

DOI: 10.11779/CJGE2017S2037

真空预压联合戗灰拌合法加固新吹填超软土地基技术

刘爱民

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222;
3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222)

摘要: 采用真空预压法加固新近吹填的超软土地基时, 尽管地基沉降量很大, 含水率也有大幅度的降低, 但有时加固后表层土的十字板剪切强度仍然较低, 不能满足工程需要。这主要是由于这类土颗粒中黏粒甚至胶粒的含量较大且土的固结快剪内摩擦角较小所造成的。对于真空预压后不能满足工程需要的表层土, 可进一步采用戗灰拌合的方法进行处理。

关键词: 流泥; 真空预压; 十字板剪切强度; 戗灰拌合

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)S2-0149-04

作者简介: 刘爱民(1969-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事软土地基处理等方面的设计和科研。E-mail: liuaimin1987@163.com。

Reinforcement technology for vacuum preloading combined with lime mixing method for soft soil foundation

LIU Ai-min

(1. Tianjin Port Engineering Institute Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Communications, PRC. Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China)

Abstract: When the vacuum preloading method is used to reinforce the flowing mud, the settlement of the foundation is relatively large and the water content is also greatly reduced, but sometimes the vane shear strength is still low, which cannot meet the needs of the project. This is mainly due to the large amount of clay particles and even colloidal particles in this kind of soil particles. The lime mixing method can be used for further treatment when the surface soil cannot meet the engineering needs after treatment of vacuum preloading.

Key words: flowing mud; vacuum preloading; vane shear strength; lime mixing

0 引言

近几年, 中国沿海地区经济飞速发展, 土地资源紧张的问题日益突出, 而中国每年港池和航道的疏浚量又非常大, 因此, 利用港池和航道疏浚土进行吹填造陆成为目前缓解土地资源紧张的主要手段。

吹填造陆过程中, 由于水力分选的原因, 在远离吹填口、接近排泥口区域常常形成一定厚度的超软土(主要为流泥和浮泥)。由于工期紧张, 经常需要对新吹填的超软土进行地基处理。近几年发现, 采用真空预压技术加固新吹填的超软土, 有时地基沉降量很大, 但加固后表层土的强度仍然偏低, 不能满足地基的使用要求。如黄骅地区某工程, 新吹填的超软土经真空预压加固5个月后, 地基总沉降量达到2.3 m, 而表层土的十字板抗剪强度只有5~15 kPa^[1]。可看出新吹填的超软土经真空预压加固后其十字板抗剪强度增加

的幅度很高, 但其抗剪强度的绝对值仍然偏低, 不能满足工程需要, 常常需要进行二次处理。目前处理方法有: ①在进行真空预压时对表层的超软土部分在四根塑料排水板中心位置再补打一根短的塑料排水板(深度穿过表层的超软土即可), 进一步减小表层超软土的排水距离, 加快其排水固结进度; ②在进行正常真空预压以前, 先采用人工在表层超软土深度范围内打设塑料排水板, 进行浅层真空预压, 待表层超软土初步固结后再重新打设塑料排水板进行真空预压加固处理^[2-3]; 另外也可待常规真空预压结束后, 对不满足工程需要的表层土进行第二次处理。青岛某工程就是对真空预压后不满足工程要求的表层土采用掺加生石灰进行拌合碾压来处理的。

表 1 各层土物理力学指标统计表

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil strata

土名	含水率/%	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	干重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模量/ MPa	十字板剪切强度/ kPa	厚度/ m
流泥	114	1.41	0.71	3.245	—	—	2	2.0~2.3
淤泥	80.4	1.53	0.85	2.196	—	—	5	1.0
淤泥质粉质黏土 和粉质黏土	39.2	1.82	1.31	1.07	0.51	4.21	9	3.0~4.8
淤泥	80.30	1.55	0.86	2.208	1.55	2.07	7	1.0
淤泥质粉质黏土 和粉质黏土	36.7	1.84	1.35	1.03	0.64	3.26	20	2.0~5.0

1 工程概况及地质条件

本工程位于青岛市黄岛区, 总加固面积约 50 万 m^2 , 为新近吹填形成, 其中 B 区位于排水口区域, 面积为 14.4 万 m^2 , 吹填土表层以流泥和淤泥为主, 工程性质较差。设计采用真空预压加固, 要求处理后表层土的地基承载力不小于 80 kPa ; 平均固结度 $\geq 85\%$ 。

