试验分析,该段路堤填料的粒径为 300 mm,粒径 38 mm 以下的颗粒占 75%,最大干密度(重型击实)为 2.08 g/cm³;粒径 38 mm 以下的颗粒占 25%,颗粒密度为 2.47 g/cm³。以两种颗粒含量百分数为权,求出填料加权平均最大干密度

为 2.18 g/cm^3 。由于该段路堤石质填料的品种多, 岩石强度和风化程度不一致, 因此采用何种有效的压实施工工艺来提高路堤填料的压实密度、控制路堤的工后沉降量、保证路堤的稳定性和耐久性是施工及质量控制的关键问题。现简要介绍在实际施工中, 对 $k50+100 \sim k50+500$ 段斜坡地带高填石路堤进行了两次强夯压实, 施工工艺组合为: 先采用常规的压路机械进行填料的分层压实, 待填筑压实到 $35.1 \sim 49.2 \text{ m}$ (路基中线标高距路基设计顶面 $3.7 \sim 10.8 \text{ m}$) 后, 采用了强夯作业方法进行第一次强夯处理, 达到路基设计标高后进行第二次遍强夯处理。

3.1 强夯设备

强夯设备是由起重机和夯锤两部分组成, 该施工段采用的起重机是波兰产的 KU1207 型履带吊车, 起吊高度 17.6 m ; 采用的夯锤底面为圆形, 直径 2.25 m , 总重量 174.4 kN 。每击的夯击能量为

$$E = 174.4 \text{ kN} \times 17.6 \text{ m} = 3\,070 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3.2 强夯参数试验

强夯参数试验的目的是选定强夯施工参数。试验时先进行单点试验, 再根据单点试验的结果布置试验区进行区域试验, 最后综合确定强夯施工参数。

(1) 单点试验

单点试验的目的是初步选定夯点夯击能量、夯点中心距、最后两击平均沉降差及夯坑总深度。单点试验的夯点选在一处已填高 49.2 m 的平整段, 共夯 18 击。开夯前, 在填石层表面下 10 cm 处夯锤边缘处直线方向每 50 cm 布一铁板桩, 共埋设 6 个 (其中 5[#]桩与 6[#]桩的间距为 100 cm)。夯击试验中, 连续测定每夯一击的夯坑深度、上口直径和每个铁板桩桩顶标高, 以求得不同夯击能量下的夯坑侧填料隆起量 (见表 1) 和夯坑填料下沉体积、累计沉降量、沉降差 (见表 2)。

单点试验结果分析:

1) 根据铁板桩顶标高测量结果 (表 1) 可以看出: ①桩顶隆起最大值发生在距夯锤边缘 1.5 m 的 3[#]桩, 说明夯击能量横波使填料产生的侧挤, 效果最好的是在距夯锤边缘 $1 \sim 1.5 \text{ m}$ 范围内。为充分利用横波侧挤效果, 并使侧挤效果叠加, 取夯点净距 1 m 比较合适, 即夯点中心距 3.3 m 。②靠近夯锤边缘, 侧挤效果较好的前 4 个铁板桩, 12 击后隆起量明显增加, 说明夯击能量使填料产生压缩变形量减小, 产生剪切变形量增加; 也说是能量利用率明显降低, 故每个夯点夯 12 击即为饱和夯击能量。

表 1 夯坑侧填料累计隆起量表
Table 1 Table of accumulative humping value of filling material at impaction delve side

