

堤防边坡稳定离心模型试验技术

高长胜, 陈生水, 徐光明, 魏汝龙

(南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 在进行堤防工程设计时, 一般要进行竣工期、水位骤降期及高洪水位运行期的抗滑稳定分析。从试验材料模拟、工况模拟及离心机加荷运行方式等方面提出应用离心机模型试验研究堤防抗滑稳定的试验模拟技术, 并探讨通过离心破坏性试验获取边坡稳定安全系数的方法。试验技术对进行堤防边坡工作与破坏机理研究以及对设计方案的论证、优选具有重要的指导意义。

关键词: 边坡工程; 离心机模型试验; 抗滑稳定安全系数

中图分类号: TD 824.7

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)23 - 4308 - 05

CENTRIFUGAL MODEL TEST ON SLOPE STABILITY OF LEVEE PROJECT

GAO Chang-sheng, CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, WEI Ru-long

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The safety factors of levee project under the conditions of completion, the water level fall suddenly and the high water level should be analyzed in the designs. The methods of simulating model material, operating mode and test technology in the centrifugal model tests for above-mentioned conditions are given, and the methods of getting safety factors from the ruinous centrifugal model tests are discussed. All these are important to analyze the work mechanism and to optimize the design in the levee project.

Key words: slope engineering; centrifugal model test; safety factor against sliding

1 引言

由于土体的变形模量、强度等与其应力水平密切相关, 且呈非线性关系, 因此要想通过模型试验来真实反映原型, 就必须实现模型的应力水平与原型保持一致。离心模型试验就是通过施加离心力使模型的容重增大, 从而使模型中各点的应力与原型一致。文[1]从能量原理的角度论证了对于用原型材料按比尺 $1:n$ 制成的模型, 只要离心模型加速度达到 $a = ng$, 加载条件与原型相同, 就可使离心模型达到与原型相同的应力状态, 且两者的塑性区域发展及其破坏过程保持相似。因此, 利用离心模型试

验进行边坡工程研究可在原型应力状态下研究和观察边坡的变形状态和破坏过程。离心模型试验技术主要包括材料模拟、工况模拟以及试验方法模拟等内容。关于离心模型试验原理及应用情况, 文[2~10]从不同方面进行了介绍与分析, 这里不再赘述。对于模型比尺为 n 的离心模型, 模型与原型主要物理量之间的关系见表 1, 根据这些相似关系及工程实际可以确定堤防边坡的离心模拟方法。

2 模型与原型边坡安全系数关系

由于离心模型满足了重力相似条件, 而常规模型则不能, 这对研究以主要作用荷载为重力的边坡

收稿日期: 2004 - 06 - 24; **修回日期:** 2004 - 11 - 25

作者简介: 高长胜(1973 -), 男, 1998年于南京水利科学研究院岩土工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事地基基础及边坡工程方面的科研与技术咨询工作。E-mail: csgao@nhri.cn.

表 1 离心模型与原型的相似率(模型比尺为 n)

Table 1 Simulation ratio between centrifugal model and prototype one(model scale is n)

内容	物理量	纲量	模型与原型之比
几何量	长度	L	1 : n
	面积	L ²	1 : n^2
	体积	L ³	1 : n^3
材料性质	含水量		1 : 1
	密度	ML ⁻³	1 : 1
	容重	ML ⁻² T ⁻²	n : 1
	粘聚力	ML ⁻¹ T ⁻²	1 : 1
	内摩擦角		1 : 1
	变形系数	ML ⁻¹ T ⁻²	1 : 1
	抗弯刚度	ML ³ T ⁻²	1 : n^4
	抗压刚度	MLT ⁻²	1 : n^2
	渗透系数	LT ⁻¹	n : 1
	质量	M	1 : n^2
外部条件	速度	LT ⁻¹	1 : 1
	加速度	LT ⁻²	n : 1
	集中力	MLT ⁻²	1 : n^2
	均布荷载	ML ⁻¹ T ⁻²	1 : 1
	能量、力矩	ML ² T ⁻²	1 : n^2
性状反应	频率	T ⁻¹	n : 1
	应力	ML ⁻¹ T ⁻²	1 : 1
	应变		1 : 1
	位移	L	1 : n
	时间	T	
	惯性(动态)		1 : n
	渗流、固结或扩散		1 : n^2
蠕变、粘滞流		1 : 1	

