

真空-堆载联合预压加固高速公路软基的研究

吴跃东 赵维炳

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 根据真空-堆载联合预压加固高速公路软基的特点,介绍了某试验段路堤的施工工序,以及各阶段现场观测土体变形的特点.通过观测结果,对采用真空-堆载联合预压加固软基的效果进行分析,并提出理想的加荷计划.

关键词 真空-堆载联合预压 软基加固 加荷计划 高速公路

中图号 TU471.8

在深厚软粘土地基上修筑高路堤的高等级公路,工程上常规使用的方法是采用堆载预压来加固软基,通过堆载预压使地基土强度提高.为了减少工后沉降,堆载高度往往超出路床设计标高很多.一般软弱地基的抗剪强度较低,限制了填土速率,导致填筑需较长时间,待地基强度增大后还须挖除超载部分填上,使得工期较长,造价也不低.真空预压法是利用抽真空来加固软土地基的一种地基加固方法,该方法最早是在 1952 年由瑞典人 W. Kjellmar^[1]提出的,1958 年我国开始从事这方面研究^[2],并在加固机理、施工工艺及理论分析等方面取得了一些重要成果.我们根据高速公路软基加固特点将这一方法引入到高速公路软基加固中,由于该方法在加固机理等方面有别于堆载预压,导致目前尚无完善的施工规范,在加固机理方面也存在许多有待研究的问题.为了进一步探索真空-堆载联合预压加固高速公路软基的机理,更好地指导施工方案制定和施工组织安排,对真空-堆载联合预压加固软基处理技术进行现场试验研究是必要的,该研究不仅可为加固机理分析提供理论依据,同时对高速公路软基采用该方法进行处理也具有指导意义.

1 工程概况

1.1 地质概况

该试验段位于珠江三角洲冲积平原区,地基表层全部是三角洲相淤泥,由于在雨季常发生洪灾,因此在建的高速公路路面设计标高较高,地面以上填土厚度约 5~6 m.原设计方案为土工布加袋装砂井超载预压方法加固地基,由于工期满足不了要求,变更后的加固方案为真空-堆载联合预压加固地基.试验段全长 259 m,面积 14 461 m².

根据钻探及试验结果,试验段地层自上而下依次为:

- ①耕殖土层,厚 0.5~1.5 m,灰黄-灰褐色,由淤泥质土及亚粘土组成,湿、可塑,含少量有机质.
- ②淤泥层,厚 3.0~5.8 m,北薄南厚,灰黑色,粘性好,饱水、流塑,局部夹薄层粉砂.
- ③淤泥质粉土层,厚 3.2~8.1 m,灰-灰黑色,粉土含量占总重的 80%,饱水、松散,含少量贝壳.
- ④淤泥层,在地质勘察报告上未见底,灰黑色,粘性好,饱水、流塑状态,局部夹薄层细砂.

地层主要物理力学性质指标见表 1.

1.2 施工概况

由于地基内存在较厚的粉土层,在真空预压加固区的四周采用淤泥搅拌桩(桩长 11 m,桩径 0.7 m,搭接 0.2 m)作为纵向密封帷幕,以确保形成较大的真空度.

主要施工工序有:场地整平、铺筑砂垫层(厚 70 cm)、打设袋装砂井(长 20 m,直径 7 cm,间距 1.5 m)、淤泥搅拌密封墙施工、真空预压、堆载(吹填砂)和真空-堆载联合预压等.

表 1 土的物理力学性质指标

Table 1 Indexes of physical and mechanical parameters for soil

土的名称	取样深度 /m	含水量 W/%	湿密度 γ (g·m ⁻³)	孔隙比 <i>e</i>	液限 <i>W_L</i>	塑性 指数 <i>I_p</i>	液性 指数 <i>I_L</i>	压缩系数 <i>a_{v1-2}</i> /MPa ⁻¹	固结系数 <i>C_v</i> (cm ² ·s ⁻¹)	无侧限 抗压强度 <i>q_u</i>	无侧限 抗压强度 <i>q'_u</i>	灵敏度 <i>S_r</i>
②淤泥	2.4~2.6	90.2	1.51	2.4	68.8	36	1.59	2.17	8.19×10 ⁻⁴	8.5		
③淤泥质粉土	5.3~5.5	26.1	1.97	0.7	26.0	7	1.06	0.44	6.23×10 ⁻³			
③粉土	8.6~8.8	25.7	1.98	0.7	27.4	8	0.74	0.13	6.51×10 ⁻³			
④淤泥	13.4~13.6	59.4	1.68	1.6	47.4	23	1.53	1.74	2.30×10 ⁻³	6.0	3.7	1.62
④淤泥	18.6~18.8	57.5	1.65	1.6	60.0	29	0.92	1.39	2.39×10 ⁻³	28.2	5.7	4.95
④淤泥	24.2~24.4	64.8	1.62	1.8	64.1	35	1.03	1.45	1.45×10 ⁻³	6.3		
④淤泥	28.6~28.8	61.8	1.65	1.7	60.7	32	1.03	1.13	9.10×10 ⁻⁴	39.9	8.7	4.59

