

长江河漫滩软土地基真空联合堆载预压 加固效果评价

程中强¹, 龚泽佳^{2*}, 章定文², 曾亮¹, 孙乔龙¹, 袁小红¹, 张茂林³

(1. 中铁四局集团第二工程有限公司, 江苏 苏州 215100; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189;
3. 南京万通城市建设设计咨询有限公司, 江苏 南京 210049)

摘要: 结合长江河漫滩软土工程特性, 通过分析真空联合堆载预压的加固过程, 从现场监测数据、原位十字板剪切试验和室内土工试验3个角度, 对南京北站迁建工程某施工区域进行了全面的加固效果分析。具体到监测数据方面, 地表沉降及孔压数据均表明单真空预压至固结趋稳后再进行堆载可进一步提升土体加固效果; 十字板剪切试验结果表明, 加固效果随深度递减, 与孔压随深度变化规律分析结论一致; 室内土工试验数据说明土体物理力学性质在加固后有明显改善。综上所述, 真空联合堆载预压对长江河漫滩软土地基加固效果良好, 加固效率高, 6个月工后固结度可达94.47%, 土体强度显著提高。为验证结论的准确性, 分别对孔压数据与十字板剪切试验数据、十字板剪切试验数据与室内土工试验数据进行了相互验证, 验证结果显示数据较为可靠, 加固效果评价的准确度较高。

关键词: 河漫滩软土; 薄粉砂层; 真空联合堆载预压; 最终沉降量; 孔压监测曲线; 十字板剪切试验; 土工试验
中图分类号: TU44 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2023)03-0215-06

Effect evaluation of vacuum and surcharge preloading method on soft soil foundation in Yangtze River floodplain

CHENG Zhong-qiang¹, GONG Ze-jia^{2*}, ZHANG Ding-wen², ZENG Liang¹,
SUN Qiao-long¹, YUAN Xiao-hong¹, ZHANG Mao-lin³

(1. The Second Engineering Co., Ltd. of CTCE Group, Suzhou 215100, Jiangsu, China;
2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;
3. Nanjing Wantong Urban Construction Design Consulting Co., Ltd., Nanjing 210049, Jiangsu, China)

Abstract: Combined with the engineering characteristics of the Yangtze River floodplain soft soil, a comprehensive analysis of reinforcement effect is carried out for a construction area of the relocation project of Nanjing North railway station from the perspectives of on-site monitoring data, in-situ vane shear test and geotechnical test by analyzing the reinforcement process of vacuum and surcharge preloading. In terms of monitoring data, the data of surface settlement and pore water pressure data show that single vacuum preloading can further improve the effect of soil reinforcement after consolidation and stabilization. The results of vane shear test show that the reinforcement effect decreases with depth, which is consistent with the analysis conclusion of the variation law of pore water pressure with depth. The data of geotechnical test show that the physical and mechanical properties of soil are significantly improved after reinforcement. In summary, the combination of vacuum and surcharge preloading has good reinforcement effect on the soft soil foundation of the Yangtze River floodplain, with high reinforcement efficiency. After 6 months of construction, the degree of consolidation can reach 94.47%, and the soil strength is significantly improved. In order to verify the accuracy of the conclusions, the pore water pressure data and vane shear test data, vane shear test data and geotechnical test data are mutually verified. The verification results show that the experimental data are reliable and the accuracy of reinforcement effect evaluation is high.

收稿日期: 2022-03-25

作者简介: 程中强 (1981—), 男, 江苏苏州人, 主要从事地基处理工程。E-mail: 517423736@qq.com。

*通信作者: 龚泽佳 (1996—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事地基处理工程。E-mail: 220194499@seu.edu.cn。

Key words: floodplain soft soil; thin silty sand layer; vacuum and surcharge preloading; final settlement; pore pressure monitoring curve; vane shear test; geotechnical test

0 引言

长江中下游沿岸地区广泛分布河漫滩软土。以南京城西的长江东侧凸岸河漫滩相软土为代表,一般由淤泥质黏土和粉质黏土组成,具有承载力低、渗透性差、压缩性高等特点^[1]。粉质黏土层中交错发育有较薄的粉砂夹层,呈“千层饼”状分布^[2],形成了水平向的地下水运移通道。但由于透镜体夹层不连续分布,工程建设引起的超静孔隙水压力竖向消散依旧缓慢,因此需要结合人工打设竖向排水板联合透镜体夹层加速软土中超静孔隙水压力的消散。

