

深厚软基筑堤过程中的地基稳定控制

汪巍巍,俞相成

(上海市水利工程设计研究院,上海 200063)

摘要 在深厚软基筑堤过程中如何控制地基稳定是工程成败的关键之一。以温州半岛浅滩一期工程为例,根据该工程施工过程中原位观测资料,分析了软基在筑堤过程中的沉降变化规律、水平位移变化规律和强度增长情况,评价了地基处理的效果,并提出了采用地表沉降速率指标、水平位移速率指标和孔隙水压力指标综合确定加载速率的方法来控制地基稳定。该方法能为分级加载速率的确定提供可靠依据,能有效地调整施工进度,保障工程安全。

关键词 软基 地基稳定 原位观测 加载速率 塑料排水板

中图分类号 :TU441+ .35 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2008)S1-0084-03

随着沿海地区城市化规模的不断扩大和经济建设的迅速发展,人们对土地的需求越来越大,浅海滩涂资源成为这些地区最大的土地后备资源。但在滩涂上筑堤圈围经常遇到地基失稳的问题,东南沿海地区普遍软基深厚,一些甚至深达 40 多 m,因此在深厚软基上筑堤如何控制地基的稳定成为圈围造地工程必须解决的课题。笔者以温州半岛浅滩一期工程为例,通过对该工程施工过程中原位观测资料的分析,探讨在深厚软基筑堤过程中的地基稳定控制。

1 工程概况

温州浅滩位于瓯江口外,介于灵昆岛(属温州市瓯海区)和霓屿岛(属温州市洞头县)之间,是瓯江河口区域内发育较为完整、规模最大的滩涂资源。温州半岛浅滩工程是在龙湾灵昆岛与洞头之间建南北 2 条围海大堤,把两岛连成一片,并实现两岛之间围涂造地 8 800 hm²。温州半岛浅滩一期工程主要是进行浅滩工程中北堤的建设,全长 14.5 km,是目前全

国最长的跨海大堤。工程自 2003 年开工历时 3 a,现已顺利验收通车。

2 设计方案

2.1 地质条件

温州半岛浅滩一期工程的堤坝均坐落在深厚的软土地基上,经勘探揭露,海堤地基 40 m 以内主要为高含水量、高压缩性、高灵敏度、低强度的淤泥和淤泥质黏土,工程地质条件差,是堤基沉降和稳定的主要控制层。各土层的物理力学指标见表 1。

北堤堤线涂面高程 - 7.8 ~ 2.2 m(国家 85 高程基准,下同),平均高程约为 - 3.0 m。大堤主要采用抛石结构,堤顶高程为 5.73 m,堤身平均高度约为 9.0 m。堤基为深厚的软土地基,地基承载力仅为 30 ~ 40 kPa,不能满足上部荷载的要求,地基必须进行处理。

2.2 地基处理方案

目前常用的海堤地基处理方法有挖除置换法、

表 1 地基土的力学指标

土层名称	含水量 <i>w</i> /%	湿密度 ρ / (g·cm ⁻³)	孔隙比 <i>e</i>	快剪指标		固结快剪指标		十字板强度 (统计值)/kPa	地基承载力/ kPa
				<i>c</i> /kPa	φ / (°)	<i>c</i> /kPa	φ / (°)		
Ⅲ ₀ 淤泥层	70.3	1.62	1.781	2.7	1.6	4.7	13.5	3.820 + 2.771 <i>Z</i>	35
Ⅲ ₁ 淤泥粉砂互层	55.0	1.70	1.385	6.0	4.2	5.4	14.7	9.193 + 1.173 <i>Z</i>	50
Ⅲ ₂ 淤泥层	61.3	1.63	1.709	7.5	2.8	7.9	13.0	11.306 + 0.409 <i>Z</i>	45
Ⅲ ₃ 淤泥层	60.1	1.63	1.692	10.3	2.4	11.1	11.7	11.306 + 0.409 <i>Z</i>	65
Ⅲ ₄ 淤泥质黏土	51.4	1.69	1.434	12.5	4.3	15.5	13.4		80

