



# 对《真空预压加固软土地基技术规程》 (JTS 147—2009) 一些问题的探讨

付长宏<sup>1</sup>, 蒋华忠<sup>2</sup>, 郑利涛<sup>1</sup>

(1. 天津市海岸带工程有限公司, 天津 300842; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 《真空预压加固软土地基技术规程》(JTS 147—2009) 中对真空及联合堆载预压时何时堆载, 滤管的布置、通水量、形式、沉降计算、检测及卸载标准等要求比较含糊。根据以往设计经验, 对堆载时间、滤管的布置、通水量、形式进行计算分析; 对沉降计算中的系数、层厚与有关规范进行比较并提出建议; 对于检测及卸载标准, 提出应根据检测数据确定卸载时间。

**关键词:** 真空(联合堆载)预压; 堆载; 滤管; 沉降计算; 检测; 卸载标准

中图分类号: U 655.54\*4.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0178-04

## Issues concerning *Technical Specification for Vacuum Preloading Technique to Improve Soft Soils*

FU Chang-hong<sup>1</sup>, JIANG Hua-zhong<sup>2</sup>, ZHENG Li-tao<sup>1</sup>

(1. Tianjin Coastal Zone Engineering Co., Ltd., Tianjin 300842, China;

2. CCCC Water Transportation Consultant Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Stipulations in *Technical Specification for Vacuum Preloading Technique to Improve Soft Soils* (JTS 147—2009) concerning the time of heaped load of vacuum combined surcharge preloading, the layout, flow capacity and type of the filter tube, settlement calculation, as well as the standard of detection and unloading are relatively vague. Based on previous experience in the design and comparing with relevant specifications, we carry out the computational analysis about all the questions above and propose recommendations. It is suggested to determine the time of unloading based on the test data.

**Key words:** vacuum combined surcharge preloading; heaped load; filter tube; settlement calculation; detection; standard of unloading

《真空预压加固软土地基技术规程》(JTS 147—2009)(简称“规程”)是我国关于用真空预压方法进行软土地基加固的第一本规程,填补了用真空预压法加固软黏土领域的规范空白,使软土地基用真空预压法加固有了一个可执行的范本,给工程设计与施工提供了一个可循的样本,统一了许多做法,为我国大规模地在沿海围海造陆工程、港口工程等建设节约了时间和投资,该规程的发布具有很大的经济和社会效益。

### 1 膜上堆载时间规定

“规程”4.1.5条规定膜上堆载应在真空预压满载10 d后进行;第5.4.2条规定试抽气4~10 d,未发现问题可进入正规的真空预压或真空堆载联合预压阶段。结合这2条规定,可以认为真空预压至少要在试抽气4~10 d后进行,真空联合堆载预压应在此基础上10 d后进行。笔者认为这10 d的规定有待商榷,例如:

1) 刚吹填的软土含水率较高,基本在85%左

收稿日期: 2013-04-17

作者简介: 付长宏(1939—),男,教授级高工,主要从事港工地基处理和道堆设计研究。

右,压缩性强,力学性质差,目前常采用直排式真空预压进行处理,然而真空预压10 d后吹填软土强度有可能仍然不能满足加载要求;

2)有些地区软土含水率相对较低,为40%~60%,力学性质相对较好,具有一定强度,但仍需进行加固处理,此时试抽气后无问题时膜上加载是否还需要10 d后进行,能否和真空预压同时进行?“规程”未给出相关的规定和说明。

笔者认为膜上堆载设计方案应根据地基的整体稳定计算结论给出。关于整体稳定计算,规程要求按公式 $\gamma_0 M_{sd} \leq \frac{1}{\gamma_R} M_{Rk}$ 计算,此公式同文献[1],式中: $\gamma_0$ 为重要性系数,按建筑物的重要性等级取1.1~1.0; $\gamma_R$ 为抗力分项系数,当强度指标为固结快剪或十字板剪时分别取1.3~1.5、1.1~1.3。根据文献[2-3]规定,对于三级建筑物重要性系数取值为0.9;文献[4]认为地基处理时与永久荷重时的安全系数应分别对待,前者可取1.1,后者可取1.2;综合以上文献规定,笔者认为目前规程的规定进行膜上堆载整体稳定验算要求偏严格,因为处理的对象是地基(非建筑物),是临时性工程(一般工期约180 d),膜上堆载整体稳定验算时抗力系数可适当降低要求,因此,笔者认为当采用直剪快剪不考虑固结时,安全系数可取1.1,若考虑固结可取1.2。整体圆弧滑动计算相对复杂,往往采用费兰纽斯公式<sup>[5]</sup>进行简化计算,即根据软土的快剪凝聚力 $c$ 估算堆土的高度 $H=5.52c/\gamma$ ,式中, $H$ 为堆土的极限高度(m); $c$ 为由快剪法测得的软土的凝聚力(kPa); $\gamma$ 为填土重度( $\text{kN}/\text{m}^3$ )。实际的堆土高度应在极限高度的基础上除以安全系数,安全系数规定同上。

