

真空预压处理港口吹填区软土地基的应用研究

王国兴¹, 周兆欣¹, 李 超²

(1. 山东交通学院 航海学院, 山东 威海 264200; 2. 威海港集团有限公司, 山东 威海 264200)

摘 要:根据工程地质实际情况设计施工工艺,把握施工技术的要点,确保密封系统的密封效果,减少膜下真空度的损失,是应用真空预压技术处理港口吹填区大面积软土地基的关键。结合威海港威海湾港区新港作业区的工程实例,对应用真空预压技术进行港口吹填区大面积软土地基处理的施工工艺、技术要点等做了详细论述,并实时监测了真空预压过程中膜下真空压力、孔隙水压力、表层沉降及分层沉降等的变化,掌握其发展规律,用于判断真空预压技术处理软土地基处理的效果。通过对各项监测数据的对比分析,得出了提高该技术处理软土地基效果的相应的结论,可供类似工程参考借鉴。

关键词:港口吹填造地; 软基处理; 真空预压; 孔隙水压力

中图分类号:U65

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2017)00-0044-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2017.04.006

真空预压技术最早由瑞典皇家地质学院 Kjellman 于 1952 年提出^[1],其作用机理是,通过对覆膜下的土体抽真空,使土体在负压荷载作用下产生超孔隙水压力,在土体与砂垫层或排水板边界形成孔隙水压力差,在压力差的作用下,孔隙水向外渗流排出,土体中的孔隙水压力随之消散。根据太沙基有效应力原理^[2],在总应力不变的情况下,随着孔隙水压力的降低,土体有效应力得到提高,在排水固结过程中,土体强度随之提高^[3-4]。因此,真空预压技术处理软土地基的效果取决于密封体内外的气压差,即负压荷载的大小;土体固结的速度取决于超孔隙水压力的消散速度。

我国于 20 世纪 50 年代末开始真空预压技术的相关研究。1958 年,天津大学进行了真空排水固结的室内试验研究;80 年代,真空预压法在天津港新港软基处理中试验成功;之后,真空预压技术逐渐得到工程应用,形成了低位真空预压、无砂垫层真空预压、直排式真空预压、增压式真空预压等多种形式,但作用机理没有变化。由于真空预压法具有处理效果较好、造价较低、施工工艺相对简单等特点,近年来,在海堤、港口填海造地等大面积软基处理中逐渐被接受,并得到应用^[5-10]。学者们还对真空预压过程中的真空度、孔隙水压力、软土强度及变形等规律和特性、卸载时间等进行了研究^[11-15],从工程应用和理论研究方面推动了真空预压技术的发展。

本文结合威海港威海湾港区新港作业区的工程实例,对应用真空预压技术进行港口吹填区大面积软基处理的施工工艺、技术要点等做了详细论述,并对真空预压过程中膜下真空压力、孔隙水压力、表层沉降及分层沉降等监测数据进行了分析,得出了相应的结论,可供类似工程参考借鉴。

1 工程地质概况

威海港威海湾港区新港作业区位于威海湾的南岸,是威海港的中心港区。港区施工过程中通过港池、航道疏浚吹填形成陆域面积近 80 万 m²。吹填区场地原为浅海相地貌,吹填后有如下特点:场地西部以淤泥质土为主,表层为流塑性,属未固结高压缩性软土,东部以砂性土为主;吹填土厚度变化大,西部为 9.60~

收稿日期:2017-06-07

作者简介:王国兴(1978-),男,副教授,博士,主要从事港口航道工程结构安全方面研究. E-mail: sdwhport@163.com

(李 燕 编辑)

11.20 m,东部为 7.90~9.80 m;原海底普遍存在淤泥质粉质黏土,厚度 2.00~7.45 m,属高含水量、高压缩性软土。吹填后地层自上而下分别为①素填土:松散-稍密,以风化砂为主;②冲填土:饱和,松散-稍密,以粉细砂为主;③冲填土:流塑或软塑-可塑状态,以淤泥质土或黏性土为主;④淤泥质粉质黏土:流塑-软塑状态;⑤粉质黏土:软塑状态,混砂性土;⑥黏土:可塑状态;⑦细中砂:松散-稍密,局部中密,饱和;⑧粉质黏土:可塑状态,局部夹砂层;⑨细砂:中密,饱和;⑩中粗砂:中密-密实,饱和,局部含黏性土;⑪强风化花岗岩:岩芯较破碎,裂隙较发育,锤击易碎。

