

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.015

# 堆载预压和真空堆载联合预压的比较

张世民,何瑜琳

(浙江大学城市学院,杭州 310011)

**摘要:**堆载预压和真空联合堆载预压都是工程中处理软土地基的常用方法。通过舟山富通电缆项目地基处理工程项目中堆载预压和真空联合堆载预压施工的比较研究,得出真空联合堆载预压比堆载预压具有更高的施工成效效率,更好的沉降稳定性和沉降性,以及水平位移量更小,使周围软弱边界的变形处于较为稳定的状态。

**关键词:**堆载预压;真空堆载联合预压;分层沉降;地表沉降;深层土体水平位移

**中图分类号:**TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0074-05

## The comparative study of surcharge preloading and vacuum surcharge preloading

Zhang Shimin, He Yulin

(Zhejiang University City College, Hangzhou 310011, P. R. China)

**Abstract:** Surcharge preloading and vacuum surcharge preloading are common methods to deal with soft soil foundation in engineering. Through the comparative study of surcharge preloading and vacuum surcharge preloading (the foundation treatment project of Zhoushan Futong cable), it can be seen that the efficiency of vacuum surcharge preloading has higher stability and better settlement, horizontal displacement and smaller deformation of the surrounding. It can make weak boundary has a stable state.

**Key words:** surcharge preloading; vacuum surcharge preloading; layer settling; surface subsidence; horizontal displacement of deep soil

排水固结法(包括:堆载预压与真空堆载联合预压)是通过在天然地基中设置竖向排水体(砂井或者塑料排水板)和水平向排水体,利用建筑物自身重量分级逐渐加载,或在建筑物建造前先对地基进行加载预压。根据地基土排水固结的特性,使土体提前完成固结沉降、增加地基强度的一种软土地基加固方法<sup>[1]</sup>。

堆载预压法最早用于处理美国加利福尼亚州的海湾公路并且取得了成功,1953年中国首次将砂井堆载预压应用于加固船台地基,1959年应用于宁波铁路路堤试验段和舟山、宁波冷库工程,然后推广到了很多实际工程,都获得了很好的效果。堆载预压

使地基在短时间内急剧下降,所以会使得边桩位移管、测斜管、地下水位管等所埋仪器随土层严重变形甚至破坏,所测数据对固结度分析计算的真实性和准确性会有比较大的影响<sup>[2]</sup>。真空联合堆载预压法兼顾真空预压和堆载预压的优势,但是在真空度方面的要求是极其严格的,真空度要维持在650 mm Hg左右,相当于87 kPa的真空压力,但是很多的实际工程中,并不能完全地达到这个要求,一般能维持在80 kPa的真空压力左右。本文以富通海洋工程电缆项目地基处理工程为数据依托,以工期、堆载引起的有效应力、土体分层沉降和地表沉降固结沉降角度,对比分析两种施工工法的差别,为同类工程提

收稿日期:2016-10-14

作者简介:张世民(1974-),男,教授,主要从事岩土工程研究,(E-mail)zhangsm@zucc.edu.cn。

供可借鉴的理论及工程建议。

## 1 工程概况

富通电缆项目地基处理工程位于舟山港综合保税海洋产业集聚区,新港十一道以北,场地南部与大成十一道相接。本工程地基处理由中交天津港湾工程设计院有限公司设计。

场地由人工吹填粉细砂和回填宕渣形成,原泥面以下淤泥质土为主,属于高压缩性土,物理力学性质差,要求进行地基处理后使用。场地地基处理合格后拟作为厂房的地坪,地基处理后要求浅基础地基承载力特征值不小于 100 kPa,场地上部设计使用荷载 50 kPa,工后 3 a 内地基沉降不大于 80 mm,场地交地标高 3.0 m(国家 85 高程,下同)。

