

真空联合堆载预压下软土路基的位移和孔压监测分析*

魏家鸣^① 王清^① 王剑平^② 杨杰^① 单博^①

(^①吉林大学建设工程学院 长春 130021)

(^②南京水利科学研究所 南京 210024)

摘要 根据某一级公路软土路基的各类监测数据结果,详细地分析了地表沉降、孔隙水压力、土体水平位移等随时间和空间的变化规律,结果表明:淤泥层的沉降量占路基总沉降量的65%,低液限黏土层(15m以下)的水平位移较小,这与其土体强度较大有关;由于过快的填筑速率可能促使总的超静孔隙水压力大于0,所以在堆载过程中需要对孔压数据进行密切观测,以防止路基失稳;加固区30m以外基本无地表水平位移,软基处理过程不会对江堤安全性产生影响;结合孔压和土体分层沉降可知,真空联合堆载预压的有效影响深度可以达到排水板以下2m的范围。

关键词 真空联合堆载 监测 土体水平位移 孔隙水压力 沉降

中图分类号:U416 文献标识码:A

ANALYSIS ON DISPLACEMENT AND POREWATER PRESSURE OF SOFT SOIL FOUNDATION UNDER VACUUM-SURCHARGE PRELOADING

WEI Jiaming^① WANG Qing^① WANG Jianping^② YANG Jie^① SHAN Bo^①

(^①Jilin University College of Construction Engineering, Changchun 130021)

(^②Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024)

Abstract This paper is based all kinds of soft soil foundation monitoring results of a first-class highway. The monitoring data of the foundation surface settlement, porewater pressure, soil horizontal displacement variation rules of time and space are analyzed in detail. The results show that about 65 percents of the total settlement of foundation is due to the silt layer. The horizontal displacement of low liquid limit clay layer (under 15m) is smaller. It is related to its bigger soil intensity. Excessive fast filling velocity can make the general excessive porewater pressure above zero. Therefore close observation of the data of pore pressure is needed in surcharge preloading process in order to prevent the foundation instability. There is nearly no surface horizontal displacement at more than 30m outside the reinforced area, which has no effect on river embankment security. Combined with the monitoring data of porepressure and layered settlement, the effective influence depth of the foundation by vacuum combined surcharge preloading can reach to about 2m.

Key words Vacuum-surcharge preloading, Monitoring, Soil horizontal displacement, the porewater pressure, Settlement

* 收稿日期: 2011-07-01; 收到修改稿日期: 2011-11-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(49972089 40372122, 40911120044, 40902077, 40372122, 2011J014)资助.

第一作者简介: 魏家鸣, 主要从事工程地质方面的研究. Email: wjmsfy@163.com

1 引言

高填方的路基尤其是高填方软土路堤是一个要突出解决的问题,这主要包括:路基稳定问题,在路基处理施工期内的稳定控制的技术仍需完善,防止出现施工期路基失稳,甚至在公路建成通车较长时间以后还出现大面积路基整体失稳的情况;工后沉降问题,由于特殊地段普遍容易出现跳车现象,这无疑影响了工程的使用。在软基处理中,传统普遍使用的堆载预压法尽管造价比较低,但存在工期较长的不足,真空联合堆载预压法近年来在我国沿海的软基处理中使用越来越多,也取得了很多成果,处治工期短,造价又低于复合地基。在软基加固处理的施工技术及加固机理方面国内专业学者已做了大量的研究^[1~7],真空联合堆载预压通过软基处治期的各种监测手段,及时获取大量软基性状指标和数据,再对监测数据进行分析,并根据反馈指导和控制施工。所获得的监测资料是指导施工、研究加固机理的重要手段。加固过程中真空度的影响深度、路基沉降变化规律、土体水平位移沿深度和水平方向上的变化规律、孔隙水压力变化规律等仍需完善。本文对南方海滨某一级公路重点监测断面的监测数据进行分析。

