

KCS 03.100
P 05

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 539—2011

水工建筑物抗震试验规程

Specification for aseismic test of hydraulic structures

2011-06-01 发布

2011-09-01 实施

中华人民共和国水利部 发布

https://www.sljzjxx.com
水利造价信息网

中华人民共和国水利部
关于批准发布水利行业标准的公告

2011年第26号

中华人民共和国水利部批准《水工建筑物抗震试验规程》
(SL 539—2011) 标准为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水工建筑物抗震试验规程	SL 539—2011		2011.6.1	2011.9.1

二〇一一年六月一日

http://www.sljzjxx.com
水利造价信息网

前 言

根据水利部 2005 年财政专项和水利水电规划设计总院文件水总科〔2005〕623 号《关于开展 20 项技术标准编制工作的通知》中第 18 项安排以及水利技术标准编制技术服务合同书要求，按照《水利技术标准编写规定》(SL 1—2002) 的要求，编制本标准。

本标准共 5 章和 4 个附录，主要包括以下内容：

- 总则；
- 术语与符号；
- 试体的设计和制作；
- 模拟地震振动台动力试验；
- 原型动力试验。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：胡 晓 李德玉 王海波 刘小生

苏克忠 张艳红 孔宪京 王 济

禹 莹 魏 力 陈 宁 李春雷

曾 迪 于爱华

本标准审查会议技术负责人：刘志明

本标准体例格式审查人：陈 昊

目 次

1	总则	6
2	术语与符号	7
2.1	术语	7
2.2	符号	7
3	试体的设计和制作	9
3.1	一般规定	9
3.2	弹性模型材料制作与参数测试	9
3.3	破坏模型材料制作与参数测试	9
3.4	混凝土坝模型材料	10
3.5	土石坝模型材料	11
4	模拟地震振动台动力试验	12
4.1	一般要求	12
4.2	模拟地震振动台	12
4.3	试体安装	13
4.4	测试系统	13
4.5	加载方法	14
4.6	试验量测和观测	14
4.7	试验数据处理	15
4.8	试验的安全措施	16
5	原型动力试验	17
5.1	一般要求	17
5.2	试验前的准备	17
5.3	试验方法	17
5.4	激振设备与测试仪器	17
5.5	试验要求	18
5.6	试验数据处理	19

5.7 试验的安全措施	20
附录 A 结构模型试体设计的相似比尺	22
附录 B 模型材料弹性模量测试方法	24
附录 C 土石坝模型动力试验的相似比尺	26
附录 D 试验报告的主要内容	27
标准用词说明	28

<http://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

1 总 则

1.0.1 为规范水工建筑物抗震试验方法，确保试验质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水工建筑物模拟地震振动台和原型动力试验。

1.0.3 水工建筑物抗震试验主要是确定弹性阶段的应力与变形状态，揭示弹塑性和破坏阶段的工作性态，并验证理论和计算方法的合理性和有效性。

1.0.4 水工建筑物抗震试验所用的设备与仪器，应有出厂合格证。设备与仪器的性能应经具有资质的检测机构检测认定，并在检定有效期内使用。

1.0.5 本标准主要有以下引用标准：

《爆破安全规程》(GB 6722)

《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203)

1.0.6 抗震试验以及用抗震试验结果进行工程设计与安全评价时，除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 试体 test sample

