

水泥搅拌桩和砂桩在真空预压防护工程中应用与分析

邱青长¹, 莫海鸿¹, 董志良², 张峰²

(1. 华南理工大学土木工程系, 广东 广州 510640; 2. 广州四航工程技术研究院, 广东 广州 510230)

摘要: 基于南沙港区格栅水泥搅拌桩和砂桩联合防护真空预压影响区内高压电缆沟的工程实例, 分析了该真空预压影响区的防护方案, 对比试验研究影响区防护和未防护断面的表层位移、深层侧向位移和地层中孔隙水压力变化规律; 位移测试结果表明该防护方案是有效的, 保护了高压电缆沟的安全; 地层中孔压变化结果表明深层格栅水泥搅拌桩周围土体有渗流发生, 该地层土体中孔隙水压力降低及地下水渗流使土中有效应力改变是周围土体发生变形的主要原因。
关键词: 软基处理; 真空预压; 防护工程; 水泥搅拌桩; 砂桩

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)01-0143-04

作者简介: 邱青长(1977-), 男, 湖南隆回人, 博士研究生, 主要从事软基处理和边坡防护方面的研究。E-mail: qiuqch@tom.com。

Analysis and application of cement-mixed piles and sand piles to protection projects of soft ground improved by vacuum preloading

QIU Qing-chang¹, MO Hai-hong¹, DONG Zhi-liang², ZHANG Feng²

(1. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology, Guangzhou 510230, China)

Abstract: Based on the application of gridiron cement-mixed piles and sand piles to protection of high-voltage cable channel in soft ground improved with vacuum preloading technique, protection project was analyzed. Some contrast were performed on protected and non-protected sections by vacuum preloading to observe surface deformation, deep lateral displacement and pore water pressure in stratum. It was shown that the protection project was effective and the high-voltage cable channel was safe. Variation of pore pressure water demonstrated that there was seepage through gridiron cement-mixed piles in deep soil. The change in effective stresses resulted from falling of pore water pressure and ground water seepage was the main factor inducing deformation of soft ground by vacuum preloading.

Key words: soft ground improvement; vacuum preloading; protection project; cement-mixed pile; sand pile

0 前言

1952年W Kjellman提出真空预压法, 国内20世纪80年代试验成功, 经过几十年的理论研究和工程实践, 在加固机理方面已取得了较多研究成果^[1-4]。目前随着真空预压技术的广泛应用, 真空预压对周围环境的影响越来越受到关注。余湘娟等^[5]通过有限元计算, 从侧向位移说明真空预压对周围建筑物影响, 当采用搅拌桩的支挡作用和止水作用, 可减少其水平位移和不均匀沉降; 彭劼等^[6]通过真空-堆载联合预压法软基加固对周围环境影响的研究, 认为影响范围在加固区外30m左右; 陈远洪等^[7]通过工程实例中软基的应力、位移、孔隙水压力的变化与周围环境相互影响的计算分析, 说明在真空预压法中采取防护措施可以明显减轻对周围环境的影响; 于志强等^[8]认为真空预压边界的安全距离主要考虑构筑物抵抗变形的能力, 其

次是地质条件, 一般建议在18m左右, 不宜小于15m。但广州港南沙港区真空预压加固区边界30m以外的沥青路面出现拉裂现象, 远大于上述文献中的影响范围。现有文献中一般提出采取防护措施可以减轻对周围环境的影响, 但对真空预压影响区的防护工程具体实例及其防护效果报导较少, 尤其对未防护与采取防护措施后典型断面现场对比试验研究甚少。

1 工程概况和试验区地质条件

南沙港区位于广州南沙龙穴岛, 该陆域是在原有滩涂地基上吹填形成的, 吹填土含水率高、强度和承载力低, 而吹填土以下也广泛分布着深厚软土层。目

基金项目: 广州四航工程技术研究院资助项目(S2005D24); 华南理工大学自然科学基金资助项目(B03-E5050960)

