

DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2010.13.019

山区高填方土石混填路基强夯方案优化研究

王清洲^{1,2},刘淑艳³,马士宾^{1,2},魏连雨^{1,2}

(1.河北工业大学土木工程学院,天津 300401;2.河北省土木工程技术研究中心,天津 300401;
3.天津市市政工程研究院,天津 300050)

摘要: 利用多道瞬态瑞雷波检测技术,确定了1 000 kN·m、1 600 kN·m、2 000 kN·m 3种不同夯击能的有效加固深度为4 m、5 m、5.7 m;通过强夯施工应力重合范围的试验研究,得出了强夯过程中相邻夯点交叉作用的应力重合规律,确定了“大间距、两遍夯”的强夯施工方案;以加固每平方米路基所均摊的夯击能作为评价强夯施工成本的指标,优化了原有土石混填路基的强夯施工方案。

关键词: 山区; 路基; 土石混填料; 强夯方案; 瑞雷波

中图分类号: U 416.12

文献标识码: A

文章编号: 1671-4431(2010)13-0072-05

Research on Dynamic Consolidation Scheme for High Embankment Filled by Earth-rock Mixtures in Mountain Region

WANG Qingzhou^{1,2}, LIU Shuyan³, MA Shibin^{1,2}, WEI Lianyu^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2.Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China;
3.Research Institute of Tianjin Municipal Engineering, Tianjin 300050, China)

Abstract: Multi-Channel Transient Rayleigh wave method is used to detect the best effective depth of different ram energy of 1 000 kN·m, 1 600 kN·m and 2 000 kN·m, which separately are 4 m, 5 m and 5.7 m. Stress-coincide regular of the adjacent tamping points is proposed based on the heavy tamping test, as well as the best dynamic consolidation scheme is determined, which is wide interval and two times consolidation. The tamping energy of per square meter consolidation is used as the evaluating indicator of dynamic construction cost, and the original dynamic consolidation schemes are optimized.

Key words: mountain district; road bed; the soil-stone mixtures; dynamic consolidation scheme; Rayleigh wave

山区地质地貌情况复杂,生态环境脆弱,高填深挖路段多,给公路建设带来了较大困难。在以往的工程实践中,高填方土石混填路基填筑虽然严格按照技术规范^[1]相关规定施工,仍然出现大量路基下沉现象,病害处置难度较大。另外,土石混合料中超粒径的石块必须弃掉或进行二次破碎后利用,从而产生了大量借方和弃方,大大增加了施工成本,延长了工期。对含有超粒径的土石混合料分层碾压后的路基采用强夯法处理,可解决路基填筑后疏松、不均匀、易沉陷等问题,为土石混填路基的施工质量提供了保障。但是,目前对于土石混填路基的强夯方案仅凭施工经验确定,具有较大随意性和盲目性,对于不同夯击能的影响深度、应力重合规律、夯点间的布置等关键问题仍没有得到很好的解决,更不能形成相应的规范和标准^[2]。采用多道瞬态瑞雷波检测技术定量检测土石混填料强夯施工参数,评价超大粒径土石混填路基施工质量,改进强夯

收稿日期:2010-02-13.

基金项目:承德市科学技术研究与发展计划(200711020)和河北省科学技术研究与发展指导计划项目(072156121).

作者简介:王清洲(1979-),男,硕士,讲师.E-mail:375821849@qq.com

施工工艺,对山区公路土石混填路基的建设具有重要指导意义。

1 土石混填路基瑞雷波无损检测原理

根据弹性动力学理论,当竖向激振力作用于匀质路基表面时,路基表面和内部由近而远地将发生弹性波的传播现象,其中包括分别与介质体积和形状变形相对应的纵波(P波)、剪切波(S波)以及由它们在地表面耦合而形成的瑞雷波(R波)。其中,S波的传播特性主要受土骨架控制,其传播速度对评判路基土的工程力学性状具有重要的实用价值。根据平面弹性波理论,路基中R波速度与S波速度之比变化范围小,且因携带振动能量大、衰减缓慢,便于检测。于是,利用实测R波速度的方法来更方便地确定路基的S波速度,并由此形成了基于稳态扫频和瞬态冲击激振的表面波法(简称SASW法),来评价路基的密实程度^[3,4]。