凡作为抗震试验的对象均称试体，是试验构件、结构的原型和模型的总称。

2.1.2 弹性模型 elastic model

为研究在荷载作用下结构弹性性能，用匀质弹性材料制成与原型相似的结构模型。

2.1.3 破坏模型 dynamic damage test

为研究在荷载作用下结构各阶段工作性能包括直至破坏的全过程反应的结构模型。

2.1.4 模拟地震振动台试验 earthquake shaking table test

通过振动台台面对试体输入地面运动，模拟地震对试体作用全过程的抗震试验。

2.1.5 原型动力试验 prototype dynamic test

在原型水工建筑物上进行的动力试验。

2.1.6 原型结构 prototype structure

按施工图建成的直接投入使用的工程结构。

2.2 符号

α_a ——加速度比尺

α_E ——弹性模量比尺

α_F ——力比尺

α_f ——频率比尺

α_g ——重力加速度比尺

α_l ——长度比尺

α_t ——时间比尺

α_v ——速度比尺

α_s ——变形比尺

α_ϵ ——应变比尺

α_ρ ——密度比尺

α_σ ——应力比尺

3 试体的设计和制作

3.1 一般规定

- 3.1.1 应根据试验目的要求和现有设备条件进行试体设计，并应满足本标准的有关规定。
- 3.1.2 结构动力试体应按相似理论进行设计，其试验模型与原型结构的相似比尺应符合附录 A 的规定。
- 3.1.3 采用模型或截取部分结构作试体时，试体应分别满足原型结构的几何、物理、力学、构造和边界的主要条件。
- 3.1.4 进行库水与结构的动力相互作用试验时，模型材料密度宜与原型结构材料密度相同。
- 3.1.5 试体设计时应满足试体安装、结构响应量测和传感器安装等对试体的要求。
- 3.1.6 当应变片的粘贴对模型局部产生刚化影响时，应考虑刚化系数修正。
- 3.1.7 制作模型的材料应进行密度、弹性模量的测试。

3.2 弹性模型材料制作与参数测试

- 3.2.1 弹性模型试验结果的应用范围限于结构的弹性工作状态，不应评价原型结构超过弹性阶段后的反应及其性状。
- 3.2.2 模型材料在试验过程中是完全弹性性质的，弹性模型材料可与原型结构的材料不同。
- 3.2.3 弹性模型如采用分批、分块材料制作时，各材料的密度、弹性模量等参数应均匀一致。
- 3.2.4 弹性模型材料的弹性模量测试宜采用敲击固端悬臂梁的方法进行，测试方法见附录 B。

