

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.05.005

某软土路基处理经济技术方案对比分析

饶迁根¹, 罗大生², 何杰¹, 孟森松¹

(1. 湖南工业大学 岩土工程研究所, 湖南 株洲 412007; 2. 江西有色建设集团有限公司, 江西 南昌 330038)

摘要: 以广州市南沙开发区某路段 K0+660~K0+843 总计 577 m 的软土地基路段地基处理工程为例, 对比分析了水泥土搅拌桩法、真空预压+塑料排水板法、碎石桩法、袋装砂井+堆载预压法、楔形夯实水泥土桩法 5 种常见地基处理方法的施工工艺及工程造价。结果表明: 几种地基处理方法工程造价的高低依次为, 袋装砂井+堆载预压法<塑料排水板+真空预压法<楔形夯实水泥土桩法<水泥土搅拌桩(粉体喷搅法)<振冲碎石桩法; 塑料排水板+真空预压法、碎石桩法、楔形夯实水泥土桩法 3 种地基处理方法都能达到较好的处理效果; 水泥土搅拌桩法、碎石桩法、楔形夯实水泥土桩法 3 种处理方法的施工周期都较短。根据实际工程特点, 考虑各种地基处理方案的优缺点、经济技术、处理效果以及施工周期等因素, 得出楔形夯实水泥土桩法为最佳方案。

关键词: 软土地基; 地基处理; 施工工艺; 工程造价

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)05-0022-05

Contrast and Analysis of Soft Soil Subgrade Treatment Economic and Technical Schemes

Rao Qian'gen¹, Luo Dasheng², He Jie¹, Meng Sensong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Jiangxi Nonferrous Construction Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: Taking the example of a 577 m soft soil foundation treatment project in the road K0+660~K0+843 of Guangzhou Nansha development zone, contrasts and analyzes the construction technology and construction cost of five common foundation treatment methods of the cement-soil mixing pile method, the vacuum preloading+plastic drainage plate method, the gravel pile method, the bagged sand drain+stack preloading method and the wedge-shaped compaction soil cement pile method. The results show that the engineering cost from low to high is the bagged sand drain + stack preloading method < the plastic drainage plate + vacuum preloading method < the wedge rammed soil-cement pile method < the cement-soil mixing pile (powder spray mixing method) < the vibrational detritus stake method. Three methods of the plastic drainage plate + vacuum preloading, the gravel pile method and the wedge rammed soil-cement pile method achieve better treatment effect; The construction periods of the cement-soil mixing pile method, the gravel pile method and the wedge rammed soil-cement pile method are short. According to the practical engineering characteristics, considering various factors of ground treatment schemes' advantages and disadvantages, economic technology, treatment effect and construction period, it is concluded that the wedge rammed soil-cement pile method is the optimal solution.

Keywords: soft soil ground; ground treatment; construction technique; project cost

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108176)

作者简介: 饶迁根(1989-), 男, 福建三明人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为工程项目管理,

E-mail: 1016317106@qq.com

1 研究背景及工程概况

随着我国经济的不断发展,土地的开发与利用日益增多,高速公路建设也迅速发展。在修建高速公路时,有时不得不经软弱的土层,软弱土层的承载能力较低,必须对其进行加固或置换。目前,我国在综合加固处理软土地基方面已经具有了相当的经验的基础。根据软土地基的地质条件和水文地理的不同,软土地基的处理方法主要有置换、排水固结、灌入化合物、振密挤密以及加筋等。国内外相关学者对这些方法的适用范围、作用效果、造价、承载能力等进行了分析比较。龚晓南、郑俊杰^[1-2]对公路地基处理方法的分类和适用范围进行了阐述,并结合实际工程案例对目前常用地基处理方法的工艺流程以及设计、施工方案进行了分析,并对“桥头跳车”、新老路堤交接处地基处理、边坡失稳等问题提出了相应的对策。温少鹏^[3]以宣杭铁路增建第二线工程线路的路堤加固为例,分析了夯实水泥土桩的施工工艺和造价。张辉^[4]运用广联达软件算量,从人工费、材料费、施工机具使用费、企业管理费、利润、规费、税金等费用构成要素,组价计算并且分析了CFG桩+碎石桩复合地基的工程造价。胡艳东等^[5]以天津市临港工业区某化工厂真空预压地基处理项目为例,从水平砂垫层作用和铺设厚度、塑料排水板打设深度的确定、真空泵功率的选择和卸载时间及卸载标准的确定4个方面,对真空预压地基处理工法节约造价的可行性进行了探讨。