工程建设中常采用真空预压联合堆载等方法处理软弱土^[3-4]。针对真空联合堆载预压过程中的固结与渗流状态,杨鹏等^[5]采用分段线性方法建立了地基大变形非线性固结沉降模型,经对比验证模型的泛用性较好且与现场实测结果较为吻合。林伟岸等^[6]考虑了真空度和堆载荷载随时间的变化过程,推导出了时间因素影响下的普遍固结解析解,并基于解析解分析了砂井地基的固结性状。穆永亮等^[7]对某机场跑道路基加固前后的现场试验数据与土工试验资料进行了分析,各物理力学指标的对比结果显示淤泥质地基加固后承载力大幅提高,加固效果明显。黄臣瑞和林伟斌^[8]依托珠三角地区某电厂地基加固工程,分析了加固过程中真空度、孔压、沉降量等监测指标的变化规律,分析结果显示真空联合堆载预压能有效提升地基承载力。

本文依托南京北站迁建工程地基处理项目,结合了现场监测、原位十字板剪切试验和室内土工试验的数据,从多个角度阐述了真空联合堆载预压的加固效果,并结合长江河漫滩软土透镜体夹层不连续分布的特点对加固效果进行了分析与评价,以供相似工况的工程参考。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

项目场地位于长江冲积漫滩、阶地边缘,西侧红线距江岸约 400 m。场地内广泛分布软弱土,深度 20~40 m 且极不均匀,地层分布类似“大锅底”形式,局部软土超过 40 m,承载力低且场地面积大。主体土层自上而下由淤泥质粉质黏土逐渐向粉质

黏土过渡,整体为灰色,软塑-流塑。水平薄层层理明显,层理单层厚 2~5 mm,局部夹较多粉土、粉砂,呈“千层饼”状分布,高压缩性,属新近沉积土,土质差。场地典型地质剖面如图 1 所示,各土层主要物理力学参数见表 1。

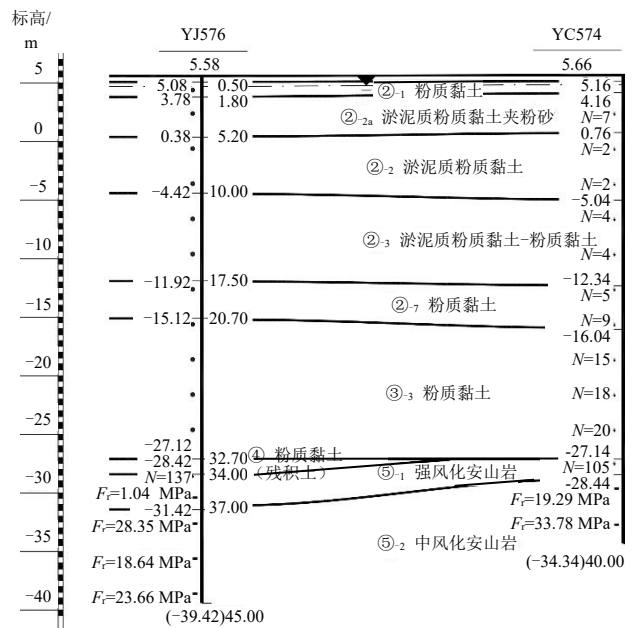


图 1 场地典型工程地质剖面图

Fig. 1 Typical engineering geological profile of the site

表 1 各土层主要物理力学参数

Table 1 Main physical parameters of different soil layers

土层名称	含水量 w/%	孔隙比 e	塑性指数 I_p	压缩模量 E_{s1-2}/MPa
②-1 粉质黏土	31.7	0.895	13.9	4.36
②-2a 淤泥质粉质黏土夹粉砂	32.3	0.917	12.2	4.03
②-2 淤泥质粉质黏土	35.4	1.021	12.6	3.57
②-3 淤泥质粉质黏土-粉质黏土	36.1	1.045	12.5	3.57
②-7 粉质黏土	26.0	0.732	13.4	5.80
③-3 粉质黏土	25.8	0.737	14.3	8.29