击数	累计夯击 能量 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	铁板桩累计隆起高度/ cm						累计 隆起 高度 / m
		距夯锤边缘/ cm						
		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	
		50	100	150	200	250	350	
1	3 070	0.5	1.0	1.0	0.7	0.5	0.2	0.31
2	6 140	1.0	1.3	1.6	1.1	0.7	0.1	0.49
3	9 210	0.6	2.1	2.5	1.7	1.3	0.5	0.77
4	12 280	0.9	2.4	2.8	2.2	1.6	0.6	0.87
5	15 350	1.2	2.6	3.3	2.4	1.8	0.7	1.02
6	18 420	1.5	3.0	3.5	2.6	2.0	0.6	1.08
7	21 490	1.0	3.2	4.3	2.7	2.0	1.7	1.33
8	24 560	1.4	3.9	4.8	3.4	2.3	1.9	1.48
9	27 630	1.5	4.0	4.9	3.7	2.5	0.9	1.51
10	30 700	1.5	4.4	5.4	4.2	3.1	1.2	1.66
11	33 770	1.5	4.8	5.8	4.4	3.2	1.3	1.79
12	36 840	1.4	5.0	6.1	4.6	3.5	1.3	1.88
13	39 910	2.0	5.8	6.7	5.0	3.7	1.4	2.06
14	42 980	1.9	6.0	6.8	5.1	3.8	1.5	2.24
15	46 050	2.0	6.2	7.3	5.5	4.1	1.5	2.24
16	49 120	2.2	6.7	7.6	5.7	4.3	1.5	2.33
17	52 190	2.4	7.1	7.8	6.0	4.4	1.5	2.39
18	55 260	2.4	7.4	8.3	6.3	4.7	1.7	2.55

表 2 夯坑填料下沉量表
Table 2 Settlements of filling material of compaction pit

击数	累计夯击能量 / kNm	上口直径 / m	夯坑深度 / m	下沉体积 / m^3	累计沉降量 / cm	沉降差 / cm
1	3 070	2.42	0.24	1.03	24.5	14.2
2	6 140	2.51	0.39	1.73	38.7	10.1
3	9 210	2.63	0.49	2.3	48.8	10.6
4	12 280	2.71	0.59	2.86	59.4	5.9
5	15 350	2.72	0.65	3.16	65.3	6.6
6	18 420	2.83	0.72	3.66	71.9	7.2
7	21 490	2.83	0.79	4.02	79.1	6.4
8	24 560	2.94	0.86	4.58	88.8	4.4
9	27 630	2.97	0.9	4.84	89.9	5.8
10	30 700	2.99	0.96	5.21	95.7	4.5
11	33 770	3.01	1.00	5.47	100.2	3.3
12	36 840	3.03	1.04	5.73	103.5	3.6
13	39 910	3.07	1.07	5.99	107.1	3.1
14	42 980	3.08	1.10	6.19	110.2	3.2
15	46 050	3.14	1.13	6.51	113.4	3.5
16	49 120	3.16	1.17	6.79	116.9	0.3
17	52 190	3.27	1.17	7.08	117.2	1.5
18	55 260	3.33	1.19	7.37	118.7	

2) 根据夯坑填料沉降量统计表 (表 2) 可以看出: ①夯完 12 击后, 夯坑上口直径为 3.03 m , 说明采用 3.3 m 夯点中心距能保证施工安全和夯锤起吊高度。②夯完 11 击后, 沉降量明显减小, 说明填料的压缩变形减小, 继续夯击效不佳。考虑施工误

差等因素,每个夯点按 12 击确定比较合适。

综上所述,确定夯击次数为 12 击,夯击能量为 36 840 kN·m,夯点中心距 3.3 m,最后两击平均沉降差 3.3 cm,夯坑总深度 1.04 m,此值作为区域试验的控制值。

(2) 区域试验

根据单点试验结果,布置 13.2 m×13.2 m 的试验区进行区域试验。

1) 试验区平面布置 试验区布置在平均高程为 532.49 m 的路基上,即已填高 49.2 m。夯点按正方形布置,中心距离为 3.3 m,夯点净距 1.05 m。

2) 区域试验强夯能数 考虑到要强夯的区域填料已经过 500 kN 激振力振动碾碾压,密实度已达到 96.3 % 的实际情况,推算单位体积填料的夯击能量为 450~500 kN·m/m³。若有效影响深度按 7 m 计,则每个夯点夯 12 击时,单位面积填料夯击能量已达 3 383 kN·m/m²,大于 JGJ79-91 “对于粗颗粒土可取 1 000~3 000 kN·m/m²”的要求。故区域试验强夯参数按每点夯击数不小于 12 击、夯坑总深度不小于 1.05 m、最后两击平均沉降差不大于 3.5 cm 进行实施。

