

# 降雨下开挖边坡位移及含水量分布规律的离心模型试验研究\*

林伟, 薛晓辉, 刘盛辉

(陕西铁路工程职业技术学院 建筑工程系, 陕西 渭南 714099)

**摘要:** 高速公路改扩建过程中, 边坡开挖后为降雨入渗提供了通道, 降雨对开挖边坡的影响比天然边坡和运营过程中的更大。文中以某高速公路改扩建工程边坡开挖为研究对象, 采用离心模型试验模拟降雨条件下边坡开挖施工过程, 揭示开挖边坡在不同支护时序条件下的变形规律及内部含水量的变化规律, 为实际工程施工及地基处理方案设计提供依据。结果表明, 随着开挖的进行, 坡体水平位移逐渐增大, 开挖后及时支护的施工方法对坡顶的水平位移及竖向变形均有较好的抑制作用, 抑制率分别达 34%、50%; 边坡土体随着降雨的进行及向内的逐渐渗透而趋于饱和状态, 体积含水量随深度的增加呈先减小后增大的趋势, 及时支护对降雨入渗具有一定的限制作用, 对保证边坡的稳定可起到较好的效果。

**关键词:** 公路; 边坡开挖; 离心模型试验; 位移变形; 含水量

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)02-0056-04

边坡失稳是在外界各种因素的共同作用下(如降雨、风化、人工开挖等)由局部小范围的变形逐渐延伸扩大最终演变为整体破坏的灾变过程, 在该过程中控制边坡变形的因素也是动态变化的。高速公路改扩建中, 边坡开挖后为降雨入渗提供了通道, 降雨对开挖边坡的影响比天然边坡和运营过程中的边坡更大。现有研究成果多侧重于降雨条件下边坡的失稳破坏形式及稳定性分析, 而对于降雨过程中边坡体纵向位移及水平位移的变化分布规律、边坡内部含水量分布形式研究较少。

离心模型试验以其能满足主要的关键相似条件而被称为与原型相等的全真型模型试验, 能再现土中应力及应变状态, 在岩土工程领域得到了广泛应用。该文采用离心模型试验模拟降雨条件, 对某高速公路改扩建工程边坡开挖中的变形及内部含水量变化进行研究, 为工程施工及地基处理方案设计提供依据。

## 1 工程概况

该边坡所处路段地形起伏较大, 部分路段高差约 70 m。基岩主要为泥盆系砂岩、泥质砂岩、灰岩及下第三系泥质砂岩、砂砾岩等, 零星出露地表。大部分地段地表为残坡积成因的砂质黏土、砾质黏土

及黏土, 一般呈硬塑状。该工程位于北回归线以南, 属亚热带季风性气候, 雨量充沛。春季连绵多雨, 夏季高温多雨, 年降雨量 1 000~2 800 mm, 年平均降雨量 1 300 mm, 年日照时数 1 000~2 000 h, 年平均蒸发量 1 700 mL。路线经过红水河流域, 位于中国暴风区第 9 区。从边坡稳定状态考虑, 每年的秋冬季节是边坡开挖的最佳时间。

## 2 离心模型试验

### 2.1 试验模型

选取 K1456+800 处边坡为原型。该边坡左侧高 73 m, 右侧高 15 m, 宽 137 m, 分 6 级开挖, 第 1 级坡率为 0.5, 第 2、3 级坡率为 0.75, 后 3 级坡率均为 1。边坡上部为强风化砂岩, 中部为强~中风化砂岩, 边坡底层及地基为中风化砂岩。根据研究目的, 对边坡原型进行简化, 左侧取至路基中心线, 右侧取至边坡拓宽后坡顶以外 11 m。

试验采用长安大学 60-gt 土工离心机进行, 模型箱宽度为 500 mm, 高度为 400 mm, 长度为 360 mm。通过对比, 确定试验模型比为 140。

### 2.2 试验方案

试验模拟高速公路边坡改扩建工程的开挖过程, 共分为 12 组, 前 6 组采用开挖一级支护一级即

\* 基金项目: 陕西铁路工程职业技术学院 2012 年第二批科研基金资助项目(2013-13)

开挖后及时支护的施工方式,后6组采用开挖完成后再支护即开挖后不及时支护的施工方式(见表1)。试验模型见图1。先采用石膏浇筑边坡的地基,通过石膏比控制地基的弹性模量,待地基完全凝固后分层填筑边坡。边坡填筑采用的土样均取自工程实际中相应的土层,确保土性与实际边坡相同。

