

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.003

沙漠浅水湖区风积沙公路路基强夯试验研究

何丽平,刘志军,王雪刚,滕超

(中交四航工程研究院有限公司,广东广州 510230)

摘要:风积沙在沙漠地区作为一种储量丰富而级配不良的回填料,虽然在中国已成功应用在部分公路路基上,但是对风积沙处理目前主要集中在浅表层的处理,对其深层或水下处理方法和适用性研究较少。该文结合新疆乌尉高速公路工程台特玛湖段风积沙路基,采用强夯法对其水下深层处理,监测夯击时风积沙夯沉量、隆起量、超静孔隙水压力,并对比其强夯加固前、后效果。研究表明:处理深度约5 m的沙漠湖区风积沙路基适宜的单点夯击能量为2 500 kN·m,单点最佳夯击数为8~9击,夯点间距宜为4.5 m,夯击时地表隆起量小;超静孔隙水压力消散迅速,多遍点夯时可连续作业;风积沙强夯前后加固效果明显,可以用作公路路基回填料。

关键词:路基工程;风积沙;强夯;夯沉量;隆起量;超静孔隙水压力

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

0 引言

中国是一个多沙漠分布的国家,沙漠面积约71.29万 km²,占国土面积的7.4%,主要分布在新疆、内蒙古、青海、甘肃、宁夏及陕西等地。为改善西部地区的基础设施,近年来中国加大了对西部省份的公路、铁路、机场等公共基础设施建设。在公路、铁路等线性工程建设中经常穿越沙漠腹地或沙漠边缘,由于沙漠地区良好的筑路材料相对匮乏,且运距较远,造成筑路成本太大,延缓了沙漠地区公共交通的发展。然而在沙漠地区存在丰富的天然风积沙,这些风积沙如能用在线路工程路基填筑上,将大大节省工程造价,加快西部沙漠地区交通建设的发展。

关于风积沙在工程填筑材料应用方面,中国学者对新疆、内蒙古、陕西等地区风积沙的基本工程特性及地基处理施工工艺进行了研究。许多学者^[1-8]通过大量的室内外试验,对沙漠地区风积沙工程特性进行了研究,发现风积沙具有机械组成细、沙粒均匀、级配不良、松散性强、不易压实等特性;还有学者^[9-16]对陕西毛素乌沙漠地区、新疆乌准铁路穿越古尔班通古特、榆靖沙漠高速公路、陕蒙沙漠高速公路

(半幅)及靖王高速公路(沙漠段)等风积沙路基进行了风积沙振动碾压处理研究,得出其最佳压实含水率、压实频率及施工工艺。

从现有风积沙研究及工程应用来看,目前不少学者对风积沙工程特性进行了研究,并已成功应用在部分公路和铁路上,为风积沙可作为筑路材料提供了一定的理论和现实依据,但目前对风积沙地基处理方法主要集中在风积沙路基振动碾压的浅表层处理,而对风积沙填筑路基的深层或水下地基处理研究目前还较少见。本文结合新疆乌尉高速公路工程台特玛湖(沙漠浅水湖)段风积沙路基,采用强夯法对湖区水下风积沙进行深层处理试验研究,并对不同夯击能下风积沙的夯沉量、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,为沙漠浅水湖区风积沙路基填筑的适宜性提供理论依据,也可为类似工程提供参考。

1 风积沙基本工程特性

在新疆乌尉高速公路工程台特玛湖区里程K328+90~K328+140选取风积沙试验样品,试验选取风积沙属于塔克拉玛干沙漠风积沙。风积沙试样

收稿日期:2023-07-13(修改稿)

基金项目:中交四航局基础研发项目(编号:2018-A-06-I-02)

作者简介:何丽平,男,硕士,工程师.E-mail:lipinghecsu@163.com

室内试验按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行。

1.1 基本物理特性

在风积沙回填之前,对选取的取土场中风积沙进行了大量的颗粒分析试验,发现台特玛湖附近风积沙的颗粒级配基本一致,都属于颗粒均匀的细沙。由于试验区面积有限,试验场地回填的风积沙基本取自同一取土场,风积沙的颗粒级配接近,无需再大量取样进行颗粒分析试验,只在试验区左、中、右3个部位风积沙回填层的中部取3组试样进行颗粒分析试验(筛分法),试验结果见表1。

