

土工离心模型试验规程

DL/ T 5102—1999

前 言

本规程是根据原电力工业部 1997 年度电力行业标准制、修订计划项目（综科教〔1998〕28 号文）的安排制定的，在编写格式和规则上符合 DL/T600—1996《电力标准编写的基本规定》。

土工离心模型试验是一项近来新发展起来的试验技术，它能直观、正确地显示土体的工程性状，为设计、施工提供依据，验证已建构筑物的运行情况，并可作为基础性研究的一种方法。世界各国均在竞相发展此项试验技术。我国自 80 年代起，许多科研机构、大专院校先后建立了自己的离心模型试验室，为许多重点工程的设计、施工提供了有关资料，同时也在一些基础性研究中取得了重要科研成果。

离心模型试验在设备、测量仪器、模型制作、数据和图像采集等方面较为复杂，同时在试验进行过程中要保证安全，防止发生事故，故需要一定操作程序和要求，以保证试验资料的可靠性和试验设备仪器的安全运行。为此编制本规程。

本规程在编写过程中参考了国内外一些离心模型试验室所订的规程、细则、手册和积累的模型试验经验。主要包括以下基本内容：

- (1) 试验准则；
- (2) 试验设备；
- (3) 模型制作；
- (4) 试验步骤；
- (5) 试验资料。

本规程的附录 A 是提示的附录。

本规程由中国水利水电科学研究院提出。

本规程由电力行业水电施工标准化技术委员会归口。

本规程起草单位：中国水利水电科学研究院。

本规程主要起草人：韩连兵、朱思哲、侯瑜京、杜廷龄、黄丽清。

本规程由电力行业水电施工标准化技术委员会负责解释。

目 次

前言	1064
1 范围	1066
2 引用标准	1066
3 术语	1066
4 总则	1067
5 试验设备	1068
6 模型制作	1069
7 试验步骤	1069
8 试验资料	1071
9 记录表格	1072
附录 A （提示的附录）物理量变换表	1073

1 范 围

1.0.1 本规程规定了土工离心模型实验中, 试验设备的主要组成部件、模型制作方法、试验操作程序和试验数据采集与资料整理的要求。

1.0.2 本规程适用于各类岩土工程构筑物的模型试验, 如土石坝、路堤、开挖边坡、挡土构筑物、地下隧道和厂房等, 以及其他模拟原型构筑物重力的试验。

2 引 用 标 准

下列标准所包含的条文, 通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时, 所示版本均为有效。所有标准都会被修订, 使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 15406—1994 土工仪器的基本参数及通用技术条件

GB/T 50123—1999 土工试验方法标准

SL 237—1999 土工试验规程

3 术 语

3.0.1 模型率 scaling factor

原形几何尺寸与模型几何尺寸的比值。

3.0.2 离心加速度 centrifuge acceleration

离心机转臂转动时, 沿半径方向所产生的加速度, 其方向与向心加速度方向相反, 大小相等, 其值与转臂的转速和考察点至转轴轴心距有关。

3.0.3 有效加速度 effective acceleration

有效荷重质心的离心加速度。

3.0.4 试验加速度 testing acceleration

模型质心的离心加速度。

3.0.5 模型箱 container

用以制作模型和安装仪器的箱体, 是模型与吊篮之间的连接部件。

3.0.6 有效荷重 effective load

吊篮所承受荷重的质量, 包括模型箱体、模型、量测仪器和安装架、电缆等的质量总和。

3.0.7 平衡荷重 balancing load

平衡有效荷重的质量。

3.0.8 模型荷重 model load

模型材料的总质量。

3.0.9 转动半径 rotating radius

转臂转动时,吊篮底板至转动轴心的距离。

3.0.10 有效半径 effective radius

有效荷重的质心至转动轴心的距离。

3.0.11 平衡半径 balancing radius

平衡荷重质心至转动轴心的距离。

3.0.12 试验半径 testing radius

模型质心至转动轴心的距离。

3.0.13 有效荷重质心 mass center of effective load

组成有效荷重的各部分质心的合成质心。

3.0.14 平衡荷重质心 mass center of balancing load

组成平衡荷重的各平衡块质心的合成质心。

3.0.15 模型质心 center of model mass

组成模型的各种材料质心的合成质心。

3.0.16 允许加速度误差 permissible error of acceleration

距模型质心最远点的加速度对模型质心加速度的相对误差。

3.0.17 离心机最大容量 maximum capacity of centrifuge

离心机的最大加速度与最大有效荷重质量的乘积。

3.0.18 有效容量 effective capacity

离心机的试验加速度与有效荷载的乘积。

4 总 则

4.0.1 模型试验应符合相似律要求和允许的误差,选择模型尺寸、模型材料,使之能正确模拟原型物体的应力、应变及其工作性状。

4.0.2 模型设计应按离心机的基本参数进行,如转动半径、吊篮尺寸、有效荷重和允许最大加速度等。根据相似原理和试验要求,确定与此相关的相似条件,选择模型试验参数。试验离心力应小于离心机允许的最大离心力。