工程问题具有重要意义。下面分析模型与原型稳定安全系数之间的关系。

安全系数的计算公式为

$$F_s = \frac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}} = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中: l_i 为第 i 土条的弧长(m), W_i 为第 i 土条的重力(kN/m), α_i 为第 i 土条弧线中点切线与水平线的夹角($^\circ$), c_i 为第 i 土条滑动面上土的粘聚力(kPa), φ_i 为第 i 土条滑动面上土的内摩擦角($^\circ$)。

对于常规模型(NM)与原型(PM), 其相似关系为

$$\left. \begin{aligned} c_i^{\text{PM}} &= c_i^{\text{NM}}, \quad l_i^{\text{PM}} = n l_i^{\text{NM}}, \quad \alpha_i^{\text{PM}} = \alpha_i^{\text{NM}} \\ \varphi_i^{\text{PM}} &= \varphi_i^{\text{NM}}, \quad \gamma_i^{\text{PM}} = \gamma_i^{\text{NM}}, \quad W_i^{\text{PM}} = n^2 W_i^{\text{NM}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: γ_i 为第 i 土条的容重(kN/m³)。

将式(2)代入式(1), 得到常规模型与原型的安全系数之间的关系:

$$F_s^{\text{NM}} = F_s^{\text{PM}} + (n - 1)F_{s(\varphi=0)}^{\text{PM}} \quad (3)$$

式中: $F_{s(\varphi=0)}$ 为 $\varphi = 0$ 时的安全系数, 对于快速施工边坡, 常采用不排水剪切强度, 因此有

$$F_s^{\text{NM}} = n F_s^{\text{PM}} \quad (4)$$

式(4)表明, 常规模型边坡的稳定安全系数是原型的 n 倍, 不能反映原型的实际安全状况。在离心模型中, 由于离心惯性力场的作用, 使离心模型的容重增大 n 倍, 此时离心模型(CM)与原型(PM)的相似关系为

$$\left. \begin{aligned} c_i^{\text{PM}} &= c_i^{\text{CM}}, \quad l_i^{\text{PM}} = n l_i^{\text{CM}}, \quad \alpha_i^{\text{PM}} = \alpha_i^{\text{CM}} \\ \varphi_i^{\text{PM}} &= \varphi_i^{\text{CM}}, \quad n \gamma_i^{\text{PM}} = \gamma_i^{\text{CM}}, \quad W_i^{\text{PM}} = n W_i^{\text{CM}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1), 有

$$F_s^{\text{CM}} = F_s^{\text{PM}} \quad (6)$$

式(6)说明, 离心模型得到的边坡安全系数与原型相等, 即离心模型边坡的安全性状反映了原型的真实情况。

3 堤防离心模型试验模拟

3.1 堤基及堤身模拟

为了使模型材料特性与原型基本相同, 从现场选取代表性土料进行模型制备, 并控制模型土层强度指标和密度与原型尽可能相同。由于试验主要是研究边坡安全性状, 因此土体强度是主要的模拟对象。为了模拟成层地基, 采用固结的方式, 根据模型的相似比尺、地基的容重和厚度确定土料用料, 然后经过充分浸泡、拌成泥浆, 从底层向上分层按实际地基强度要求设定预压荷载, 然后采用与原型一致的加速度(ng)进行固结, 直至形成整个地基。堤身也用相同的方法进行模拟, 模拟完成后按模型比尺开挖形成堤防边坡, 模型堤防的各部分尺寸为 $L_{\text{CM}} = L_{\text{PM}}/n$ (L_{CM} 为离心模型边坡长度, L_{PM} 为原型边