表1 风积沙颗粒分析试验结果

样品 编号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%				定名
	1	0.5	0.25	0.075	
1	100.0	99.8	99.7	14.2	细沙
2	100.0	99.7	99.3	12.6	细沙
3	100.0	99.6	99.0	16.3	细沙

根据试验结果计算风积沙的不均匀系数和曲率系数,结果见表2。

表2 风积沙级配指标计算结果

样品 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
1	0.118	0.053	0.087	2.23	1.21
2	0.119	0.060	0.088	1.98	1.08
3	0.167	0.046	0.104	3.63	1.41

同时对选取的3组风积沙样品进行其他基本物理特性试验,结果见表3。

表3 风积沙其他基本物理参数

天然含水率/ %	天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	平均渗透系数/ ($10^{-3}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
0.4~0.7	1.44~1.48	2.98~3.26

由表2、3可知:风积沙不均匀系数小于5,粒径均匀,颗粒级配不良,不易压实,属于不良填筑材料;风积沙在天然状态下含水率为0~1%,含水率极低,主要是由于地处新疆塔克拉玛干沙漠南段,气候干旱少雨造成;天然密度为1.4~1.5 g/cm^3 ;平均渗透系数为 $3.0\times 10^{-3}\text{cm}/\text{s}$ 左右,渗透性好,有利于超静孔隙水压力的消散。

1.2 击实特性

为研究试验区风积沙的压实性能,在试验区选取1组风积沙试样(11种不同含水率)进行击实试验,以确定回填料的最大干密度及最优含水率。由于本试验区只进行了1组击实试验,而对于同一种填料而言每组试验结果可能会存在一定波动,故本试验组与现场其他区域风积沙的击实试验组进行对比,发现本试验组结果与其他区域试验组结果趋势一致,试验结果波动在可接受的范围内。本试验组击实试验结果见表4。由表4可知:风积沙最佳含水率约为16%,最大干密度为 $1.632\text{g}/\text{cm}^3$ 。

表4 风积沙击实试验结果

试验序号	含水率/%	湿密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	2.08	1.536	1.505
2	4.03	1.600	1.538
3	5.95	1.620	1.529
4	8.12	1.657	1.532
5	10.13	1.697	1.541
6	11.96	1.731	1.546
7	14.02	1.781	1.562
8	15.33	1.843	1.598
9	16.15	1.895	1.632
10	17.77	1.901	1.614
11	19.78	1.895	1.582

1.3 下卧粉砂层渗透性及压实特性

为了解风积沙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。

选取粉砂层试样(5种不同含水率)进行击实试验,以确定粉砂层的最大干密度以及最优含水率,击实试验结果见表5。

表5 粉砂层击实试验结果

试验序号	含水率/%	湿密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	6.81	1.733	1.623
2	9.12	1.876	1.719
3	11.45	1.938	1.739
4	14.53	1.959	1.710
5	18.03	1.871	1.585

由表5可知:粉砂层试样的最佳含水率约为11.5%,最大干密度为 $1.739\text{g}/\text{cm}^3$ 。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% 共 3 种压实度下的平均渗透系数,试验结果见表 6。

表 6 粉砂层渗透试验平均渗透系数

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

由表 6 可知:粉砂层的平均渗透系数在 $8.48 \times 10^{-4} \sim 8.82 \times 10^{-4}$ cm/s 范围,其渗透性能较好,超静孔隙水压力消散较快,但比风积沙的渗透性能差。

2 试验设计

2.1 试验区选取及地层分布

沙漠湖区风积沙路基存在水下回填,同时路基

的地基处理深度达 5 m,常规分层碾压处理方法无法适用,而风积沙具有散粒结构、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压密过程快,超静孔隙水压力消散快,土体容易变得密实,从而提高其强度,故试验区采用强夯法对风积沙水下路基进行深层处理。风积沙的强夯试验区选取在台特玛湖里程为 K328+90~K328+140 路段进行。

试验区地层分布上部为风积沙回填层,试验区 1 平均厚度约 3.7 m,试验区 2 平均厚度约 4.2 m,下部为原地层粉砂层。现场试验区首先采用风积沙回填路基至湖面以上 1 m,采用强夯法对地基进行处理,水面 1 m 以上采用分层碾压方法回填至路基顶面。此次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,水面以下处理深度约 5 m,试验段路基结构见图 1。