上述研究大多仅对地基处理方案进行分类,比较其施工工艺、流程作业,着重考虑的是软土地基处理方法的可行性,其造价分析主要局限在一个工程实例中同一种桩在不同施工工艺情况下的工程造价对比分析,或一个工程实例中单一地基处理方法的工程造价分析,对于不同地基处理方法的造价对

比研究较少。因此,本文以广州市南沙开发区某路段K0+660~K0+843总计577 m的公路为例,对水泥土搅拌桩法、真空预压+塑料排水板法、碎石桩法、袋装砂井+堆载预压法、楔形夯实水泥土桩法的施工工艺及工程造价进行对比分析,进而确定最佳的投标方案。

广州市南沙开发区某路段,其场地大部分为珠江三角洲冲积平原,地面河涌,水塘发育,地势平坦,农田广布,地面高程为4.0~7.0 m。根据《公路自然区划标准》,该区属于华南沿海台风区,道路经过地段主要为水塘和果园地。K0+660~K0+843路段的地质条件为软弱土层。根据钻孔揭露情况,路线内地层按成因可分为:1)人工填筑土,平均厚度为1.2 m;2)海陆交互相淤泥、淤泥质砂层,平均厚度为2.0 m;3)冲洪积粉质黏土、淤泥质土及砂层,平均厚度为4.3 m;4)残积粉质砂土,平均厚度为7.3 m;5)下伏燕山三期侵入花岗岩。

针对上述路段实例,拟设计5种地基处理方案,并对5种方案进行工程造价估算。要进行工程造价比较,就必须具备相应的条件,即技术方案符合可比性原则。在施工地质条件相同的情况下,本次估算排除了前期平整场地、通水通电等施工前期条件,着重考虑在施工过程中的施工造价,以每平方米的造价为比较依据进行对比。

2 袋装砂井+堆载预压法

袋装砂井+堆载预压处理法分为袋装砂井施工和堆载预压施工2个部分。袋装砂井井径 D 为70 mm,间距为1 m,正三角形布置,并通过计算置换率的计算,得出每平方米占1.16根桩^[6]。袋装砂井+堆载预压法的工程造价见表1。其中,间接工程费为直接工程费的总和 $\times 10\%$,下同。

表1 袋装砂井+堆载预压法工程造价

Table 1 The engineering cost for the bagged sand well + stack preloading method

费用组成	工程项目	单价	砂井长/m	合计	备注
直接工程费	砂井袋	0.35~0.40/(元·m ⁻¹)	15	5.625/元	取平均值
	砂	0.36/(元·m ⁻¹)	15	5.4/元	
	人工费	0.5/(元·m ⁻¹)	15	7.5/元	主要从事辅助施工作业
	砂桩机	0.5/(元·m ⁻¹)	15	7.5/元	包括司机及砂桩机使用费
	土或砂的装载与平铺	10/(元·m ⁻³)		40/(元·m ⁻²)	堆载高度4 m
	卸载与外运	10/(元·m ⁻³)		20/(元·m ⁻²)	由于材料下沉2 m
	堆载材料费	25/(元·m ⁻³)		50/元	利用了2 m ³ 的材料
	小计			140.2/(元·m ⁻²)*	
间接工程费				14.02/(元·m ⁻²)	