2 施工工艺与技术要点

本工程采用真空预压法进行软基处理,施工工艺与技术要点见图 1。由于本工程场地为吹填区,吹填土土质过于松软,呈流塑或软塑状态,含水量很高,因此,处理难度很大。提高土体的密封程度,尽量减少膜下真空度的损失,是本工程施工的关键^[16]。本工程分 4 个区进行施工,编号分别为 1 区,2 区,3 区和 4 区。

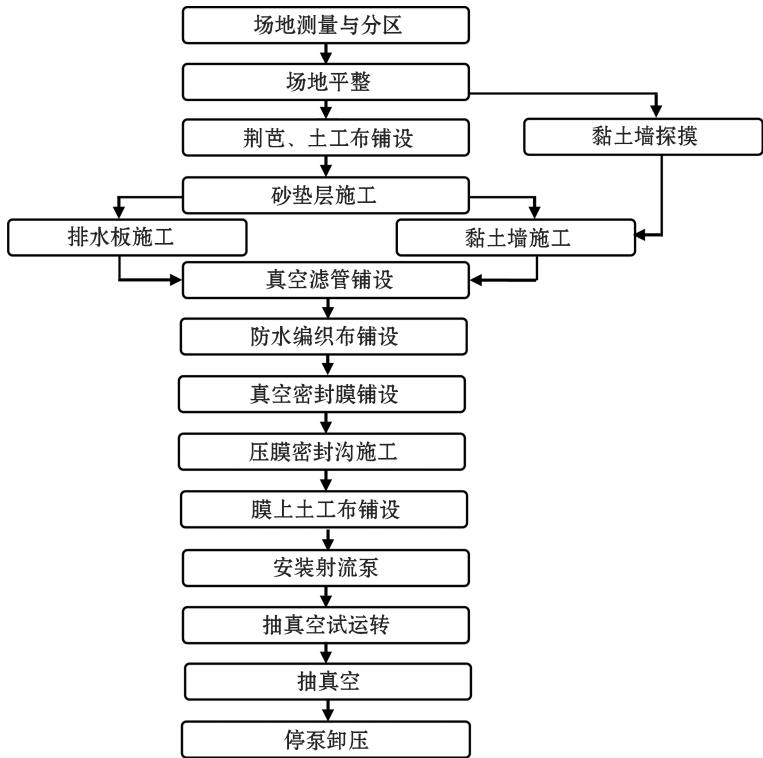


图 1 真空预压施工工艺流程

Fig.1 Construction technics flow of the vacuum preloading

2.1 水平排水垫层

2.1.1 荆笆与土工布铺设

场地整平后,采取渐进法错缝铺设 3 层荆笆,上下两层垂直交叉铺设,每片之间搭接 20 cm,每间隔 50 cm 用铁丝绑扎。荆笆铺设完成后,在其上铺设两层规格为 300 g/m² 的土工布。铺设前清理地表杂物以免土工布被扎破,铺设过程中用袋装砂包压实,铺设完成后尽快进入下一工序,以免土工布受光照过久老化。

2.1.2 砂垫层施工

土工布铺设完成后,鉴于场地表面非常松软,地基承载力很低,采用人工和轻便机械顺序推进回填 0.5 m 的中粗砂作为水平排水垫层,中粗砂要求含泥量小于 5%,干密度大于 $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,渗透系数大于 $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,不含植物、残株等杂物。

2.2 垂直排水通道

采用 B 型塑料排水板正方形布置,间距 1 m。采用套管法整板打设,严禁接长使用;下端穿过淤泥层进入粉质黏土 1 m 以上,不得打入透水层;尽量避免“回带”,“回带”量控制在总量的 5% 以内,且长度不超过 30 cm,否则应在临近处补打;严禁出现扭结、断裂和撕破滤膜现象。打设完毕及时剪断板带,确保板上端露出砂垫层顶面大于 0.25 m,并把板头埋入砂垫层 0.15 m,以防扎破密封膜。排水板打设施工的现场见图 2。



