



高陡填方边坡加筋设计

高德发, 郭金国

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 以重庆港果园作业区二期扩建工程6号高陡填方边坡设计为例, 介绍如何结合地形、地质和占地条件, 以极限平衡理论为基础采用 Bishop 方法对不同坡率、填料的高陡填方加筋边坡进行稳定性分析, 并据此拟定经济实用的设计方案, 然后通过离心模型试验对拟定方案的安全性进行验证后确定设计方案, 最后通过施工期监控量测结果来检验设计方案的安全可靠性, 以为港口陆域工程和道路工程高陡填方边坡治理提供切实可行的借鉴方法。

关键词: 陆域; 道路; 高陡边坡; 加筋边坡; 极限平衡; 离心模型试验

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0154-05

Reinforcement design of high and steep slope

GAO De-fa, GUO Jin-guo

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Taking No. 6 high and steep slope design of the second phase extension project of Chongqing port orchard work zone for example, we introduce the way of combining topography, geology and land occupation condition to carry out stability analysis on high and steep reinforcement fill slope using the method of Bishop on the basis of limit equilibrium theory, and accordingly make economical and practical design scheme. The design scheme can be confirmed after the security is validated by centrifugal model test. Finally, we examine the safety and reliability of the design scheme by monitoring measurement results in the construction period, to serve as reference for high and steep fill slope treatment in harbor land area engineering and road engineering.

Keywords: land area; road; high and steep slope; reinforcement slope; limit equilibrium theory; centrifugal model test

1 项目概况

重庆港果园作业区二期扩建工程位于重庆市两江新区鱼嘴组团鱼嘴镇东部, 区域地形条件复杂、相对高差较大; 陆域特点是堆场面积宝贵、外弃土石方量大、工期紧张。为有效发挥码头功能、提高陆域堆场利用率, 本项目在陆域部分设置了大量的高陡边坡; 同时, 在保证安全的前提下, 高边坡设计应尽量调陡坡率以增加堆场面积、尽量利用现场开挖料作为坡体填料以减小外运。

本项目陆域共设置9段边坡, 总长约7.09 km, 最大挖方边坡高度48.5 m, 最大填方边坡高度37.5 m。其中6号边坡具有一定的代表性, 以下

针对6号边坡设计进行方案论述。

2 边坡概况

6号边坡位于一级堆场内侧道路和二级堆场之间(图1), 其中K0+680~880边坡坡脚位于一级堆场的填方内侧道路边缘, 坡高37.5 m。

3 地形地质条件

1) 地形地貌。场区为构造剥蚀浅丘地貌, 发育多处沟谷、斜坡、山包, 相对高差约93 m, 地形坡度角一般为 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 局部砂岩陡坎或陡坡的地形坡角为 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。

收稿日期: 2016-01-05

作者简介: 高德发(1976—), 男, 高级工程师, 从事港口陆域边坡的方案研究与设计。

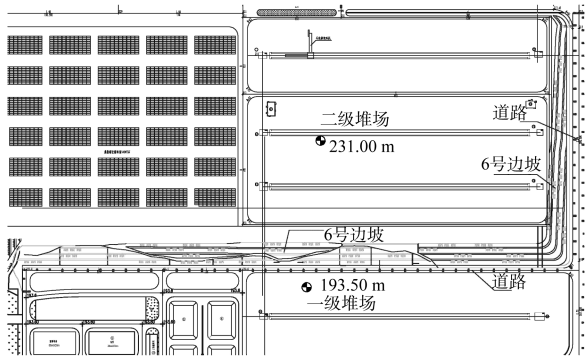


图 1 6号边坡平面布置

4.4 边坡方案比选

4.4.1 边坡方案拟定

本段边坡拟定为 4 级, 从下至上的前 3 级边坡每级坡高 10 m、第 4 级边坡高度 7.5 m, 边坡间平台宽 2 m, 边坡坡率 1:N。根据不同填料拟定边坡方案为: 1) 方案 1。砂岩填料, 坡率 1:1.5, 坡面采用码砌防护。2) 方案 2。砂岩填料, 坡率 1:0.75, HDPE 土工格栅。3) 方案 3。泥岩填料, 坡率 1:0.75, HDPE 土工格栅。4) 方案 4。泥岩填料, 坡率 1:1, HDPE 土工格栅。5) 方案 5。泥岩填料(上部两级边坡)+砂岩填料(下部两级边坡), 坡率 1:0.75, HDPE 土工格栅。

