



高陡加筋边坡离心模型试验与数值分析

万年华

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为实现增大堆场面积、减小弃方外运、美化港区环境、节约工程投资的目的, 针对长江上游重庆果园港二期工程陆域堆场形成, 提出采用37.5 m的高陡加筋边坡设计方案, 通过离心模型试验与数值分析相结合的技术路线, 分析和研究了现有2[#]和6[#]加筋边坡设计断面对应的有、无加筋边坡断面以及变换坡率、变换填料等条件下边坡的稳定性, 优化设计和指导施工。

关键词: 高陡加筋边坡; 码头堆场; 离心模型试验; 数值分析; 安全系数

中图分类号: U 417.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0029-06

Centrifugal model test and numerical analysis of high and steep slope reinforced side slope

WAN Nian-hua

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

Abstract: For the purpose of enlarging the area of the storage yard, reducing spoil transportation, beautifying the harbor environment, and cutting down the engineering cost, we propose the design scheme of 37.5 m tall high and steep slope reinforced side slope for the land formation in Chongqing Guoyuan port phase two project upstream the Yangtze River. Based on the centrifugal model test and numerical analysis, we analyze the stability of the existing No.2 and No.6 side slopes side slopes with and without reinforced slopes respectively and under the condition of slope rate variation and filling materials variation, so as to optimize the design and guide the construction.

Key words: high and steep slope reinforced slope; terminal yard; centrifugal model test; numerical analysis; safety factor

加筋土边坡是一种边坡坡率介于正常填方放坡与挡土墙护坡之间的加筋结构, 其作用机理主要是通过填土中铺设多层水平加筋材料, 利用加筋材料与土体之间的相互受力机理, 改善土体的工程性能, 提高边坡的稳定性, 使边坡变陡。由于加筋土边坡属柔性结构, 与传统的刚性结构挡土墙相比, 具有施工方便快捷、环保, 能更好地适应变形, 能节省工程投资, 能有效节约用地、融入周边环境、恢复自然生态, 有着较好的社会和经济效益。加筋土边坡已广泛地应用于公路、铁路、机场、港口、水利等各行各业, 但30 m以上的高陡加筋边坡在国内仍为数不多, 这主要是因为目前加筋边坡设计理论和设计方法还尚未

成熟, 国内的大型高陡加筋边坡工程也多参照国外以及现有工程设计方案。由于现有的理论不能完整反映加筋材料与填料的相互作用关系, 现有的计算方法也未全面反映筋材的作用, 加之对加筋边坡破坏形态和机理的认识不足, 使得加筋边坡设计以及边坡稳定分析难以反映工程实际, 对那些高陡的、重要的工程项目, 如本工程37.5 m的高陡加筋边坡有必要运用极限平衡法计算、有限元分析和离心模型试验多种手段进行边坡稳定的验证和分析。

1 项目概况

果园港位于重庆两江新区, 是长江流域内河规划建设最大的水、铁、公联运港, 设计年总通

收稿日期: 2013-06-06

作者简介: 万年华(1965—), 男, 高级工程师, 从事岩土工程及路基路面研究。

过能力3 000万t。果园港总平面布置根据拟建项目水域和陆域条件,作业区前沿采用框架直立式方案,后方陆域堆场采用两级平台方案,一级堆场平台高程为193.5 m,二级堆场平台高程为231 m,两级高差达37.5 m。基于复杂的陆域地形,为了最大化陆域堆场面积,总图布置了大量的高陡边坡,其中2#和6#边坡为两处高陡填方边坡,若采用40 m高的圬工挡墙,不仅对地基承载力要求高,而且极不经济;若采用1:1.5,1:1.75,1:2正常放坡,将增加无利用价值的放坡占地面积,减少堆场的实用面积,这对岸坡用地极其紧张的长江上游地区,同样不可取。因此,一种既能调陡边坡坡率,又对地基承载力要求不高,同时还能适应地基沉降变形,便于美化环境的柔性加筋边坡便成为果园港堆场边坡的首选方案。

2 加筋边坡设计方案

2#边坡高度为37 m,坡率为1:0.4,分4级填筑,填料要求为开山石渣(砂岩),综合内摩擦角不小于38°,加筋间距为50 cm,自上而下加筋材料型号和长度分别为A型长14 m, C型长20 m, C型长22 m以及D型长20~6 m,见图1。