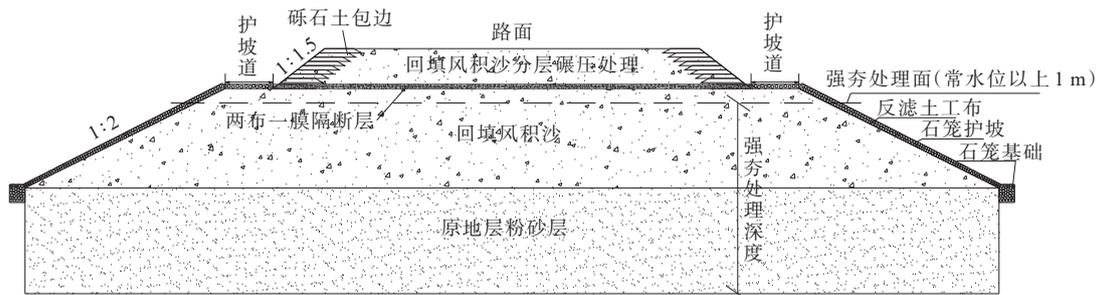


图 1 湖区风积沙试验段路基结构示意图

2.2 夯点平面布置及施工参数

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)推荐的强夯有效加固深度与单击夯击能的对应关系来预估强夯试验的夯击能,由于本次试验强夯处理有效加固深度约 5 m,故试验采用 1 500 kN·m 和

2 500 kN·m 两种能量进行试夯,并对其加固效果进行对比分析。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,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,具体施工参数见表 7。

表 7 各试验区施工参数

试验	试验区	夯点间距/m	点夯能量/(kN·m)	点夯夯锤	满夯能量/(kN·m)	满夯夯锤
填筑风积	试验区 1	3.5	1 500	锤重 15 t、锤直径 2 m	1 000	锤重 15 t、锤直径 2 m
沙+强夯	试验区 2	4.5	2 500	锤重 15 t、锤直径 2 m	1 000	锤重 15 t、锤直径 2 m

(1) 点夯夯点布置

夯点均采用正三角形布置,其夯点布置单元图见图 2。

(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

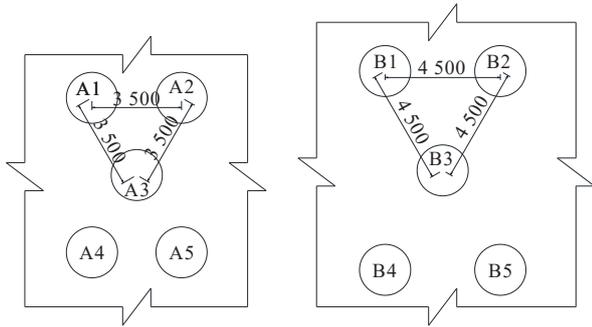
数为 2 击,夯击 1 遍,夯点间距按 1/4 锤印搭接。

2.3 监测及检测布置及数量

(1) 夯沉量及地表隆起量观测

选取 A3、B3 观测单击夯沉量,通过观测确定每个强夯点的合理夯击数;在点 A3 和 B3 距夯坑中心 2 m、3 m、4 m、5 m 的位置布置测点测量每击夯坑周边

地表隆起。如周边地表隆起量和夯坑体积增量相等,停止夯击,当超静孔隙水压力消散后继续夯击。



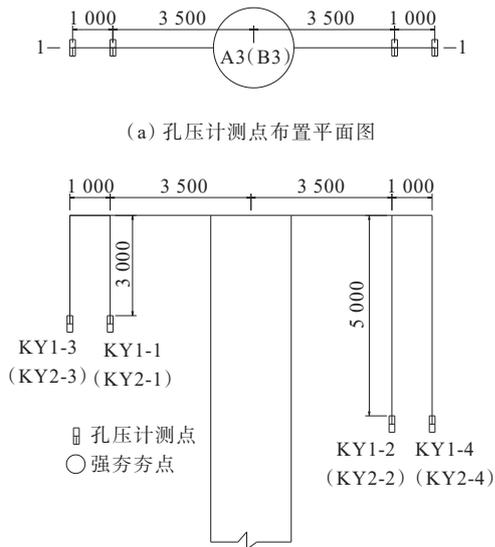
(a) 试验区1

(b) 试验区2

图2 试验区夯点正三角形布置单元图(单位:mm)

