



真空联合堆载预压软基监测

尹培林, 王 新

(中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 介绍真空堆载联合预压软基处理工程中常用的监测手段及监测方法。结合工程实例, 综合运用表层沉降监测、孔隙水压力监测、分层沉降监测、地下水位观测等手段, 控制施工加载期的加载速率和荷载维持时间, 确保施工期的安全性, 并通过量测数据进行固结度计算和工后沉降的估算, 以期达到信息化施工的目的, 可供软土地基处理设计与施工参考。

关键词: 真空联合堆载预压; 软基处理; 监测

中图分类号: TU 472.33; TU 413.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0061-05

Analysis of observed data for soft soil foundation treatment by vacuum surcharge preloading method

YIN Pei-lin, WANG Xin

(CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Common means and methods for monitoring and measurement in improvement of soft soils with the vacuum surcharge preloading technique are introduced. The results of improvement of soft soils with the vacuum preloading technique are analyzed by jointly using the means and methods of surface settlement monitoring and measurement, measurement of pore water pressure, monitoring and measurement of layer settlement and observation of ground water in the light of engineering cases, which may serve as reference for the design and implementation of soft soil improvement projects.

Keywords: vacuum surcharge preloading method; soft soil improvement; monitoring and measurement

在软基加固过程中, 通过埋入地基土体中的监测仪器(包括孔隙水压力计、分层沉降磁环、表层沉降板和水位管等)获得相应的测试结果, 可反映出地基预压荷载大小、地基加固软土的固结状态、地基表层和深层土体的变形情况; 通过对观测数据的计算分析, 及时掌握软土地基在加固施工过程中地基土体的变形、应力转换和稳定情况; 严格按有关规范和设计要求的沉降速率、水平位移速率来控制加载。同时, 对软土地基加固施工过程实现动态监控, 以指导施工, 确保施工质量, 且通过对监测数据的综合分析, 可以对地基的加固效果作出正确的评价。

1 软基监测的主要方法及目的

1.1 表层沉降观测

表层沉降观测主要用于沉降速率及沉降量控制。沉降观测是地基处理最常用的监测手段, 通过沉降观测, 可以直观地了解地基的竖向变形, 以便及时采取合理措施, 减少变形量, 控制施工速率, 确保工程安全; 同时也为验证设计、检验施工质量和进行科学研究提供依据, 通过沉降观测可以绘制沉降-时间曲线和沉降速率-时间关系曲线, 利用实测沉降曲线来计算固结度, 确定卸载时间。

1.2 分层沉降观测

通过观测土层内部不同部位的沉降大小, 可

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 尹培林(1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事软基处理监测工作。

以掌握各土层的变形特性及有效压缩层厚度,了解软真空预压软基处理施工及运行期间的固结状况,判断其稳定性,作为控制施工进度、改进施工方法及确保工程安全的依据。

1.3 孔隙水压力观测

通过孔隙水压力观测主要监测施工过程中饱和软土层内在不同深度处的孔隙水压力的增长和消散过程,分析土体不同深度不同时间的有效应力的变化情况,用以推算饱和软土层经处理后的固结度、强度及强度增长,分析地基的稳定性,控制加载速率,避免堆载过多或过快而造成地基的破坏。同时,孔压消散情况也反映了软基加固的效果。

1.4 地下水位观测

在地基处理过程中,各种地基处理方法都会对加固区内外的地下水产生影响,引起地下水位变化。在加固过程中增加地下水位的观测,可以及时掌握加固过程中加固区内外水位变化情况,为分析加固效果和设计计算提供资料与依据,并及时分析评价地基处理对周围环境的影响。