边坡填筑完成后上机运行相当于实际时间8年后停机,进行边坡开挖过程。每组试验开挖至相应高度后继续运行并模拟降雨过程,同时监测边坡的变形及稳定状态。降雨结束后继续运行,待边坡变形稳定后提高重力加速度直至边坡破坏,试验结束。其中的降雨情况根据试验情况不同而不同(见表1)。

表1 试验分组

组别	开挖支护时序	降雨时间	降雨条件
JYSY-1		1~2级开挖后	以3 mm/h强度持续6 h
JYSY-2		1~4级开挖后	以3 mm/h强度持续7 h
JYSY-3	开挖一级支护一级	1~6级开挖后	以3 mm/h强度持续8 h
JYSY-4		开挖支护完成后	总降雨量为50 mm
JYSY-5		开挖支护完成后	总降雨量为100 mm
JYSY-6		开挖支护完成后	总降雨量为200 mm
JYSY-7		1~2级开挖后	以3 mm/h强度持续6 h
JYSY-8		1~4级开挖后	以3 mm/h强度持续7 h
JYSY-9	开挖完成后支护	1~6级开挖后	以3 mm/h强度持续8 h
JYSY-10		开挖完成后	总降雨量为50 mm
JYSY-11		开挖完成后	总降雨量为100 mm
JYSY-12		开挖完成后	总降雨量为200 mm

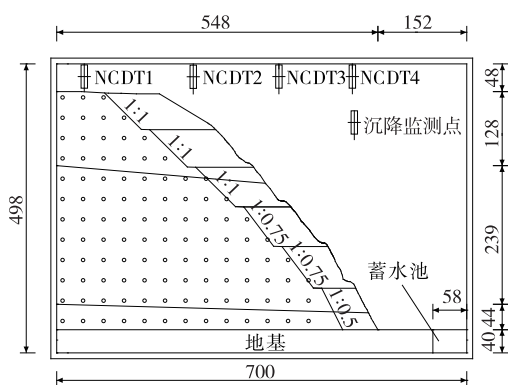


图1 模型填筑示意图(单位:cm)

### 2.3 试验量测

为监测边坡的变形特性,试验过程中对边坡的沉降进行监测,监测点布置见图1,其中NCDT1用于监测坡顶沉降,NCDT2用于监测第5级边坡的沉降,NCDT3用于监测第3级边坡的沉降,NCDT4用于监测坡脚的沉降。

以大头针为标记结合高速摄影装置进行边坡内部沉降观测,大头针的布置见图2中的圆点,大头针行间距与列间距均为35 mm。在试验前和试验后分别记录每个大头针的坐标,根据坐标的变化值得到

土体的沉降值。为了减小大头针对土体的影响,将15 mm长的大头针剪短,只留下大头针端部极小部分,并在模型箱壁上涂抹润滑剂降低土体与模型箱之间的摩擦力。以老路基中心线与路面水平线交点为原点建立坐标系,纵坐标以下为正,横坐标以左为正,竖向变形以向下为正。



图2 模型中大头针的布置

试验中路基沉降采用NCDT1300型激光位移传感器监测,其精度为 $4 \mu\text{m}$ ,误差 $\leq 40 \mu\text{m}$ ,有效量程为100 mm,满足试验要求。为固定该传感器,采用3 mm厚矩形钢管制作可调节水平和垂直位置的T形支架,经过悬臂梁理论计算,当离心机加速度为200g时,支架产生的最大挠度为 $25.8 \mu\text{m}$ ,满足试验

精度要求。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 边坡开挖中的变形

##### 3.1.1 坡顶变形

图3为边坡坡顶在开挖过程中的水平变形。从图3可看出:采用两种不同开挖支护时序方式对坡顶水平变形规律的影响不大,坡顶在开挖后即产生沉降,随着边坡开挖过程的发展,沉降逐渐增加,但增加速率均不大,曲线发展较为平缓。从变形值来看,采用及时支护方式对边坡水平变形具有较好的限制作用,第1级开挖后和第6级开挖后水平变形分别降低34%、31%。

