

ICS 27.140

P 59

备案号: J1051—2010

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL / T 5246 — 2010

**水电水利工程滑坡涌浪模拟
技 术 规 程**

**Code for landslide-generated waves simulation for
hydropower & water resources**

2010-05-24 发布

2010-10-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 总则	2
3 研究大纲	3
4 基本资料	4
5 滑坡涌浪模型试验	5
5.1 模型设计	5
5.2 试验设备与量测仪器	5
5.3 模型制作	5
5.4 模型率定与验证	6
5.5 试验及观测	6
5.6 资料整理及分析	6
6 滑坡涌浪数值模拟	8
6.1 控制方程及数值求解方法	8
6.2 初始条件及边界处理	8
6.3 计算区域确定及网格划分	8
6.4 模型率定及验证	8
6.5 计算及其成果分析	9
7 报告编写	10
附录 A (规范性附录) 滑坡涌浪模型试验测量精度	11
附录 B (资料性附录) 滑坡涌浪平面二维数学模型 基本方程	12
条文说明	15

前 言

本标准根据《国家发展改革委办公厅关于下达 2006 年行业标准项目计划的通知》（发改办〔2006〕1093 号）的要求制定。

本标准制定过程中认真总结了我国水电水利工程滑坡涌浪模型试验和数值模拟的经验及国内外最新研究成果，并广泛征求了国内有关单位及专家的意见。

本标准的主要内容为滑坡涌浪模型试验和数值模拟。

本标准的附录 A 是规范性附录、附录 B 是资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电施工标准化技术委员会归口。

本标准负责起草单位：长江水利委员会长江科学院、水资源与水电工程科学国家重点实验室（武汉大学）。

本标准主要起草人：金峰、姜治兵、任坤杰、李学海、贺昌海、陈玲玲。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化中心（北京市白广路二条 1 号，100761）。

1 范 围

本标准规定了水电水利工程滑坡涌浪模拟技术的基本要求。
本标准适用于水库、河道、湖泊等岸坡下滑时的涌浪模拟。

2 总 则

2.0.1 为统一规范滑坡涌浪的模拟方法和技术要求，提高研究成果的科学性、准确性和可靠性，特制定本规程。

2.0.2 滑坡涌浪可采用模型试验、数值模拟或两者相结合的方法进行研究。

2.0.3 滑坡涌浪的模拟研究除执行本标准外，还应符合国家和行业现行有关标准的规定。

3 研 究 大 纲

3.0.1 模型试验和数值模拟前，应根据研究任务和要求，编制研究大纲，并根据研究过程中的实际情况进行必要的修正。

3.0.2 研究大纲宜包括下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 研究目的和内容；
- 3 工程基本资料；
- 4 研究方法；
- 5 研究进度计划；
- 6 预期成果目标；
- 7 项目负责人和参加人员；
- 8 其他。

4 基本资料

4.0.1 地形资料:

地形图测图比尺不宜小于 1:10 000, 滑坡体区域测图比尺不宜小于 1:2000。

4.0.2 滑坡体地质资料。

4.0.3 水文资料:

1 洪水期、平水期和枯水期模拟河段进流断面的流量过程及出流断面相应的水位过程;

2 模拟河段沿程至少 2 个断面的水位流量关系曲线;

