

Study on Strengthening Treatment of Waste Landfill Area

Heng Kong¹, Heng Zhang², Fei Guo¹, Zhenkun Lee¹

¹Beijing Municipal Construction Group Co., Ltd., Beijing,

²China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing

Email: 996744390@qq.com

Received: July 2nd, 2019; accepted: July 17th, 2019; published: July 24th, 2019

Abstract

With the acceleration of urbanization, the using of construction land is becoming increasingly tense, and landfills are becoming more and more common as engineering sites. In order to discuss the feasibility of using the roadbed as a roadbed after the reinforcement of waste landfill, this paper combines the actual engineering of Fuyao Highway to discuss the physical engineering properties of the waste mixed soil and the parameters and effects of on-site reinforcement. The results show that the bearing capacity of the waste landfill can be met by the design specifications after strong reinforcement, and the research results can be used for reference and reference of other sub-filled landfills under similar conditions.

Keywords

Landfill, Dynamic Consolidation, Slamming Parameters, Settlement Modulus, Rebound Modulus

垃圾杂填区强夯加固处理研究

孔 恒¹, 张 衡², 郭 飞¹, 李振坤¹

¹北京市政建设集团有限责任公司, 北京

²中国土木工程集团有限公司, 北京

Email: 996744390@qq.com

收稿日期: 2019年7月2日; 录用日期: 2019年7月17日; 发布日期: 2019年7月24日

摘 要

随着城市化进程的加快, 建筑用地日趋紧张, 将垃圾填埋场作为工程场址愈发寻常。为探讨垃圾杂填区

文章引用: 孔恒, 张衡, 郭飞, 李振坤. 垃圾杂填区强夯加固处理研究[J]. 土木工程, 2019, 8(5): 1011-1021.

DOI: 10.12677/hjce.2019.85118

的加固后作为公路路基的可行性, 本文结合富耀公路实际工程, 对垃圾杂填土的物理工程性质、以及现场强夯加固的参数和效果进行了探讨分析。结果证明, 通过强夯加固后垃圾杂填区的承载力能够满足设计规范的要求, 研究成果可供类似条件下其他垃圾杂填区的路基处理参考和借鉴。

关键词

杂填土, 强夯, 夯击参数, 夯沉量, 回弹模量

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

垃圾杂填区由于其成份复杂, 有机物及可腐烂物多, 力学稳定性和化学稳定性较差, 为满足设计要求且保证地基为上部构筑物提供足够的支撑, 必须采取一定的措施对垃圾杂填区特殊地基进行加固处理。

王雪松等[1]采用抛石挤淤并换填拆房土的方式对深水生活垃圾填埋段进行加固处理, 结果证明, 可以达到预期并满足设计要求, 具有良好的技术效果和经济效益。许立斌等[2]针对建筑垃圾场地及生活垃圾场地分别采用强夯法和强夯置换法处理, 静载荷试验和动力触探试验表明, 地基承载力得到显著提高, 且场地没有发现回弹现象。宋进联等人[3]采用注浆法对垃圾杂填地基进行处理, 检测结果表明, 地基整体承载力明显提高, 但局部未达到设计要求。焦瑞玲等[4]对位于垃圾填埋场区域的铁路动车段路基采用了渣土桩和注浆两种地基处理方案, 填补了我国铁路在大型、深厚层垃圾填埋场地基处理方面的技术空白。刘建华[5]采用强夯法对建筑垃圾场地进行了处理, 经过多年的观测, 采用强夯处理建筑垃圾地段路基稳定, 路面良好, 既解决了大规模城市建设所产生的建筑垃圾带来的环境污染问题, 也减少了购土回填所造成的对自然环境的破坏, 具有较好的经济和社会效益。