勘察结果表明: 受地形和吹填工艺的影响, 不同位置的土层分布有一定的差别, 场区土层按土的物理力学性质可分为 5 层, 自上而下依次为流泥、淤泥、淤泥质粉质黏土和粉质黏土、淤泥、淤泥质粉质黏土和粉质黏土。表层的流泥和淤泥为新近吹填土, 深灰色, 均匀, 饱和, 流塑状, 厚度为 3.0~3.5 m, 表层经晾晒有 20~30 cm 厚的硬壳, 人行走时有一定危险。各层土的物理力学指标见表 1。

2 真空预压加固

2.1 施工情况

按照设计要求, B 区分为 6 个真空预压施工区, 其中 B1 和 B2 区地质条件最差, 因此, 本文主要以 B1 和 B2 区为代表进行介绍。施工前先铺一层荆芭(由于后期荆芭的购买极其困难, 部分区域改铺一层土工格栅), 再铺一层 350 g/m^2 的土工布, 然后人工铺设 0.4 m 厚的砂垫层, 同塑料排水板一起构成地基处理的排水系统, 砂垫层采用含泥量小于 3% 的中粗砂, 其渗透系数大于 $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。砂垫层验收合格后开始打设 B 型塑料排水板, 排水板按正方形布置, 打设深度随土层埋深情况有所变化, 平均打设深度为 11.97 m, 间距为 1.0 m。排水板打设完成后开挖压膜沟、铺膜抽真空, 真空预压荷载为 80 kPa , 真空度达到设计要求后开始计时, 连续抽气 90 d 以上, 根据实测沉降推算的固结度大于 85%, 且连续 10 d 沉降速率小于 2.0 mm/d 后停泵卸载。

2.2 监测及检测结果分析

(1) 地表沉降

地表沉降主要由两部分组成, 一部分是打设塑料

排水板期间产生的沉降, 另一部分是在真空预压期间产生的沉降。在打设塑料排水板后, 土层排水路径大大缩短, 地基土在其自重压力和砂垫层荷载作用下, 会产生一定量的固结沉降, 欠固结土尤其如此。打板期间的沉降量可通过打板前后砂垫层标高的变化来求得。根据现场测量结果, 打设塑料排水板开始至实施真空预压前, B1 区和 B2 区的沉降量分别为 391.9 mm 和 382.4 mm。

真空预压期间, 由于真空预压荷载的施加, 地基土也会产生较大的固结沉降, 该部分沉降可通过布设的沉降杆观测求得。B1 区和 B2 区在真空预压期间实测平均沉降曲线见图 1。采用双曲线法按式(2)可计算地基土的最终沉降量, 再根据平均实测沉降量按式(3)可以计算地基平均固结度, 计算结果分别为 88.8% 和 87.2%。同理, 计算的各沉降杆处的固结度为 78.6%~89.2%。从计算结果可以看出, 尽管加固区的平均固结度满足卸载要求, 但是各沉降杆处的地基固结度差别较大, 这说明各处的地基加固效果是不均衡的。

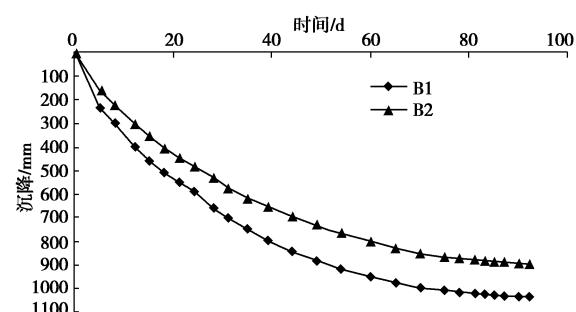


图 1 B 区沉降时间曲线

Fig. 1 Settlement-time curves in area B

$$S_t = S_0 + t / (\alpha + \beta) \quad (1)$$

$$S_\infty = S_0 + 1 / \beta \quad (2)$$

$$U = S_0 / S_\infty \quad (3)$$

式中 S_0 为满载时地基沉降量 (mm), α , β 为待定系数; S_∞ 为最终沉降 (mm), S_t 为卸载时沉降量 (mm), t 为从满载开始至计算固结度时的时间 (d), U 为固结度。

(2) 孔隙水压力

孔隙水压力传感器按设计要求的深度分别埋在四根排水板所围区域的中心处, 从理论上讲, 该中心处距离周围的排水板距离最远, 也就是排水路径最长, 孔隙水压力消散最慢。B1 区孔隙水压力变化曲线见图 2。从图中可以看出, 随着抽真空时间的延长, 孔隙水压力逐渐消散, 且前期消散速度快, 后期消散缓慢。