4.4.2 加筋边坡设计原理及计算方法

加筋边坡的稳定性计算和布筋方法以极限平衡理论为基础, 计算原理是对于加筋土边坡采用 Bishop 方法进行圆弧滑动稳定性分析^[1] (图 2)。

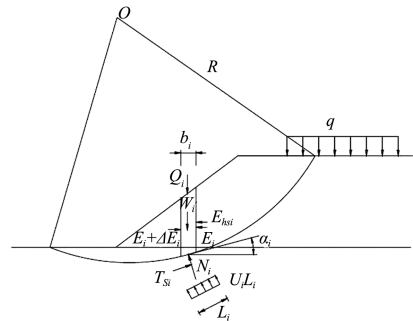


图 2 Bishop 圆弧滑动稳定分析

$$F_s = \frac{\sum [c_i b_i + (W_i + Q_i) \tan \varphi_i] / m_{ci}}{\sum (W_i + Q_i) \sin \alpha_i} \quad (1)$$

$$m_{ci} = \cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \tan \varphi_i}{F_s} \quad (2)$$

式中: F_s 为整个滑体下滑力计算的安全系数; b_i 为第 i 个土条宽度(m); W_i 为第 i 个土条重力(kN); Q_i 为第 i 个土条垂直向外力(kN); α_i 为第 i 个土条底滑面的倾角($^\circ$); c_i 、 φ_i 为第 i 个土条的抗剪强度指标。

先对未加筋边坡进行稳定分析, 求得最小安全系数 F_{su} , 并与设计要求的安全系数 F_{sr} 比较, 当 $F_{su} < F_{sr}$ 时, 应采取加筋处理。所需筋材总拉力 T_s 计算公式为:

$$T_s = (F_{sr} - F_{su}) M_D / D \quad (3)$$

2) 地层岩性。基底地层从上至下分别为: 残坡积粉质黏土(Q_4^{el+dl}), 侏罗系中统沙溪庙组(J_{25})的砂岩($J_{25}-S_s$)、泥岩($J_{25}-M_s$)。

3) 地震。场区地震动峰值加速度 0.05g, 地震动反应谱特征周期 0.35 s。

4 边坡设计方案

4.1 方案拟定

一般填方边坡设计主要考虑坡率法和支挡法两种方法^[1-2]。结合本项目特点, 采用较缓坡率的一般坡率法, 将增加边坡占地、减小堆场面积, 明显不可取; 重力式支挡结构对基底要求高, 而本项目地形地质条件复杂, 设置约 38 m 高的重力式挡墙既不经济也不安全。因此, 本边坡拟采用加筋处理来加陡边坡坡率, 以达到增大堆场面积和消耗土石方的目的。

加筋边坡方案的主要优点为: 比一般坡率法减少了边坡的占地面积并增加了堆场的面积、增加了边坡的填方工程量从而减小外弃土石方; 比传统的圻工挡墙对承载力的要求低、对不均匀沉降的适应性强、坡面绿化相对简单; 稳定性计算和布筋方法一般以极限平衡理论为基础, 设计施工均较成熟。