本文结合富耀公路项目为实例, 通过现场强夯试验确定强夯的施工参数、施工工艺并对加固效果进行检测。希望为类似的地质情况及其他垃圾杂填区域加固处理提供参考。

2. 工程概况

2.1. 工程简介

富平耀州红色旅游公路 PPP 项目, 起点位于富平县刘集镇, 沿线经七个镇, 终点于富耀 G210, 路线全长 41.339 公里, 道路等级为一级公路, 设计时速为 80 km/h。进场之后发现有三处较大的垃圾填埋区域(K30 + 700~K31 + 230)如图 1 所示。

2.2. 杂填区现场地质情况

本次研究选择 3 块垃圾杂填区其中之一, 相对于新建道路的位置如图 2 所示。由于沙石盗采形成的大坑, 后于 2009~2011 年不间断垃圾填埋形成并高于原地面。在前期的勘探过程中得知: 垃圾堆厚度最高点比新建道路高 0~3 m 不等, 底部距新建道路下约 8~10 m。主要垃圾以建筑垃圾(碎混凝土块、碎砖等)、生活垃圾为主, 有机物比较多, 其中含有大量的塑料袋、布条、灰渣等。垃圾填埋区的一侧有河流, 周边基本上为农田。通过对现场不同位置及深度垃圾土进行取样, 测得其基本物理指标如表 1 所示。



Figure 1. The location of the landfill
图 1. 垃圾填埋区在道路设计中的位置

由表 1 可知：杂填土的密度约为 $1.32\sim 1.55\text{ g/cm}^3$ ，相对于天然土($1.6\sim 1.9\text{ g/cm}^3$)其密度明显偏小，这主要是由于垃圾土中含有大量的有机物，其干密度要比天然土密度偏小；其次，杂填土的密度的变化范围较大，造成这种现象的原因主要由化与其成分、覆盖土层、填埋时间、取样深度等原因造成的。杂填土的最大含水量可达 100.8%，比天然土甚至软粘土的含水量更大，这说明垃圾杂填土的更容易产生湿陷性，强度偏低。孔隙比和压缩系数也要比天然土偏大，说明在相同的荷载条件下，垃圾杂填土更容易压缩，相对形变更大，对比不同的取样深度，孔隙比随取样深度的增大而减小，说明杂填土具有自重压密性。综上指标可得出相对于天然土，垃圾杂填土具有不均匀性、自重压密性、湿陷性、高压缩性等特点。

Table 1. Basic physical and mechanical index of the landfill
表 1. 杂填土的基本物理力学指标表

密度/ g/cm^3	含水量/%	孔隙比	压缩系数/ Mpa^{-1}	有机物含量/%
0.82~1.55	12.3~100.8	1.01~1.33	1.03~1.72	10.8~28.8



K30+700~K30+840垃圾坑航拍图

Figure 2. Location of the landfill areas relative to the road
图 2. 垃圾杂填埋区域相对于新建道路的位置

3. 垃圾杂填区加固方案设计

垃圾杂填场地地基处理与一般场地的处理相比有较大区别, 首先填埋不均匀, 时间不同、厚度不等、不规范填筑、成分复杂, 该类场地处理的难度大, 国内外类似工程可以借鉴的经验很少。

根据目前研究, 强夯法在应用中的设计要点主要如下:

- 1) 确定现场所需加固区域规模的大小, 勘察场地土质地质情况, 以及周围环境的影响, 论证方案实施的经济性与可行性。
- 2) 结合勘察的基础数据、加固用途、承载力与变形要求, 初步计算夯击能量, 确定加固深度, 然后选定强夯施工参数, 如: 夯锤形状、锤重、落距、夯间距、夯击次数等。
- 3) 根据现场地质状况及所需加固的区域面积, 利用白灰划出强夯施工的方格网, 合理设计强夯的施工参数, 并结合夯点间距、施工范围设计强夯点位。
- 4) 确定强夯施工计划及明确施工注意事项, 特别是安全注意事项。
- 5) 强夯前进行选点试夯, 并通过检测试夯后的地基承载力与回弹模量, 检验加固效果, 确定最终的强夯次数、夯锤落距。

