

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.077

排水板和砂井联合堆载预压加固海相软土地基的工作性状的现场试验

蒋建清¹, 曹国辉¹, 刘热强²

(1. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 广东省建筑工程机械施工有限公司, 广东 广州 510500)

摘要: 针对场地内夹杂岸堤、塘埂和人行道路网的深厚海相软土地基处理, 提出塑料排水板和袋装砂井联合堆载预压加固方法, 并通过现场试验研究该类地基在路堤填筑及堆载预压过程中的地表及深层沉降特性、超孔隙水压力消散机制和地基水平位移规律等工作性状。结果表明, 采用该方法处理深厚海相软土地基具有良好的加固效果, 地基沉降大部分在填筑期和预压期间发生, 有效降低了场地的工后沉降和施工工期, 可为沿海深厚复杂海相软土地基加固处理提供参考; 塑料排水板和袋装砂井联合堆载预压处理地基的沉降-时间曲线呈多级式发展, 袋装砂井处理部位的沉降量小于塑料排水板处; 软基上部土体的排水效果明显优于中、下部土体, 排水板处理区域的超孔隙水压力大于砂井处理区域; 软基顶部土体向堆载区域移动, 地表3 m以下的软土层被挤向堆载处理区域外。

关键词: 软土地基; 工作机制; 堆载预压; 砂井; 塑料排水板; 现场试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增2-0551-08

Field test on behaviours of marine soft soil foundation treated with plastic drainage plate and sand column combined with surcharge preloading

JIANG Jian-qing¹, CAO Guo-hui¹, LIU Re-qiang²

(1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, China;

2. Guangdong Provincial Architectural Engineering Machinery Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510500, China)

Abstract: In order to solve the technical difficulties to reinforce the deep marine soft soil foundation that including walkway network, the reinforcing technology by plastic drainage plate and sand column combined with surcharge preloading is proposed to reinforce the large scale complex deep marine soft soil foundation. The mechanical behaviors of the reinforced soft soil foundation during embankment filling and preloading are studied including the surface settlement and deep settlement characteristics, the excess pore water pressure dissipation mechanism, and the horizontal displacement law by field tests. The results show that the construction method used to reinforce the deep marine soft soil foundation has achieved good reinforcing effects. The settlement of the deep marine soft soil foundation accomplished mostly during the period of filling and preloading, which effectively reduce the post-construction settlement and construction period. The results provide an important reference for the reinforcement of the complex deep marine soft soil foundation. The settlement versus time curve of the marine soft soil foundation treated with plastic drainage plate and sand column combined with surcharge preloading is multistage development model. The settlement at the site reinforced by sand column is less than that at the site reinforced by plastic drainage plate. Meanwhile, the excess pore water pressure at the site reinforced by plastic drainage plate is greater than that at the site treated with sand column. The drainage effect of the upper soft soil is significantly superior to the lower. The top soil of the soft foundation under surcharge preloading would move to the treated area; while the soft soil below the surface 3 m would be pushed outside the region treated with plastic drainage plate and sand column.

Keywords: soft soil foundation; mechanism; preloading; sand column; plastic drainage plate; field test

1 引言

我国沿海地区广泛分布由淤泥沉积物及少量腐

殖质土所组成的海相软弱场地, 这种软土具有高含水率、高孔隙比、高压缩性, 且具有低抗剪强度、低渗透性、低承载力等特点^[1-4], 其地基承载力和

收稿日期: 2015-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(No.51308198); 湖南省教育厅资助科研项目(No.14B034); 湖南省科技计划项目(No.2014SK3180)。

第一作者简介: 蒋建清, 男, 1979年生, 博士, 副教授, 从事岩土工程与结构工程研究。E-mail: lh201314@163.com

沉降一般均不能满足设计和相关规范要求。如何快速、有效、经济地对沿海深厚海相软基进行固结处理成为了工程界和学术界所关注的热点和难点。

软基加固处理方法主要分成两大类：一类是复合软土地基处理法，如粉喷桩、旋喷桩及碎石桩等。另一类是排水预压固结法，包括堆载预压法、真空预压法及真空-堆载联合预压法等^[5-10]。这些软土地基处理方法存在不同的适用性：(1) 真空-堆载联合预压法及真空预压法处理高填方土坡的稳定问题中能取得良好的加固效果，但不适于大面积的软基处理工程。(2) 复合软土地基处理法适用于施工工期较短的工程，但造价高，且在施工过程中如果桩的质量控制不好，对加固效果影响较大，当软土层厚度较大时的影响更大。

塑料排水板联合堆载预压法与其他几种软基处理方法相比具有其独特的优势，施工方法简便，造价低廉，在软基处理中加固效果显著，适用于大面积的软基处理工程中，并在国内外的软基处理工程中得到广泛应用^[11-15]。对于一些复杂软土地基，如场地内含有岸堤、塘埂和人行道路网等，因塑料排水板在其较硬区域施工不便，工程实践中应考虑其他排水通道。两种固结排水通道联合加固大面积海相软基的参考资料非常匮乏。