3) 夯坑表面处理 夯击完成以后,推平夯坑,用激振力 500 kN 振动碾碾压 8 遍。亦可根据试验,采用轻锤,低落距,满夯,夯击面重复三分之一,夯击 3 遍。

4) 密实度检测 在试验区内选定 4 点,用灌水法检测密实度,每 1 m 作为一个检测层,共检测 5 m 深,试坑直径在 0.8~0.9 m 之间,取样深度在 0.7~0.9 m 之间。检测结果见表 3。

前述可知,原振动碾压密实的路基填料的平均干密度为 2 100 kg/m³,密实度为 96.3 %。由表 3 可知,强夯处理以后路基填料平均干密度提高到 2 220 kg/m³,密实度提高了 5.5 %,说明强夯效果明显。

表 3 密实度检测表

Table 3 Testing of compaction degrees

检测深度/m	干密度/kg·m ⁻³	密实度/%
1	2 170	99.5
2	2 230	102.3
3	2 210	101.4
4	2 240	102.8
5	2 250	103.2
平均值(5 m 深度)	2 220	101.8

5) 平均夯沉量 夯击试验前,按 3.3 m×3.3 m 方格网测量试验区原地面高程,共测 25 个测点,平

均高程 532.49 m。夯毕推平碾压密实以后,仍按前述方法和位置测量,平均高程降至 532.06 m,即平均夯沉量 43 cm,按有效影响深度 7 m 计算,夯沉量为 6.1 %。

6) 均匀性检测 可用标准贯入法、静(动)力触探法、瑞雷波法检测。本次实验未做,根据王铁宏所做的瑞雷波检测表明^[3],强夯处理范围内的路基水平方向均匀性、垂直方向均匀性均较好。

3.3 强夯施工工艺

(1) 确定强夯施工参数

首先进行单点试验和区域试验,据此确定强夯施工参数如表 4 所示。

表 4 强夯施工参数

Table 4 Construction parameters of dynamic compaction

夯点布置形式	夯点中心距/m	每击夯击能量/kN·m	每点击数	夯坑总深度/m	最后两击平均沉降差/cm	表层处理
正方形	3.3	3 070	≤12	≤1.0	≥3.5	推平碾压

(2) 施工放样

先绘制施工图,布置好夯点位置,按表 4 要求用石灰放出夯点位置,误差不得大于 10 cm。

(3) 夯击

按表 4 要求逐点连续夯击,退行。定时测量夯锤起吊高度,确保夯击能量,每个夯点夯前和最后 3 击测量夯锤底面高程。夯击完成后推平碾压。

(4) 场地高程测量

用水准仪按 3.3 m×3.3 m 方格网测量强夯前后场地高程,计算出平均夯沉量。

(5) 强夯施工质量控制

1) 密实度检测 用灌水法或灌砂法逐层检测密实度,每层深度为 1.0 m。试坑直径 80~90 cm;测点深度不小于 70 cm。每 5 000 m²检测一点,不足 5 000 m²也应检测一点。

2) 强夯施工参数控制 施工中每 10 个施工日抽测 1 次夯锤落距,每天抽测 1 个夯点的夯击击数、两个夯坑的总数深度及最后两击平均沉降差。每天 2 500 m²检测纵横各 8 个夯点的 1 个区域的夯点中心距。夯点击数少于规定值或夯点中心距大于规定值时应及时补夯。

4 结 语

综合上述分析及工程实践,得出如下认识:

(1) 斜坡地带高速公路高填石路堤存在着差异

沉降变形因素，采用常规的压路机械碾压施工，尽管路基填料压实度能满足规范要求，但是在路堤内还存有一定的质量隐患。

（2）强夯处理能最大限度地减少填石路堤之间填料的空隙量，对已按常规压路机械压实后的填石路堤进行强夯处理，效果显著，如强夯影响深度达到 7 m 以上，夯后压实度提高了 5.5 %，平均夯沉量 43 cm。考虑强夯处理的作用深度大，建议只对高速公路填石路堤 95 区和 96 区进行强夯处理，能有效地提高工程质量和经济效益。

（3）对斜坡地带高速公路高填石路堤进行强夯

处理，能从根本上减少路堤沉降隐患，提高路堤的整体强度，保证其稳定性和耐久性，从而大大提高高速公路的质量。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ79-91 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑出版社, 1991.
- [2] 交通部第一公路工程总公司. JTJ033-95 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [3] 王铁宏. 新编全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.