

DOI: 10.11779/CJGE2017S2031

真空预压法处理软土地基的工程应用

曹杰^{1,2}, 郑建国^{1,2}, 刘智^{1,2}, 李波³, 李攀^{1,2}, 杨超^{1,2}, 何丹^{1,2}, 赵海圆^{1,2}

(1. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 陕西省特殊土工程性质与处理技术重点实验室, 陕西 西安 710043;

3. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 基于软基加固现场实测资料, 通过工程实例分析了真空预压技术加固软土地基时地表沉降、深层沉降、水平位移、孔隙水压力和真空度的变化规律, 验证和评价真空预压法的处理效果; 同时, 通过区域性对比试验, 探讨了真空-堆载联合预压的结合时机问题, 为类似工程提供借鉴和参考。

关键词: 真空预压; 沉降; 位移; 软土

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0124-04

作者简介: 曹杰(1980-), 男, 陕西西安人, 博士, 高级工程师, 从事地基处理、高填方工程方面的研究工作。E-mail: caojie801014@126.com。

Application of vacuum preloading method in consolidating soft soil foundation

CAO Jie^{1,2}, ZHENG Jian-guo^{1,2}, LIU Zhi^{1,2}, LI Bo³, LI Pan^{1,2}, YANG Chao^{1,2}, HE Dan^{1,2}, ZHAO Hai-yuan^{1,2}

(1. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 2. Shaanxi Key Laboratory

of Engineering Behavior and Foundation Treatment for Special Soil, Xi'an 710043, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics

and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the field data of soft foundation reinforcement, the variation laws of soil surface settlements, stratified settlements, horizontal displacements, pore water pressures and vacuum degrees are analyzed by use of the vacuum preloading technique, the treatment effect of this method is verified. The design of the test area is carried out, and the time of the combination of vacuum and surcharge is discussed. The results may provide reference for similar projects.

Key words: vacuum preloading; settlement; displacement; soft soil

0 引言

排水固结法是处理软黏土地基的有效方法之一。根据加压方式的不同, 排水固结法分为堆载预压、真空预压、降水预压及真空-堆载联合预压等。本文通过施工过程中变形特征监测和地基处理前后强度特征检测, 就真空预压法处理某市政道路的工程案例进行了分析, 证明真空预压法处理该段软土地基的可行性与合理性。同时, 增设了试验区, 通过对比试验, 就真空-堆载预压时两者的结合时机进行了探讨。

1 工程地质概况

工程所在区域位于长江漫滩之上, 场地内表层人工填土较为复杂, 其下较深范围内均为长江冲淤积成因的土层, 土层分布变化较大, 强度低, 压缩性高。其场地内的土层分布依次为: ①~1 杂填土, 层厚 0.0~5.8 m; ①~2 淤泥质填土, 层厚 0.3~1.6 m; ①~3

素填土, 层厚 0.7~5.0 m; ②~1 亚黏土, 层厚 0.7~2.7 m; ②~2 淤泥质亚黏土, 层厚不详; ②~3 亚黏土, 层厚 1.2~7.2 m; ②~4 粉细砂, 层顶埋深 13.0~18.7 m。各层物理力学性质指标如表 1 所示。

2 工程施工概况

真空预压法软基处理的施工准备包括清场、铺设砂垫层、打设袋装砂井等。地基处理主要是抽真空进行预压。平整场地后, 铺设 40 cm 砂砾垫层, 并打设 18 m 袋装砂井, 梅花形布置, 间距 1.5 m; 铺设 30 cm 厚的砂垫层, 埋设 PVC 主管与滤管, 滤管滤眼直径 8 cm; 铺设一层土工布及两层密封膜, 同时开挖密封沟, 覆土密闭; 安装真空设备, 抽真空历时 42 d。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2013BAJ06B00); 陕西省科技统筹创新工程项目 (2016KTZDSF03-02); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800501); 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (CKSF2017012/YT); 湖州市自然科学基金项目 (2016GY19)