6#边坡总处理高度为54 m,其中平台以上边

坡高度为37 m,平台以下填土厚17 m,边坡部分为4级填筑,坡率为1:0.75,加筋间距为50 cm,自上而下加筋材料型号和长度分别为B型长16 m, C型长25 m, C型长32 m以及D型长28 m;平台以下填土部分加筋间距100 cm,加筋采用E型长35m,见图2。筋带型号见表1和表2。

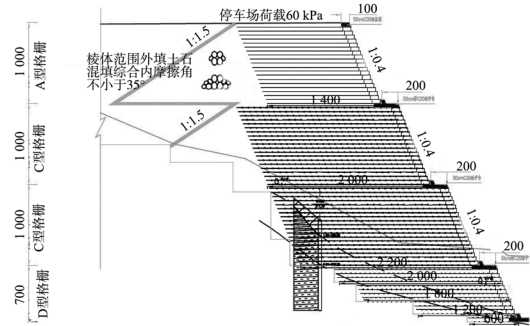


图1 2#边坡设计方案

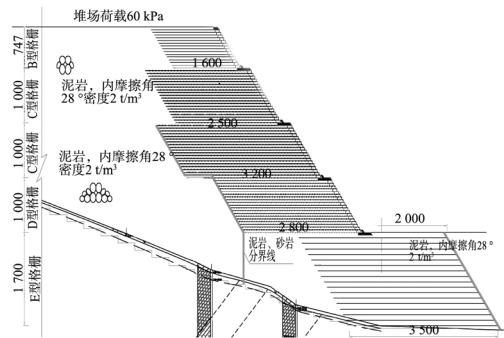


图2 6#边坡设计方案

表1 单向土工格栅技术指标

格栅类型	材质	质控拉伸强度/ (kN·m ⁻¹)	20℃下长期蠕变断裂程度 (大于100 a) / (kN·m ⁻¹)	最小炭黑含量/%
A型格栅(单向拉伸格栅)	高密度聚乙烯(HDPE)	65~89	>25	2
B型格栅(单向拉伸格栅)	高密度聚乙烯(HDPE)	89~130	>34	2
C型格栅(单向拉伸格栅)	高密度聚乙烯(HDPE)	130~169	>50	2
D型格栅(单向拉伸格栅)	高密度聚乙烯(HDPE)	>169	>65	2

表2 双向土工格栅技术指标

格栅类型	材质	强度/(kN·m ⁻¹)			最小炭黑含量/%
		纵/横向 拉升 强度	纵/横 向拉升 强度 (2%)	纵/横 向 拉升强度 (5%)	
E型土工 格栅双向 拉伸土工 格栅	聚丙烯 (PP)	≥40	≥14	≥28	2

3 加筋边坡的离心模型试验及数值分析

为论证2#和6#边坡设计的整体稳定性,同时与现有设计计算结果进行对比,验证两个边坡设计方法的正确性和合理性,采用了离心模型试验及数值分析法对加筋边坡的稳定性进行了相互验证。

3.1 离心模型试验

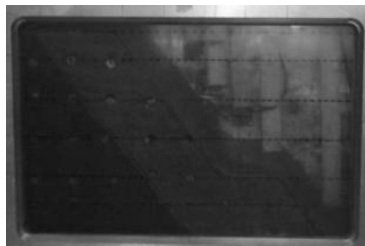
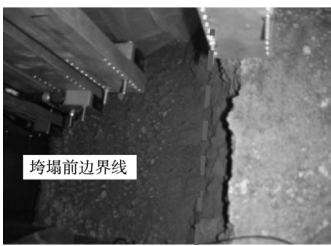



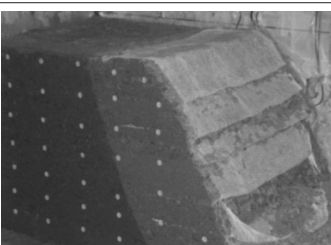




离心模型试验方案共计6组(表3),针对2#

边坡开展了加筋情况研究 (RS3), 针对 6# 边坡 (RS4, RS5) 和变换坡比 (RS6) 的研究 (表4)。开展了无加筋 (RS1)、加筋 (RS2)、变换填料



