

吹填土地地区路基处理新方法效果对比研究

郝志超¹, 沈宇鹏^{1, 2*}, 张尧禹³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 轨道工程北京市重点实验室, 北京 100044;

3. 中交公路规划设计院工程勘察公司, 北京 100088)

摘要: 对某沿海吹填土地地区路基运营期工后沉降长期监测, 用双曲线拟合法进行沉降预测, 对高真空击密和板体稳定技术两种工法的实测沉降和预测沉降进行对比分析。结果表明两种工法处理的路段的路中实测最终沉降平均值分别是 53 mm 和 61 mm, 预测沉降集中在 100~150 mm 之间。两种工法均能较好的控制工后沉降, 但高真空击密法处理后的路段工后沉降更小并且能更快的趋于稳定。造价方面高真空击密处理 6 m 深度的造价约 85 元/m², 板体稳定法处理 80 cm 深度的造价就达到了 80 元/m², 说明高真空击密法在工后沉降、处理深度、处理造价等方面综合处理效果更有优势, 更适合在该地区推广应用。

关键词: 吹填土; 路基处理; 高真空击密法; 板体稳定技术; 效果对比

中图分类号: TU44; U213.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0579-05

作者简介: 郝志超(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为铁道工程。E-mail: 11121339@bjtu.edu.cn。

Comparative studies on treatment effects of new methods for dredger fill foundation

HAO Zhi-chao¹, SHEN Yu-peng^{1, 2}, ZHANG Yao-yu³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Track Engineering, Beijing

100044, China; 3. China Communications Construction Company Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: On account of a long-term observation of subgrade subsidence after construction in a certain coastal dredger fill region and Subsidence prediction using hyperbolic fitting method, the measured settlement and predicting subsidence of High vacuum compaction method and Board ground stability technique were analyzed. The results show that the average measured final settlement is 53 mm and 61 mm respectively, predicting subsidence was between 100 mm to 150 mm. Two kinds of method can better control post-construction settlement, but High vacuum compaction method processed sections are smaller and faster to post-construction settlement. in terms of Cost ,high vacuum tight treatment cost about 85 Yuan/m² of 6 m depth, the Board ground stability technique of 80 cm cost reaches 80 Yuan/m². It shows that the High vacuum compaction method treatment effect has more advantages on the post-construction settlement, treatment depth, the processing cost and so on, and is more suitable for popularization and application in the region.

Key words: dredger fill; subgrade treatment; high vacuum compaction method; board ground stability technique; comparison of effect

0 引言

吹填法是沿海地区填海造陆的一种主要方法, 所形成的吹填土地基具有天然含水率高、均匀性差、强度低等性质, 非常不利于工程建设。高真空击密法和板体稳定技术为近年来出现的吹填土地地区路基处理新型方法, 以其施工速度快、加固效果明显、可最大限度利用吹填砂料等优点正不断受到建设单位的青睐^[1]。但这两种新方法的处理效果在不同吹填土地地区也存在明显的区别, 比较两者的适用情况不能单纯依靠其他地区的应用经验。此外现在对软基处理方法在吹填土地地区处理的适用性研究, 大都集中在设计阶段和施工

阶段, 随着道路通车而结束, 很少能够继续进行系统的观测研究^[2]。因此, 结合当地实际工程, 在后期运营阶段对两种处理方法的处理效果进行对比是研究吹填土地地区路基处理方法适用性的关键, 同时对该吹填土地地区道路施工阶段的路基处理及运营阶段的路基养护具有重要意义。

高真空击密法发明以来, 吴价城等^[3]介绍了高真

基金项目: 唐山市科技计划项目 (10130204C-1)