坡长度)。堤身和堤基也可以采用分层压实法按强度和密度进行模拟，但模拟效果控制不如固结法好。

3.2 水位变化模拟

由于在高速旋转的离心模型上进行堤防水位变化模拟较为困难，为了有效模拟堤防水位变化，在离心机上特地设计和安装了一套水位控制系统，如图 1 所示。该系统由贮水箱、进水电磁阀、管路和放水电磁阀以及水位传感器构成。在模型所承受的离心加速度达到设计值后，根据设定运行时间，打开进水阀，模拟堤防水道一侧蓄水，当水位上升到最高洪水位时，关闭进水电磁阀，并维持在这一水位上继续运行，模拟堤防处于高水位浸泡。当浸泡时间达到试验预定要求时，打开放水电磁阀，堤防水道一侧的洪水位发生骤降。由于在高速运转的离心机中精确控制水流速度有一定困难，因此，进出水流的速率由控制阀门及管路的数量来近似控制，在蓄水和水位骤降过程中的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。

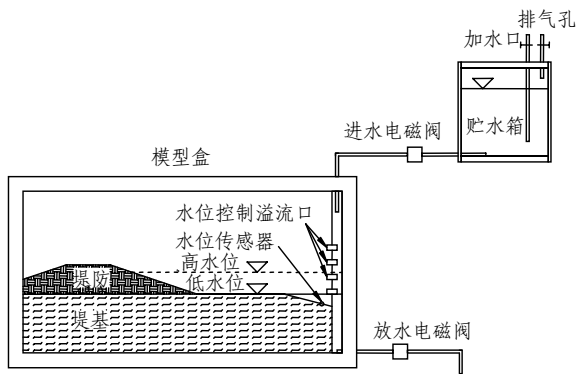


图 1 离心模型水位控制系统

Fig.1 Water level controlling system of centrifugal model

3.3 竣工期模拟

在高速旋转的重力场中，真实地再现堤防分层、分期的施工过程是非常困难的。根据相似理论，可以通过控制离心加速度来模拟堤坝的填筑^[6]，模拟过程主要为：首先依据堤防的现场填筑速率和模型比尺(n)确定施加的离心加速度，当离心加速度达到 $n_i g$ 时，此时模型模拟的高度相当于原型填筑到 $(n_i/n)H$ (H 为原型堤防高度)的高度。按照确定的加速度将其施加到模型上，施加过程可以近似模拟现场填筑过程。当离心加速度达到设计加速度(ng)时，相当于原型堤防竣工时的填筑高度，此时模型的性

状即代表原型堤防在竣工时的稳定性状。由于堤防边坡在填筑过程中的变形破坏主要受地基固结控制，因此，这一过程可作为固结问题进行处理，则模拟各层及整个施工期的填筑时间为

$$T_{CMi} = \frac{T_{PMi}}{n^2} \tag{7}$$

$$T_{CM} = \frac{T_{PM}}{n^2} \tag{8}$$

式中： T_{CMi} 为填筑离心模型的第 i 层时所用运行时间， T_{PMi} 为填筑原型第 i 层时所用的实际时间， T_{CM} 为堤防完工时离心模型的运行时间， T_{PM} 为完工时原型所用的实际时间， n 为离心模型的相似比尺。

3.4 高洪水位模拟

本工程主要模拟设计洪水位下背水堤坡的安全性状。在堤防竣工期模拟结束后，保持加速度(ng)不变，根据模型相似比尺及堤防的实际蓄水时间与过程，确定离心模型的蓄水时间、蓄水速率与蓄水高度，以及保持高洪水位的时间、水位骤降时间及水位骤降速率，利用水位控制系统对堤防临水侧实现蓄水模拟。当蓄水高度达到设计洪水位高度时，关闭进水电磁阀，并保持高洪水位条件，根据堤防在高洪水条件下的运行状况，判定背水侧堤坡的安全性状。堤防蓄水前边坡的变形破坏主要受地基固结控制，蓄水过程及保持高洪水位边坡的变形破坏主要受渗透控制，因此，可以将这一过程按固结与渗透问题进行处理，对各个过程而言，模型的运行时间按式(7)进行设定，其中， T_{CMi} 取高洪水位过程中模型堤防在不同状态下的运行时间， T_{PMi} 取保持高洪水位过程中原型堤防在不同状态下的实际时间。