本次结合某快速轨道交通线的软基处理工程实践，开展塑料排水板和袋装砂井联合堆载预压加固大面积深厚海相软土地基的现场试验，研究其沉降特性、超孔隙水压力消散机制、软基水平位移规律等工作性状，为沿海同类深厚海相软土地基加固处理提供技术支持。

2 试验段概况

2.1 试验段工程地质和地貌

试验段位于某城际快速轨道交通线车辆段，属于冲积平原地貌区，地面高程为 2~8 m。车辆段场地内分布大面积鱼塘，其平均水深约 2.0 m，并夹杂有岸堤、塘埂和人行道路网，施工范围内有高压

线横穿。车辆段段址内需进行地基处理的海相软土面积约有 50 万 m²。

试验段范围的上覆地层主要为第四系全新统人工填筑土、全新统冲洪积层、更新统冲洪积层和第四系残积层，下伏基岩为震旦系大别山组混合片麻岩。试验段地基各软弱层岩性自上而下分述如下：层①素填土：褐红、褐黄色、杂色，松散~稍密状态，主要由粉质黏土组成，偶夹砖块及碎石，局部夹杂填土或填砂，层厚 0.6~7.0 m，埋深 0~2.8 m，标贯击数平均值 $N_{63.5}$ 为 9 击；层②粉质黏土：灰黄、褐黄色，软塑状态，干强度一般，成分以黏粒为主，粉粒次之，层厚 0.5~4.9 m，一般埋深 0~5.7 m，标贯击数平均值 $N_{63.5}$ 为 4.6 击/30 cm；层③淤泥质黏土：场地范围内广泛分布，灰黑、黑色，软塑~流塑状，局部有机质含量达 11.4%，层厚 0.4~9.2 m，埋深 0~14.2 m，标贯击数平均值 $N_{63.5}$ 为 4.0 击；层④淤泥质砂：灰黑、褐灰色，主要由淤泥、淤泥质土与粉砂、细砂组成，呈混合、互层、夹层状产出，场地内较连续分布于 RDK0+365~1+259 m 和 CDK0+353~1+080 m，层厚 1.1~13.2 m，埋深 0~13.4 m，标贯击数平均值 $N_{63.5}$ 为 4.6 击。场地主要软弱土层物理力学参数见表 1。

2.2 试验段软土地基固结排水通道设计

2.2.1 竖向排水通道

结合场地实际情况，场地内大面积鱼塘区域软土的竖向排水体采用塑料排水板，在岸堤、塘埂、人行道路、填土较厚区域及高压线位置等处的竖向排水体采用袋装砂井，其中在高压线两侧 15 m 宽范围内设置竖向砂井排水带。砂井直径为 100 mm，中心间距为 1.6 m；塑料排水板间距为 1.2 m，呈正三角形平面布置。砂井和塑料排水板均在场地表面铺设完砂垫层后打设，塑料排水板及砂井穿透所处理的软土层并深入下卧细砂层不小于 1.0 m，上端高出砂垫层顶面 20 cm。塑料排水板及砂井的平面布置如图 1 所示。

表 1 软弱土层土体物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical parameters of soft soils

土层名称	含水率/%	重度/(kN/m ³)	孔隙比	液性指数	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa	竖向渗透系数 K_v /(10 ⁻⁷ cm/s)	水平渗透系数 K_h /(10 ⁻⁷ m/s)	竖向排水固结系数 C_v /(10 ⁻³ cm ² /s)	径向排水固结系数 C_h /(10 ⁻³ cm ² /s)	直接快剪强度指标		固结快剪强度指标	
											c /kPa	φ /°	c /kPa	φ /°
①填土	30.5	17.7	0.965	0.8	0.413	4.69								
②粉质黏土	47.1	17.1	1.322	1.2	0.808	2.84					12.1	9.9	14.4	16.5
③淤泥质土	56.2	16.2	1.864	1.9	1.286	2.50	2.521	1.758	0.59	0.535	9.78	6.2	12.2	11.5
④淤泥质砂	53.9	16.2	1.617	2.3	1.257	2.60	9.340	6.029	1.49	1.195	8.71	6.3	11.2	14.1

2.2.2 水平排水通道

用潜水泵抽排鱼塘水,等待深厚淤泥表面形成表壳层后铺设一层经编复合土工布,并填设砂垫层至标高 4.0 m,使之基本与现状塘埂和路面持平。在砂垫层中设置纵、横向间隔 60 m 的排水盲沟,盲沟由渗滤土工布包裹级配碎石构成。在预压区边缘设置集水沟,由潜水泵抽排水。砂垫层渗透系数宜大于 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 。软基处理断面见图 1(b)。