3.3 破坏模型材料制作与参数测试

- 3.3.1 破坏模型试验的目的是评估原型结构的极限承载力以及

原型结构从弹性工作状态直到损伤破坏甚至极限变形时的全过程性能。

3.3.2 破坏试验模型材料的应力—应变曲线宜与原型相似，施加于模型的各类荷载大小、施加顺序及阻尼效应等应能够代表原型实际工况。

3.3.3 破坏模型材料的典型破坏机制应与原型材料相似。

3.3.4 破坏试验模型材料应满足抗拉压强度的相似要求。破坏模型材料的拉压强度可采用单轴拉压方法测试。测试组数与参数统计方法应与原型结构材料试验相同。

3.3.5 模型材料采用分批分块制作时，应保证上述材料特性均匀一致。模型材料块间的连接强度应略大于模型材料的强度。

3.3.6 对于质量分布影响不大的破坏试验，当采用与原型材料相近的模型材料时，为满足其密度比尺的相似要求，可采用附加质量的方法。

3.3.7 试体采用微粒混凝土时，应进行微粒混凝土抗压、抗拉强度与应力应变关系力学性能试验。

3.3.8 未取样试体材料实际强度，可在全部试验完成后，从试体受力较小部位截取试件进行材料力学性能试验。

3.3.9 破坏模型其试体配筋的材料应符合相似性的要求，可采用细铁丝。模拟细纹筋时，光面钢筋宜作表面压痕处理。

3.3.10 试体制作时安装量测仪表的预埋件和预留孔洞位置应正确；在施工中应采取防止预埋的传感元件损坏的措施。

3.3.11 各类模型材料试件均应与试体同批同时制作，并应在同样条件下进行养护。

3.4 混凝土坝模型材料

3.4.1 混凝土坝模型制作的材料密度宜与大坝混凝土的密度相等。模型材料的弹性模量选取宜使振动台的频率范围包含重力坝模型的前三阶频率，包含拱坝模型的前五阶频率。

3.4.2 混凝土坝弹性模型材料可采用加重橡胶、石膏混合材料、

水泥砂浆混合材料。

3.4.3 混凝土坝破坏模型材料可采用硫酸钡混合材料、石膏混合材料、水泥砂浆混合材料。

3.4.4 混凝土坝模型材料的力学特性宜参照混凝土材料试验规程确定的方法测定。抗拉强度宜采用轴心抗拉试验测定值。

3.5 土石坝模型材料

3.5.1 制作土石坝模型的材料可采用原型坝体土石料的模拟级配料。原型坝料和模型坝料的材料力学特性参数应采用有关土工试验确定。

3.5.2 土石坝模型动力试验的相似比尺见附录 C。

4 模拟地震振动台动力试验

4.1 一般要求

4.1.1 利用模拟地震振动台对试体进行动力特性和动力反应的试验，可评价结构的抗震性能和抗震能力。

4.1.2 根据振动台试验的目的与要求，应对试体进行设计，确定合理的加振次序，可靠的试体响应测试记录方法与测试方案。

4.2 模拟地震振动台

4.2.1 振动台应能够准确再现试验要求的地震动波形，提供正弦周期运动和功率及频谱稳定的白噪声运动。

4.2.2 振动台控制系统应具有迭代修正功能，并应满足以下要求：

1 迭代过程的振动强度应控制在较低水平，以确保试体不会受到意外的影响。

2 迭代次数宜少于5次。

3 当试验要求高精度模拟地震波输入时，宜选用能对地震波具有迭代功能的有数控装置的振动台。

4.2.3 振动台的台面尺寸、有效载重量、最大倾覆力矩、最大加速度、最大速度、最大位移、工作频率范围等指标应满足试验要求。对于大缩比的试体模型，振动台应有较高的频率响应范围；对足尺或小缩比的试体模型，振动台应有较好的低频特性和足够的位移范围。

4.2.4 振动台台面应有足够的刚度，合理布置的试体固定结构。

4.2.5 振动台动力系统的振动、噪声、电磁干扰不应影响试验过程及周边环境产生不良影响。

4.3 试体安装

4.3.1 在试体安装之前，应检查振动台各部分及控制系统，确认处于正常的工作状态。

4.3.2 试体与台面之间宜铺设找平垫层。

4.3.3 吊装过程中应防止试体受损。起吊重要试体应进行计算分析验证，控制试体起吊过程中的变形量。

4.3.4 应采取必要措施避免试体在搬运、吊装、固定过程中受力、变形或受到冲击、剧烈振动产生不可预期的损坏。根据试体情况与试验室起吊能力，可分阶段加工制作试体，完成部分试体后先吊装固定，在振动台台面上完成剩余部分试体的加工、制作和拼装连接。

4.3.5 试体与振动台面固定应具有足够强度和刚度，尽可能减小固定螺栓实际受拉部分长度，保证足够的螺栓数量。所有螺栓应采用扭矩扳手紧固，保证固定螺栓受力均匀。对于加振时间较长的试体，应采取必要的防松措施。

4.3.6 应采取措施防止液体滴漏以及加载过程中液体溅出和漏出。

4.4 测试系统

4.4.1 测试系统应根据试验要求的动力特性范围、动力反应幅值以及所需测试的物理量进行选择。所选用的各种测试仪器均应在试验前进行系统标定。

4.4.2 测试系统的适用频率范围，其下限频率宜低于试验用地震动输入最低主要频率的 $1/10$ 。对于弹性试验上限频率应高于地震动输入的最高有效频率的 2 倍，对于破坏试验上限频率宜适当提高。