真空-堆载联合预压加固软基工程施工自 1998 年 8 月 19 日开始,淤泥搅拌桩密封到 9 月 8 日完成,现场观测仪器到 9 月 12 日埋设完毕,排水滤管埋设、密封膜铺设及真空系统安装到 9 月 19 日结束,并开始抽真空,9 月 23 日膜下真空度达到 60 kPa,9 月 25 日真空达到 80 kPa,以后一直保持在 80 kPa 左右,11 月 2 日~11 月 12 日吹填第一层填砂(1.2 m),11 月 19 日~11 月 26 日吹填第二层填砂(1.8 m),12 月 2 日~12 月 8 日吹填第三层填砂(1.2 m)到设计标高,填土荷载达 151.4 kPa(包括真空荷载)。从整个施工过程来看,密封膜、膜面及膜周边密封良好,膜下真空度上升正常,并维持稳定,真空预压施工是成功的,后期堆载施工快速、连续,达到了缩短施工工期的目的。

2 真空-堆载联合预压加固软基的特点

真空-堆载联合预压是在真空预压和堆载预压法基础上发展起来的软基加固方法,具有真空预压和堆载预压的双重效果,通过抽真空形成负压,当真空度达 80 kPa 以上,相当于一次性加 4~5 m 高度的填土荷载,缩短了加载时间。对于高速公路采用真空-堆载联合预压加固软基方法,可利用路基填土作堆载,使土体在真空荷载和堆载联合作用下发生固结,强度能提高 2~3 倍。同时,由于真空产生负压,使土体产生向内收缩变形,可以抵消因堆载引起的向外挤出变形,地基不会因填土速率快而出现不稳定性问题,因此,真空-堆载联合预压比堆载预压安全可靠。另外,真空-堆载联合预压加固软基的加固效果影响深度较大,比较适合加固深厚软土层地基,不仅预压效果明显,而且可减少软基的工后沉降。