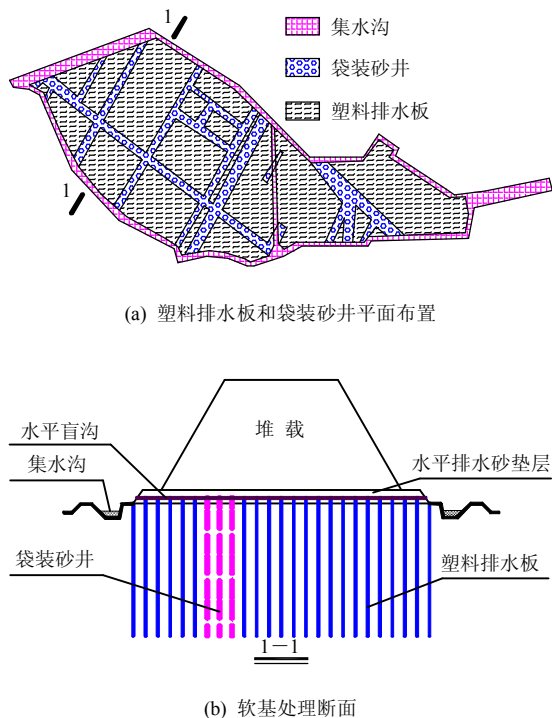


图 1 软基固结排水通道布置示意图

Fig.1 Sketch of consolidation drainage channel layout of soft foundation

2.3 试验段堆载预压方案简介

塑料排水板和袋装砂井联合堆载预压法通过预先在软基中不同部位施打塑料排水板或袋装砂井,然后在软基上堆载,增加土体中的附加应力,对软基进行预压。若采用吹填砂进行堆载预压,砂量需求巨大,港口离施工现场有一定距离,动力损耗较大,难以满足文明施工及环保要求。因此,最终选择堆土堆载方案对软基进行预压。

为缩短施工工期,现场堆载采用小区域试验区和大面积施工区堆载并行的施工决策,大面积堆载施工是在小面积试验区每级满载后约 30 d 进行,试验区堆载和大面积堆载并行方案如图 2 所示。小面积试验区的监测数据可以作为大面积堆载区域施工的指导,若试验区出现异常,30 d 时间也足够用于调整规划大面积堆载施工方案,施工风险小。

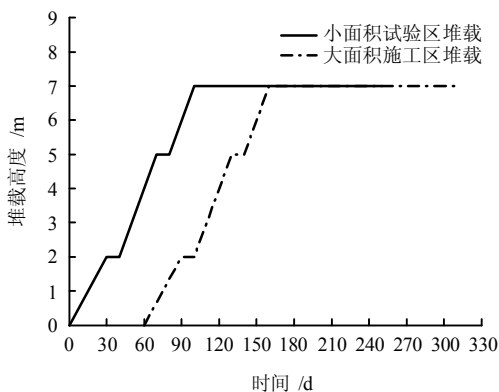


图 2 试验区和大面积区域堆载高度-时间曲线

Fig.2 Curves of loading height and time in exploratory test area and large scale regional

3 试验段现场测试方案

3.1 监测系统

为监测软土地基填筑期和预压期地基变形发展情况、控制地基的稳定性、检验地基的加固和预压效果、指导设计和施工,在试验段施工现场设置了原位监测系统。监测系统主要由浅层沉降、深层沉降、孔隙水压力、场地周边位移等构成。各项监测的基本要求如下。

(1) 浅层沉降监测

浅层沉降板用于观测地基总沉降量。浅层沉降板应在插板前埋设在砂垫层底部,以监测原地表以下总沉降量随时间的变化规律。

(2) 深层沉降监测

分层沉降环用于观测不同深度土层的压缩量。每一个深层沉降观测点要求在淤泥层上、中、下部各布置一个沉降环,在下卧稳定土层中布置一个沉降环。

(3) 孔隙水压力监测

孔隙水压力计用于监测淤泥层的孔隙水压力大小、消散速度和地基固结情况。每个孔隙水压力监测点布置 3 个传感器,分别位于淤泥顶面下方 1.0 m、淤泥层中部及淤泥层底上方 1.0 m,各深度位置的传感器分孔埋设。