2 工程应用

2.1 工程概括

广东某港区围海造陆软基处理工程主要采用浅表层预处理+真空联合堆载预压深层处理方式,经过疏浚土吹填至+4.7 m、浅表层预处理、陆上推填1.5 m砂垫层、铺设土工布及格栅、抽真空负压85 kPa、铺设膜上砂0.5 m、堆载3 m开山石等工艺,该港区真空联合堆载预压软基处理面积约30万 m^2 ,分为10个小分区处理。以其中一个小分区W2区为例分析说明:W2区软基处理面积约2.8万 m^2 ,勘察钻孔资料显示W2区平均吹填泥厚度约为6.7 m,原状泥厚度约为13.3 m深,且新吹填土黏粒含量约51.2%,含水率高达110%,孔隙比约3.320,原状泥黏粒含量约48.7%,含水率约98.7%,孔隙比约2.665。因此该软土具有黏土含量高、含水率高、孔隙比大等特性,软基处理难度较大。

W2区自2013年1月底完成插设排水板施工,场地插板期平均沉降量为0.838 m,于2013年2月初开始试抽真空,一周后即达到真空恒载要求 ≥ 85 kPa,2013年6月底完成3 m三级堆载,达到设计恒载要求,预压总荷载(含砂垫层)约170 kPa。截至2013年10月中旬卸载时W2区已恒载约112 d。

2.2 监测点的设立

根据本工程的设计要求和现场的施工情况布置监测点(图1,表1)。

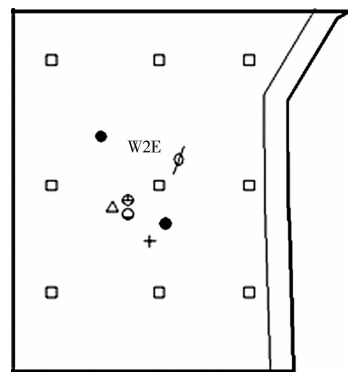


图1 监测点布置

表1 监测项目明细

| 监测项目 | 符号 | 数量 |
|-------|----|----|
| 沉降标 | □ | 9个 |
| 孔隙水压力 | △ | 1组 |
| 分层沉降 | ⊕ | 1根 |
| 水位观测管 | ⊙ | 1根 |

3 监测成果

3.1 表层沉降观测

表层沉降主要通过观测布置在真空膜面上的沉降高程得到,表层沉降观测成果如表2所示。W2区共设置9个沉降标,各标沉降情况符合真空联合堆载预压加固地基沉降规律。从表2中可以看出,真空联合堆载预压期内最大沉降量5.534 m(CJ2-7),最小平均总沉降量4.250 m(CJ2-6),而大多砂性土深层处理的沉降值在2 m左右,可以看出该吹填淤泥的沉降量非常可观,超出设计计算值,造成欠载预压,根本原因在于土的高压缩性和高含水率。从图2可以看出,该软土的恒载期收敛趋势较缓慢,恒载100 d后沉降速率才勉

强达到设计要求, 个别沉降标的固结度刚达到80%。笔者利用 Asaoka 方法和双曲线法分别计算恒载期的平均固结度 U_t (表3), Asaoka 方法计算结果明显高于双曲线法, 这跟 Asaoka 方法计算固结度时取值数量有关, 但从实测数据曲线的收敛趋势来看, 笔者认为双曲线的计算结果更为吻合, 这是因其黏土含量较大、次固结效应所致, 沉降曲线不易稳定, 沉降速率收敛较慢, 也就难以估准其最终沉降量了。因此, 为了更好地拟合计算最终沉降值, 建议在计算黏性较大的软土固结度时优先采用双曲线法。

表2 W2区沉降

| 沉降板编号 | 累计总沉降/mm | 后期平均沉降速率/(mm·d ⁻¹) |
|-------|----------|--------------------------------|
| CJ2-1 | 4 698 | 1.5 |
| CJ2-2 | 4 591 | 1.3 |
| CJ2-3 | 4 588 | 1.2 |
| CJ2-4 | 5 235 | 1.7 |
| CJ2-5 | 4 978 | 1.8 |
| CJ2-6 | 4 250 | 1.7 |
| CJ2-7 | 5 534 | 1.8 |
| CJ2-8 | 4 901 | 1.3 |
| CJ2-9 | 4 326 | 1.6 |
| 平均值 | 4 789 | 1.7 |

