



# 某深水斜坡式防波堤施工中 预留沉降的计算方法

罗柳, 齐应明, 谭永安, 唐如蜜  
(中交二航局第一工程有限公司, 湖北武汉430012)

**摘要:** 为了较好地控制防波堤预留沉降, 分别对基础和堤身在不同时期的沉降量进行了详细的计算, 并在施工过程中时时观测沉降情况, 根据理论计算并结合沉降观测数据, 对防波堤预留沉降进行分阶段控制。结果显示沉降数据与理论计算相吻合。

**关键词:** 预留沉降; 斜坡式防波堤; 沉降计算; 沉降曲线

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0193-05

## Settlement reservation calculation in construction of deepwater sloping breakwater

LUO Liu, QI Ying-ming, TAN Yong-an, TANG Ru-mi

(No.1 Engineering Company Ltd. of CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan 430012, China)

**Abstract:** In order to control the breakwater settlement reservation better, we calculate the settlement of the foundation and embankment in different periods and the settlement in the construction process at all times. According to the theoretical calculation and observation data of settlement, we control the settlement reservation in stages. The result shows that the settlement data coincides with the theoretical calculation.

**Key words:** settlement reservation; sloping breakwater; settlement calculation; settlement curve

### 1 工程简介

某深水斜坡式防波堤堤长1 880.4 m, 典型断面见图1。

本工程所在海域的海底覆盖层厚度变化较大, 近岸区基岩裸露, 深水区覆盖多种土层, 局部地质变化大; 主要土层是: ①<sub>1</sub>淤泥、①<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土、①<sub>3</sub>粉质黏土、①<sub>4</sub>中粗砂、②<sub>1</sub>粉质黏土、②<sub>2</sub>粉土、②<sub>4</sub>黏土、②<sub>5</sub>中粗砂混黏性土、③<sub>1</sub>砾质黏性土和④<sub>1</sub>强风化花岗岩。

施工区海流流速较小, 一般都在1 m/s以内。堤心石回填采用水上和陆上同时进行, 其厚度从岸向海4~26 m逐渐增加。堤心石推填完成半年后, 胸墙施工从岸向海逐段进行浇筑。

### 2 防波堤预留沉降量的控制原则

防波堤预留沉降量由堤身预留沉降量和地基预留沉降量两部分组成。

对于防波堤基础沉降, 采用分层总和法计算地基最终沉降量, 通过计算固结度来确定地基在某一阶段已完成的沉降量和需预留的沉降量。对于堤身沉降, 因涉及因素较复杂, 理论计算方式很多, 施工规范又未统一, 各种计算结果相差较大。本工程采用理论计算与施工经验相结合的方式, 以确定堤身在某一阶段的预留沉降量。