收稿日期: 2017-08-02

表 1 土层物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

层号	取值	w /%	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	e	I_p	I_L	α_{1-2} /(MPa^{-1})	E_{s1-2} /MPa	q_u /kPa	灵敏度 S_t	直剪 (快剪)	
											c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
①~3	计算值	33.4	18.8	0.927	15.6	0.80	0.507	3.826			13.9	13.8
	平均值	34.4	18.7	0.949		0.86	0.544	3.614				
②~1	计算值	32.4	18.9	0.902	14.9	0.79	0.400	4.901	46.0	1.9	22.6	14.9
	平均值	33.4	18.8	0.924		0.84	0.445	4.402				
②~2	计算值	40.6	17.7	1.153	14.7	1.36	0.695	3.293	33.5	3.44	9.22	15.4
	平均值	51.4	16.5	1.476		1.60	0.876	2.743	29.1		7.81	11.25
②~3	计算值	33.9	18.5	0.954	10.3	1.48	0.361	5.870				
	平均值	34.9				1.66						
②~4	计算值	25.8	19.5	0.692			0.144	12.902			10.1	29.2
	平均值	29.7	19.0	0.815			0.197	10.158				

3 现场监测及成果分析

现场监测内容主要包括地表沉降、分层沉降、水平位移、孔隙水压力、真空度, 检测内容为十字板强度测试。观测断面为 A~D6 个断面。其中断面 B、断面 D 为全观测断面。

3.1 表面沉降

表 2 为抽真空结束时, 6 个断面实测最终沉降量。

表 2 沉降量汇总
Table 2 Summary of settlements (mm)

断面编号	T_a	T_b	T_c
A	354	438	383
B	417	461	379
C	191	360	269
D	288	360	276
E	305	376	304
F	297	346	256

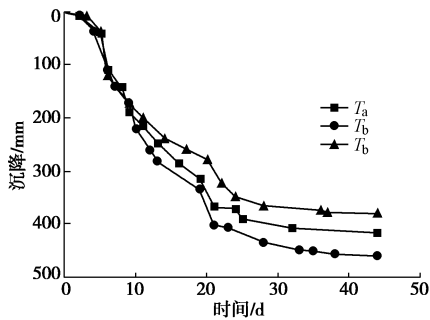


图 1 地表沉降曲线

Fig. 1 Curves of surface settlements

由表 2 可以看出, 各断面中处于中间位置的监测点 (T_b) 沉降量均大于两侧边缘的监测点 (T_a , T_c) 沉降值, 地表呈现下“凹”型沉降, 加固区土体整体向场内收缩, 表明真空预压处理软基沉降效果显著。篇幅所限, 本文仅列出典型断面 B 的观测成果予以分析和讨论。

如图 1 所示, 断面 B 抽真空开始阶段沉降明显, 日沉降量最大为 44 mm 左右。随着抽真空的进行, 沉降速率逐渐减小, 抽真空 20 d 后沉降曲线走势趋于平

缓, 沉降量增幅明显减小。20 d 和 30 d 时 T_b 对应沉降值分别为 401 mm 和 422 mm, 分别占卸载时 (42 d) 沉降量的 87% 和 95%。随后继续进行抽真空, 日沉降量速率均在 1~3 mm/d, 说明加固区的土体沉降已基本达到稳定。

3.2 分层沉降

断面 B 处埋设 8 个分层沉降环, 其深度分别为 1, 5, 9, 13, 17, 21, 23, 25 m。从分层沉降时程曲线 (图 2) 来看, 1~9 m、9~13 m、13~25 m 深度范围内沉降量分别为 150, 160, 94 mm, 由此可见, 土体的沉降量主要发生在第 4 个分层沉降环 (埋设深度为 13 m) 以上的土体中, 该范围内的地基沉降占总沉降的 77% 左右。因此, 从分层沉降的监测结果来看, 埋深 13 m 范围内属于地基处理显著影响区域。

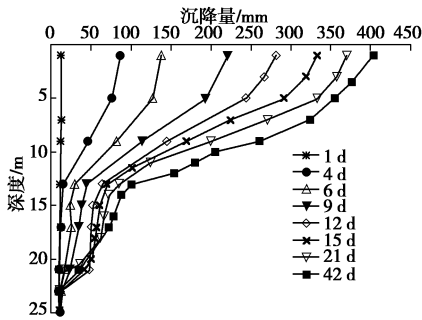


图 2 分层沉降曲线

Fig. 2 Curves of stratified settlements

3.3 水平位移观测

如图 3 所示, 水平位移量最大值为 172 mm, 水平位移主要发生在深度 10 m 以上的土层中, 占到总位移量的 80%。此外, 与堆载预压相比, 真空预压处理段的水平位移是向内的, 即土体在各向同性的球应力作用下呈现中心收缩现象, 不会因土体的抽真空加载速率过快而引起土体失稳。因此, 真空预压加载可以一次性达到设计要求。