收稿日期: 2005-11-14

前该区域吹填陆域采用真空预压加固已达几百万平方米,其加固效果良好,施工工艺和施工参数基本相同,施工工序:①铺设土工布、土工格栅;②回填中细砂;③回填中粗砂垫层;④施插塑料排水板;⑤施打泥浆搅拌墙;⑥真空预压。其中①、②步作用是防止淤泥“拱泥”现象和提高地基的承载力,以便施工机械能安全作业。主要施工参数:塑料排水板 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 正方形布置,打设深度由设计深度和现场 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 网格探摸确定;真空预压边界为两排搭接 200 mm 、 $\phi 700\text{ mm}$ 的泥浆搅拌桩,单排桩与桩之间搭接也为 200 mm ,打设深度要求桩深进入淤泥层 0.5 m ,形成 1.2 m 宽泥浆密封墙;真空度稳定要求在 85 kPa 达 $80\sim 90\text{ d}$,卸载前地基固结度要求达 88% 以上。

试验区域为南沙港区二期软基处理工程,根据该工程岩土工程勘察报告和仪器埋设钻孔,主要土层从上到下:①回填中细砂,层厚 $1.8\sim 2.3\text{ m}$,层顶标高 $+6.0\text{ m}$;②吹填淤泥,含水率高,流动状态,均匀性差,局部沉积有细砂和中砂;③淤泥,层厚 $2.5\sim 6\text{ m}$,原淤泥面标高 $+1.0\text{ m}$ 左右,比较均匀,渗透性差;④粉砂或黏质粉土,层厚 $2\sim 3\text{ m}$,颗粒分选性好,粒径 $0.1\sim 0.25\text{ mm}$ 含量超过 40% ,渗透性强;⑤淤泥质黏土,夹薄层粉砂,不均匀,局部有中砂,层厚 $4\sim 8\text{ m}$,水平向渗透强;⑥含砂、贝壳及有机质等杂质的黏土层,其下为软塑黏土或粉质黏土层。该区域地层具有明显分层特性,各土层渗透系数存在数量级差别。

2 防护方案和试验概况

真空预压法对周围构筑物的影响主要表现在两方面:①真空预压法加固软土地基,加固区周围土体有产生向加固区水平位移的趋势,导致周围构筑物向加固区移位而破坏;②加固区抽真空引起的周围地下水下降,对周围土体有降水预压的加固效果,周围土体产生不均匀沉降而对构筑物造成影响。因此真空预压防护方案选择的原则主要考虑减少影响区土体向加固区的水平位移和受降水预压引起不均匀沉降。

本次防护对象为高压电缆沟,位于真空预压加固区西侧,距加固区边界约 25 m 。邻近加固区边界泥浆搅拌桩打设深度 7.6 m ,加固区内塑料排水板打设深度 $20\sim 23\text{ m}$,从地层结构上看,排水板打穿第⑤层进入第⑥层,因此抽真空时排水板深度第④、⑤层土与外界形成一较畅通的渗流通道,导致该区域真空预压的影响区较远。抽真空期间为保护电缆沟安全,在高压电缆沟和加固区边界间采取格栅水泥搅拌桩和砂桩联合的防护方案,设计参数:水泥搅拌桩直径 600 mm ,搭接 200 mm ,格栅边长 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,打设深度 18 m ,

防护工程长度为平行加固区边界方向并超过电缆沟端点 20 m ,总长 60 m ,中心线离加固区边界 15 m ;砂桩设计直径 400 mm ,打设深度 10 m ,搭接为 0 ,东排砂桩边长 60 m ,西排砂桩边长 20 m ,见图1。水泥搅拌桩有止水和支护双重作用;砂桩为松散多孔介质,具有应力释放的作用,且沿砂桩开挖排水沟,保持排水沟内水源畅通,因此理论上水泥搅拌桩和砂桩均能减少影响区地基降水预压强度和水平位移传递范围。