收稿日期: 2013-07-17

*通讯作者

空击密法的加固机理、技术要点、和施工工艺，并结合大量工程实例对加固前后土的物理力学指标对比，指出高真空击密法能够满足工程设计各项要求，能很好的应用于沿海饱和软土的处理。徐士龙等^[4]结合实际工程从预沉降量和土层物理力学指标两方面，对高真空击密法加固处理饱和软黏土地基，进行了加固评价，指出采用高真空击密法加固堆场地基，可取得符合设计要求的加固效果。高真空时间、夯点间距等施工参数对加固效果均有重要影响。对于板体稳定技术马茂军^[1]、李中山等^[5]结合实际工程从路基弯沉、工程造价等方面研究了板体稳定技术在吹填土地区的适用性，指出板体稳定技术能有效进行吹填砂地区的加固处理，具有较好的技术效果和经济效果。综上所述，研究成果是针对两种路基处理方法的适用性从施工阶段土的物理力学指标、路基弯沉等方面进行了研究而在实际工程中，真正能够反映软基处理方案效果的应该是工后的沉降，本文主要以某吹填土地区既有高速公路的运营阶段长期沉降观测资料为基础，进行实测工后沉降统计分析并利用曲线拟合法来进行沉降预测分析，对高真空击密法和板体稳定技术的处理效果进行对比研究，为今后该吹填土地区路基处理提供指导意见。

1 地基处理工程概况

1.1 地区概况

研究区域大都由吹填砂形成，基本未经天然沉积和压实，含水率高；动力触探数据离散性较大。吹填土性质自上而下可分为 4 层。第一层：浅灰或黄绿色粉质黏土，厚度 1.5~3.0 m，可塑—软塑状态，容许承载力 90 kPa 左右。第二层：软塑状灰—灰黑色粉质黏土和粉土，厚度 13~15 m，容许承载力 120~150 kPa。第三层为灰黄、黄褐色粉土和可塑—硬塑状态粉质黏土，局部夹浅黄的粉砂，厚度 15.9~27.8 m，固

结度为 0.87，属欠固结土，容许承载力 200~400 kPa。第四层：灰—灰黑色粉质黏土，厚度 10.0~14.4 m，固结度为 0.54，属欠固结土，容许承载力 250 kPa。区域内已修建多条公路，不同路段采用不同的处理方法进行了处治，如强夯法、山皮石换填、板体稳定技术、高真空击密法。其中高真空击密法处理的 A 路段和板体稳定技术处理的 B 路段路基高度和交通荷载状况基本一致，本文对这两条路的路基处理效果进行对比研究。

1.2 路基处理方法

(1) 高真空击密法

上海港湾软地基处理工程有限公司在 1999 年至 2003 年间，通过多项工程的试验研究，发明了“高真空击密法”软地基处理工法。它是通过数遍的高真空强制排水，并结合数遍合适的变能量击密（强夯），对施工场地进行处理后，场地表层会形成一定厚度的硬壳层，从而能够达到提高承载能力，减小差异沉降与工后沉降的目的。与其他软土地基处理方法相比，高真空击密法工期较短、造价较低、能克服普通强夯法对饱和软土施工容易生产弹簧土的缺陷^[3]。本工程高真空击密处理相关参数如下：

卧管间距为 5 m，井点管间距为 8.3 m，配备一定数量的真空泵 24 h 排水。低能量强夯施工，采用 10~12 吨的夯锤，夯锤直径 2.5 m；强夯遍数为 3 遍，夯点间距 4.0 m×4.0 m；第一遍夯击能量 2×500 kN·m，每点两击，第 2 遍夯击能量 2×700 kN·m，每点两击。第三遍夯击能量 2×900 kN·m，每点两击。

(2) 板体稳定技术

板体稳定技术原理是通过将一定比例的添加剂和松软地基混合形成具有一定厚度的硬壳层而提高地基承载力，具有原位固结、就地取材、节能环保等优点。本工业区吹填细砂掺加复合固化剂试样的干密度为 1.62~1.67 g/cm³，掺加 3%水泥和 0.06%复合固化剂。