3.4 孔隙水压力

断面 B 处布置 4 支孔隙水压力计 (埋深分别为 2,

5, 8, 12 m), 监测结果表明(图4), 随着抽真空的进行, 不同深度处的孔压均随时间的延续呈下降的趋势, 浅层孔压变化尤为明显。地下2 m处, 抽真空1 d后孔压就达到-10 kPa, 1周后孔压稳定在-60 kPa, 这说明在真空荷载作用下, 随着地基土孔隙水的排出, 水位下降, 在地表以下土体中形成负压; 在地下5 m处, 孔压值也逐渐降为负值, 并稳定在-10 kPa左右。随着深度的增加, 孔压下降速度变缓, 达到稳定孔压所需时间也越长。施工结束时, 4个埋深处孔压分别降低了67, 60, 56, 50 kPa, 浅层孔压降幅最为明显。需要说明的是, 由于施工阶段电力供应出现中断, 使得孔压时程曲线出现波动。

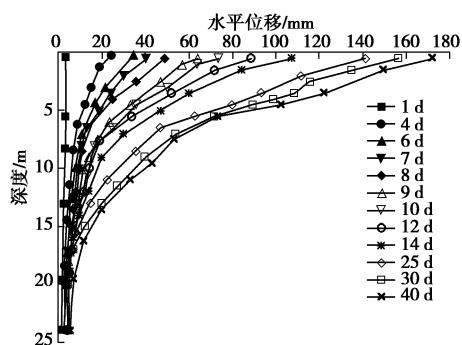


图3 水平位移曲线

Fig. 3 Curves of horizontal displacements

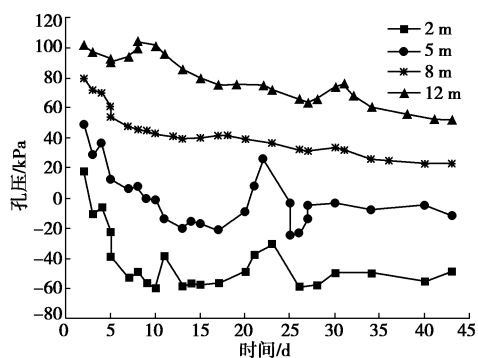


图4 孔隙水压力变化曲线

Fig. 4 Curves of pore water pressures

3.5 膜下真空度

如图5所示, 从真空度随时间变化曲线可以看出, 抽真空开始以后, 地表以下的真空度逐渐上升, 随着时间推移逐渐稳定, 在地下2 m处, 真空度稳定在26 kPa; 随着深度的增加, 真空度呈明显衰减趋势。埋深5 m处平均真空度为15 kPa, 而10 m处真空计显示真空度为零。这说明真空压力沿袋装砂井向下传播时, 存在一定的深度限制。

3.6 十字板剪切试验

真空预压后通过十字剪切试验, 测定现场软土地基的强度变化, 评价地基处理效果。检测结果(图6)

表明, 经过真空预压处理, 原状土土体的强度有较大的提高, 尤其是深度为3 m左右的土体强度, 由加固前的18.5 kPa增加到67.7 kPa, 提高幅度最大。因此, 检测结果表明真空预压软基处理方法对软土地基, 尤其是浅层部位的加固具有良好的处理效果。