3 水库及湖泊的水位变化过程。

4.0.4 滑坡涌浪可能影响的重要建筑物的位置、型式及设计等级。

5 滑坡涌浪模型试验

5.1 模型设计

5.1.1 模型应满足几何相似、水流运动相似和动力相似，应遵循重力相似准则。

5.1.2 宜采用正态模型，其模拟范围、比尺应根据研究目的和要求确定。

5.1.3 滑坡体按地形、地质资料模拟。

5.2 试验设备与量测仪器

5.2.1 滑坡体载体和控制装置：

- 1 滑坡体载体可采用滚轮车式或面滑动式装置；
- 2 滑坡体的牵引、卸放宜采用自动控制装置。

5.2.2 主要量测仪器有：光电传感器或电触点式滑速测量装置；浪高仪；流速仪；压力传感器；照相机、摄像机等。

5.2.3 试验使用的通用量测仪器，应有国家或行业技术监督部门颁发的合格证。自行研制的仪器、仪表，应满足试验要求。

5.3 模型制作

5.3.1 绘制模型总体布置图、结构物模型详图、测点布置图，并提出模型加工及安装要求。

5.3.2 模型地形制作可采用断面板法、等高线法。变化较缓的地形宜用断面板法，断面间距 300mm~800mm。变化复杂的地形宜用等高线法。

5.3.3 根据相似条件选取适宜的材料制作滑坡体。

5.3.4 制作滑坡体控制装置。

5.3.5 选择固定位置设置浪高、流速及压力测量装置。

5.3.6 宜在建筑物和岸坡面等适当位置绘制高程标志。

5.3.7 模型制作安装完毕后，应进行检测、校核，并有完整记录。

5.3.8 水库、湖泊、河道和建筑物模型制作精度应满足附录 A 要求。

5.4 模型率定与验证

5.4.1 应进行模型水位验证和糙率校正。

5.4.2 水位允许偏差原型值：山区河流为 $\pm 0.10\text{m}$ ，平原河流为 $\pm 0.05\text{m}$ 。

5.5 试验及观测

5.5.1 根据不同水位流量条件与滑坡体滑速进行试验。

5.5.2 试验观测应包括以下内容：

- 1 采用滑坡体滑速测控装置采集不同时刻点的滑体速度；
- 2 采用全程录像采集涌浪高度及涌浪爬坡范围数据；
- 3 沿河道布置多个波高仪，采集水位随时间变化过程；
- 4 观测滑坡产生的涌浪对建筑物的影响，包括水压力和漫坝流量等。

5.6 资料整理及分析

5.6.1 试验资料包括滑坡体特征值和滑坡涌浪高度、涌浪爬坡范围、涌浪压力、涌浪传递速度、漫坝流量、相对水深和滑坡体滑速变化等试验成果。

5.6.2 成果分析应包括以下内容：

- 1 滑坡体滑入河中堆积体位置、形状图和堆积方量；
- 2 涌浪首浪高度与滑速的关系；
- 3 涌浪爬坡范围与滑速的关系；
- 4 涌浪沿程衰减过程线；

- 5 各测点动水压力与涌浪高度的变化关系；
- 6 涌浪爬坡范围与首浪高度的变化关系；
- 7 漫坝水量与坝前涌浪高度的关系；
- 8 岸坡、建筑物处涌浪涉及的淹没范围。

6 滑坡涌浪数值模拟

6.1 控制方程及数值求解方法

- 6.1.1 滑坡涌浪数值模拟可采用平面二维控制方程,参见附录 B。
- 6.1.2 模型计算数值格式应满足相容性、收敛性和稳定性要求。
- 6.1.3 数值求解方法可采用控制体积法、有限单元法和有限差分法等。

6.2 初始条件及边界处理

- 6.2.1 初始条件包括计算区域内的初始水位和流速。
- 6.2.2 上游入流边界给定流量,下游出流边界给定水位。干湿边界宜采用动边界技术模拟。

6.3 计算区域确定及网格划分

- 6.3.1 计算区域应包含滑坡涌浪的影响范围。上下游开边界应设于河道渐变流段。
- 6.3.2 网格剖分应能反映计算区域地形特征。网格边界应能概化河道岸线边界。网格的疏密应根据计算区域内不同部位和计算要求确定,滑坡涌浪产生的局部区域计算网格应加密。

6.4 模型率定及验证

- 6.4.1 水流紊动黏性系数 N_x 和 N_y 可由子涡模型计算确定或给定常数。
- 6.4.2 糙率 n 值由数学模型试算确定,计算区域内可取统一值或分段取值。
- 6.4.3 滑坡体形体阻力系数 C_D 可取 0.8~1.2。