3 观测项目的选择

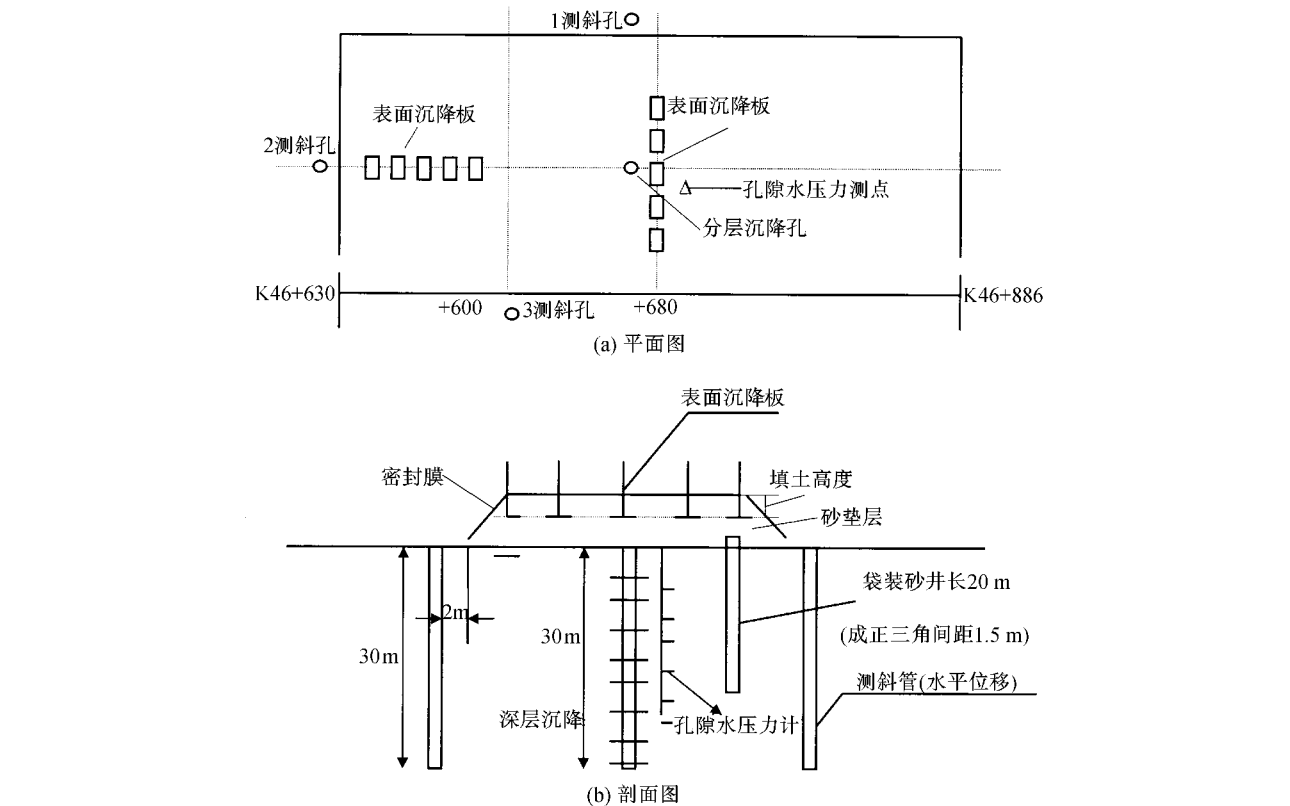
为了真空-堆载联合预压加固软基方法的机理研究,验证地基加固效果,更好地指导施工,在典型断面布置现场观测仪器(仪器埋设如图 1 所示)。(a)真空表:观察真空度的变化规律,以验证密封措施的效果和井阻对真空度的影响。(b)分层沉降孔:观察各土层沉降的变化规律,以了解对地基深层土的加固效果和加固影响深度。(c)测斜管:测量侧向水平位移值,其大小是判别路堤地基稳定与否的控制指标之一。根据水平位移的变化规律,可以了解真空-堆载联合预压各阶段土体的变形特点。(d)孔隙水压力计:根据不同深度孔隙水压力随时间的变化规律,可以了解不同深度土体的固结情况和强度增长趋势。(e)表面沉降板:表面沉降随时间变化规律是高速公路工程上控制施工进度和安排后期施工的最重要指标。

4 观测成果与分析

a. 从图 2 和图 3 上看,抽真空阶段中,1~4 m 段压缩约 190 mm,4~10 m 段压缩约 140 mm,10~20 m 段约压缩 240 mm,20 m 以下压缩约 80~90 mm,说明真空预压的效果是明显的,它完全可以达到堆载预压的效果。另外,影响深度可以达到袋装砂井底部以下约 2~3 m 处,但这种影响在淤泥层中相对较弱。

b. 从图 4 上看,在袋装砂井打设完毕、砂垫层铺设后,测斜管明显向外挤出变形,水平位移量在 -20 mm

左右.抽真空阶段,加固区内有收缩变形,30 d 时测斜管向内水平位移达 300 mm 左右,说明真空-堆载联合预压加固软基可较好避免土体发生剪切破坏.



注 (1) 表面沉降板尺寸 50 cm × 50 cm, 沉降杆用 1/2 水管. (2) 分层沉降孔, 1.5 ~ 30.0 m 深度之间放置 15 只磁环, 各磁环等间距. (3) 测斜孔深 23 ~ 30 m. (4) 孔隙水压力测点, 沿测点深度方向 1 ~ 25 m 埋设 8 只.