4.0.3 根据模型尺寸和原型构筑物的尺寸,按式(4.0.3)确定模型率 n :

$$n = \frac{L_p}{L_m} \quad (4.0.3)$$

式中: L_p ——原型构筑物尺寸;

L_m ——模型尺寸。

4.0.4 试验加速度应小于离心机允许的最大加速度,有效荷重质量应小于离心机允许的最大质量。按式(4.0.4)计算试验加速度:

$$a_m = \frac{L_p}{L_m} g \quad (4.0.4)$$

式中: g ——重力加速度。

4.0.5 制作模型的材料应采用原型材料,并具有与原型材料相同的物理力学性质,或采用符合相似律的替代材料。

5 试 验 设 备

5.0.1 土工离心机的各组成部件(见图 5.0.1),包括转动机构(图中 1、2 及 7~9)、传动机构(图中 3~6)、辅助设备(润滑系统、冷却系统、供水系统、报警系统)。

1) 转动机构中的平衡重可以和吊篮同步摆动,也可以固定在转臂上。

2) 润滑系统指转动轴、轴承、减速器等工作时的供油回路系统。

3) 冷却系统是指离心机运转时,保证轴承、减速器的机械冷却及使离心机室内温度控制在 $4^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 的采用风冷或水冷的循环散热系统。

5.0.2 模型箱的几何尺寸及形状应根据试验要求选定,如圆柱形、方形或长方形,不管哪种类型的模型箱都应满足以下要求:

1) 制造模型箱的材料应为强度高、刚度大的轻型材料,如铝合金等。

2) 模型箱如有一侧为有机玻璃窗,有机玻璃面应透明无刻痕、无裂缝,有足够的强度。

3) 模型箱应有供水、排水系统和安装量测设备的装置,并要求在箱室内充满水时,承受设计加速度情况下不漏水。

4) 模型箱的底板和周边在最大荷载作用下的挠度应不大于 0.1mm 。

5) 新模型箱使用之前应在满荷载和加速度为 $1.25a$ (a ——设计允许的加速度)的作用下进行检验。

5.0.3 量测设备包括前置放大器和各类传感器(孔隙压力、位移、土压力和加速度等传感器)、数据采集、摄像设备(见图 5.0.1 中 10、11)等。传感器在使用之前应进行静力标定,应取不少于 50% 的传感器按试验要求进行加速度考核,其误差范围应符合 GB/T15406 的规定。

5.0.4 附属设备包括分析筛、制模用具、台秤(感量小于 $0.001t$, t 为有效荷重)和取样器等。

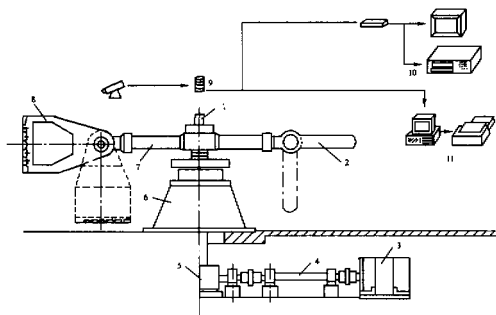


图 5.0.1 土工离心机

1—转轴; 2—平衡重; 3—电动机及整流系统; 4—传动轴; 5—减速器;
6—机座; 7—转臂; 8—吊篮; 9—滑环; 10—摄像系统; 11—数据采集系统

6 模型制作

6.0.1 在制作模型前,应对原型构筑物的设计资料,如边界条件、材料性质和模拟研究的问题等,进行分析,提出试验计划大纲及每次试验历时和模型设计书(模型设计书包括模型材料、模型率、加速度、测点布置及试验次数)。参加试验的人员应持有上岗证。

6.0.2 模型材料的物理力学性质,如密度、含水率、压缩性和强度等一般应与原型构筑物材料的相同。对于粗粒土,应按 SL 237—1999 标准中的规定制作模型;如用原型材料有困难时,允许用相似材料替代,但应有试验依据和符合相似律的要求。相似材料的物理力学性质应与原型材料相同或相似。

6.0.3 按本规程式(4.0.3)确定模型率 n 时,还应考虑允许加速度误差及离心机最大容量 c ,应满足式(6.0.3-1)及式(6.0.3-2):

$$n = L_p / (2\alpha R_m) \quad (6.0.3-1)$$

$$n \leq \frac{c}{gm_e} \quad (6.0.3-2)$$

式中: L_p ——原型构筑物尺寸, m;