注:*直接工程费的总和=(5.625+5.4+7.5+7.5) \times 1.16+40+20+50=140.2(元/m²)。

砂井袋采用聚丙烯 (poly propylene, PP) 编织土工布, 容许抗拉强度大于 15 kN/m, 每卷长度不小于 400 m。本工程选用 JJM23、DJL30-20 履带式砂井桩机, 采用密封性能好的活瓣式桩尖。施工时, 在桩机旁架设 1 台经纬仪, 检测桩管的垂直度。施工过程中应控制沉管与拔管的速度, 以减少对地基土的扰动。预压是排水固结法加固软弱地基的主要因素, 通过加载预压, 迫使软土中孔隙水排出, 使孔隙水的压力转化为有效应力, 以增强地基强度。该地基处理方法在施工过程中的关键是堆载环节, 需要分级加载、控制加荷速率, 在加载的过程中必须实时监测, 达到预定标准后再进行卸载, 因此需要较长的施工周期。袋装砂井+堆载预压法在施工中受土质、砂井、加载等级等因素的影响, 当各项因素控制不当时, 处理效

果难以保证。

3 塑料排水板+真空预压法

塑料排水板+真空预压法施工的原理是将软土路基处理区域作为一个密封体, 通过真空泵负压源, 将土体中的孔隙水和空气抽排出加固体, 以提高地基的承载力。塑料排水板+真空预压法分为塑料排水板施工和真空预压施工 2 个部分。垂直排水通道采用塑料排水板, 塑料排水板按正三角形布置, 间距为 1.0 m, 采用普通 B 型塑料排水板, 插板深度按设计要求 15 m 进行施工, 通过对置换率的计算, 得出每平方米占 1.16 根桩。塑料排水板+真空预压法工程造价见表 2。

表 2 塑料排水板+真空预压法工程造价

Table 2 The engineering cost for the plastic drainage plate+vacuum preloading method

费用组成	工程项目	单价	排水板长/m	合计	备注
直接工程费	塑料排水板	$(1.1\sim 1.14) / (\text{元}\cdot\text{m}^{-1})$	15	16.8/元	取平均值
	人工费	$0.12 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-1})$	15	1.8/元	取平均值
	机械费	$0.22 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-1})$	15	3.3/元	包括司机及机械使用费
	真空膜	$4.5 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-2})$		4.5/元	
	密封墙	$3\sim 4 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-2})$		3~4/元	取平均值
	排水管	$3\sim 4 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-2})$		3~4/元	取平均值
	抽真空	$40 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-2})$		40/元	连续抽 3 个月
	土或砂装载、平铺	$22.5 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-2})$		22.5/元	包括司机及机械使用费
	土或砂材料费	$25 / (\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$		50/元	抽真空后下沉 2 m
	小计			149.4/元	*
间接工程费				14.94/元	

注: *直接工程费的总和= $(16.8+1.8+3.3)\times 1.16+4.5+3.5+3.5+40+22.5+50=149.4$ (元/m²)。

塑料排水板的施工顺序为场地平整→铺设砂垫层→测量放样→塑料排水板施工→排水盲沟、集水井、排水边沟施工。密封膜采用 3 层聚乙烯 (polyethylene, PE) 薄膜, 根据各预压区实际长度, 每边各增加 5 m 密封膜, 密封膜在工厂热合一次成型, 且必须符合设计要求。为满足真空预压要求, 本次选用 IS-II 型真空泵系统 (抽真空为期 3 个月)。塑料排水板+真空预压地基处理方法受塑料排水板规格、抽真空方法、真空膜密闭性能等因素的影响, 在施工中应合理使用真空泵, 保持真空膜的密闭性, 从

而保证处理效果。采用真空预压时, 先抽真空, 当真空压力达到设计要求时, 再进行堆载。较之堆载预压法, 真空预压法的施工周期较短。

4 水泥土搅拌桩法

水泥土搅拌桩的桩径 D 为 500 mm, 采用正三角形布桩, 间距为 1.3 m, 通过对置换率的计算, 得出每平方米占 0.607 根桩。水泥土搅拌桩法的工程造价见表 3。

表 3 水泥土搅拌桩法工程造价

Table 3 The engineering cost for the soil-cement mixing pile method

费用组成	工程项目	单价 / (元·m ⁻¹)	桩长/m	合计	备注
直接工程费	粉体喷搅法作业	7	15	105/元	包括司机及搅拌桩机使用费
	材料费 (水泥)	22.5	15	337.5/元	水泥标号为 32.5R
	小计			268.6/元	*
间接工程费				26.86/元	