6.4.4 控制断面水位率定允许偏差为 $\pm 0.10\text{m}$ 。

6.4.5 流速沿断面分布特征应与原型一致，流量率定允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

6.4.6 流态、流向及回流范围应与原型一致。

6.5 计算及其成果分析

6.5.1 根据不同水位流量条件与滑坡体体积和滑速进行计算。

6.5.2 计算成果如下：

- 1 涌浪首浪高度；
- 2 涌浪在滑坡体对岸的爬坡范围；
- 3 涌浪的沿程传播与衰减规律。

6.5.3 成果分析如下：

根据计算成果，分析涌浪首浪高度与滑速的关系、涌浪爬坡范围与滑速的关系、涌浪沿程衰减的过程线及涌浪爬坡范围与首浪高度的变化关系，分析涌浪对水工建筑物、村镇、码头、通航船舶等的影响。

7 报 告 编 写

7.0.1 模型试验研究报告应包括工程概况、试验目的与内容、模型设计与制作、量测仪器、模型率定和验证、试验成果与分析、结论与建议等内容。

7.0.2 数值模拟研究报告应包括工程概况、计算研究目的与内容、数学模型、模型率定和验证、计算成果与分析、结论与建议等内容。

附 录 A
(规范性附录)

滑坡涌浪模型试验测量精度

滑坡涌浪模型试验测量精度见表 A.1。

表 A.1 滑坡涌浪模型试验测量精度表

施测对象	测试仪器	精 度 控 制	备 注
模型	水准仪 经纬仪 钢尺	整体模型地形高程允许误差为 $\pm 3.0\text{mm}$ ，平面距离允许误差为 $\pm 10\text{mm}$ ；建筑物模型高程允许误差为 $\pm 0.3\text{mm}$ ，水准基点和测针零点允许误差为 $\pm 0.3\text{mm}$	
水位	量水测针 跟踪式水位仪 波高仪	测针精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ ； 跟踪式水位仪精度为 $\pm 0.2\text{mm}$ ，量程应大于 300mm，跟踪速度应大于 50mm/s； 波高仪精度为 $\pm 0.2\text{mm}$	测杆应垂直安装
流速	旋浆流速仪 表面流场粒子图像测速系统 电磁流速仪	流速测量允许误差为 $\pm 0.02\text{m/s}$	
流量	电磁流量计 超声波流量计	流量允许误差为 $\pm 1\%$	控制阀宜安装在流量计下游

附录 B

(资料性附录)

滑坡涌浪平面二维数学模型基本方程

B.1 河道水流运动基本方程:

B.1.1 连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (\text{B.1})$$

B.1.2 x 向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

B.1.3 y 向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

式中:

ζ —— 相对于某一基准面的水位, m;

h —— 相对于某一基准面的水深, m;

N_x —— x 向水流紊动黏性系数, m^2/s ;

N_y —— y 向水流紊动黏性系数, m^2/s ;

f —— 科氏力系数;

n —— 糙率系数。

B.2 模拟涌浪产生的基本方程:

B.2.1 连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = \frac{\partial z_B}{\partial t} \quad (\text{B.4})$$

B.2.2 x 向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u + S_{HU} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{其中, } S_{HU} = C_D v^2 (\cos \alpha_v)^2 \left(\frac{\partial z_{BO}}{\partial x} - \frac{\partial z_B}{\partial x} \right).$$

B.2.3 y 向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v + S_{HV} \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

$$\text{其中, } S_{HV} = C_D v^2 (\sin \alpha_v)^2 \left(\frac{\partial z_{BO}}{\partial y} - \frac{\partial z_B}{\partial y} \right).$$

式中:

z_B ——相对于某一基准面的滑坡面高程, m;

z_{BO} ——相对于某一基准面的滑坡体表面高程;

C_D ——滑坡体形体阻力系数;

v ——滑坡体滑速;

α_v ——滑坡体滑向在水平面上的投影与 x 轴的夹角, ($^\circ$).

