



基于离心试验和数值模拟的 加筋高陡边坡综合分析方法

吴爱清¹, 俞武华¹, 李波²

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;

2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 以重庆港某码头工程陆域加筋边坡为原型, 采用离心模型试验和数值模拟相结合的综合分析方法, 研究加筋高陡边坡的加筋机理及稳定性。离心模型试验结果表明: 加筋边坡与无加筋边坡的破坏模式不同, 无加筋边坡坡肩垮塌, 而加筋边坡在1/6~1/3边坡高度处出现应力集中; 边坡填料尤其是边坡中、下部填料的强度性质对边坡的安全系数起决定性的作用, 如果仅将边坡上部变为强度较低的填料, 加筋边坡安全系数变化甚小。数值分析方法先进行离心模型试验验证, 再用于分析计算原型加筋边坡的安全系数和应力位移场分布, 保证了数值分析计算结果的正确性, 研究成果为设计提供了技术支持。本研究可作为研究加筋边坡工程或其他岩土工程参考。

关键词: 加筋边坡; 离心模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0033-06

Comprehensive analysis method with centrifuge tests and numerical simulation on high and steep reinforced slopes

WU Ai-Qing¹, YU Wu-hua¹, LI Bo²

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

2. Key Laboratory Geotechnical Mechanics and Engineering of the Mechanics and Engineering of the Minister of Water Resources,
Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the continental reinforced slopes in some wharf engineering of Chongqing port, the reinforcement mechanism and the stability of high and steep geosynthetic-reinforced slopes under its own weight are studied through centrifuge model tests and two-dimensional finite element methods. The centrifuge test results show that the failure mode of the reinforced slope is different from that of slope without geosynthetic. The slope shoulder collapses in the former, while the stress concentrated at the 1/6~1/3 of the slope height in the latter. The strength of the fillings especially those at the middle and lower part of the slope has a decisive influence on the slope stability. If the upper fillings are changed with low strength soils alone, the stability of the slope might decrease rarely. The numerical analysis firstly is tested and verified by the centrifuge tests results, and then is applied to the analysis of the factor of safety and the stress and displacement of the prototype slope. The comprehensive analysis method with centrifuge tests and numerical simulation can be used in other reinforced slopes and geotechnical engineering projects.

Key words: reinforced slope; centrifuge tests; numerical simulation

重庆港主城港区果园作业区是重庆港重要组成部分, 位于重庆市两江新区鱼嘴镇。港区陆域

收稿日期: 2013-01-17

作者简介: 吴爱清(1963—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设咨询工作。

规模大,考虑山区地形特点、土石方平衡和交通道路衔接布置需要,陆域平面布置采用阶梯式方式,陆域形成采用高挖深填形成,边坡和挡墙工程量大,部分开挖边坡高度达到50 m,回填边坡高度达到近40 m,对于高陡回填边坡设计采用加筋边坡结构。

加筋土技术是通过在土体内铺设或掺加土工合成材料来改善土体强度,因其具有美观、安全性高、施工方便、抗震性能高等优点,已成为高陡边坡设计的主要结构形式之一^[1]。但是,加筋边坡设计理论和设计方法还尚未成熟,无法准确分析加筋边坡的变形和破坏机理,国内的大型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的反映加筋材料与填料的相互作用关系,现有的计算分析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,因此,有必要运用其它的研究手段,如:静力模型、离心模型试验进行边坡稳定的验证和分析。

离心模型试验是在离心机中通过增加离心力来模拟重力的试验方法。离心模型试验可实现与原型条件相同的应力状态,使得模型与原型应力与应变相同,模拟原型的变形及破坏过程。同时,可以用于验证理论分析与数值计算的合理性和可靠性,其优势是可以比较直观的反映现场原型的效果,试验费用相对原型试验来说较低,是目前解决比较复杂岩土工程问题的重要手段之一。目前,国内外诸多学者已开展了加筋边坡离心模型试验,并进一步与数值分析方法进行对比验证^[2-9]。