4.4.3 测试系统动态范围应大于 60db 。

4.4.4 测量信号分辨率宜小于最小有用振动幅值的 $1/10$ 。

4.4.5 宜采用数采系统记录试验数据，采样频率应与测试仪器

相匹配。

4.4.6 应采用重量轻和体积小的传感器。传感器的安装和拆卸不应使试体动力响应产生明显影响。

4.4.7 连接传感器的导线应采用屏蔽电缆，以减少电缆引起的信号损失。电缆敷设应避免对试体响应产生明显影响。

4.4.8 测试仪器的输出阻抗和输出电平应与数采系统匹配。

4.4.9 测试仪器应有可靠接地措施。

4.5 加载方法

4.5.1 振动台试验加载时，台面输入的地震加速度时程曲线应按下列条件进行设计：

1 设计地震应按照 **SL 203** 的相关规定确定加速度时程。

2 超载破坏试验，宜在设计地震基础上全时程同比例逐级增大输入加速度，分级不宜过多。

3 振动台台面输入加速度应按相似比尺进行修正。对超出振动台工作频段的频率成分应通过数字滤波消除修正。

4.5.2 白噪声振动幅值宜控制在设计水平地震动峰值加速度的 **20%** 以下，正弦扫频的振动幅值宜控制在设计水平地震动峰值加速度的 **10%** 以下。

4.5.3 正弦扫频宜采用单向等振幅加速度的连续变频正弦波输入，扫频范围不应小于振动台地震动输入的有效频率范围。

4.5.4 截断白噪声的频率范围不应小于振动台地震动输入的有效频率范围。白噪声激励可采用单向加振进行，持续时间宜取 **180s**。

4.5.5 试验前，应根据分析计算结果确定合理的加载方案。

4.6 试验量测和观测

4.6.1 根据试验目的要求，应合理设计试体响应的量测方案，包括量测方法、量测物理量、测点布置及传感器电缆布置。

4.6.2 试验可按需要量测试体的加速度、速度、位移、力、应

变、动水压力等主要动态响应物理量。

4.6.3 测点布置应能全面反映试体的动态响应、损伤状况，以及关键部位的加速度、位移、应变等响应。

4.6.4 对于整体结构模型试体，宜在模型的底部、顶部和结构特性有明显变化的位置布置传感器。测点宜优先布置在加速度和变形反应最大的部位。

4.6.5 当采用接触式位移计量测试体变形时，安装位移计的仪表架应固定于台面或基坑外的地面上。仪表架本身应有足够的刚度。

4.6.6 如传感器与被测试体间使用绝缘垫隔离，其隔离垫谐振频率应远大于被测试体的自振频率。

4.6.7 传感器的连接导线应牢固固定在被测试体上，宜从试体运动较小的方向引出。

4.6.8 在试验逐级加载的间隙中，应观测结构试体裂缝出现和扩展情况，量测最大裂缝宽度，将裂缝出现的次序和扩展情况按输入地震波过程在试体上描绘并作出记录。

4.6.9 试验的全过程宜以录像作动态记录。对于试体主要部位的开裂，失稳屈服及破坏情况，宜拍摄照片和作写实记录。

4.7 试验数据处理

4.7.1 试验数据分析前，应保存原始数据，对数据应进行下列处理：

1 根据传感器的标定值及应变计的灵敏系数等对试验数据进行修正。

2 根据试验情况和分析需要，可采用滤波处理、零均值化、消除趋势项等减小量测误差的措施。

4.7.2 当采用白噪声试验确定试体自振频率、阻尼比、振型时，宜采用传递函数通过模态识别技术求得。

4.7.3 需用加速度反应值计算位移值时，可用积分法计算，应注意消除趋势项等因素的影响。

4.7.4 经过试验数据处理后，应提供试体的动力反应最大幅值、时程曲线、频谱曲线，并根据需要提供主要的自振频率、阻尼比和振型等分析结果。

4.7.5 试验报告的主要内容应符合附录 D 的要求。

4.8 试验的安全措施

4.8.1 应设定危险区，试验过程中所有人员应远离危险区。应防止模型上外加荷重块的移位或者甩出伤人。

4.8.2 试验时应采取措施，防止试体倒塌时砸坏台面和加振器，损坏和污染输油管道及其他设备。

4.8.3 试验前，应检查振动台过载保护装置，确保处于正常工作状态。

4.8.4 振动台控制系统应设有不间断电源。

4.8.5 试验室的起重吊车起吊时，起吊重量应确保在起吊机、吊杆吊具、起吊缆绳、吊环的额定负载范围内，特别注意起吊缆绳的质量检查，使用没有损伤的起吊缆绳。

4.8.6 从振动台吊离试体时，应注意检查是否所有的试体与振动台台面连接的螺栓都已拆除。

4.8.7 应遵守电焊、打磨、气割等作业的操作规程，远离易燃、易爆物品。

4.8.8 应配备防火设施，严格执行防火规章制度。

