



无砂真空预压抽真空梯度 对软基加固效果的影响

曹俊伟, 朱洪波

(中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315200)

摘要: 在利用浅层无砂真空预压技术进行软基加固过程中, 探索如何控制抽真空梯度(即开泵比例), 达到加固效果满足设计要求且节约工程成本的目的。以温州乐清湾港区软基处理工程为依托, 结合现场监(检)测结果, 对两个相同真空泵数量、不同开泵比例的试验区进行对比分析, 结果表明: 根据固结度调整抽真空梯度可得到较好的加固效果。

关键词: 软基; 真空预压; 固结度; 抽真空梯度

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0181-05

Effect of vacuum gradient on consolidation performance in surface-layer vacuum preloading technique

CAO Jun-wei, ZHU Hong-bo

(Ningbo Branch of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo 315200, China)

Abstract: The vacuum gradient can be controlled to meet the design requirement of the ground stabilization and the cost can be decreased correspondingly in the application of surface-layer vacuum preloading technology. Based on the treatment engineering of soft foundation in Yueqing bay region, Wenzhou, we carry out a comparison and analysis on the same arranged vacuum pumps and different gradients of working pumps depending on the monitoring and inspected results. It shows that the vacuum gradient should be adjusted according to the degree of consolidation during corresponding course, which can obtain good performance.

Keywords: soft base; vacuum preloading; degree of consolidation; vacuum gradient

近年来沿海诸多省市, 特别是天津、温州地区, 为缓解紧张的建设用地而大面积围海造陆, 其吹填淤泥形成的软基采用浅层真空预压技术进行快速加固, 为后续工程施工形成作业平台。但在抽真空施工过程中发现: 一是在抽真空开始加载阶段, 当真空泵逐台开启数量过快, 致使真空度上升较快, 尤其夏季高温期间, 出现滤管因环刚度不足和管内真空度过高而被抽扁的现象; 二是抽真空施工过程中, 当膜下真空度达到 70 kPa 以上时, 增加开泵数, 真空度上升的幅度较小, 但真空泵出水量和表层沉降速率却增大较多。以

上两点说明逐台增加的开泵数, 即抽真空梯度影响着加固效果。另外, 抽真空电费对软基加固的工程成本影响较大, 主要影响因素为布泵数量、抽真空过程中逐级增加的开泵比例(即抽真空梯度)和该开泵比例持续时间的长短。因此, 真空泵在布泵数量满足设计要求的情况下, 合理控制抽真空梯度可控制软基加固效果并节约工程成本。

1 试验区工程概况

试验区位于所属工程 B 围区内, 其区域内吹

收稿日期: 2014-04-28

作者简介: 曹俊伟(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程施工及管理。

填淤泥经3个月落淤晾晒、泌水后依旧呈流动-流塑状态,厚度4~6 m,天然含水率>150%,黏粒含量>40%,饱和度接近于100%。

试验区采用浅层真空预压技术进行地基加固,排水板采用SPB-B型板,以“一管一板”方式正方形布置,间距0.8 m,深度为人工插设至原滩面,长度为3.5~6 m,平均长度5 m。软式真空滤管 $\phi 50$ mm,主管间距12.4 m,支管间距0.8 m。试验区分别设在施工区块B1-9区和B1-11区,面积分别为17 443 m²和17 338 m²,均按1 200 m²/台布泵,真空泵数量均为14台,功率均为7.5 kW。两区地质资料相近,排水板打设长度一致,布泵数量一致,具有良好的可比性。试验区抽真空梯度以在抽真空不同阶段采取不同开泵比例(即开泵比例=实际开泵数/该区布泵总数)的方式进行控制,以消除不同布泵密度对试验结果所引起的差异^[1-2]。

在抽真空阶段,两区开泵比例随时间变化基本规律见表1,变化曲线见图1。开泵比例B1-9区为设计要求,B1-11区为根据本工程吹填土土质特性和温州地区类似工程经验。经多方讨论分析,优化后的开泵比例,根据设计要求,真空度达到80 kPa之后,开泵比例 ≥ 0.8 ,试验区真空泵轮流开启,但真空泵开启台数控制在11台(11/14=0.8),即总的开泵比例控制在0.8,此种方案节约用电且避免出现抽真空薄弱部位。因B1-9区开泵速率过快,故其开泵比例总体上高于B1-11区,在真空度未达到80 kPa之前,真空度增加也过快。

