

强夯法加固粉土路基现场试验研究

孟祥龙¹, 孔 军¹, 王 凯¹, 姚占勇^{2*}, 彭俊强¹, 蒋红光², 毕玉峰³, 滕显飞⁴, 马川义¹, 李 慧²

¹山东高速集团有限公司, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

³山东省交通规划设计院有限公司, 山东 济南

⁴广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州

Email: *zhanyong-y@sdu.edu.cn

收稿日期: 2021年3月29日; 录用日期: 2021年4月18日; 发布日期: 2021年4月25日

摘 要

依托典型黄泛区高速公路工程, 开展了松铺高度为4 m的粉土路基强夯填筑试验研究, 通过试验路测试, 优化了相关工艺参数, 分析了强夯法加固粉土路基的效果。结果显示, 采用1500 kN·m的夯击能填筑松铺高度为4 m的黄泛区粉土路基是可行的, 其合理设计和工艺参数为夯击能采用1500 kN·m, 夯击数为10击, 夯间距为3.2 m, 土的含水率宜控制在最佳含水率的-5%~3%范围内; 经多点夯、满夯之后, 强夯路基的空间密度仍呈现不均匀分布, 其中夯锤下的土体压实度略高于夯间2个百分点, 上部土体的压实度则显著高于下部土体约6个百分点; 夯后路基的平均静回弹模量约为52 MPa, 其中夯间承载能力略低于夯锤以下约2.7 MPa; 为保证路基支撑的均匀性, 强夯路基上部应该设置一定厚度的均匀过渡层, 强夯路基上部设置2 × 20 cm石灰处置土过渡层后, 路基静回弹模量约提高1倍, 路基支撑均匀。

关键词

强夯, 粉土路基, 夯沉量, 静力触探, 压实度, 工艺参数

Field Test Study on Consolidation of Silty Subgrade by Dynamic Compaction

Xianglong Meng¹, Jun Kong¹, Kai Wang¹, Zhanyong Yao^{2*}, Junqiang Peng¹,
Hongguang Jiang², Yufeng Bi³, Xianfei Teng⁴, Chuanyi Ma¹, Hui Li²

¹Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd., Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

³Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Jinan Shandong

⁴Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Email: *zhanyong-y@sdu.edu.cn

*通讯作者。

文章引用: 孟祥龙, 孔军, 王凯, 姚占勇, 彭俊强, 蒋红光, 毕玉峰, 滕显飞, 马川义, 李慧. 强夯法加固粉土路基现场试验研究[J]. 土木工程, 2021, 10(4): 285-294. DOI: 10.12677/hjce.2021.104032

Abstract

This paper performed experimental investigation on the dynamic compaction of a typical expressway silt roadbed with a height of 4 m in the Yellow River flooding area. Based on experimental achievement, relevant technological parameters were optimized and the effect of the dynamic compaction method on strengthening the silt roadbed was characterized. The results indicated that the tamping of 1500 kN·m is feasible to fill silt roadbed in Yellow River flooding area with the height of 4 m. The optimized tamping energy is 1500 kN·m with the tamper spacing of 3.2 m. The tamping number is controlled at 10 and the soil moisture content should be controlled in the optimal moisture content -5%~3% range. After multi-point compaction and full compaction, the spatial density of the dynamic compaction roadbed still presents an uneven distribution, among which the compaction degree of the soil under the rammer is slightly higher than 2%, while the compaction degree of the upper soil is 6% higher than that of the lower soil. The average static resilient modulus of the rammed roadbed is about 52 MPa, among which the load capacity between rammers is slightly lower than that under the rammer, about 2.7 MPa. In order to ensure the uniformity of subgrade support, a uniform transition layer of a certain thickness should be set at the upper part of the dynamic compaction subgrade. After setting a 2 × 20 cm lime treated soil transition layer at the upper part of the dynamic compaction subgrade, the static resilient modulus of the subgrade would be increased by about one time, and the subgrade support would be uniform.