2 工程概况

拟建公路作为本地城市的1条观光道路,为在城市规划中体现人文景观和城市交通二者结合之理念,故线路走向与江堤近于平行。本文所分析的重点断面的加固区边界距江堤约为30m。江堤是经过数十年的逐步填筑而成,地基未进行过处理,而新建公路所增加的路堤荷载及其所带来的沉降、位移效应都可能影响江堤的稳定性。

2.1 工程地质条件与物理力学性质指标

本区为滨海冲积平原区,海陆交互相沉积,根据现场勘察资料,由上至下土层分布如下:①人工填土,主要由黏性土组成,厚0.7m;②淤泥、淤泥质土,灰黑色,含腐植质,粉细砂、底部呈流塑状,饱和,属高压缩性土,层厚为12.7m;③低液限黏土,浅黄色,主要由黏粒、粉粒组成,含细砂,黏性较强,呈可塑状,很湿,属中偏高压缩性土,层厚9.6m。④强风化砂岩,褐黄色,节理裂隙发育,半土半岩状,浸水易软化,地基承载力可达500kPa。各土层物理力学性质指标如表1。其中地层②、③是产生沉降固结的主要地层,是本次研究的主要地层。

表1 主要地层的基本物理力学性质指标

Table 1 Basic indicators of physical and mechanical properties of major stratum

层号	土层名称	含水量 $\omega/(\%)$	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩系数 $a_{1.2}/\text{MPa}$	塑性指数 I_p	固结系数 $C_v/\times 10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	承载力 f_k/kPa
②	淤泥、淤泥质亚黏土	50.1	15.7	1.430	1.23	1.46	17.1	2.34	50~70
③	低液限黏土	31.3	18.6	0.901	0.39	0.33	15.0	3.0	135
④	强风化砂岩	16.7	19.5	0.597		0.13			500

2.2 软基处理设计方案

此路段软土层厚度达23m,路基填高5m,在平面上以梅花型布设排水板,排水板打设深度为20m,打设的间距为1.2m。铺设0.5m厚的中粗砂垫层,其上布置2层土工布和密封膜,设计膜下真空度达到80kPa。采用直径76mm,4mm厚管壁,可以承受400kPa的标准PVC管,主管与滤管间使用带筋软胶管连接,在连接处最外层防砂的土工布预留一定的沉降空间,以确保连接处不会被路基的不均匀沉降所破坏。

从2006年1月11日开始抽真空,2006年10月12日停泵,抽真空总天数270d。2006年3月9

日开始填土,满载预压开始时间2006年9月28日,实际满载预压时间149d。

2.3 监测布置方案

利用埋设监测仪器和观测点,监测并取得软土路基处治过程中软土层的变形数据,通过对监测数据的处理分析,对可能出现的不利情况进行预测,掌握路基土的固结情况,检验路基处治效果,在加固区路中、边共布置孔隙水压力测点8个,深层土体水平位移测点2个,地表沉降板7个,分层沉降环10只。为了分析加固影响深度,在排水板底部埋设了孔压计和分层沉降环(图1)。

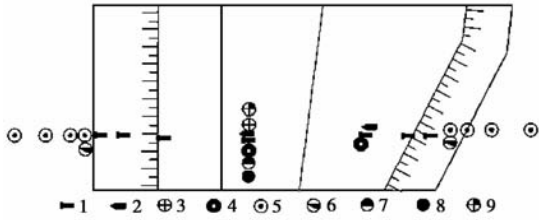


图1 监测平面布置图

Fig. 1 The layout of monitoring equipments installation

1. 地面沉降板; 2. 孔隙水压力测点; 3. 路堤填筑前十字板孔;
4. 分层沉降测点; 5. 边桩; 6. 深层水平位移测点; 7. 路堤填筑前取土孔;
8. 路堤填筑完成取土孔; 9. 路堤填筑完成(路面施工前)原位测试孔。注:为检测软土路基处治效果,在路堤填筑前和路堤填筑完成时(路面施工前)进行原位测试和原位取土

