

淮河入海水道淤土段堤防工程施工速率控制分析

王文红,石建华

(江苏省水利勘测设计研究院有限公司,江苏 扬州 225009)

摘要 介绍淮河入海水道淤土段堤防工程的施工概况,采用逐步加高法控制软土地基堤防施工加荷速率,即利用堤防本身的质量作为压载,分级逐渐施加荷载,使软土地基强度逐渐适应上部荷载的增加,最后加至设计高度。根据太沙基一维固结理论,采用有效固结压力法推算软土地基因固结而增长的强度,通过计算分析确定采用逐步加高法施工的分级荷载和加荷时间,并利用堤防施工期的实测数据分析了计算成果的合理性。

关键词 软土地基 堤防施工 加荷速率 淮河入海水道

中图分类号:TV871

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2009)02-0048-04

Construction speed control analysis of the dike project in Huaihe River Sea-entering Channel silted section//WANG Wen-hong¹, SHI Jian-hua²(*Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China*)

Abstract :The construction of the dike project in the Huaihe River sea-entering channel silted section is introduced. The gradual reinforcing method is adopted to control the rate of loading on a soft land base in the dike construction project. That is, using the dead weight of the dike as a pressure load, the load is applied gradually, which allows the foundation intensity to bear the increasing load until it arrives at the design elevation. According to Terzaghi's one-dimensional consolidation theory, and using the effective consolidation pressure technique, the intensity increase of the soft land base due to consolidation is calculated. The gradual load increase and the load time of the gradual reinforcing method are determined through calculation and analysis. Meanwhile, the rationality of the calculation results is analyzed through measured data from the dike construction period.

Key words :soft soil foundation; dike construction; loading speed; Huaihe River Sea-entering Channel

近几年,深厚软黏土堤基的处理方法有:采用铺垫透水材料加速排水和扩散应力、在堤脚外设置压载、打排水井或塑料排水带、放缓堤坡、控制施工加荷速率等。

淮河入海水道近期河道工程在深厚软淤土上筑堤,堤长达 48 km,地基中淤泥质粉质黏土层厚度在 5~30 m 不等,堤身填筑高度 8~9 m,根据技术经济比较,确定采用在堤脚外设置压载和控制施工加荷速率相结合的方案进行堤基处理。该工程 1999 年度工程(江苏阜宁淤土段)北堤于 2000 年 8 月中旬开始填筑,历时 2 年施工结束,实测堤身沉降满足规范要求,于 2003 年 6 月通过验收。在 2003 年和 2007 年汛期经受了 2 次行洪考验,大堤安然无恙,说明工程施工采用的堤基处理方案是切实可行的。本文以该段北堤为例对堤防施工加荷速率控制分析作简要介绍。

1 工程概况

淮河入海水道近期河道工程 1999 年度工程设计范围为:桩号 90+493(大沙河)~桩号 100+953(跃进河),全长 10.46 km,工程内容包括南、北泓道开挖和南、北堤填筑,其中南堤利用苏北灌溉总渠北堤加高增厚,北堤为新筑堤,堤身填筑高度约 7.8 m。该段河道工程地质条件较差,全线地面以下 2.0 m 左右普遍分布淤泥质粉质黏土(3-1 层),层厚 5~16 m,黏聚力 $c = 13 \sim 15$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 3^\circ \sim 6^\circ$,抗剪强度极差。根据堤防稳定计算分析和堤基处理方案比较,设计采用在堤脚外设置压载平台和控制施工加荷速率相结合的方案进行堤基处理,以确保堤防在施工期和应用期的稳定。