Keywords

Dynamic Compaction, Silt Subgrade, Tamping Settlement, Static Sounding, Compaction Degree, Process Parameters

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

强夯法是反复将夯锤提至一定高度然后自由落下，通过对地基的冲击和振动作用加固地基的一种经济、高效的土体加固方法，目前被广泛应用于各种地基加固。自 20 世纪 70 年代初法国人梅纳首次采用强夯法加固填土地基以来，强夯技术已广泛的应用于世界各地地基加固工程。随着技术的成熟，强夯法在公路路基的加固中也得到了一定的应用[1] [2] [3]，并因其施工效率高、工程经济等突出特点引起工程界的广泛关注。但由于强夯动力填筑路基的空间密度是不均匀的，这与传统的路基填筑采用压路机碾压并以压实度作为路基压实质量控制和评价的主要技术指标不同，强夯路基的相关设计和工艺参数尚不明确，也无法采用现行的路基设计和施工标准进行质量评价。合理确定强夯路基的设计、工艺参数并评价强夯填筑路基的加固效果，成为目前道路工程界普遍关心、并严重制约强夯技术在路基工程中的重要技术问题。

目前，国内外对强夯加固地基的工程应用和工程技术的研究成果十分丰富，其中大部分是通过物理模型试验和数值模拟的方法分析地基强夯加固机理和效果，优化相关工艺参数，为了有效模拟地基

强夯动力加固问题,部分学者也对数值模拟的方法开展了相关研究[4]-[10]。为了解决强夯加固过程模拟,姚占勇等基于 ABAQUS 通用软件开发了土体模量、粘聚力、摩擦角等力学参数随夯击过程动态变化的强夯用户子程序[11]。郑颖人等对不同地基强夯加固机理及加固效果进行了研究,拓宽了强夯在地基加固中的应用范围[12]-[17]。路基强夯加固方面,罗恒等对红砂岩路基强夯加固进行了较为系统的研究[18][19][20];乔兰等对湿陷性黄土路基强夯加固效果进行了研究[21][22];姚占勇、崔新壮等通过现场试验,验证了采用强夯填筑高速公路含砂砾黏性土路基的可行性[23][24]。总体而言,强夯法经过多年的发展已经是一种较为成熟的地基加固技术,但在路基加固方面的研究上相对比较滞后,尚未见针对黄泛区粉土路基强夯填筑的相关报道,不同土质强夯路基的工艺参数和工程效果尚待系统研究。

本文依托黄泛区典型高速公路-济(南)东(营)高速公路工程,开展了4 m松填高度的黄泛区粉土强夯填筑试验,通过现场检测,系统分析了强夯路基的工程质量,优化了相关工艺参数,对黄泛区高速公路路基的快速填筑具有重要意义。

2. 依托工程概况

济(南)东(营)高速处于黄泛区平原,该地区地势平坦,主要由黄河冲(淤)积而成,在地表沉积了10 m左右厚的泛滥沉积物,形成了以黄泛区粉土为主的特殊黄泛区地质地貌。该区域粉土及粘粒颗粒含量较少,级配不良,颗粒磨圆度高,难以压实,且在压实过程中表层水分极易蒸发散失,为保证压实质量,需多次洒水,压实质量难以控制。选取150 m典型路段开展粉土路基强夯,路基宽度为28.0 m,路基设计高度为4.95 m,路基断面组成为:中央分隔带宽度为3.0 m,左侧路缘带宽度为 2×0.75 m,车辆行驶车道宽度为 $2 \times (2 \times 3.75)$ m,路基右侧硬路肩宽度为 2×3.5 m,土路肩宽度为 2×0.75 m。路基松填高度为4 m。地基为典型黄泛区粉土地基,地下水位低,不考虑地下水的影响。路面结构为4 cm 改性沥青玛蹄脂碎石(SMA13) + 5 cm 中粒式改性沥青混凝土(AC16C) + 6 cm 中粒式沥青混凝土(AC20C) + 12 cm 大粒径透水性改性沥青混合料(LSPM30) + 36 cm 水泥稳定碎石 + 18 cm 二灰土,路面结构总厚度为81 cm。为提高路基承载能力,路床区设置 2×20 cm 石灰处置土。