3.5 洪水位骤降模拟

本工程主要模拟设计洪水位骤降期间临水位堤坡的安全性状。在堤防竣工期模拟结束后，保持加速度不变，根据堤防的实际蓄水过程、高洪水位时间、水位骤降过程来确定离心模型的蓄水时间、蓄水速率与蓄水高度，以及保持高洪水位时间、水位骤降时间及水位骤降速率，利用水位控制系统对堤防临水侧实现蓄水模拟。当蓄水高度达到设计洪水位高度时关闭进水电磁阀，并根据堤防洪水位实际运行时间，确定离心模型在高洪水位的运行时间，然后进行水位骤降模拟。当水位骤降至设计低水位时，关闭放水阀，此时临水位堤坡的安全性状

即代表实际水位骤降的安全性状。堤防水位骤降边坡的变形破坏可按渗透问题进行处理,因此,骤降过程中模型的运行时间按式(8)进行设定,其中, T_{CM} 取模型堤防在水位骤降过程中的运行时间, T_{PM} 取原型堤防在水位骤降过程中的实际时间。

4 模型安全性系数确定

4.1 模型破坏性试验

边坡稳定安全系数一般是依据边坡土体强度指标及几何形状,采用合理的计算模型与方法得到的。因此,工程中的安全系数实际上是虚幻的,而在进行离心机模型试验时可以通过破坏性试验获取模型的安全系数,这对优化、验证工程设计具有重要意义。

离心机模型破坏性试验是指模型在达到所模拟的工况时边坡未出现破坏,然后按照一定的试验程序加大离心机加速度直至边坡出现破坏。对于堤防在不同工况下的破坏性试验,本文建议采用如下模拟方法进行:

(1) 竣工期:在正常竣工后紧接着继续加大离心加速度进行破坏性试验,该工况下的边坡破坏与施工填筑速率密切相关,建议加速度的施加速率采用模拟施工期时的平均加速度施加速率。破坏性试验的加速度施加速率为

$$\Delta\dot{\alpha} = \frac{ng}{T_{CM}} = \frac{n^3g}{T_{PM}} \quad (9)$$

式中: $\Delta\dot{\alpha}$ 为加速度施加速率。 T_{CM} 取模型堤防完工时的运行时间, T_{PM} 取原型施工完成的实际时间。

(2) 水位骤降:由于水位骤降稳定计算主要考虑由于水位骤降而导致的下滑力矩增大,因此,破坏性试验可在水位骤降完成后继续加大离心加速度。该工况下的边坡破坏与水位骤降速率密切相关,建议加速度施加速率与水位骤降速率相一致,即在相同的时间内由于加速度的增加而使模拟的水位骤降高度增加的值与原型水位骤降值相同。破坏性试验加速度施加速率为

$$\Delta\dot{\alpha} = \frac{n^3g}{T_{PM}} \quad (10)$$

式中: T_{PM} 取原型水位骤降时间。

(3) 高洪水位:该工况下的边坡破坏与堤防两侧水位差及土渗透特性密切相关。破坏性试验加速

度施加速率影响因素较多,具体确定较为复杂,本文建议加速度施加速率与浸润面移动特性相一致(理论计算出由于水位升高而使浸润面上升的移动过程)。

4.2 模型安全系数

假定采用 $\varphi = 0^\circ$ 计算边坡抗滑稳定安全系数,其计算公式为

$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} = \frac{\sum c_i l_i}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (11)$$

假定离心模型与原型的设计相似比为 n ,运行至原型设计状况时对应的加速度水平为 α_0 ,称之为模型设计加速度水平;当进行破坏性试验时,对应堤防边坡在临界破坏时的加速度水平为 α_1 ,称之为模型临界加速度水平。由于进行破坏性试验的目的主要是研究设计工况条件下的抗滑稳定安全系数,因此,可将模型在两种状态下的几何尺寸视为相同,即可得到原型与离心模型的安全系数之间的关系:

$$F_s^{PM} = F_s^{CM_0} = \frac{a_1}{a_0} F_s^{CM_1} \quad (12)$$

式中: F_s^{PM} 为 $a = a_0$ 时的安全系数, $F_s^{CM_1}$ 为 $a = a_1$ 时的安全系数。

堤防边坡在临界破坏时的安全系数 $F_s^{CM_1} = 1$,因此,通过破坏性试验获取的模型安全系数为

$$F_s^{PM} = F_s^{CM_0} = \frac{a_1}{a_0} \quad (13)$$

这样即可由设计状况的离心加速度与临界破坏加速度确定模型的安全系数。

4.3 破坏性试验有关问题的讨论

要想应用离心模型试验完全模拟工程实际中由设计到破坏的过程是极其困难的,试验只能在尽量满足工程实际的条件下,对边坡破坏起主要影响的一些关键性问题进行模拟。另外,进行破坏性试验时的加速度施加速率对堤防破坏有较大影响,较大的加速度施加速率会使边坡提前破坏,反映出的安全系数偏小,反之,则安全系数偏大。因此,进行破坏性试验时,选用合适的加速度施加速率对准确反映模型边坡安全性状有重要意义,目前,国内外尚无进行破坏性试验的有关依据。因此,本文提出的破坏性试验的模拟技术是探讨性的,需要在试验与工程实践中进一步进行研究与完善,但从堤防边坡发生破坏的机理分析,建议的破坏性试验模拟技

术是符合实际工程状况的。另外破坏性试验也可采用其他模拟技术进行,如施加外荷、重复工况等搜索边坡破坏临界状态等,但在目前情况下这些方法操作起来是繁琐的。

5 结 语

(1) 应用离心机模型试验对堤防工程在不同工况条件下进行模拟是可行的,这对应用离心机进行堤防工程工作与破坏机理研究以及进行设计方案的验证、优选具有重要的指导意义。

(2) 通过离心机破坏性试验来研究堤防边坡的抗滑稳定安全系数是可行的,但要设定合理的破坏性试验程序。

(3) 本文提出的破坏性试验模拟技术有一定的工程意义,需要在试验与工程实践中进一步验证与完善。

参考文献(References):

- [1] 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.(Du Yanling. Study on principle of the geotechnical centrifuge model test and test technology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, (8): 19 - 27.(in Chinese))
- [2] 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.(Zhang Weimin, Dou Yi. Development of geocentrifuge modelling in NHRI[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995, (3): 294 - 301.(in Chinese))
- [3] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 1 - 5.(Bao Chenggang, Rao Xibao. Principle of the geotechnical centrifugal model test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 1 - 5.(in Chinese))
- [4] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 199 - 203.(Huang Zhiquan, Wang Sijing. A study of application of centrifugal model testing in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 199 - 203.(in Chinese))
- [5] 徐光明, 章为民, 蔡正银. 离心模拟关键技术试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1995.(Xu Guangming, Zhang Weimin, Cai Zhengyin. Study on test technology in centrifugal test[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995.(in Chinese))
- [6] 章为民, 徐光明. 土石坝施工填筑过程离心模拟方法研究[J]. 水利学报, 1997, (2): 8 - 13.(Zhang Weimin, Xu Guangming. Study on modeling the construction process of embankment dams in centrifugal test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (2): 8 - 13.(in Chinese))
- [7] 杜延龄, 朱思哲, 刘令瑶. 土工离心试验技术研究[J]. 水力发电, 1991, (9): 17 - 20.(Du Yanling, Zhu Sizhe, Liu Lingyao. Study on technology of the geotechnical centrifuge model test[J]. Water Power, 1991, (9): 17 - 20.(in Chinese))
- [8] 油新华, 李 晓. 国外离心模型试验技术在边坡工程中的应用现状与展望[J]. 工程地质学报, 2000, (4): 442 - 445.(You Xinhua, Li Xiao. Current status and prospect of application of centrifugal model test to slope engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, (4): 442 - 445.(in Chinese))
- [9] 杨龙才, 王炳龙, 周顺华, 等. 基坑边坡变形和稳定性的离心试验研究[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版), 2000, 21(10): 100 - 105.(Yang Longcai, Wang Binglong, Zhou Shunhua, et al. Centrifugal model test for deformation and stability of pit slope[J]. Journal of Shanghai Tiedao University(Natural Science), 2000, 21(10): 100 - 105.(in Chinese))
- [10] 郭 昭, 王景铭, 张师德. 土工离心模拟试验的应变分析[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版), 1997, 18(4): 106 - 112.(Guo Zhao, Wang Jingming, Zhang Shide. Analysis of geotechnical centrifugal test data based on strain field[J]. Journal of Shanghai Tiedao University(Natural Science), 1997, 18(4): 106 - 112.(in Chinese))