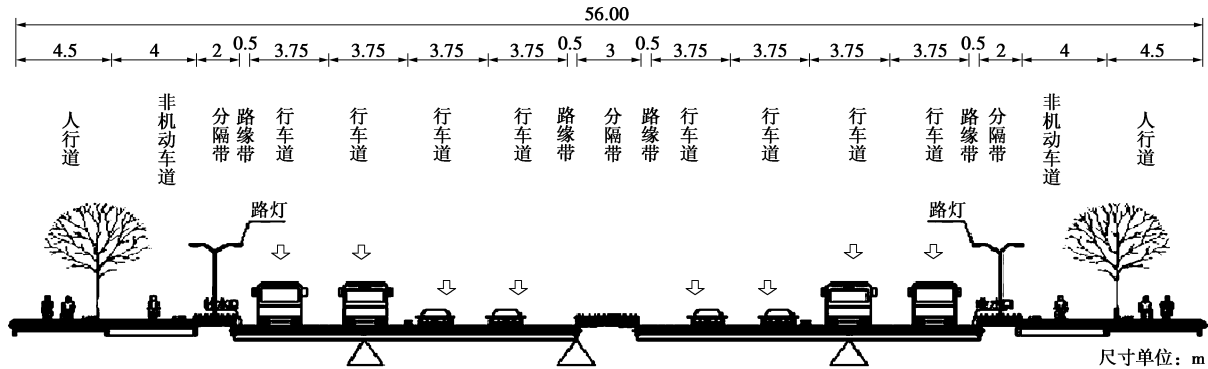


图 1 沉降监测布置示意图

Fig. 1 Layout of subsidence monitoring

1.3 工后沉降监测方案

监测方案：既有的 2 条公路每 500 m 设置一个监测断面，在地质条件突变地段增加观断面。在路基中间隔离带、每侧路基面中心设置沉降观测点，一个断面共设置 3 个沉降观测点，监测布置如图 1 所示。A、B 两路段共 36 个监测断面，108 个监测点。

测量等级：(按行业规范执行)采用二等水准测量；测量点每次按二等水准与工作基点联测。

测量频率：观测时间为 12 个月；前 3 个月 4 次/月；接着 3 个月 2 次/月；最后 6 个月，1 次/月。

2 实测沉降分析

2.1 沉降过程

本研究从 2011 年 5 月 15 起开始对路段断面监测点进行沉降监测，到 2012 年 4 月 22 日为止，总计 342 天，经过大量的监测数据统计工作，得到了充分的沉降数据。为了对比研究两路面的沉降过程，在 A、B 两条路上各选取一典型断面，分别做出 A、B 两路断面上路左、路中、路右 3 个监测点沉降 - 时间关系曲线如图 2 所示。

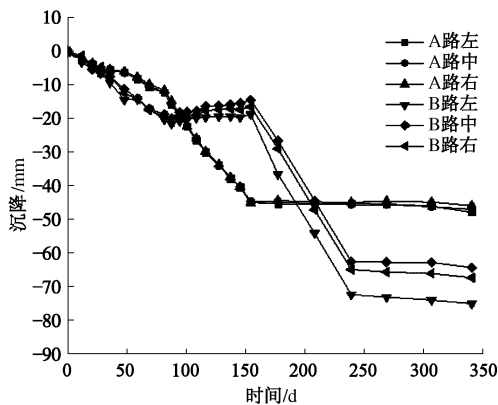


图 2 断面沉降过程曲线比较

Fig. 2 Comparison of subsidence curves

根据图 2 中 A、B 两路断面左、中、右的沉降曲线特征，A 路断面在监测前 150 d 沉降线性增大，约为 0.3 mm/d。第 150 天以后，路基沉降趋于稳定，路基主固结沉降完成。最终沉降量约为 45 mm。而 B 路断面沉降稳定则在 240 d 后，比 A 路多用了近 100 d，最终沉降量约 62 mm。可知 A 路基断面相对于 B 路断面趋于稳定用的时间更短且最终沉降量更小。而 B 路段断面 3 个点沉降速率在第 100 天附近出现了负值，第 170 天~第 240 天内沉降速率突然增大，最大值约为 0.6 mm/d，出现了沉降突变阶段，反映出 B 路沉降过程的极不稳定性。