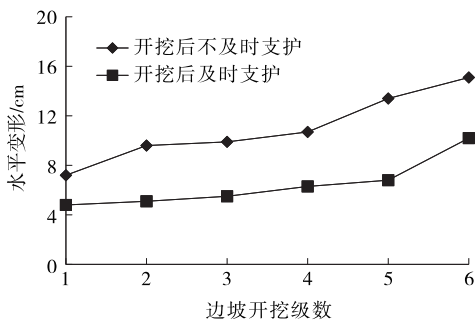


图3 坡顶开挖过程中的水平变形

图4为边坡坡顶开挖过程中的竖向变形。从图4可看出:边坡开挖后,坡顶迅速发生竖向变形,其中前4级开挖过程中坡顶沉降发展较迅速,近似呈直线发展;后2级开挖时坡顶沉降速率放缓,基本进入稳定阶段。两种开挖支护时序施工方法下坡顶沉降规律基本类似,但开挖后期的沉降曲线有所不同。开挖后及时支护的施工方法对坡顶竖向变形有较好的抑制作用,其中开挖前期抑制效果较好,竖向变形降低50%左右,开挖后期效果降低。可见开挖后及时支护在开挖前期更能发挥作用。

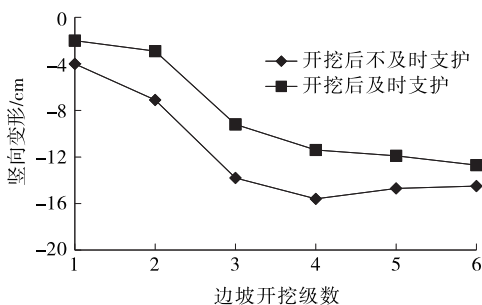


图4 坡顶开挖过程中的竖向变形

##### 3.1.2 坡脚变形

图5为坡脚开挖过程中的水平变形。从图5可看出:第1级边坡开挖后,坡脚位置背离边坡方向产生了一定水平位移,且随着开挖的进行水平位移逐渐增大;第4级开挖后水平位移逐渐降低。两种施工方法下坡脚水平位移的发展规律基本一致,相对而言,开挖后及时支护方法的水平位移有所降低,但降幅比坡顶竖向变形的降幅小。说明开挖支护方式主要对坡体起作用,对坡脚的作用有限。

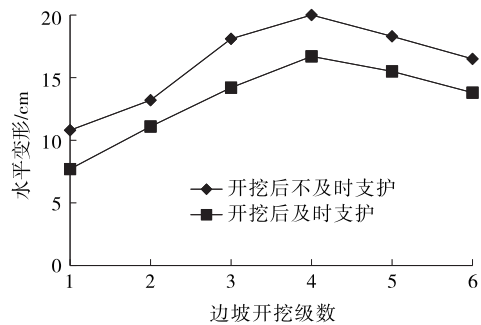


图5 为坡脚开挖过程中的水平变形

图6为坡脚开挖过程中的竖向变形。从图6可看出:开挖后及时支护工况下,在第1~3级边坡开挖后,坡脚位置背离边坡方向均产生了向下的位移,从第1级开挖到第3级开挖开始,竖直向下的位移逐渐增大至顶峰,第3级开挖完成后该位移值逐渐减小,至第4级开挖时基本无位移产生,即以第4级开挖为节点,竖向位移由下转为向上;第4级开挖后坡脚位置背离边坡方向又产生向上的位移并呈逐渐增大的趋势。开挖后不及时支护工况下,坡脚竖向位移的发展规律与及时支护情况基本一致,但其竖向位移偏大,且以第5级开挖为转折,第5级开挖完成后竖向位移由向下变为向上。

