

# 沙漠浅水湖区砾石土公路路基强夯试验研究

何丽平<sup>1</sup>, 梁狄<sup>2</sup>, 谭庆波<sup>2</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航局第二工程有限公司)

**摘要:**砾石土作为一种良好的回填料,在中国公路工程建设中使用较广泛,但目前对砾石土公路路基地基处理主要集中在浅表层的处理,对其水下填筑体深层处理研究较少。该文结合新疆35团至若羌高速公路工程台特玛湖段戈壁砾石土路基,采用强夯法对其水下填筑体深层处理,监测夯击时砾石土夯沉量、隆起量、超静孔隙水压力,并对比其强夯加固前、后效果。试验表明:戈壁砾石土单点夯最佳夯击击数大致为9击,夯击时地表隆起量小;超静孔隙水压力消散迅速,消散时间约1h,多遍点夯时可连续作业;强夯前、后砾石土加固效果有明显提升,适用于沙漠浅水湖区的水下回填。

**关键词:**戈壁砾石土;强夯;夯沉量;隆起量;超静孔隙水压力

在中国新疆、甘肃等西部地区存在大量的风积沙和戈壁砾石土,在这些地区修建公路时可以选择风积沙和戈壁砾石土作为路基的填料,研究表明:风积沙的机械组成很细,沙粒过于均匀,级配不良,不是良好的天然路基回填料,在路基回填时需慎重选用;而戈壁砾石土作为路基填料有强度高、稳定性好等诸多优点,是一种良好的天然回填材料,被广泛地运用在西部地区路基填筑中。

目前中国学者对砾石土回填路基进行了一些有效的研究,结果表明:砾石土路基地基处理目前主要集中在路基的浅表层,而实际工程建设中往往会遇到湖区或低洼积水等水域需穿越,存在砾石土水下填筑体深层处理的问题。对于砾石土水下填筑体深层处理,研究发现,水下填筑的砾石土具有散粒结构,孔隙大,透水性强,孔隙水容易消散的工程特点,在强夯冲击荷载作用下砾石土压密过程很快,超静孔隙水压力消散也快,土体容易变得密实,从而提高其强度,故可采用强夯法对砾石土水下填筑体进行深层处理,但目前未发现有对戈壁砾石土水下填筑体强夯处理的相关研究。

该文结合新疆35团至若羌高速公路工程台特玛湖(沙漠浅水湖)段戈壁砾石土水下填筑的试验段路基,研究戈壁砾石土基本工程特性,并采用强夯法对其进行深层处理试验研究,对不同夯击能下戈壁砾石土的夯沉量、隆起量、超静孔隙水压力大小及消散进行监测,分析强夯的加固效果,为沙漠浅水湖区强夯法处理水下戈壁砾石土填筑路基的适宜性提供依据。

## 1 基本工程特性

在新疆35团至若羌高速公路工程台特玛湖区里程K333+640~K333+690段戈壁砾石土回填料选取砾石土试验样品,试验所选取的砾石土来源于拉克拉玛干沙漠边缘戈壁滩的戈壁料。

为获得戈壁砾石土路基回填料的基本物理特性参数,对回填料按照JTG E40—2007《公路土工试验规程》要求进行颗粒分析、天然含水率、天然密度、土粒相对密度、渗透及击实等室内试验。

### 1.1 基本物理特性

对选取的戈壁砾石土试验样品采用筛分法进行3组颗粒分析试验,试验结果见表1。

根据试验结果计算砾石土的不均匀系数和曲率系数,结果如表2所示。

戈壁砾石土填料的天然含水率、天然密度、土粒相对密度及平均渗透系数等基本物理参数测试结果(3组试样的平均值)见表3。

由表2、3可知:戈壁砾石土不均匀系数远大于5,曲率系数为1~3,可知戈壁砾石土颗粒级配好,易于压实,属于良好回填料;砾石土在天然状态下含水率为0~1%,含水率极低;天然密度为 $1.9\sim 2.1\text{ g/cm}^3$ ,土粒相对密度为 $2.6\sim 2.7$ ;平均渗透系数为 $2.0\times 10^{-2}\text{ cm/s}$ 左右,渗透性很好,有利于超静孔隙水压力的消散。