基于上述讨论,笔者认为对于以上2种情况规程第5.4.2条是必须的,第4.1.5条是不需要的。

## 2 真空设备的布置方法

“规程”第4.1.2条规定真空预压加固范围较大时,应分区加固,分区面积宜为20 000~40 000  $\text{m}^2$ ,第4.5.2条要求抽真空设备宜均匀布置在加固区四周,必要时也可适量布置在加固区中部,每台设备的控制抽气面积宜为900~1 100  $\text{m}^2$ 。目前抽真空

设备常采用以下2种布置方式:1)沿加固区四周布置;2)按设备能力(每台设备控制面积1 000  $\text{m}^2$ 左右)均匀布置。如按前者布置抽真空设备,并假定分区面积为40 000  $\text{m}^2$ 时,中心点到边的最小距离为100 m(图1);而1 000  $\text{m}^2$ 布置一台抽真空设备时,泵到边的最长距离仅为15.81 m(图2),笔者通过在天津临港工业区一系列的试验和工程实践后认为抽真空设备按1 000  $\text{m}^2$ 一台均匀布置更为合理,因为从软土中被真空预压抽出的水在排水滤管中的行走距离大大缩短了,能量消耗更小,真空预压所需要时间更短。

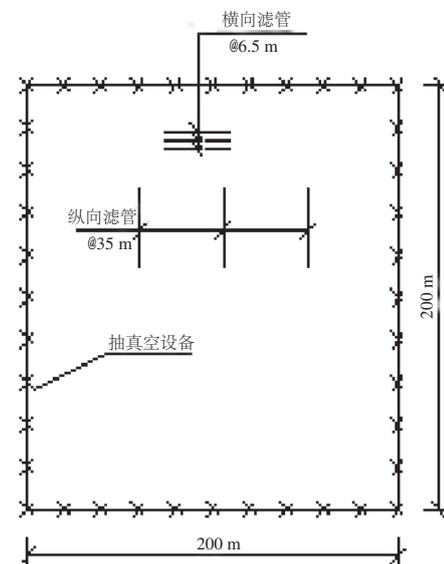


图1 40 000  $\text{m}^2$ 真空设备布置

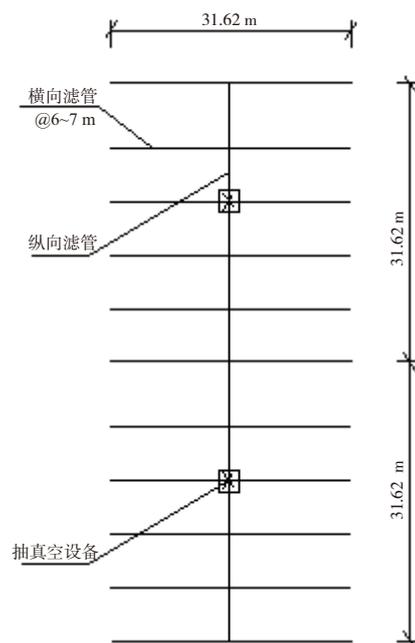


图2 1 000  $\text{m}^2$ 真空设备布置

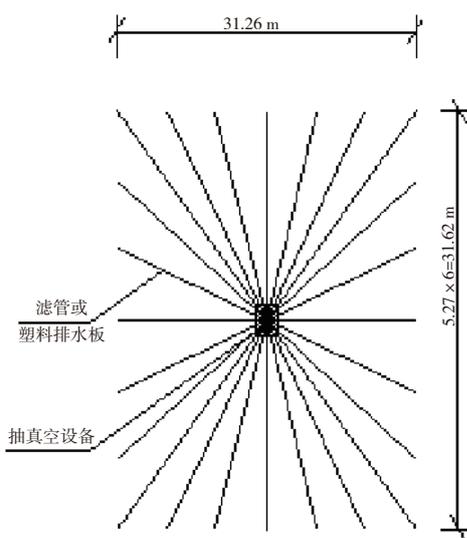


图3 滤管布置

### 3 滤管布置

“规程”第4.3.2条规定排水砂垫层中应设置纵横向滤管（间距分别为30~40 m和6~7 m），但未提出滤管直径和对其强度有何要求，纵横滤管的布置原则、主次关系、联接要求等也未有明确要求（一般均按图1, 2布置）实践过程中易造成混乱，有的项目滤管直径为63 mm或更大，也有的项目选用滤管直径仅为25 mm，且纵横管的联接多用十字、丁字及L形联接接头，施工费时、费材料。笔者认为滤管的选型和布置应根据通水量要求进行专门的设计，举若干计算实例进行说明，

“规程”第4.1.6(2)规定，真空联合堆载预压地基沉降速率不大于30 mm/d，则当按1 000 m<sup>2</sup>布置一台抽真空设备时，滤管内的水流量（最大）计算如下：

1) 当有砂垫层时，且按1 000 m<sup>2</sup>布置一台抽真空设备（抽真空设备布置在块中间如图2所示）：横向滤管内的通水量为： $6.5 \text{ m} \times 31.62/2 \times 0.03 = 3.083 \text{ m}^3/\text{d} = 35.68 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，如横向滤管的通水量均流入纵向滤管，则纵向滤管的通水量为： $6.5 \times 4 \times 31.62/2 \times 0.03 = 12.33 \text{ m}^3/\text{d} = 142.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，以上通水量是在真空预压荷载85 kPa时（若有堆载则需加堆载荷重），前者可选用C型塑料排水板，其通水量 $\geq 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ （350 kPa侧压力时）；纵向滤管可选用2根整体式塑料排水板SPD-C型，其通水