采用离心模型试验方法研究加筋边坡的加筋机理和破坏模式具有独特的优势,加筋边坡的离心模型试验填料大多采用原型填料,加筋材料通常以相似材料进行替代,但由于受到模型比尺的影响,加筋的层厚往往不能按照一定的比尺进行缩尺,无法直接反映原型边坡的加筋布置,必须与其他方法相结合开展综合性研究。因此,本文采用离心模型试验与数值分析相结合的技术路线,研究加筋边坡的稳定性以及应力位移场分布

规律。离心模型试验通过模拟原型应力场来反映加筋体与填筑材料间的相互作用,揭示加筋边坡的破坏机理,并用于验证数值模型的合理性;进一步采用该数值分析方法分析原型加筋边坡,分析边坡的安全系数和应力位移场。

1 原型条件与技术路线

1.1 原型条件

重庆港主城港区果园作业区典型加筋边坡最高达38 m,坡比为1:0.75,要求填料为开山石渣(砂岩),综合内摩擦角不小于38°,筋带长度及具体设计断面尺寸见图1,筋带型号见表1。边坡总处理高度为54 m,其中边坡高度为37 m,地基处理17 m,边坡部分为四级填筑,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;地基部分加筋间距100 cm,加筋采用E型长35 m。

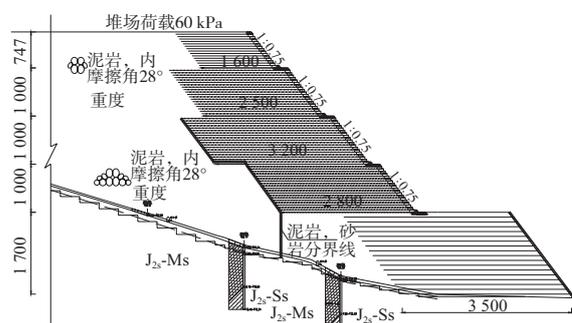


图1 原型边坡设计方案(单位:mm)

表1 土工格栅技术指标

类型	质控拉伸强度/(kN·m ⁻¹)
A型(单向HDPE)	65~89
B型(单向HDPE)	89~130
C型(单向HDPE)	130~169
D型(单向HDPE)	>169
E型(双向PP)	≥40

1.2 技术路线

本研究采用离心模型试验与数值分析相结合的综合分析方法(图2),主要技术路线如下:

1) 基于原型边坡坡比和填料特性,开展未加筋边坡和加筋边坡离心模型试验,研究格栅材料存在与否两种条件下边坡的稳定安全状态;进一步,采用离心模型试验开展变换填料和坡比的参

数分析, 研究加筋边坡的关键影响因素。

2) 基于离心模型尺寸和材料参数开展离心模型的数值分析, 通过计算结果与试验结果进行对比分析, 验证数值模拟参数和本构关系等选择的合理性; 计算离心模型边坡的安全系数, 分析边坡内部的应力和位移场。

3) 基于原型边坡设计断面参数, 建立与第二步相似的数值模拟, 预测原型边坡的安全系数和应力位移场分布规律, 为原型边坡的优化设计提供指导。

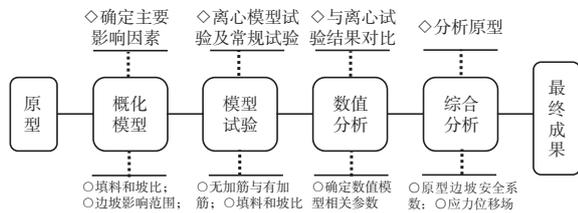


图2 研究技术路线

2 离心模型试验

2.1 试验原理和试验设备

离心模型试验是在离心机中通过增加离心力来模拟重力的试验方法。离心模型试验可实现与原型条件相同的应力状态, 使得模型与原型应力与应变相同, 模拟原型的变形及破坏过程。同时, 可以用于验证理论分析与数值计算的合理性和可靠性, 其优势采用离心场中的小尺寸模型能够比较直观的反映原型, 试验费用相对原型试验较低, 是目前解决比较复杂岩土工程问题的重要手段之一。