表3 离心模型试验方案

试验方案编号	试验条件
RS1	以6#边坡为原型, 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#边坡为原型, 设置加筋层
RS3	以2#边坡为原型, 设置加筋层
RS4	针对6#断面, 进行顶部3层填料变化试验
RS5	针对6#断面, 进行全断面填料变化试验
RS6	针对6#断面, 进行全断面填料、坡比变化试验

表4 离心模型试验结果及分析

工况	试验前照片	试验后照片	说明
RS1			当离心机加速度为112g左右时, 边坡斜坡面上的3个水平位移测点的量测值发生突变, 此时边坡已发生破坏。沉降自动记录数据显示, 当加速度为100g时, 坡肩沉降为7.8 mm, 还原至原型沉降约为780 mm
RS2			当离心机加速度为157g时, 加筋边坡局部加筋体被拉断, 位置大约在上部边坡的6~12 cm处, 相当于原型边坡高度的1/6~1/3处。对应加速度为100g时, 坡肩沉降为7.4 mm, 还原至原型后沉降约为740 mm
RS3			当2#加筋边坡试验加载到159g时, 加筋体被拉破, 位置大约在边坡的6~12 cm处, 相当于边坡高度的1/6~1/3处。对应加速度为100g时, 坡肩沉降为6.2 mm, 还原至原型后沉降约为620 mm
RS4			6# 边坡顶部3层填料换为风化后泥岩。当加速度为156g时, 加筋体被拉破, 位置大约在边坡高度的6~12 cm处, 相当于边坡高度的1/6~1/3处。对应当加速度为100g时, 坡肩沉降为8.9 mm, 还原至原型后沉降约为890 mm
RS5			6# 边坡填料全部换为风化后泥岩。当加速度为120g左右时边坡浅层变形突然增大, 局部发生滑动。系风化后泥岩强度较低导致边坡稳定系数下降。当加速度为100g时, 坡肩沉降为11.2 mm, 还原至原型后沉降为1120 mm

续表

工况	试验前照片	试验后照片	说明
RS6			6#边坡填料全部换为风化后泥岩, 坡比变为1:1。当加速度为137g时, 坡脚处出现破坏垮落。试验后通过模型开挖在边坡高度的1/3位置处水平位移最大, 拉裂现象最为明显。对应加速度为100g时, 坡肩沉降为9.8 mm, 还原至原型后沉降约为980 mm

3.2 数值分析

1) 离心模型数值分析。

加筋边坡离心模型可以简化为平面应变问题, 以RS2模型为例建立的数值模型见图3。其中, 填料泥岩和砂岩的物理力学参数见表5。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。

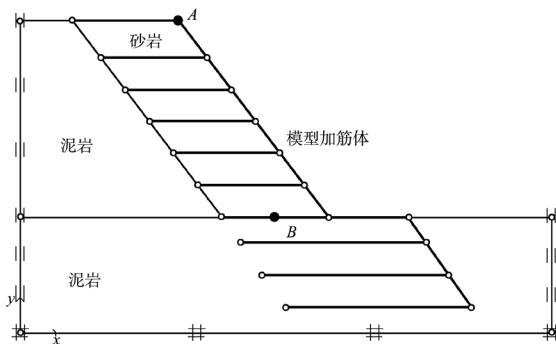


图3 加筋边坡数值模型 (以RS2为例)

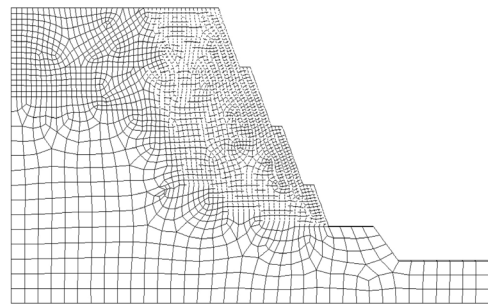
表5 数值模拟分析相关参数

材料	密度/ (t·m ⁻³)	干密度/ (t·m ⁻³)	含水率/ %	弹性模 量/MPa	泊松比 μ	C/kPa	$\phi/(\circ)$
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