(4) 场地周边位移监测

测斜管用于监测场地周边岸堤和围堰的水平位移。测斜管间距约 70 m,测斜管底部埋入地基加固期间不变形的土层中 3 m 以上。并沿现有高压线塔周围布设沉降监测点。

(5) 观测频率

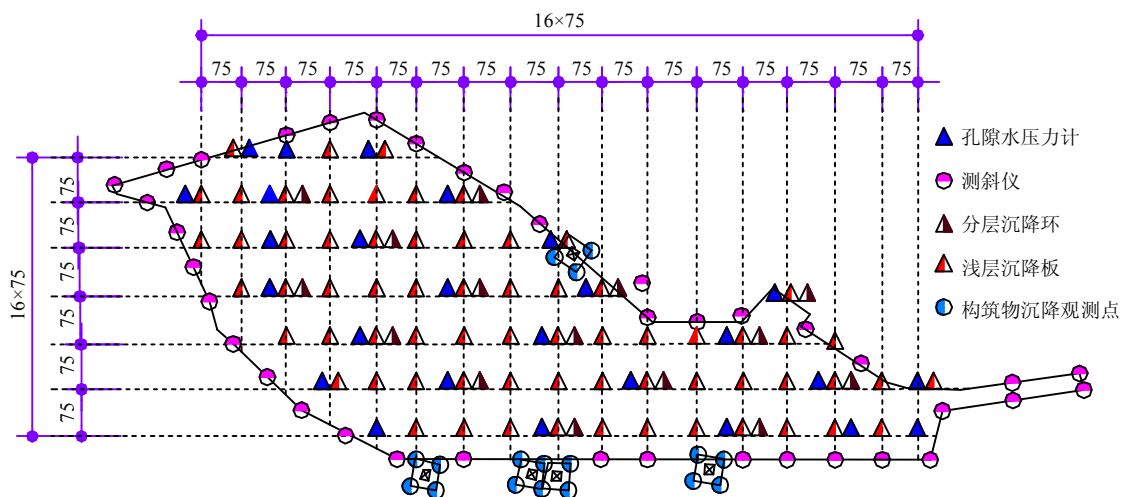
监测设备埋设完成时,初读一次。未填筑之前,

每 2~3 d 测读一次。堆载期间,即第一次填筑开始至填筑结束时,每天观测一次。预压期间,每 3 d 观测一次,随沉降量的减小,观测间隔时间可适当延长,直至沉降稳定,预压达到要求。

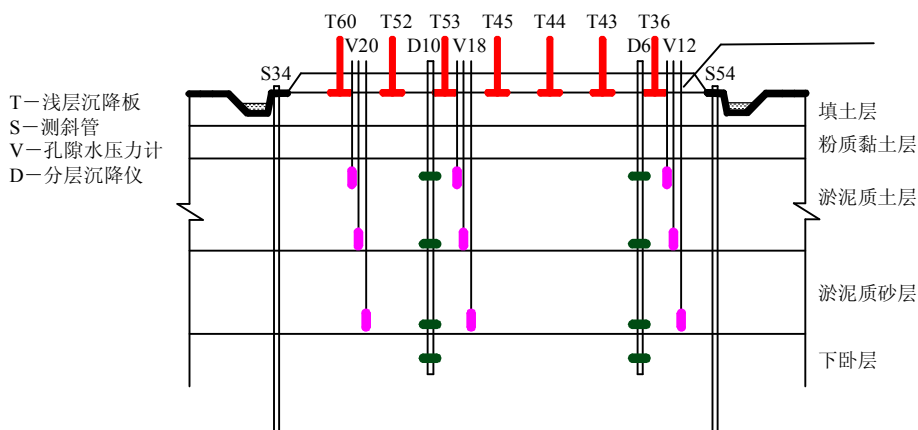
3.2 测试元器件布置

各监测点平面布置如图 3(a)所示,浅层沉降测点纵、横向布置间距均约为 75 m,其总数不少于

70 个测点;深层沉降监测共设 15 个测点;孔隙水压力监测共设 26 个测点。某断面的测试元器件布置方案见图 3(b),断面上共布设测斜管 2 根,浅层沉降板 6 个,孔隙水压力计 3 组共 9 个,分层沉降环两组共 8 个。观测仪器露出地面的部分设置保护装置,填方施工期间采取严格保护措施,保证观测数据的连续性。



(a) 原位监测点平面图(单位: m)



(b) 某断面监测元件布置

图 3 现场试验系统及元器件布置

Fig.3 Sketches of field test systems and test components layout

4 现场试验结果与讨论

4.1 软基沉降分析

图 4(a)为浅层沉降测点 T52、T53 的堆载-时间-沉降实测曲线。从图中可以看出,在塑料排水板和砂井打设后的堆载初期,沉降曲线平缓、接近线性变化,软土地基的固结沉降量很小,说明在软基中施打塑料排水板和砂井只是增加土体的竖向排水通

道,若不施加适量的堆载,则达不到加速软基固结的目的;随着堆土高度的不断增加,软土地基的固结沉降量增幅较大,沉降曲线呈多级式发展,在每级加载初期沉降曲线会变陡,随着时间延长,曲线逐渐近似抛物线方式变缓直到下次加载,且随着加载次数的增加,加载初期沉降曲线变陡的趋势越来越小;在堆载完成后的满载预压期,沉降曲线逐渐变缓,最后沉降量趋于稳定。

图 4(b)为浅层沉降测点 T52、T53 的沉降速率与堆载时间关系曲线。由图可见, 软基浅层沉降速率的极值是在每级堆载开始施加时出现, 宜增加每级堆载开始时刻软基的沉降变化趋势监控频率, 满载预压约 90 d, 软基沉降速率接近为 0。