路基土的颗粒组成和主要物理性质指标见表1、表2。

Table 1. Grain size distribution

表 1. 土的颗粒组成

粒径/mm	>0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005
粉土	0	0	2.9	8.4	57.1	12.2	19.4

Table 2. Main physical property of the soil

表 2. 试验用土的主要物理性质指标

指标	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重	最大干密度 $\gamma_d/(g \cdot cm^{-3})$	最佳含水率 $w_{op}/\%$
粉土	19.3	32.1	12.8	2.72	1.81	13.6

3. 试验方案

路基松填高度为4 m,筑路材料为典型黄泛区粉土,通过初步试夯,土的含水率宜控制在最佳含水率的-5%~3%范围内。为保证足够的强夯侧限,经计算分析,路基两侧超填2.0 m。参考《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)[25]并经初步试夯,点夯的夯击能采用1500 kN·m,止夯标准为最后两击平均夯

沉量小于 5 cm。

路基填筑完成后先开挖检测路基初始压实度并进行静力触探试验，得到路基的初始状态。初步在试验区中部随即选取互不影响的点位进行逐击试夯，记录每一击的夯沉量数据。夯击结束后对夯点的压实度、含水率进行检测，并进行静力触探试验，分析不同夯击次数下土体密度、强度等的变化规律，确定单点夯的最佳夯击次数、夯击能的影响深度与宽度。静力触探检测点位如图 1 所示，开挖检测压实度的测点位置如图 2 所示。为方便对比分析，静力触探检测和压实度检测均以夯锤底部为零基准面。

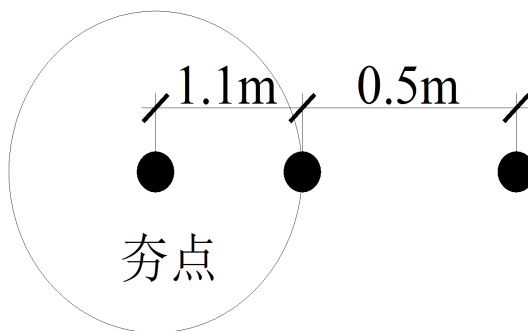


Figure 1. Static penetration detection points
图 1. 静力触探检测点位

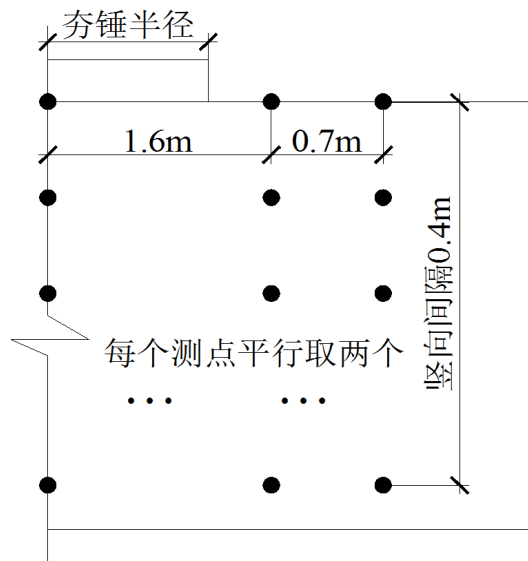


Figure 2. Position of compaction measuring points
图 2. 压实度测点位置

点夯完成后，按照确定的工艺参数进行试验路全段点夯，夯坑整平后采用 800 kN·m 夯击能满夯 2 遍，之后振动压实 1 遍 + 静压 1 遍。检测路基回弹模量和工后沉降。