注: *直接工程费的总和= $(105+337.5)\times 0.607=268.6$ (元/m²)。

水泥土搅拌桩法采用四搅四喷法进行施工, 按照设计的要求, 桩长为 15 m, 水泥渗入比为 18%~20%,

垂直偏差不超过 1.5%，桩径偏差不大于 4%。选用 STB-1 深层搅拌机，搅拌桩采用标号为 32.5R 的普通硅酸水泥作为固化剂，水灰比为 0.45，泵浆浓度采用密度计控制。水泥土搅拌桩方法的施工工艺流程如下：测量放线→桩机就位、对中→报验桩位→制备水泥浆→搅拌喷浆下沉→喷浆、搅拌、提升→重复搅拌下沉→重复搅拌上升→成桩结束位移→地基处理效果检测。该地基处理方法在施工搅拌时速度较快，无振动，无噪音，通过特制的搅拌机械能缩短施工周期，节约施工成本。水泥土搅拌桩法是将水泥与原地基软土层进行搅拌混合，对于有机质含量较高、酸碱度较低的黏土，处理深度不宜大于 12 m，否则，加固效果较差。

5 碎石桩法

碎石桩的桩径 $D=1\ 000\ \text{mm}$ ，采用正三角形布桩，间距为 1.7 m，通过对置换率的计算，得出每平方米占 0.4 根桩。碎石桩法的工程造价见表 4。碎石桩一般采用振冲器进行作业，待振冲器成孔后，将振冲器向上移动一定的距离，把碎石填入所成的桩孔中，

再用振冲器振密，如此反复循环施工，直至碎石桩制作完成。造孔的过程需要控制好吊机卷扬绳的下放速度，不宜过快，一般为 0.5~2 m/min，并始终保持振冲器处于悬挂状态，以免造成斜孔。若土层较硬，需在硬土层中将振冲器上下往复移动几次，以使该段孔径扩大，便于填料。振冲的振密也是很重要的环节，依靠振冲器的水平振动力不仅将孔内的石料振密，还不断地将填料挤入孔壁土中，使孔径扩大。当桩周土的约束力与振冲器的振力相等时，孔径不再扩大，即完成一根桩的施工。碎石桩施工工艺流程如下：测量定位→桩机就位→复测桩位→开始振动沉管→边沉管边灌卵石至设计深度→边拔管边振动边继续灌卵石→复打振动沉管→灌卵石→边拔管边振动边继续灌卵石→振动拔管→成桩。碎石桩法在施工过程中需要注意控制桩位偏移的大小、碎石填料的密实度以及碎石的风化程度等，否则将影响桩体的质量。利用该地基处理方法处理后的地基土的承载力得到显著提高，同时利用大功率振冲器施工，造孔速度为 8~10 m/min，这对于施工周期短的项目较为适合。

表4 振冲碎石桩法工程造价

Table 4 The engineering cost for the vibrational detritus stake method

费用组成	工程项目	单价 / (元 · m ⁻¹)	桩长 /m	合计	备注
直接工程费	施工人工费	2	15	30/元	主要从事辅助施工作业
	吊车	4	15	60/元	包括司机及吊车使用费
	装载机	2.5	15	37.5/元	包括司机及装载机使用费
	振冲器	0.3	15	4.5/元	包括司机及振冲器使用费
	材料费(碎石)	102.05	15	1530.75/元	
	小计			665.1/(元 · m ⁻²)*	
间接工程费				66.51/(元 · m ⁻²)	

注：*直接工程费的总和 = (30+60+37.5+4.5+1530.75) × 0.4 = 665.1 (元/m²)。

6 楔形夯实水泥土桩法

楔形夯实水泥土桩法的桩顶直径为 500 mm，桩

底直径为 300 mm，间距为 1.7 m，通过对置换率的计算，得出每平方米占 0.607 根桩。夯实水泥土桩法的工程造价见表 5。

表5 楔形夯实水泥土桩法工程造价

Table 5 The engineering cost for rammed soil-cement piles wedge method

费用组成	工程项目	单价 / (元 · m ⁻¹)	桩长 /m	合计	备注
直接工程费	水泥土桩机械作业	7	15	105/元	包括司机及机械使用费
	施工人工费	2	15	30/元	主要从事辅助施工作业
	材料费(水泥)	11	15	165/元	水泥标号为 32.5R
	小计			182.1/(元 · m ⁻²)*	
间接工程费				18.21/(元 · m ⁻²)	