3 监测结果分析

3.1 地表沉降

从加固区沉降标所测得的地表沉降随时间的变化曲线看到(图2),自2006年1月11日开始抽真空,地表迅速下沉,沉降曲线较陡,沉降速率最大达 $17\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$;随着抽真空时间的增加,测点的沉降速率逐渐降低,沉降曲线逐渐变缓。自2006年3月9日开始,各级填土荷载迅速施加于地表面,填筑速率达 $1.03\text{kPa}\cdot\text{d}^{-1}$,可见沉降曲线再次变陡,这是真空堆载联合作用加速固结沉降的结果。当填筑速率减慢以后,如2006年9月24日填土加到 80kPa 后直到2007年2月22日即预压5个月以后再加下一级荷载,这段时间沉降曲线趋于平缓。到2006年10月24日,此时真空预压已达9个月,同时沉降监测数据显示,其中后2个月,沉降速率较大的路右2曲线沉降速率也已接近 $23\text{mm}\cdot\text{mon}^{-1}$ ($\leq 25\sim 30\text{mm}\cdot\text{mon}^{-1}$),满足真空卸载标准,此时停泵。

以试通车后的工作状态作为路基最终荷载状态,经过试通车1a的沉降观测,根据沉降监测曲线按“三点法”,推算最终沉降量 S_u 为 221cm 。试通车时,监测的最大沉降量约为 204.8cm ,可算得此时固结度为 92.6% ;通车1a后,监测的最大沉降量为 212cm ,由此求得此时路基的固结度达到 95.8% 。由通车1a后监测的最大沉降量(212cm)减去试通车时监测的最大沉降量(204.8cm),可知通车1a实际工后沉降约为 7.2cm 。

3.2 分层沉降

由分层沉降随时间变化曲线可知(图3),抽真

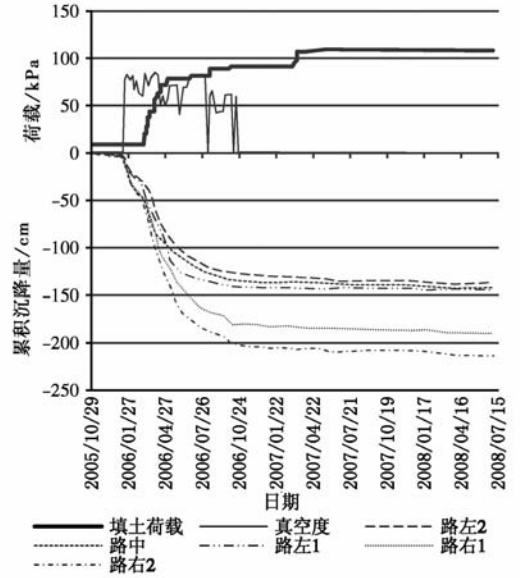


图2 地面沉降-荷载-时间过程线

Fig. 2 Curve of Land subsidence-load-time

空开始时,各个埋深的沉降磁环迅速下沉,随后曲线变缓,直到堆载开始,在联合预压作用下沉降速率再次变大。地表至 13.8m 之间淤泥质黏土沉降量最大,约占总沉降量的 65% ,排水板 21m 以下有相对较小的沉降量,板下 2m 内沉降为 39cm 左右,约占总沉降量的 10% ,可见排水板对其以下土层的固结仍有一定影响。