4. 试验结果与分析

4.1. 单点夯的夯沉量检测

夯击过程中的夯击沉降量可间接反映出强夯的夯击压实效果。试夯结束后，分别对各夯点的单击夯沉量和累计夯沉量进行统计分析，得到了强夯夯沉量与击数的关系如图 3 所示。

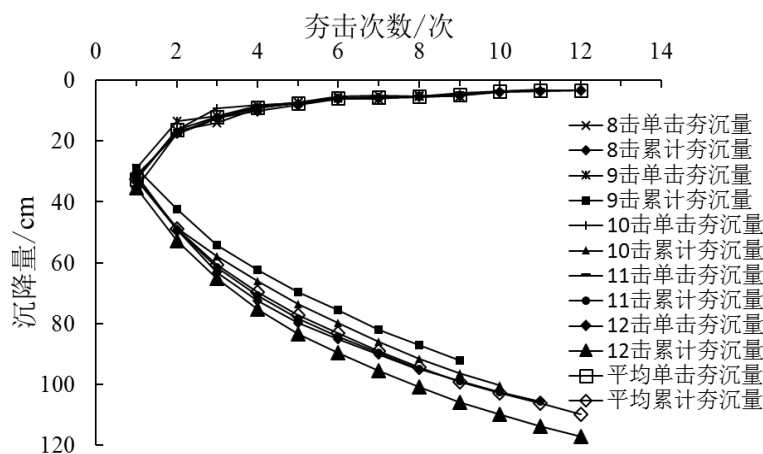


Figure 3. The relationship curve between the settlement and the number of drops
图3. 夯沉降量与夯击次数关系曲线

图3显示,随夯击次数的增加,土体逐渐密实,累计夯沉量增长的幅度逐渐减小,总沉降量1 m左右,且地面隆起量较小,强夯加固效果较好;第1击沉降量最大,随夯击次数增加快速收敛,6击以后单击夯沉量逐步趋于平稳,在第9击之后沉降量均已小于5 cm;试验区不同夯击点位的夯击沉降量基本相同,离散型较小,以5 cm作为止夯标准时可初步确定单点强夯最佳夯击次数为9击或10击。与地基加固不同,《公路路基设计规范》(JTG D30-2015) [26]对高等级公路路基压实度均作了明确规定,因此仍需通过其他试验进一步确定最佳夯击次数。

4.2. 单点夯后土体的静力触探检测

点夯完成后,对于9击、10击的夯点的夯锤正下方、夯锤边缘、夯锤外侧、强夯前路基进行静力触探检测,检测结果见图4~6。

图4、图5显示,强夯前的贯入阻力 P_s 在深度2.8 m左右明显上升,这是由于该部分已经到达原有地基位置,地基在填筑路基之前已经加固处理;试验区填土经过强夯处理后,填土范围内的土体 P_s 值均有了不同程度的提高,且地基处的 P_s 值相较强夯前也有不同程度的提高,表明试验所采用的强夯能级能够满足本试验区有效加固深度[27]的要求,且在此填土高度情况下能够对地基进行二次加固;图示4个测点位置的贯入阻力 P_s 的大小依次为夯锤正下方 > 夯锤边缘 > 夯锤外侧 > 强夯前,表明强夯竖向的加固效果要优于径向的加固效果,径向加固范围大于1.6 m,竖向加固深度大于3 m,这是由于强夯动应力径向衰减速度大于竖向衰减速度[18] [28],故径向有效加固范围不大;试验填土经过强夯处理后, P_s 平均值从强夯前的1.54 MPa提高到了强夯后的3.03~5.51 MPa,土体强度发生了明显的提高,提高幅度在97%~258%之间,加固效果明显。

强夯完成之后上部土体的 P_s 值较下部偏小,主要是因为路基填土为非饱和黄泛区粉土,对强夯具有较强的动力响应,随着夯击次数的增加,下部土体逐渐密实,而表层已经夯实的土体会因振动形成夯击扰动层,土体由密实变得相对松散,强度偏低。由于该扰动区域厚度一般在1 m范围内,通过后期的低能满夯可以对此扰动层进一步加固。

图6为9击、10击的 P_s 值对比情况。图6显示,10击土体的 P_s 值比9击土体的 P_s 值提高了12%~20%,表明加固区域的土体在夯击作用下进一步密实,夯击能量得以向外传递,加固影响范围逐渐增大,夯点周围土体随着夯击次数的增加强度会有进一步的提高,但提高幅度不大。这是由于强夯下土体的变形是耗散结构,强夯时向土体系统内部输入负熵流,系统熵减小,最后趋于某个与夯击能对应的相对稳定状