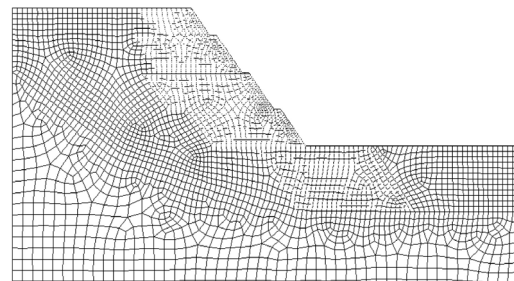
2) 原型边坡数值分析。

首先, 利用经离心模型试验验证后的数值分析方法分析加筋边坡原型, 得到边坡稳定安全系数; 然后, 进一步采用极限平衡法计算加筋边坡的安全系数, 对比两种不同方法得到的原型边坡的安全系数, 通过变换边坡填料、有无加筋等多种工况进行拓展研究。

根据设计图进行加筋布置, 并建立准三维有限元分析网格(图4)。



a) 2#



b) 6#

图4 加筋边坡网格示意图

3.3 数值模拟和离心试验结果对比

基于6组离心模型建立数值模型, 其数值模拟和离心试验结果对比 (主要包括坡顶A沉降、关键点B处的竖向和水平土压力以及安全系数) 见表6, 通过将数值分析方法与离心模型试验量测结果进行对比发现: 1) RS1和RS2加筋部分均为砂岩填料, 前者未加筋而后者加筋, 试验量测结果和数值分析结果均表明加筋后沉降少许减少, 但可明显提高边坡的安全系数; 2) RS4加筋部分上部为泥岩填料, 下部为砂岩填料, 结果其沉降以及边坡的安全系数基本与RS2基本一致, 表明边坡下部填料对边坡的安全系数起控制作用; 3) RS5和RS6填料为风化后泥岩, 坡比分别为1:0.75和1:1, 两组结果均表明沉降明显增大, 比RS2沉降分别增大3.9 mm和2.5 mm (还原至原型为390 mm和250 mm), 并且安全系数明显降低。

表6 数值模拟和离心试验结果对比

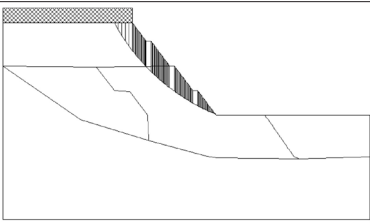
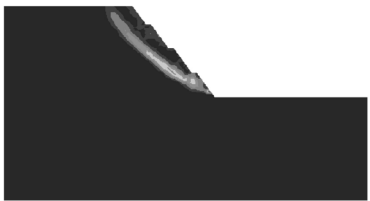
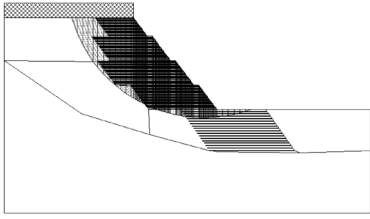
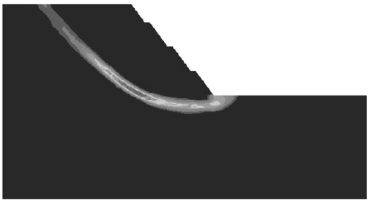
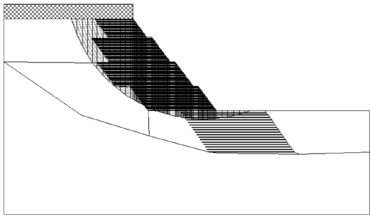

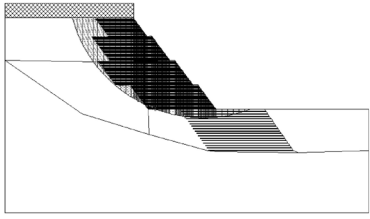
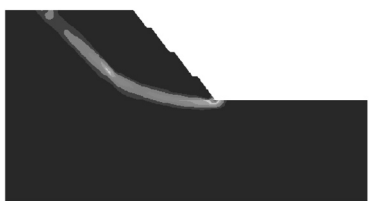
试验编号	分析方法	加速度100g时结果对比			安全系数 (破坏时加速度)
		坡顶A沉降(还原至原型)/cm	竖向土压力(测点B)/kPa	水平土压力(测点B)/kPa	
RS1	离心试验	78	168.0	30.0	112g
	数值模拟	86	339.5	133.2	1.07
RS2	离心试验	73	450.0	32.0	157g
	数值模拟	82	380.5	165.0	1.27
RS3	离心试验	62	623.8	106.3	159g
	数值模拟	69	583.5	192.9	1.25
RS4	离心试验	89	280.0	50.0	156g
	数值模拟	83	368.5	156.3	1.20
RS5	离心试验	112	490.0	80.0	120g
	数值模拟	128	345.6	200.7	0.97
RS6	离心试验	98	200.0	130.0	137g
	数值模拟	108	268.9	182.6	1.10