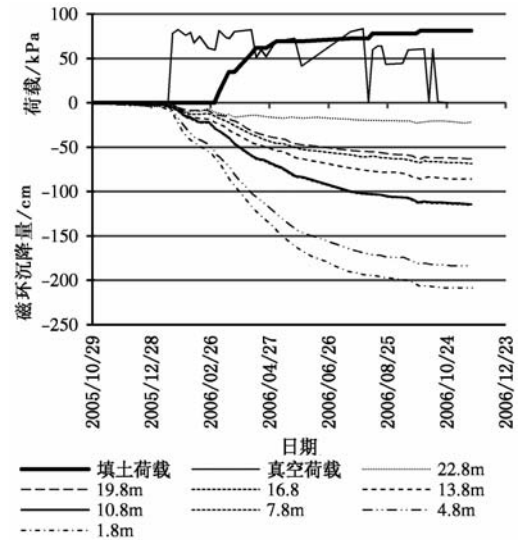


图3 路中分层沉降-荷载-时间过程线

Fig. 3 Curve of road central layered settlement-load-time

3.3 地表及深层土体水平位移

地表水平位移随时间变化曲线如图4所示(指向路堤外侧方向为正),为了分析土体的水平位移

在不同水平距离上的变化规律,设置了离加固区距离不同的若干地表水平位移边桩。

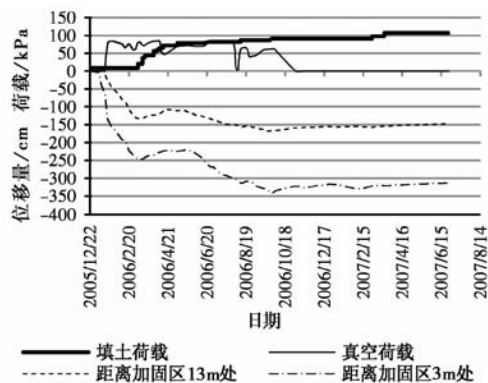


图4 地表水平位移-荷载-时间过程线

Fig. 4 Curve of surface horizontal displacement-load-time

以距离加固区边界 20m 和 30m 的 2 个测点为例。在真空预压的作用下,土体迅速由路两侧向路中方向收缩,随堆载开始,收缩值逐渐减小,联合预压后期,收缩值继续变大,停泵后,收缩值趋于稳定。预压过程中,距加固区 3m 处的收缩位移值最大达 -340mm 左右,距加固区 13m 处的最大位移值为 -170mm 左右,可见随着离路中加固区距离的增加,土体水平位移值减小^[7],加固区边界处的水泥搅拌桩在很大程度上限制土体的水平位移。距加固区边界 30m 左右江堤处的土体水平位移已经很小,亦未见有平行于加固区的裂缝,预压过程不会影响江堤稳定性。

土体位移沿深度方向的变化规律如图 5(指向路堤外侧方向为正)所示。从抽真空开始至开始填土这段时间,土体位移指向路中,说明由真空荷载引起的指向路中的附加应力作用明显,地表位移最大,并沿深度方向减小,到开始填土时(2006 年 3 月 7 日),地表位移达到 -130mm 左右;堆载开始以后,土体指向路中的位移值有减小的趋势,可见堆载在土体中产生的附加应力方向指向路堤外侧,当填土完成达到满载时,深度 12m 以下位移值由负值变为正值,这是由于随着堆载量的增加,其产生的附加应力增加已超过此处真空度引起的附加应力^[8,9]。深度 15m 以下水平位移已经很小,这是由于 15m 处于低液限黏土层中,其压缩系数为 0.33,压缩性不如较浅部的淤泥及淤泥质土层,而强度较淤泥层要大。

从曲线系的斜率和形态上来看,满载预压完成以后,深度 12m 以下土体随深度增加侧向位移值变化不大,这一方面是由于深度 12.7m 以下进入了

湿、可塑-硬塑的中压缩性的低液限黏土层,压缩性、含水量不如埋深较浅的淤泥层;另一方面真空度和堆载产生的荷载效应随深度增加都有一定程度的衰减,二者的矢量叠加后的附加应力场也较小,水平位移值沿深度方向变化不明显。