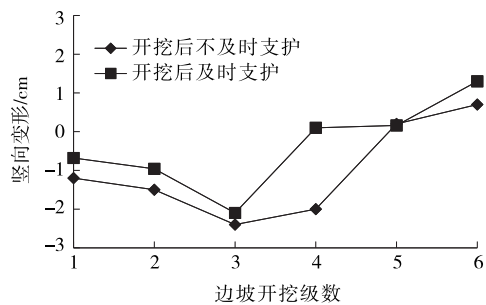


图6 坡脚开挖过程中的竖向位移

#### 3.2 边坡含水量的变化

以开挖第2级边坡坡底角为研究点,每次降雨完成后,沿该点竖直向下在不同深度处进行体积含

水量测量,结果见图7。

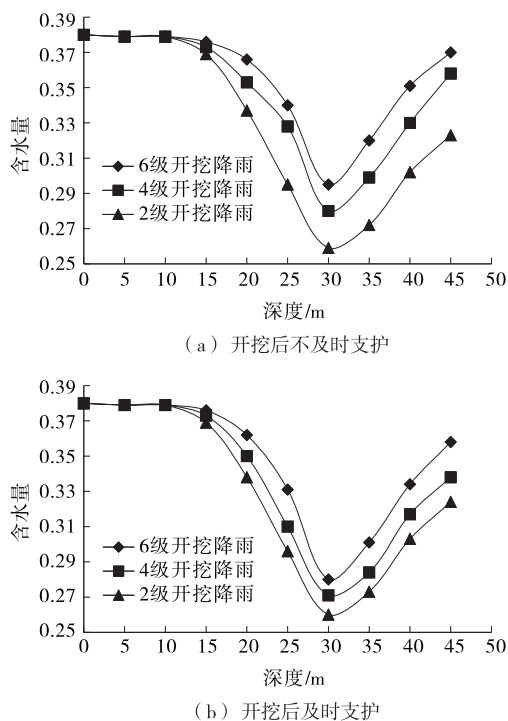


图7 坡脚开挖过程中边坡含水量的变化

从图7可看出:1)边坡表层体积含水量的大小明显受到降雨入渗的影响,随着降雨的进行及向内的逐渐渗透,边坡土体趋于饱和状态,体积含水量随深度的增加呈先减小后增大的趋势。这是由于随着降雨的入渗,地下水位抬高,孔隙水压力也升高,在地下水位以上区域出现暂态饱和区。这不仅会使暂态孔隙水压力升高,还会使非饱和区基质吸力下降,从而导致边坡稳定性下降。此外,根据相关文献所得出的含水量与土体力学性质间的相互关系,含水量的增加会导致土质边坡的安全系数降低。2)对比3条曲线,降雨量越小,对应含水量越小。随着开挖的进行完成3次降雨,对应含水量增加,从试验过程中每次降雨后边坡变形来看,在开始降雨时,边坡岩土体变形不明显,即对其稳定性削弱不显著;随着降雨量及降雨次数的增加,浅表层岩土体持续软化,造成抗剪强度降低、边坡安全系数减小。3)两种工况下,第2级边坡开挖完成后进行降雨对应的含水量分布曲线基本一致。边开挖边支护工况下,第4级开挖完成后进行降雨对应的含水量及第6级开挖完成后进行降雨对应的含水量均比开挖完成后再支护工况下对应深度处的含水量小,表明边开挖边支护对降雨入渗有一定的限制作用,对保证边坡的稳定能起到较好的效果。因此,施工中应加强边坡的

支护措施。

## 4 结论

(1) 开挖后及时支护的施工方法对坡顶的竖向变形有较好的抑制作用,其中开挖前期的抑制效果较好,竖向变形降低50%左右,开挖后期效果降低,说明开挖后及时支护在开挖前期更能发挥作用。

(2) 随着开挖的进行,坡顶的水平位移逐渐增大,开挖后及时支护的施工方法对坡顶水平位移具有较好的抑制作用,抑制率约34%,稍低于纵向变形抑制率。

(3) 边坡表层体积含水量大小明显受到降雨入渗的影响,边坡土体随着降雨的进行及向内的逐渐渗透而趋于饱和状态,体积含水量随深度的增加呈先减小后增大的趋势。随着降雨的入渗,地下水位抬高,孔隙水压力也升高,在地下水位以上区域出现暂态饱和区。

(4) 及时支护对降雨入渗具有一定的限制作用,对保证边坡的稳定能起到较好的效果。

## 参考文献:

- [1] 马玉秋,聂志凌.降雨对土质边坡稳定性影响机理及实例分析[J].市政技术,2011,29(6).
- [2] 邓通发,桂勇,罗嗣海,等.降雨条件下花岗岩残坡积土路堑边坡稳定性研究[J].地球科学与环境学报,2012,34(4).
- [3] 张洪全.考虑降水渗流对边坡稳定性影响分析[J].工程与建设,2009,23(6).
- [4] 张卓,练继建.不同降雨强度下岩体边坡的渗流场分析[J].水力发电学报,2006,25(5).
- [5] 刘永涛.降雨入渗对黄土边坡稳定性影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [6] 刘义高,周玉峰.增湿条件下膨胀土路堑边坡稳定性数值分析[J].岩土工程学报,2007,29(12).
- [7] 吴宏伟,陈守义,庞宇威.雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J].岩土力学,1999,20(1).
- [8] 钱立平,马建林.土工离心模型试验原理与若干问题分析[J].路基工程,2007(3).
- [9] 周健,刘宁.离心模型试验技术应用的新进展[J].上海地质,2002(1).
- [10] 陈建斌,孔令伟,郭爱国,等.降雨蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征研究[J].土木工程学报,2007,40(11).