α ——允许加速度误差 ($\leq \pm 5\%$);

R_m ——试验半径, m;

m_e ——有效荷重质量, kg;

c ——离心机最大容量, $g \cdot t$ 。

6.0.4 根据初步确定的模型率 n 值,按原型几何尺寸缩小至 $1/n$ 制作模型。若模型箱的尺寸不能满足模型尺寸要求,可调整 n 值。模型尺寸应尽可能大些,以便能清晰地显示模型的变形。

6.0.5 传感器的埋设应与模型材料接触密实,动力线和传感器的导线应弯曲成蛇形固定在转臂的导杆上或模型箱周壁上,以防止受力拉断。在同一测点上尽可能平行设置两个同类传感器,便于互相校核。

6.0.6 在土料模型的制作过程中应沿垂直断面和水平层取样,检测其密度和含水率是否符合原型材料的要求。模型箱的侧壁与模型接触面应采取措施,如铺聚四氟乙烯薄膜或涂润滑硅脂以减少摩擦阻力。

6.0.7 模型与透明有机玻璃板接触断面处应分层埋设测点标志,并绘出坐标方格,记下各测点的坐标。

6.0.8 称模型箱的总质量(包括已制作好的模型、量测传感器、导管电缆等)。

6.0.9 在模型制作、仪器安装和称总质量的过程中,试验负责人应在现场,由校核人员检查是否符合已认可的模型设计要求,经认可后方可安放于吊篮内。

7 试验步骤

7.0.1 将模型箱安装于试验吊篮内并固定于吊篮底板上。模型箱底板应与吊篮板面平面接

触, 不应有起伏不平或倾斜。

7.0.2 将各传感器和摄像机头的电线连接于接线板上, 并将电线固定于吊篮框架上, 然后启动数据采集和摄像系统, 检查显示信号是否正常, 经过校核人员检查认可。

7.0.3 调整平衡荷重, 平衡荷重质心与有效荷重质心绕转动轴心转动的平衡力矩应满足式(7.0.3):

$$\Sigma R_e W_e = \Sigma R_c W_c \quad (7.0.3)$$

式中: W_e ——有效荷重重量, N;

W_c ——平衡荷重重量, N;

R_e ——有效半径, m 或 mm;

R_c ——平衡荷重重心至转动轴心的距离, m 或 mm。

离心机的不平衡力矩和偏心距按表 7.0.3 所示各栏进行计算, 其值应小于设计允许值。

表 7.0.3 离心模型平衡计算

项目名称: _____				转动半径 R : _____ mm				
模型编号: _____				试验者: _____				
最大加速度: _____				校核者: _____				
有效 荷 重	部件名称	重量 W_e N (1)	重心至吊 篮底板 距离 Z mm (2)	重心偏心距		力矩 N·mm		
		X mm (3)		Y mm (4)	$W_e X$ (5) = (1) × (3)	$W_e Y$ (6) = (1) × (4)	$W_e Z$ (7) = (1) × (2)	
		$\Sigma W_e =$	$\bar{Z} =$	$\bar{X} =$	$\bar{Y} =$	$\Sigma W_e X =$	$\Sigma W_e Y =$	$\Sigma W_e Z =$
$\bar{Z} = \frac{\Sigma W_e Z}{\Sigma W_e}$ (mm), $\bar{X} = \frac{\Sigma W_e X}{\Sigma W_e}$ (mm), $\bar{Y} = \frac{\Sigma W_e Y}{\Sigma W_e}$ (mm), $R_e = R - \bar{Z}$ (mm), 有效荷重力矩 = $\Sigma W_e \times R_e$ (N·mm)								
平 衡 重	平衡块重量 w_c N (1)	平衡块数量 (2)	重量 W_c N (3) = (1) × (2)	各平衡块 板距吊篮 底板距离 Z mm (4)	各平衡块力 矩 $W_c Z$ N·mm (5) = (3) × (4)			
		$\Sigma W_c =$			$\Sigma W_c Z =$			
$\bar{Z} = \frac{\Sigma W_c Z}{\Sigma W_c}$ (mm), $R_c = R - \bar{Z}$, 平衡力矩 = $\Sigma W_c \times R_c$ (N·mm)								
<div style="text-align: right;">日期: _____</div> <div> 注 1. 不平衡力矩 = $\Sigma W_e R_e - \Sigma W_c R_c$ (N·mm) 2. 作用在吊篮底板上的不平衡重量 = 不平衡力矩 / R_e (N) 3. 有效荷重重心偏心距 $e = \sqrt{X^2 + Y^2}$ (mm) 4. \bar{Z}—重心距吊篮底板距离 (mm); \bar{X}—重心垂直于转臂的水平距离 (mm); \bar{Y}—重心距转臂的垂直距离 (mm) </div>								