图 2 排水板打设施工现场

Fig.2 Photo of the construction site of drainage plate setting

3.3 黏土密封墙

使用 SJB-II 型深层双轴搅拌桩机,采用两喷四搅工艺,制作宽 1.2 m 的双排黏土墙。自透水层以上 1 m 开始粘土拌合,拌合深度至透水层底标高以下 1 m,确保墙体穿透透水层并进入不透水层顶面标高以下 1 m。黏土掺入量 $> 20\%$,膨润土掺入量 5%,如黏土黏粒含量 $> 40\%$,可不掺入膨润土,泥浆浓度达到 1.3 后用泥浆泵抽送泥浆。桩机定好位,调整机架垂直度,开启桩机,搅头边下沉边搅拌,下沉速度 $\leq 1.2 \text{ m/min}$,至设计深度后停止,搅拌喷浆 10~30 s 后,启动提升装置,边喷浆搅拌边提升,提升速度 $\leq 0.8 \text{ m/min}$,使浆液和土体充分拌合。重复进行第二次搅拌下沉及第二次喷浆提升,完成黏土密封墙施工。

3.4 射流泵及滤管

3.4.1 射流泵布设

选用 3BA-9 型真空射流泵,功率大于 7.5 kW,安装后形成不小于 96 kPa 的真空压力,确保膜下真空压力达到 85 kPa 以上。射流泵按 $800 \text{ m}^2/\text{台}$ 布置,要求 24 h 满负荷运转,应预留备用泵,防止抽真空过程中射流泵因损坏或发生故障停止运转。

3.4.2 滤管布设

滤管采用 $\Phi 75 \text{ mm}$ 硬质 PVC 管,打孔加工后包裹针刺无纺布,做到只透水不透砂。滤管呈框格形布置,纵向按两端间距 35.0 m、中间间距 37.5 m 布设,横向按间距 6.5 m 布设,见图 3。在管路旁开挖深约 20 cm 的管沟,埋管入沟,并用中粗砂填平。滤管相交处采用二通、三通、四通连接,连接点应严格密封。为避免膜下真空度在停泵后很快降低,应在管路中设置止回阀和闸阀。滤管布设施工见图 4。

3.5 密封系统

3.5.1 密封膜铺设

为防止外力作用下膜下粗颗粒刺破密封膜,在密封膜铺设前,先铺设一层厚度为 230 g/m^2 的单面压膜防水编织布,铺设时采用双排线重叠,用手提缝纫机现场缝合,铺设过程中每 100 m^2 用砂包袋固定。

在编织布上铺设 3 层聚氯乙烯薄膜作为密封膜,单层厚度 0.12~0.14 mm,每边各加长 3 m 以便埋入压膜沟,预留足够的地基不均匀沉降变形富余量,防止密封膜拉裂。铺设前认真清理编织布表面杂物,选择无

风或风力较小的时段分层铺设,铺膜过程中随铺随用砂袋压膜,每层膜铺设完成后认真检查,发现有破裂处及时用清水洗净,再用胶水贴膜补好,完成后即可进行下层密封膜铺设,3层膜的黏接缝应尽量错开。密封膜铺设完成后,用真空泵少量抽气将膜吸住。

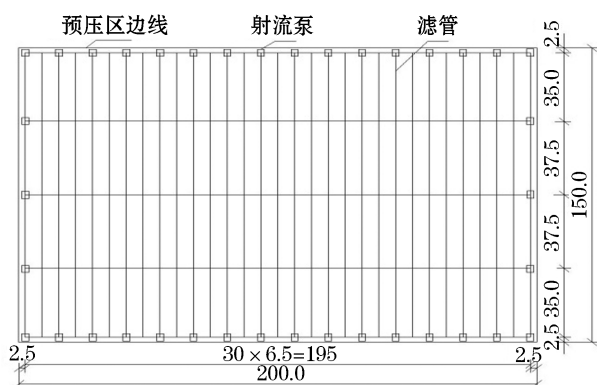


图3 射流泵及滤管平面布置图(m)

Fig.3 Layout chart of jet pump and filter tube (m)