(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、水平方向影响范围以及土中孔隙水压力的消散情况;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,各试验区的孔压编号(编号KY1-1;KY是“孔压”首字母,第一个“1”表示试验区1,第二个“1”表示该试验区第1个孔压计)、埋设深度及距夯点距离见图3。



(a) 孔压计测点布置平面图

(b) 孔压计测点1-1断面图

图3 孔压计埋设布置图(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个夯点中心连线中点,最后1个位于3个夯

点几何中心。

3 试验结果分析

3.1 夯沉量及地表隆起量

(1) 点夯夯沉量

分别选取1500 kN·m能量的夯点A3、2500 kN·m能量的夯点B3进行单击夯沉量分析,其单击夯沉量与累计夯沉量随击数关系曲线如图4所示。

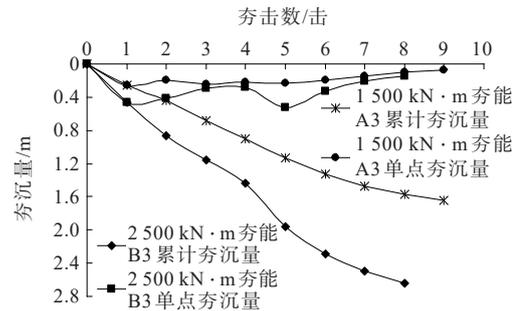


图4 单击夯沉量与累计夯沉量随击数变化过程线

由图4可知: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,累计夯沉量曲线变化平缓。观测结果显示,点夯过程中1500 kN·m能量单击夯击数至9击时满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)规定的最后两击平均夯沉量不大于50 mm的收锤标准,2500 kN·m能量单击夯击数至8击时满足最后两击平均夯沉量不大于100 mm的收锤标准。

在点夯试验点A3、B3夯击完成后,采用相同能量完成其余夯点的夯击,剩余夯点无需量测每击下的沉降量,只需量测后期夯击快收敛时的夯沉量,直至满足相应的收锤标准,最后统计试验区各夯点满足收锤标准的夯击数,试验区内夯点的夯击数基本处在(8~9)±1击范围内,可知两种夯击能下夯点最佳夯击数为8~9击。

(2) 点夯地表隆起量

在1500 kN·m能量A3和2500 kN·m能量B3两点单击夯过程中分别测量每击作用下的地表隆起量,观测点分别距夯点中心2 m、3 m、4 m、5 m,夯点周围隆起量观测结果见图5。图5中0~1 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。

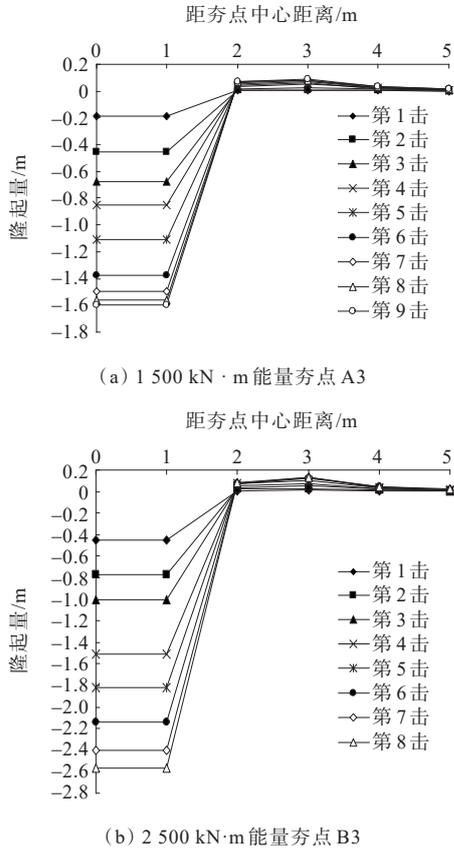


图5 距夯点中心不同距离地面隆起量变化过程线

由图5可知:在1500 kN·m及2500 kN·m夯击能量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处分别埋设2组(4个)孔隙水压力计,分析强夯在深度、水平向影响范围和超静孔隙水压力的消散时间,其布置如图3所示。每组内各孔隙水压力计测头的埋设见表8。