4. 强夯参数设计

强夯法地基处理效果主要取决于方案的设计, 方案的合理, 就能达到预期的效果, 反之不仅事倍功半, 而且有可能破坏地基, 而强夯方案设计主要根据场地的工程地质条件和要求, 应从加固深度及其范围, 夯击能, 夯击次数, 夯点间距, 布置以及夯击遍数等几个方面的主要参数考虑来合理选择。

1) 施工设备的选定

夯锤: 夯锤形状、锤击桩送桩器及衬垫设置应符合规定, 本文所选为圆形夯锤。

起重机具: W1001 型履带式起重机, 脱钩器, 夯锤重量 21 T, 落距设定为 10 m, 夯击能 2100 KN·m。
推土机: T3-100 型, 用作回填、整平夯坑。

2) 强夯法的有效加固深度

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。表 2 给出了不同等级夯击能下, 不同土质的有效加固深度的参照值。本项目杂填土底部距新建道路下约 8~10 m, 由于其压缩性大, 按照经验选用 2000 KN·m 的夯击能基本上可以满足要求。

Table 2. Effective reinforcement depth of the dynamic compaction

表 2. 强夯法的有效加固深度(m)参照表

单击夯击能/KN·m	碎石土, 砂土等	粘土, 粘性土, 湿陷性黄土等
1000	5.0~6.0	4.0~5.0
2000	7.0~8.0	6.0~7.0
3000	9.0~10.0	7.0~8.0
4000	10.0~12.0	8.0~9.0

3) 夯点布置

设计强夯点位, 首先要确保加固场地的强度与承载力在整体上得到提高, 其次合理的点位布置能够有效改善杂填区的不均匀性, 而且也利于保证施工作业的简易性与连续性, 节省施工费用。现场强夯点位布置如图 3 所示。

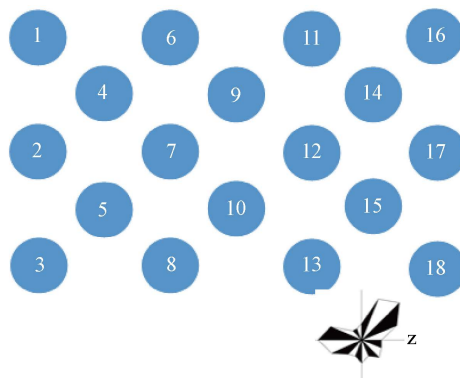


Figure 3. The arrangement of the reinforcement points
图 3. 强夯点布置示意图

4) 夯点间距

实践证明, 间隔夯击效果比连击更好, 并且强夯时第一遍强夯点的间距宜取夯锤直径的 1.2~2.2 倍, 以保证使夯击能量传递到深处和保护夯坑周围所产生的辐射向裂隙为基本原则。

5) 夯击遍数

杂填地基中若是多含有级配不良的碎石、软弱的砂质土以及成分复杂的垃圾土时, 夯击遍数建议为 2~3 遍; 路基中主要是粘质土时, 力学性质非常差建议夯击 3~8 遍; 路基土中多是泥炭类似的有机质时, 建议夯击 3~5 遍。对场地主要点位按设计遍数夯击完成后, 最中再进行全场低能量夯击, 使表层土体得以夯实。根据大量工程经验及实际情况, 现场采用主夯击能夯击 2 遍, 最后再以低能量全场满夯一遍, 锤印搭接 1/3。

6) 试夯确定强夯次数

单夯点测试: 采用 1000 KN·m, 1500 KN·m, 2000 KN·m 共 3 个夯击能量级别进行试夯, 如图 4 所示。每个点之间的间隔为 5 m, 试夯中认真记录每个夯点的每击夯击沉降量, 夯击次数(夯击次数满足收锤条件为止停夯), 测定坑深度, 口径, 体积, 如图 5 所示。然后根据测试记录的资料经对比分析, 确定最佳单击夯能和单点的夯击次数。最后制夯点布置图, 以指导施工。

为保证观测稳定, 在安全距离外架设水准仪, 先记录强夯前夯锤在地面上的高度, 每夯一次后竖上标尺。对于强夯后夯锤倾斜幅度较大的情况, 保证在圆心处测一高度数据, 然后在高低位置取三个点, 测的数据后求其平均值。



