

文章编号:1673-9469(2015)03-0055-03

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.03.013

## 深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤沉降分析

崔广强<sup>1</sup>,常方强<sup>2</sup>

(1. 福建农林大学 金山学院,福建 福州 350002; 2. 华侨大学 土木工程学院,福建 厦门 361021)

**摘要:**针对一深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤工程,采用钻探和物探方法检验置换效果,然后现场监测围堤填筑完毕后的沉降,采用 Verhulst 模型预测围堤的最终沉降,最后建立了该类围堤沉降的计算方法,并对实例工程进行计算分析。研究表明,该类围堤底部存在一定深度的泥石混合层和纯淤泥层,导致较长的固结稳定时间和较大的沉降值;围堤填筑完毕后约经历 5 个月沉降才趋于稳定,最终沉降预测值位于 1 366 ~ 1 556 mm 之间;围堤的沉降主要由泥石混合层、淤泥层和下部粉质粘土层的压缩产生,围堤总沉降的计算值与实测结果的推算值较为接近。

**关键词:**爆炸挤淤;沉降;泥石混合;压缩模量;Verhulst

**中图分类号:**TU441.7

**文献标识码:**A

### Settlement analysis of embankment built by toe - shooting method

CUI Guang - qiang<sup>1</sup>, CHANG Fang - qiang<sup>2</sup>

(1. College of Jinshan, Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian Fuzhou 350002, China ; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Fujian Xiamen 362021, China)

**Abstract:** For one embankment built by toe - shooting method at deep mud foundation, drilling and geophysical method were used for detecting the replacement effect, then settlement of the embankment were observed and ultimate settlement was predicted by Verhulst model based on the observed data, finally, the settlement calculation method of embankment was established, and was used the settlement of the embankment. The results show that, there is a certain kind of stone - mud mixed layer and pure mud layer at the bottom of this kind of embankment, and the two layers results in a longer time to consolidate and larger settlement; the settlement of the embankment undergone 5 months to be stable, with ultimate settlement between 1366 - 1556mm; the settlement of embankment is induced by the compression of stone - mud mixed layer, mud layer and silt clay layer, and the total settlement by calculation and prediction are close.

**Key words:** toe - shooting; settlement; stone - mud mixed layer; compression modulus; Verhulst

深厚淤泥地基处理方法中,爆炸挤淤填石法具有施工快速、造价低、处理效果好等优势,在码头、防波堤、护岸和围堰等工程中应用广泛。该法早期处理的淤泥层厚一般不超过 12 m,处理效果良好,但近年来许多工程中需处理的淤泥土层厚度超过了 12 m,如福建沿海海港淤泥厚达 30 m。在深厚淤泥中,该项技术存在一些局限性,深层淤泥不易完全置换,即可能存在一定深度的泥石混合层和纯淤泥层。当淤泥未完全置换时,围堤稳定性较低,施工完毕后,可能产生较大的沉降。目

前的主要研究集中在爆炸挤淤填石的施工技术和筑坝机理方面,其中施工技术已较为成熟,机理研究也做了一些工作<sup>[1-3]</sup>。围堤施工完毕后的稳定性也有学者进行了研究<sup>[4-5]</sup>,文献[6]利用 Plaxis 有限元分析了围堤的沉降,但对于深厚淤泥中的沉降却鲜有研究。本文结合一深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤,探讨该项技术在深厚淤泥中的处理效果,监测围堤挤淤完毕后的沉降,并提出深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤的沉降计算方法,并与实测结果进行比较。

收稿日期:2014-12-27

基金项目:福建省交通科技发展资助项目(201014)

作者简介:崔广强(1980-),男,山东梁山人,硕士,讲师,研究方向为地基与基础工程。

## 1 工程概况

该工程位于福建省福州市连江县境内罗源湾的南岸,淤泥层深厚。考虑到工程施工进度及经济性,围堤采用爆破挤淤填石法处理,其中北围堤、西围堤及部分东围堤地基处理均采用此法。泥面以上围堤高8 m,顶宽9.4 m,采用斜坡堤的结构型式。

该围堤地质条件较差,存在厚达30 m的淤泥层,地层状况为(以泥面为深度零点):①0~3 m,淤泥混砂,灰黄色;②3~30 m,淤泥,深灰色;③30~39 m,粉质粘土,黄褐色,上部夹少量砂土;④39~ ,粉质粘土,夹碎石。其中淤泥的重度为17.0 kN/m<sup>3</sup>,压缩模量为1.7 MPa,内聚力为13 kPa,内摩擦角为2°。粉质粘土的重度为20.0 kN/m<sup>3</sup>,压缩模量为6.6 MPa,内聚力为22 kPa,内摩擦角为15°。