1.2 真空联合堆载预压方案

场地土层含水量高、渗透性差,以传统软基处理手段很难快速达到预期加固目标。值得注意的是,场地软土层中交错发育有薄粉砂夹层,可提供地下水水平向运移的通道,从而降低地下水位,减少孔隙水压力。但由于夹层厚度较小,地下水在自

重作用下流动缓慢, 需通过真空负压的方式加速夹层中地下水的流动, 因此采用了真空联合堆载预压的方法加固场地。

本工程加固场地近似正方形, 边长约 200 m, 纵向排水通道采用 B 型塑料排水板, 正方形布置, 间距 1 m。结合工程勘察结果, 排水板深度以穿透淤泥质软土层为准, 平均深度约为 20 m。

施工采用了“直排真空-堆载预压”技术^[9], 通过布设水平支管代替砂垫层的孔隙水传导功能, 通过吹填堆载代替砂垫层压紧真空膜, 节省了砂垫层布置的成本。联合加固方案如图 2 所示。

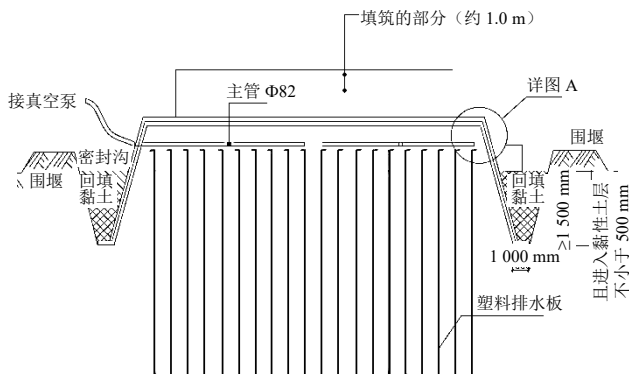


图 2 直排真空-堆载预压加固方案

Fig. 2 Reinforcement scheme of straight-line vacuum and surcharge preloading

场地监测设备为多点成套布置, 9 个取样监测点均匀分布于方形场地的三等分中心位置。分层沉降管、水位管、孔隙水压力计在密封膜铺设前埋设完成, 沉降标在真空预压开始前埋设。

2 监测数据分析

2.1 地表沉降监测数据分析

场地地基加固采取“统一抽排真空、分块吹填堆载”的方式进行, 以便提升地基加固方案的可操作性。真空度统一设置为 80 kPa, 吹填堆载量与堆载时机依据各区块地质条件与真空加固效果分别确定。

现选取某典型区块加固全过程的地表沉降监测数据, 并以时间为横轴与固结荷载共同绘制, 如图 3 所示。

图中以横轴为界, 上半部分的实线为真空度随时间变化曲线, 虚线为联合堆载后的加固总荷载, 灰色区域为堆载压力; 下半部分的沉降随时间变化曲线可分为两个阶段, 蓝色方形代表单真空预压阶段的沉降, 红色三角代表真空预压联合堆载阶段的

沉降。

由于施加堆载荷载时土体已趋于稳定, 真空荷载对土体已无明显加固效果, 因此堆载过程中选择维持较低水平的真空度, 在保证排水系统内负压状态的同时可节约大量能源。

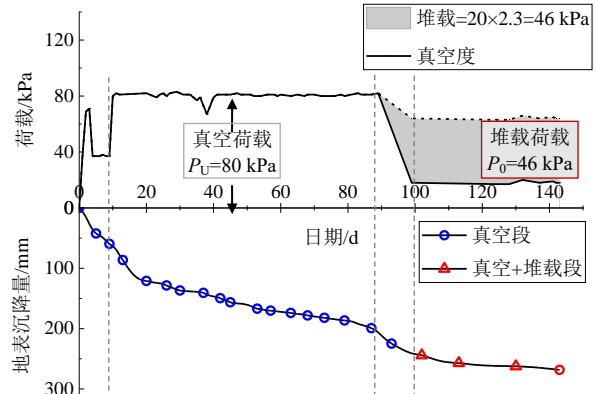


图 3 加固荷载及地表沉降量随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curve of reinforcement load and surface settlement with time

固结度是衡量地基加固效果的主要指标, 可由地表沉降量随时间变化曲线估算。《真空预压加固软土地基技术规程》(JTS 147—2—2009)^[10] 推荐使用经验双曲线法推算最终沉降量, 从而得出加固后的土体固结度。由图 3 可知, 该区块在单真空预压加固至沉降趋稳后, 再进行吹填堆载, 同时保留了较低真空度。因此可以将沉降曲线分两段分别拟合计算。