表 1 戈壁砾石土颗粒分析试验结果

砾石土 编号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
	40	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.075
KF-1	100	91.8	81.1	68.1	50.4	44.1	32.4	18.9	10.5
KF-2	100	91.3	83.3	71.5	53.1	44.3	30.7	19.3	9.9
KF-3	100	91.5	81.4	69.0	51.0	43.9	31.2	18.8	10.1

表 2 戈壁砾石土级配指标计算结果

砾石土 编号	限制粒 径 $d_{60}$ / mm	有效粒 径 $d_{10}$ / mm	中间粒 径 $d_{30}$ / mm	不均匀 系数 $C_u$	曲率 系数 $C_c$
KF-1	3.286	0.038	0.440	86.47	1.55
KF-2	2.842	0.078	0.480	36.44	1.04
KF-3	3.166	0.069	0.469	45.88	1.01

表 3 戈壁砾石土其他基本物理参数

天然含水 率/%	天然密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土粒相对 密度	平均渗透系数/ ( $\times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0.5~0.8	1.93~2.02	2.66~2.71	1.76~2.34

1.2 击实特性

为研究戈壁砾石土的压实性能,对选取的 1 组(5 种不同含水率)砾石土回填料试样进行击实试验,以确定回填料的最大干密度以及最优含水率,击实试验结果见图 1。

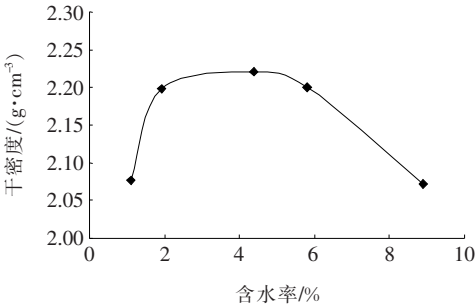


图 1 戈壁砾石土击实试验曲线

由图 1 可知:砾石土试样的最佳含水率约为 4.4%,最大干密度为  $2.221 \text{ g/cm}^3$ 。砾石土压实效果好,易密实,最佳含水率只有 4.4%,用水量少,对于沙漠干旱少雨地区戈壁砾石土是很好的路基填料。

1.3 下卧粉砂层渗透性及压实特性

为了解砾石土回填料下卧土层粉砂层在夯击作用下土层的压实特性及超静孔隙水压力的消散能力,从现场取回下卧土层试样进行击实试验及渗透试验。

选取 1 组(5 种不同含水率)粉砂层试样进行击实

试验,结果见图 2。

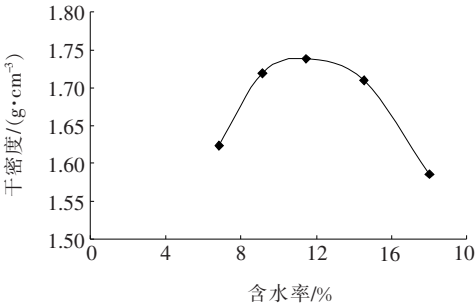


图 2 粉砂层击实试验曲线

由图 2 可知:粉砂层试样的最佳含水率约为 11.5%,最大干密度为  $1.739 \text{ g/cm}^3$ 。粉砂层压实效果较好,较易密实。

根据击实试验结果,分别测试粉砂层在 93%、95%、97% 3 种压实度下的平均渗透系数,结果见表 4。

由表 4 可知:粉砂层的平均渗透系数为  $8.48 \times 10^{-4} \sim 8.82 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,其渗透性能较好,超静孔隙水压力在其中消散也较快,但总体比砾石土的渗透性能差。

表 4 粉砂层平均渗透系数

压实度/%	平均渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
93	$8.82 \times 10^{-4}$
95	$8.56 \times 10^{-4}$
97	$8.48 \times 10^{-4}$

2 试验设计

2.1 试验区选取及地层分布

戈壁砾石土的强夯试验区选取在台特码湖区里程 K333+640~K333+690 路段。

试验区地层分布:上部为砾石土回填层,平均厚度约 2.5 m;下部为原地层的粉砂层。现场试验区对回填至湖面以上 1 m 后路基进行强夯地基处理,水面 1 m 以上采用分层碾压方法回填至路基顶面,现场试验主要对水面以下路基(含水面以上 0~1 m 的回填层)进行强夯地基处理的研究,该试验的处理深度约为

