

边坡变形破坏离心机模型试验研究

Centrifuge modeling of deformation and failure of slope

高长胜, 徐光明, 张 凌, 杨守华

(南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

关键词: 边坡; 离心模型; 变形; 安全系数

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)04-0478-04

作者简介: 高长胜(1973-), 男, 博士生, 主要从事地基基础与边坡工程的科研与技术服务工作。

0 概 述

关于离心模型试验原理和边坡稳定性模型试验的相似律, 文献[1]~[3]中分别从不同的角度进行了比较详细的论述, 并指出在离心机模型中, 由于惯性力场的作用, 使模型的容重增大 n 倍, 就可使离心模型达到与原型相同的应力变形状态, 使两者的塑性区域发展及其破坏过程保持相似, 从而得出离心模型的边坡的安全系数与原型完全相等, 模型反映了原型的真实情况。由于离心模型满足了重力相似条件, 而常规模型则不能, 这对研究以自重为主要受力的边坡工程问题具有重要意义。本文针对某堤防工程, 利用离心机模型试验, 进行施工期及运行期水位骤降时边坡变形稳定特性研究, 并进行了理论计算与分析。

1 试验研究

1.1 试验简介

模型试验是在南京水利科学研究院 400 g-t 大型离心机进行的, 模型箱的尺寸为: 1100 mm (长) × 550 mm (高) × 400 mm (宽), 为了模拟水位升降, 设计安装了水位控制系统^[4], 水位动态变化由水位传感器通过数据采集系统实时监测和记录。根据模型箱与原型的几何尺寸设定模型相似比为 $n=60$ 。

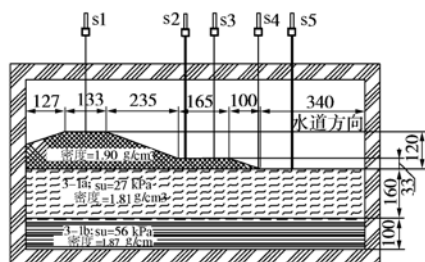


图 1 竣工期模型 (BM1) 布置图 (单位: mm)

Fig. 1 Arrangement of model during construction

选用从现场选取的代表性土料进行模型制备, 控

制性土层分堤身粘土、3-1a 软土层和 3-1b 粘土层, 进行分层压实并控制密度和强度指标与原型尽可能相同。模型各土层主要物理力学特性指标见表 1, 模型布置图见图 1, 2。同时在模型剖面上布置变形测量网格, 通过闭路电视边坡变形, 并在模型表面中心线上安装激光位移传感器 (见图中 s1~s5), 测量边坡表面的沉降变形过程, 传感器的分辨率为 20 μm (见图 1 和图 2)。

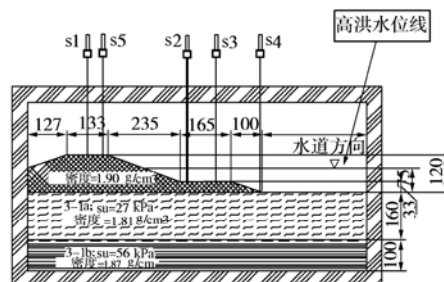


图 2 水位骤降期模型 (BM2) 布置图 (单位: mm)

Fig. 2 Arrangement of model during rapid drawdown

1.2 试验模拟技术

试验模拟技术可参考文献[4], 这里仅对有关方法或原理简单介绍:

(1) 竣工期模拟: 填筑过程按固结问题进行处理, 模型模拟施工过程的运行时间为: $t_m = \frac{t_p}{n^2}$ (t_m 为模型运行时间, t_p 为实际施工完成时间, n 为相似比), 按照上述原理施加加速度速率, 并在 t_m 时刻达到设计加速度 ng , 此时模型的变形特性相当于原型竣工期状况。

(2) 蓄水和水位骤降模拟: 在竣工期模拟结束后, 保持模型运行的加速度不变, 开始蓄水, 达到高洪水位后继续运行使堤防充分浸泡, 然后通过水位控制系统进行水位骤降模拟, 蓄水与水位骤降过程按固结与渗透问题考虑, 模型模拟蓄水和水位骤降的运行时间