注: 观测开始日期为 2013-02-01; 累计加固历时 250 d。

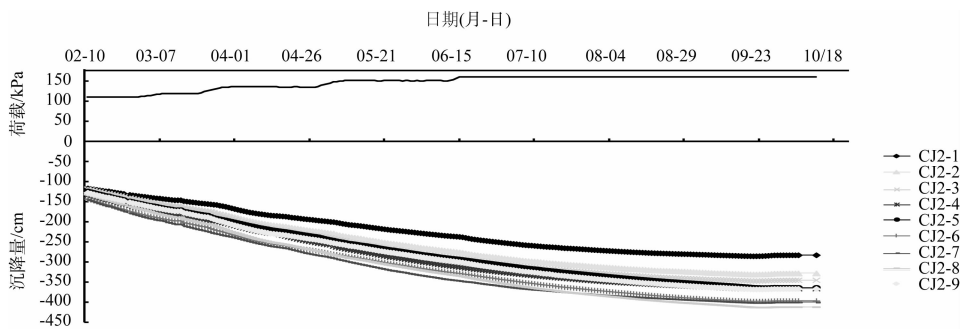


图2 W2区沉降-荷载-时间曲线

表3 W2区固结度计算结果

| 方法 | 沉降标 | 斜率 β | 截距/mm | 计算最终沉降/mm | 当前沉降(10-12)/mm | 固结度/% |
|----------|-------|------------|---------|-----------|----------------|-------|
| Asaoka 法 | CJ2-1 | 0.905 | 461 | 4 870 | 4 698 | 96.5 |
| | CJ2-2 | 0.928 | 351 | 4 887 | 4 591 | 93.9 |
| | CJ2-3 | 0.931 | 341 | 4 965 | 4 588 | 92.4 |
| | CJ2-4 | 0.908 | 506 | 5 506 | 5 235 | 95.1 |
| | CJ2-5 | 0.919 | 430 | 5 281 | 4 978 | 94.3 |
| | CJ2-6 | 0.938 | 287 | 4 645 | 4 250 | 91.5 |
| | CJ2-7 | 0.932 | 413 | 6 051 | 5 534 | 91.5 |
| | CJ2-8 | 0.905 | 486 | 5 129 | 4 901 | 95.6 |
| | CJ2-9 | 0.906 | 424 | 4 527 | 4 326 | 95.6 |
| | 平均值 | 0.920 | 409 | 5 083 | 4 789 | 94.2 |
| 双曲线法 | CJ2-1 | 0.001 41 | 0.126 8 | 5 080 | 4 698 | 92.5 |
| | CJ2-2 | 0.000 90 | 0.130 1 | 5 328 | 4 591 | 86.2 |
| | CJ2-3 | 0.001 08 | 0.099 7 | 5 097 | 4 588 | 90.0 |
| | CJ2-4 | 0.000 89 | 0.090 0 | 5 880 | 5 235 | 89.0 |
| | CJ2-5 | 0.000 94 | 0.103 0 | 5 621 | 4 978 | 88.6 |
| | CJ2-6 | 0.000 93 | 0.119 9 | 4 930 | 4 250 | 86.2 |
| | CJ2-7 | 0.000 88 | 0.067 4 | 6 112 | 5 534 | 90.5 |
| | CJ2-8 | 0.000 99 | 0.106 1 | 5 505 | 4 901 | 89.0 |
| | CJ2-9 | 0.000 74 | 0.093 2 | 5 121 | 4 326 | 83.4 |
| | 平均值 | 0.000 97 | 0.100 2 | 5 382 | 4 789 | 88.9 |

3.2 孔隙水压力观测

采用振弦式孔隙水压力计与频率计观测孔隙水压力，观测地基土体在抽真空后孔隙水压力消散和土体固结情况，用埋设在不同深度处的孔隙水压力测头来监测地基土中孔隙水压力的变化过程，分析地基强度增长情况，指导施工的合理安排。加固区中心点处沿深度在离地表4、8、12、16、20 m处各布置1只孔隙水压力计。

由于吹填土黏泥含量较高、有机质含量较高、含沙量少等特性，各区孔隙水压力在抽真空后消散较缓慢，且日均消散值较稳定，在真空负压85 kPa及3.5 m厚开山石的双重作用下，每日消散值约