5 m。试验段路基剖面示意图见图 3。

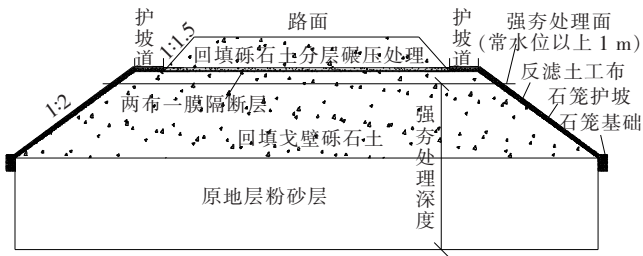


图 3 湖区戈壁砾石土试验段路基剖面示意图

2.2 夯点平面布置及施工参数

试验采用 1 500 kN·m 和 2 500 kN·m 两种能量进行夯夯,并对其加固效果进行对比。强夯所用锤重 15 t,直径 2.0 m,根据经验,强夯点间距一般为夯锤直径的 1.5~2.5 倍,即 3.0~5.0 m,此次试验采用 3.5 m 和 4.5 m 两种夯点间距进行试验,分 2 个试验区进行,其施工参数如表 5 所示。

表 5 试验区施工参数

试验区	夯点间距/m	点夯能量/(kN·m)	夯锤重/t	夯锤直径/m	满夯能量/(kN·m)
1	3.5	1 500	15	2	1 000
2	4.5	2 500	15	2	1 000

注:点夯、满夯夯锤重量和夯锤直径相同。

(1) 点夯夯点布置。试验区 1、2 夯点布置见图 4。

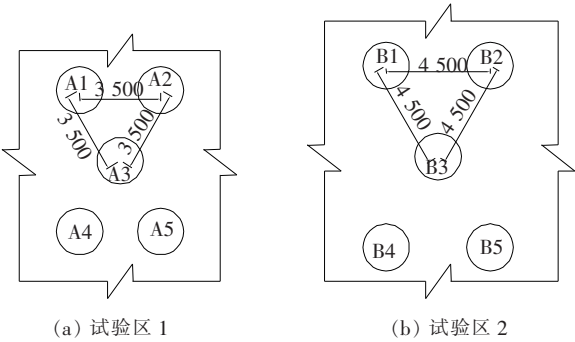


图 4 试验区夯点正三角形布置单元图(单位:mm)

(2) 满夯夯点。完成点夯后,进行一遍满夯,满夯所用锤重 15 t,直径 2.0 m,满夯的夯击能为 1 000 kN·m,每点夯击数为 2 击,夯击 1 遍,夯点间距按 1/4 倍锤印搭接。

2.3 监测及测点布置

(1) 夯沉量及地表隆起量观测。选取 A3、B3 测点观测单击夯沉量,通过观测确定每个强夯点的合理夯击数;在 A3 和 B3 测点距夯坑中心 2、3、4 和 5 m 的

位置布置测点测量每击夯坑周边地表隆起,隆起量和夯坑体积增量相等时停止强夯试验。当超静孔隙水压力消散后继续夯夯,继续观测地表隆起。

(2) 孔隙水压力监测

强夯过程中孔压可以反映强夯的处理深度大小、水平方向影响范围及土中孔隙水压力消散情况;在试验区 1 夯点 A3,试验区 2 夯点 B3 处分别埋设 2 组(4 个)孔隙水压力计,其布置见图 5。

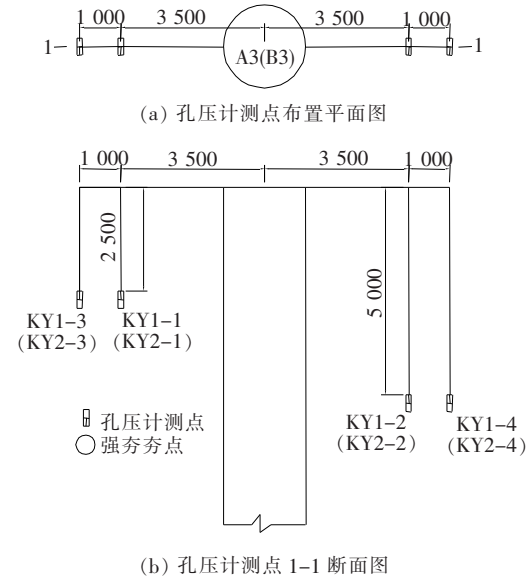


图 5 孔压计布置图(单位:mm)