以该区域开始抽真空的日期为零点, 抽排至真空度稳定时 ($u=80$ kPa) $t=14$ d; 吹填堆载开始和结束时间节点分别为 $t=87$ d、 $t=99$ d; 结束监测时 $t=143$ d。由 $t=14\sim 87$ d、 $t=99\sim 143$ d 两阶段的实测沉降量, 结合拟合公式 (1), 可得归一化后的拟合曲线表达式 (2) 和 (3)。

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

$$S_{t1} = 95.18 + \frac{t-14}{0.273 + 0.007(t-14)}, t \in [14, 87] \quad (2)$$

$$S_{t2} = 240.91 + \frac{t-99}{0.610 + 0.024(t-99)}, t \in [99, 143] \quad (3)$$

式 (1) 中: S_0 、 S_t 分别为某阶段加载开始时和加载 t 时间后的实测沉降量; α 、 β 为拟合系数。将归一化的拟合式 (2) 和式 (3) 与实测散点绘于同一坐标系中, 如图 4 所示。

在式(2)和式(3)中取 $t \rightarrow \infty$, 可求得单真空阶段($t=14 \sim 87$ d)的推算最终沉降量 $S_{\infty 1}=236.03$ mm, 固结度 $U_{t1}=187.48/236.03=79.43\%$; 联合预压阶段推算最终沉降量 $S_{\infty 2}=283.26$ mm, 综合固结度 $U_{t2}=267.59/283.26=94.47\%$ 。最终沉降量水平线与沉降曲线位置关系见图4。

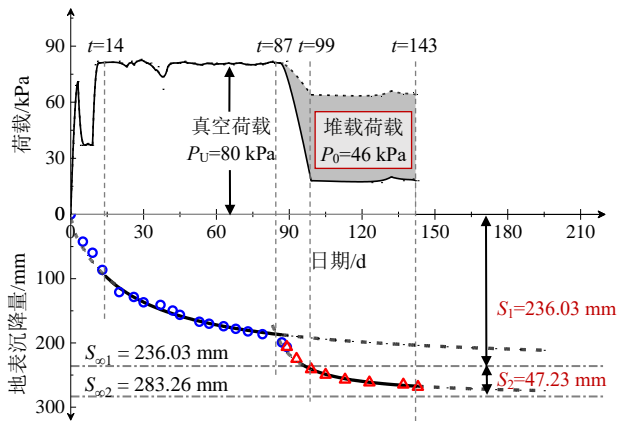


图4 地表沉降曲线分段拟合结果

Fig. 4 Piecewise fitting results of surface settlement curve

从图4的拟合结果可以看出, (1) 单一真空预压加固河漫滩软土至沉降变化趋缓时, 土体固结程度约为实际工后固结状态的70%, 且未达到预期加固目标(预期固结度 $U_t=80\%$); (2) 对比两段拟合曲线的预期固结度可知, 真空预压趋稳后再联合堆载, 可使土体的预期固结度从66.19%提升至94.47%, 提升比例为42.7%; (3) 结合荷载曲线可知, 施加堆载荷载时, 土体在理论总荷载基本不变的条件下继续固结, 可见固结荷载大小不是影响土体固结状态的唯一因素, 多种加荷方式组合能达到更好的加固效果。

2.2 孔隙水压力监测数据分析

场地内孔隙水压力计埋设于0~20 m的土层深度范围内, 以2 m为间隔, 每个监测点位埋设10个。不同深度处超静孔压随时间的变化曲线如图5所示。

从时间的角度分析, (1) 孔压在真空预压初期($t=1 \sim 14$ d)降低了21.8 kPa(各层均值), 约为孔压减小量极值(27.5 kPa, 各层均值)的79%, 说明真空预压使土层产生了负超静孔隙水压力, 且集中于真空抽排初期产生; (2) 真空预压中期($t=14 \sim 87$ d)孔压减小速率放缓并逐渐趋于稳定, 可能是由于地层变形等引起的井阻效应导致排水板中的水流通过性能下降, 从而影响了真空度在土层中的继续传递, 降低了土层排水固结效率; (3) 吹填堆