量为 $70 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。在这种情况下，完全可用塑料排水板替代滤管。另外，排水板相接十分方便：减少了管与塑料排水板相接而增加的造价，克服了原操作影响效率、联接铁丝易扎破真空膜、表面不平整等缺点。

选用排水板作为滤管时，通常布置成放射形的（图3所示，每根滤管的通水量为 $5.27 \times 31.62/2 \times 0.03 = 2.5 \text{ m}^3/\text{d} = 29 \text{ cm}^3/\text{s}$ （ $< 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ ）。这样布置，从软土中排出的水到抽真空设备的距离最短，抽水面积较均匀，有利淤泥中水被抽走，效率最高，最节电省能（但滤管或塑料排水板长度稍有增加，而管径较细，材料费会减少），且可成标准型设计。

2) 有砂垫层时，按40 000 m<sup>2</sup>分区在周边均匀布置抽真空设备时(图1)：横向滤管的通水量为 $6.5 \times 100 \times 0.03 = 19.5 \text{ m}^3/\text{d} = 225.7 \text{ cm}^3/\text{s} \approx 220 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，可选用HPB-20 × 6型整体式塑料排水板（HPB-206通水量为220 cm<sup>3</sup>/s）。可以看出滤管均匀布置在加固区四周时，对滤管通水量有较高的要求，因此是不合理的（以上计算中均未计及砂垫层的渗水作用）。

3) 无砂垫层时（即直排式真空预压法），亦按1 000 m<sup>2</sup>设置1台抽真空设备计算。由于无砂垫层，横向滤管与2根插入软土中的塑料排水板相接，塑料排水板间距往往小于1 m，如按间距1 m且塑料排水板为正方形布置时，其通水量为： $2 \times 31.62/2 \times 0.03 = 0.95 \text{ m}^3/\text{d} = 11 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，那么1根A型常用塑料排水板（通水量为 $\geq 15 \text{ cm}^3/\text{s}$ ）即可。

根据太沙基固结理论，砂井主要产生径向固结，固结度 $U_{tr} = 1 - e^{(-8C_{rd}/F_n)}$ ，当固结度 $U \leq 50\%$ 时每天的固结度相差不大，以后就很快锐减。因此按前述条件，只要满足规范规定的最大固结沉降引起的最大出水量后，在以后的因沉降引起的出水量均为小于或大大小于最大出水量。这里也可知在固结度已达50%以后的时间里（或更早），从软土中排出水量是很少的，只要保持膜下真空度基本不变的情况下，软土中的水在真空压力下才会慢慢的排向砂垫层，过一段时间后再将砂垫层中的水排走，也就是说这一段时间内可以关闭射