Figure 4. The test of the first construction
图 4. 试夯



Figure 5. The measurement of the settlement
图 5. 夯沉量测量

根据参数要求, 经过试夯, 最终最佳单击夯能确定为 2000 KN·m (夯锤提升高度为 9.52 m), 其他两种较小的夯击能会增大夯击次数, 单点的夯击时间过长。在最佳夯击能的条件下, 夯击次数与夯沉量的关系如图 6 所示。由图 6 可知: 夯沉量基本随夯击次数的增大而降低, 在达到 9 次时, 夯沉量分别为 39 mm、45 mm、47 mm, 达到了试夯停止的标准。因此最终确定单点的夯击次数为 9 次。

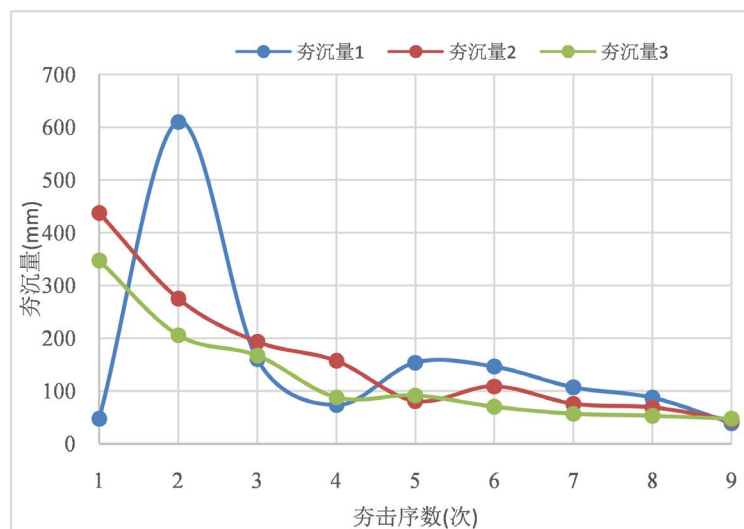


Figure 6. The relationship between the settlement and the times of compaction
图 6. 夯沉量与夯击次数关系图

5. 强夯加固效果研究

杂填土路基经过强夯加固处理后, 要通过现场试验检测, 来研究强夯加固时土体强度的变化规律, 以及加固后的效果能否达到工程实践要求。针对本工程实例, 本文采用沉降量与回弹模量试验研究路基加固后的强度, 以及两者之间的变化规律。

《公路沥青路面设计规范》规定: 路基顶面回弹模量要求如表 3。

5.1. 强夯时的沉降量检测与分析

1) 第 1 次强夯

对填埋区第 1 次强夯时进行检测, 测得夯击过程中的沉降量如表 4 所示。所有点位均在强夯 9 下后

达到止夯标准，通过试验测得强夯后各点位的总沉降量，以及每个点位在每次夯击后的沉降量的变化，如图 7 所示。

Table 3. The resilience modulus standards of the top of subgrade
表 3. 路基顶面回弹模量(MPa)

交通荷载等级	极重	特重	重	中等、轻
回弹模量，不小于	70	60	50	40

Table 4. The total settlement of reinforcement points after 1st dynamic compaction
表 4. 第 1 次强夯后总沉降量(m)数据表

夯击点位	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
总沉降量	1.345	1.623	1.412	1.158	1.146	1.092	1.227	1.339	1.175
夯击点位	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
总沉降量	1.025	1.062	1.034	1.281	1.1	1.078	1.129	1.101	1.19