2.2 实测最终沉降

为了分析所有测点的最终沉降量的情况，本文以 2012 年 4 月 22 日监测结束日期各断面测点的累计沉降为最终沉降量进行对比分析。统计显示 A 路实测最终沉降最小值为 16 mm，最大值为 89 mm，路基中心实测最终沉降平均值为 53 mm。B 路 2012 年 4 月 22 日实测最终沉降最小值为 45 mm，最大值为 75 mm，路基中心沉降平均值为 61 mm。各测点实测最终沉降均在 100 mm 以内。表 1 是两条路所有测点实测最终沉降量的分布范围，可以看出两条路大部分测点实测最终沉降量都集中在 50~70 mm 之间。说明两种地基处理方法均能有效的控制路基的工后沉降，而从各测点沉降平均值看，A 路沉降平均值比 B 路沉降平均小 8 mm。

表 1 实测最终沉降量分布范围

Table 1 Distribution ranges of observed subsidences

沉降量 区间	30 mm 以下	30~50 mm	50~70 mm	70 mm 以上
A 路段	10%	20%	55%	15%
B 路段	0%	16%	56%	28%

3 沉降预测及分析

3.1 双曲线法

由于实测沉降曲线的形态近似于一条双曲线，所以可以采用双曲线来配合，并通过将曲线外延来推得未来某时刻的沉降量或最终沉降量。双曲线具体拟合方法见参考文献[6]。

3.2 抛物线法

对于有些情况沉降曲线在沉降 - 时间对数坐标系 (s - lnt) 中，沉降曲线可由两部分组成。第一部分可由抛物线来拟合，第二部分（即次固结部分）可由直线拟合；只要运营期的有效应力小于预压期末的固结应力，次固结可以忽略不计。沉降曲线的一般表达式为

$$s = a(\lg t)^2 + b(\lg t) + c \quad , \quad (1)$$

式中，参数 a, b, c 可用实测数据经过回归求得方法求得。

3.3 预测方法的选择

通过各个测点预测沉降曲线和实测沉降曲线的对比发现，双曲线拟合预测的后期预测沉降比实测沉降偏小且误差较大，无法较好的反映该吹填土地区沉降的实际特征。抛物线拟合方法能较好的预测该地区沉降。取某一断面为例来简单验证两种曲线拟合方法的适用情况。以截至到 2011 年 9 月 30 号之前的 138 d 内的实测数据分别用抛物线和双曲线拟合方法进行拟合预测，并与后期实测沉降数据进行对比。

从图 3 中可以看到，双曲线拟合方法在前期拟合

较好，然而后期预测与实测数值相差较大，抛物线拟合曲线后期和实测曲线比较接近。其他研究断面沉降预测也大都反映了类似的特征。因此，选用抛物线拟合预测的最终预测沉降量为准。

3.4 预测最终沉降分析

预测最终沉降的时间取自监测日期后第 2000 天，预测路基约 5 年后的沉降。预测采用抛物线拟合法，以 excel 表格为数据处理工具，用监测期 342 d 内的实测沉降拟合求出抛物线公式 $s=a(\lg t)^2+b(\lg t)+c$ 中的 a, b, c 参数，然后将最终时间值 2000 带入抛物线公式，即得出最终沉降预测值。

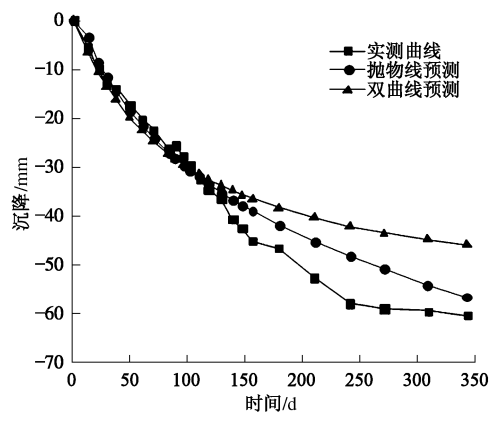


图 3 两种预测沉降和实测沉降曲线对比图
Fig. 3 Comparison among two predicted and observed subsidence curves

用抛物线拟合法预测的两条路 108 个测点中，A 路最终沉降量最小值为 32 mm，最大值为 178 mm，路基中心预测沉降平均值为 117 mm；B 路最终沉降量最小值为 78 mm，最大值为 149 mm，路基中心预测沉降平均值为 116 mm，两条路的预测沉降平均值基本相同。从表 2 来看，两条路大部分测点的预测最终沉降量分布范围也接近，都在 100~150 mm 之间。《公路路基设计规范》规定软土地区高速公路路基容许工后沉降为 $s\leq 300$ mm，两条路预测最终沉降平均值均能满足要求。