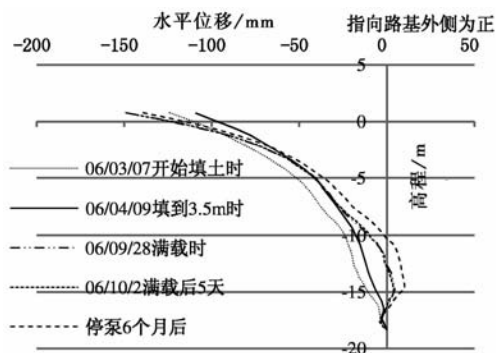


图5 深层水平位移线

Fig. 5 Curve of horizontal displacement-load-time

整体上看,曲线系在不同深度的位移值大多为负,即主要集中在朝向路中的方向。这说明真空作用下的路基排水固结效果明显,有效地避免了在只进行堆载预压下可能出现的路基土向外侧挤出失稳情况的发生。

3.4 超静孔隙水压力及地下水水位

自抽真空开始后,加固区各深度处测点的孔隙水压力均迅速下降,形成负的超静孔隙水压力(图 6)。各深度测点孔压变化规律未出现 Mandel-Cryer 效应^[10],说明路基土体上下均有较好孔隙水压力消散能力。随着抽真空时间的增加,孔压下降速率慢慢变低。由真空预压期的孔隙水压力消散值(表 2)可知,至开始堆载之前,路基土体孔隙水压力在各个深度处的消散值大体一致,约为 22kPa,深度 8m 和 17.1m 处的孔压消散值偏大,这可能是由于测点与排水板较近的原因或者该深度处土的渗透系数较大的缘故,20m 以下孔压消散值较浅层土小为 16~17kPa,说明排水板以下土体排水相对较为困难。

在堆载开始以后,除 8m 深处,其他各深度处负超静孔压的绝对值不断减小^[11]。8m 深处的孔压上升和消散的速度都很快,在整个填筑期大致呈下降趋势,这是由于测点距离排水板很近的缘故。堆载初期填筑速率达 $1.03\text{kPa}\cdot\text{d}^{-1}$,在 2006 年 4 月 27 日测得的孔压数据显示,深度 11m、14m 等处的测点孔压值上升至接近于 0,此时不利于路基的稳定,停

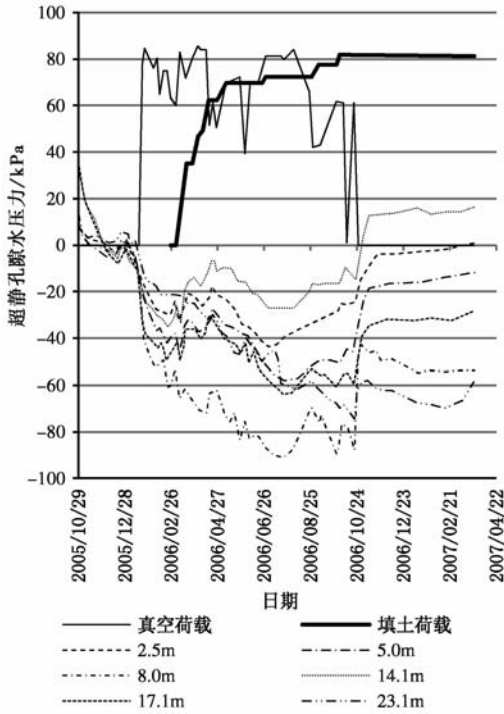


图6 路中超静孔压-荷载-时间过程线
Fig. 6 Curve of road central excessive pore water pressure-load-the time

表2 真空预压期孔隙水压力消散值

Table 2 Pore water pressure abreaction value in vacuum preloading period

深度/m	2.5	5.0	8.0	11.0	14.1	17.1	20.0	23.1
抽真空之前孔隙水压力值/kPa	-8	-13	-6	-9	-12	-14	-14	-4
填筑前孔隙水压力值/kPa	-31	-43	-60	-33	-34	-50	-30	-21
开始抽真空至堆载前孔压消散值/kPa	23	30	55	24	23	37	16	17
消散速率/ $kPa \cdot d^{-1}$	0.38	0.5	0.92	0.4	0.38	0.62	0.27	0.28