5 原型动力试验

5.1 一般要求

5.1.1 本章适用于水工建筑物的原型动力特性和动力反应试验。

5.1.2 原型动力试验的振源，应能激起水工建筑物进行往复运动，并能在原地重复进行。

5.2 试验前的准备

5.2.1 应搜集水工建筑物所在场地的工程地质和地震地质、设计图纸、结构现状以及邻近的干扰振源等资料。

5.2.2 应根据试验目的制定试验方案及进行必要的计算。

5.2.3 应进行激振设备的检验和测试仪器的配套、标定。合格后装箱，安全运至试验现场。

5.3 试验方法

5.3.1 测试水工建筑物的基频时，宜选用随机脉动法或人工爆破激振法。

5.3.2 测试水工建筑物多个振型时，宜选用稳态正弦波激振法。

5.3.3 测试水工建筑物反对称振型或扭转振型时，宜选用多振源相位控制同步的稳态正弦波激振法。

5.3.4 评估水工建筑物的抗震性能时，可选用稳态正弦波激振法或人工爆破激振法。

5.3.5 框架等结构的动力特性试验可采用施加初位移的自由振动法或敲击法进行测试。

5.4 激振设备与测试仪器

5.4.1 当采用稳态正弦激振的方法进行试验时，宜采用旋转惯性机械起振机，也可采用液压伺服激振器，使用频率范围宜为

0.5~20 Hz。

5.4.2 可根据需要测试的动参数等具体情况，选择加速度计、速度计、位移计和动水压力计，必要时应选择相应的配套仪表。

5.4.3 应根据需要测试的最低和最高阶频率选择测试仪器的频率范围。

5.4.4 测试仪器的最大可测范围应根据试体结构的类别和试体最大振动幅值来选定。

5.4.5 传感器的横向灵敏度应小于**0.05**。

5.4.6 传感器应具备机械强度高，安装调节方便，体积重量小而便于携带，防水防潮，防电磁干扰等性能。

5.4.7 记录仪器或数采系统的电平输入及频率范围，应与测试仪器的输出相匹配。

5.5 试验要求

5.5.1 随机脉动测试应符合下列要求：

- 1** 测试仪器应有良好的接地措施。
- 2** 试验时测试记录时间不应少于**30min**，在测试阻尼时不应少于**60min**。
- 3** 多次测试时，每次测试中应至少保留一个共同的参考点。
- 4** 在测试过程中应避免各种干扰因素的影响。

5.5.2 起振机振动试验应符合下列要求：

- 1** 应正确选择起振机的位置，合理选择激振力，防止水工建筑物的振型畸变和信噪比过小。
- 2** 宜采用扫频方式寻找共振频率。在共振频率附近进行测试时，应保证半功率带宽内有不少于**5**个频率的测点。

5.5.3 人工爆破激振试验应符合下列要求：

- 1** 爆破药量和位置应根据水工建筑物试验目的及试验方案决定。
- 2** 在水库底基岩进行人工爆破激振时，应保证爆破点与水工建筑物的距离，能够清晰区分通过库水传播和通过库底基础传

播的激振波。

- 3 重复爆破时宜考虑多次爆破的一致性。
 - 4 在坝前库水中进行小药量水爆试验，炸药用量宜取 5~10kg，水深宜为 5~10m，爆点至坝距离宜不小于 100m。宜控制试体振动最大加速度不大于 20cm/s^2 ，以确保大坝建筑物的安全。
- 5.5.4** 施加初位移的自由振动测试应符合下列要求：
- 1 应根据试验目的布置拉线点。
 - 2 拉线与试体连接部分应能够整体传力到试体上。
 - 3 每次测试时应记录拉力数值和与试体轴线间的夹角。
 - 4 施加初位移时不应使试体出现损坏。
- 5.5.5** 敲击法试验应符合下列要求：
- 1 应根据试验感兴趣频段的范围，选用钢锤头、橡胶锤头或其他高分子材料制成的锤头。
 - 2 敲击法试验宜重复多次敲击，每次敲击力宜保持一致并确保不造成试体的损坏。
 - 3 根据试验的方便程度和测试仪器的情况，敲击法试验可按多点敲击激振，布置单点测试响应进行。也可布置多点测试响应，单点敲击或布置多点测试响应，多点敲击等方式进行。

5.6 试验数据处理

- 5.6.1** 数据采样间隔应符合采样定理的要求。
- 5.6.2** 时域数据处理应符合下列要求：
- 1 应对试验数据的零点漂移、记录波形、记录长度和标定值等进行检验和处理。
 - 2 按自由衰减曲线求取试体自振频率时，不应取用突断衰减的最初两个波。宜在记录曲线上比较规则的波形段内取有限个周期的平均值计算。
 - 3 试体结构阻尼比宜按自由衰减曲线求取，在稳态正弦激振时宜根据实测后的共振曲线采用半功率点法求取。