4.2 填料的选择

陆域部分挖方区主要为泥岩、砂岩, 为了尽量利用现场开挖料减少废弃土石方量, 边坡填料采用泥岩填料和砂岩填料。

4.3 土工格栅

本边坡加筋体部分格栅采用单向土工格栅(高密度聚乙烯), 层间距 50 cm; 基底处理部分铺设双向土工格栅(聚丙烯格栅), 层间距 1 m。

式中： M_D 为未加筋土坡每一滑弧对应的滑动力矩；
 D 为对应于每一滑弧的 T_s 相对于滑动圆心的力臂。

4.4.3 边坡方案计算结果

5种边坡方案，设计情况及计算结果见表1。

表1 边坡设计结果

方案	下部 填料	上部 填料	坡率	坡体格栅型号及长度								地基处理 (层间距1m)	安全 系数
				第1级边坡		第2级边坡		第3级边坡		第4级边坡			
				型号	长度/m	型号	长度/m	型号	长度/m	型号	长度/m		
1	砂岩	砂岩	1:1.5									E型	1.414
2	砂岩	砂岩	1:0.75	D型	20	C型	26	C型	26	A型	14	E型	1.429
3	泥岩	泥岩	1:0.75	D型	50	C型	50	C型	50	B型	50	E型	1.193
4	泥岩	泥岩	1:1	D型	35	C型	45	C型	45	A型	30	E型	1.383
5	砂岩	泥岩	1:0.75	D型	22	C型	28	C型	28	A型	16	E型	1.407

根据《建筑边坡工程技术规范》^[4]的规定，圆弧滑动法计算的边坡稳定性系数应不小于1.30，方案3安全系数偏低，格栅加长不起作用。

4.4.4 边坡方案综合比选

对K0+680~880选择代表性断面K0+740断面进行工程估算，结果见表2。

表2 边坡方案估算(每延米工程量)

方案	填方 (砂岩料)/m ³	填方 (泥岩料)/m ³	土工格栅/ m ²	坡面防护及 加固/m ³	边坡占地 面积/m ²	估算金额/万元	
						不含边坡占地	含边坡占地
1	1 675.0	0	340	135.0	62.250	8.72	27.39
2	2 202.0	0	1 990	37.5	34.125	12.84	23.08
3	0	2 202.0	4 060	37.5	34.125	14.20	24.44
4	0	2 026.0	3 290	37.5	43.500	12.23	25.28
5	940.8	1 261.2	2 140	37.5	34.125	12.45	22.69

注：填方数量为各方案坡顶与坡脚间的工程量。

由表2可知：考虑占地时，方案5费用最低。因方案5具有填方数量最大、占地最小、安全性高、投资最省的特点，本段边坡采用方案5作为推荐方案。

4.4.5 离心模型试验验证

为保证6号边坡的整体稳定性，验证设计方案的合理性和安全性。设计过程中特委托长江水利委员会长江科学院对6号边坡进行离心模型试验研究^[4]。

研究采用模型试验与数值分析相互验证的技术路线：1)进行1组未加筋边坡的离心模型试验，研究在没有格栅材料条件下边坡的稳定安全状态，同时，运用数值分析方法模拟模型试验过程，分析边坡的应力和变形，计算边坡的安全系数，与离心模型试验结果进行对比验证。2)进行1组加筋边坡的离心模型试验，并针对模型的加载过程和稳定状态进行数值分析，进一步验证加筋边坡

的计算方法和分析理论。3)加筋边坡开展不同填料和不同坡比的离心模型试验，研究加筋边坡的关键影响因素，同时，采用经离心模型结果检验过的计算方法，结合实测的材料参数，综合分析评价设计断面的安全状态。

4.4.5.1 离心模型试验方案

离心模型试验共拟定5种方案。RS1：以6号边坡为原型(砂岩填料、坡率1:0.75)，进行无加筋边坡变形、稳定与应力状态离心模型试验；RS2：以6号边坡为原型(砂岩填料、坡率1:0.75)，设置加筋层，对应设计方案2；RS3：针对加筋边坡设计断面，进行填料变化试验，即边坡填料全部换为风化后泥岩，对应设计方案3；RS4：针对加筋边坡设计断面，进行填料和坡比变化试验，即边坡填料全部换为风化后泥岩，坡比变为1:1，对应设计方案4；RS5：针对加筋边坡设计断面，进行填料变化试验，即顶部两层填料换为风化后泥