本防波堤预留沉降分两次进行, 在堤心石陆上推填至顶面时通过提高堤心石高程进行第一次预留; 在浇筑防浪胸墙底板前通过对测量数据、

收稿日期: 2012-02-15

作者简介: 罗柳(1977—), 男, 工程师, 从事港口和海岸工程施工。

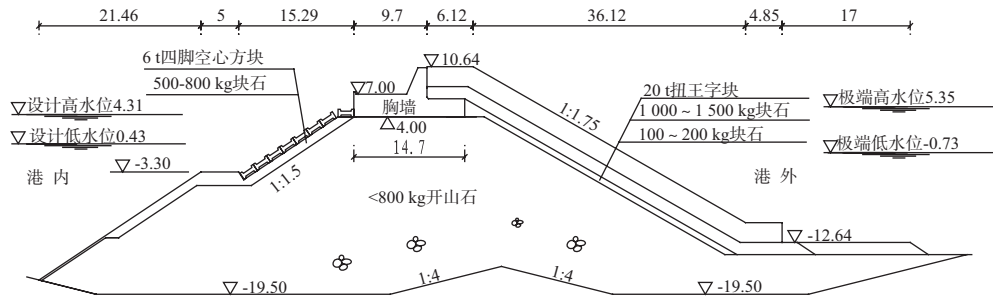


图1 典型断面

理论计算、施工经验、施工情况等各方面综合分析，再次调整堤心石高程，进行第二次预留<sup>[1]</sup>。

堤心石出水后沿堤顶轴线每50m设1个沉降观测点，每10d进行一次沉降观测，以掌握沉降情况<sup>[2]</sup>。

### 3 地基最终沉降量及预留沉降量计算

本工程堤身成形主要经历了3个阶段，依次是：堤心石水下抛填至-4.8m，陆上推填堤心石至4.0m，胸墙浇筑。计算中考虑该3种工况下对地基预留沉降量的影响。

#### 3.1 计算程序

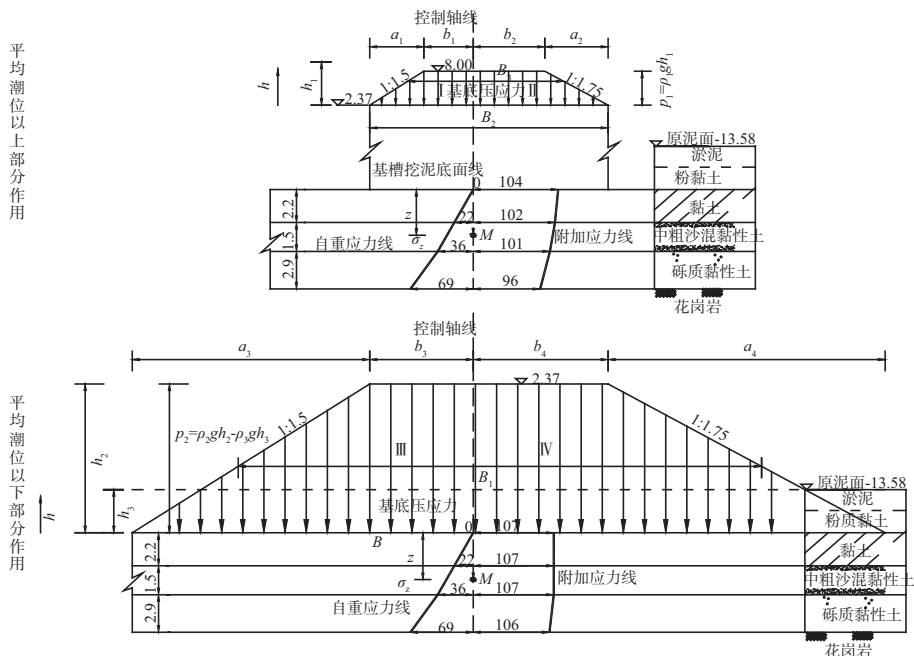
画出计算受力简图→地基分层→计算附加应力→计算基础分层下沉量和总下沉量→查修正系数并进行修正→计算固结度→计算剩余下沉量即

预留沉降量。

#### 3.2 斜坡堤地基最大沉降量计算

##### 3.2.1 斜坡堤成形后计算模式

控制轴线处地基应力主要是由土体自重应力和土体上部附加应力组成。本工程条件下，地基应力在较小范围以内 $e-p$ 曲线接近一条直线，压缩模量 $E_s$ 取0.1~0.2MPa对应的值；按照土力学分层总和法计算沉降量。假定地基为条形柔性基础，按设计最高水位和最低水位的平均值2.37m将堤身分成上下两部分（密度不同），每部分从控制轴线分成两块，然后计算每一块引起的地基竖直向下的附加应力，再计算每一层的沉降量，最后叠加起来为总的计算沉降量<sup>[3]</sup>。现取离15#钻孔最近的桩号EK1+056.5(F52#)为例，应力分布见图2。



注： $h_1$ 为平均潮位以上部分有效高度， $h_1$ 取5.13m； $h_2$ 为平均潮位以下部分堤身高度； $h_3$ 为挖泥厚度； $p_1$ 为平均潮位以上部分引起地基最大竖向应力； $M$ 为控制轴线下地基中任意一点； $\sigma_z$ 为 $M$ 点附加应力； $z$ 为基底到 $M$ 点的竖向距离； $\rho_1$ 为平均潮位以上部分加权密度； $\rho_2$ 为平均潮位以下部分堤身浮密度， $\rho_2=0.65 \text{ t/m}^3$ ； $\rho_3$ 为基槽挖泥部分浮密度， $\rho_3=0.77 \text{ t/m}^3$ ； $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ 为断面尺寸； $B$ 为基底宽， $B_1$ 为下部分对应于高度 $h$ 的堤身宽度， $B_2$ 为上部分底宽， $B_3$ 为上部分对应于 $h$ 的堤身宽度。

图2 EK1+056.5(F52#)应力分布

### 3.2.2 控制轴线处地基附加压应力的计算

1) 由平均潮位以上部分引起控制轴线处基底压应力 $p_1=\rho_1gh_1=115.19$  kPa。

2) 由平均潮位以下部分引起控制轴线处基底压应力 $p_2=\rho_2gh_2-\rho_3gh_3=95.9$  kPa。

3) 控制轴线处地基附加压应力:

$$\sigma=K_z p \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ 为控制轴线处地基附加压应力 (kPa);  $p$ 为为控制轴线处基底压应力 (kPa);  $K_z$ 为竖直附加应力系数, 在图3中查取。