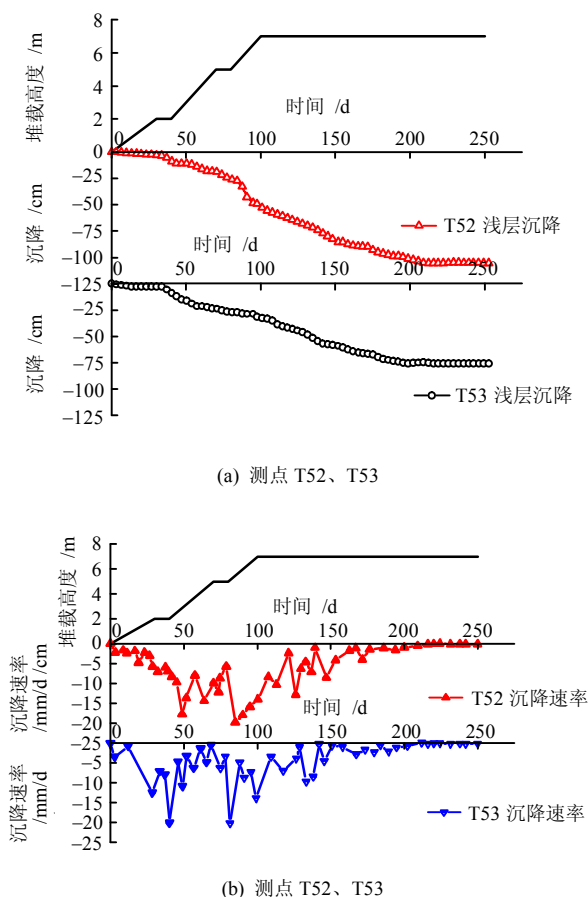


图 4 软基浅层堆载-时间-沉降曲线

Fig.4 Measured curves about shallow settlement of soft soil foundation

图 5(a)为袋装砂井 (T45 测点) 和塑料排水板 (T44 测点) 两种不同排水通道处置处的软基浅层沉降对比图。由图可见, 两种排水通道下浅层沉降均随荷载的增加而增大; 相同堆载条件下袋装砂井处理处的软基浅层沉降要迟于塑料排水板处, 塑料排水板处理部位的最大沉降为 98.24 cm, 袋装砂井处理部位的最大沉降为 88.4 cm, 表明袋装砂井处理部位的浅层总沉降量小于塑料排水板处理地基的浅层总沉降; 排水通道的间距是导致两种排水通道处置软基差异沉降的重要因素 (塑料排水板设计间距为 1.2 m, 袋装砂井设计间距为 1.6 m), 若要减小软基的差异沉降, 排水板和袋装砂井的合理间距有待进一步研究; 从第三级堆载结束后经过 150 d 的排水

固结, 塑料排水板和袋装砂井处理区地表沉降分别增加 68.6 % 和 54.9 %, 表明软土地基在塑料排水板和袋装砂井联合处理下得到了有效固结。图 5(b)为袋装砂井 (T45 测点) 和塑料排水板 (T44 测点) 两种不同排水通道处置处的软基浅层沉降速率对比图。由图可见, 两种处置部位软基浅层沉降速率规律基本一致, 都是在每一级载堆后存在一个较大速率时段, 之后沉降速率又逐渐缓和, 到后期沉降速率趋于一致; 在堆载预压的前期, 塑料排水板处理地基沉降速率变化较为明显, 而袋装砂井处理地基则在堆载高度大于 2 m 后才出现较大变化。

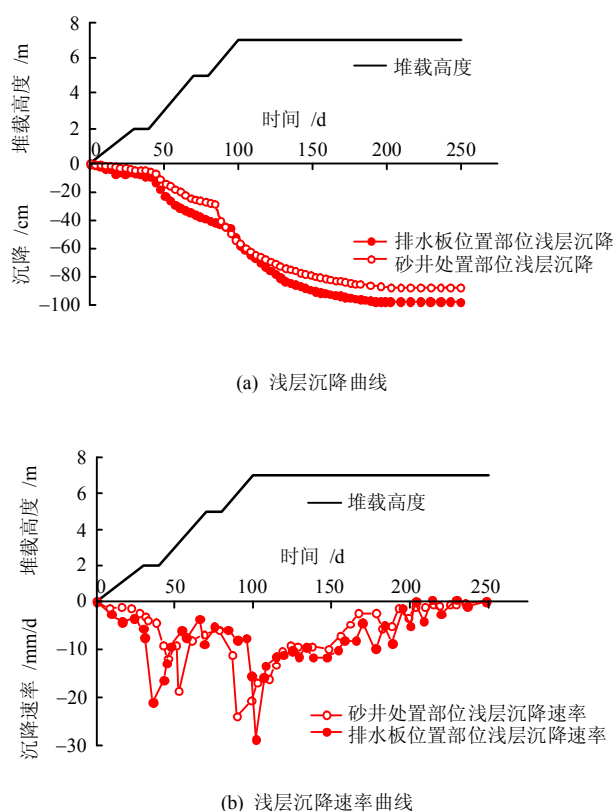


图 5 两种排水通道处理部位的浅层沉降对比

Fig.5 Comparison of shallow settlement of soft soil site treated by two kinds of drainage channel