注 :*Z* 值为十字板距地表的深度。

作者简介 汪巍巍(1974 —),女,安徽安庆人,工程师,硕士,从事水利工程设计与研究。E-mail :gabions@163.com

堤脚外压载法、塑料排水板排水固结法、真空预压法、高强土工材料加筋法、爆破挤淤法、桩基法等^[1]。对比该工程的地理环境和建筑材料供给等特定条件,挖除置换法在深厚的软土地基上不适用;堤脚外压载法虽具备采用条件,但不能满足施工进度要求,宜与其他处理办法联合应用;爆破挤淤法的投资较高,不经济;由于工程范围内地基土中存在淤泥粉砂互层,难以形成负压,加上涂面低,不具备大范围陆上施工条件,因此真空预压法也不适用。经分析比较,塑料排水板排水固结法加固软黏土地基效果可靠、计算理论较成熟、施工经验丰富,且较经济,所以本工程最终采用以塑料排水板为主、加筋土工布和镇压层为辅作为地基处理的主要方案。

软土地基打设排水板的主要目的是改变地基原有的排水边界条件,增加孔隙水排出的通路,缩短排水距离,加速地基土的固结,从而尽早提高地基承载力以保证堤身在加载过程和后期的稳定,并将施工后的沉降控制在一定范围内^[2]。为在满足稳定和沉降要求的前提下,尽可能寻找比较合理的排水板布置方案,以保证工程技术可靠、经济合理,设计阶段就不同排水板深度、间距对海堤的稳定沉降影响进行了一系列计算分析^[3],最终确定排水板间距为1.4 m,深度为16~22 m。

3 施工监测

3.1 原位观测的目的

由于海堤构筑在深厚的软土地基上,工程地质条件差,施工过程中的不确定因素较多,为确保施工过程中海堤的稳定,原位观测成为施工过程中不可缺少的重要环节之一。原位观测主要是利用海堤填筑前埋设的观测仪器动态监测大堤填筑过程,对现场各项观测数据进行综合分析,以掌握排水固结效果,控制和调整施工进度及加载速率,为工程的安全、快速施工提供保证。

3.2 原位观测的主要内容和观测断面的布置

温州半岛浅滩一期工程原位观测内容主要有地

表沉降观测、水平位移观测、孔隙水压力观测和地基十字板强度测试等4项,并以地表沉降观测为主。北堤全长14.5 km,共设原位观测主控断面3个,地表沉降主控断面27个(每个断面布置5只沉降板),地表沉降辅助断面35个(每个断面布置3只沉降板)。主控断面观测项目布置如图1所示。

3.3 原位观测结果及分析

在深厚软土地基上筑堤,必须严格控制加载速率,使强度的提高与地基中剪应力的增长相适应。当加载厚度过大,地基中一定范围的剪应力达到某一临界值时,地基由以弹性变形为主变为以塑性变形为主,此时在总沉降量中由地基土剪切变形产生的沉降将显著增大。如果再盲目加载,或出现潮位急退或施工交通荷载等不利因素的作用,堤坝地基中的塑性区将继续扩大,则有可能发生地基的整体破坏。即使地基不出现明显的失稳现象,过大的剪切变形也会造成地基土结构的破坏,这对堤坝施工后沉降的控制十分不利。

3.3.1 地表沉降

温州半岛浅滩一期工程施工过程中主要通过对沉降速率的控制来确定加载速率。图2是大堤某断面前2级加载后的沉降速率曲线。图2显示加载后瞬时沉降十分明显,尤其是第1级荷载加载后的第1天沉降速率就超过120 mm/d。产生该现象的主要原因是原始地基表层存在新近沉积的浮泥,其孔隙比大且抗剪强度极低、压缩模量小,加载后即发生