表 1 模型各土层主要物理力学特性指标
Table 1 physical property indexes of soils

指标	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	含水率 w /%	容重 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和度 S_r /%	不排水强度 s_u /kPa
堤身粘土	—	—	26	1.90	89	53
3-1a 淤泥	69	30	35.2	1.81 (BM1) 1.82 (BM2)	94	27 (BM1) 29 (BM2)
3-1b 淤泥质粘土	—	—	32.5	1.87	96	56

为 $t_m = \frac{t_p}{n^2}$ 进行设定 (t_m 为模型运行时间, t_p 为原型实际时间)。

(3) 破坏性试验: 在模型达到所模拟的实际工况后, 紧接着破坏性试验, 以测定模型的稳定安全系数, 边坡破坏时间与施加的加速度速率有直接关系, 破坏性试验过程中施加加速度的速率为: $\Delta \dot{\alpha} = \frac{n^3 g}{t_p}$ (t_p 为原型施工或水位骤降实际时间)。模型的安全系数定义为 $F_s^m = \alpha_1 / ng$ (α_1 为模型的破坏临界加速度), 模型破坏失稳时的临界加速度是根据边坡变形与加速度变化关系曲线上的特征点来确定的。

2 试验结果及分析

为了直观表达模型试验反映原型的状况, 将模型离心加速度水平 a/g 换算成它所模拟的原型填筑高度 h_p ($h_p = a/g \cdot h_m$), 模型沉降 s_m 换算成原型尺度的沉降 s_p ($s_p = n \cdot s_m$), 模型时间 t_m 换算为原型时间尺度 t_p ($t_p = n^2 \cdot t_m$)。

2.1 施工期边坡变形破坏特性

图 3 给出了模型 BM1 表面 5 个沉降测点处的沉降随堤身填筑高度的变化曲线。可以发现各点的表面沉降随填筑升高而增加, 其中位于堤顶测点 s1 记录的沉降最大, 当填筑至设计高度时, 该测点沉降读数为 90 cm, 当进行破坏性试验时, 堤顶的沉降一直继续增加, 但在位于上坡坡脚处的测点 s2 和下坡坡脚处的测点 s4 的沉降开始增加, 到一定程度后开始减小, 即两坡脚处发生隆起, 表明堤防有失稳的迹象。表 2 给出了破坏性试验加速度值与堤顶 s1、s2、s4 沉降速率的关系。由曲线上的特征隆起点和关键点沉降速率可以确定堤防边坡破坏临界加速度约为 77~80.0 g, 取小值得到竣工时边坡稳定安全系数约为 1.28。

根据模型剖面位移网格结点的坐标变化所绘制的矢量图见图 4, 图中同时标出坡顶附近出现的裂缝位置和失稳破坏时的滑弧。可以发现, 滑动破坏面基本成圆弧状, 并切入到软弱地基层 (3-1a) 中。