载施工期间($t=87 \sim 99$ d)孔压增大, 说明堆载使土层产生了正的超静孔隙水压力, 随着后续超静孔压的消散, 土层有效应力增加, 固结程度进一步提升。

从土层深度的角度分析, 加固过程中, 孔压变化幅度随深度增大而逐渐减小, 说明真空联合堆载预压受真空度传递和土层固结排水效率的影响, 对该场地深部土层的加固效果随深度递减。结合图1的地质剖面图可知, 加固效果的影响边界为淤泥质粉质黏土-粉质黏土层(②₃)与粉质黏土层(②₇)的交界处, 有效加固深度在20 m以内。

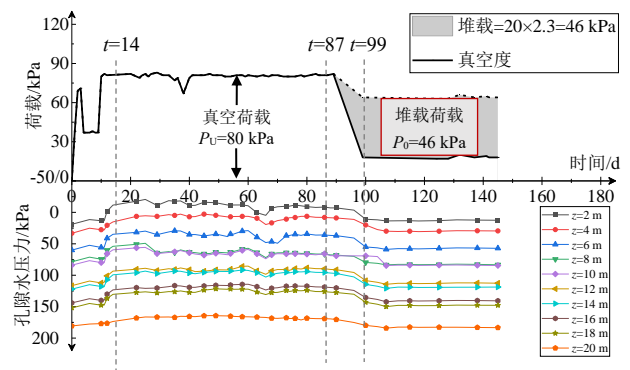


图5 各深度土层孔压随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curve of pore water pressure of soil layer at different depths with time

3 十字板剪切试验数据分析

通过原位十字板剪切试验可得加固前后不同深度原状土体不排水抗剪强度 C_u (图6)、抗剪强度增量 ΔC_u 和抗剪强度增量百分比 $\Delta C_u\%$ (图7)。

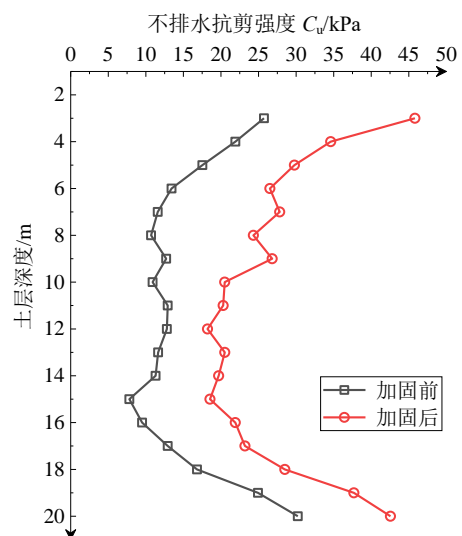


图6 加固前后 C_u 随深度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of C_u with depth before and after ground improvement

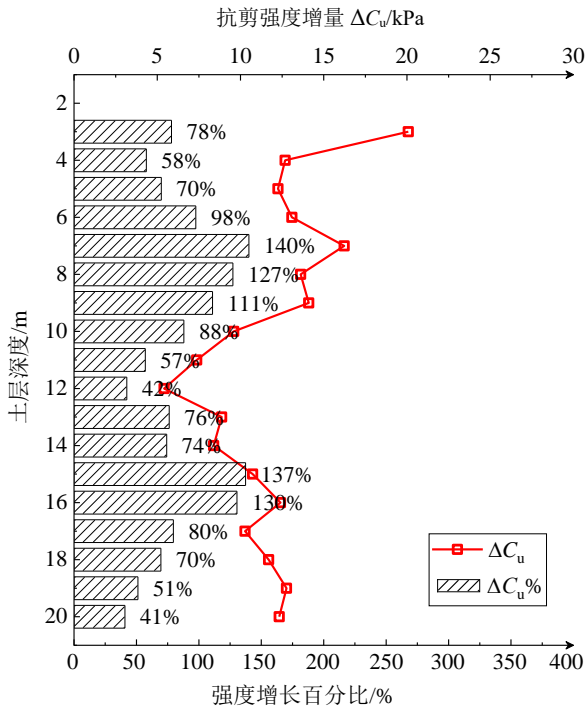


图7 抗剪强度增量 ΔC_u 曲线和抗剪强度增量百分比 $\Delta C_u\%$
 Fig. 7 Curve of shear strength increment ΔC_u and percentage of shear strength increment $\Delta C_u\%$