(3) 地基检测。对强夯后的地基进行重型动力触探试验,以研究其加固前后的效果。每个试验区测试强夯前、后重型动力触探试验点 3 个,其中 1 个位于夯点中心,1 个位于 2 个夯点中心连线的中点,最后 1 个位于 3 个夯点的几何中心。

3 试验结果分析

根据试验设计方案在选取的湖区戈壁砾石土路基试验段进行现场强夯试验。

3.1 夯沉量及地表隆起量

(1) 点夯夯沉量

分别选取 1 500 kN·m 能量的夯点 A3;2 500 kN·m 能量的夯点 B3 进行单击夯沉量分析,其单点夯沉量与累计夯沉量随击数关系曲线如图 6 所示。

由图 6 可知:总体规律为随着夯击数的增加,累计夯沉量逐渐增大,单击夯沉量逐渐减小,至一定夯击数后,累计夯沉量曲线逐渐变缓。观测结果显示,点夯过程中单点夯击数至 9 击时满足收锤标准,1 500、2 500

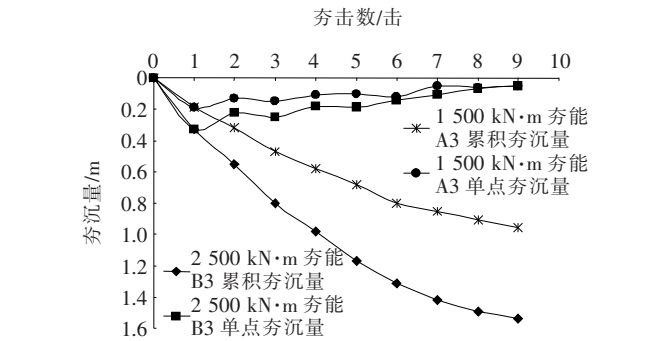


图 6 单击夯沉量与累计夯沉量随击数变化曲线

$\text{kN} \cdot \text{m}$  夯击能最佳夯击数大致为 9 击。  
(2) 点夯地表隆起量

在  $1\,500\,\text{kN} \cdot \text{m}$  能量 A3 和  $2\,500\,\text{kN} \cdot \text{m}$  能量 B3 两点单点夯击过程中分别测量每击作用下的地表隆起量,分别距夯点中心 2、3、4 和 5 m 的位置布置测点观测。夯点周围隆起量观测结果如图 7 所示。

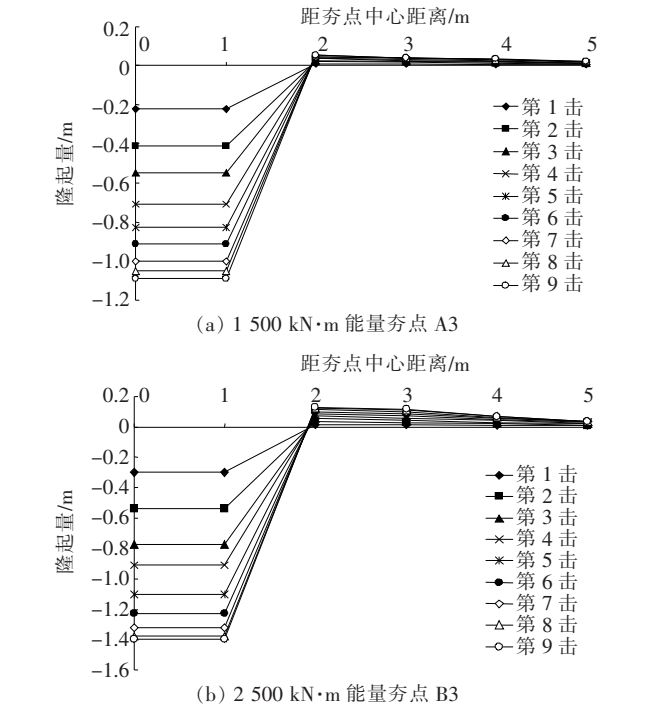


图 7 距夯点中心不同距离地面隆起量变化曲线

图 7 中  $0 \sim 1\,\text{m}$  范围所测为每击作用下夯坑的夯沉量,以负值表示,夯坑周边的地表隆起值以正值表示。由图 7 可知:在  $1\,500$ 、 $2\,500\,\text{kN} \cdot \text{m}$  能量夯击能作用下夯点周围地面以下沉为主,地表隆起量小。