表1 两区抽真空开泵比例控制

时间/d	比例	
	B1-9区	B1-11区
0~7	0.14	0.14
7~14	0.29	0.14~0.29
15~21	0.29~0.57	0.29
22~28	0.57	0.29
29~35	0.57~0.80	0.29~0.57
36~55	0.80	0.57
56~60	0.80	0.57~0.80
61~105	0.80	0.80

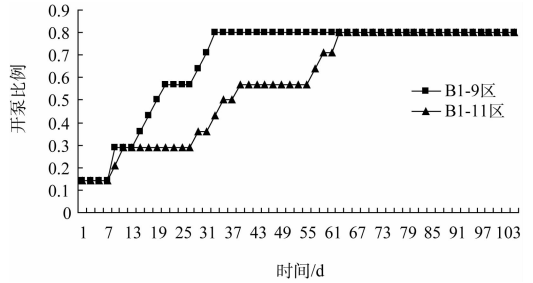


图1 两区开泵比例-时间变化曲线

2 实测结果分析

2.1 膜下真空度

从图2膜下真空度-时间变化曲线可看出,在抽真空整个阶段,在膜下真空度未达到80 kPa之前,由于开泵比例B1-11区较B1-9区小,致使B1-11区真空度较B1-9区上升平缓;当真空度达到80 kPa后,开泵比例的递增不再影响真空度的递增,但是出水量却增加。监测试验区现场,发现两区有2个共同特征:1)当真空泵开启到4~6台,即开泵比例0.29~0.43、膜下真空度60 kPa左右时,滤管逐渐出现被抽扁的现象,随着开泵数的逐台增加,膜下真空度的不断提高,滤管被抽扁的数量渐渐增加,滤管被抽扁的数量约占总量的30%~50%,分析其原因:一是因为夏季连续将近40℃的高温,使密封膜表面温度达到55℃左右,滤管被高温软化,材料强度降低;二是当管内真空度达到60~80 kPa时,高温软化后的滤管,其环刚度12 kN/m²不满足现场实际施工强度要求。2)在抽真空梯度前期和中期,膜下真空度上升到70 kPa以上,开泵比例增加或减少约7%对膜下真空度影响较小,但是增加开泵比例,出水量增加明显,分析其原因:由于没有砂垫层,当膜下真空度从0 kPa上升到70 kPa以上过程中,密封膜与吹填土表面之间的水和空气绝大部分已被吸出,在密封沟和密封膜密封条件良好的情况下,增加开泵比例,虽然膜下真空度上升幅度有限,但真空度沿排水板通道在垂直方向上向土体更深处传递,使吹填土表面至更深处排水板周围的孔隙水和气体被吸出,致使出水量增加。