表 2 预测最终沉降量分布范围
Table 2 Distribution range of predicted subsidence

沉降量区间	50 mm	50~100 mm	100~150 mm	150 mm
	以下			以上
A 路段	9%	17%	54%	20%
B 路段	0%	16.5%	67%	16.5%

4 经济性对比

另外在处理深度上板体稳定技术的处理深度一般 1 m 左右，而高真空击密法处理深度可达 6 m。从造价上看高真空击密法处理 6 m 深度的造价约 85 元/m²，

板体稳定法处理 80 cm 深度的造价就达到了 80 元/m²。同时由于吹填土的灵敏度高，各地吹填土的性质也有不同，板体稳定技术的应用必须慎重选择合适的固化剂。

5 结论及建议

通过监测 A 路和 B 路运营期工后沉降和用抛物线拟合法预测最终沉降量，加以处理分析，并综合其他方面对比研究可以得出以下结论：

- (1) 高真空击密法处理后的路基沉降能更快的趋于稳定，稳定时间比板体稳定技术提前 100 d 左右。
- (2) 高真空击密法处理后的路基沉降过程更加平缓稳定，而板体稳定技术处理路段受当地降水量的影响可能出现沉降速率的突变，建议加强路基排水设施。
- (3) 抛物线拟合法比双曲线拟合法更适合该吹填土地区的工后沉降预测。
- (4) 两种工法处理后的路基最终沉降和预测最终沉降都能满足要求，但高真空击密法处理后的路基实测最终沉降更小。

可知，高真空击密法处理后的路基沉降量更小，沉降过程更加稳定，综合效果更好，因而更适合在该吹填土地区大量推广应用。

参考文献：

[1] 马茂军. 板体地基稳定和高真空击密技术在曹妃甸工业区吹填砂路基处理中的应用比较[C]// 企业科技与发展, 2010: 79 - 89. (MA Mao-jun. The Comparison between the Applications of Board Ground Stability and High Vacuum Compact Technique in Cao Feidian Industrial Zone's Hydraulic Sand Reclamation Roadbed Treatments[C]// Enterprise Science And Technology &Development, 2010: 79 - 89 (in Chinese))

[2] 周焕云. 高速公路软基处理效果评价及选型策略研究[D]. 南京：东南大学，2003. (ZHOU Huan-yun. Study of expressway soft groud treatment chosing[D]. Nanjing: Southeast Univercity, 2003. (in Chinese))

[3] 吴价城, 武亚军, 吴名江. 高真空击密法——一种软土地基处理新工艺[J]. 地球与环境, 2005(50): 496 - 501. (WU Jia-cheng, WU Ya-jun, WU Ming-jiang. A high vacuum soil compact method -a new technology for soft soil improvement[J]. Earth and Envirenment, 2005(50): 496 - 501. (in Chinese))

[4] 徐士龙, 楼晓明, 刘敦敏, 等. 高真空击密法加固堆场地基的试验研究[C]// 第 9 届土力学与岩土工程学术会议论文.

- 北京: 清华大学出版社, 2003: 736 - 739. (XU Shi-long, LOU Xiao-ming, LIU Dun-min, et al. Study of high vacuum compaction in consolidating stock dump foundation[C]// The 9th Soil Mechanics Geotechnical & Engineering Academic Conference Papers. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 736 - 739. (in Chinese))
- [5] 李中山. ALLU 地基稳定处理系统在吹填砂路基中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2009, **32**(1): 47 - 49. (LI Zhong-shan. Application of ALLU Foundation stabilization system in dredger fill region subgrade[J]. Heilongjiang Jiaotong Keji, 2009, **32**(1): 47 - 49. (in Chinese))
- [6] 赵洪波. 高速公路软土路基沉降预测[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(增刊 1): 1168 - 1170. (ZHAO Hong-bo. Settlement prediction of highway soft foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(S1): 1168 - 1170. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)