2 堤防施工加荷速率控制分析

该工程堤防施工采用逐步加高法控制加荷速率,即利用堤防本身的质量作为压载,分级逐渐施加

荷载,使软土地基强度既逐渐适应上部荷载的增加,又不发生剪切蠕动,最后加至设计高度,缓慢地提高堤基的抗剪强度。

2.1 由固结引起的基础强度增长分析

根据土力学理论,正常固结的地基土往往是在 K_0 条件下固结(K_0 为静止侧压力系数),即固结在 $\sigma_1' = p_0$ 和 $\sigma_3 = K_0 p_0$ 条件下(p_0 为地基土的自重应力),这种受力条件和变形条件与单向压缩试验中的条件是完全相当的。于是,地基内某一深度处的原位应力状态可用图 1 中的应力圆表示。原点与这种应力圆顶点的连线即 K_0 线。其斜率等于 $(1 - K_0)/(1 + K_0)$,与自重应力 p_0 无关。可见,土在缓慢沉积过程中的有效应力路径将从原点开始沿 K_0 线进行。由于在 K_0 条件下土不可能发生剪切破坏,故 K_0 线总是位于 K' 线(破坏线)之下。

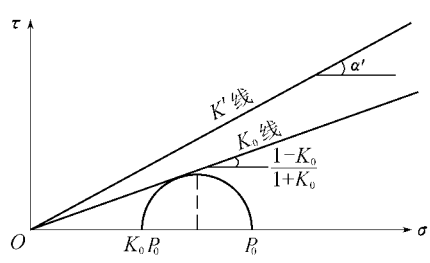


图 1 地基原位应力状态示意图

在不固结不排水条件下,由外荷载引起该深度处土剪切破坏时的大、小主应力增量分别为 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$,用常规三轴试验来模拟的话,其剪切破坏的总应力路径将从图 2 所示的 A 点开始,沿水平线至 B 点,再由 B 点沿直线至 C 点。剪切破坏的有效应力路径将从 A 点开始,沿曲线至 C' 点。

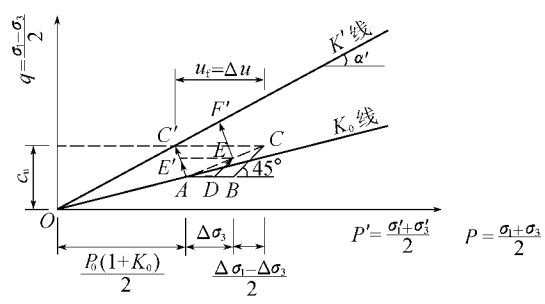


图 2 不固结不排水条件下的有效应力

如果由外荷载引起的上述大、小主应力增量分级施加,则总应力路径将从图 2 所示的 A 点开始沿水平线至 D 点,再由 D 点沿直线至 E 点;而有效应力路径将从 A 点开始,沿曲线至 E' 点。显然,这时土内的剪应力小于它的强度,土不会被剪切破坏。如果允许土在外应力不变的条件下排水固结,则有效应力路径将从 E' 点沿水平线至 E 点。当土处在 E 点位置,再在不排水条件下使其受剪切破坏时,则有效应力路径将从 E 点开始沿曲线至 F' 点剪切破

坏。 F' 点比 C' 点所在位置高,意味着土经过一阶段的排水固结后其不排水强度将有所增加。所以,为弥补软黏土地基强度的不足,采用分期施工的办法常常是有效的。

2.2 地基抗剪强度增长的预计

在软土地基上筑堤,随着荷载的增加,地基中剪应力也在增大,在一定条件下由于剪切蠕动可能导致地基抗剪强度的衰减,又由于地基的排水固结,抗剪强度随时间而增长,因此,地基中某一点在某一时间的抗剪强度可表示为^[1]

$$\tau_f = \tau_{f0} + \Delta\tau_{fc} - \Delta\tau_{fr} \quad (1)$$

式中: τ_{f0} 为地基中某点在加荷之前的天然抗剪强度; τ_{fc} 为由于固结而增长的抗剪强度增量; τ_{fr} 为由于剪切蠕动引起的抗剪强度衰减量。

由于 $\Delta\tau_{fr}$ 目前尚难计算,为了考虑其效应,将式(1)改写为

$$\tau_f = \gamma(\tau_{f0} + \Delta\tau_{fc}) \quad (2)$$

由有效固结压力法推算得

$$\Delta\tau_{fc} = \Delta\sigma_e U \tan\varphi_{cu} \quad (3)$$

式中: $\Delta\sigma_e$ 为固结压力增量; U 为地基中某点的固结度,设可用平均固结度代替,在分级荷载下 U 用改进的太沙基公式求解^[2]; φ_{cu} 为内摩擦角,取用固结快剪指标。