由图6和图7可以看出, (1) 土体抗剪强度 C_u 呈现“上下大, 中间小”的分布规律, 说明中部淤泥质粉质黏土的结构强度低于下层粉质黏土;
 (2) 土体不排水抗剪强度增量 ΔC_u 随深度增加大致呈减小趋势, 说明真空联合堆载预压加固效果随深度递减, 与孔隙水压力随深度变化规律分析结论一致;
 (3) 中层土体 ($z=10\sim 16\text{ m}$) 加固后强度较其他土层仍偏低, 可以考虑增设加固手段以进一步提升强度。

根据 HAN^[11] 给出的不排水抗剪强度 C_u 预测方法, 正常固结状态下 ($OCR=1$) 饱和黏性土的不

排水抗剪强度增量 ΔC_u 与有效固结压力增量 $\Delta \sigma'_z$ 之间存在以下比值关系:

$$\frac{\Delta C_u}{\Delta \sigma'_z} = 0.20 \sim 0.30 \quad (4)$$

在土体不等向固结条件下, 式(4)中的 $\Delta \sigma'_z$ 可视为与固结产生的有效应力增量 $\Delta \sigma'$ 相等^[12]。另根据有效应力原理, 饱和地基土中有 $\Delta \sigma = \Delta \mu + \Delta \sigma'$, 其中 $\Delta \sigma$ 为地基附加应力, $\Delta \mu$ 为孔隙水压力变化值。具体到真空联合堆载预压的工况, 单真空预压时有:

$$\mu_0 - \mu_{\text{堆载前}} = \Delta \sigma'_1 \quad (5)$$

式中: μ_0 为加固前初始孔压; $\mu_{\text{堆载前}}$ 为吹填施工前孔压; $\Delta \sigma'_1$ 为单真空预压阶段土体有效应力增量。

孔压稳定后再施加堆载时有:

$$p + \mu_{\text{堆载前}} - \mu_\infty = \Delta \sigma'_2 \quad (6)$$

式中: p 为堆载荷载; μ_∞ 为堆载完成后土中孔压稳定时的值; $\Delta \sigma'_2$ 为堆载预压阶段土体有效应力增量。

加固前后土体有效应力增量 $\Delta \sigma' = \Delta \sigma'_1 + \Delta \sigma'_2$, 将式(5)和式(6)代入后可得:

$$\Delta \sigma' = p + \mu_0 - \mu_\infty \quad (7)$$

取该区域堆载荷载 $p=46\text{ kPa}$, 将对应时间节点各土层的孔压值代入式(7)得到 $\Delta \sigma'$, 并计算 ΔC_u 与 $\Delta \sigma'$ 的比值, 将结果汇总后如表2所示。

由表2计算结果可知, 土层各深度下 ΔC_u 与 $\Delta \sigma'$ 的比值大部分介于 0.2~0.3 之间, 结果中存在个别偏离范围的值, 但偏移数据比例低于 50%, 偏移率均值低于 50%, 基本可验证十字板剪切试验结果的可靠性, 但在实际应用中仍需进一步判别。

表2 土体抗剪强度增量与有效应力增量比值关系计算

Table 2 Calculation of the ratio between the increment of shear strength and effective stress of soil

深度/m	初始孔压 μ_0/kPa	加固后孔压 μ_∞/kPa	有效应力增量 $\Delta \sigma'/\text{kPa}$	不排水抗剪强度增量 $\Delta C_u/\text{kPa}$	$\Delta C_u/\Delta \sigma'$
2	19.0	12.5	52.5	—	—
4	33.3	29.5	49.8	12.69	0.25
6	60.1	57.1	49.0	13.09	0.27
8	78.7	83.3	41.4	13.61	0.33
10	84.0	84.5	45.5	9.60	0.21
12	116.6	112.6	50.0	5.41	0.11
14	122.1	118.8	49.3	8.39	0.17
16	144.0	140.6	49.4	12.40	0.25
18	151.9	147.8	50.1	11.69	0.23
20	180.7	183.3	43.4	12.33	0.28

4 室内土工试验数据分析

本节主要针对该区域淤泥质粉质黏土层(②₃, z=10~17.5 m)的室内土工试验数据进行分析,并结合加固前后土层抗剪强度数据进行对比。加固前后土体物理力学参数及变化率如表3所示。