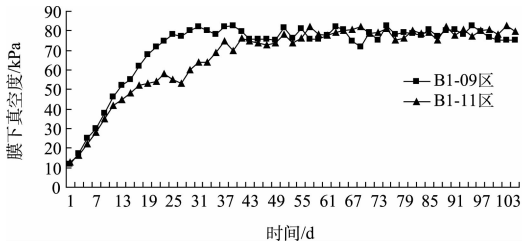


图2 膜下真空度-时间变化曲线

2.2 地表沉降

从图3加固区沉降量对比曲线可看出, 两者沉降曲线大体一致, 略有差别。抽真空105 d后, B1-9区的沉降比B1-11区小103 mm, 说明虽然抽真空0~60 d时B1-11区开泵率小于B1-9区, 但整体沉降量大。从图4加固区沉降速率对比曲线可看出, 在每次增加开泵比例的时候, 两区沉降速率相应增大。在0~35 d时间内, B1-9区沉降速率大于B1-11区; 在35 d后, B1-11区沉降速率大于B1-9区, 且持续时间较长。抽真空整体阶段, 偶尔出现的低值点, 是因为密封膜破损漏气, 没有及时粘补造成的。B1-9区在抽真空80 d后沉降速率开始稳定, 保持在5 mm/d左右, 这段时间将持续25 d左右; B1-11区在抽真空95 d后, 沉降速率开始稳定, 保持在5 mm/d左右, 这段时间将持续10 d左右。但B1-9区在抽真空第35 d后, B1-11区在抽真空95 d后, 尽管开泵率为0.8, 但沉降速率却递增不明显, 而是逐渐衰减下去, 分析其原因, 一是吹填土中可作为密封材料的黏性颗粒(渗透系数大约是 10^{-8} cm/s数量级), 在抽真空过程中被吸附在排水板周围, 形成了堵塞排水板排水通道的土柱, 且在吹填土体垂直方向上, 由上到下土柱直径由大到小渐变, 坚硬程度由硬到软。在相同时间分段内, 在抽真空前期和中期, B1-9区开泵比例大, 土柱形成较B1-11区快, 但在抽真空结束后, 在相同坚硬程度的情况下, B1-9区土柱直径较B1-11区小, 同时, 在4个土柱中心位置, B1-11区土体比B1-9区略硬, 说明B1-11区加固效果较B1-9区好。二是抽真空前期和中期沉降速率大, 主要是因为吹填土浅层水和空气易被吸出, 吹填土浅层沉降较大所致; 抽真

空后期速率小, 是因为沉降主要发生在土体深层, 虽然真空度沿排水板通道向土体更深处传递, 但真空度也沿排水板深度衰减, 孔隙水和空气很难被吸出, 深层沉降量小所致。

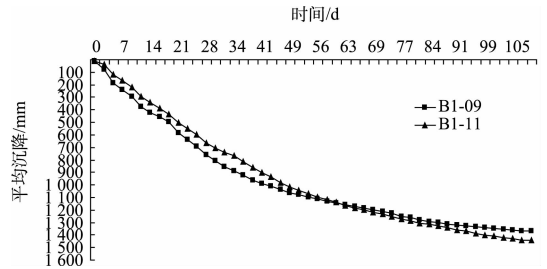


图3 试验区沉降量对比曲线

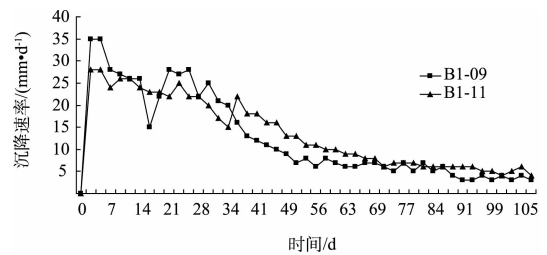


图4 试验区沉降速率对比曲线

根据沉降曲线, 采用双曲线法推算土体固结度, 对于B1-9区, 在第21 d, 增加开泵比例至0.57时固结度为35%; 在第35 d, 增加开泵比例至0.80时固结度为52%, 此后开泵比例0.8不变, 抽真空结束后固结度达到81%。对于B1-11区, 在第25 d, 增加开泵比例至0.29时固结度为35%; 在第35 d, 增加开泵比例至0.57时固结度为46%; 在第60 d, 增加开泵比例至0.80时固结度为68%, 此后开泵比例0.8不变, 抽真空结束后固结度达到86%。

2.3 孔压消散

从图5孔压消散对比曲线可看出, 两区在地表以下1.0 m处的孔压消散值从总体来看, B1-11区的孔压消散值略大于B1-9区。在抽真空开始的0~7 d内很相近, 7~63 d内B1-9区消散速率大于B1-11区, 63~105 d内B1-9区消散速率较B1-11区小。主要原因是0~7 d两区开泵比例相同, 均为0.14, 故孔压消散值相同; 7~63 d内B1-9区的开泵比例较B1-11区高, 故B1-9区孔压消散值较B1-11区大; 63~105 d内B1-9区因抽真

空前期开泵速率过快,使排水板周围致密土柱形成,排水通道堵塞过早,土柱外围的孔隙水无法通过致密土柱沿排水板通道被排出,孔压消散缓慢,故 B1-9 区孔压消散值较 B1-11 区小。结合图 3 和图 4 分析,尽管 B1-9 区在第 86 d 后, B1-11 区在第 97 d 后,沉降量没有明显的增加,出水量明显减少,但孔压却呈下降趋势,说明后期维持开泵比例维持在 0.8 以上仍是有效的,孔压仍然在消散,土体固结度在增长,但是固结度增长速度很缓慢。