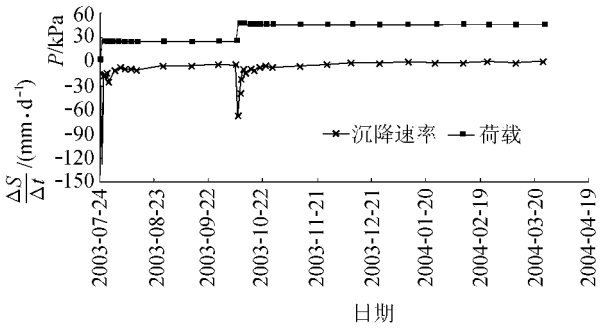


图2 沉降速率曲线

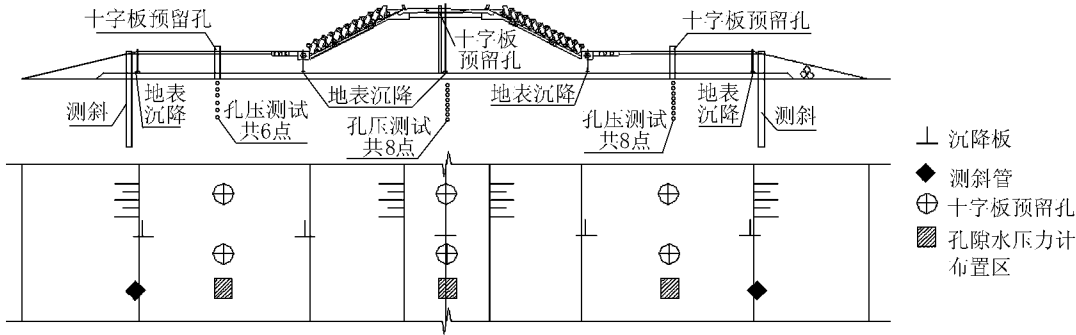


图1 主控断面观测项目布置示意图

较大的瞬时沉降。但沉降速率衰减也很快,第3天就小于30 mm/d,5~10天后小于10 mm/d并趋于稳定。因此在施工中仅以1天的沉降速率来判别地基稳定性是不合适的,通过对沉降速率资料的分析,本工程采用连续3天的平均沉降速率进行加载控制。

另外,统计资料显示,加载后的沉降速率变化明显与加载厚度相关,加载过快不仅使沉降速率异常增大,而且使其衰减也较为缓慢。以某一测点为例,第2级荷载加载前的沉降速率为3 mm/d,第2级荷载加载2.5 m厚度后最大沉降速率高达87 mm/d,近12天后才下降至10 mm/d以下。由于该测点没有布置其他观测项目,无法依靠其他指标综合判断地基塑性开展趋势,但从该项观测所反映的现象应该可以推断地基有发生危险的趋势。所幸地面没有发生明显隆起现象,且由于排水板的作用,强度增长较快,从而制止了塑性区的进一步发展。由此可见,在施工过程中为保证地基的稳定除沉降速率外还需对加载厚度进行控制。

随着堤身的不断加高,地基土所承受的附加荷载不断增大,需降低分层加载厚度,减少瞬时沉降,使地基承载力稳定增长,避免一次集中加载过量造成地基失稳。因此随着断面高程的增加,本工程对加载厚度和沉降速率采用更严格的控制值。

3.3.2 侧向位移

测斜观测主要观测在上部荷载作用下地基土不同深度的水平位移状况,若地基土侧向水平位移过大,说明地基已发生较大剪切变形,有失稳的趋势,根据已有工程的经验,本工程采用水平位移速率 $A < 4 \text{ mm/d}$ 作为加载速率的控制指标之一。实际施工中,第1级荷载加载后,最大水平位移速率均在10 mm/d以上,远大于要求的4 mm/d,经分析这主要是在滩地表面浮泥上加载产生侧向挤淤造成的,其值不能真实反映地基的失稳情况。第1级加载以后最大水平位移速率基本都控制在3~4 mm/d之间。