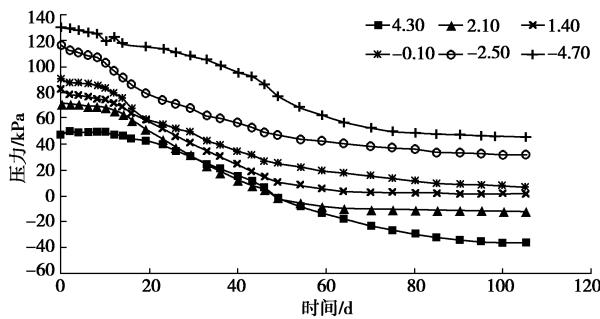


图 2 B1 区孔隙水压力消散时程线

Fig. 2 Dissipation curves of pore water pressure in area B1

铺膜前我们对孔隙水压力进行了观测, 并将观测结果同静止的地下水位观测结果进行了对比分析, 结果表明该区软土层均处于欠固结状态。根据孔隙水压力消散结果, 计算土层内不同深度处的固结度为 70.3%~84.3%。平均固结度为 77.2%。

(3) 十字板剪切强度试验

卸载后对各加固区进行了十字板剪切强度试验, 每区在中心和边角处共检验 3 个孔。检验结果表明: 表层的 1~3 m 范围内土层较软, 十字板强度为 3~10 kPa, 3 m 以下土层的十字板强度较高。由于不同位置处表层十字板强度差别较大, 为了对该加固区有一个比较客观实际的分析, 又补充做了 19 个现场十字板检验孔, 检验结果见表 2。

表 2 加固后十字板剪切强度统计结果表

Table 2 Vane shear strengths of ground after reinforcement

项目	表层强度/kPa		深层强度/kPa
	较低范围	较高范围	
样本数	55	9	83
范围	1.26~13.36	14.36~24.95	19.9~49.9
均值	5.88	18.87	34.02
方差	3.58	4.33	7.61
变异系数	0.61	0.23	0.22

十字板检验结果表明, 随着所处位置的不同, 表层土的十字板抗剪强度差异非常大, 表层以下 2~3 m 深度范围内强度较低的区域十字板抗剪强度为 1.3~10 kPa 不等, 平均为 5.88 kPa, 推算的地基承载力约为 18 kPa; 强度较高的区域十字板抗剪强度平均为 18.88 kPa, 推算的地基承载力约为 60 kPa; 3 m 以下区域十字板抗剪强度较高, 平均为 34.02 kPa, 推算的地基承载力约为 105 kPa。

3 真空预压加固后表层土强度较低的原因分析

在吹填过程中, 地形和吹填工艺对吹填效果有比较大的影响, 同时由于水力分选的原因, 使得表层吹填土的工程性质差别较大, 在远离吹填口区域细颗粒汇集集中形成流泥, 厚度为 2~3 m, 个别区域达到 4.0 m, 施工前表层因晾晒形成有 20~30 cm 厚的硬壳层, 硬壳层下的软土仍为流动状态。真空预压就是在这种情况下进行施工的。

3.1 从土的颗粒分析看强度增长

加固后重点对淤泥(加固前的流泥)的颗粒组成进行分析, 从分析结果看, 表层新吹填的流泥的黏粒(粒径小于 0.005 mm)平均含量为 38.3%, 最大达到 47.8%。我们在现场通过用手触摸, 感觉该层流泥的颗粒与一般的黏粒不同, 触摸该种流泥感觉光滑、滑腻, 同触摸油脂的感觉一样, 认为该层流泥的颗粒中粒径小于 0.002 mm 的胶粒的比重较大。真空预压只能排出极细土颗粒间的自由水, 土颗粒周围仍有大量的强结合水和弱结合水, 所以加固后土体在受到剪力作用时, 大量的结合水能够起到很好的润滑作用, 使得土的抗剪强度很低。

3.2 从固结快剪指标分析加固后土体强度

首先, 《港口工程地基规范》(JTS147—1—2010)中建议的土体强度增长公式为^[4]

$$\Delta S_{uk} = \sigma_{zk} U \tan \varphi_{cq} \quad (4)$$

式中, ΔS_{uk} 为加载过程中强度增量的标准值(kPa), σ_{zk} 为平均垂直附加应力的标准值(kPa), U 为平均固结度, φ_{cq} 为土的固结快剪内摩擦角标准值(度)。

考虑到加固后卸载的影响, 根据以往的经验, 实际增长的强度可按式(4)计算所得强度进行折减, 折减系数可取 0.85~0.90。由此可见, 土体的强度增长值同预压荷载、固结度和土的固结快剪内摩擦角有直接的关系, 在预压荷载和固结度一定的情况下, 土的强度增长值同土的固结快剪内摩擦角密切相关。加固前表层流泥十字板的抗剪强度平均为 1.95 kPa。根据强度增长公式计算, 当流泥在 80 kPa 预压荷载下固结度达到 85%时, 预估增长后十字板强度为 6.44 kPa。现场测试结果表明, 表层以下 2~3 m 深度范围内强度较低的区域十字板抗剪强度平均为 5.88 kPa, 理论计算结果和现场实测结果也是比较一致的。