分析表3数据可知,土层②₃的物理力学性质在加固后获得明显改善,说明真空联合堆载预压对该河漫滩相淤泥质软土层的加固效果较好。

关于软土地基承载力的确定,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 3363—2019)^[13]规定应首选载荷试验等原位测试方法,但同时也给出了如下方法间接确定地基承载力特征值 f_{a0} :

(1)对于一般黏性土地基,可根据孔隙比 e 和液性指数 I_L 查《公路桥涵地基与基础设计规范》中

表4.3.3-6得到 f_{a0} ;当孔隙比 $e > 1.1$ 、液性指数 $I_L > 1.1$ 时, f_{a0} 可根据式(8)确定:

$$f_{a0} = 57.22E_s^{0.57} \quad (8)$$

分别代入表3中处理前后的压缩模量 E_{s1} 、 E_{s2} 值,可计算得到加固前后地基承载力特征值增加量 $\Delta f_{a0} = 12.78$ kPa,提升比例为11.85%。

(2)根据软土地基天然沉积饱和软黏土的不排水强度 C_u , f_{a0} 可根据式(9)确定:

$$f_{a0} = \frac{5.14}{m} C_u \quad (9)$$

式中: m 为抗力修正系数,视软土灵敏度及基础长宽比等因素选用1.5~2.5,本工程选用 $m=2$ 。将表1中 $z=12$ m的不排水抗剪强度增量 ΔC_u 代入式中,可得地基承载力特征值增加量 $\Delta f_{a0} = 13.90$ kPa,与方法(1)结果差距小于10%,证明了土工试验数据的可靠性。

表3 土层②₃处理前后主要物理性质指标值统计

Table 3 Statistics of main physical property index values of soil ②₃ before and after treatment

项目	含水量	重度	孔隙比	液性指数	压缩系数	压缩模量	直剪快剪	
	w/%	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	I_L	a_{v1-2}/MPa^{-1}	E_{s1-2}/MPa^{-1}	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
处理前	44.0	16.9	1.277	1.39	0.75	3.04	6.0	10.8
处理后	39.5	17.6	1.156	1.14	0.59	3.70	9.2	13.0
变化率	-10.2%	+4.1%	-9.5%	-18.0%	-21.3%	+21.7%	+53.3%	+20.4%

5 结论

(1)依托长江河漫滩软土地基加固工程,从监测数据、十字板剪切试验、室内土工试验3个角度分别对加固效果进行了分析,实测数据表明真空联合堆载预压加固长江河漫滩软土地基的效果良好,加固6个月后综合固结度达到94.47%。

(2)表层沉降及孔压监测数据均显示,加固过程分为单真空预压和真空联合堆载预压两部分。分析结果表明,单真空预压初期即可快速达到土体固结速率峰值,证明薄粉砂层在真空负压状态下可快速提升地下水水平运移效率;土体状态趋于稳定后再进行堆载时土体强度进一步提升,证明本工程中堆载与真空预压互为补充,二者协同提升了加固效果与固结效率。

(3)加固过程中不同深度土层的孔压及强度变化数据均表明,由于真空度沿排水板向下传递过程中的衰减,联合堆载预压加固效果随深度递减,有效加固深度为0~20 m。

(4)通过原位十字板剪切试验及室内土工试验的数据分析,不仅巩固了真空联合堆载预压加固长江河漫滩软土效果良好的分析结论,还分别给出

了孔压监测数据与十字板剪切试验、十字板剪切试验与室内土工试验相互验证准确性的方法,验证结果显示十字板剪切试验与土工试验较为可靠。

参考文献

- [1] 刘维正,石名磊.长江漫滩相软土结构性特征及其工程效应分析[J].岩土力学,2010,31(2):427-432.
LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei. Structural characteristic and engineering effect analysis of Yangtze River backswamp soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 427-432.
- [2] 夏佳,陈新民,严三保,等.现代河漫滩软土固结与压缩微结构探析[J].岩土工程学报,1997,19(5):69-75.
XIA Jia, CHEN Xin-min, YAN San-bao, et al. Analysis of consolidation and compression microstructure of modern floodplain soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5): 69-75.
- [3] 刘景锦,雷华阳,卢海滨,等.真空预压法淤堵泥层形成机理及预测模型研究[J].水文地质工程地质,2017,44(3):61-71.