2 强夯施工参数确定

强夯试验段位于承德市宽城县境内,全长300多m,最大填方高度12m,采用挖方地段爆破后的土石混填料进行分层填筑,其中混合料中石料含量约为70%~85%。土料为粘性土,石料主要为中风化和强风化的砂岩,抗压强度小于15MPa。施工时每80cm为一层,每层由21t压路机碾压8遍,全段分2次进行强夯加固(每6m1次)^[5]。为保证土石混填料高填方的填筑质量,要求填料中石料的最大粒径不超过80cm。

2.1 试验参数选择

采用北京市水电物探研究所生产的SWS-II型多道瞬态面波仪,检波器的固有频率为4Hz,接收道数24道,采样间隔0.5ms,采样点1024,道间距1m,偏移距5m^[6]。强夯试验选用1000kN·m、1600kN·m、2000kN·m3种夯击能,单点连续夯击10次,一遍完成,强夯试验的各项参数见表1。

表1 土石混填路基强夯试验参数

填筑厚度/m	锤径/m	落距/m	夯击能/(kN·m)	夯击次数	夯击遍数
6	2.2	5	1000	10	1
6	2.2	8	1600	10	1
6	2.2	10	2000	10	1

2.2 有效加固深度的确定

强夯法的有效加固深度既是反映处理效果的重要参数,又是选择地基处理方案的重要依据。为精确测量1000kN·m、1600kN·m、2000kN·m不同能级对路基的有效加固深度,选择路基填土高度为6m,保证强夯的能量在整个路基厚度中传递。经过试夯,3种能级单点夯击10次均能满足最后一次夯沉量小于5cm。测得夯前与10击后同一位置的面波数据,经软件处理后的各能级夯前与夯后波速对比见图1~图3。

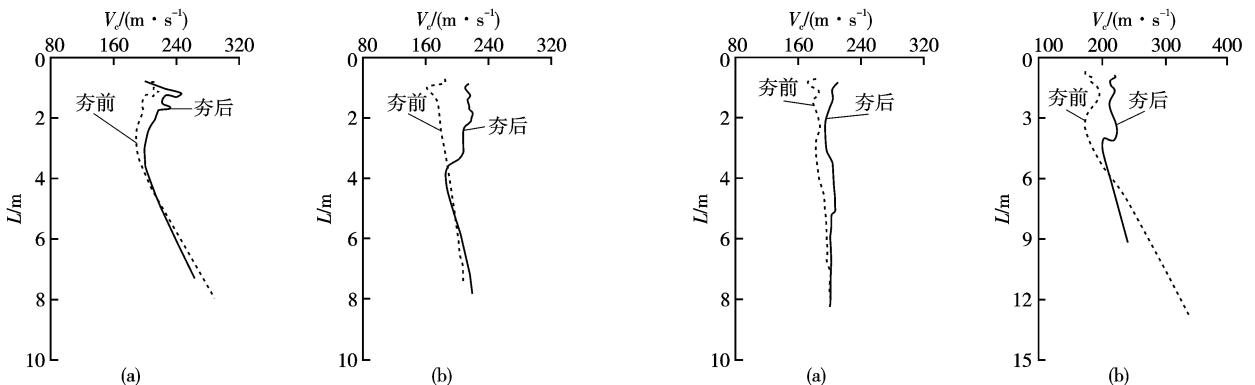


图1 夯击能为1000kN·m强夯前后瑞雷波波速曲线比较图

图2 夯击能为1600kN·m强夯前后瑞雷波波速曲线比较图

由图1~图3测点瑞雷波波速随深度的变化曲线可以看出,不同夯击能在一定深度内,夯后的瑞雷波平均波速较夯前的平均波速整体上有比较明显的提高。对于夯击能为1000kN·m时,图1中3.5~4m范围内夯前与夯后瑞雷波波速曲线出现重合,证明其有效加固深度为4m;由图2可知,夯击能为1600kN·m时,有效加固深度为5m;由图3可知,夯击能为2000kN·m时,有效加固深度为5.7m。

2.3 强夯施工应力重合范围研究

为合理确定强夯施工中的夯间距,研究强夯施工过程的应力重合规律,采用面波仪对强夯施工过程中土石混填料剪切波变化规律进行检测。试验方案如图4所示:①、②、③、④为夯点,按正方形分布,2个夯点中