表8 孔隙水压力计测头埋设情况

夯点	能量/ (kN·m)	距离夯点中 心距离/m	孔隙水压 力测头	埋设深 度/m	所处地层
A3	1500	3.5	KY1-1	3.0	风积沙
			KY1-2	5.0	粉砂
		4.5	KY1-3	3.0	风积沙
			KY1-4	5.0	粉砂
B3	2500	3.5	KY2-1	3.0	风积沙
			KY2-2	5.0	粉砂
		4.5	KY2-3	3.0	风积沙
			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,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晌。

(1) 超静孔隙水压力随夯击数的变化规律
分别取夯击点A3和B3的监测结果,绘制超静孔隙水压力随夯击数变化过程线,见图6。

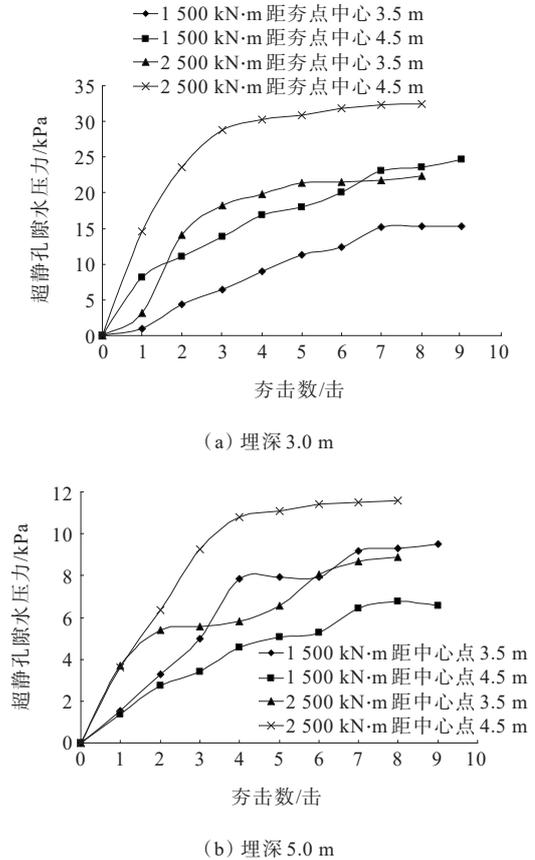


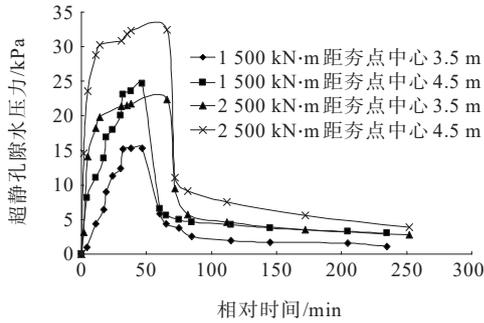
图6 超静孔隙水压力随夯击数变化过程线

由图6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增量较大,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。

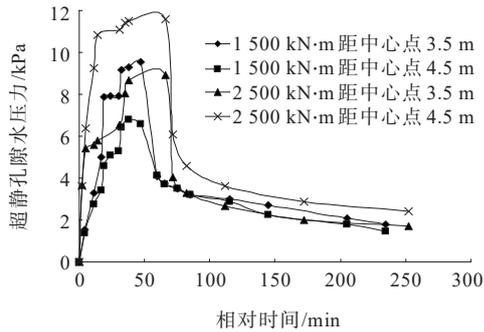
(2) 超静孔隙水压力在不同能量不同水平距离下变化规律

分别取夯击点A3和B3的监测结果,绘制埋深3.0 m和5.0 m的孔压计单点夯超静孔隙水压力随时间变化的过程线,由于相邻两夯击时间间隔为3~5 min,施工时保持连续夯击,待夯击完成后开始观测完整的超静孔压消散过程,结果如图7所示。图中横坐标“相对时间”是指相对于第一次夯击的时间,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7可知:从整体上看,两种能量下相同埋深处距夯点中心4.5 m处超静孔隙水压力比3.5 m处