### 3.2.3 控制轴线处地基沉降量计算

根据土力学的分层总和法的原理计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{m_s a_i (p_{2i} - p_{1i})}{1 + e_{1i}} H_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_s \Delta \sigma}{E_{si}} H_i \quad (2)$$

式中:  $S$ 为控制轴线处地基最终沉降量;  $m_s$ 为沉降计算经验系数;  $a_i$ 为压缩系数;  $p_{1i}$ 为第 $i$ 分层在建筑物建造前, 地基中的应力(平均自重应力);  $p_{2i}$ 为第 $i$ 分层在建筑物建造后, 地基中的应力(平均自重应力和平均附加应力之和);  $\Delta \sigma=p_{2i}-p_{1i}$ , 即为平均

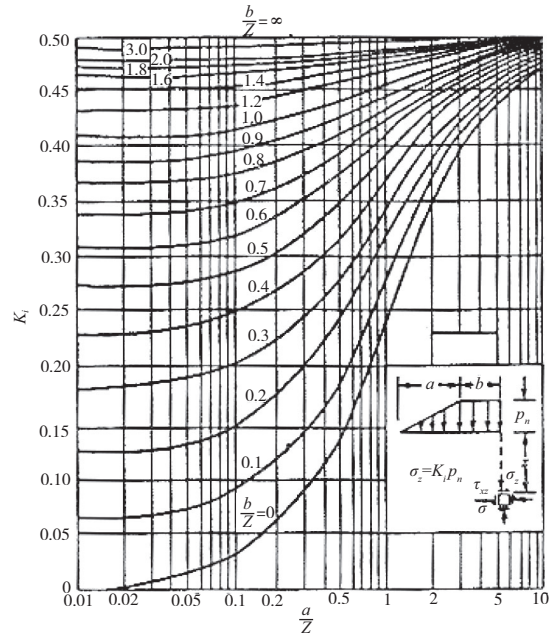


图3 梯形分布压力下的附加应力系数

附加压应力;  $H_i$ 为第 $i$ 分层的厚度, 取 $H_i$ 为每层土层的厚度(表1);  $e_{1i}$ 为相应于 $p_{2i}$ 时的孔隙比;  $n$ 为压缩层范围内土层分层数目, 压缩层范围取强风化花岗岩以上所有土层;  $E_{si}$ 为压缩模量。地基最终沉降量 $S_1$ 见表1。

表1 地基最终沉降量 $S_1$ 计算参数

桩号 (钻孔号)	部位	岩土分层	层厚 $H_i/m$	层底附加 应力 $\sigma_1/kPa$	层顶附加 应力 $\sigma_2/kPa$	压缩模量 $E_i/MPa$	修正 系数 $m_s$	每层 沉降量/m	沉降 总量 $S_1/m$
EK1+056.5 (52#)	上部分	② <sub>1</sub>	2.2	114.04	115.19	7.7	0.8	0.026 2	0.055 7
		② <sub>5</sub>	1.5	111.73	114.04	22.0	0.2	0.001 5	
		③ <sub>1</sub>	2.9	105.97	111.73	25.0	0.2	0.002 5	
	下部分	② <sub>1</sub>	2.2	95.88	95.88	7.7	0.8	0.021 9	
		② <sub>5</sub>	1.5	95.88	95.88	22.0	0.2	0.001 3	
		③ <sub>1</sub>	2.9	94.92	95.88	25.0	0.2	0.002 2	

### 3.3 堤心石推填至顶面时地基预留沉降量计算

1) 堤心石出水前抛填高程为-4.8 m, 同3.2计算原理计算-4.8 m高程堤心石作用下地基可发生的最大沉降量 $S_2$ 。

2) 根据固结度计算堤心石出水前地基完成的沉降量<sup>[3]</sup>。

地基土固结度:

$$U_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 T_v}{4}\right) \quad (3)$$

式中:  $U_z$ 为固结度;  $T_v$ 为竖向固结时间因数,  $T_v=C_v t/H^2$ , 其中 $C_v$ 为竖向固结系数,  $t$ 为时间,  $H$ 为