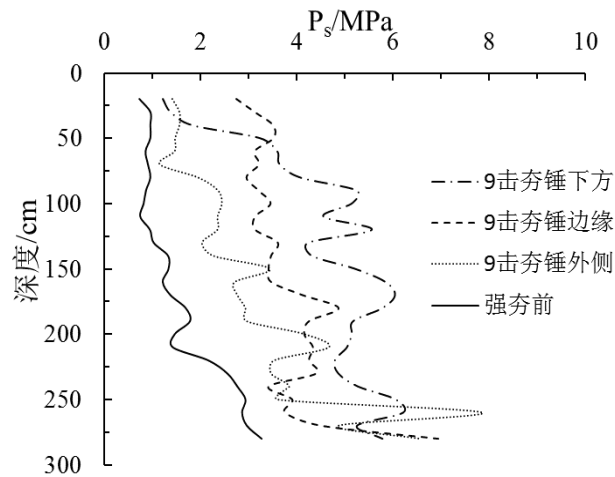


Figure 4. The static cone penetration curve of 9 drops

图 4. 9 击的静力触探曲线

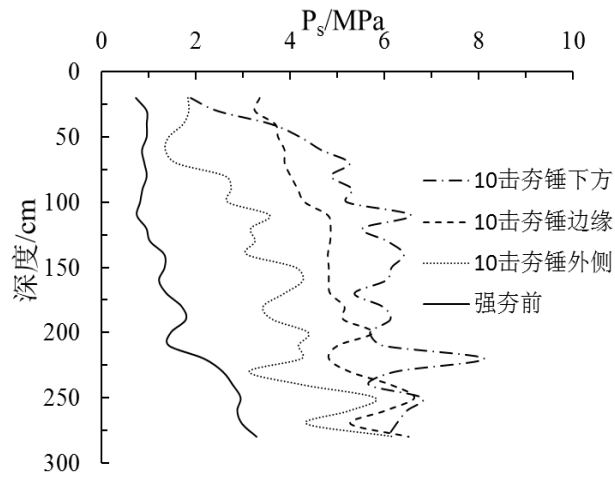


Figure 5. The static cone penetration curve of 10 drops

图 5. 10 击的静力触探曲线

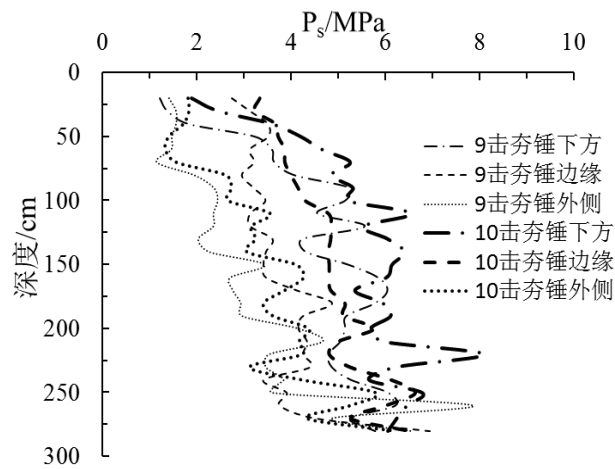


Figure 6. Comparison of static cone penetration results of single point tamping with 9 and 10 drops

图 6. 单点夯 9 击和 10 击的静力触探结果对比

态[29]。因此,在夯击能不变的情况下夯击次数的增加对土体并不会明显的加固效果,相反可能破坏已加固区域的土体,起到相反作用,这与夯沉量检测结果呈现的规律是相吻合的。在满足设计要求的前提下强夯存在一个临界最少夯击次数,即最佳夯击次数

4.3. 单点夯的压实度检测

压实度是路基填土工程的质量控制指标。《公路路基设计规范》(JTG D30-2015) [23]对路堤压实度的规定如表 3 所示。

对单点夯 9 击、10 击后的夯点开挖,采用灌砂法检测不同层位的压实度,测点布置如图 2 所示。0 测点位于夯锤下方,距夯锤中心 1.6 m 为测点 1.6,距夯锤中心 2.3 m 为测点 2.3。压实度检测结果如图 7~9 所示。