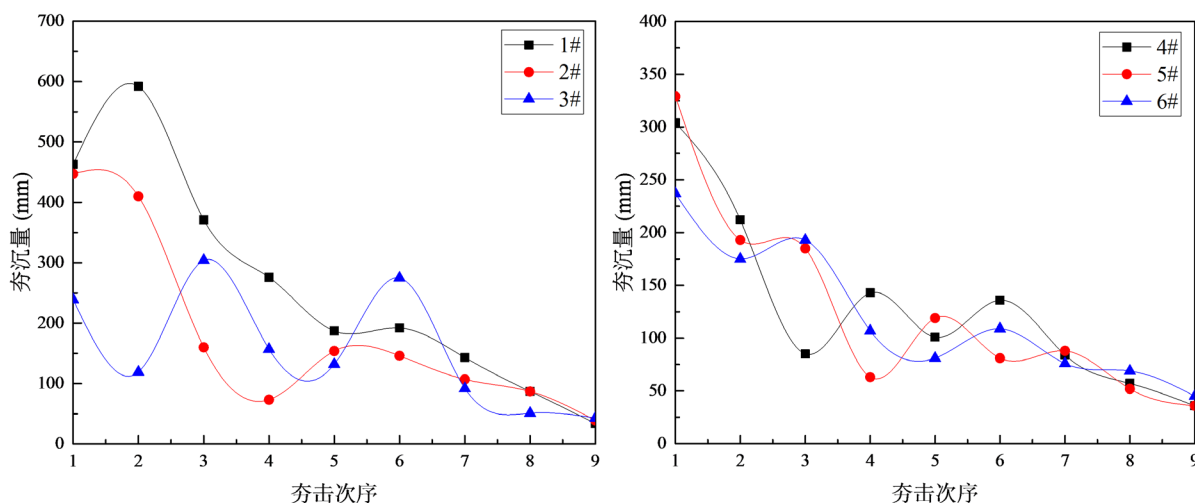


Figure 7. The change of settlement of the reinforce point after the 1st compaction

图 7. 强夯点的沉降量变化

由图 7 可以看出，各点位的沉降量整体都在下降，但是夯击过程中沉降变化的差异性非常大。如图 7 中的 3# 夯击点，刚清理过的场地，土体表层比较松软所含垃圾大多是棉絮、塑料袋、绳子等柔性、塑性体，第 1 次夯击沉降量就达到了 239 mm。伴随着夯击次数的增加，沉降量并非单一地从大到小变化，而是出现波动，甚至会出现“逆增长”。

之所以出现夯沉量的“骤降”与“骤增”：一是因为前几次夯击作用下，土体急剧固结，但并不稳定；二是存在一些强度、硬度比较大的废料“夹在”土体中，而且由于堆填的无规律性，这些废料离散地分布在杂填区，而且厚度不一。虽然各个曲线在波动情况不同，但在强夯作用下，最终沉降量的变化均稳定在 50 mm 以下，数据离散程度减小，能够反映出土体均匀性在发生良好变化。

2) 第 2 次强夯

第 2 次强夯时，测得夯击过程中的沉降量如表 5 所示。

由图 8 中可以看出，土体沉降量的变化主要集中在前 3 次的夯击，之后的沉降量趋于下降，接近于

Table 5. The total settlement of reinforcement points after 2nd dynamic compaction
表 5. 第 2 次强夯后总沉降量(m)数据表

夯击点位	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
总沉降量	1.263	1.1	1.227	1.22	1.27	1.04	0.82	0.733	0.794
夯击点位	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
总沉降量	0.7	0.86	0.718	0.76	0.72	0.73	0.77	0.75	0.69