图 6 为深层沉降测点 D10 的堆载-时间-沉降实测曲线。从图中可见, 软基深层沉降随荷载的增加而增加, 深层沉降量小于浅层沉降, 深层沉降最大值出现在淤泥层顶部的监测点上, 最大沉降量为 49.65 cm, 约为浅层沉降量的 1/2; 深层沉降值随沉降环埋设的深度增加而依次减小, 软弱土层上部的固结沉降量大于下部软弱土层; 下卧层沉降最大值为 16.67 cm, 下卧层得到充分压缩, 应重视下卧层对软基沉降的影响, 确保下卧层的排水固结效果。

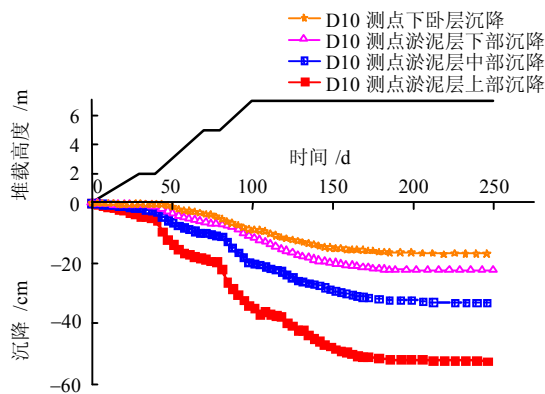


图6 测点D10的堆载-时间-深层沉降曲线
Fig.6 Preloading-time-deep settlement curves of measuring point D10

图7为排水板和砂井两种排水通道处理软基的深层沉降对比。从图中可以看出,不同排水通道部位,软基深层沉降均随堆载高度增加而增大;固结时间相同的条件下,塑料排水板部位的深层沉降量大于袋装砂井处理软基;在相同堆载条件下,袋装砂井处理软基的深层沉降要迟于塑料排水板处理部位;塑料排水板处理软基的深层沉降速率大于砂井处理部位的深层沉降速率。

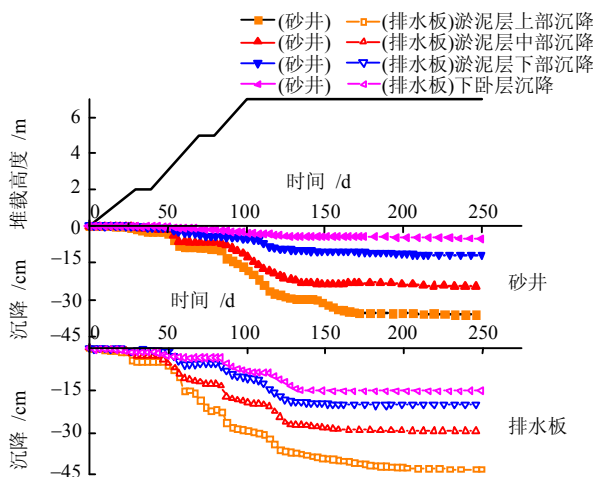


图7 两种排水通道处理软基的深层沉降对比
Fig.7 Comparison of deep settlement of soft soil site treated by two kinds of drainage channel

4.2 软基超孔隙水压力分析

图8为塑料排水板和袋装砂井两种排水通道不同深度处软土层的超孔隙水压力随堆载和时间的变化曲线。从图中可以看出,在每一级荷载施加过程中土体内部的孔隙水压力迅速增加,在每级荷载施加后的静置时段及第三级堆载施加后的预压固结期,土体内的超孔隙水压力逐渐消散,最后超孔隙水压接近0,土体有效应力明显增加,说明塑料排

水板和袋装砂井联合固结排水在这类复杂地基处理中的效果很好;在堆载前期软基的超孔隙水压力消散慢,堆载高度超过5m后孔压消散速度加快,进一步说明堆载较小时加速软基固结效果不明显;淤泥层不同深度处的超孔压变化规律接近,但淤泥层上部的超孔隙水压力曲线起伏最小、下部次之、中部最大,且淤泥层上部的超孔隙水压力最小、下部次之、中部最大,说明在堆载和预压固结过程中,淤泥层上部土体的排水效果明显优于中、下部土体,这主要是由于淤泥层上部土体靠近地表水平排水砂垫层,堆载施加后产生的超孔压能快速消散,而排水板和砂井均穿透淤泥层进入下卧透水砂层,使淤泥层下部土体的超孔隙水压力也能较快消散,淤泥层中部土体的排水路径最长,故其孔隙水压力消散最慢;排水板处理区域的超孔隙水压力大于砂井处理区域,其超孔隙水压力的消散期要比砂井部位稍长。