图4 滤管布设施工现场

Fig.4 Photo of the site of construction and layout of filter tube

为防止外力作用下膜上粗颗粒刺破密封膜,造成漏气,密封膜铺设完成后,还要在其上铺设一层厚度为 450 g/m^2 的无纺土工布,铺设时间以抽真空当膜下真空度达到 85 kPa 并稳定后为宜。

3.5.2 压膜沟施工

在预压区四周采用机械辅以人工开挖压膜密封沟,压膜沟应切断透水层,深入不透水层 $>0.5 \text{ m}$,沟底宽 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$,挖沟时如遇塑料排水板,应沿沟边向上插入砂垫层中,不能剪断,插入量大于 0.2 m 。为确保密封效果,需将密封膜逐层踩入密封沟,先踩粘合部位,再踩其他部分,防止撕裂密封膜,每层踩入深度不小于 1 m 。踩膜入沟完成后,用粘土及时回填压实。

3.6 真空预压

上述工序完成后,开始试抽真空。首先开启所有的射流泵,正常情况下,开泵 4 h 后泵口处真空度可达 20 kPa ,在此过程中检修漏气部位;当真空度达 40 kPa 时停泵,进行全面检修。试抽时间约为 $3 \sim 7 \text{ d}$ 。试抽无问题后开始正式抽真空。正常情况下,经 24 h 抽气后膜下真空度可达 85 kPa ,此后进入恒载阶段。抽真空过程中应备有足够的发电机,以保证临时停电时至少有 $1/3$ 的射流泵保持 24 h 满负荷运转。

3.7 停泵卸载

在膜下真空度达到 85 kPa 的恒载状态下连续抽真空 150 d 左右,经监测达到设计的卸载要求,即按实测沉降曲线推算的固结度不小于 85% ,且实测地面沉降速率连续 10 d 平均沉降量不大于 2 mm/d ,方可停泵卸载。真空预压结束后,要对黏土墙和压膜沟部位进行处理。压膜沟全部开挖,黏土墙部位吹填土表面下挖 1.5 m ,用中粗砂夯填,压实度要求达到 93% 。

4 过程监测与分析

4.1 膜下真空压力与孔隙水压力

真空荷载影响孔隙水压力的消散,监测膜下真空度可以掌握真空荷载的施加情况。每个孔位的孔隙水压力计有 6 个埋设深度,分别为地表以下 $2, 5, 8, 11, 14$ 和 17 m 。对地下水位变化的影响进行修正,得

到真空荷载影响下的孔隙水压力。监测孔隙水压力可了解土体中有效应力的发展变化过程,从而分析土体加固效果及强度增长情况。图 5 为各区中心处真空荷载与修正后孔隙水压力随时间的变化曲线。