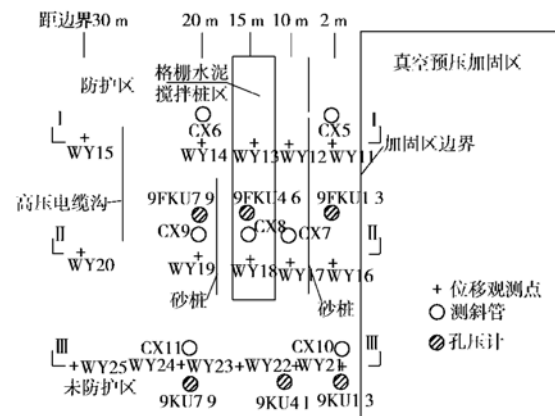


图1 试验区平面布置示意图

Fig. 1 Layout of test area

为研究该防护方案的防护效果,本试验在防护和未防护区选取典型断面进行对比研究,试验方案如图1。观测点均布设在平行加固区边界分别为 2 m 、 10 m 、 15 m 、 20 m 和 30 m 的5个断面上,试验主要埋设仪器设备:测斜管7根,编号CX5、CX6和CX7、CX8、CX9分别为防护区I-I和II-II断面,CX10、CX11为未防护区III-III断面,防护和未防护断面各埋设9个孔压测头,编号9FKU1~9FKU9为II-II断面,9KU1~9KU9为III-III断面,分3层埋设,埋深分别在地表下 5 m 、 10 m 、 18 m (编号从上到下排序),位移观测点15个,WY11~WY15为I-I断面,WY16~WY20为II-II断面,WY21~WY25为III-III断面。

3 试验结果与分析

3.1 表层位移分析

图2为断面测点的总沉降比较曲线,可看出格栅水泥搅拌桩内土体的沉降相对较小,采取防护措施后防护断面各测点沉降均减小,防护断面距边界 30 m 的WY15、WY20测点总沉降为 2.9 cm 和 3.3 cm ,III-III断面WY25测点总沉降为 6.4 cm ,距预压边界 30 m 处采取防护措施后沉降减少约 50% 。

图3为断面测点表层水平位移比较曲线,距预压边界 30 m 处,防护断面的WY15、WY20测点水平位移为 5 cm 和 4.9 cm ,III-III断面的WY25测点水平

位移则达 8.3 cm,距边界 30 m 处防护后最大水平位移减少 40%以上, WY17、WY22 测点水平位移受排水沟影响较大。结合地层中孔压变化结果,测点总沉降与深处最大孔压变化值成比例,地层土体中孔隙水压力降低使土体有效应力改变是发生沉降的主要原因。

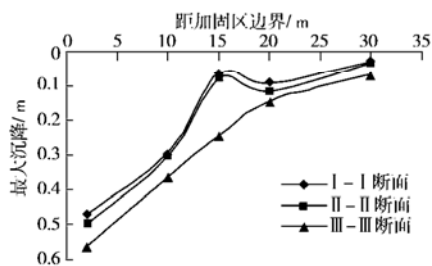


图2 断面测点总沉降比较曲线

Fig. 2 Comparison of total settlements in different sections

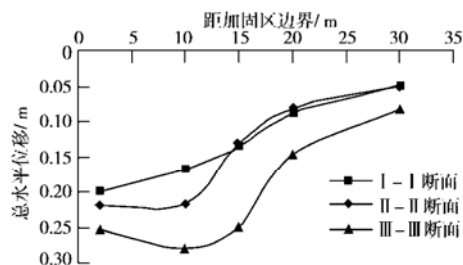


图3 断面测点总水平位移比较曲线

Fig. 3 Comparison of horizontal displacements in different sections

由图2、3对比分析,该地层真空预压影响区土体表层水平位移比沉降衰减慢,距边界2 m 测点沉降远大于水平位移,但是20 m 以远测点的水平位移则反过来大于沉降,可推测地层土体水平位移影响范围大于不均匀沉降影响范围。抽真空导致未防护区距边界30 m 处 WY25 测点产生大于 8 cm 的水平位移和 6 cm 的沉降,这对一般构筑物都会造成破坏性影响,因此该地层真空预压加固对周围环境影响超过 30 m,从而为边界 30 m 外沥青路面拉裂现象提供数据证明。

本工程通过抽真空期间对电缆沟周围土体变形严密监测和加固区内真空预压信息化施工,保护了高压电缆沟的安全,电缆沟位于 WY14、WY15、WY19、WY20 测点之间,从表层位移曲线推算,高压电缆沟处采取防护后水平位移和沉降均减少了约 40%,仍发生了 7 cm 以上水平位移和 5 cm 左右的沉降,因此对于严格控制变形的构筑物防护,该方案仍需优化设计。