(a) 埋深 3.0 m(风积沙)



(b) 埋深 5.0 m(粉砂)

图7 在不同水平向距离下单点夯超静孔隙水压力随时间变化的过程

的大;在相同埋深相同距离处,2500 kN·m 能量下超静孔隙水压力比1500 kN·m 能量的大,可知2500 kN·m 夯能、4.5 m 夯点间距进行强夯更合理。由超静孔隙水压力消散曲线可知:风积沙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,而后消散缓慢,3 h 后消散超80%,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。

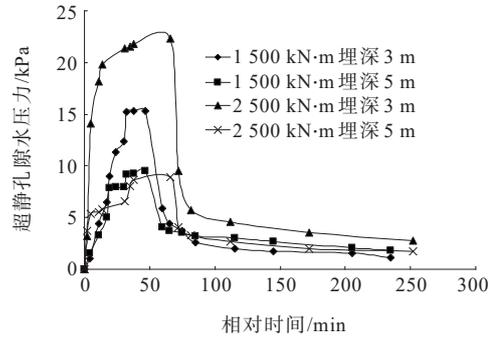
(3) 超静孔隙水压力在不同能量不同深度下变化规律

分别取夯击点 A3 和 B3 的监测结果,绘制距夯点中心 3.5 m 和 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 8 所示。

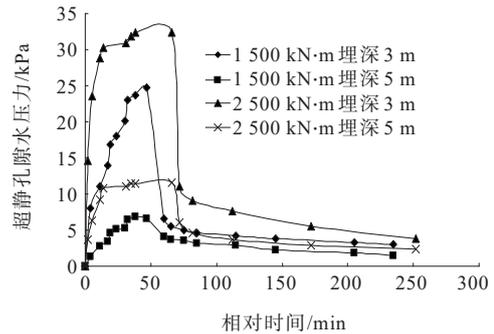
由图 8 可知:在距夯点 3.5 m 和 4.5 m 处,两种能量下路基处理有效深度都可达 5 m,且埋深 3 m 位置超静孔隙水压力比埋深 5 m 位置的大,可知上部风积沙加固效应比下部粉砂加固效应更好。

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,加固前、后动探击数随着深度变化对比见图 9。



(a) 距夯点中心 3.5 m



(b) 距夯点中心 4.5 m

图8 在不同深度单点夯超静孔隙水压力随时间变化的过程

设计要求处理后路基的重型动探击数不小于 6 击。由图 9 可知:1500 kN·m 能量、夯点间距 3.5 m 强夯处理后风积沙动探击数平均值为 5.9~6.8 击,下卧层粉砂平均值为 7.4~7.9 击,上部回填层风积沙动探击数有部分深度小于 6 击,不满足设计要求;而 2500 kN·m 能量、夯点间距 4.5 m 强夯处理后风积沙动探击数平均值为 6.7~8.1 击,下卧层粉砂平均值为 7.1~8.0 击,两者各测试深度动探击数基本大于 6 击,能满足设计要求,此强夯施工参数能用于试验区风积沙的加固。同时发现在相同能量及夯点间距强夯后,风积沙加固效果呈现如下规律:夯点中心 > 2 夯点中心 > 3 夯点中心。

4 结论

(1) 风积沙属于细沙,颗粒均匀,级配不良,不易压实;天然状态下含水率极低,本身渗透性能好,有利于土体加固时超静孔隙水压力的消散;风积沙最佳含水率约 16%,最大干密度约 1.63 g/cm³。

(2) 风积沙在 2500 kN·m 夯击能下单点最佳夯击数为 8~9 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。