图3是大堤一断面(滩地高程为-3.5 m,坝基宽度为100 m)侧向位移随深度的变化曲线。根据观

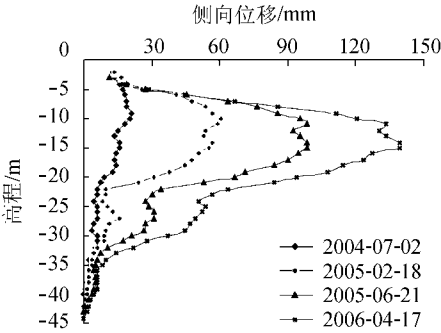


图3 地基土侧向位移曲线

测结果,侧向位移沿高程变化情况如下:在加载初期,最大位移发生在-10 m高程附近,随着荷载的增加,水平位移向深部发展,最大位移发生在-15 m高程附近,塑性区开展深度有往深处延伸的趋势,但仍在允许的坝基宽度范围内(1/4~1/3坝宽),这说明地基是稳定的。

3.3.3 孔隙水压力

孔隙水压力观测主要通过海堤施工过程中超静孔隙水压力的增长及消散来了解地基的固结和强度增长情况。根据一些工程实践经验,只要地基中孔隙水压力与荷载之比小于某一定值时,即可不断加载而不致造成地基失稳。本工程施工中采用孔隙水压力系数 $\bar{B}$ (孔隙水压力增量与荷载增量之比)的监测值小于0.6作为加载速率的控制指标之一。

根据本工程几个测点的孔隙水压力统计资料,超孔隙水压力随荷载的增加而逐渐增大,-25.5 m高程以上插板区的超静孔隙水压力消散明显,排水板以下超静孔隙水压力消散缓慢,这说明排水板加速固结的作用很显著。此外,孔隙水压力监测数据表明,在停荷期下卧层孔隙水压力出现了增长现象,这是由于土骨架具有黏滞性效应,上部厚层黏土延滞了深部孔隙水压力的消散,深部土体在单位时间内因土骨架的应力松弛作用而产生的孔隙水压力增长量大于其消散量,从而造成孔隙水压力增大。本工程中加载期孔隙水压力系数 $\bar{B}$ 一般为0.3~0.5,最大为0.59,均在控制范围之内。

3.3.4 十字板强度

在施工过程中通过现场十字板剪切试验测定地基的强度,可以直接了解地基软土层强度变化的状况和地基处理的效果。表2反映了大堤某断面地基土十字板强度增长情况,从表2中数据可以看出:①堤轴线和镇压层位置排水板处理区的地基土强度都有明显增长,堤轴线位置地基土的强度增长大于镇压平台位置的强度增长,这符合加载越大排水效果越显著的规律;②与排水板处理区相比,下卧层土体的强度虽有增长,但不明显,这说明排水板的加速固结作用十分明显。

表2 地基土强度增长情况

土层名称	深度范围/m	镇压层下强度增长/kPa	堤轴线下强度增长/kPa
Ⅲ ₁ 淤泥与砂互层	0~6	27~32	36~40
Ⅲ ₂ 淤泥	6~21	8~26	10~30
Ⅲ ₃ 淤泥	21~30	3~5	3~6

注 数据资料来自浙江广川工程咨询有限公司和天津港湾工程质量检测中心的工程原位观测检测报告。

(下转第102页)

沙。在需要冲沙时控制进入沉沙池的流量为冲沙流量,降低水位进行冲沙,此时开启渠道进入前池的控制闸门,发电用水由压力前池控制闸直接进入前池,不影响电站的发电运行。

d. 结合布置所需的长度比分开布置短,工程投资也较分开布置少,有利于电站的正常运行。

4 结 语

a. 在取水口及渠道沿线均没有合适位置布置沉沙池的情况下,考虑将沉沙池布置在渠末的前池位置是可行的,为防止泥沙在渠道内淤积,渠道需采用较陡的底坡,保证渠道内流速大于不淤流速,小于不冲流速。