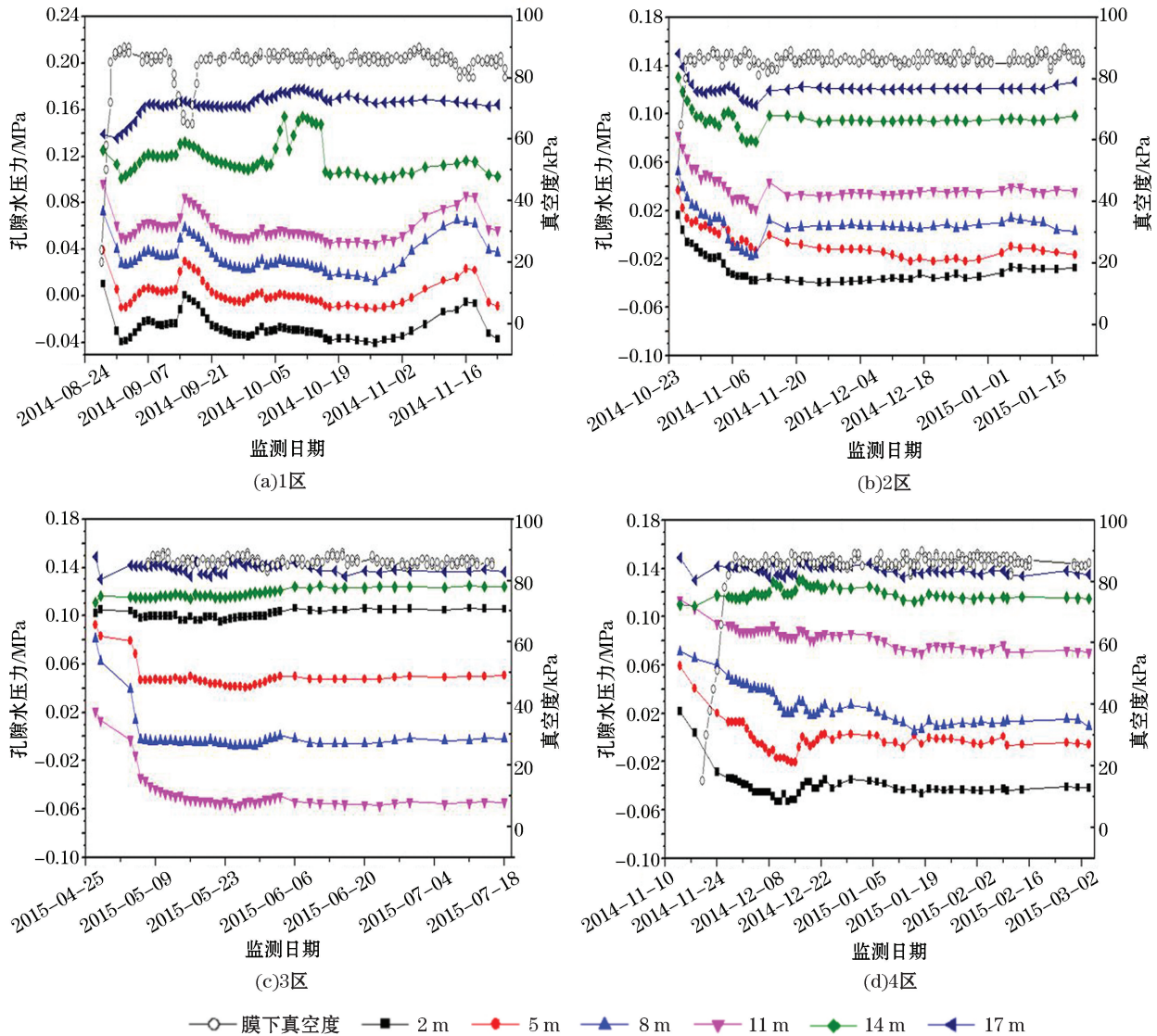


图 5 各区真空荷载、孔隙水压力-时间曲线图

Fig.5 Changes of vacuum load and pore water pressure with time in each district

从真空荷载随时间的变化曲线可以看出,施工过程中,除 1 区有过因铺设土工布导致部分真空泵停止工作,出现孔隙水压力反弹、在此期间随时间消散不明显的现象外,各区的真空度基本能够保持在 85 kPa 以上,部分可达 90 kPa,较好地满足设计要求。从孔隙水压力随时间的变化曲线可以看出,当真空度保持在 85 kPa 时,孔隙水压力处于正常消散状态;加载初期,孔隙水压力快速消散,随着预压时间的增加,土体内孔隙水及气体排除,土体压缩固结,孔隙比减小,土体的渗透性减小,孔隙水压力消散速率减小;当现场出现停电、真空膜破损、真空泵维修等问题时,真空度明显减小,孔隙水压力也出现了反弹,恢复抽真空后,孔隙水压力消散逐渐正常。

由于真空度随深度的增加衰减,且深层自然沉积的低塑性粉质黏土、淤泥质土孔隙水压力消散较慢;表层新吹填低塑性流动淤泥质土及松散的杂填土等孔隙水压力消散较快,整个抽真空期间孔隙水压力随时间呈下降趋势。

4.2 表层沉降

观测地表沉降量,可以根据实测沉降曲线推算土体固结度,评价地基加固效果,确定合理的卸载时间。各区地表沉降观测最终结果见表 1,用双曲线法推算各区地基土平均固结度均可达到 85%以上,且最后 10 d 沉降速率均小于 2 mm/d。

表 1 各区地表沉降观测表

Table 1 The subsidence of land surface observed in each district

区 号	地表平均沉降量/mm	最后 10 d 平均沉降速率/mm · d ⁻¹	推算固结度
1	1 028	<2	92.2%
2	1 140	<2	87.1%
3	914	<2	89.4%
4	849	<2	90.2%