本次离心模型试验采用长江科学院CKY-200现代化多功能土工离心机, 其主要技术指标: 有效容量 $200g-t$; 最大加速度 $200g$, 无级调速, 调速精度 $0.1g$; 有效半径 $3.7m$; 吊篮净空尺寸 $1.2m \times 1.0m \times 1.5m$; 模型箱尺寸(长 \times 宽 \times 高) $1.0m \times 1.0m \times 1.0m$ 、 $1.0m \times 0.4m \times 0.8m$ 两种; 数据采集通道40个, 包括土压力、水压力、孔隙水压力、应变、位移和温度及频率等。

2.2 试验方案

本次离心模型试验共开展5组试验, 如表2所示。其中, 基于原型加筋边坡相关参数, RS1进行未加筋边坡变形、稳定与应力状态离心模型试



图3 CKY-200土工离心机

验; RS2设置加筋层间距为 d , 研究加筋体对边坡稳定性和变形的影响; RS3~RS5进行边坡填料以及坡比的拓展研究, 分析加筋边坡稳定性的关键影响因素。

表2 试验方案

编号	试验条件
RS 1	基于原型加筋边坡相关参数, 进行未加筋边坡变形、稳定与应力状态离心模型试验, 填料为砂岩
RS 2	基于原型加筋边坡相关参数, 设置加筋层, 填料为砂岩
RS 3	进行填料变化试验, 上部填料采用风化后泥岩, 下部砂岩
RS 4	进行填料变化试验, 填筑材料均采用风化后泥岩
RS 5	基于RS4, 进行坡比变化试验, 坡比由 $1:0.75$ 变为 $1:1$, 填料均采用风化后泥岩

本次模型试验为二维模拟, 模型箱尺寸 $1.0m \times 0.4m \times 0.8m$ (长 \times 宽 \times 高), 根据加筋部分影响范围合理选择研究范围, 为避免加速度过高、线速度不同而带来的系统误差, 本次离心模型试验比尺选择为 $1:100$, 设定加速度为 $100g$ 。以RS2为例, 离心模型布置和主要监测项目如图4所示。

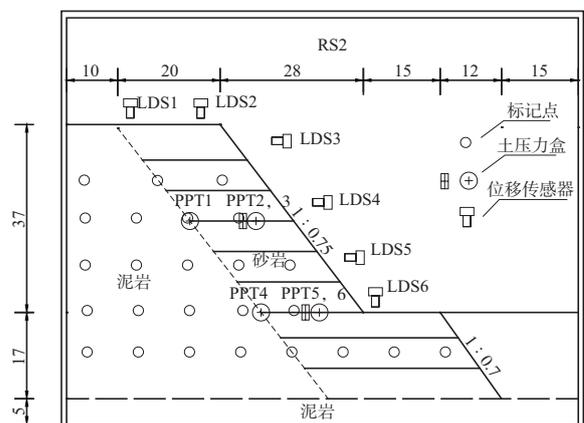


图4 离心模型布置和主要监测项目(单位: cm)

2.3 模型材料

1) 填筑材料的模拟。

为了保证离心模型反映原型土层特性,模型材料从现场取样,采用等量替代和相似级配相结合的方法确定模型填料的级配,保证填料的物理力学性质与原型相似。按照设计指标要求,原型边坡中加筋范围内的填筑材料采用分层碾压压实,分层厚度50 cm,碾压后孔隙率小于20%,干密度不小于 $2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$,填料最大粒径不得大于30 cm,大于20 cm的颗粒含量不超过全重的20%,含泥量不大于7%。要求级配良好,不均匀系数 $C_u \leq 5$,曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 。填筑后填筑体渗透系数不小于 $1 \times 10^{-2}\ \text{cm}/\text{s}$ 。