图 1 观测仪器埋设示意图

Fig.1 Layout of observation instruments

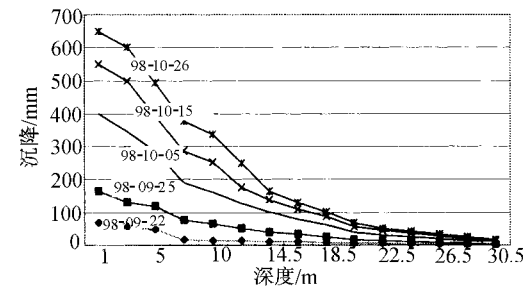


图 2 分层沉降随时间变化曲线

Fig.2 Variation of subsidence in different layers with time

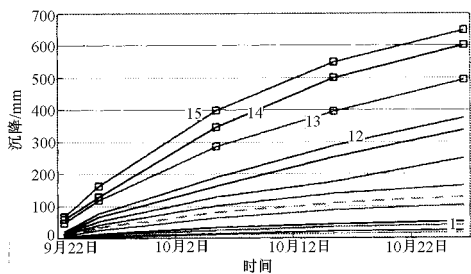


图 3 各分层累计沉降随时间变化曲线

Fig.3 Variation of total subsidence in different layers with time

c. 从图 5 上看, 埋设在淤泥层内的 3 m、5 m、10 m、15 m、20 m 孔压测点, 抽真空阶段, 孔压力总体变化趋势呈上升, 它与真空度从 0 上升至约 80 kPa 的时间比较吻合, 随后有一个相对持续稳定过程, 持续过程沿埋设深度逐步延长, 之后孔压力缓慢下降, 其中 15 m、20 m 测点由于受抽真空土体向内收缩的影响, 存在典型的曼德尔效应, 孔压来不及消散, 造成孔压上升. 随着时间的延续, 孔压也呈下降趋势. 25 m 测点, 由于抽真空对其影响较小变化不大, 7 m 测点, 埋设在淤泥质粉土层内, 由于该土层透气、渗水性能较好, 孔压一直呈下降趋势. 1 m 测点, 距砂垫层较近, 在真空度上升(从 0 上升至约 80 kPa)阶段是负压上升过程, 最大负压接近 20

kPa,随后缓慢下降.

d. 从图 6 上看,在加固区边缘(1,5,9,10 板)总沉降量相对较小,分别为 1 282 mm,1 367 mm,1 234 mm,1 217 mm.而加固区内(2,3,4,6,7,8 板)总沉降量相对较大,分别为 1 542 mm,1 677 mm,1 480 mm,1 669 mm,1 574 mm,1 421 mm.在真空度上升阶段,日均沉降量约 30 mm,最大日沉降量为 53 mm,随后沉降速率逐渐变缓.说明真空预压阶段,土体的固结变化速率是一个渐变收敛过程.

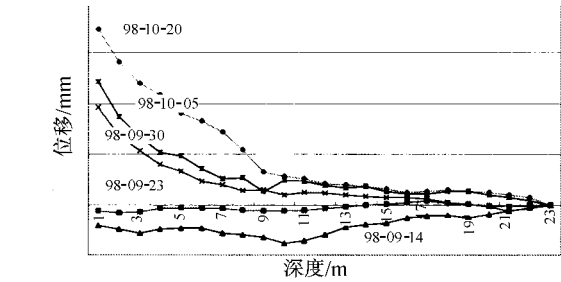


图 4 水平位移随深度变化曲线

Fig.4 Variation of horizontal displacement with depth

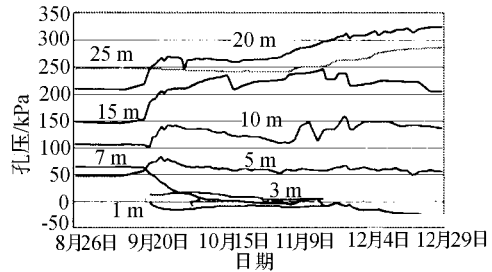


图 5 孔隙水压力变化曲线

Fig.5 Variation of pore pressure

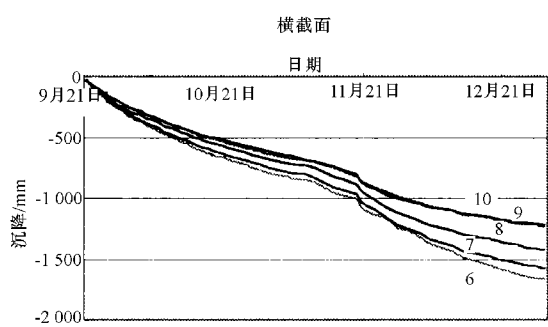
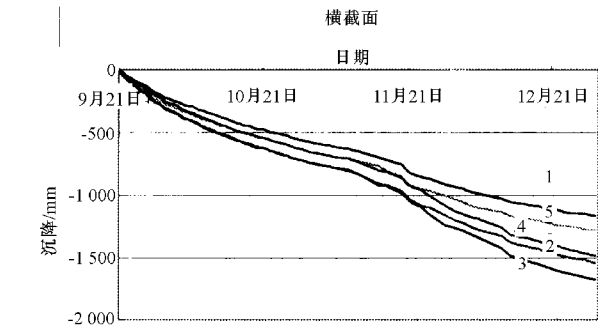