各区观测点布设数量不同,各点表层沉降随时间变化曲线见图 6。本区域上部土层为新近吹填土,土质松散,尚未完成自重固结,后续施工回填砂垫层,砂垫层荷载使得土体产生部分沉降;插板期间,土体形成竖向排水通道,因回填砂垫层较为松散,插排水板期间土体沉降明显,砂垫层密实,致使抽真空期间表层土体沉降量较小。

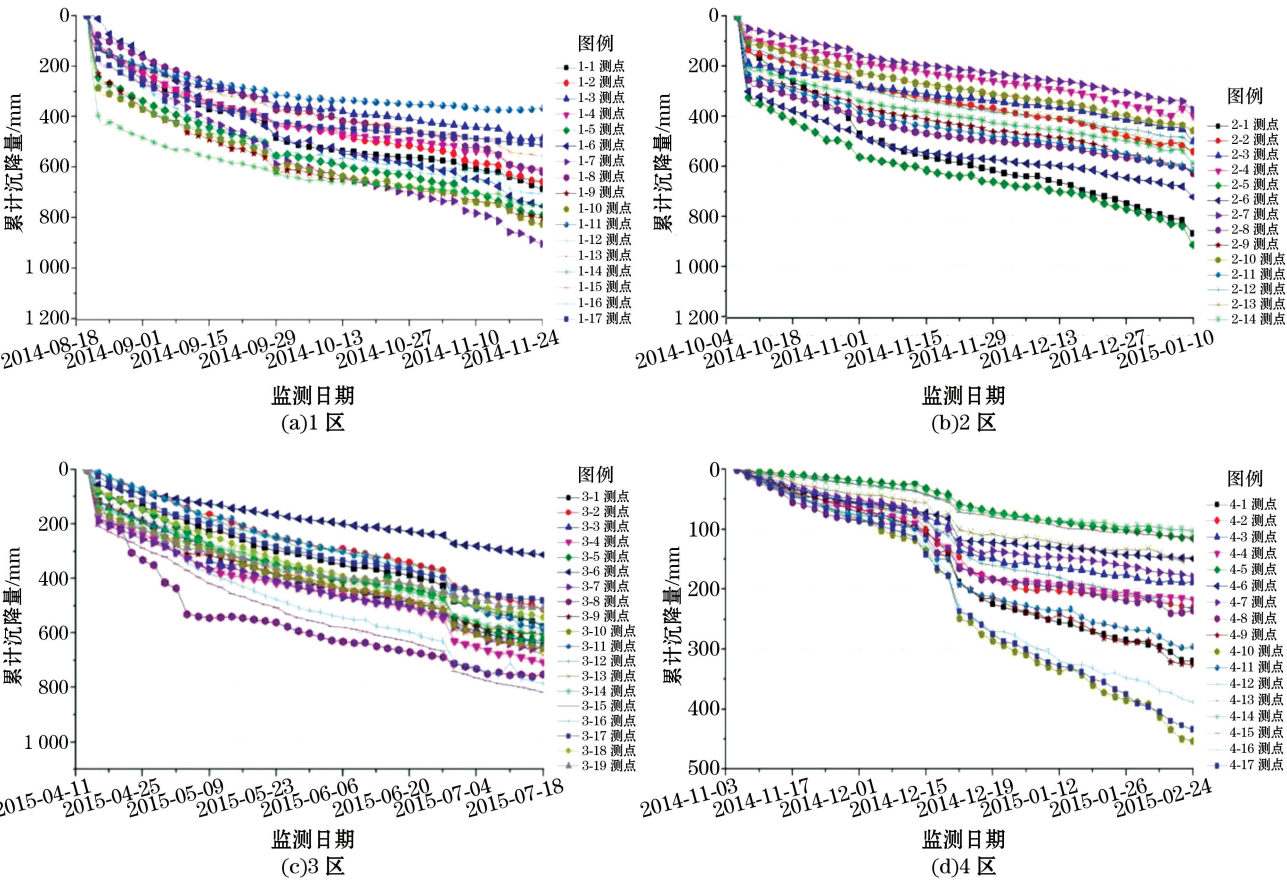


图 6 各区表层沉降-时间曲线图

Fig.6 Changes of surface subsidence with time in each district

4.3 分层沉降

通过观测各土层沉降量,掌握土层的压缩情况,用于判断软基加固能够达到的有效深度。在整个工程区内布置 12 个孔位,每个孔位的分层沉降磁环有 8 个埋设深度,分别为地表以下 2,4,6,9,10,12,14 和 16 m 分层沉降观测结果见图 7。从图中可以看出,沉降量主要集中在 9 m 以上的中浅层,地面以下 16 m 处土体也有沉降,表明真空预压加固有效深度可达 16 m。各层土由浅到深沉降量逐渐减小,一方面是因为深层土质以密实的粉细砂为主,土质较硬,土层压缩率低,浅层土质以松散的粉质粘土、淤泥质吹填土为主,土质较软弱,含水量较高;另一方面是因为真空度由地表向下传递逐渐衰减,使得深部土层加固效果较差。