离心模型试验填料级配确定方法:为了尽可能减小模型的粒径效应,控制模型的结构尺寸和土粒的平均粒径之比为28~32,同时采用控制中细粒含量与原型一致,采用等量替代法模拟原型填料,确定本次离心模型试验所用填料的粒径为20 mm,颗粒大小分布曲线如图5所示。进一步开展固结排水剪切试验(CD试验)确定强度指标,试样尺寸为直径101.0 mm,控制干密度为 $20\ \text{kN}/\text{m}^3$,得到强度指标为:泥岩 $c=24.9\ \text{kPa}$, $\varphi=32.8^\circ$,砂岩 $c=26.2\ \text{kPa}$, $\varphi=36.5^\circ$,风化后泥岩 $c=25.2\ \text{kPa}$, $\varphi=26.4^\circ$ 。

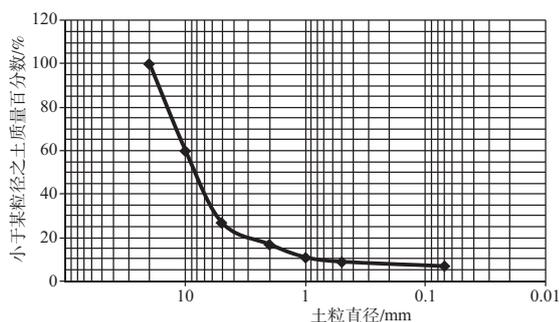


图5 颗粒大小分布曲线

2) 加筋材料的模拟。

加筋材料与土的相互作用增强了边坡的稳定性,加筋边坡内部的应力应变状态与未加筋边坡明显不同,边坡剪切屈服区特性随之发生变化,同时加筋效果的主要影响因素为加筋密度和加筋强度。离心模型缩尺后的加筋材料无法同时模拟原型的加筋密度和加筋强度。为了更为真实地反

映加筋材料与土体的相互作用,重点模拟原型加筋材料的平均抗拉强度,然后进一步采用数值分析方法对离心模型试验开展拓展研究,分析原型加筋边坡的加筋密度和加筋强度。

原型中共有4种加筋材料,平均抗拉强度为 $119.2\ \text{kN}/\text{m}$;保证加筋边坡水平方向平均抗拉强度相似,模型比尺为1:100,所以模型中加筋材料的抗拉强度应取为 $1.19\ \text{kN}/\text{m}$ 。通过多种材料的抗拉强度比选试验,选定为纱布,平均抗拉强度为 $1.10\ \text{kN}/\text{m}$,平均极限延伸率为2.60%。

2.4 试验结果

对比RS1和RS2试验结果,未加筋边坡发生破坏的位置在坡肩,破坏模式为自重作用下的坡肩垮塌;而加筋边坡的破坏主要表现为局部加筋体被拉断,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,如图6所示。加筋引入后,边坡破坏时的加速度由112g增大至157g,表明加筋体的引入可以明显提高边坡的稳定性。



图6 试验后照片(以RS6为例)

对比RS2、RS3和RS4试验结果(表3)可知,加筋边坡的破坏模式均相同,主要是边坡高度的1/6~1/3处发生局部破坏;同时,边坡中下部填料对边坡稳定性起控制作用,RS3试验仅改变了边坡上部填料,边坡填料采用强度较低的分化后泥岩,但破坏时的加速度基本一致;对比RS3和RS4,RS4边坡整体均填料采用强度较低的泥岩填料,其破坏时的加速度明显低于RS3破坏时的加速度。

对比RS4和RS5试验结果可知,两组试验的坡比分别为1:0.75和1:1,坡比变缓可以明显提高边坡稳定性,但相对于填筑材料其影响偏小。

表3 离心模型试验结果

试样编号	破坏时加速度	坡顶沉降 (还原至原型)/cm	破坏模式	破坏位置
RS1	112g	78	坡肩垮塌	坡肩
RS2	157g	73		
RS3	156g	89	局部破坏	边坡高度 1/6~1/3
RS4	120g	112		
RS5	137g	98		