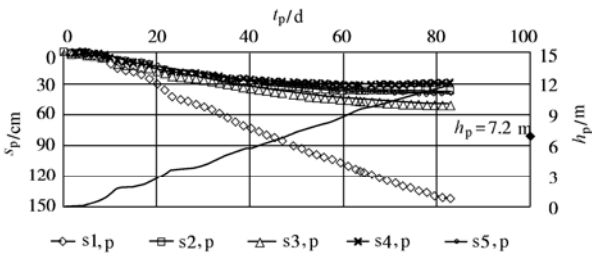


图 3 施工期沉降过程线

Fig. 3 Time history of surface settlement

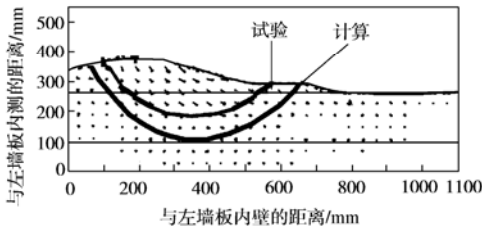


图 4 施工期边坡位移矢量及其滑弧示意

Fig. 4 Displacement vector and slide surface

2.2 水位骤降期边坡变形破坏特性

图 5 是水位骤降期模型 BM2 表面 5 个测点处的沉降读数、堤身填筑高度和水位变化过程的水深与所模拟的原型时间变化过程曲线。在施工期, 沉降总的发展趋势仍是随堤身升高而增加, 位于堤顶的 s1 和 s5 测点沉降最大, 当堤身填筑至设计高度时, 两测点沉降读数分别为 97 和 108 cm。在模型的竣工期结束后, 即开始了蓄水和水位骤降的模拟, 此时保持模型的离心加速度不变, 可以看出 s1 和 s5 在此阶段的沉降速率明显较为缓慢。由于测点 s2、s3 和 s4 在浸水淹没期间, 激光位移传感器因水体反射的干扰无法给出它们正确的读数, 直到水位骤降后, 激光位移传感器才给出正确的位移测量读数, 蓄水前与水位骤降后的传感器测读结果表明在这一过程中这些测点的沉降值也是变大的。

当水位最高涨至洪水位 4.5 m 时, 保持这一水位使堤防充分浸泡饱和, 然后进行水位骤降模拟, 水位骤降幅度为 3.5 m。

表 3 给出了位于堤顶的 s1、s5 和位于上坡坡脚测点 s2 在破坏性试验中的沉降速率及其对应加速度值,

表 2 破坏性试验表面沉降速率及其对应加速度值

Table 2 Surface settlement rate and the corresponding acceleration									
加速度/g	64	66	68	70	72	74	76	78	80
s1 沉降速率 (cm · d ⁻¹)	1.42	1.63	1.63	1.59	1.63	1.65	1.75	2.65	2.45
s2 沉降速率 (cm · d ⁻¹)	0.24	0.24	0.35	0.35	0.24	0	0	-0.67	-0.24
s4 沉降速率 (cm · d ⁻¹)	0.03	0	0.02	0.02	0.03	-0.02	0	0	-0.02

表 3 破坏性试验表面沉降速率及其对应加速度值

Table 3 Surface settlement rate and the corresponding acceleration							
加速度/g	60	64	70	74	76	79	80
s1 沉降速率 (cm · d ⁻¹)	0.54	0.43	0.87	1.23	3.56	2.17	1.20
s5 沉降速率 (cm · d ⁻¹)	0.81	0.92	1.15	1.75	4.71	3.23	1.96
s2 沉降速率 (cm · d ⁻¹)	0.19	0.19	-0.19	0	-0.38	-0.76	-0.76

由沉降曲线和沉降速率特征值可以确定水位骤降期模型破坏临界加速度为 75~80 g，取小值得到边坡稳定安全系数为 1.25。

显向外鼓出，可以判定，这部分坡体构成了破坏失稳时的滑动体。

2.3 两种工况下边坡变形破坏特性

由于离心模型土体主要根据原型地基与堤身的强度进行模拟控制，因此，获取的边坡变形破坏特征是可靠的。边坡变形破坏离心模型试验表明，当堤防边坡的土体出现较大变形后，边坡才会出现破坏，边坡出现破坏时坡顶的沉降速率会突然变大，坡脚隆起伴随明显的侧向位移，并在堤顶出现拉裂隙，边坡变形破坏表现为渐进变形到突变破坏的过程。

竣工期堤防边坡的变形破坏特征明显不同于水位骤降时的状况，竣工期边坡的变形破坏的滑弧已切入到地基内，表现为深层变形破坏，而水位骤降的滑弧则未切入到地基内表现为浅层变形破坏，这两种变形破坏特征的不同对堤防的设计与防护有重要意义。