Table 3. Degree of compaction of embankment

表 3. 路堤压实度

路基部位	路面底面以下深度/m	压实度/%		
		高速公路、一级公路	二级公路	三、四级公路
上路堤	轻、中等及重交通	0.8~1.5	≥94	≥93
	特重、极重交通	1.2~1.9	≥94	—
下路堤	轻、中等及重交通	1.5 以下	≥93	≥92
	特重、极重交通	1.9 以下	≥92	≥90

图 7、图 8 显示,强夯后路基的压实度均有较程度的提高,检测范围内 9 击、10 击土体的压实度均在 84%以上,平均压实度增幅在 10.9%~17.9%之间,进一步说明试验所采用的强夯能级能够满足 4 m 松填高度强夯填筑有效加固深度的要求,且能够对地基进行二次加固,加固效果明显。9 击、10 击中测点 0、测点 1.6、测点 2.3 的压实度依次递减,由测点 2.3 的压实度可知,9 击、10 击的径向有效加固范围已超过 2.3 m。

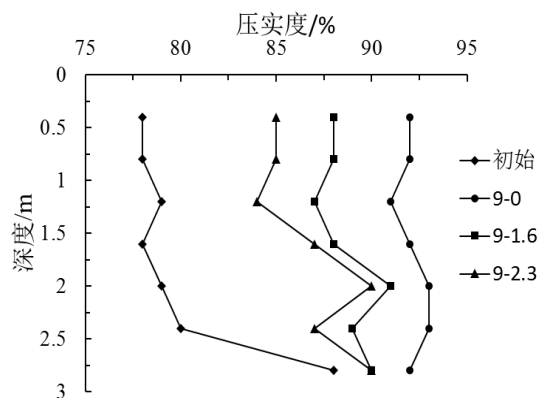


Figure 7. Degree of compaction after 9 drops

图 7. 9 击压实度

图 9 为 9 击、10 击的压实度对比情况。由图 9 可知,10 击后测点 2.3 的压实度增加较明显,较 9 击平均增加了 4.4 个百分点;其次为测点 1.6 和测点 0,压实度增加了 2.3~4.4 个百分点,表明土体在强夯作用下加固区域继续增大,但增加幅度较小。

综合静力触探和压实度检测结果，对于松铺厚度为 4 m 的黄泛区粉土路基，采用 3.2 m 行间距点夯 10 击是合理的。

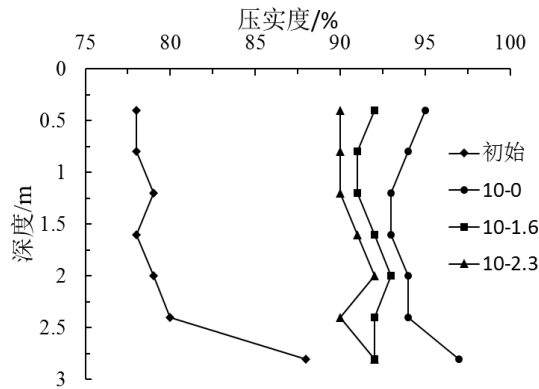


Figure 8. Degree of compaction after 10 drops
图 8. 10 击压实度

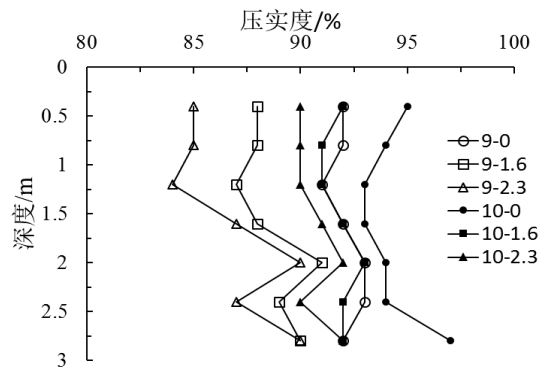


Figure 9. Comparison of degree of compaction of single point tamping with 9 and 10 drops
图 9. 单点夯 9 击和 10 击压实度对比