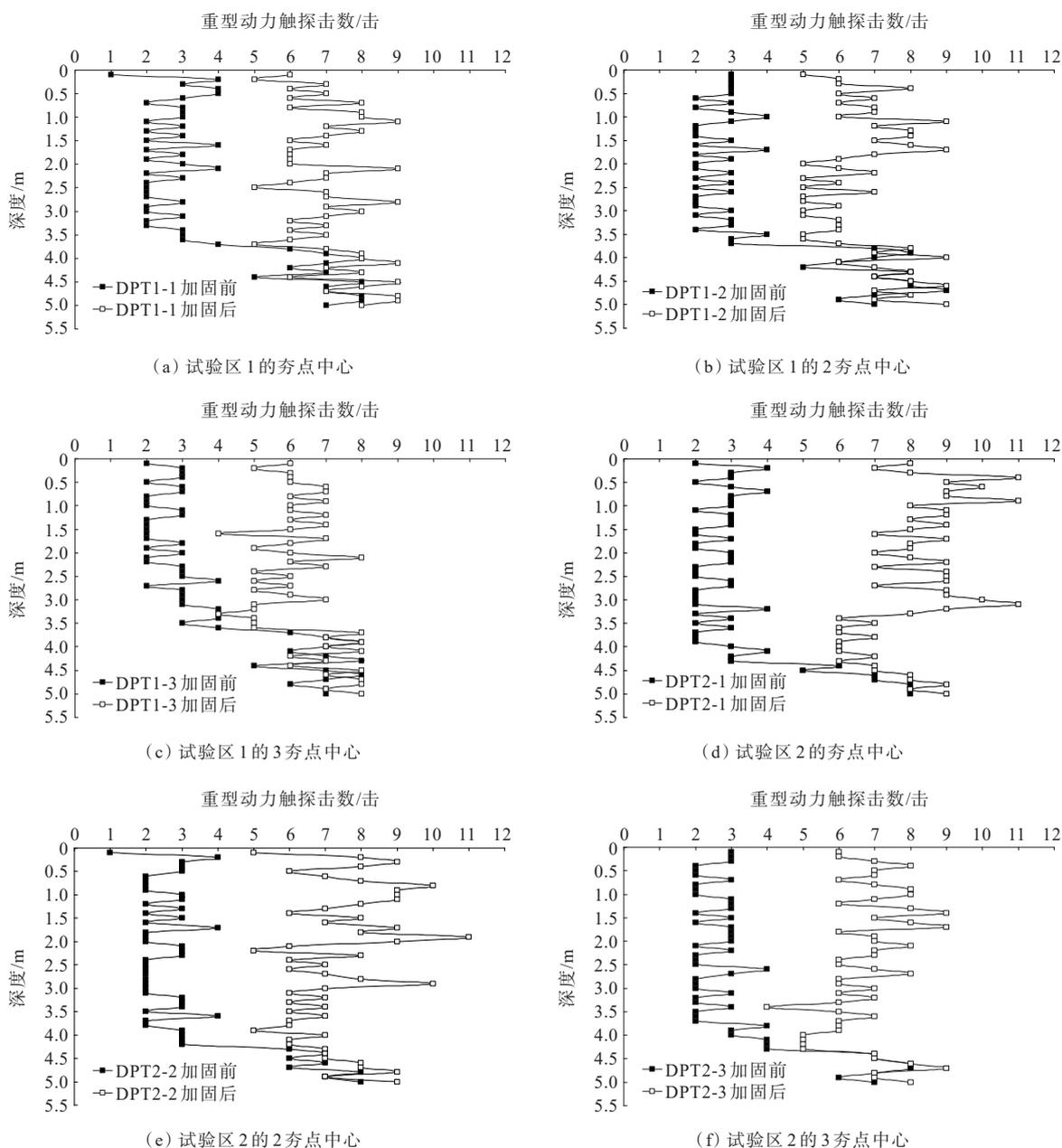


图9 试验区加固前、后动探击数随着深度变化图

(3) 风积沙在 $2\ 500\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能下加固有效深度可达 $5\ \text{m}$, 在深度方向上部加固效应比下部好; 水平方向 $4.5\ \text{m}$ 处加固效应比 $3.5\ \text{m}$ 处好。

(4) 风积沙及原地层粉砂超静孔隙水压力在夯击完成后消散迅速, $3\ \text{h}$ 后消散程度超 80% , 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。

(5) 在 $2\ 500\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能、夯点间距 $4.5\ \text{m}$ 、单点夯击数 8 击强夯后, 风积沙地基强度能满足设计要求, 强夯法适用于沙漠浅水湖区风积沙路基的水下深层处理, 风积沙可作为沙漠浅水湖区公路路基的

回填料。

参考文献:

- [1] 徐德富. 沙漠地区风积沙地基的工程特性[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 43-46.
- [2] 李万鹏. 风积沙的工程特性与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [3] 陈忠达, 张登良. 塔克拉玛干风积沙工程特性[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(3): 1-4.
- [4] 李世芳, 胡作龙. 新疆兵团垦区风积沙工程特性试验研究[J]. 中外公路, 2005, 25(6): 148-151.
- [5] 金昌宁, 张玉红. 塔克拉玛干沙漠风积沙的剪切变形特

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.004

基于集对分析理论的路基沉降组合预测模型研究

丁健峻,罗进锋,王祺顺

(湖南省交通科学研究院有限公司,湖南长沙 410015)

摘要:为实现不确定性因素影响下的路基沉降预测,该文基于集对分析理论和统计决策思想构建路基沉降组合预测模型。该模型首先选定单项预测模型,并根据单项预测模型的预测结果将预测值和实测值构建为集对;然后应用正态分布理论确定集对关系划分标准,基于联系数确定组合权重系数,实现预测信息的优性组合;最后通过预测误差评价提出组合预测模型,并通过某路基沉降数据验证了该组合预测模型应用于路基沉降的有效性。

关键词:路基工程;组合预测;集对分析理论;集对关系准则;统计决策思想;组合权重系数

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

0 引言

近年来,中国公路网快速建设和发展,公路交通在国民经济中的基础性地位和作用显著增强^[1-3]。路基作为公路运输的基础,在汽车动荷载和降雨、冻融等环境因素的长期耦合作用下,会产生沉降变形,进而影响公路的运营和养护。因此,如何实现准确预测路基沉降是近年来专家学者的研究重点。

目前路基沉降的预测方法主要有单项预测和组合预测两种。单项预测方法主要包括曲线拟合法、反演预测法和系统理论法等^[4-9],其局限性在于会丢

失样本点部分信息^[10],为避免这一现象,通过优性组合单项预测建立的组合预测模型预测结果更为准确^[11-13]。鉴于此,基于各类组合标准的组合预测模型被提出,如吴清海等^[14]基于相关系数和拟合误差等权重确定原则,提出了基于最小二乘的组合预测模型;赵明华等^[15]针对沉降数据的误差特性,基于残差平方提出了组合权重的预测方法;陈华友等^[16]探讨了基于有效度的组合预测方法。组合预测方法能显著提升预测的可靠度,但目前关于组合预测的组合方式,即权重系数的确定,还未有统一标准。

路基的变形沉降受汽车随机动荷载作用、特殊地质条件和复杂气候环境等多种可变性和不确定性

征[J].中外公路,2016,36(1):27-31.

- [6] 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,2018,38(4):24-28.
- [7] 周子豪,苏占东,吴成龙,等.风积沙改性土试样压实度控制方法[J].中外公路,2021,41(5):264-268.
- [8] 何丽平,梁狄,谭庆波.沙漠浅水湖区砾石土公路路基强夯试验研究[J].中外公路,2021,41(4):52-57.
- [9] 纪林章.风积沙压实机理研究[D].西安:长安大学,2007.
- [10] 徐高山.沙漠地区风积沙路基基底冲击碾压工艺及应用[J].施工技术,2011,40(S1):184-186.
- [11] 张生辉,王新民,陈忠明.沙漠地区高速公路风积沙路基

压方法研究[J].公路交通科技,2004,21(8):29-33.

- [12] 杨建青.风积沙处理河套地区软弱地基的技术研究[D].天津:河北工业大学,2013.
- [13] 刘晓明,王艺钢,赵明华.岩溶发育区公路路基强夯处治方法研究与应用[J].中外公路,2023,43(2):16-21.
- [14] 吕江,赵晖,杨杓.强夯法处治岩溶地基设计参数研究[J].中外公路,2023,43(2):26-30.
- [15] 范红英.陕蒙沙漠公路不良地质路段路基施工技术研究[D].西安:长安大学,2005.
- [16] 陈亭.振冲碎石桩处治风积沙湿软地基[J].公路交通科技(应用技术版),2011(S1):63-66.

收稿日期:2023-04-18(修改稿)

基金项目:湖南省交通运输厅科技项目(编号:201826)

作者简介:丁健峻,男,硕士,工程师.E-mail:1450997056@qq.com