7.0.4 按如下要求进行安全检查:

1) 对本节 7.0.1~7.0.3 每一步骤应由安全人员复查并签字认可。

2) 在离心机主机室内, 转臂上和吊篮内不得留有任何杂物, 紧固件不得松动。门窗须

经安全人员仔细检查后，方可关闭主机室安全门。

3) 离心机的传动机构及辅助设备应预试启动，并确认其处于正常工作状态。

4) 上述三项工作应经离心机操作负责人签字认可后，方可正式启动。

7.0.5 应先启动辅助设备，待运行稳定后，再启动离心机，同时试验人员开始对试验过程和试验数据进行监测。

7.0.6 按式 (7.0.6) 计算转臂的转速

$$N = 29.903 \sqrt{\frac{n}{R_m}} \quad (7.0.6)$$

式中： n ——模型率；

R_m ——试验半径，m；

N ——转臂转速，r/min。

7.0.7 离心机转臂转动后，加速度从零升至预定加速度所需历时，应由试验负责人根据试验要求确定。按式 (7.0.7) 计算有效加速度历时：

$$t_e = t_n + t_m/2 \quad (7.0.7)$$

式中： t_e ——有效加速度历时，min；

t_n ——试验加速度历时，min；

t_m ——从启动至预定试验加速度历时，min。

7.0.8 有下列情况之一者，可以停机或延长试验时间：

- 1) 试验已达到预计的有效加速度历时；
- 2) 试验负责人根据数据采集或录像资料认为可以停机；
- 3) 遇有报警信号，应由操作负责人根据情况决定停机；
- 4) 试验负责人认为需要延长预定的试验时间，则应与操作负责人商定延长时间。

7.0.9 达到预计历时，停止试验。依次关闭转动机构、辅助设备、数据采集系统。

7.0.10 离心机运转期间，未经允许，非操作人员不得进入控制室内或触动控制按钮。

7.0.11 停机后检查：

1) 离心机转臂转动停止后，操作人员开启安全门，试验负责人和操作人员方可进入圆形离心机室内。

2) 卸下模型箱和平衡荷重，并对离心机转臂、吊篮、照明、摄像设备和模型箱内的模型、量测设备及辅助设备等进行仔细检查，做好记录和填写运行情况报告表。

8 试 验 资 料

8.0.1 在模型箱有机玻璃透明侧板上，测记埋设在断面内各测点的坐标，重新描绘模型轮廓线，并对模型各部位取样，按 GB/T 50123 的规定，测定其密度 ρ 及含水率 w 。

8.0.2 按附录 A 将各传感器测定的数据换算成原型的各相应物理量。

8.0.3 试验报告应包括：

1) 试验前后的模型轮廓线，及各部位的测点（位移、土压力、孔隙压力等）和加载设备布置等。

2) 实测的模型各测点位移轨迹图和土压力、孔隙压力沿深度和平面的分布图和照片。

- 3) 试验前后各层土密度 ρ 和含水率 w 的变化图或资料。
- 4) 如采用替代材料 (非原型材料), 应提出按相似律分析的结果或试验资料等依据。
- 5) 量测仪器的型号、尺寸, 及其准确度和布置位置。

9 记 录 表 格

9.0.1 试验负责人按6.0.1条要求填写表9.0.1各栏所包括的内容。

表 9.0.1 离心模型试验计划表

项目名称		模型率 n	
委托单位		试验加速度 $a_m = ng$	
研究内容			
测定项目		量测设备	规格、名称 数量
参加试验人员	模型设备	试验操作	安全检查
试验负责人		协作人员	
操作负责人		安全检查人	
试验室 负责人意见			

日期:

9.0.2 按7.0.4和7.0.11的要求, 将试验前后安全检查的结果填写于表9.0.2所列各栏。

表 9.0.2 离心机试验设备运行表

项目名称: _____	最大加速度: _____
试验内容: _____	运行时间: _____
有效荷重质量: _____	试验日期: _____
试验负责人: _____	试验室负责人: _____

检查内容		设 备 状 态			
		运行前	签 名	运行后	签 名
模型制备	模型箱				
	吊篮				
	平衡重				
	量测仪器				
机械转动	主机室				
	传动轴				
	润滑系统				
	冷却系统				
电气控制	电机				
	整流器				
	控制台				
	报警系统				
数据采集	转臂线路				
	滑环				
	数采系统				
	录像系统				