心距为 6 m,⑤点为瑞雷波检测点。试验时,采用 2 000 kN·m 夯击能,依次夯击夯点①、②、③、④,每个夯击点连续夯击 10 次,对检测点⑤分别测得原状土、4 个夯点 8 击、10 击时的瑞雷波波速,4 点夯击结束后依次测量夯坑直径以及各夯点与测点边缘之间的距离,如图 5 所示。对测点所测的瑞雷波波速变化见表 2。

由表 2 可知:

1)4 个夯点依次夯击过程中测点⑤的波速基本呈现上升趋势。在 0~2.4 m 深度范围内波速变化不大,甚至在 2.4 m 处波速减小,经统计发现夯坑深度在 1~1.3 m 深,表明强夯加固过程中距夯坑中心水平距离 1.5~2.5 m 范围内的表层土石混合料受沉陷的土体挤压,导致在 2.4 m 深度范围内剪切波波速比夯前出现减小现象;而在 2.4~6.0 m 深度范围内剪切波波速明显增加,平均增加约 15%~25%,说明强夯施工中 4 个夯点对测点 2.4~6.0 m 范围内的加固效果均有贡献。

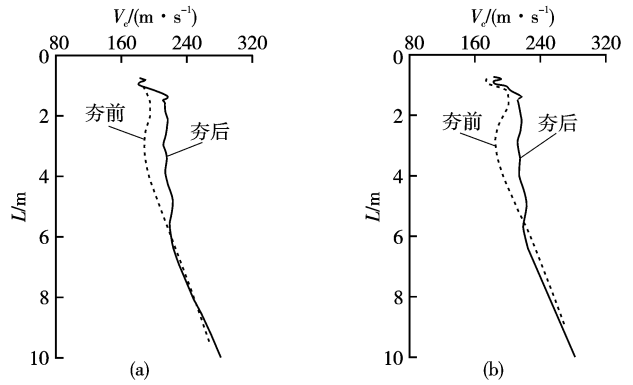


图3 夯击能为 2 000 kN·m 强夯前后瑞雷波波速曲线比较图

表 2 测点的剪切波波速表

$v/(m \cdot s^{-1})$

深度/m	8 击					10 击				
	原状	夯点 1 夯后	夯点 2 夯后	夯点 3 夯后	夯点 4 夯后	原状	夯点 1 夯后	夯点 2 夯后	夯点 3 夯后	夯点 4 夯后
0.8	178	184	186	188	197	178	181	190	191	197
1.6	184	193	198	194	193	184	185	193	198	193
2.4	187	195	191	191	173	187	193	193	182	173
3.2	190	190	198	203	210	190	199	205	215	206
4.0	189	198	202	208	217	189	202	212	218	227
4.8	191	191	203	211	221	191	209	215	221	231
5.6	195	205	218	228	238	195	212	224	248	245
6.0	198	213	226	237	249	198	224	231	256	259

2)间夯便于能量的吸收,使夯击能有利于向深层传递,对深层加固有利。再夯第 2 遍时,对加固浅层土体有利,提高表层密实度。因此,强夯施工方案应采用 2 遍夯,第 1 遍采用高夯击能大间距夯击,用于加固路基深处土体;第 2 遍采用低夯击能夯击第 1 遍 4 个夯点交叉的中心位置用以加固表层土体。

3)对比 8 击和 10 击强夯后的波速,差别在 3%~4% 之间,并且 8 击后的波速也满足规范要求,因此根据二级路对路基压实度的要求及施工成本,施工方案中可以考虑将单点夯击次数取为 8 击。

3 强夯施工方案的优化

施工单位原有强夯施工方案为方案 1,夯点中心间距为 3.5 m,每个夯点连续夯击 10 次和最后一夯沉降量小于 5 cm 的双重控制标准控制施工。强夯后夯坑基本上是一个连着一个,致使表层过早硬化夯击能难以向深处传递,影响了强夯加固效果,又增加了施工成本。为确定