止填土1个多月后,各测点孔压逐渐下降到-25kPa以下,再次进行填筑,直至填筑完成。整个填筑过程中,路基土孔隙水压力一直保持在负压的状态,为路基的稳定控制施工提供了可靠的依据。

由于8m深处孔压计离排水板可能很近,可参考作为此处排水板内的超静孔隙水压力近似值,监测数据表明,在真空恒载期间,例如抽真空至2006年6月26日时,8m处负压可达到-80kPa以下,与砂垫层内的真空度值基本达到一致,可见,负压可能

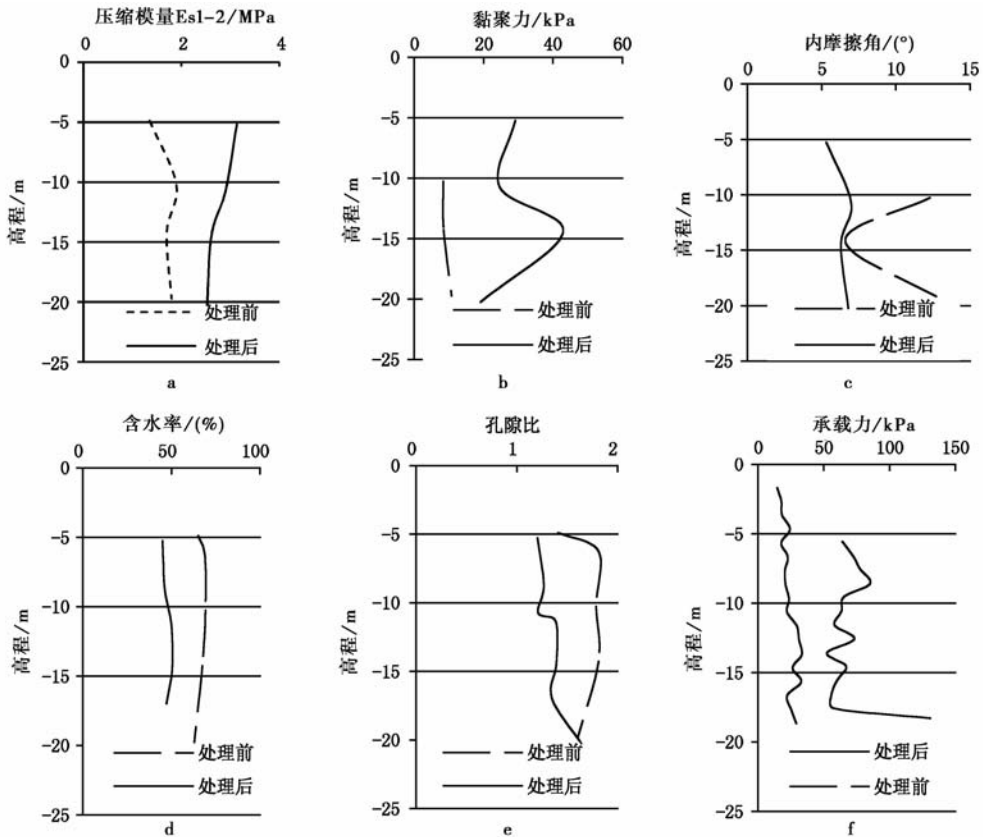


图7 路基处治前后土的物理力学性质指标的变化

Fig. 7 Changes of indicators of physical and mechanical properties before and after foundation treatment

a. 压缩模量 E_{s1-2}/MPa ; b. 直剪快剪,黏聚力/kPa; c. 直剪快剪,内摩擦角/ $^{\circ}$; d. 含水率/MPa; e. 孔隙比; f. 承载力/kPa

在传递的行程中有一定的损耗,但负压在排水体内和砂垫层中的分布模式一致^[12];负压在传递到土体中的过程中有一定程度的损耗,各测点的损耗程度不尽相同,这与土体不同深度处的渗透系数不同有关。