3.2 孔隙水压力

在夯点 A3、B3 处埋设 2 组(4 个)孔隙水压力计,分析强夯加固影响深度、水平向范围和超静孔隙水压力的消散时间,每组内各孔隙水压力计测头的埋设详见表 6。

表 6 孔隙水压力计测头埋设情况				
能量/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	距离夯点中 心距离/ $\text{m}$	孔隙水压 力测头	埋设深 度/ $\text{m}$	所处地层
1 500 (夯点 A3)	3.5	KY1-1	2.5	砾石土
		KY1-2	5.0	粉砂
	4.5	KY1-3	2.5	砾石土
		KY1-4	5.0	粉砂
2 500 (夯点 B3)	3.5	KY2-1	2.5	砾石土
		KY2-2	5.0	粉砂
	4.5	KY2-3	2.5	砾石土
		KY2-4	5.0	粉砂

强夯加固期间沙漠湖区地下水位几乎无变动,水位变动不会对孔隙水压力的监测产生影响,因此在对超静孔隙水压力进行分析时不再考虑地下水位变动的影响。

(1) 超静孔隙水压力随夯击数的变化规律  
取夯击点 A3、B3 的监测结果,绘制超静孔隙水压力随夯击数变化过程线,如图 8 所示。

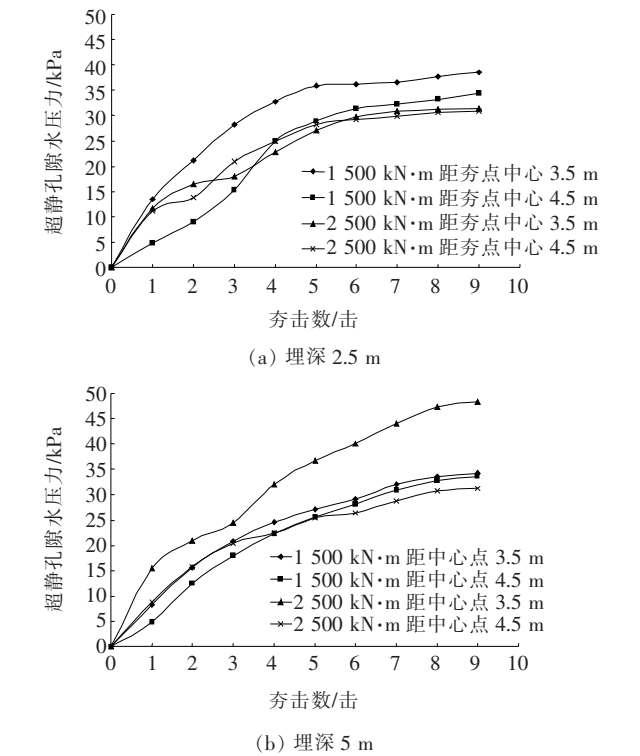


图 8 超静孔隙水压力随夯击数变化曲线

由图 8 可知:随着夯击数的增加超静孔隙水压力累计上升,初期每击作用下超静孔隙水压力的增量比较大,后期增量减小,至夯点满足收锤标准时超静孔隙水压力的变化过程线呈平缓状态。