0.3~1.2 kPa，消散曲线呈线性趋势发展，且孔压消散速率和堆载厚度关系不大，直到卸载时略微趋于稳定，基本与沉降趋势保持一致，所以笔者认为要想降低高黏性软土中的孔隙水压力，从而增加土的有效应力，增加恒载时间是最有效直接的方法。从图3可以看出，在堆载正压过程中，孔隙水压力出现急剧上升的情况，但由于正压小于消散的负孔压差，超静孔隙水压力仍为负值，加固土体仍处于安全状态。所以，孔隙水压力实测值总体处于下降趋势，说明真空联合堆载预压处理该吹填土效果良好，同时说明真空联合堆载预压对加固土体的安全性有较好的作用。

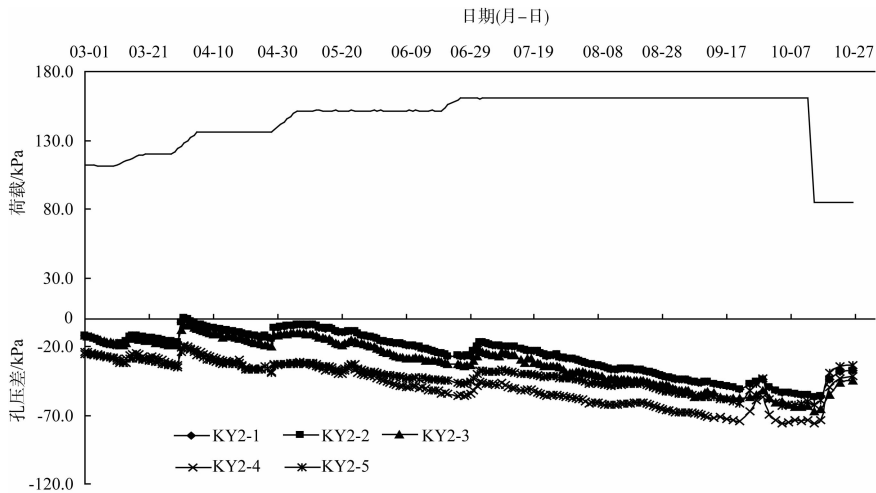


图3 W2区孔压差-时间-荷载曲线

3.3 分层沉降观测

在区内中心点处分别设1组磁环式分层沉降仪，每组5个点，与孔压计对应从地表以下4 m起沿深度每4 m设置1个测点，观测其所在土层沉降情况。观测时间为抽真空后全程进行监测。分层沉降观测成果经过整理后见表4。从表4可以看出：第1磁环的累积沉降量与地表的平均沉降量是可以相互印证的，深度16 m以上的土体压缩量较大，16 m以下压缩量较小。可以看出，第1个磁环以上的淤泥厚度仅为2.6 m左右，而另1.5 m是砂层，由于该层受到的附加应力最大，所

以它的压缩率最大，第2、3、4层都属淤泥，且厚度相近，但由于第2层属于吹填淤泥层，第3、4层属于原状淤泥层，因此第2层的压缩率略高于第3、4层，也是符合规律的。第5个环埋于粉质黏层（约2 m厚）中，但与第4个环之间的土层大部分仍是淤泥，厚度约2 m，且由于真空度传递的损失，因此压缩率最小。表4中的数据较好地反映了深层土体的压缩沉降和固结规律，真空负压由上至下逐渐减弱，所测压缩率随深度增加渐渐减小，各土层加固效果随深度增加逐渐降低。

表4 W2区各深度土层的压缩率

| 分组 | 磁环编号 | 磁环初始高程/m | 磁环沉降量/cm | 磁环间土层原厚度/m | 磁环间土层压缩量/cm | 土层压缩率/($\text{cm}\cdot\text{m}^{-1}$) |
|-----|------|----------|----------|------------|-------------|---|
| W2区 | 地表 | 3.687 | (478.9) | | | |
| | 1 | -0.474 | 304.0 | 第1层(4.161) | 174.9 | 42.0 |
| | 2 | -4.764 | 192.8 | 第2层4.290 | 111.2 | 25.9 |
| | 3 | -8.694 | 121.3 | 第3层3.930 | 71.5 | 18.2 |
| | 4 | -12.608 | 51.9 | 第4层3.914 | 69.4 | 17.7 |
| | 5 | -16.605 | 18.3 | 第5层3.997 | 33.6 | 8.4 |