压缩土层最远的排水距离, 本工程为单向排水; 水上抛石与陆上推填时间差为半年左右, 所以 $t=182$  d。

3)第一次地基预留沉降量为:

$$S_{i1}=S_1-U_z S_2 \quad (4)$$

堤心石推填至顶面时地基预留沉降量计算参数见表2。

### 3.4 浇筑胸墙底板时地基预留沉降量计算

1) 堤心石设计顶高程为4.0 m, 同3.2计算原理计算堤心石出水后至浇筑胸墙期间地基可发生的最大沉降量 $S_3$ 。

2) 堤心石推填到堤顶后至浇筑胸墙时隔半年

表2 堤心石推填至顶面时地基预留沉降量计算参数

桩号(钻孔号)	岩土分层	竖向排水距离H/m	竖向固结系数 $C_v/(10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	固结度 $U_z$	沉降 $S_1/\text{cm}$	沉降 $S_2/\text{cm}$	每层剩余沉降量 $(S_1 - U_z S_2)/\text{cm}$	预留沉降量 $s_{i1}/\text{cm}$
EK1+056.5 (52#)	② <sub>1</sub>	2.20	1.4	0.74	4.81	2.23	3.17	
	② <sub>5</sub>	3.70	1.8	0.51	0.28	0.13	0.22	3.76
	③ <sub>1</sub>	6.60	4.2	0.44	0.47	0.23	0.37	

左右,因此第二次地基预留沉降量为:

浇筑胸墙底板时地基预留沉降量计算参数见表3。

$$S_{i2} = S_1 - U_z S_2 - U_z S_3 \quad (5)$$

表3 浇筑胸墙底板时地基预留沉降量计算参数

桩号(钻孔号)	岩土分层	竖向排水距离H/m	竖向固结系数 $C_v/(10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	固结度 $U_z$	沉降 $S_1/\text{cm}$	沉降 $S_2/\text{cm}$	沉降 $S_3/\text{cm}$	每层剩余沉降量 $(1 - U_z S_2 - U_z S_3)/\text{cm}$	预留沉降量 $S_{i2}/\text{cm}$
EK1+056.5 (52#)	② <sub>1</sub>	2.20	1.4	0.74	4.81	2.23	3.58	0.54	
	② <sub>5</sub>	3.70	1.8	0.51	0.28	0.13	0.21	0.11	0.86
	③ <sub>1</sub>	6.60	4.2	0.44	0.47	0.23	0.36	0.21	

#### 4 斜坡堤堤身最终沉降量及预留沉降量计算

$$S = a_v \sigma h_2 \quad (6)$$

##### 4.1 计算堤身最终沉降量

根据《海港工程设计手册》的要求:抛石基床应预留沉降量,对于不夯实基床,除地基沉降量之外,尚应预留由基础压缩引起的沉降量。基床压缩沉降量按下式计算<sup>[4]</sup>:

式中:  $S$ 为基床压缩沉降量(m); $\sigma$ 为建筑使用时期的最大平均压应力(kPa); $a_v$ 为抛石基床的压缩系数,一般采用 $0.0005 \text{ kPa}^{-1}$ 。

利用积分法计算沉降量,得到平均潮位以上部分堤身沉降:

$$S_4 = 0.0005 \int_0^{1.63} \left[ \frac{4 \times 22 \times \frac{(b_1 + b_2 + 31.34)}{2}}{B_2 - 3.25h} + \frac{16.5 \times (1.63 - h) \times \frac{(B_2 - 3.25h + 31.34)}{2}}{B_2 - 3.25h} \right] dh = 0.063 \text{ m} \quad (7)$$

平均潮位以下部分堤身沉降:

$$S_5 = 0.0005 \int_0^{h_2} \left[ \frac{P_1 \frac{(b_3 + b_4 + B_2)}{2}}{B - 3.25h} + \frac{\rho_2 g (h_2 - h) \frac{b_3 + b_4 + B - 3.25h}{2}}{B - 3.25h} \right] dh = 0.01832 \times [(h_2 - 37.11) + 15.32 \ln(11.27 + h_2)] + 0.00082h_2^2 \quad (8)$$

下沉率:

$$\gamma = \frac{0.063 + 0.01832 \times [(h_2 - 37.11) + 15.32 \ln(11.27 + h_2)] + 0.00082h_2^2}{h_2 + 1.63} \quad (9)$$

结论:下沉率 $\gamma$ (堤身沉降量/堤身抛石高度)是关于 $h_2$ 的递增函数;从EK0+000~EK1+880.4,  $\gamma=4.0\% \sim 5.1\%$ 。