(2) 超静孔隙水压力在不同能量不同水平距离下的变化规律



取夯击点 A3、B3 的监测结果,绘制埋深 2.5、5 m 的孔压计单点夯超静孔隙水压力随时间变化的过程线,如图 9 所示。

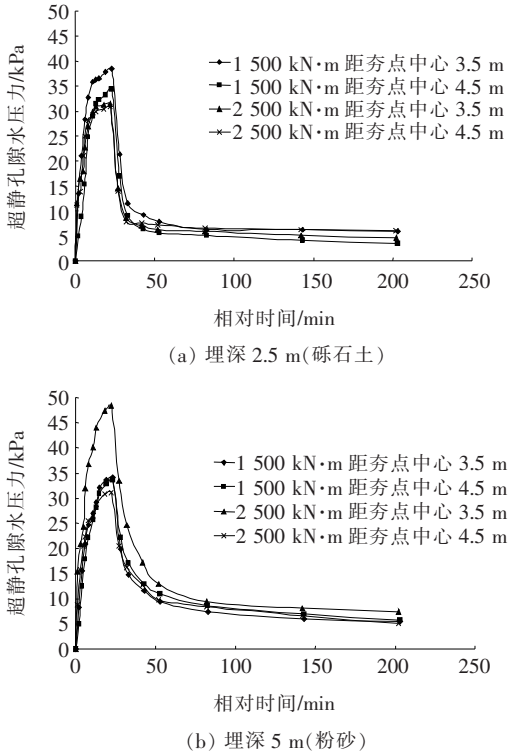


图 9 在不同水平向距离下单点夯超静孔隙水压力随时间变化曲线

图中横坐标“相对时间”是指相对于第 1 次夯击的时间,超静孔隙水压力达到峰值时夯击满足收锤标准,后续曲线为超静孔压的消散过程。

由图 9 可知:① 从整体上看,在相同埋深处两种能量下距夯点中心 4.5、3.5 m 处超静孔隙水压力大小基本一致,可知两处土体都有较好的加固效果,在考虑施工成本的情况下,建议采用 4.5 m 的夯点间距;② 砾石土回填层及原地质粉砂层的超静孔隙水压力在夯击完成后大部分迅速消散,而后消散变慢,砾石土约 1 h、粉砂约 3 h 后消散程度都已超 80%,故在强夯存在多遍点夯时可连续夯击施工,不需中间等待时间。

(3) 超静孔隙水压力在不同能量不同深度下的变化规律

取夯击点 A3、B3 的监测结果,绘制距夯点中心 3.5、4.5 m 处孔压计单点夯超静孔隙水压力随时间变化的过程线,如图 10 所示。

由图 10 可知:在距夯点 3.5、4.5 m 处,两种能量下埋深 2.5 m 位置超静孔隙水压力与埋深 5 m 位置的超静孔隙水压力大小基本一致(除 2 500 kN·m 能

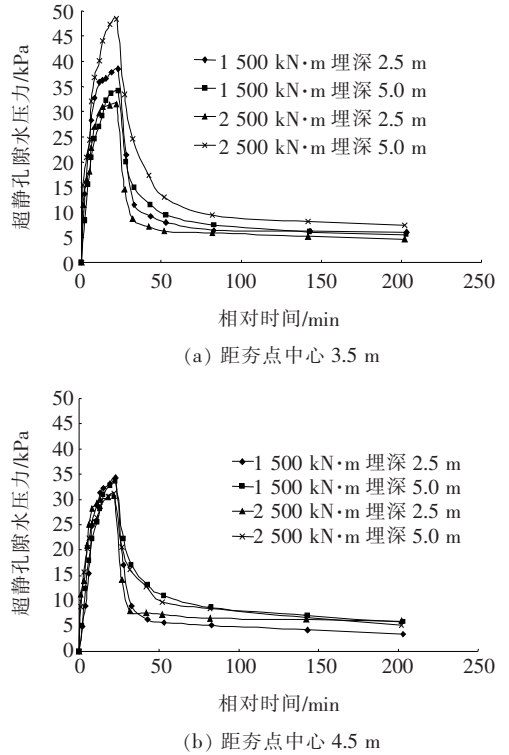


图 10 在不同深度单点夯超静孔隙水压力随时间变化曲线

量 3.5 m 处超静孔隙水压力之外)。从不同深度的超静孔隙水压力来看,在两种能量下深度 5 m 处土体与 2.5 m 处的土体有相同的加固效果,有效加固效果随着深度增加几乎无递减,在 2 500 kN·m 能量 3.5 m 处甚至有所增加,说明 5 m 深度范围内地基都能得到有效的加固。

3.3 检测结果

试夯区在夯前、后分别进行了 3 组重型动力触探试验检测,以对比强夯加固效果,试夯前、后土层重型动力触探击数对比分析结果见表 7。

由表 7 可知:两种能量下砾石土回填层及原粉砂层强夯加固后效果都有提高,由于砾石土层是回填层,初始动探值较小,所以砾石土提升效果最明显,而粉砂层属于原地层,初始动探值相比较而言更大,所以粉砂加固效果没有砾石土明显;在相同动探孔位处,2 500 kN·m 能量、夯点间距 4.5 m 强夯处理后砾石土动探击数比 1 500 kN·m 能量、夯点间距 3.5 m 强夯处理后动探击数要大,加固效果提升更明显,底部粉砂亦如此。砾石土和粉砂加固后的动探平均值都大于 8 击,密实程度达到中密及以上。