3 数值模拟

3.1 离心模型数值分析

图7为基于模型试验相关参数建立的数值模型。在几何模型左右边界约束水平位移, 底部同时约束水平和垂直位移, 填料采用莫尔-库仑模型, 采用弹塑性土工格栅单元。为了真实反映离心模型箱内侧壁的摩擦效应, 填料与箱内壁的摩擦系数取值0.3。其中, 抗拉强度 EA 为土工格栅单位宽度轴向力和轴向应变的比值。由拉伸试验获得的模型土工格栅平均抗拉强度为1.10 kN/m, 平均极限延伸率为2.60%, 砂岩和泥岩的弹性模型约为30 MPa。填料采用摩尔-库伦屈服与破坏准则, 选用关联流动法则。

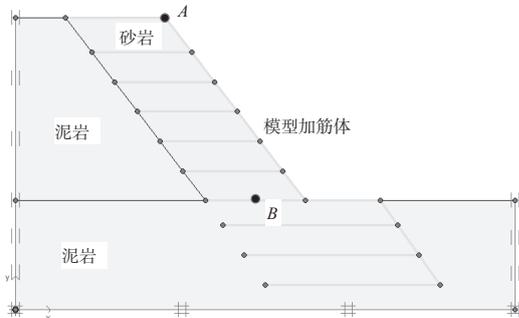


图7 基于模型试验建立的数值模型

图8为模型试验加筋体拉力分布规律, 表4为数值分析与离心模型试验结果对比。分析表明: 加筋体拉力最大值出现在边坡高度的1/6~1/3处, 这与模型试验观测得到照片破坏位置非常一致; 通过对比数值模拟计算得到的安全系数与离心模型中边坡破坏时加速度, 两者的结果非常吻合, 边坡中下部填料相同时, 安全系数基本一致 (RS2和RS3), 安全均大于1.35; 当边坡中下部换为强度较差的填料时, 安全系数均小于1.25 (RS4和RS5)。

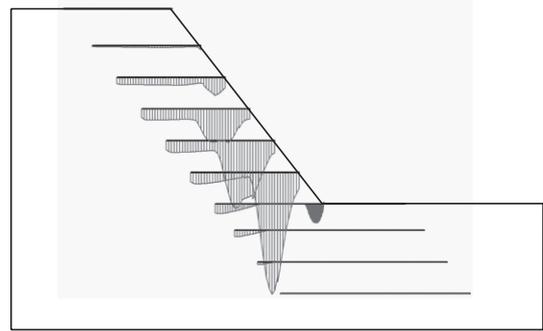


图8 模型试验加筋体拉力分布规律

表4 数值分析与离心模型试验结果对比

编号	安全系数或破坏时加速度	
	离心试验	数值模拟
RS1	112g	1.09
RS2	157g	1.42
RS3	156g	1.37
RS4	120g	1.04
RS5	137g	1.21

3.2 原型边坡数值分析

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, 得到原型加筋边坡的应力位移场分布。图9为加筋边坡网格示意图, 图10为原型加筋边坡破坏面, 图11和图12分别为加筋边坡的竖向应力和沉降。分析可知, 基于原型边坡设计断面尺寸以及边坡填料和加筋体的设计参数计算得到原型边坡的安全系数为1.60。加筋边坡沉降在坡顶最大, 最大沉降为53.2 cm。沉降计算结果远小于离心模型试验结果, 主要原因是原型边坡填料的变形模量远大于模型填料的变形模量, 并且原型边坡的整体加筋强度要大于离心模型。