上述分析结果均表明, B 区吹填形成的表层超软土, 在真空预压荷载作用下即使固结度达到 85%时, 其强度和地基承载力仍然偏低。

4 钣灰拌合处理情况

针对 2~4 m 表层土真空预压加固后十字板剪切强度偏低的情况, 经讨论采用钣灰拌合的方法进行处理, 即掺加一定量的生石灰和石子进行拌合, 利用生石灰的吸水特性大幅降低土的含水率, 利用石子充当土体骨架, 来大幅提高表层土的地基承载力, 减小后期沉降。

4.1 加固方案

用挖掘机将表层软土挖出, 并将软土、生石灰和石子按体积比 1:0.06:0.3 的比例进行拌合, 根据现场情况调整挖掘机的拌合方法, 直至掺和物拌合均匀, 拌和次数不少于 3 次。将拌合均匀的拌合物用挖掘机的挖斗击打压实, 表面 1 m 深度分 3 层击实。静置一段时间, 当强度达到一定要求(约为 15 d), 再用挖掘机进行碾压。拌合用的生石灰选用新近生产的生石灰, 要求其粒径 ≤ 5 mm(筛分法)、氧化钙的含量不小于 70%、含粉量不大于 10%、含水量不大于 5%。拌合用的石子粒径在 20~80 mm 之间, 含泥量 $\leq 5\%$ 。

4.2 加固效果

为检验拌合处理后的地基承载力, 对拌合处理后的地基土做了 3 组载荷试验, 载荷板采用边长 1.0 m 的方板。试验结果表明: 当荷载加至 200 kPa 时, 承压板的最大累计沉降量为 350 mm, 地基尚未达到极限破坏状态, 因此地基承载力特征值可取 100 kPa, 沉降最大的荷载试验曲线见图 3。

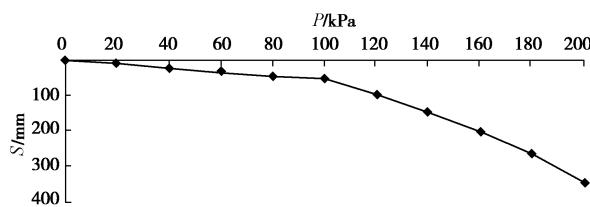


图 3 钣灰拌合后地基载荷试验 P - S 曲线

Fig. 3 P - S curves of loading plate tests after lime mixing

5 结 论

现场工程实践证明, 真空预压联合钣灰拌合法加固新吹填超软土是可行的, 通过对其加固效果进行分

析, 可得到以下结论:

(1) 地基经过真空预压加固后, 地表平均沉降量为 1421 mm, 消除地基沉降比较明显。

(2) 真空预压加固后 3 m 深度以下的所有土层加固效果满足设计要求, 地表以下 2~3 m 范围内的新吹填的超软土物理指标改善明显, 而对其强度指标来说, 尽管其十字板抗剪强度增加的幅度很高, 但其抗剪强度的绝对值仍然偏低。这主要是由于这类土颗粒中黏粒甚至胶粒的含量较大且土的固结快剪内摩擦角较小所造成的。

(3) 对于加固后十字板剪切强度偏低的表层土, 采用钣灰拌合的方法进行处理可大幅提高地基承载力, 减小后期沉降。

参 考 文 献:

- [1] 刘爱民, 梁爱华, 尹长权. 整体式塑料排水板与普通塑料排水板加固效果对比试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊): 130~133. (LIU Ai-min, LIANG Ai-hua, YIN Chang-quan. Comprehensive Application of Geosynthetics on solidified soil sea dike project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S0): 130~133. (in Chinese))
- [2] 闫澍旺, 孙立强, 李伟, 等. 真空加固超软土工艺的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 341~347. (YAN Shu-wang, SUN Li-qiang, LI Wei, et al. Model tests on vacuum preloading technology of super-soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 341~347. (in Chinese))
- [3] 单志浩, 陈智军, 王强, 等. 二次加固直排法真空预压在天津临港工业区中的应用[J]. 中国港湾建设, 2015, 8(8): 36~38, 71. (SHAN Zhi-hao, CHEN Zhi-jun, WANG Qiang, et al. Application of secondary reinforcement inline vacuum preloading in Tianjin Harbor Industrial Zone Project[J]. China Harbour Engineering, 2015, 8(8): 36~38, 71. (in Chinese))
- [4] JTS147—1—2010 港口工程地基规范[S]. 2010. (JTS147—1—2010 Code for soil foundations of port engineering[S]. 2010. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)