2.3 北堤填筑总工期的确定

该工程在初步设计阶段委托南京水利科学研究所土工研究所对淤土段堤防筑堤技术进行专题研究,通过采用比奥固结理论对堤身及堤基进行有效应力应变分析,结果表明,当堤防填筑时间为 24 个月时堤基中基本不存在塑性破坏区,因此,该工程北堤填筑时间控制为 2 年。

2.4 北堤分级加荷荷载值的确定

2.4.1 第 1 级容许施加荷载计算

北堤各土层物理力学性指标见表 1,根据 GB 50286—98《堤防工程设计规范》^[3],在天然软土地基上用连续施工方法修筑土堤时,其第 1 次容许施加的荷载计算公式为

$$p_1 = 5.52 \frac{C_u}{k} \quad (4)$$

式中: p_1 为容许施加荷载,kPa; C_u 为天然地基不排水剪强度,由无侧限三轴不排水剪试验或原位十字板剪切试验测定,kPa; k 为安全系数,宜采用 1.1~1.5,该工程取 1.1。

根据北堤堤基土抗剪强度指标计算,北堤填筑第 1 次容许施加的荷载为 65.24 kPa。

2.4.2 剪切蠕动折减系数 η 的取用

根据资料统计,在工程设计中一般采用的剪切

表 1 北堤各土层物理力学性指标

土层号	土质	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比	抗剪强度指标			压缩系数/ MPa^{-1}	渗透系数/ $(cm \cdot s^{-1})$
				试验方法	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$		
1-2	重黏土	1.86	1.04	直接快剪	26	12	0.44	
3-1	淤泥质粉质黏土	1.71	1.45	直接快剪	13	3	1.1	3.0×10^{-7}
3-1	淤泥质粉质黏土	1.71	1.45	固结快剪	12	10	1.1	3.0×10^{-7}
3-1	细砂夹层	1.98	0.67	直接快剪				3.3×10^{-4}
4-1'	细砂	1.99	0.66	直接快剪	6	31		4.7×10^{-4}
4-1	粉质黏土	1.96	0.81	直接快剪	32	14	0.18	

蠕动折减系数 $\eta = 0.75 \sim 0.9$ 。一般而言,土的塑性指数越大、含水量越高,则其蠕变性越显著,强度降低也越多。在该工程设计中,考虑到施工期内地基的塑性变形范围很小,且设置了压载平台,对地基的稳定较有利,因此选用较高值 $\eta = 0.9$ 。

2.4.3 北堤各分级荷载计算

2.4.3.1 各分级荷载及加荷时间假定

该工程北堤堤基平均地面高程为 2.5 m,北堤设计堤顶高程为 10.23 ~ 10.29 m,平均填筑高度约 7.8 m。根据填筑高度假定北堤分 4 级荷载逐步加载。为确保堤防施工期稳定,设计要求每级荷载逐步匀速施加,各级荷载之间应停歇 1 ~ 2 个月或更长时间,待地基沉降相对稳定后再继续往上填筑,直至填筑至设计高度。各分级荷载及加荷时间假定见表 2。

2.4.3.2 北堤各分级荷载计算

图 3 为北堤 CS90 + 616 附近堤基地质剖面图。以该剖面土层分布进行分析计算。地基中软黏土层层面高程为 0.26 m,取土层厚度 $H = 16$ m。软黏土的初始孔隙比 $e_1 = 1.45$,压缩系数 $a_v = 1.1 MPa^{-1}$,竖向平均渗透系数 $k = 3.1 \times 10^{-7} cm/s$,直接快剪抗

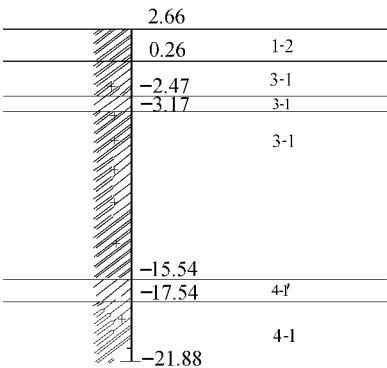


图 3 北堤地质剖面图(单位:m)