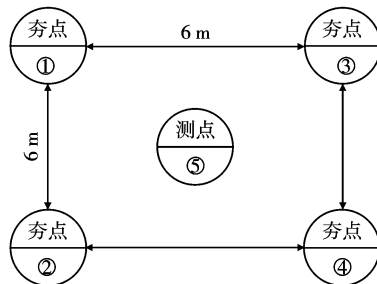


图4 试验方案示意图

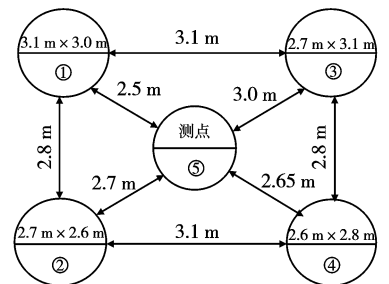


图5 强夯施工后测点分布示意图

合理夯点间距,依据研究得到的强夯施工参数,重新制定了 2 种方案,夯点正方形布置,并与现有施工方案进行对比,强夯方案示意图如图 6 所示。

1)方案 1:夯击能为 2 000 kN·m,夯点中心间距为 3.5 m。

2)方案 2:2 遍夯,第 1 遍 2 000 kN·m 夯击能,每点夯击 8 次,夯点中心间距 4.5 m,第 2 遍夯点采用

1 600 kN·m 夯击能,每点夯击 5 次。

3)方案 3:2 遍夯,第 1 遍 2 000 kN·m 夯击能,每点夯击 10 次,夯点中心间距 6 m,第 2 遍夯点采用 1 600 kN·m 夯击能,每点夯击 8 次。

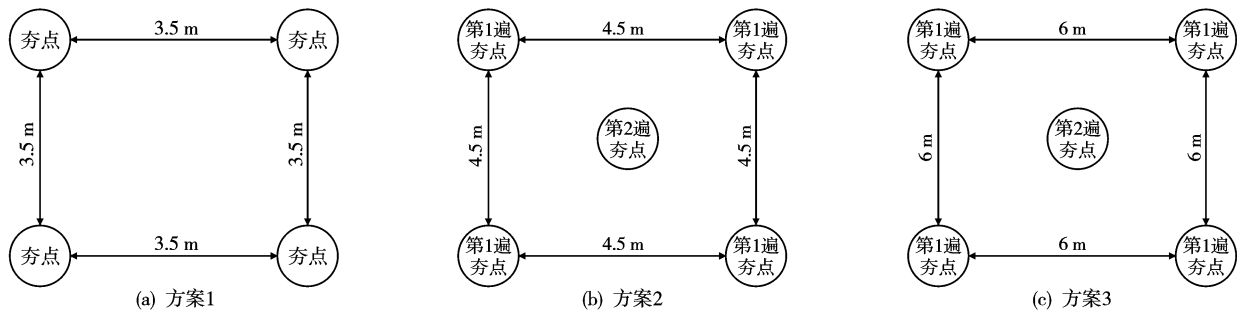


图6 强夯施工方案示意图

在试验路强夯试验场选出 3 块区域分别采用 3 种施工方案进行强夯,测得夯前与夯后的瑞雷波波速经反演后得到的剪切波波速见表 3~表 6。

表 3 断面夯前剪切波波速表

$v/(m \cdot s^{-1})$

深度/m	夯前断面 1				夯前原状断面 2			
	测点 1	测点 2	测点 3	平均值	测点 1	测点 2	测点 3	平均值
0.7	231	226	222	226	234	238	196	223
1.4	240	236	220	232	232	248	185	221
2.1	248	222	225	231	241	258	210	236
2.8	248	221	227	232	244	258	227	243
3.5	259	243	244	248	259	249	249	252
4.2	247	245	244	245	258	250	243	250
4.9	240	257	258	251	255	231	238	241
5.6	231	266	261	252	253	234	245	244

表 4 夯后断面 1 剪切波波速表

$v/(m \cdot s^{-1})$

深度/m	方案 1 断面 1				方案 1 断面 2			
	测点 1	测点 2	测点 3	平均值	测点 1	测点 2	测点 3	平均值
0.7	261	241	278	260	235	281	224	247
1.4	254	244	283	260	241	275	246	254
2.1	288	267	291	282	232	268	243	248
2.8	289	273	288	283	268	275	269	271
3.5	303	299	269	290	297	271	262	277
4.2	301	296	267	288	295	269	258	274
4.9	297	281	255	278	294	255	269	273
5.6	283	280	265	276	283	252	257	264