图 6 表面沉降随时间变化曲线

Fig.6 Variation of surface subsidence with time

5 路堤筑的稳定分析

经计算各级荷载时的整体稳定的安全系数见表 2.根据实践和理论计算,在真空-堆载联合预压作用下,36 d 内完成 4.2 m 的路堤填筑,其地基稳定是偏于安全的.我们可以针对本工程的特点,设计理想的加荷计划见表 3.

表 2 各级荷载的稳定安全系数

Table 2 Stability safety factor for each load

填土荷载	填土总荷载 /m	时间	安全系数 K
第一级(1.2 m)	1.2	真空预压后第 37 d	4.3
第二级(1.8 m)	3.0	真空预压后第 54 d	2.2
第三级(1.2 m)	4.2	真空预压后第 67 d	1.8

表 3 理想加荷计划

Table 3 Ideal loading plan

填土荷载	填土总荷载 /m	时间	间隔 /d	安全系数
第一级(2.0 m)	2.0	真空预压后第 30 d	10	3.8
第二级(1.5 m)	3.5	真空预压后第 45 d	10	2.0
第三级(1.0 m)	4.5	真空预压后第 60 d	10	1.5

6 结 论

a. 采用真空-堆载联合预压加固软基,效果明显,能够在较短的时间内使土体固结,土体强度得到较大提高,并且在较短的时间内填土加荷至设计标高.沉降速率大大突破规范中的规定(10 mm/d),试验段观测期间测得最大日沉降量 53 mm/d.

- b. 侧向位移量和位移速率与荷载大小有明显的相关性 ,随着荷载的增加 ,位移量和位移速率增大 ,加载停止 ,位移量和位移速率显著减小 .与堆载预压不同的是随着加荷的停止 ,水平位移不是向外位移 ,因为抽真空不仅使土体固结 ,而且使土体产生向内收缩变形 ,因此对路堤稳定非常有利 .
- c. 类似本工程地质、路堤条件 ,采用真空-堆载联合预压加固软基加载期间 ,可参考本文的理想加荷计划 .
- d. 真空-堆载联合预压处理高速公路软基 ,技术可靠 ,经济合理 ,在深厚软基高速公路建设中推广应用 ,必将产生较显著的社会、经济效益 .

参 考 文 献

1 Kjellman W. Consolidation of clay by mean of atmosperence on soil stabilization. MIT ,1952 ,132 ~ 137
2 侯钊 ,陈环 ,钱征等 .天津软土地基 .天津 :天津科学技术出版社 ,1978.56 ~ 221

Study on Strengthening of Soft Foundations of Express Highway by Vacuum-Surcharge Preloading

Wu Yuedong Zhao Weibin

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ . ,Nanjing 210098)

Abstract An introduction is given to the working procedure of a certain section of a highway and the varions stages of field observation of the soil body on the basis of strengthening of soft foundation by vacuum-surcharge preloading. Through observation the effects of strengthening of the soft foundation by vacuum-surcharge preloading are analysed and ideal loading plan is put forward.

Key words vacuum-surcharge preloading ,soft foundation strengthening ,field observation ,loading plan ,express highway

《水利水电科技进展》征订启事

《水利水电科技进展》(双月刊 ,国内统一刊号 CN32 - 1439/TV ,国际标准刊号 ISSN1006 - 7647).主要刊登与水利、水电、水运、海洋、土木、环境等学科有关的文章 ,为水利水电工程建设及运行管理提供有借鉴意义的新颖实用技术和科技信息 .主要栏目有方针与政策、专题综述、研究与开发、规划与勘测、设计与施工、工程管理、经济交流、国外动态等 ,适合广大工程技术人员、科学研究人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读 .

本刊由河海大学主办 ,全国各地邮局均可订阅 ,邮发代号 28 - 244 ,2000 年全年订价 30.00 元 ,也可直接汇款至编辑部订阅(另加包装邮寄费 6.00 元).编辑部地址 :南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部 ,邮政编码 210098.汇款时务请注明“订水利水电科技进展”.联系电话 (025)8713777 转 50335.