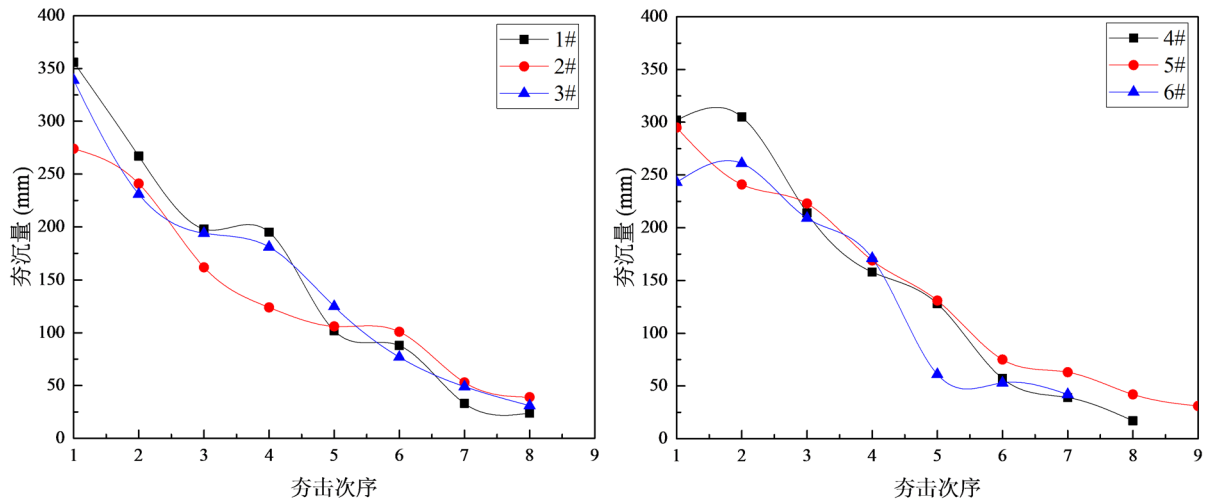


Figure 8. The change of settlement of the reinforce point after the 2nd compaction
图 8. 强夯点的沉降量变化

线性变化。

a) 与第 1 次相比，土体第 2 次强夯后，首次夯击沉降量最大的是 1#点，最大沉降为 356 mm，其第 1 次强夯时首次夯击沉降量为 537 mm，下降近 181 mm。

b) 由图 8 与图 7 可知，图 8 中只有两条曲线出现轻微波动，数据后期变化非常稳定，而图 7 中不仅曲线之间的离散性大，曲线变化不稳定，波动性非常明显，直到最 2~3 次锤击时夯击量才趋于稳定。

5.2. 强夯后的回弹模量研究

1) 第 1 次强夯后

强夯后，对所有点位进行承载板试验检测路基顶面的回弹模量。根据现场检测，试验结果及分析如表 6 所示。

Table 6. The resilience modulus of reinforcement points after 1st dynamic compaction
表 6. 第 1 次强夯后回弹模量值

夯击点位	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
回弹模量(MPa)	60	52	51	76	49	41	42	68	42
夯击点位	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
回弹模量(MPa)	54	42	44	73	58	66	53	54	67

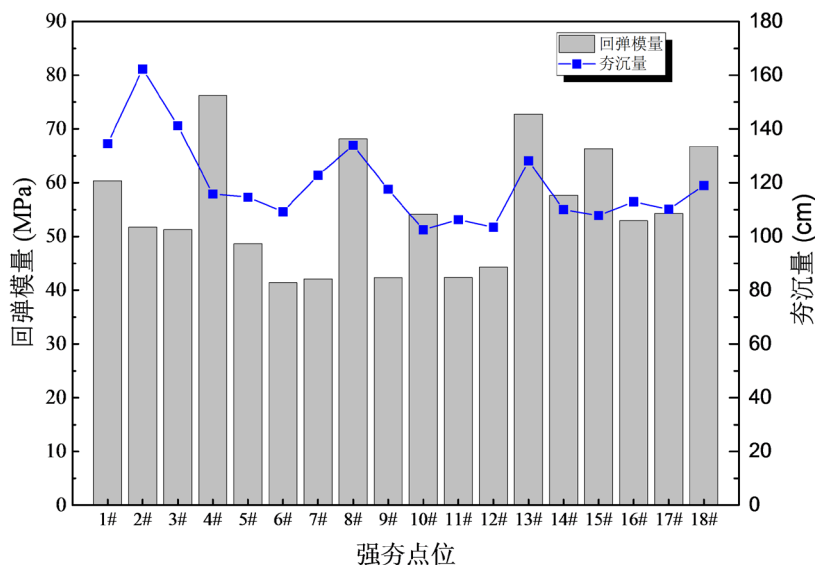


Figure 9. The relationship between the settlement and compressive rebound modulus after the 1st compaction
图 9. 夯沉量与回弹模量关系