3.2 深层侧向位移分析

图4为深层最大侧向位移曲线,最大侧向位移均发生表层,其值与邻近位移测点的表层水平位移结果基本吻合。对比 CX10 和 CX5 曲线,距边界 2 m 处的深层侧向位移地表 6 m 以下基本吻合,但在地表下 2~

6 m 则相差较大。对比 CX10 和 CX11 曲线,未防护区断面 2 m 处与 20 m 处土体深层侧向位移也是在地表下 6 m 深度范围内有变化。对比 CX6、CX9 和 CX11 的曲线,距边界 20 m 处防护与未防护的深层侧向位移在水泥搅拌桩全长范围侧向位移均减少。比较 CX6 和 CX9 曲线,防护后土层深层侧向位移差别主要表现在地表下 6 m 深度范围内。CX7 和 CX8 测斜管水平距离相差 5 m,但最大水平位移减少了近 10 cm,水泥搅拌桩发挥了有效的支护作用。

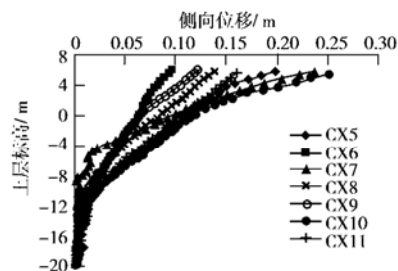


图4 深层最大侧向位移曲线

Fig. 4 The maximum lateral displacement in deep stratum

3.3 地层中土体的孔压变化分析

图5为III-III断面土体中孔压变化与时间曲线。土体中孔压变化与水头变化相当,孔压降低就是水头降低,数据表明同深度土体中离加固区越近孔压变化越大,如地表下 18 m 深处,9KU3 孔压测头最大下降 56.2 kPa,9KU6 孔压测头最大下降 40.7 kPa,9KU9 孔压测头最大下降 29.3 kPa,孔压变化 20 m 处仍超过 2 m 处的 50%,表明该地层内地下水向加固区内渗流路径长,影响范围大;同位置土层越深,孔压变化值越大,如距边界 2 m 处,9KU3 孔压测头最大孔压下降 56.2 kPa,9KU2 孔压测头最大孔压下降 51.8 kPa,9KU1 孔压测头最大孔压下降只有 35 kPa。此现象可从地基的成层特性来分析,5 m 深的上部孔压测头有泥浆密封墙遮挡,并受地表水补给和外界条件影响最大,因此孔压降低最小;10 m 深的中部孔压测头位于淤泥层或粉砂层内,上覆淤泥隔断了竖向渗流,而含薄层粉砂的淤泥质黏土层为透水性和弱透水性相间的“千层糕”地层,粉砂和薄层粉砂中的地下水近似为承压水,不考虑排水板的阻力,抽真空时排水板上下水头下降应相等,地下水以水平渗流为主,因此“千层糕”地层抽真空时影响区地下水运动类似于抽水时地下水向承压完整井的非稳定渗流,排水板深度范围内地层越深受外界影响越小,并且 10 m 处受砂桩的影响大,因此同位置 18 m 处孔压变化值大于 10 m 深处。

图6为防护II-II断面土体中孔压变化与时间曲线,与图5孔压变化规律基本一致,但水泥搅拌桩外孔压测头 9FKU7 和 9FKU8 的孔压变化值较小,说明

上层水泥搅拌桩的止水效果好, 但 18 m 深处 9FKU9 的孔压变化较大, 与未防护 9KU9 孔压变化基本一致, 可见防护区深层地下水仍有渗流发生, 地下水渗流路径是穿透格栅水泥搅拌桩还是通过淤泥质黏土中的薄层粉砂绕流, 本研究没有足够的说明, 但从试验结果可看出, 该防护方案在此成层地基中的深层防渗效果不佳, 从而导致防护后土体仍产生较大的变形。