水电水利工程滑坡涌浪模拟 技 术 规 程

条 文 说 明

目 录

2	总则.....	17
4	基本资料.....	18
5	滑坡涌浪模型试验	19
6	滑坡涌浪数值模拟	20
7	报告编写.....	21

2 总 则

2.0.1 滑坡涌浪是十分复杂的水流运动。总结已有滑坡涌浪模拟技术的理论和实践，制定本标准，对规范模拟方法、提高模拟成果的准确性，为水电水利资源开发和利用及水灾害预测与评估提供可靠的科学依据具有十分重要的意义。

2.0.2 滑坡涌浪模拟主要方法包括物理模型试验和数学模型计算两种。这两种模型具有各自的优势，须结合实际工程要求进行选择。数学模型多用于进行长距离大范围涌浪演进模拟，物理模型多用于滑坡涌浪产生过程的模拟。

4 基本资料

4.0.1、4.0.2 基本资料是开展滑坡涌浪模拟工作的前提条件，其精度和代表性影响到模型成果的精度和可靠性。使用资料时要对资料进行认真分析和校核，发现问题要仔细考证，及时与提供资料的部门进行商酌并加以修正。

4.0.3 根据模拟河段内的实测和调查洪水水面线和相应流量，率定和验证模型的糙率。

5 滑坡涌浪模型试验

5.1 模型设计

滑坡涌浪模型宜采用正态模型。如采用变态模型，需对滑坡涌浪产生与传播过程等成果的合理性进行论证。

模型比尺的确定除满足研究目的和要求外，还应考虑试验场地的大小和试验设备的供水能力。

6 滑坡涌浪数值模拟

6.1 控制方程及数值求解方法

6.1.1 模拟涌浪产生的基本方程包括连续方程与动量方程。

1 数学模型以式 (B.1) ~ 式 (B.3) 作为基本方程, 模拟滑坡涌浪发生前的流场及滑坡涌浪产生后的流场。滑坡涌浪产生前的流场一般为恒定场, 作为模拟滑坡涌浪的初始流场。

2 数学模型以式 (B.4) ~ 式 (B.6) 作为基本方程, 模拟滑坡涌浪的产生。在式 (B.4) ~ 式 (B.6) 中, 同时考虑了滑坡体对水体的体积侵占效应和滑坡体对水体的水平动量作用。在滑坡体入水的过程中, 一般滑坡体都会发生破碎, 破碎的滑体与水体相互掺混, 确切估计掺混到水体内部的滑体体积十分困难, 因此在模拟计算时, 一般不考虑滑坡体的破碎及滑体与水体的相互掺混。此外, 滑坡体入水时还会在竖直方向上对水体施加动量作用, 实例计算表明, 同时考虑滑坡体对水体的体积侵占效应和滑坡体对水体的水平动量作用能较好地模拟涌浪的产生。

6.3 计算区域确定及网格划分

6.3.2 一般采用三角形、四边形网格对计算区域进行划分。网格划分应保证网格的光滑性, 即保证网格尺度空间变化的连续性。

7 报 告 编 写

7.0.1 模型试验研究报告中，模型设计与制作部分包括模型比尺的选择，模型平面布置以及模型制作的方法和精度控制等；量测仪器部分包括主要量测仪器设备的性能及精度；试验成果与分析包括滑坡涌浪到达各特征断面的时间和推进速度，各特征断面最高水位、最大流量和最大流速值以及它们出现的时间，下游城镇淹没时各特征点处的水力要素变化过程，涌浪对航运的影响范围和程度等；结论和建议部分是指根据下游各城镇的人口、社会 and 经济发展情况，现有防护设施标准等，分析滑坡涌浪对下游各居民点及各类建筑设施的影响程度和淹没范围，估算滑坡涌浪可能造成的损失，提出减小滑坡涌浪可能造成损失的防范措施或防护规划的意见或建议。

7.0.2 数值模拟研究报告的数学模型部分包括基本方程，数值格式，边界条件和有关参数的选取，计算河段范围确定与网格划分等。