本工程包括 2012-10 号和 2012-11 号两个地块,两地块相连。2012-10 地块红线面积 249 036.79 m<sup>2</sup>,2012-11 号地块红线面积 67 157.42 m<sup>2</sup>,场区红线总面积 316 194.21 m<sup>2</sup>,两个地块场区地基处理加固面积共 294 113.04 m<sup>2</sup>,其中,一期实施区域面积 127 378.10 m<sup>2</sup>。

地基处理区域共分为 19 个区,其中一期实施的区域包括 Z-1、Z-2、Z-3、Z-4、Z-5、D-1 共 6 个分区,单个分区面积不大于 30 000 m<sup>2</sup>。

在 Z-1、Z-2、Z-3、Z-4、Z-5 这 5 个区域进行真空联合堆载预压,在 D-1 进行堆载预压。以此来比较两方法的优缺点与先进性。本文把 Z-1(真空联合堆载预压)和 D-1(堆载预压)两区域进行比较。

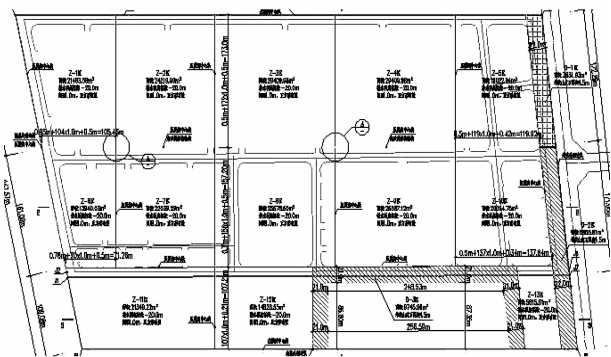


图 1 总平面布置图

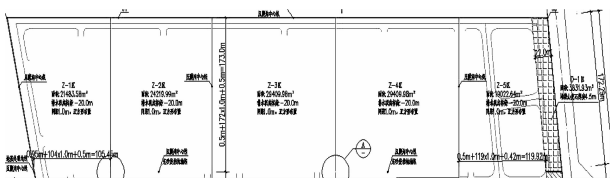


图 2 Z-1 和 D-1 区分布

## 2 堆载预压与真空联合堆载预压的加固机理比较

两者加固土层的微观原理不一样:真空预压产生的是负压,形成负的超静孔隙水压力,但是堆载预压却是形成正的孔隙水压力。

1)堆载预压的加固机理:堆载预压法的加固机理实质上就是使地基土产生排水固结。在土力学中,土体在某一压力作用下,孔隙水被逐渐排出,孔隙体积随之减少,有效应力逐渐提高,土体的密实度和强度随时间逐渐增长的过程称为土的固结过程。所以,地基土层的固结过程就是超静孔隙水压力不断消散和有效应力不断增大的过程,同时土体被逐渐挤压密实,抗剪强度增大。如图 3,堆载预压加固后单元土体应力摩尔圆的大小和位置都改变了,土体的剪应力和抗剪强度都有增加,土体容易发生失稳剪切破坏,所以须分级加载以控制堆载的速率。加载过程从 A 到 A',卸载后被加固土体的强度沿超固结包络线 A'退到 B 点,强度增加了  $\Delta\tau$ <sup>[3]</sup>。

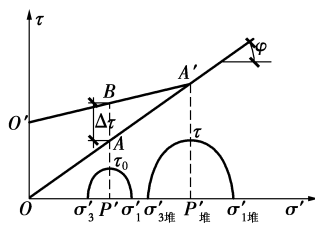


图 3 单位土体应力摩尔圆

真空堆载联合预压的加固机理:真空预压联合堆载预压使土体固结的直接原因是:排出土体中的水和气,降低土体含水量,土骨架受到有效应力的挤密作用使得土颗粒重新排列组合,改善其受力特性和受力能力。真空联合堆载预压处理软粘土层时发展的微观机理可分为 3 个步骤:

1)真空联合堆载初始阶段:该阶段实质上是真空预压阶段,仅抽真空系统开始发挥效用。砂垫层中的空气首先被抽走,形成真空区,紧接着是与砂垫层紧密相连的待处理土层表面层中的连通孔道中的水气因为砂垫层中产生的压差而被“压出”,并逐渐在该土层中形成真空渗流场,该渗流场流动介质即为以水为主,水气结合的真空流体介质。这种流体介质在压差“吸力”作用下打破土体中孔隙水的静止状态,在孔隙间形成网络通道,并发生网络渗流。这种渗流场作用因为土体中竖向塑料排水板的布置与

深部形成竖直连通通道而逐渐向土体深层延伸。该阶段主要是孔隙中自由水受力排出,土体受到的有效应力增大。

2)真空联合堆载预压稳定阶段:此阶段实质上是真空预压的后期阶段,此时整个代加固地基已经形成了一个巨大的真空渗流场,大连通道与小连通通道之间再次形成压差,这种压差随着时间慢慢消散,而小孔道中的水也随之排出,随着孔隙水的排出,使得土层中水位下降,土层中自重应力也随之发生改变,由于上部土层自重的增加,下部土层中形成超静孔压,两者同时作用使得土颗粒发生错位、填充、重新排列。真空预压范围只局限于地下水位以上和地表层以下这之间的土层,随着地下水位的下降,这个预压范围逐渐增大,预压效果越来越好。至于地下水位以下的土体的固结并不是因为真空预压作用的结果,而是因为地下水位下降,使得原来处于浮容重状态的土颗粒恢复到自身容重从而对原有土骨架增加了一个自重应力而使得土骨架被压缩,土颗粒重新排列,并趋向紧密,这个过程实际上是增加了土的有效应力,使得土在自重作用下产生固结。

3)真空与堆载联合作用阶段:联合作用阶段即是真空预压和堆载预压在对土层作用发生正向叠加,真空预压加速地下孔隙水的外排,地下水位随之不断下降,使得土层孔隙比不断增大,土的有效应力不断增大,堆载进一步加大土颗粒的有效应力,土层在附加荷载和自重应力作用下加速土颗粒的挤密和重排。该阶段土层固结明显,地基沉降量较大,土层结构强度急剧增大,软土地基加固效果开始显现<sup>[4]</sup>。

4)真空预压阶段总应力不变,有效应力随着负的超静孔隙水压力增大而增大,有效应力随着超静孔隙水压力的消散随之减小。堆载预压时,有效应力增长,孔隙水压力减小,当孔隙水压力消散到最低值时有效应力达到最大值,与此同时总应力也跟着增加,这个增加量主要来自于外加荷载。

5)由于真空预压时总应力不变,所以在预压时不需要考虑软粘土的剪切破坏导致土体失稳,但是堆载预压时由于总应力的增大,土体中产生的剪应力相应增大,所以要时刻注意剪应力增加的速度要小于土体抗剪强度增加的速度,否则就会导致土体因剪切变形而失稳。

### 3 真空联合堆载预压和堆载预压施工工艺比较研究

#### 3.1 真空联合堆载预压施工

铺设工作垫层:正式抽真空 20 d 后,铺设一层  $300 \text{ g/m}^2$  土工布,土工布在工厂缝合搭接宽度不小于 50 mm,现场缝合搭接宽度不小于 200 mm。

吹填粉细砂:在工作垫层上吹填 600 mm 厚粉细砂,吹填前应根据现场情况在地基处理边界上修建临时充砂袋挡埝。粉细砂技术指标要求:其粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量应大于 50%,粘粒含量应控制在 10% 以内。吹填粉细砂应分层均匀吹填,合理安排施工工艺。注意回填施工期间采取有效防护措施保护密封膜,维持膜下真空度不小于 85 kPa。

堆载山皮石:吹填粉细砂排水碾压后,在粉细砂上部分层回填 1 700 mm 厚山皮石。山皮石容重不小于  $18 \text{ kN/m}^3$ ,块石粒径不宜大于 0.3 m,山皮石堆载料碎石含量不小于 60%。回填过程中应分层碾压密实,压实度大于 90%。