注：*直接工程费的总和 = (105+30+165) × 0.607 = 182.1 (元/m²)。

根据桩位设计的平面布置图以及测量基准点，确定桩的位置。利用设计好的桩模打入软土层中，成

孔完成之后，对所成的孔进行检查。待检查完成之后，把事先拌制好的水泥土填入成好的孔中，再用

夹板自落式夯实机成桩。楔形夯实水泥土桩法的成孔工艺流程为：平整场地→定桩位→钻机就位→钻孔至设计深度→检查成孔质量→验收成孔；成桩工艺流程为：验收成孔→夯实孔底→制备水泥土→分层夯填成桩→检查成桩量。夯实水泥土桩法具有施工工艺简便、设备轻型、施工速度快、质量容易控制等优点，所以得到了广泛的推广应用。经夯实水泥土桩法处理的工程，其地基承载力有大幅度的提高，一般可提高50%~100%，变形量有明显的改善，地基均匀性能好，沉降少。

7 地基处理技术经济分析对比

上述几种常见的地基处理方法的经济、技术指标对比见表6。由表6可以看出：1) 几种常见的地基处理方法工程造价的高低依次为，袋装砂井+堆载预压法<塑料排水板+真空预压法<楔形夯实水泥土桩法<水泥土搅拌桩(粉体喷搅法)<碎石桩法；2) 塑料排水板+真空预压法、碎石桩法、楔形夯实水泥土桩法，这3种地基处理方法都能达到较好的处理效果；3) 水泥土搅拌桩法、碎石桩法、楔形夯实水泥土桩法，这3种地基处理方法的施工周期都较短。

表6 几种常用的地基处理方法的经济、技术指标对比

Table 6 The economic and technical index comparison table of some common ground treatment methods

地基处理技术	直接工程费/(元·m ⁻²)	间接工程费/(元·m ⁻²)	合计/(元·m ⁻²)	处理效果	处理总工期
袋装砂井+堆载预压法	140.2	14.02	154.22	一般	长
塑料排水板+真空预压法	149.4	14.94	164.34	好	适中
水泥土搅拌桩法	268.6	26.86	295.46	差	短
碎石桩法	665.1	66.51	731.61	好	较短
楔形夯实水泥土桩法	182.1	18.21	200.31	较好	短

8 结语

根据实际的工程特点，考虑各种地基处理方案的优缺点、经济技术、处理效果以及施工周期等因素，得出楔形夯实水泥土桩法为最佳方案。

参考文献：

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 19-169.
Gong Xiaonan. Composite Foundation Theory and Engineering Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 19-169.
- [2] 郑俊杰. 地基处理技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 83-166.
Zheng Junjie. Foundation Treatment Technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004: 83-166.
- [3] 温少鹏. 夯实水泥土桩的施工工艺及造价分析[J]. 企业技术开发, 2007, 5(5): 66-68.
Wen Shaopeng. The Construction Technics and Cost

Analysis of Tamping Cement Pile[J]. Technological Development of Enterprise, 2007, 5(5): 66-68.

- [4] 张辉. CFG+碎石桩复合地基工程造价分析[D]. 北京: 北方工业大学, 2011.
Zhang Hui. The Research on the Cost of CFG Pile Composite Foundation[D]. Beijing: North China University of Technology, 2011.
- [5] 胡艳东, 刘江, 孙永兵. 真空预压地基处理工法节约造价的可行性[J]. 工程勘察, 2010(1): 415-420.
Hu Yandong, Liu Jiang, Sun Yongbing. The Feasibility of Vacuum Preloading Foundation Treatment Method to Save Cost[J]. Geotechnical Investigation Surveying, 2010(1): 415-420.
- [6] 中国建筑科学研究院. JGJ 79—2012建筑地基处理技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 6-60.
China Academy of Building Research. JGJ 79—2012 Technical Code for Ground Treatment of Buildings[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 6-60.

(责任编辑: 徐海燕)