3.4 地下水位观测

各区在中心点处理设1根水位管,采用敞口式测量法观测抽真空期间地下水位的里外变化情况,水位管埋置深度为12 m,滤管段长为4 m,典型水位差曲线如图4所示。由图4可以看出,抽真空开始一个月内水位迅速下落,之后偶尔会由于降雨影响导致水位上升,截至卸载前水位下降逐渐趋缓,最后水位趋于稳定。由于区外未设置地下水位测量,区内外地下水位连通,因此笔者认为该水位差并不能代表真实地下水位变化,且由于采用敞口式测量法,测量的地下水位在一定程度低于实际水位。虽然本次监测工作采用的测量水位方法有一定的缺陷,但是图中所反映的趋势是非常明显的,就是地下水位在抽真空的过程中总体呈下降趋势。

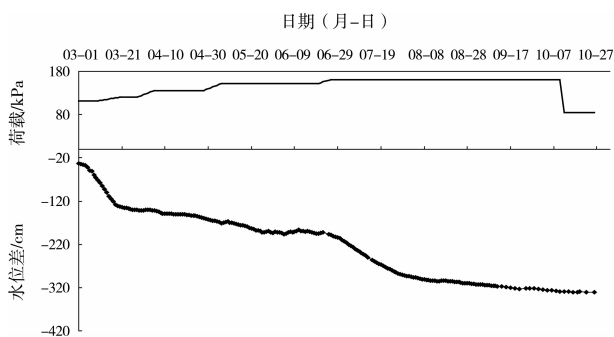


图4 W2区水位差-时间-荷载曲线

4 监测效果分析

从监测数据可以看出,W2区的平均计算固结度达到了89%,超过了设计要求的85%。真空联合堆载预压中都发生了较大的沉降量,平均沉降量达到了4 789 mm,同样超过了设计预期值,各区孔压在恒载期持续消散并逐步达到一稳定值,且真空负压卸载后孔压发生较大反弹,说明真空

预压效果较好;地下水位变化与孔压变化规律一致,且超孔压消散值与堆载荷载的比值达到85%,表明应力固结度亦达到85%,满足了设计要求;分层沉降监测结果表明地表下16 m深度仍有可观的压缩沉降量,且各土层压缩量均不小,与表层沉降监测值相互印证,表明真空联合堆载预压加固达到了预期的深度。综上所述,W2区真空联合堆载预压法取得了较好的加固效果。

5 结语

1) 采用先进的观测技术进行监测,可以及时了解采用真空联合堆载预压处理新吹填淤泥施工过程中土体的强度变化和变形特征,并通过资料分析有效地进行施工过程控制,以判断加固工程是否达到了预期的目的。

2) 在监测工程中发现新吹填淤泥软基处理工程具有预压期长、总沉降量大、区内不均匀沉降大、孔压消散缓慢、沉降速率大以及沉降速率收敛慢等特点,表明采用真空联合堆载预压加固处理高黏粒含量的淤泥土,即便达到设计固结度,也很难控制工后沉降和差异沉降,需要较长恒载时间才能满足上层构筑物的沉降控制需求。

3) 分层沉降监测结果表明由浅至深的土体表现出沉降量依次减小的规律。一方面说明,真空预压加固法加固软基由于沿程的井阻作用导致了真空度由上到下的逐渐衰减;另一方面,深层土体的欠压密和欠固结程度较低也是其沉降量逐渐减少的原因。

4) 建议在科研工作中可以采用封闭式测量+区内外同时测量的方法测量地下水位,即在区内外各埋设一根水位管,并埋设多个电极于土体不同深度,来反映真实的地下水位变化值。

(下转第77页)