b. 渠道采用较陡底坡虽然解决了淤积问题,但同时发电水头会有损失,如果水头比较宝贵,仍需将沉沙池布置于渠道前段。因此,需进行技术经济比较来确定。

c. 沉沙池在电站运行时进行冲沙一般需要较大的冲沙流量才能保证较好的冲沙效果,但流量大会影响发电取水。而采用降低水位冲沙效果较好,

冲沙流量不需太大,不影响发电取水。该工程充分考虑了河流泥沙问题,沉沙池只需定期冲沙,因在冲沙时发电用水由渠道直接进入前池,而前池的沉沙作用很小,因此应选择在来水含沙量较小时清理沉沙池,以尽量减少泥沙对机组的磨损。

d. 前池与沉沙池之间的取水侧堰布置需比较确定,侧堰要有足够的宽度,使水流平稳进入前池;侧堰的顶高程布置要比较选定,降低堰顶高程可增加前池的共用部分容积,但需增加沉沙池长度,因此需拟定几组方案进行比选。

白济汛电站水头较高,虽河流泥沙问题不严重,但为保证机组的安全运行,需要设置沉沙池。结合地形、地质条件将沉沙池与压力前池结合布置在渠道末端的优点是比较明显的,对于节约投资,提高沉沙效果及电站运行是有利的。对于小流量、高水头的电站沉沙池及压力前池设计有一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] SL269-2001,水利水电工程沉沙池设计规范[S].
[2] SL/T205-97,水电站引水渠道及前池设计规范[S].
(收稿日期 2007-07-16 编辑 方宇彤)

(上接第 86 页)

3.4 结 论

通过以上对施工过程中原位观测资料的分析,可以看出塑料排水板能够有效地加速超孔隙水压力的消散,提高地基土强度,其加固深厚软基的作用十分明显。在施工过程中可采用地表沉降速率指标、水平位移速率指标和孔隙水压力指标综合确定加载速率,以确保地基的稳定。加载控制指标建议值见表 3。

表 3 加载控制指标

加载时断面高程 (相对高程)/m	一次加载 厚度/m	地表沉降速率/ (mm·d ⁻¹)		水平位移 速率 A/ (mm·d ⁻¹)	孔隙水 压力系 数 B	停荷 期/d
		何时停止 加载	何时 加载			
<3.0	≤2.0	M>30	N<10	<4	<0.6	30~60
约4.0	≤1.5	M>30	N<10	<4	<0.6	40~60
约4.8	≤1.3	M>20	N<5	<4	<0.6	45~60
约5.6	≤1.2	M>20	N<5	<4	<0.6	45~60
约6.2	≤1.0	M>20	N<5	<4	<0.6	≥50
>7.0	≤1.0	M>15	N<5	<4	<0.6	≥60

注:M为连续3天的平均沉降速率,N为连续5天的平均沉降速率。

加载速率的控制与地基土的性质、加载方式等因素有关,在实际施工与观测中,若有1项指标超出而另外2项未超出,应及时分析原因;若有2项以上

指标同时超出,应暂停施工或采取其他处理措施。只有把各项观测结果综合起来考虑,并注意加载结束后数天内的发展趋势,才能正确地判断地基是否处于危险状态。

4 结 语

原位观测是深厚软基筑堤过程中一个重要的环节,通过对观测资料的分析可以了解软基固结情况和强度增长情况,同时观测资料也是完善设计和指导施工的依据。笔者在对温州半岛浅滩一期工程原位观测资料分析的基础上,提出了采用地表沉降速率指标、水平位移速率指标和孔隙水压力指标综合确定加载速率的方法来控制地基的稳定。该方法能有效地调整施工进度,保障工程的安全。

参考文献：

[1] 浙江省水利厅.浙江省海塘工程技术规定[R].杭州:浙江省水利厅,1999.
[2] 《地基处理手册》(第二版)编写委员会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:55-58.
[3] JTJ017-96,公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].

(收稿日期 2007-02-12 编辑 骆超)