岩, 对应设计方案 5。

4.4.5.2 离心模型试验材料参数

模型填料的相关参数见表 3。加筋体厚度 =

0.5 mm, 抗拉强度 1.10 kN/m, 平均极限延伸率为 2.60%, 界面强度参数为 0.7~0.9 倍填料的强度参数。

表 3 模型填料参数

材料	密度/(t/m ³)	干密度/(t/m ³)	含水率/%	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	强度指标	
						c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
砂岩	2.14	2.0	7	30	0.3	26.2	36.5
泥岩	2.14		7	30	0.3	24.9	32.8
风化后泥岩	1.93	1.8	7	20	0.3	25.2	26.4

4.4.5.3 离心模型数值分析

通过数值模拟和离心试验结果对比发现:

1) RS1 和 RS2 对比, 加筋后沉降少许减少, 但可明显提高边坡的安全系数; 2) RS3 和 RS4 的填料全部采用风化泥岩, 虽坡比不同, 但沉降均明显

增大、安全系数明显降低; 3) RS5 的沉降以及边坡的安全系数与 RS2 基本一致, 表明边坡下部填料对边坡的安全起控制作用。其中, RS5 的离心试验和数值模拟结果见表 4。

表 4 RS5 离心试验和数值模拟结果对比

分析方法	加速度 100g 时结果对比			破坏时加速度	安全系数
	坡顶前沿线中心点沉降 (还原至原型)/cm	填料底层中心点竖向土压力/kPa	填料底层中心点水平土压力/kPa		
离心试验	89	280.0	50.0	156g	1.56
数值模拟	83	368.5	156.3		1.20

4.4.5.4 原型边坡数值分析验证

根据设计方案建立准三维有限元分析网格进行计算分析(由于有限元法与极限平衡法计算安全系数的方法及原理有一定的差异, 因此安全系数并非完全对应, 但差异较小): 1) 对于未加筋边坡 RS1, 滑弧位置较浅, 抗滑力小导致其安全系数较小, 不能满足规范要求; 而加筋后的 RS2, 由于土工格栅对土体的水平约束作用导致边坡应力场重分布, 最小滑弧位置逐步由边坡表面深入坡体内部, 抗滑力大幅增加, 原型边坡强度折减法安全系数为 1.60, 满足规范要求不小于 1.30 的要求; 2) 边坡全部填料换为风化后泥岩后边坡 (RS3) 安全系数减小至 1.18, 表明方案不满足边坡设计规范要求; 3) 边坡上部两级平台采用风化后泥岩并且加筋后的边坡 (RS5) 安全系数为 1.55, 能够满足边坡设计规范要求。

综上所述, 采用设计方案 5 进行 6 号边坡设计是安全合理的(实际设计过程中, 结合离心模型试验情况进行设计方案调整的互动过程, 受篇幅

限制不再赘述)。

5 施工监测

为掌握加筋边坡的变形动态和土工格栅的应变情况, 保证施工期和运营期的边坡安全, 业主要委托重庆市勘测院进行本项目的施工期监测工作。

根据重庆市勘测院提供的监测报告^[5](以 K0+740 断面测点监测结果为例, 其传感器及监测测点布置见图 3、其水平和垂直位移变化曲线见图 4), 6 号边坡垂直向土压力随填土层数的增加逐步加大、水平向土压力变化不明显, 土工格栅位移量较小, 变形趋于稳定。