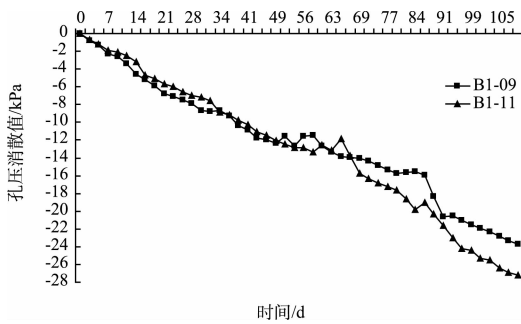


图 5 试验区孔压消散对比曲线

抽真空 B1-9 区第 55 d 后, B1-11 区第 69 d 后,吹填土中的孔隙水和空气被大量吸出,排水板插设深度范围内吹填土土颗粒发生了移位和重组,形成了土体骨架,吹填土体开始变得坚硬密实,土体表层以下约 0.5 ~ 0.8 m 深度范围内形成了一个硬壳层,承受了 80 kPa 膜下真空度的大部分荷载。根据固结理论^[3-4],土体产生固结需具备 2 个条件:一是孔隙水必须排出;二是有效应力增加。在抽真空后期(即抽真空梯度第 4 阶段),由于土体硬壳层分担了 80 kPa 膜下真空度大部分荷载,尽管吹填土较深处孔压依旧在消散,但是较深处土体骨架的有效应力增量远小于孔压消散值,故有效应力增长极慢,使抽真空后期沉降量小。根据分析得出,当抽真空后期沉降速率递减到约 5 mm/d 时,继续抽真空可降低孔压,但沉降量增加不明显,土体物理性质(如孔隙比、压缩系数等指标)也没有明显改善,说明浅层真空预压技术加固较深部位吹填土的效果是有限的。如需继续改善土体物理性质,可采用堆载预压或是铺设砂垫层做真空联合堆载预压进行深层处理。

2.4 耗电量

由于浅层真空预压工程成本 30% 左右主要取决于真空泵抽真空所耗电量,因此有必要对单位功率下 B1-9 区和 B1-11 区沉降随时间的变化关系进行对比分析。

从图 6 两区单位功率下的沉降对比曲线可看出,在第 14 d 后, B1-11 区单位功率下的沉降较 B1-9 区大,说明 B1-11 区的真空泵利用效率高。由此可得出,不是布泵数量对吹填土的抽真空加固效果产生影响,而是真空泵所施加的功率大小对加固效果产生影响,即在地基加固效果相同的情况下, B1-11 区开泵比例所消耗电量比较小,节约用电。

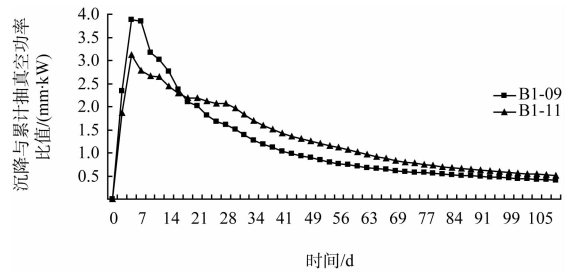


图 6 单位功率下的沉降对比曲线

3 地基加固效果

3.1 含水率

从图 7 两区不同深度土体含水率可看出,整体上 B1-11 区含水率比 B1-9 区低,分布在 51% ~ 56%, B1-9 区分布在 54% ~ 60%,说明 B1-11 区加固效果较好。