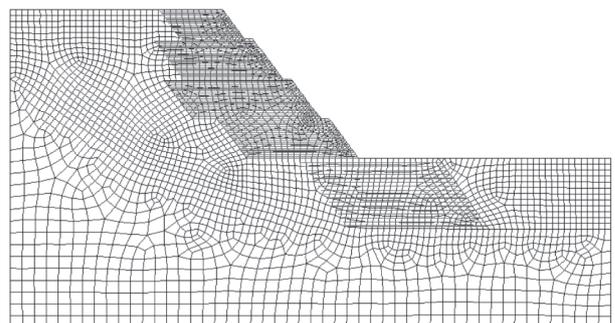


图9 原型加筋边坡网格示意图

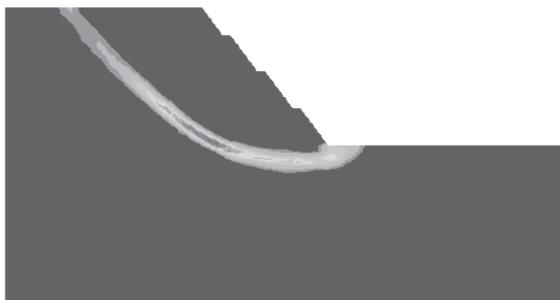


图10 原型加筋边坡破坏面

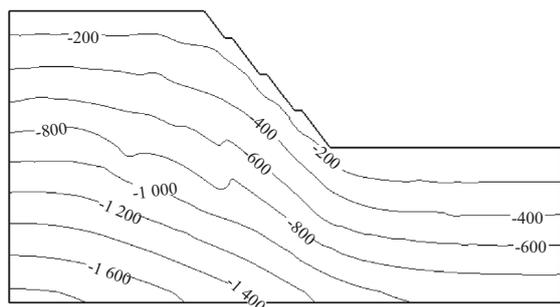


图11 加筋边坡竖向应力 (单位: kPa)

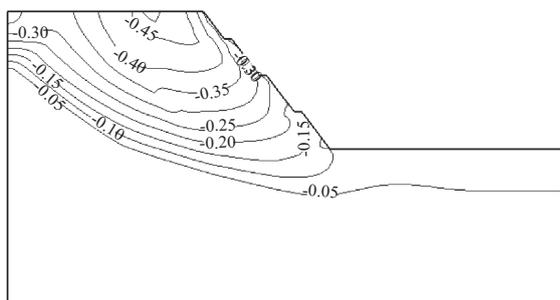


图12 加筋边坡沉降 (单位: m)

4 结论

1) 综合利用离心模型试验与数值模拟两种方法的优点研究加筋高陡边坡。采用离心模型试验模拟原型重力场,揭示加筋边坡工程中加筋体与填筑材料间的相互作用机理。通过离心模型试验结果对数值模拟进行验证,为数值分析原型加筋边坡的稳定安全系数和应力应变分布提供了可靠性的技术支持。

2) 离心模型试验与数值分析结果均表明,加筋边坡的最大侧向变形出现在边坡高度约1/6~1/3处,该部位易出现应力集中现象,应加以重视。

3) 对于加筋边坡工程,设计中应考虑加筋体施工过程中施工损伤引起的强度降低,以及填料强度可能随时间的变化等因素,依据相应的设计规范,合理确定边坡稳定安全系数,确保加筋边坡的长期稳定安全。

参考文献:

- [1] Zornberg J G, Arriaga F. Strain distribution within geosynthetic-reinforced slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(1): 32-45.
- [2] 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.
- [3] 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,2000,33(3):84-91.
- [4] 雷胜友.双面加筋土高挡墙的离心模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):417-423.
- [5] 张嘎,王爱霞,张建民,等.土工织物加筋土坡变形和破坏过程的离心模型试验[J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(2):2057-2060.
- [6] Porbaha A, Goodings D J. Geotextile reinforced cohesive slopes on weak foundations[C]//Proceedings of Centrifuge'94 Conference, Singapore, 1994: 623-628.
- [7] Viswanadham B V S. Modeling and instrumentation considerations of a geogrid[C]//Fukuoka, Japan: Proceedings of Int Symp on Earth Reinforcement, 2001: 153-158.
- [8] Yu Y Z, Zhang B Y, Zhang J M. Action mechanism of geotextile-reinforced cushion under breakwater on soft ground[J]. Ocean Eng, 2005,32(14/15): 1679-1708.
- [9] Chen J F, Yu S B. Centrifugal and numerical modeling of a reinforced lime-stabilized soil embankment on soft clay with wick drains[J]. International Journal of Geomechanics, 2011, 11(3): 167-173.

(本文编辑 郭雪珍)