剪强度指标为黏聚力 $c = 13 kPa$,内摩擦角 $\varphi = 3^{\circ}$ 。固结快剪抗剪强度指标为黏聚力 $c = 12 kPa$,内摩擦角 $\varphi = 10^{\circ}$ 。根据式(1)~(3)计算,北堤各级荷载加荷起始时地基土的抗剪强度和各分级荷载见表 2。

从表 2 可以看出,除第 1 级荷载假定值小于计算值外,其余各级荷载假定值和计算值较接近;至 2 年施工期结束时,各级荷载对地基土的累计固结度为 67%,即堤基完成总固结沉降的 67%,与南京水利科学研究院的分析结果较一致。通过计算分析,说明北堤各分级荷载和加荷时间假定基本合理,设计最终按表 2 所列北堤各分级荷载及加荷时间假定值提供给施工方指导施工。北堤设计断面、分期施工及竣工断面见图 4。

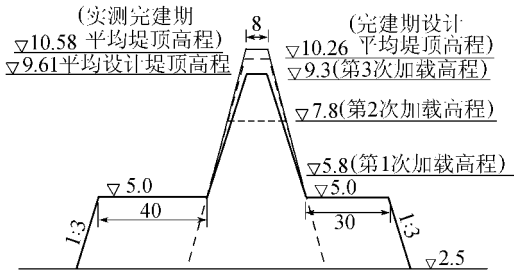


图 4 北堤设计断面、分期施工及竣工实测断面示意图(单位:m)

3 控制施工速率的措施

在该工程堤防设计中除提出各分级荷载加荷时间外,还对施工方提出堤防沉降及水平位移观测要求,要求在堤身及堤坡布置沉降观测设施,并在堤身坡脚处及其附近沿纵向设置 2 ~ 3 排边桩,通过观测施工过程中的堤防侧向水平位移和沉降速率,监视地基的稳定性,以控制加荷速率。根据 SL 260—98

表 2 北堤填筑各分级荷载计算成果

加荷分级	假定堤防分级填筑高度/m	假定分级荷载 $\Delta P_n/kPa$	各级荷载始终时间 $t_{n-1} - t_n/月$	本级荷载的地基平均固结度/%	$\frac{\Delta P_n}{\sum \Delta P}$	各级荷载下地基土的累计固结度/%	地基土的 τ_f/kPa	分级荷载计算值/ kPa
I	3.3	62.7	0 ~ 6	34	0.423	15	15.38	77.20
II	2.0	38.0	8 ~ 12	32	0.256	32	19.09	33.10
III	1.5	28.5	14 ~ 18	32	0.192	51	25.84	28.99
IV	1.0	19.0	20 ~ 24	32	0.128	67	29.76	20.12
合 计	7.8	148.2	24					

《堤防工程施工规范》^[4],设计要求控制堤身沉降速率小于或等于 10 mm/d、水平位移小于或等于 5 mm/d。

4 实测沉降、水平位移资料统计分析

4.1 施工期地基稳定分析

该工程施工方根据设计要在北堤和南堤分别布置了沉降和水平位移观测设施,其中 CS90 + 616 ~ 92 + 973 段北堤共布置 6 个断面,断面间距约 500 m,该段堤防堤基软黏土土层厚约 11 ~ 16 m。根据施工方提供的该段北堤沉降观测资料统计,施工期北堤堤顶中心点日最大沉降量为 5.3 ~ 7.95 mm,坡脚处日最大水平位移量为 3.7 ~ 5.1 mm(见表 3),基本控制在规范允许值范围内,说明在堤防施工期间堤基处于稳定状态。

表 3 北堤沉降水平位移观测资料统计

断面号	堤面 高程/ m	日最大 沉降/ mm	断面号	堤面 高程/ m	日最大 水平位移/ mm
90 + 616	6.31	5.70	90 + 616	4.82	4.50
90 + 986	5.72	5.71	90 + 986	4.30	3.70
91 + 482	5.82	6.20	91 + 482	5.82	3.78
91 + 964	8.40	7.95	91 + 964	5.30	4.80
92 + 478	6.45	5.30	92 + 478	5.20	3.40
92 + 973	5.19	6.66	92 + 973	4.90	5.10
平均值	6.32	6.25	平均值	5.06	4.21