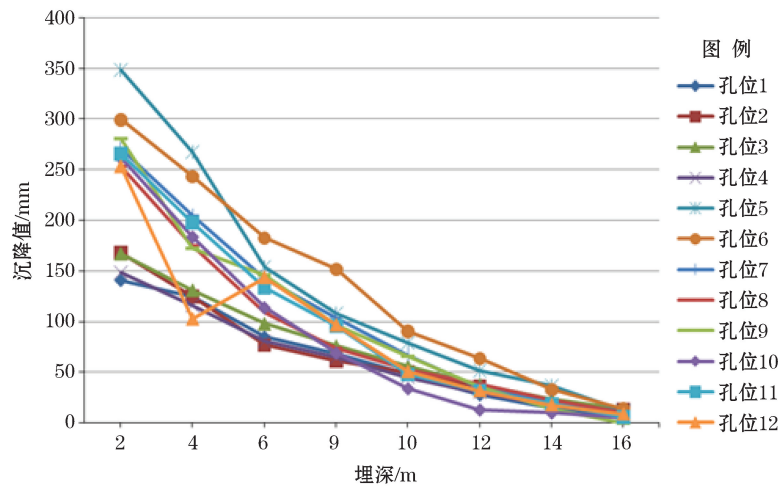


图 7 分层沉降观测结果

Fig.7 Observed results of layering subsidence

5 结 论

本文结合威海港威海湾港区新港作业区的工程实例,对应用真空预压技术进行港口吹填区大面积软基处理的施工工艺、技术要点等做了详细论述,并对真空预压过程中膜下真空压力、孔隙水压力、表层沉降及分层沉降等监测数据进行了分析,得出以下结论:

1)对于疏浚土吹填形成的港口陆域软基处理,因吹填土表层多为流塑状的淤泥或淤泥质土,强度非常低,为便于施工,可以通过铺设荆笆来提高承载力,以保证工期的需要。

2)真空预压法处理软土地基的关键在于提高土体的密封程度,尽量减少膜下真空度的损失,要严格按照设计要求,进行密封膜的铺设和黏土墙的施工,施工过程中规范操作,采取一切措施避免破坏密封系统,造成漏气。

3)按照本文所述施工工艺进行施工,港口吹填区软基处理效果较理想,能够在预定时间内达到设计卸载要求。通过对监测数据进行分析得知,真空预压过程中,膜下真空度、孔隙水压力、表层及分层沉降等变化规律均正常,真空度、孔隙水压力及分层沉降随深度衰减的趋势明显,真空预压加固有效深度可达 16 m,但加固效果主要集中在 9 m 以上。

参考文献 (References):