5.6.3 频域数据处理应符合下列要求：

- 1** 对频域中的数据宜采用滤波、零均值化等方法进行处理。
- 2** 试体的自振频率宜采用自谱分析或傅里叶谱分析方法求取。
- 3** 试体的阻尼比宜采用自相关函数分析，曲线拟合法或半功率点法确定。
- 4** 试体的振型，宜采用自谱分析、互谱分析或传递函数分析方法确定。

5.6.4 经过试验数据处理后，应提供试体的动力反应最大幅值、时程曲线、频谱曲线，并根据需要提供主要的自振频率、阻尼比和振型等分析结果。

5.6.5 对于复杂试体的试验数据，应采用多种方法进行综合分析。

5.6.6 试验报告的主要内容应符合附录 D 的要求。

5.7 试验的安全措施

5.7.1 试验场地内应划分出危险区。试验时，一切人员均必须撤离危险区。

5.7.2 非试验工作人员严禁靠近试验区。

5.7.3 试验人员在经过陡峻危险地段布设测点时，必须加带保护绳。

5.7.4 制定试验方案，应包括安全防护措施的内容。

5.7.5 激振设备、测试仪器的运输、吊装、试验过程中，必须遵守国家现行的有关安全规程。

5.7.6 起振机设备和测试仪器应设置接地装置，宜设置稳压、调压设备。

5.7.7 起振机设备地脚螺栓应埋设牢固。起振机在安装之前应进行检查，在经过试机后，方可吊装就位。

5.7.8 起振机偏心框内放置的配重铅块应固定，必须防止运转时铅块甩出伤人。

5.7.9 爆破材料中的炸药和雷管属危险品，在保管、运输和作业中，应严格遵守 **GB 6722** 的有关规定。

5.7.10 爆破药量和位置选取，应确保周边建筑物及设施、岸坡等的安全，避免对生态环境的不利影响。

5.7.11 坝前库水中进行小药量水爆试验，宜选用乳胶炸药，对炸药和雷管应采取有效的防水措施。

5.7.12 初位移法测试中应采取以下措施：

1 拉线与试体和测力计的连接应可靠，拉线绞车应设保护装置。

2 应采取防护措施，防止断线伤人。

附录 A 结构模型试体设计的相似比尺

A.0.1 结构模型的设计应满足物理、几何以及边界条件的相似要求。

A.0.2 水工建筑物模拟地震振动台试验模型设计，考虑水与结构相互作用时，宜按表 A.0.2 相似比尺计算相似关系。

表 A.0.2 模型相似比尺

项 目	相似比尺	备 注
长度比尺	a_l	基本相似比尺
密度比尺	a_ρ	基本相似比尺
弹性模量比尺	a_E	基本相似比尺
加速度比尺	$a_a = 1.0$	
时间比尺	$a_t = a_l a_E^{1/2} a_\rho^{-1/2}$	
频率比尺	$a_f = a_t^{-1}$	
变形比尺	$a_s = a_l a_E$	
应变比尺	$a_\epsilon = a_s a_l^{-1}$	
应力比尺	$a_\sigma = a_s a_\rho$	

A.0.3 采用人工质量模拟的强度模型时，应按表 A.0.3 中人工质量模拟的模型的相似比尺计算相似关系。

表 A.0.3 模型相似比尺

相似比尺	破坏模型	用人工质量模拟的破坏模型	忽略重力效应的破坏模型
	(1)	(2)	(3)
长度比尺 a_l	a_l	a_l	a_l
弹性模量比尺 a_E	a_E	a_E	a_E
密度比尺 a_ρ	$\frac{a_E}{a_l}$	a_ρ	a_ρ

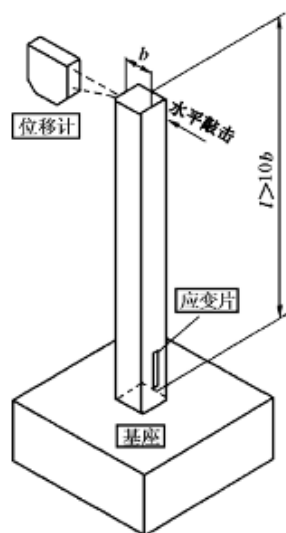
表 A.0.3 (续)