卸载:真空预压抽气时间不少于 120 d,真空联合堆载预压满载不少于 70 d,并达到卸荷标准后停泵卸载,真空预压结束<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 堆载预压施工

1)堆载预压方案排水通道设计及打设塑料排水板前场地整理措施同真空预压方案要求相同。

2)在中粗砂垫层以上分层堆载山皮石,堆载料采用山皮石,山皮石容重不小于  $18 \text{ kN/m}^3$ ,块石粒径不宜大于 0.3 m,山皮石堆载料碎石含量不小于 60%。总堆载厚度为 4.5 m,回填过程中应分层碾压密实,地基处理后卸载厚度为 2.4 m。

### 4 现场监测试验结果的比较研究

#### 4.1 土体分层沉降

从 Z-1 沉降-时间变化曲线中可以看出,自抽真空开始,不同深度的磁环都随土体而开始下沉,在抽真空初期(2015 年 9 月 28 日—2015 年 11 月 27 日),下沉速率较大。随着抽真空施工的进行(2015 年 11 月 27 日—2016 年 1 月 26 日),各个磁环的沉降速率逐渐减小,从变化曲线中可以看出曲线趋于缓和。由分层沉降沿深度的比较过程中可以发现,在排水板深度范围内的各深度土层沉降较均匀,即各层土体均有相应压缩变形。在相同的时间段,浅处的沉降大于深处土体的沉降,与理论吻合。在堆

载施加之后,浅层的磁环的沉降速率有所增加,深层土体沉降变化较平缓。

从 D-1 分层沉降-时间变化曲线中可以看出,堆载预压区从 2015 年 9 月 28 日—2015 年 11 月 27 日曲线呈水平状态,沉降速率缓慢,从 2015 年 11 月 27 日—2016 年 1 月 26 日堆载开始之后,曲线呈陡峭状态,沉降速率迅速增大,沉降量增加。

堆载预压区和真空联合堆载预压区在堆载达到满载后期,沉降曲线都趋于平缓,沉降量趋于稳定。

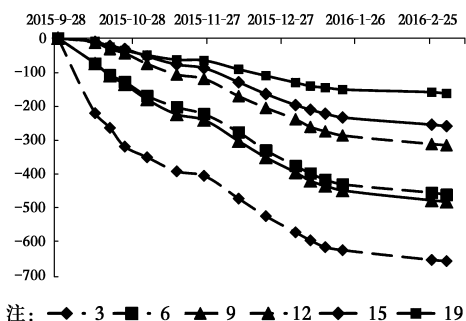


图 4 Z-1 区土体分层沉降-时间变化曲线

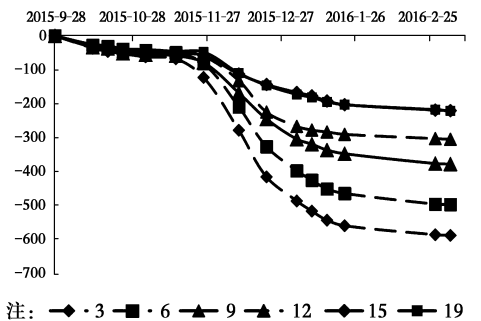


图 5 D-1 区土体分层沉降-时间变化曲线

从 2 种方法的曲线中可以看出,在前期真空联合堆载预压处理的土层沉降-时间曲线比堆载预压处理的土层沉降-时间曲线陡峭,即真空联合堆载预压处理的土层沉降速度大于堆载预压处理的土层速度,说明真空联合堆载预压比堆载预压有更高的施工成效效率。

#### 4.2 地表沉降观测(铺膜后部分)

从堆载预压法施工的 D-1 区中,自 2015 年 9 月 22 日—2015 年 10 月 22 日,沉降-时间变化曲线趋于平缓,斜率较小,这是因为处于堆载预压前期准备阶段。在 2015 年 11 月 21 日—2016 年 1 月 20 日前期堆载过程中,沉降-时间变化曲线斜率急剧增大,曲线陡峭,沉降速率明显增大。在 2016 年 1 月 20 日—2016 年 3 月 3 日加载后期至结束阶段,沉降-变化时间曲线趋于平缓。