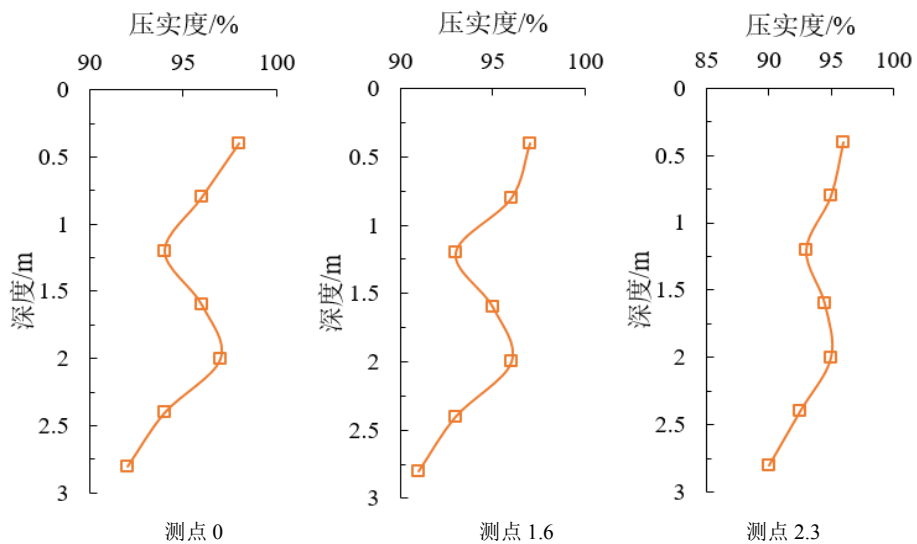


Figure 10. Test results of compaction after multi-point tamping
图 10. 多点夯后压实度检测结果

Table 4. Dynamic compaction process parameters**表 4.** 强夯工艺参数

夯击能/kN·m	夯点间距/m	最佳击数/次	止夯标准/cm	有效加固深度/m	径向有效加固范围/m
1500	3.2	10	≤5	>3	>2.3

注：为保证工程质量，实际夯击次数要同时满足最佳夯击次数和止夯标准。

4.4. 多点夯与满夯后的检测

根据点夯试验结果，拟定强夯工艺参数如表 4。夯点采用正方形布置，采用隔行跳夯的方式进行路基强夯。点夯后推平夯坑进行满夯。满夯后选择典型夯点进行路基的压实度检测，结果如图 10。

图 10 显示，经多点夯和满夯后，夯点间以及路基上部压实度得到了显著提高：其中测点 0 (即夯锤下)土体的压实度达到 92%~98%，测点 1.6 (正向夯间)土体的压实度达到 91%~97%，测点 2.3 (斜向夯间)土体的压实度达到 90%~96%。整体上，强夯路基的空间密度呈现不均匀分布，夯锤下的土体压实度略高于夯间测点 1.6、测点 2.3 约 1~2 个百分点，上部土体的压实度则显著高于下部土体约 6 个百分点。

采用承载板法检测强夯后路基的回弹模量，结果表明，夯锤以下路基的回弹模量为 53 MPa，夯间的路基承载能力略低于夯锤以下路基的承载能力约 2.7 MPa，平均约为 52 MPa。根据设计方案，夯后路基上部设置 2 层灰土处置层，经检测设置两层灰土层后 3 个测点的静回弹模量约提高 1 倍，路基支撑均匀。

5. 主要结论与建议

本文通过现场试验，验证了采用 1500 kN·m 的夯击能填筑松铺厚度 4 m 的黄泛区高速公路粉土路基的可行性，得到以下主要研究结论和建议。

1) 强夯填筑松铺厚度 4 m 的黄泛区高速公路粉土路基合理设计和工艺参数为：夯击能 1500 kN·m，夯击数为 10 击，采用正方形布点的合理夯间距为 3.2 m，土的含水率宜控制在最佳含水率-5%~3%范围内。

2) 松铺厚度 4 m 的粉土路基点夯 10 击后的夯坑累计深度约为 1 m，经多点夯、满夯之后，整体上，强夯路基的空间密度呈现不均匀分布：夯锤下的土体压实度略高于夯间测点 1.6、测点 2.3 约 1~2 个百分点，上部土体的压实度则显著高于下部土体约 6 个百分点；夯间的路基承载能力略低于夯锤以下路基的承载能力约 2.7 MPa。为保证路基支撑的均匀性，强夯路基上部应该设置一定厚度的均匀过渡层。