4.2 设计成果合理性分析

据实测资料统计,北堤各级荷载加荷结束时的堤顶中心线位置累计沉降实测值和加荷时间见表 4。根据北堤完建期实测堤顶高程,采用分层总和法计算的北堤最终沉降量平均为 2 025 mm,完建期实测堤基沉降量占最终沉降量的 66.6%,与本文分析计算成果较接近。根据施工方提供的资料,第 1 级荷载加荷时间之所以延长至 9 个月,是因为当时阴雨天较多,两侧压载平台的土料含水量太高,翻晒土料花费的时间比计划多得多,导致堤身填筑速度较计划延迟了 3 个月。除去该因素,各级荷载实际加荷时间和设计加荷时间相比差别不大。总体说来,北堤分级加荷控制施工速率设计较合理,对工程施工起到了指导作用。

表 4 各级荷载实际加荷时间和累计实测沉降统计

平均堤顶 高程/m	分级填筑 高度/m	分级荷载/ kPa	累计实测 沉降/mm	平均加载 时间/月
5.83	3.33	63.27	382.24	0 ~ 9
7.89	2.06	39.14	798.48	10 ~ 15
9.22	1.33	25.27	1 154.92	17 ~ 21
10.58	1.36	25.84	1 348.82	22 ~ 24

5 结 语

淮河入海水道淤土段堤防的施工充分说明软土

地基上的堤防采用逐步加高法进行施工是切实可行的,在该工程堤防施工速率控制设计中,尚有以下几点值得进一步总结、研究:

a. 在采用有效固结压力法计算地基固结而引起的抗剪强度增长值时,反映地基剪切蠕变对强度影响的折减系数 η 的取用非常重要。根据有关资料统计,剪应力越大,剪切蠕动的效应就越显著, η 值随着荷载和时间的增加而逐渐减小。在该工程设计中,无法精确地取用 η 值,一律取用 0.9,未考虑剪应力、荷载和时间的影 响,尽管施工过程中的实测资料分析表明计算结果较合理,但在今后的类似工程设计中如何合理采用 η 值,尚需根据同类工程设计经验做进一步研究。

b. 地基土的渗透系数对地基固结度的影响很大,淮河入海水道淤土段的淤泥土层土性复杂,土层中夹有砂性土薄层或透镜体,对地基的排水固结产生有利的作用,因此,在选用土层渗透系数时考虑了淤泥土层中砂性土夹层对排水固结的影响,采用成层土垂直向平均渗透系数进行计算。根据实测资料分析,计算结果是合理的,由此可见,在分析地基的固结度时淤泥土层中薄砂夹层的排水作用不可忽视。

c. 设计中要求施工方在施工过程中通过沉降、水平位移观测监视地基的稳定性来控制加荷速率至关重要,可有效地防止堤基在加荷过程中出现过大的瞬时沉降所造成的堤基失稳。

参考文献:

[1] 曾国熙,卢肇钧,蒋国澄,等.地基处理手册[M].北京:中国建筑业出版社,1988.
[2] 华南工学院,南京工学院,浙江大学,等.地基及基础[M].北京:中国建筑业出版社,1981.
[3] GB 50286—98 堤防工程设计规范[S].
[4] SL260—98 堤防工程施工规范[S].

(收稿日期 2008-06-04 编辑:高建群)

· 简讯 ·

万家寨引黄入晋工程北干线开工建设

2009 年 2 月 27 日,山西万家寨引黄入晋工程北干线全面开工建设。北干线是万家寨引黄入晋工程的重要组成部分,工程从山西忻州市偏关县下土寨分水闸起,经平鲁、朔州、山阴、怀仁至大同南郊区墙框堡水库,线路总长 161.1 km,设计年引水 5.6 亿 m³,近期年引水规模 2.96 亿 m³。工程概算投资 48.6 亿元。北干线引水工程将于 2011 年通水到山西大同市。工程全部建成后,可有效解决大同、朔州 2 市的缺水问题,满足工业用水和 450 万人口的生活用水。

(本刊编辑部供稿)