表 5 夯后断面 2 剪切波波速表

$v/(m \cdot s^{-1})$

深度/m	方案 2 断面 1				方案 2 断面 2			
	测点 1	测点 2	测点 3	平均值	测点 1	测点 2	测点 3	平均值
0.7	244	216	225	228	226	227	224	226
1.4	242	215	220	226	236	236	232	235
2.1	236	226	232	231	248	242	243	244
2.8	238	225	240	234	266	264	251	260
3.5	262	266	278	269	275	256	265	265
4.2	263	266	277	269	287	266	275	276
4.9	285	287	298	290	294	273	291	286
5.6	287	283	275	282	279	265	281	275

表6 夯后断面3剪切波波速表

 $v/(m \cdot s^{-1})$

深度/m	方案3断面1				方案3断面2			
	测点1	测点2	测点3	平均值	测点1	测点2	测点3	平均值
0.7	222	213	231	222	216	239	222	226
1.4	212	228	235	225	216	235	234	228
2.1	262	251	260	258	250	227	226	234
2.8	275	266	282	274	252	231	248	245
3.5	298	294	286	293	258	250	270	259
4.2	295	286	280	287	255	262	269	262
4.9	285	288	281	285	254	272	302	276
5.6	273	281	286	280	253	282	285	273

根据3种方案强夯后加固效果的剪切波波速结果可知,3种强夯方案对土石混填路基的加固效果明显,波速由220~250 m/s提高到230~290 m/s,均可以使路基满足荷载作用的要求。5 m以下深度范围内剪切波波速增加幅度逐渐减小,与2 000 kN·m的有效加固深度有关,施工中应严格控制强夯施工的最大填筑高度,避免造成路基深处出现软弱夹层。

对比分析波速表可知:方案1的加固效果要好于方案2、方案3,其波速提高幅度要高于后2种方案。若按加固每平方米路基所均摊的夯击能作为评价强夯施工成本的指标,可得各方案的经济效益对比表见表7。在满足路基承载力的前提下,方案3最经济,因此施工时推荐采用方案3进行强夯施工。

表7 3种方案单位面积夯击能对比表

方案	加固面积/总夯击能/单位面积夯击能/		
	m^2	(kN·m)	(kN·m)
方案1	12.25	80 000	6 530.61
方案2	20.25	72 000	3 555.56
方案3	36	92 800	2 577.78

4 结 论

应用SWS-II面波仪,通过强夯试验研究,采集了瑞雷波波速,获取了强夯试验参数,改进和优化强夯施工方案,得出以下结论:

a.通过对1 000 kN·m、1 600 kN·m、2 000 kN·m 3种夯击能强夯前后瑞雷波波速的变化对比分析,得到了3种不同夯击能单点夯的有效加固深度为4 m、5 m、5.7 m。

b.4个夯点对交叉中心位置的瑞雷波波速提高均有贡献,在0~2.4 m深度范围内的波速变化不大,2.4~6.0 m深度范围内剪切波波速平均增加约15%~25%,推荐采用大间距、2遍夯的强夯施工方案。

c.以加固每平方米路基所均摊的夯击能作为评价强夯施工成本的指标,对比分析了3种强夯施工方案的经济效益,在满足路基承载力要求的前提下,优化了土石混填路基的强夯施工方案。改进后的强夯方案其施工成本仅为原来的40%,并且能够大大降低强夯持续时间,提高效率。

d.瑞雷波无损检测技术较传统检测手段更适合于粒径超规范的土石混填路基施工质量检测,且检测结果能够反映路基深处的密实情况,便于土石路基强夯施工质量控制。

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准.JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 高一峰,柴贺军,杨建国,等.土石混填路基强夯压实试验研究[J].公路交通科技,2003(3):8-11.
- [3] 中华人民共和国行业标准.JGJ/T 143—2004 多道瞬态面波勘察技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [4] 刘云祯.工程物探新技术[M].北京:地质出版社,2006.
- [5] 王金学,张国杰.土石混填路基强夯施工方案研究[J].公路,2009(5):235-239.
- [6] 赵明阶,黄卫东,韦刚.公路土石混填路基压实度波动检测技术及应用[M].北京:人民交通出版社,2006.