流泵而达到省电节能。

一般设计单位均将真空预压分区范围内短边方向设计成横向布置滤管,并在短边方向端头布置抽真空设备,尽量减少管内水流的距离,提高射流泵的能效。而分区范围内长边方向设计成纵向布置滤管,每台抽真空设备控制面积为 $1\ 000\text{ m}^2$ 左右,因此纵向滤管的作用似为固定横向滤管,如是应该将纵向滤管改为其它能起固定作用的材料可节省材料、省钱。

## 4 沉降计算

### 4.1 经验系数 $m_s$

“规程”未区分真空预压或真空联合堆载预压笼统取经验系数 $m_s$ 为1.0~1.3。笔者认为真空预压时因孔隙水压力降低,水平方向增加了一个向负压源的压力,土体会发生向内的侧向变形,因此不会产生地基的瞬时变形,或真空预压时地基不会因竖向变形引起的向外的侧向变形<sup>[6-7]</sup>,因此 $m_s$ 取0.8~0.9;真空联合堆载预压时取0.9(堆载预压时取1.1~1.4)。笔者认为应分别取值较为合理。

### 4.2 土层厚度的取值

“规程”只要求在土层厚度较大时宜划分若干小层,未提出具体数字要求。有关规范规定分层厚度宜为0.5~1.0 m<sup>[8]</sup>。根据天津、青岛等项目深厚的软黏土的分层沉降计算经验,当分层厚度较大时,计算会简单,计算结果不够精准,0.5~1.0 m厚的分层计算结果相对较为符合实际的。

## 5 监控项目

对于真空联合堆载预压,“规程”只提出要监控孔隙水压力,未提出控制要求,真空联合堆载预压地基时当堆载过快时易出现地基失稳(直排式真空联合堆载预压时),除了水平位移的预警外,孔隙水压力的变化也是警报,应为“当真空联合堆载预压时,对连续逐渐加载的工程,应绘制孔压 $u$ 与观测时间相应的荷载 $p$ 的曲线。当曲线斜率出现陡增时,可认为土体已发生剪切破坏。此时应停止加载<sup>[6]</sup>;也可以是边桩水平位移在加载时位移速率大,停载时速率几乎为零<sup>[9]</sup>,则边桩水平位移 $<5\text{ mm/d}$ 时可以继续加载;边桩

水平位移接近 $5\text{ mm/d}$ 时为预警状态;边桩水平位移 $\geq 5\text{ mm/d}$ 时应立即停止加载,以确保安全。

## 6 卸载标准

关于卸载(停止抽真空)标准;“规程”未有明确规定,只要求加固深度范围内地基平均总应变固结度不宜小于80%。目前各设计单位在确定卸载标准时仅提出固结度大于85%或以上、沉降速率小于 $2\text{ mm/d}$ ( $5\text{ d}$ 平均)。笔者认为规定较宽泛,根据地基允许的工后沉降确定卸载时机更为合理。应根据地基处理期间的观测资料反算最终沉降量、固结系数、沉降速率,再根据允许残余沉降量、允许地基承载力或稳定性要求均已满足设计要求时<sup>[6]</sup>,即可停止抽真空。

## 7 结语

1) 真空联合堆载预压加固地基时,应根据加固时软土的抗剪强度的提高,确定何时可堆载。

2) 抽真空设备应按 $900\sim 1\ 100\text{ m}^2$ 的控制面积均匀布置在需加固处;滤管的布置应是放射形的,其直径应通过计算确定,并建议可用塑料排水板替代滤管,从而方便施工、省钱、省时。

3) 提出沉降计算中的 $m_s$ 系数和软土分层厚度的建议值;

4) 完善对孔隙水压力的检测要求和卸载标准。可供“真空预压规程”修订时参考。

## 参考文献:

- [1] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [2] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [3] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [4] JTG D30—2004 公路路基设计规范[S].
- [5] 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算:下册[M]. 北京:水利出版社, 1979.
- [6] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [7] 艾英钵, 施建勇, 刘加才. 真空预压加固软土地基沉降的简化计算方法[J]. 中国港湾建设, 2005 (6): 3-5.
- [8] JTJ 017—1996 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].
- [9] 高宏兴. 软土地基加固[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.