在爆炸挤淤过程中,炸药布设在堤头位置,布药宽度为42 m,药包平均埋深为15 m,药包间距为2 m,单药包重量为36 kg。爆炸挤淤完毕后采用钻探和物探的方法,检验挤淤效果,即填石置换淤泥的深度及程度。经检验,围堤上部完全由填石置换,填石厚度位于23~28 m之间;填石下部为泥石混合层,厚度位于1.4~3.7 m之间,置换率位于25%~65%之间;下部为尚未得到任何置换的纯淤泥层,厚度位于0.7~1.9 m之间。

## 2 沉降监测及预测

### 2.1 沉降监测

相对于一般厚度的淤泥爆炸填石围堤,深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤的底部淤泥往往不能完全置换或得不到任何置换,故通常产生较大的沉降,需要较长的沉降历时。为了明确围堤的沉降特性,掌握沉降时间,为后期施工进行指导,检验设计理论,待围堤爆破挤淤填石完毕后在北围堤主轴线布设测点,用以监测围堤的沉降,测点间距为30 m,共布设了8个测点。监测仪器采用水准仪,型号为DSG320水准仪,置静点位于蛇山之上,X坐标:2 918 672.529,Y坐标:476 572.176。监测频率为每周监测一次,共历时21周。

将不同时间的沉降监测结果绘制于图1中,可以看出,沉降在18周内沉降速率较大,19周后沉降速率趋缓,至第20周时,8个沉降观测点监测

到的沉降量位于1 333~1 537 mm之间。

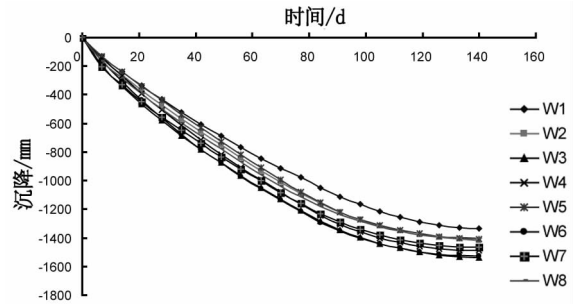


图1 北围堤沉降随时间的变化关系

Fig.1 The relationship between settlement and time of north embankment

### 2.2 最终沉降预测

由于淤泥渗透系数较小,围堤沉降达到稳定的时间较长,为了获得围堤的最终沉降量,往往根据前面一定监测时间的沉降监测结果,采用一定的理论方法预测最终沉降量。采用Verhulst模型预测围堤的最终沉降量,该模型通过求解一偏微分方程,得到最终沉降量。

$$\frac{dp(t)}{t} = ap(t) - bp^2(t) \quad (1)$$

式中: $a$ 和 $b$ 为参数; $p^2(t)$ 为阻尼项。

该模型求解后得到沉降预测值为:

$$\hat{x}_i^{(1)}(t+1) = \frac{a/b}{1 + [\frac{a}{bx_1^{(0)}} + 1]e^{-at}} \quad (2)$$

当 $t=1,2,\dots,n$ 时, $\hat{x}_i^{(1)}$ 计算值即为相应时间的沉降值;当 $t=\infty$ 时, $\hat{x}_i^{(1)}$ 计算值等于极限值 $a/b$ ,该值可以认为是围堤的最终沉降量,具体计算方法可参考文献[7]。

经预测,8个沉降监测点的最终沉降位于1 366~1 556 mm之间,约为第21周沉降监测值的1.1~1.2倍,表明围堤填筑完毕后待21周后,沉降已基本完成83%~90%。

### 3 最终沉降计算

最终沉降的计算方法较多,包括分层总和法、应力面积法和太沙基一维固结理论。根据最为常用的应力面积法计算围堤的最终沉降,该法是在分层总和法的基础上,引入了沉降计算经验系数对计算结果进行修正的基于有限压缩层模型的地基变形计算方法,也是一种简化了的分层总和法[8]。其计算公式为:

$$S = m_s \sum_{i=1}^n \Delta S_i = m_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z(0)}}{E_{s_i}} (C_i z_i - C_{i-1} z_{i-1}) \quad (3)$$

式中,  $m_s$ —沉降计算经验系数;  $n$ —地基沉降计算深度范围内按压缩模量划分的土层数目;  $\sigma_{z(0)}$ —围堤底面处的附加应力,  $\sigma_{z(0)} = \sigma_h - \gamma h$ ;  $\sigma_h$ —围堤地面压应力, 当  $\frac{z}{b} > 1$  时,  $\sigma_h$  采用基底平均压应力, 当  $\frac{z}{b} \leq 1$  时,  $\sigma_h$  采用基底压应力图形中距最大应力点  $\frac{b}{4} - \frac{b}{3}$  处的压应力;  $b$ —基础的宽度;  $\gamma$ —土的重度;  $h$ —基础埋置深度;  $E_{s_i}$ —第  $i$  土层的压缩模量;  $z_i, z_{i-1}$ —为围堤底部至第  $i$  土层、第  $i-1$  土层的距离;  $C_i, C_{i-1}$ —围堤底面计算点至第  $i$  土层、第  $i-1$  土层底面范围内的平均附加应力系数。