根据试验结果，分析强夯点的回弹模量值与总沉降量的关系。

由图 9 可知：去除特殊点，土体强夯后在整体趋势上表现为夯沉量越大，模量值越小，但并没有严格对应的数量关系式。18 组强夯点中夯沉量全部大于 1.0 m，其模量值达到 70 MPa 的点位有 2 个，合格率仅有 11.1%。而且由柱状图可以各点之间存在明显的差异，均匀性较差，整体的加固效果并不理想。

2) 第 2 次强夯后

在第 2 次强夯用推土机等机械设备将场地清理推平，同样按照设计好的强夯参数严格施工。强夯完成后再将场地整平，7 d 后进行试验检测，并画出网格线，尽量保证两次测量模量的点处于同一相对位置。

a) 路基回弹模量试验结果如表 7 所示。

Table 7. The resilience modulus of reinforcement points after 2nd dynamic compaction

表 7. 第 2 次强夯后回弹模量值

夯击点位	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
回弹模量(MPa)	113	101	109	106	111	97	88	83	84
夯击点位	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
回弹模量(MPa)	77	90	82	83	82	83	81	85	77

固化 - 强夯后回弹模量与总沉降量的关系如图 10 所示。

由图 10 可以看出，杂填区在加固后回弹模量与沉降量都发生了比较大的变化。

首先，18 个点位在强夯作用后，回弹模量值全部大于 70 MPa，柱状图的分布更加均匀，各点位之间模量值的差异性减小。

其次，18 个点位在强夯作用后，各个点位的沉降量比第 1 次强夯后更小，如沉降量减少至第 1 次夯击后的 1/3 的点位有 12 个。第 1 次强夯加固后，杂填区土体的沉降量主要分布在 103~162 cm 之间，去除特殊点，数据标准差为 0.15；第 2 次强夯加固后，杂填区土体的沉降量主要分布在 69~126 cm 之间，去除特殊点，数据标准差为 0.12，各点位间数据的差异性明显变小，并且图中沉降量曲线变化也更加平稳，波动性很小。

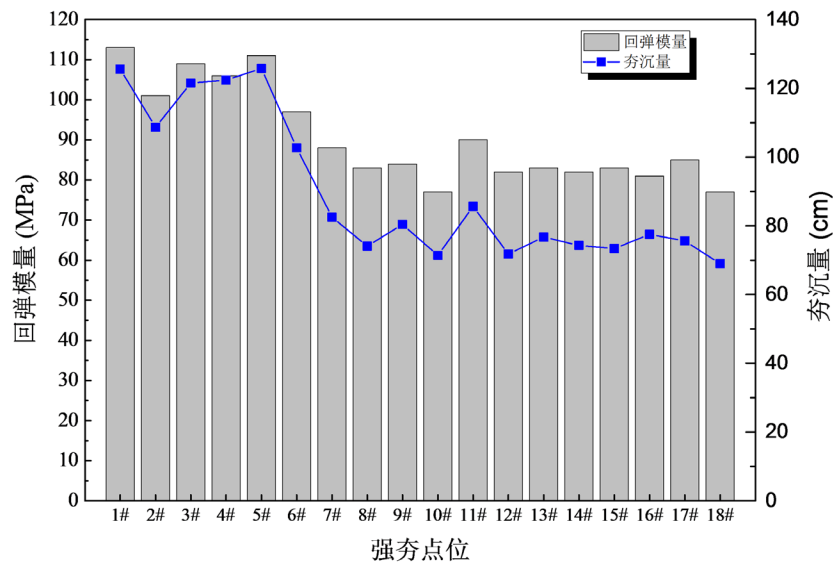


Figure 10. The relationship between the settlement and compressive rebound modulus after the 2nd compaction

图 10. 夯沉量与回弹模量关系

b) 累计夯沉量与回弹模量的数值关系

由图可知第 2 次强夯在加固后，整体上夯沉量的变化与测得的回弹模量值表现出明显的规律性。通过对累计夯沉量与回弹模量的数据进行线性拟合，得到两者之间的关系式，如图 11。