3.4 极限平衡法和有限元法结果对比

对未加筋、土工格栅加筋、上部采用风化后泥岩填筑并加筋等3种工况进行了计算，现以6#边

坡为例，其极限平衡法和有限元法得到的稳定计算结果见7。

表7 6#边坡稳定计算

工况	极限平衡法	有限元法
未加筋	 <p>安全系数1.12</p>	 <p>安全系数1.10</p>
加筋	 <p>安全系数1.68</p>	 <p>安全系数1.60</p>
上部两级平台采用风化后泥岩填筑并加筋	 <p>安全系数1.65</p>	 <p>安全系数1.55</p>
边坡填料全部采用风化后泥岩填筑并加筋	 <p>安全系数1.25</p>	 <p>安全系数1.18</p>

由于极限平衡法与有限元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。由数值分析结果可知:

1) 对于未加筋边坡,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,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。2#加筋边坡强度折减法安全系数为1.58,6#加筋边坡强度折减法安全系数为1.60,加筋后的边坡安全系数均超过1.3,满足规范要求。

2) 2#加筋边坡破坏时的滑动面在边坡下部尤其是靠近坡脚位置处明显穿过加筋格栅,而在边坡上部绕过加筋材料;6#边坡破坏时的滑动面也在边坡下部穿过加筋格栅,部分滑动面侵入地基内,在边坡上部绕过加筋材料。

3) 边坡上部一级平台或两级平台填料换为风化后泥岩后,其安全系数产生一定的变化。2#边坡上部一级平台采用风化后泥岩并且加筋后其安全系数为1.53;6#边坡上部两级平台采用风化后泥岩并且加筋后,其安全系数为1.55,能够满足边坡设计规范要求。

4) 边坡全部填料换为风化后泥岩后,其安全系数明显减小。2#边坡全部填料换为风化后泥岩并且加筋后,其安全系数为1.15;6#边坡全部填料换为风化后泥岩并且加筋后,其安全系数为1.18,方案不满足边坡设计规范要求。

4 结论

1) 加筋高陡边坡是近期迅速发展的一种保证高填方工程质量的优良施工方案。不仅能增加高填方边坡的稳定,还有着较好的社会、经济效益,在山区场平工程中具有良好的推广应用前景。

2) 加筋边坡离心模型试验通过提高离心场模

拟原型重力场,可以比较直观地反映现场原型的效果,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) 基于离心模型试验结果对比验证得到的数值分析方法,预测2#和6#加筋原型边坡的安全系数分别为1.58和1.60;离心模型试验和数值分析均表明加筋边坡在极限状态边坡高度的 $1/6 \sim 1/3$ 处出现应力集中。

4) 边坡中下部填料对边坡的安全系数起控制作用。当边坡上部一定范围填料换为风化泥岩后,2#和6#加筋原型边坡的安全系数分别为1.53和1.55,能够满足边坡设计规范要求;当边坡全部填料换为风化泥岩后,2#和6#加筋原型边坡的安全系数分别为1.15和1.18,不能满足边坡设计规范要求。

参考文献:

- [1] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 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报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2012.
- [2] 杨锡武, 欧阳仲春. 加筋筋高路堤陡边坡离心模型的研究[J]. 土木工程学报, 2000(5): 89-91.
- [3] 介玉新, 李广信, 陈轮. 纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 12-15.
- [4] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 加筋挡土墙离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2000(3): 85-90.
- [5] 杨锡武, 徐积江, 王多银. 加筋高路堤陡边坡在渝长公路上的应用[J]. 重庆交通学院学报, 2000(4): 55-58.
- [6] 凌天青. 公路高大加筋土挡墙设计方法的研究[J]. 中国公路学报, 2000(2): 13-15.
- [7] 张小莉. 加筋陡坡路堤结构的计算与分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [8] 梁志勇. 山区高速公路高填斜陡路堤稳定性研究[J]. 公路工程, 2012(3): 85-88.

(本文编辑 武亚庆)