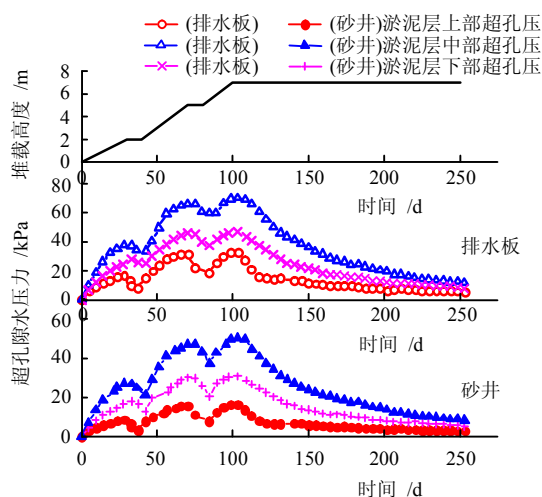
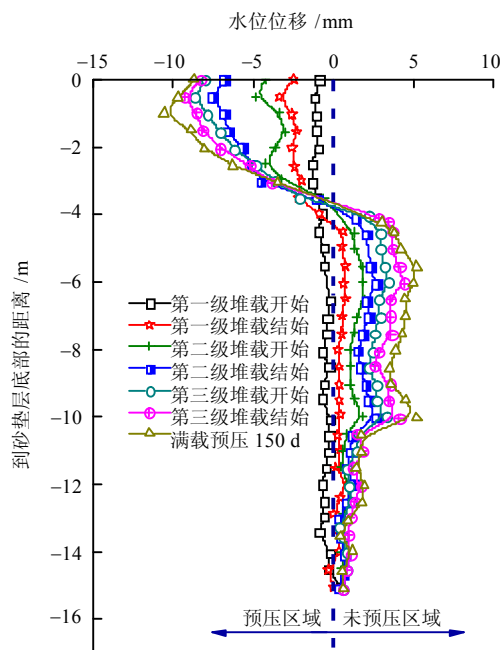


图8 两种排水通道超孔隙水压力随时间和堆载变化曲线
Fig.8 Curves of excess pore water pressure with time and preloading

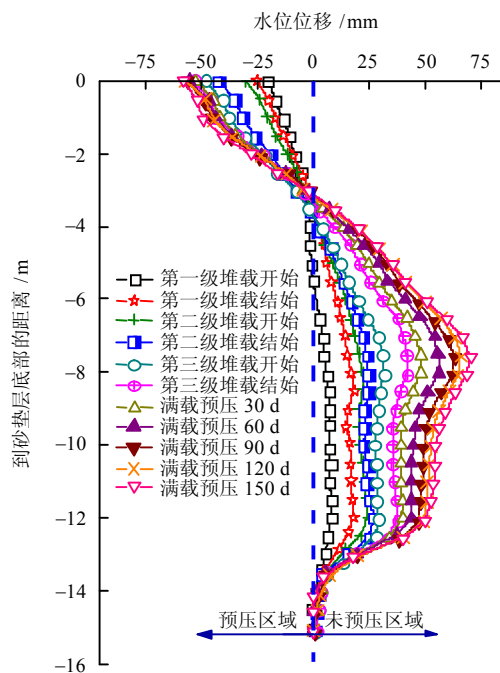
4.3 软基地周边侧移分析

图9为S34和S54测斜测点的水平位移变化曲线。S54测点位于原坚固河堤旁,河堤作为主要施工干道,其位移变化受车辆行走影响较明显,浅层影响较大、深层变化较小,测斜管顶部最大水平位移为11mm,说明堆载预压对既有河堤结构的安全运营影响小。S34测点位于软基施工场地边界,周边均为软土土层,由图9(b)可知,测斜管顶部位移为负值,说明顶层土体向排水固结区域移动,且随时间、荷载的增加呈增大趋势,施工中设置施工围堰限制顶层土体的水平位移;深层水平位移亦随加载和时间的增大而增大,最大水平位移为70.6mm,发生在地下8m处,最大变形速率为

1.4 mm/d<5 mm/d, 满足设计要求; 地表 3 m 以下的软土层水平变形曲线呈抛物线型, 土体被挤向堆载处理区域外; 测斜管底部水平位移接近为 0, 说明测斜管埋设深度合理, 满足项目监测要求; 场地堆载完成后水平位移增长速度减缓, 60 d 后水平位移趋于稳定。



(a) 测点 54 号



(b) 测点 34 号

图 9 软基加固区边缘水平位移变化曲线
Fig.9 Curves of horizontal displacements at reinforced area edge

5 结 论

(1) 采用塑料排水板和袋装砂井联合堆载预压方法, 对夹杂较硬区域的深厚海相软土地基进行固结处理, 深厚海相软土地基具有良好的快速固结效果, 大部分沉降在施工期基本完成, 有效控制了场地的工后沉降。

(2) 塑料排水板和袋装砂井联合堆载预压处理地基的沉降-时间曲线呈多级式发展, 在堆载初期接近线性变化, 随堆载增加, 在每级加载初期沉降曲线会变陡, 之后曲线近似抛物线方式变缓直到下次加载, 最后沉降趋于稳定。

(3) 在堆载预压的前期, 塑料排水板处理地基沉降速率变化较为明显, 而袋装砂井处理地基则在堆载高度大于 2 m 后才出现较大变化, 软基浅层沉降速率的极值在每级堆载开始时出现; 在相同堆载条件下, 袋装砂井处理处的软基沉降要迟于塑料排水板处理地基, 软基深层沉降量小于浅层沉降, 深层沉降值随沉降埋设的深度增加而依次减小, 软弱土层中上部的固结沉降量大于下部。