相似比尺	破坏模型	用人工质量模拟的 破坏模型	忽略重力效应的 破坏模型
	(1)	(2)	(3)
重力加速度比尺 σ_g	1	1	忽略
加速度比尺 σ_a	1	1	$\frac{1}{\sigma_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_3}$
时间比尺 σ_t	$\sqrt{\sigma_1}$	$\sqrt{\sigma_1}$	$\sigma_1 \sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_3}}$
频率比尺 σ_f	$\frac{1}{\sqrt{\sigma_1}}$	$\frac{1}{\sqrt{\sigma_1}}$	$\frac{1}{\sqrt{\sigma_1}} \sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_3}}$
速度比尺 σ_v	$\sqrt{\sigma_1}$	$\sqrt{\sigma_1}$	$\sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_3}}$
变形比尺 σ_s	σ_1	σ_1	σ_1
应力比尺 σ_σ	σ_2	σ_2	σ_2
应变比尺 σ_ϵ	1	1	1
力比尺 σ_F	$\sigma_2 \sigma_1^3$	$\sigma_2 \sigma_1^3$	$\sigma_2 \sigma_1^3$

水利造价信息网
<http://www.slzjxx.com>

附录 B 模型材料弹性模量测试方法

B.0.1 弹性模型材料的弹性模量测试宜采用敲击固端悬臂梁的方法进行，如图 B.0.1 所示。



图B.0.1 悬臂梁法测弹性模量
 l —试条有效长度； b —试条截面最大边长

- B.0.2** 悬臂梁长度应大于其截面尺寸 10 倍以上。
- B.0.3** 悬臂梁应采用粘接性能良好的粘结剂固定于大体积基座上，基座的质量要大于悬臂梁质量 100 倍以上。
- B.0.4** 测试传感器可选用非接触式动态位移计或应变片。
- B.0.5** 悬臂梁的基频与弹性模量的关系按式 (B.0.5) 计算：

$$E = \frac{f^4}{1.375} \frac{\rho A}{J} (2\pi)^2 \quad (\text{B.0.5})$$

式中 E ——弹性模量；
 ρ ——材料密度；
 A ——试条截面积；
 J ——截面惯性距；
 l ——试条有效长度；
 f ——基频频率。

附录 C 土石坝模型动力试验的相似比尺

表 C 土石坝模型动力试验的相似比尺

项 目	符 号	相似比尺	备 注
尺寸	L	α_L	基本相似比尺
密度	ρ	α_ρ	基本相似比尺
模量系数	σ	α_σ	基本相似比尺
坝体应力	σ	$\alpha_\sigma = \alpha_\rho \alpha_L$	
水压力或孔隙水压力	p	$\alpha_p = \alpha_\rho \alpha_L$	
剪切模量	G	$\alpha_G = \alpha_L^2 \alpha_\rho \alpha_\sigma^2$	
应变	ϵ	$\alpha_\epsilon = \alpha_\sigma = \alpha_L^2 \alpha_\rho^2 / \alpha_\sigma$	
位移	u	$\alpha_u = \alpha_L^2 \alpha_\rho^2 / \alpha_\sigma$	
速度	v	$\alpha_v = \alpha_L^2 \alpha_\rho^2 / \alpha_\sigma^2$	
加速度	a	$\alpha_a = 1$	
时间	t	$\alpha_t = \alpha_L^2 \alpha_\rho^2 / \alpha_\sigma^2$	
频率	f	$\alpha_f = \alpha_\sigma^{-1/2} \alpha_L^{-2/2} / \alpha_\rho^2$	
阻尼比	ξ	$\alpha_\xi = 1$	
黏聚力	c	$\alpha_c = \alpha_\rho \alpha_L$	
摩擦角	φ	$\alpha_\varphi = 1$	

附录 D 试验报告的主要内容

- 1.参加人员
- 2.工程概况与试验目的
- 3.试验方案
- 4.试验设备与测试仪器
- 5.数据处理与分析
- 6.试体动力特性
- 7.试体动力响应
- 8.结论
- 9.参考文献

标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要 求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推 荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允 许
不必	不需要、不要求	