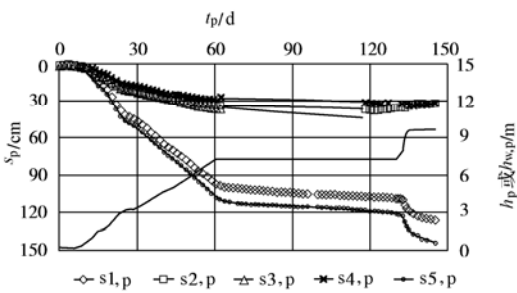


图 5 水位骤降期沉降过程线

Fig. 5 Time history of surface settlement

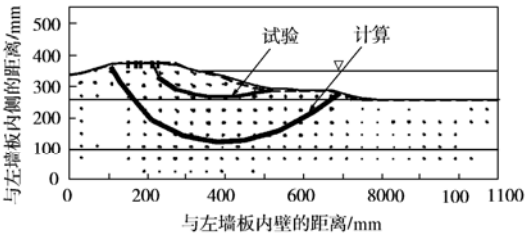


图 6 水位骤降期边坡位移矢量及滑弧形式

Fig. 6 Displacement vector and slide surface

根据模型剖面位移网格结点的坐标变化所绘制的矢量图见图 6，图中同时标出了变形前后的表面轮廓线、坡顶附近所形成的裂缝所在位置和滑弧。从图中可以看到，迎水一侧边坡体中发生的水平位移量最大，尤其是最高水位线以下上坡部分因水平侧向位移而明

3 现场稳定计算与变形分析

3.1 稳定计算

模型模拟现场堤防边坡土体的物理力学性质指标见表 4，水位骤降幅度的设计工况为 3.2 m，稳定计算采用 Bishop 法，实际计算结果为 $F_{竣工}=1.40$ ， $F_{骤降}=1.56$ ，滑弧情况见图 4 和图 6，可见竣工期边坡破坏的滑弧与模型试验较为接近，但水位骤降期实际计算与模型试验测定的滑弧有一定差异。

3.2 变形分析

在实际工程中对变形起关键作用的除外加载荷外

表 4 现场土体物理力学性质指标表
Table 4 Mechanical properties of soils

土层 名称	容重 $\gamma/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗剪指标							压缩指标		
		直剪		十字板		三轴剪指标			e_0	C_c	C_v
		c_q /kPa	φ_q /($^\circ$)	su /kPa	c_{cu} /kPa	φ_{cu} /($^\circ$)	c' /kPa	φ' /($^\circ$)			
堤身	1.90	18	3	—	—	—	—	—	1.470	0.48	6.31
3-1a	1.76	—	—	27.6	2	13	1	25	1.469	0.44	6.91
3-1b	1.76	—	—	44.4	2	13	1	25	1.184	0.43	4.38

主要与土体压缩特性、结构性和地基排水条件等有关，试验测得的沉降变形是定性的，无法与现场实际进行对比，但获取的边坡变形特征，以及边坡在变形破坏时在坡脚隆起、堤顶沉降速率突然变大等特点是符合工程实际的，这些特点可以指导工程安全施工与防护。

4 结 语

通过对某堤防工程边坡变形稳定的离心机模型试验研究，有以下下结论：

- (1) 离心模型试验表明，堤防边坡破坏一般伴随着变形的发展，在变形发展到一定程度后，一般坡顶沉降速率突然变大，坡脚处出现隆起，并在堤顶出现拉裂缝，边坡破坏表现为渐进变形至突变失稳的特点。
- (2) 从离心模型破坏性试验观测到，竣工期的滑动破坏面呈圆弧状，并切入软弱地基层中，失稳破坏是为深层破坏，水位骤降期的边坡在水位骤降一侧的水平位移明显，尤其是最高水位线以下上坡部分，因侧向位移而明显向外鼓出，滑动破坏面基本呈圆弧状，滑弧未切入地基土层中，失稳破坏主要表现为浅层破

但在离心模型中土体的这些特性难以模拟，所以模型坏。

(3)通过离心机模型破坏性试研究获取堤防模型边坡在施工期的稳定安全系数为 1.28，水位骤降期的稳定安全系数为 1.25，实际计算中施工期的安全系数与滑弧与模型试验较为接近，而在水位骤降条件下，理论计算与模型试验结果有一定差异。

(4)施工期与水位骤降期边坡变形破坏特征的不同对进行堤防工程的设计与防护有重要意义。

参考文献：

[1] 章为民, 窦 宜. 土工离心模拟技术的发展[J]. 水利水运科学研究, 1995,(3): 294 - 301.

[2] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[R]. 长江科学院院报, 1998, 15(2):1 - 5.

[3] 杜延龄. 土工离心模型试验基本原理及其若干基本模拟技术研究[J]. 水利学报, 1993,(8):19 - 27.

[4] 高长胜, 等. 堤防边坡稳定离心模型试验技术[J]. 岩石力学与工程学报, 待刊.