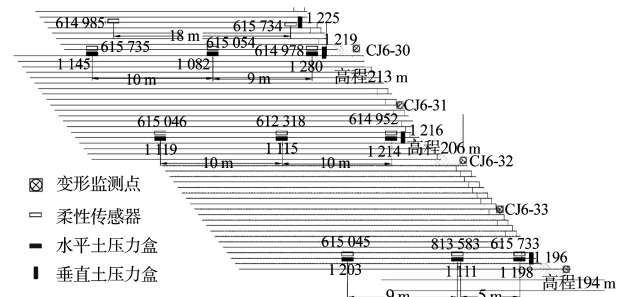


图 3 6 号边坡 K0+740 断面传感器及监测测点布置剖面

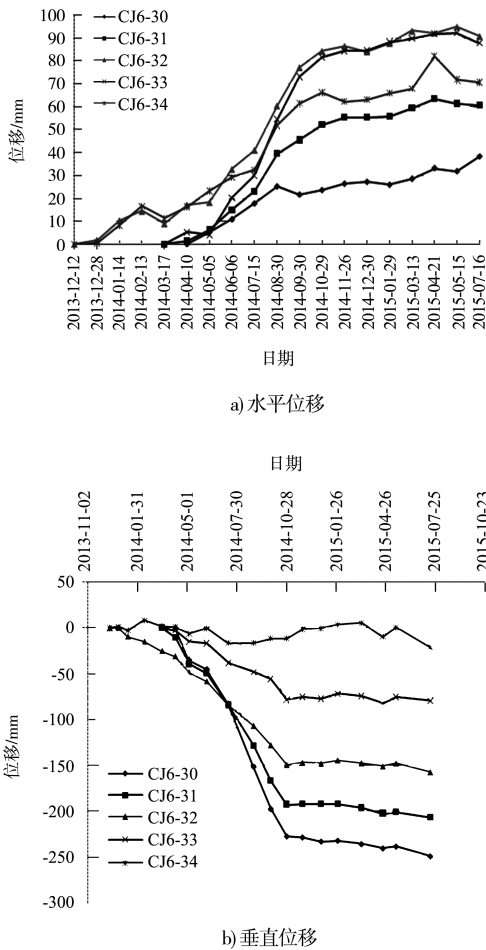


图4 6号边坡 K0+740 断面测点时间-位移变化曲线

6 结语

1) 针对重庆港果园作业区二期扩建工程建设的特点,以极限平衡理论为基础采用 Bishop 方法

对6号高陡边坡的稳定性进行计算分析,并通过技术经济比选后采用合理的设计方案。

2) 通过离心模型试验对设计方案进行验证,并根据试验结果修正设计方案。加筋边坡离心模型试验通过提高离心场模拟原型重力场。试验结果表明:离心模型试验能够揭示加筋边坡工程的变形规律和破坏形式,能够反映原型的关键影响因素。

3) 理论计算和模型试验均存在一定的局限性,施工过程中及运营期内开展长期的水平位移和沉降变形等监测工作对保证工程安全具有明显的辅助作用。

参考文献:

- [1] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
- [2] 交通部第二公路勘察设计院.公路设计手册路基[M]. 2版.北京:人民交通出版社,1996.
- [3] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S].
- [4] 长江水利委员会长江科学院.重庆港主城港区果园作业区二期扩建工程加筋边坡离心模型试验研究[R]. 武汉:长江水利委员会长江科学院,2012.
- [5] 重庆市勘测院.重庆港主城港区果园作业区二期扩建工程边坡监测报告(第1~23期)[R].重庆:重庆市勘测院,2013.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中交第三航务工程勘察设计院有限公司 1 项科研成果达国际领先水平

5月17日,中交第三航务工程勘察设计院有限公司的《桶式结构设计与施工成套技术》项目成果经中国港口协会、上港集团和公司的多位业内专家评审鉴定,达到国际领先水平,具有广泛的推广价值。

此项技术针对软土地基和环保要求,建立了桶式结构的设计理论,形成系统的设计方法,开发了预制、运输、定位、下沉、纠偏和监测等成套施工技术。此结构已成功应用于连云港港徐圩港区防波堤工程,在环境保护、投资控制、资源节约方面具备显著的经济效益和社会效益。

http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201605/t20160525_48092.html(2016-05-25)