(4) 随堆载增加, 土体内部的孔隙水压力迅速升高, 堆载高度超过 5 m 后孔压消散速度加快, 在预压固结期超孔隙水压力逐渐消散至 0, 土体有效应力明显增加; 淤泥层上部土体的排水效果明显优于中、下部土体; 排水板处理区域的超孔隙水压力大于砂井处理区域, 其超孔隙水压力的消散期要比砂井部位稍长。

(5) 堆载完成 60 d 后场地水平位移增长趋于稳定。堆载预压对既有河堤结构的安全运营影响小, 软基顶部土体向排水固结区域移动, 施工中设置施工围堰可限制顶层土体的水平位移。地表 3 m 以下的软土层被挤向堆载处理区域外, 测斜管底部水平位移接近为 0。

参 考 文 献

- [1] XUE Jian-feng, CHEN Jian-feng, LIU Jun-xiu, et al. Instability of a geogrid reinforced soil wall on thick soft Shanghai clay with prefabricated vertical drains: A case study[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(4): 302—311.
- [2] 柴跃进. 某铁路车站软土地基的沉降变形特性[J]. *铁道科学与工程学报*, 2013, 10(4): 95—99.
CHA Yue-jin. Settlement characteristics of soft soil in the railway station[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2013, 10(4): 95—99.

- [3] 周龙翔, 童华炜, 王梦恕, 等. 广州软土的工程特性及地基处理方法的对比研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(1): 17—20.
ZHOU Long-xiang, TONG Hua-wei, WANG Meng-shu, et al. Study on the engineering properties and the suitable treatment methods of guangzhou soft soil[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2006, 30(1): 17—20.
- [4] BHURIA N R, SACHAN A. Shear strength and constant rate of strain consolidation behaviour of cement-treated slurry-consolidated soft soil[J]. **Current Science**, 2014, 106(7): 972—979.
- [5] 邓礼久, 金亮星, 罗嘉金. 塑料排水板堆载预压法处理软基的固结效果[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(3): 68—72.
DENG Li-jiu, JIN Liang-xing, LUO Jia-jin. Consolidation effect of reinforcing soft soil foundation by preloading accumulating load method with plastic drainage plate[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2013, 10(3): 68—72.
- [6] 王祥, 李小和, 周顺华. 真空联合堆载预压处理高速铁路软土地基效果检验[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(12): 45—49.
WANG Xiang, LI Xiao-he, ZHOU Shun-hua. Effect of treating soft soil foundation of high-speed railway with vacuum-mound preloading method[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2008, 25(12): 45—49.
- [7] 王祥. 粉喷桩复合地基工后沉降的现场研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 362—367.
WANG Xiang. Field tests on post-construction settlement of DJMP composite foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(3): 362—367.
- [8] 曹永华, 李卫, 刘天韵. 浅层超软土地基真空预压加固技术[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 234—238.
CAO Yong-hua, LI Wei, LIU Tian-yun. Surface-layer improvement technology for ultra soft soil by vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Supp.1): 234—238.
- [9] 冯诚, 冯申辉. 深厚软土地区浅基坑事故的预防与处理实例[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 711—714.
FENG Chen, FENG Shen-hui. Prevention and treatment of shallow pit accidents in deep and soft soil areas[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(Supp.): 711—714.
- [10] ZHANG Tong-wei, YUE Xi-bing, DENG Yong-feng, et al. Curing time effect on behavior of cement treated marine clay[J]. **Construction and Building Materials**, 2014, 28(3): 51—57.
- [11] 应舒, 陈平山. 真空预压法中塑料排水板弯曲对固结的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3633—3640.
YING Shu, CHEN Ping-shan. Effects of bended plastic drainage plates on consolidation caused by vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.2): 3633—3640.
- [12] 刘金龙, 栾茂田, 汪东林, 等. 土工织物与塑料排水板联合处理软基的效果分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1726—1730.
LIU Han-long, LUAN Mao-tian, WANG Dong-lin, et al. Effect of disposing soft foundation using geotextile and plastic drainage plate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1726—1730.
- [13] 沈才华, 宋少华. 关于塑料排水板的真空联合堆载预压软基处理的位移反分析研究[J]. 公路交通科技, 2003, 20(6): 20—24.
SHEN Cai-hua, SONG Shao-hua. Study on the displacement back-analysis of the vacuum-heaped load combining pre-compression[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2003, 20(6): 20—24.
- [14] DENG Yue-bao, LIU Gan-bin, LU Meng-meng, et al. Consolidation behavior of soft deposits considering the variation of prefabricated vertical drain discharge capacity[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 30(8): 310—316.
- [15] SAOWAPAKPIBOON J, BERGADO D T, YOUWAI S, et al. Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains(PVDs) with and without vacuum preloading[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2010, 28(1): 1—11.