##### 4.2 计算堤身两次预留沉降量

4.1中计算了堤身最终沉降量。因堤身出水前,无法对施工中的沉降进行实测,所以本工程堤身下沉预留值根据以往施工经验,主要以三亚某防波堤堤身沉降观测数据作参考。

堤心石水上抛填到陆上推填间隔半年,期间堤身下沉度为20%;陆上推填至浇筑胸墙底板间隔半年,期间堤身下沉度为20%。(下沉度为某时间段内堤身沉降量与堤身最终沉降量的百分比)。那么第一次堤身预留沉降量为:

$$S_{d1} = (1 - 20\%) \gamma (h_1 + h_2) \quad (10)$$

第二次堤身预留沉降量为:

$$S_{d2} = (1 - 20\% - 20\%) \gamma (h_1 + h_2) \quad (11)$$

### 4.3 两次总预留沉降控制

第一次总预留沉降量为:

$$S_{\text{总}1} = S_{i1} + S_{d1} \quad (12)$$

第二次总预留沉降量为:

$$S_{\text{总}2} = S_{i2} + S_{d2} \quad (13)$$

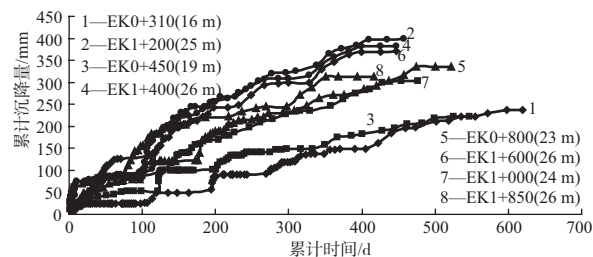
通过堤心石出水后的沉降曲线,看出陆上推填至浇筑胸墙底板期间堤身下沉度与计算基本吻合。所以在浇筑胸墙底板时只需对堤顶表面小范围调整。

## 5 结语

1) 本工程通过准确计算地基预留沉降量及堤身最终沉降量,同时结合以往施工经验取两时刻堤身下沉度以计算预留沉降量的方法攻克了斜坡式防波堤沉降控制国内难题。

2) 图4为本防波堤堤身出水后8个不同桩号的实测沉降与时间关系,根据测量数据分析可知,沉降曲线与理论计算相符,说明本工程中预留沉降量取值是合理的。

3) 堤身沉降受外部荷载、石料级配、潮位等各种因数影响,堤身未出水前的沉降量难以实测,所以要控制好防波堤沉降预留值,不仅要准确计算还需要坚持不懈的测量,通过长期的沉降



注: EK\*+\*\*\*(\*), 括号以外的内容代表里程桩号, 括号以内代表堤身抛石厚度。

图4 实测沉降量与时间关系

观测进行反推、类推。斜坡堤沉降长期存在,而且每个工程的施工情况不同,很难找到与该工程一致的沉降曲线作参考;从技术的角度考虑,在预留沉降时,应遵循宁高勿低、勤测量、根据测量数据及时调整的原则。

### 参考文献:

- [1] 李志勤,潘伟.黄骅港南防波堤工程沉降分析及预留施工[J].港口技术,2002(6):37-38.
- [2] 蒋凯辉,张宏武,王春柱,等.某深水防波堤施工中的预留沉降控制[J].水运工程,2009(1):85-89.
- [3] 雷伟.土力学[M].长春:吉林科学技术出版社,2004.
- [4] 交通部第一航务工程勘察设计院.海港工程设计手册[M].北京:人民交通出版社,2001.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第184页)

2) 从监测数据看,试验区沉降速率衰减较快,满载50 d后,沉降速率满足卸载要求,其原因主要与本地区高渗透软土地基中含砂夹层多、渗透系数大的特性有关,说明直排式真空预压法加固此类软土地基可大大的缩短工期。

3) 检测效果显示,处理后容许承载力均超过了120 kPa,各主要加固土层的物理力学指标均得到了改良:含水率平均减幅为18.9%,重度平均增加3.6%,孔隙比平均减幅为14.8%,压缩系数平均减幅为41.5%。

4) 试验证明,直排式真空预压法取消了中粗砂水平排水垫层和滤管、滤膜,将排水板直接和排水管网连接,形成效率更高的真空排水管网,节省了资源,缩短了工期,降低了造价。

### 参考文献:

- [1] 陈允进,夏玉斌,刘健,等.直排式真空预压法加固高粘性超软吹填土室内模型试验研究.水运工程,2011(10):125-131.
- [2] 夏玉斌,陈允进.直排式真空预压法软土地基加固试验与研究[C]//中国土木工程学会港口工程分会技术交流文集,2009.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司.新型软基处理技术应用研究项目总结报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2011.
- [4] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [5] JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S].

(本文编辑 郭雪珍)