4 软基处理效果分析

对软基处理前后的各类土工试验数据进行对比,可知路基土的物理力学性质指标发生了很大变化。

在主要物理指标方面(图7),(1)土层平均含水率由加固前的66.6%降到加固后的49.3%,降幅达到0.26;(2)土层平均孔隙比由1.679变为1.347,相对减少0.2;(3)由十字板剪切实验测得加固前后土层抗剪强度,并得到加固前后的土层的承载力,可知加固后各深度处处土层承载力提高了1.5~5倍。

如图7所示,在力学性质方面,加固后路基土层的压缩性、抗剪强度均有不同程度的提高。在直剪快剪试验中发现,黏聚力有较大程度的提高,而摩擦角普遍有所减小,但其幅度不大,综合看来土层抗剪强度提高很大。

5 结论

(1)刚抽真空时,地表沉降的速率较大,达到 $17\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$,随后逐渐变小,联合预压开始后,地表沉降的速率再次变大,沉降速率与填筑速率密切相关,在满载预压过程中,随着时间的增加,沉降速率逐渐变得很小。由三点法,推算出试通车1a后工后沉降为7.2cm,路基的固结度达到95.8%。

(2)淤泥层内的分层沉降量占总沉降量的65%左右,排水板以下2m土层内仍有39cm的沉降量。距离加固区30m以外的土体水平位移值已很小,深度15m以下基本没有水平位移。

(3)在土层中,真空预压产生负超静孔隙水压力,堆载预压产生正超静孔隙水压力。总的超静孔隙水压力随着抽真空的开始而先下降,之后在开始堆载以后又短暂上升,一般均为负值。在逐级填土时,过快的填筑速率会导致孔压的大幅回升,对于土体初始孔隙水压力较大的深度处,总超静孔隙水压力有可能回升为正的孔隙水压力,不利于路基在逐级填土时的地基稳定。砂垫层内的真空度和排水板

内的超静孔隙水压力值在真空恒载期间内基本一致。

参 考 文 献

- [1] 陈允进,宋晶,夏玉斌,等.真空预压法加固吹填土的孔隙水压力试验研究[J].工程地质学报,2010,18(5):703~707.
Chen Yunjin, Song Jing, Xia Yubin, et al. Laboratory experimental studies of pore water pressure in dredger fill consolidation with vacuum preloading. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 703~707.
- [2] 娄炎.真空排水预压法的加固机理及其特征的应力途径分析[J].水利水运科学研究,1990,(1):61~68.
Lou Yan. Stress path analysis for the mechanism and characteristics of improving the ground soil by sdvp method. Hydro-Science and Engineering, 1990, (1): 61~68.
- [3] 王炳龙,杨龙才,宫全美,周顺华.真空联合堆载预压法加固软土地基的试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2004,34(4):499~453.
Wang Binglong, Yang Longcai, Gong Quanmei, Zhou Shunhua. Experimental study on soft soil reinforced by vacuum combined with fill preloading. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 34(4): 499~453.
- [4] 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.
Han Xuefeng, Kuang Guolin, Tan Guohuan, et al. Variation law of pore water pressure in soil improved by underwater vacuum preloading method. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 658~662.
- [5] 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 Xiaonan, Cen Yangrun. Mechanism of vacuum preloading. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(2): 7~10.
- [6] 邓明.真空预压法加固地基效果的影响因素[J].中国港湾建设,2006,142(2):11~13.
Deng Ming. Factors affecting consolidation of soil improved with vacuum preloading method. China Harbor Engineering, 2006, 142(2): 11~13.
- [7] 朱建才,陈兰云,龚晓南.高等级公路桥头软基真空联合堆载预压加固试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2160~2165.
Zhu Jiancai, Chen Lanyun, Gong Xiaonan. Testing study on reinforcing soft foundation of highway bridge-head by vacuum combined with surcharge preloading. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2160~2165.
- [8] 童中,汪建斌.软土路基真空联合堆载预压位移监测与分析[J].岩土力学,2002,23(5):661~666.
Tong Zhong, Wang Jianbin. Monitoring and analysis of displacements of soft soil embankment with jointed vacuum-preloading treatment. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 661~666.
- [9] 刘寒鹏,杜东菊,孙锐.真空预压软基处理沉降监测分析[J].工程地质学报,2009,17(1):111~114.
Liu Hanpeng, Du Dongju, Sun Rui. Field test analysis of the settlements of soft soils treated with vacuum drainage preloading in coastal region of Tianjin. Journal of Engineering Geology, 2009, 17

(1): 111 ~ 114.