- [1] KJELLMAN W. Consolidation of clay by means of atmosphere pressure[C]//Proceedings of a conference on soil stabilization. Boston: MIT Press, 1952: 258-263.
- [2] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [3] GAO Z Y. Analysis on mechanics of vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 45-56. 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.
- [4] MEI G X, XU K, ZAI J M, et al. Deformation mechanism of soft foundation under vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1168-1172. 梅国雄, 徐锴, 宰金珉, 等. 真空预压加固软土地基变形机理的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1168-1172.
- [5] ZHU P, YAN S W, LIU R, et al. Case study on improving soft foundation of embankment with vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 508-510. 朱平, 闫澍旺, 刘润, 等. 真空预压法加固路堤软基的工程实例分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 508-510.
- [6] DENG L Z, KE C H. Successful application of large-area vacuum preloading in Nansha phase I project[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(3): 115-120. 邓龙照, 柯朝晖. 大面积真空预压在南沙一期工程中的成功应用[J]. 水运工程, 2004(3): 115-120.
- [7] CONG J, CAO Y L, YANG C J. Experimental study on consolidation of port reclamation stack yard foundation by means of vacuum preloading and broken stone pile[J]. Coastal Engineering, 2007, 26(1): 41-47. 丛建, 曹永琅, 杨成军. 真空预压联合碎石桩加固港口吹填堆场地基的试验研究[J]. 海岸工程, 2007, 26(1): 41-47.
- [8] LIU B, CAI N S, AI Y B. Construction technology of vacuum preloading for compaction treatment of large-area hydraulically-filled soft ground[J]. Port & Waterway Engineering, 2006 (9): 73-76. 刘兵, 蔡南树, 艾英钵. 大面积吹填软土地基真空预压施工工艺[J]. 水运工程, 2006(9): 73-76.
- [9] WANG C F. Technological research on treating soft foundation with large area vacuum preloading method[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(5): 28-32. 王长法. 大面积真空预压加固法处理软土地基技术研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(5): 28-32.
- [10] JIANG Z, FU M, YUAN J N, et al. Case analysis on scheme of silty soft soil foundation treatment for Zhuhai seawall and evaluation of its effect[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(7): 42-46. 姜忠, 付明, 袁俊年, 等. 珠海海堤淤泥质软土地基处理方案实例解析及效果评价[J]. 水利水电技术, 2016, 47(7): 42-46.
- [11] ZHU J C, WEN X G, GONG X N, et al. Analysis of factors having effect on distribution of vacuum degrees during soft ground by vacuum drainage preloading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(11): 1399-1401. 朱建才, 温晓贵, 龚晓南, 等. 真空排水预压法中真空度分布的影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(11): 1399-1401.
- [12] HAN X F, KWONG A K L, THAM L G, et al. Variation law of pore water pressure in soil improved by underwater vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 658-662. 韩雪峰, 邝国麟, 谭国焕, 等. 水下真空预压过程中孔隙水压力变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 658-662.
- [13] XU H, DENG X J, QI Y Z, et al. Development of shear strength of soft clay under vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 285-290. 徐宏, 邓学均, 齐永正, 等. 真空预压排水固结软土强度增长规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 285-290.
- [14] MING J P, SUN Z Y. Experimental study on deformation of soil under vacuum unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1081-1086. 明经平, 孙振远. 真空预压地基卸荷变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1081-1086.
- [15] XIE F. Determination of unloading time for large area reclaimed land treated with vacuum preloading method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(1): 97-100. 谢放. 大面积吹填造地真空预压卸载时间的确定[J]. 水利水电技术, 2013, 44(1): 97-100.
- [16] BAO S F, LOU Y, DONG Z L, 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. 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.

Study on Application of Vacuum Preloading in Treatment of Soft Soil Foundation in the Port Reclamation Area

WANG Guo-xing¹, ZHOU Zhao-xin¹, LI Chao²

(1. *Navigation College, Shandong Jiaotong University, Weihai 264200, China;*

2. *Weihai Port Group Co., Ltd., Weihai 264200, China*)

Abstract: Designing the construction technics according to the actual situation of engineering geology, grasping the key points of construction technology, ensuring the sealing effect of the seal system and reducing the loss of vacuum degree under membrane are the keys to use vacuum preloading technology to deal with the soft soil foundation in the port reclamation area. Combining with an engineering example of Xingang operating area in the Weihai Bay Port area, the construction technics and the technical key points related to the application of the vacuum preloading to the treatment of large area soft soil foundation in the port reclamation area are discussed in detail. The variations of the vacuum pressure under the membrane, the pore water pressure, the surface subsidence and the layering settlement are monitored real-time in the course of vacuum preloading, in order to known the change regulation and to judge the effect of soft soil foundation treatment by using the vacuum preloading. By analyzing and comparing the monitoring data, corresponding conclusions are obtained, which can offer references for the similar projects.

Key words: port reclamation; soft foundation treatment; vacuum preloading; pore water pressure

Received: June 7, 2017