4 结论

(1) 戈壁料砾石土颗粒级配好,属于良好的填筑

表7 试夯前、后土层重型动力触探击数对比

孔号	深度统计 范围/m	地层	阶段	最大击 数/击	最小击 数/击	平均击 数/击	平均击数 增长率/%	备注
DPT1-1	0.0~2.6	砾石土	夯前	7	2	4.6	134.5	1 500 kN·m、夯点 间距 3.5 m、夯点中 心
			夯后	15	7	10.7		
	2.6~5.0	粉砂	夯前	11	5	7.3	73.6	
			夯后	17	8	12.6		
DPT1-2	0.0~2.7	砾石土	夯前	8	2	5.0	97.7	1 500 kN·m、夯点 间距 3.5 m、2 夯点 中心
			夯后	16	7	9.8		
	2.7~5.0	粉砂	夯前	11	5	7.4	40.7	
			夯后	15	7	10.4		
DPT1-3	0.0~2.6	砾石土	夯前	8	3	4.9	72.4	1 500 kN·m、夯点 间距 3.5 m、3 夯点 中心
			夯后	13	6	8.4		
	2.6~5.0	粉砂	夯前	10	6	7.6	28.0	
			夯后	13	7	9.7		
DPT2-1	0.0~2.7	砾石土	夯前	8	3	5.3	117.3	2 500 kN·m、夯点 间距 4.5 m、夯点中 心
			夯后	16	8	11.6		
	2.7~5.0	粉砂	夯前	12	5	7.7	75.1	
			夯后	18	9	13.5		
DPT2-2	0.0~2.6	砾石土	夯前	8	3	5.4	100.0	2 500 kN·m、夯点 间距 4.5 m、2 夯点 中心
			夯后	16	8	10.8		
	2.6~5.0	粉砂	夯前	10	5	7.5	58.9	
			夯后	16	8	11.9		
DPT2-3	0.0~2.6	砾石土	夯前	9	3	5.3	76.3	2 500 kN·m、夯点 间距 4.5 m、3 夯点 中心
			夯后	13	8	9.4		
	2.6~5.0	粉砂	夯前	11	5	7.8	33.0	
			夯后	16	8	10.4		

材料,在天然状态下含水率极低,渗透性较好;砾石土在含水率4%左右最容易压实。随着夯击数的增加,累计夯沉量逐渐增大,单击夯沉量逐渐减小,至一定夯击数后,累计夯沉量曲线逐渐变平缓,两种夯击能的最佳夯击数约为9击;夯击时夯点周围地面以下沉为主,地表隆起量小,夯击加固有效。

(2) 砾石土选取2 500 kN·m夯能、4.5 m夯点间距进行加固更合理,且整个地基处理深度范围内加固效果几乎无递减。砾石土及原地质粉砂层的超静孔隙水压力在夯击完成后消散迅速,在强夯存在多遍点夯时可连续夯击作业,不需中间等待时间。

(3) 砾石土回填层及原粉砂层强夯加固后效果都有较大提高,砾石土加固效果比粉砂加固效果提升更明显,砾石土和粉砂加固后的动探平均值都大于8击,

密实程度达到中密及以上。

参考文献:

[1] 陈虎. 基于累计夯沉量确定高路堤压实度的方法研究[J]. 中外公路,2018(3).

[2] 金昌宁,金伟涛. 粉黏粒含量对浸水+环刀法测定干燥风积沙密度的影响[J]. 中外公路,2018(4).

[3] 刘大鹏. 车辆荷载作用下风积沙和砾类土低路堤工程特性研究[D]. 长安大学博士学位论文,2007.

[4] 龚晓南,地基处理手册[M]. 3版. 北京:中国建筑业出版社,2008.

[5] 胡振南. 碎石土路基强夯处理的数值模拟及试验研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文,2006.

[6] 杨建华. 碎石土高路堤的强夯处理与沉降特性研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文,2008.