真空联合堆载预压 Z-1 区,自 2015 年 9 月 22 日—2016 年 1 月 20 日在整个真空联合堆载预压实施阶段,沉降-时间变化曲线一直呈现陡峭状,沉降速率基本维持在一定数值附近。自 2016 年 1 月 20 日—2016 年 3 月 3 日施工后期及结束阶段,曲线才呈现逐渐平缓。

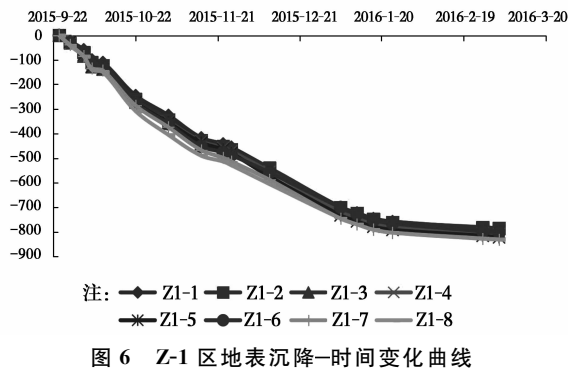


图 6 Z-1 区地表沉降-时间变化曲线

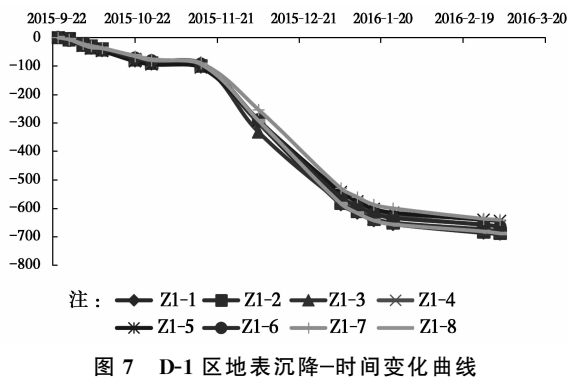


图 7 D-1 区地表沉降-时间变化曲线

截止 2016 年 3 月 3 日,真空联合堆载预压区抽真空计时已达 120 d,实测平均日沉降量小于 1.5 mm。堆载预压区实测平均日沉降量小于 1.5 mm。地基沉降比较均匀,真空联合堆载预压效果明显。

#### 4.3 深层土体水平位移监测

深层土体水平位移(CX1 和 CX7)中,累计最大水平位移是七号测斜孔 CX7(D-1 区)为 448.75 mm,累计最大值发生位置在地表处。从各深层土体位移变量随时间变化曲线图来看,水平位移累计量随着抽真空施工的进行而逐渐增大,沿深度方向逐渐减小。

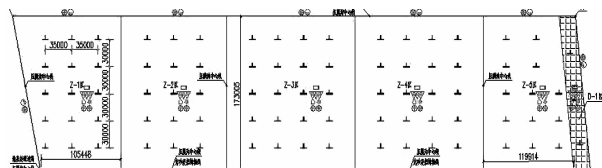
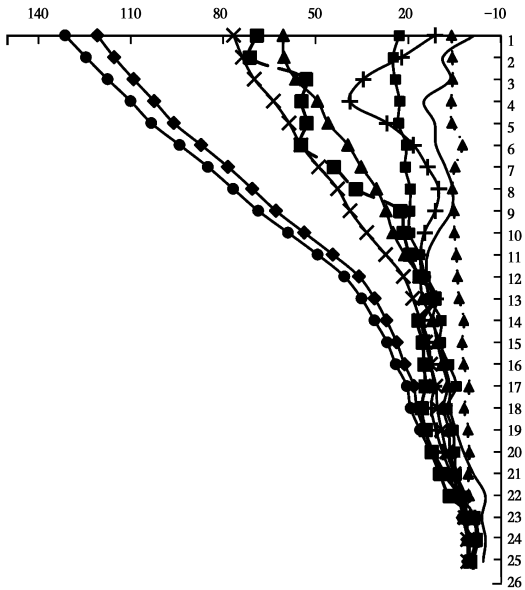