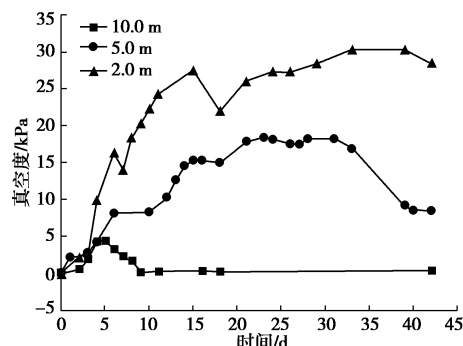


图5 真空度变化曲线

Fig. 5 Curves of vacuum degrees

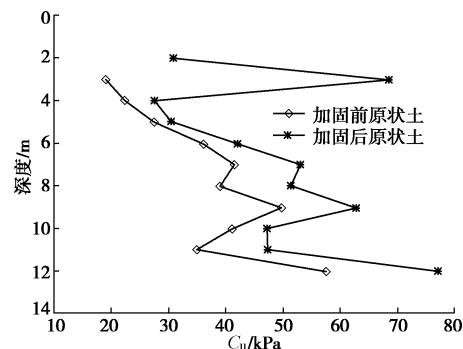


图6 加固前后十字板强度对比

Fig. 6 Comparison of vane strengths before and after reinforcement

4 讨论

本文在已有工程案例基础上, 补充进行了真空-堆载联合预压的初步试验, 主要关注点在于真空预压与堆载预压的结合时机, 以使地基处理效果更为理想。

试验段采用塑料排水板真空-堆载联合预压加固处理, 加固深度14.5~18.5 m, 排水板间距1.2 m梅花形布置, 塑料排水板顶面铺0.8 m砂垫层, 设计要求膜下真空压力不小于80 kPa, 为研究真空预压与堆载不同联合时机对工后沉降的影响, 在试验区采用了两种不同加载方式: K0+276—K0+456段抽真空约两个月后才开始正式堆载, 而K0+476—K0+515段抽真空后约1周开始正式堆载。本文以固结度来直观衡量地基处理效果, 如表3所示。

表3 固结度对比

Table 3 Comparison of consolidation degrees

断面	1个月	2个月	3个月
K0+342	36	44	53
K0+448	37	45	56
K0+500	37	53	66

(%)

试验结果表明, 相对于 K0+342 断面, K0+500 固结更快, 这表明真空与堆载联合的时间对地基沉降有较大的影响。K0+342 和 K0+448 两断面, 抽真空 3 个月后固结度为 53% 和 56%, 而 K0+500 断面抽真空 3 个月后固结度达到 66%, 说明真空与堆载联合越早, 施工期固结度越高, 对减少后期沉降就越有利。

5 结 论

(1) 监测结果表明, 地下 10 m 范围内均有明显分层沉降与水平位移。施工过程中虽然有间断性停电现象, 但真空预压法处理软基效果仍较为明显, 在较短时间内可达到理想的处理效果。

(2) 真空预压法有别于堆载预压法, 前者使得土体向加固区内收缩变形, 避免土体产生剪切破坏, 对施工期路堤稳定非常有利, 不存在分级加载, 缩短了工期, 加快工程进度。

(3) 现场对比试验结果表明, 若采用联合预压, 真空-堆载联合的时间对地基沉降(固结度)有较大的影响, 联合越早, 对减少后期沉降就越有利。

参考文献:

- [1] 鲍树峰, 娄 炎, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1350 - 1359. (BAO Shu-feng, LOU Yan, DONG Zhi-liang, et al. Causes and countermeasures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1350 - 1359. (in Chinese))
- [2] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1429 - 1433. (ZHU Qun-feng, GAO Chang-sheng, YANG Shou-hua, et al. Transfer properties of vacuum degree in treatment of super-soft muck foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1429 - 1433. (in Chinese))
- [3] 应 舒, 高长胜, 黄家青. 新吹填淤泥地基浅层处理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **32**(12): 1956 - 1960. (YING Shu, GAO Chang-sheng, HUANG Jia-qing. Experimental study on surface-layer improvement of soft foundation filled by newly dredged silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **32**(12): 1956 - 1960. (in Chinese))
- [4] 金小荣, 俞建霖, 龚晓南, 等. 真空预压部分工艺的改进[J]. 岩土力学, 2007, **28**(12): 2711 - 2714. (JIN Xiao-rong, YU Jian-lin, GONG Xiao-nan, et al. Improvement of partial technology for vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(12): 2711 - 2714. (in Chinese))
- [5] 龚晓南, 岑仰润, 李昌宁. 真空排水预压加固软土地基的研究现状及展望[C]// 地基处理理论与实践—第七届全国地基处理学术讨论会论文集. 兰州: 中国水利水电出版社, 2002: 3 - 7. (GONG Xiao-nan, CHEN Yang-run, LI Chang-ning. Actuality and expectation in the research of vacuum preloading reinforcement of soft foundation[C]// Theory and Practice of Foundation Treatment-The 7th National Academic Conference on Foundation Treatment. Lanzhou: China Water and Power Press, 2002: 3 - 7. (in Chinese))
- [6] 曹 杰. 排水固结法在不同应力路径条件下引起软土地基沉降的初步研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (CAO Jie. Research on soft soil foundation settlement with drainage consolidation under varied stress paths[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)