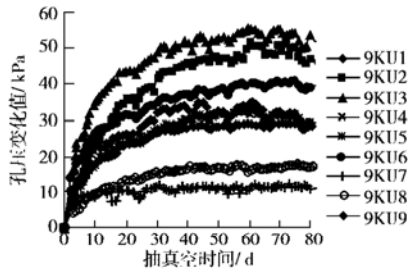


图 5 III - III 断面土体中孔压变化与时间曲线

Fig. 5 Variation of pore pressures with time in III - III section

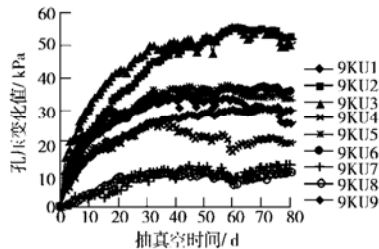


图 6 II - II 断面土体中孔压变化与时间曲线

Fig. 6 Variation of pore pressures with time in II - II section

地层土体中孔压变化测试结果表明, 砂桩桩长范围内, 地表水通过砂桩补给到土体中, 减少了表层土体中的水头降低值。5 m 深处土体中的孔压变化相对砂桩以下地层减少了 20 kPa 以上, 减弱了表层土体中的降水预压强度, 由于该地基的成层特性, 对砂桩深度以下地层土体中孔压变化影响不明显。

4 结 论

(1)南沙港区真空预压影响区内采取水泥搅拌桩和砂桩联合的防护措施, 保护了高压电缆沟的安全, 达到了预期防护效果; 位移测试结果表明高压电缆沟处的水平位移和沉降均减少约 40%, 但仍发生了 7 cm 以上水平位移和 5 cm 左右的沉降。

(2)南沙港区真空预压对周围环境影响范围大于 30 m; 地层土体中孔压降低引起土体有效应力增加是真空预压影响区土体发生不均匀沉降的主要原因; 砂桩减弱了表层土体中的降水预压强度。

(3)真空预压对周围环境影响主要为降水预压引起的不均匀沉降和真空吸力产生的水平位移; 阻止周围地下水向加固区内渗流是减少影响区不均匀沉降的关键, 工程实践表明该防护措施在此成层地基中深层

防渗效果难以保证, 导致土体防护后仍产生较大变形。

参考文献:

- [1] 陈 环, 鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土工程学报, 1984,6(5): 39 - 47.(CHEN Huan, BAO Xiu-qing. Consolidation effective stresses in soil under the negative pressure condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984,6(5): 39 - 47.(in Chinese))
- [2] 沈珠江, 陆舜英. 软土地基真空排水预压的固结变形分析[J]. 岩土工程学报, 1986,8(3): 7 - 15.(SHEN Zhu-jiang, LU Shun-ying. Analysis of consolidation and deformation of soft subsoil under vacuum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986,8(3): 7 - 15.(in Chinese))
- [3] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989,11(4): 45 - 56.(GAO Zhi-yi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989,11(4): 45 - 56.(in Chinese))
- [4] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002,35(2): 7-10. (GONG Xiao-nan, CEN Yang-run. Mechanism of vacuum preloading[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering., 2002,35(2): 7 - 10.(in Chinese))
- [5] 余湘娟, 吴跃东, 等. 真空预压法对加固区边界影响的研究[J]. 水利学报, 2002(9): 123 - 128.(YU Xiang-juan, WU Yue-dong, et al. Effects of vacuum preloading method on boundary of consolidated soft foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 123 - 128.(in Chinese))
- [6] 彭 劫, 刘汉龙 陈永辉, 等. 真空 - 堆载联合预压法软基加固对周围环境的影响[J]. 岩土工程学报, 2002,24(5): 656 - 659.(PENG Jie, LIU Han-long, CHEN Yong-hui, et al. Effects of combined vacuum surcharge preloading to surrounding environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(5): 656 - 659.(in Chinese))
- [7] 陈远洪, 洪宝宁, 龚道勇. 真空预压法对周围环境影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2002,23(3): 382 - 386.(CHEN Yuan-hong, HONG Bao-ning, GONG Dao-yong. Numerical analysis of influence of vacuum preloading method on surrounding environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(3): 382 - 386.(in Chinese))
- [8] 于志强, 朱耀庭, 等. 真空预压法加固软土地基的影响区分析[J]. 中国港湾建设, 2001(1): 26 - 30. (YU Zhi-qiang, ZHU Yao-ting, et al. Analysis of affected surrounding area of soft soils improved with vacuum preloading technique[J]. China Harbour Engineering, 2001(1): 26 - 30.(in Chinese))