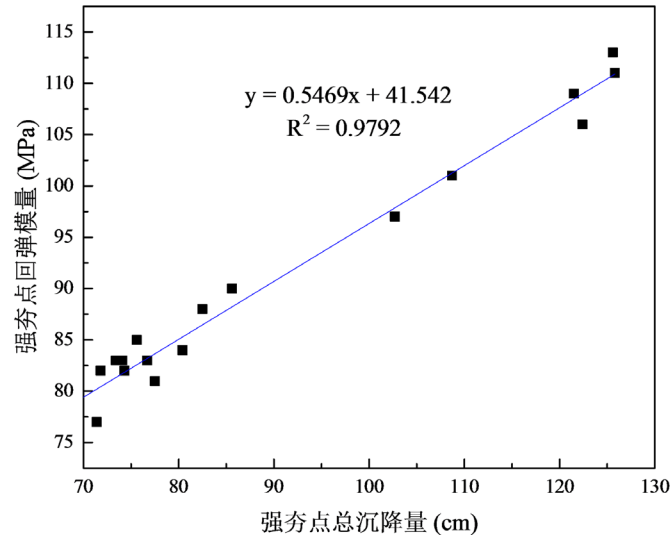


Figure 11. The relational equation between the settlement and compressive rebound modulus

图 11. 累计夯沉量与回弹模量关系图

得出： $y = 0.5469x + 41.542$ ， $R^2 = 0.9792$ 。y 为强夯后的回弹模量值(MPa)，x 为强夯后的累计沉降量(cm)。

综上所述，第 2 次加固后，回弹模量与沉降的趋势线变化趋势一致，均呈现出下降趋势，在整体上可以理解为最终夯沉量越大强夯后的路基模量值越大，而且某些点位的夯击次数越多、沉降变化越小，

模量值越大。第 1 次强夯后, 强夯区整体表现为夯沉量越大, 路基回弹模量越小, 即夯沉量与回弹模量变化相反; 第 2 次强夯后, 累计夯沉量与回弹模量的变化趋势相同, 由关系式可以看出, 累计夯沉量越大, 路基回弹模量越大。

6. 结论

1) 根据工程要求与杂填土填埋现状, 确定了所需加固的强夯范围, 设计了加固深度、夯点间距、夯锤落距、强夯遍数等施工参数, 并结合效果检测得到了验证。

2) 强夯后, 各点位之间的强度与承载能力的差异性得到明显改善。

3) 结合强夯后的回弹模量检测, 提出了以强夯沉降量作为检测指标, 即所在工程区域在第二次强夯后夯沉量达到 0.7~0.8 m 时, 回弹模量值均超过 70 MPa, 路基承载能力可以达到要求。

4) 提出了夯沉量作为检验强夯效果的指标, 强夯后强夯点位之间的夯沉量与模量值均匀化, 强夯后夯沉量越小模量值越大, 地基抵抗变形的能力越强。并得出累计夯沉量 x (cm) 与回弹模量 y (MPa) 的关系式: $y = 0.5469x + 41.542$, $R^2 = 0.9792$ 。

参考文献

- [1] 王雪松, 秦晓燕, 郭友. 抛石挤淤换填处理津港高速垃圾填埋段路基的试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(3): 193-195.
- [2] 许立斌, 王书芳. 强夯置换法在处理生活垃圾地基中的应用[J]. 勘察科学技术, 2004(5): 44-45.
- [3] 宋进联, 黄海. 注浆技术在处理杂填土时的应用及探讨[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(6): 57-58.
- [4] 焦瑞玲. 北京高速铁路动车段垃圾填埋场地基处理现场试验研究[J]. 铁道标准设计, 2009(2): 76-80.
- [5] 刘建华. 强夯处理城市道路杂填土路基实践[J]. 城市道桥与防洪, 2006(2): 69-71.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询; 或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/> 顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org