3) 强夯路基上部设置 2 × 20 cm 石灰处置土层后，路基静回弹模量约提高 1 倍，路基支撑均匀。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51608306)；山东大学青年学者未来计划 (2019WLJH60)；山东省科技厅科技发展计划(2019B47_1)。

参考文献

- [1] 曾国熙, 卢肇钧, 蒋国澄, 叶政青. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [2] 王铁宏. 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.
- [3] 冶金工业部建筑研究总院. 强力夯实法与振动水冲法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- [4] Sandler, I.S. and Rubin, D. (1979) An Algorithm and a Modular Subroutine for the CAP Model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **3**, 173-186. <https://doi.org/10.1002/nag.1610030206>
- [5] Ghassemi, A., Pak, A. and Shahir, H. (2009) A Numerical Tool for Design of Dynamic Compaction Treatment in Dry

- and Moist Sands. *Iranian Journal of Science and Technology*, **33**, 313-316.
- [6] Ma, Z.Y., Dang, F.N. and Liao, H.J. (2014) Numerical Study of the Dynamic Compaction of Gravel Soil Ground Using the Discrete Element Method. *Granular Matter*, **16**, 881-889. <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0529-x>
- [7] Fan, D.H. (2013) Analysis on Dynamic Compaction and Mechanical Behavior of Reclamation Foundation Using Soil Tests. *Materials Testing*, **55**, 892-896. <https://doi.org/10.3139/120.110509>
- [8] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2903-2909.
- [9] 刘洋, 张铎, 闫鸿翔. 吹填土强夯加排水地基处理的数值分析与应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1478-1486.
- [10] 牛志荣, 杨桂通. 冲击荷载下土体位移特征研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1743-1748.
- [11] 姚占勇, 周冲, 蒋红光, 毕玉峰, 孙梦林, 周磊生, 齐辉. 基于帽盖模型的强夯地基应力-应变特征与有效加固范围分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 969-977.
- [12] 郑颖人, 陆新, 李学志, 冯遗兴. 强夯加固软粘土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 21-25.
- [13] 张清峰, 王东权. 煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 1049-1056.
- [14] 董倩, 况龙川, 孔凡林. 碎石土地基强夯加固效果评价与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 337-341.
- [15] 贺为民, 范建. 强夯法处理湿陷性黄土地基评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4095-4101.
- [16] 周健, 史旦达, 贾敏才, 崔积弘. 低能量强夯法加固粉质黏土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2359-2364.
- [17] 年廷凯, 李鸿江, 杨庆, 陈允进, 王玉立. 不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 139-144.
- [18] 罗恒, 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 郭乃正, 何长明, 赵炼恒. 红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土体变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2701-2706.
- [19] 王桂尧, 胡振南, 匡希龙. 红砂岩路基强夯处理大变形数值模拟方法与效果分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2451-2456.
- [20] 郭乃正, 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 赵炼恒, 但汉成. 大颗粒红砂岩高填方路基强夯加固理论与试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(1): 185-189.
- [21] 乔兰, 丁余慧, 于德水. 强夯法处理路基的加固效果[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(6): 659-661.
- [22] 王吉利, 刘怡林, 栾茂田, 沈兴付. 强夯法处理黄土路基检测方法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4562-4567.
- [23] 崔新壮, 姚占勇. 强夯在威乳高速公路改建工程中的应用研究及一般性推广[J]. 山东大学学报(工学版), 2008(8): 53-56.
- [24] 王楹, 姚占勇, 张昊. 强夯加固公路路基的工后沉降分析[J]. 公路交通科技, 2016(3): 169-174.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2012.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [27] 孔位学, 陆新, 郑颖人. 强夯有效加固深度的模糊预估[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 807-809.
- [28] 何长明, 邹金锋, 李亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 628-632.
- [29] 颜波, 林沛元, 于海涛, 李海洋, 丁庆峰. 强夯地基处理夯沉量及夯击能量耗散分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 249-252.