- [10] 朱建才, 温晓贵, 龚晓南. 真空排水预压加固软基中的孔隙水压力消散规律[J]. 水力学报, 2004, (8): 123 ~ 128.
Zhu Jiancai, Wen Xiaogui, Gong Xiaonan. Dissipation of pore water pressure in soft foundation reinforced by vacuum drainage preloading. Shuili Xuebao, 2004, (8): 123 ~ 128.
- [11] 李时亮. 真空预压加固软土地基作用机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 479 ~ 482.

Li Shiliang. Analysis of action mechanism of treating soft foundation with vacuum preloading. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 479 ~ 482.

- [12] 吴春勇. 真空联合堆载预压软土路基稳定控制与沉降预测, 博士学位论文[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Wu Chunyong. Stability Control and Settlement Forecast of Soft Roadbed Treated with Combined Vacuum-Surcharge Preloading. Changchun: Jilin University, 2007.

第四届地质(岩土)工程光电传感监测国际论坛(4th OSMG-2012)

主要议题

- 分布式监测技术的最新进展
- 分布式光电传感解调技术
- 分布式光电传感网数据采集与无线传输技术
- 分布式传感监测中的温度补偿与异常识别技术
- 岩土体大变形分布式监测技术
- 特种分布式传感光纤(缆)的研发
- 地质与岩土工程中分布式传感网的布设与安装工艺
- 基于分布式监测技术的工程安全监测与诊断系统
- 地质与岩土工程中分布式监测集成技术
- 分布式传感监测技术工程应用实录

会议语言

英文或中文

论文征集

作者应在 2012 年 8 月 1 日前提交一份约 300 字的英文或中文摘要, 并于 2012 年 9 月 1 日前提交英文或中文的论文全文。提交的论文可以是已经发表的, 格式要求请参阅会议网站。

重要日期

论文摘要提交	2012 年 8 月 1 日
会议提前注册	2012 年 8 月 1 日
产品参展注册	2012 年 8 月 1 日
论文全文提交	2012 年 9 月 1 日
会议现场注册	2012 年 10 月 11 日全天和 12 日上午
会议时间	2012 年 10 月 12—13 日

学术委员会

- 主席 F. Ansari 教授
(University of Illinois-Chicago, 美国)
- 副主席 W. R. Habel 博士
(联邦材料研究与测试学院, 德国)
黄安斌教授(国立交通大学, 中国台湾)

组织委员会

- 主席 施斌教授(南京大学, 中国)
- 副主席 K. T. Chang 教授(金乌工学院, 韩国)

联系方式

联系人: 朱鸿鹄博士(南京大学光电传感工程监测中心)

地址: 南京市汉口路 22 号 邮编: 210093

电话: 025-83597888, 83686220 传真: 025-83596220

E-mail: osmg2012@nju.edu.cn, 网站: <http://osmg2012.acei.cn>

会议场址

苏州工业园区独墅湖高教区仁爱路 150 号
南京大学(苏州)高新技术研究院会馆

注意事项

- 由于会议期间正值苏州旅游旺季, 宾馆预定十分紧张, 请参会者务必于 2012 年 8 月 1 日前提交会议回执。
- 会议将设光电传感监测技术与产品展览区, 欢迎相关公司企业和科研单位参展。参展相关信息见网站。
- 本次会议将组织一次会后考察, 初步考察地点为韩国金乌工学院和有关监测现场。具体信息将在网站上公布。