填石的压缩模量取 40 MPa, 而泥石混合层的压缩模量尚无方法确定, 下面推导泥石混合层压缩模量的计算方法。假设填石在淤泥内均匀分布, 如图 2 所示, 单位长度内分布填石块数为  $n$ , 填石等效成圆形, 其等效直径为  $d$ , 单位面积内填石置换率可表示为:

$$m = \frac{n^2 \pi d}{4}, n = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{m}{\pi}} \quad (4)$$

则泥石混合层的压缩模量可表示为:

$$E_s = \pi \frac{d^2}{4} n^2 E_{s,s} + (1 - \pi \frac{d^2}{4} n^2) E_{s,m} \quad (5)$$

式中,  $E_{s,m}$  和  $E_{s,s}$  分别为淤泥和填石的压缩模量。

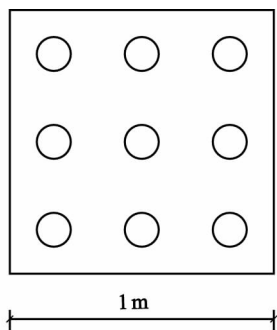


图2 泥石混合层压缩模量计算示意图

Fig. 2 Calculation diagram of sand-mud mixed layer compression modulus

对于围堤最终沉降的计算, 围堤置换效果各参数均采用均值确定, 填石厚度为 25 m, 泥石混合层厚度为 2.5 m, 混合层置换率为 45%, 淤泥层厚度为 1.3 m。由于填石压缩模量较大, 其压缩性较小, 可以忽略, 围堤的沉降可视为由填石荷载引起, 压缩主要产生在泥石混合层、淤泥层和底部粉质粘土层。经计算, 三者的压缩量分别为 242、821

和 510 mm, 围堤的总沉降为 1 593 mm, 这与由实测结果推算的最终沉降量 1 366 ~ 1 556 mm 较为接近。

为了确定泥石混合层置换率对沉降的影响, 分别计算不同置换率时的围堤沉降, 结果绘制于图 3 中, 可以看出, 泥石置换率越高, 沉降量越小, 当高于 40% 时, 沉降量随置换率变化较小。

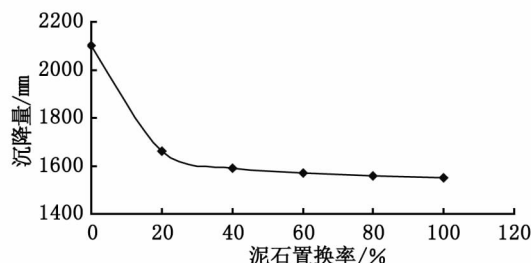


图3 围堤泥石置换率与沉降量的关系

Fig. 3 The relationship between mud replacement rate and settlement of embankment

### 4 结论

1) 深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤, 底部往往存在一定厚度的泥石混合层和淤泥层。

2) 围堤填筑完毕后历经 21 周, 约 5 个月时, 沉降趋于稳定, Verhulst 模型的最终沉降预测值位于 1 366 ~ 1 556 mm 之间。

3) 围堤的沉降主要由泥石混合层、淤泥层和下部土体的压缩产生, 围堤沉降计算值为 1 593 mm, 与由实测值推算的最终沉降值较为接近。

### 参考文献:

[1] 许连坡. 在爆炸荷载作用下连云港海淤的黏性特征[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(4): 297-301.  
 [2] 许连坡, 顾道良, 李世海. 在海淤中爆破的一些现象和问题[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(4): 328-337.  
 [3] 乔继延, 丁桦, 郑哲敏. 爆炸排淤填石法机理研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 349-352.  
 [4] 杨光煦. 压载挤淤研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(2): 72-76.  
 [5] 谭昌明, 姜朴. 爆炸挤淤筑堤中的土工问题[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(4): 18-20.  
 [6] 陈书丽, 李涛, 江礼茂. 爆炸排淤填石围堤坝的沉降计算[J]. 大坝与安全, 2007(6): 4-8.  
 [7] 宋彦辉, 聂德新. 基础沉降的 Verhulst 模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 124-126.  
 [8] 卓文泽, 周斌. 河内-海防公路软基渗透性及差异沉降研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(1): 14-18.

(责任编辑 王利君)