图 8 测斜孔布置(测斜仪)

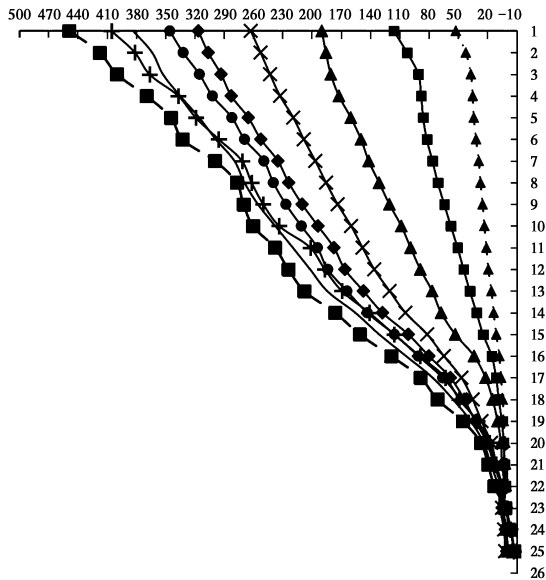
在抽真空施工的初期,水平位移发展速率较大,随着施工的进行其变化速率减缓。从变化曲线图中

可以看出,抽真空期间的水平位移变化主要集中在20米范围以内,下部土体的水平位移变化较小。



注: -▲- 2015年9月28日 -■- 2015年10月6日 -▲- 2015年10月16日  
-×- 2015年10月28日 -◆- 2015年11月12日 -●- 2015年11月26日  
-—- 2015年12月18日 -+ - 2016年1月5日 -■- 2016年3月3日

图9 CX1测斜一号孔水平位移-时间变化曲线



注: -▲- 2015年9月28日 -■- 2015年10月6日 -▲- 2015年10月16日  
-×- 2015年10月28日 -◆- 2015年11月12日 -●- 2015年11月26日  
-—- 2015年12月18日 -+ - 2016年1月5日 -■- 2016年3月3日

图10 CX7测斜一号孔水平位移-时间变化曲线

堆载施工开始之后,由于测斜一号孔CX1(Z-1区)测斜管接高,堆载的土体对其向场外挤压,12 m范围内变化明显。同样由于堆载的影响,测斜孔在部分深度范围内的水平位移转向区域外发展。原因分析是在堆载后,在土体的一定深度,当真空形成的向心作用小于由于填土荷载在这一深度引起的水平附加应力时,土体则发生向外的水平位移<sup>[6]</sup>。

在堆载满载的后期,土体水平位移变化量逐渐减小而趋于稳定,真空堆载联合堆载预压可使土体水平位移量更小。

## 5 结语

通过2种不同预压方法的工程实例的比较分析,以工期、堆载引起的有效应力、土体分层沉降和地表沉降固结沉降角度,得出真空联合堆载预压比堆载预压具有更高的施工成效效率,更好的沉降稳定性和沉降性,以及水平位移量更小,使周围软弱边界的变形处于较为稳定的状态,为合理选择预压方法提供了有益经验和借鉴作用。但由于软土地基处理的隐蔽性,对软土地基的处理应建立科学的监测方法,进行信息化施工,以保证施工的质量和安

## 参考文献:

- [1] 魏新江. 地基处理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007.
- [2] 章丹峰, 邓浩, 杨彬. 堆载预压法加固软基效果评价与测试分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(8): 1399-1402.
- [3] 地基处理手册(第二版)编写委员会. 地基处理手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [4] 周永辉. 真空联合堆载预压法施工技术的应用与革新[J]. 土工基础, 2011, 25(3): 40-41.
- [5] 吴桂芬. 真空-堆载联合预压加固软基效果的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [6] 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.

(编辑 郭飞)