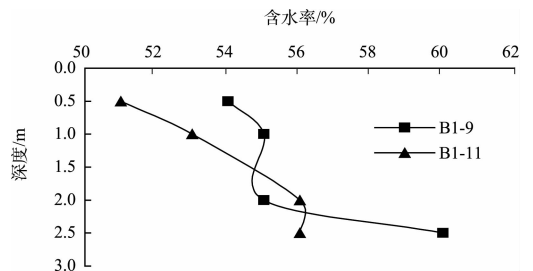


图 7 含水率-深度变化曲线

3.2 按临塑压力公式计算地基承载力

加固后的吹填土按塑性状态中的临塑压力公式^[5]计算地基承载力,从表 2 临塑压力公式计算的地基承载力可看出,两区 0.9 ~ 1.2 m 深度地基

承载力为 53 kPa, 2.3 ~ 2.6 m 深度地基承载力为 52 kPa, 两区加固效果接近。

表2 临塑压力公式计算地基承载力

分区	土样深度/m	计算深度/m	密度/ $(t \cdot m^{-3})$	内摩擦角/ $(^\circ)$	内聚力/kPa	承载力/kPa
B1-9	0.90 ~ 1.20	0.3	1.65	9.3	11	53
	2.30 ~ 2.60	0.3	1.61	9.0	11	52
B1-11	0.90 ~ 1.20	0.3	1.66	9.3	11	53
	2.30 ~ 2.60	0.3	1.60	8.7	11	52

3.3 静力触探结果

在含水率和临塑公式计算地基承载力间接评价加固效果的基础上, 采用原位测试双桥静力触探试验直接验证两区加固效果^[6]。从图8锥尖阻力随深度变化曲线可看出, 在0 ~ 1.5 m 加固深度范围内, B1-11区锥尖阻力略大于B1-9区, 为B1-9区锥尖阻力的1 ~ 1.4倍, 均值为1.2倍; 1.5 ~ 2.5 m 加固深度范围内, 虽B1-11区锥尖阻力也大于B1-9区, 但B1-11区锥尖阻力是B1-9区的1.3 ~ 1.7倍, 均值为1.5倍, 说明B1-11区的加固效果优于B1-9区。

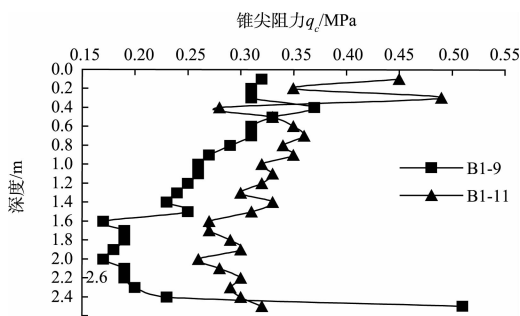


图8 锥尖阻力 q_c -深度变化曲线

通过对含水率、临塑压力公式计算地基承载力、静力触探试验结果进行分析, 得出B1-11区在节省施工用电的情况下, 地基处理效果优于B1-9区。

4 结语

1) 按优化后的开泵比例控制抽真空施工, 即: 1 200 m^2 /台布置 7.5 kW 的真空泵, 抽取真空时, 在0 ~ 14 d, 开泵比例0.14 ~ 0.29; 15 ~ 28 d, 开泵比例0.29; 29 ~ 35 d, 开泵比例0.29 ~ 0.57; 36 ~ 55 d, 开泵比例0.57; 56 ~ 60 d, 开泵比例0.57 ~ 0.80; 61 ~ 105 d, 开泵比例0.80, 软基加固效果整体上优于原设计方案, 并且节约抽真空用电。

2) 根据固结度作为控制开泵比例的标准, 固结度达到35%、46%、68%时, 分别增加开泵比例至0.29、0.57、0.80, 此后维持不变。此处不同的固结度对应不同的开泵比例, 主要是针对本工程土体特性而言。针对其他地区的土质, 可借鉴本文的试验方法和思路, 具体问题具体分析。

3) 控制好抽真空梯度, 可以延缓滤管被抽扁的时间, 保证滤管的通水能力, 在夏季高温期间, 滤管环刚度要根据施工实际情况加以提高。

4) 抽真空后期, 表层沉降量减小, 沉降速率趋于平缓, 但孔压依旧在消散, 土体固结度在缓慢增长。

参考文献:

- [1] 张功新. 真空预压加固大面积超软弱吹填淤泥土试验研究及实践[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [2] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [3] JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S].
- [4] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
- [5] JGJ—2011 软土地区岩土工程勘察规范[S].
- [6] 林少波, 黄建华, 陈平山. 浅层加固技术中抽真空作用强度对加固效果的影响[J]. 水运工程, 2011(2): 117-119.

(本文编辑 武亚庆)