

文章编号:0559-9350(2020)10-1299-08

## 拱坝-库水相互作用的振动台破坏试验研究

张宇<sup>1</sup>, 冯新<sup>2</sup>, 齐晗兵<sup>1</sup>, 范哲<sup>3</sup>

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 为探究拱坝-库水相互作用对拱坝强震失效模式和超载能力的影响, 在振动台上开展模型动力破坏试验。基于弹性力-重力相似律设计模型, 考虑了材料率效应, 利用天然水模拟库水, 缝的模拟考虑了键槽影响以及裂纹尖端开裂相似条件。选择模型基频对应的谐波逐级加载开展超载试验, 并运用多种技术手段监测模型损伤破坏全过程。试验表明, 库水的预压作用能够充分发挥拱结构的抗压特点, 使得顶拱拱向应力分布均匀。本次试验与不考虑库水的研究结果对比, 得出结论: 库水并没有降低拱坝结构整体超载能力, 在宏观裂纹出现前约束顶拱动态应力的发展, 使得顶拱与拱冠梁趋于同时破坏。本文研究结果可为评估坝库相互作用对拱坝超载能力与失效模式的影响提供试验依据。

**关键词:** 坝库相互作用; 失效模式; 振动台; 相似关系; 动力模型试验

**中图分类号:** TV642.2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slx.20200245

## 1 研究背景

我国常在崇山峻岭间建设高拱坝, 这些地方往往是地震活跃地带, 拱坝的抗震安全显得尤为重要。在地震发生时, 水库常处于蓄水状态, 库水与坝体的相互作用直接影响拱坝的损伤破坏机理, 成为拱坝抗震安全问题中的研究热点之一。Westergaard<sup>[1]</sup>开创性地提出附加质量方法研究动水压力以后, 很多科研工作者对此问题进行了广泛研究, 取得了许多重要成果。这些研究成果在实际运用中存在一些假定和限制条件, 因此有必要从物模试验的角度出发, 更加直观地探究库水的存在对拱坝极限承载能力和失效模式的影响。

Westergaard附加质量模型包含刚性坝体、库水是无黏的不可压缩水体、库区为矩形形状等假设, 概念明确、使用简便且计算结果偏于安全, 现行的《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB35047-2015)推荐此法计算动水压力。许多科研工作者针对附加质量模型限制条件开展研究。潘家铮<sup>[2]</sup>计算求得楔形重力坝动水压力的解析解。Chopra<sup>[3]</sup>研究了水库长度对坝面动水压力的影响, 并从理论上证明了不应忽略较大竖向地震动。Millán等<sup>[4]</sup>利用边界元法分析了库水域形状、库水压缩性等影响因素对大坝动力响应的影响。上述研究都假定坝体为刚性, 实际地震过程中, 坝体会因为地面和山体运动以及动水压力的影响而产生变形, 这种变形又影响了库水的边界条件, 整个过程体现了强烈的流固耦合现象。因此, 考虑坝体-库水相互作用能够更真实地反映坝面动水压力的影响。Clough<sup>[5]</sup>用有限元方法离散库水, 将Westergaard公式适用范围推广到拱坝三维问题。

很多学者采用数值方法研究研究坝库动力响应问题。许贺等<sup>[6]</sup>利用比例边界有限元模拟坝前可压缩库水, 发展了坝库动力耦合弹塑性分析方法。孔宪京等<sup>[7]</sup>采用比例边界有限元, 通过坝库三维模

收稿日期: 2020-04-15; 网络首发时间: 2020-10-07

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200930.1023.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401602); 国家自然科学基金项目(51969010, 51669008)

作者简介: 张宇(1984-), 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事水工结构抗震研究。E-mail: zhangyu@nepu.edu.cn

通讯作者: 冯新(1971-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震与健康监测研究。E-mail: fengxin@dlut.edu.cn

型,建立了不同方向地震作用时动水压力与坝应力分布的联系。杜修力等<sup>[8]</sup>利用时域显式分析法并考虑库水的可压缩性来计算坝库相互作用,发现附加质量模型明显增加了结构地震反应。Du等<sup>[9]</sup>通过分析动水压力和淤砂层,指出淤砂层对某些频率的坝面动水压力有放大作用。Lin等<sup>[10]</sup>通过比例边界有限元方法研究坝库相互作用。王俊等<sup>[11]</sup>利用流体单元与固体单元研究坝库耦合系统在强震下对重力坝应力分布及损伤的影响,指出附加质量模型对结构损伤有放大作用,流固耦合模型更接近现实情况。尽管坝体-库水相互作用问题的研究已有多,但还没有一种被广泛认可的计算模型包含了库水压缩性、水库形状和流域面积、淤砂层、地基等诸多重要因素。在实际拱坝工程的抗震设计时,设计人员通常仍利用折减的Westergaard附加质量考虑动水压力,折减系数选取因人而异。

振动台模型试验能够有效地验证和补充数值研究结果。宫必宁<sup>[12]</sup>利用矾土、水泥和铁粉等材料浇筑重力坝模型,利用振动台分别施加了人造地震波、实测地震波以及简谐波,分析了坝体不同高程的动水压力和加速度,指出动水压力对于坝体结构低阶频率作用较大,规范规定的动水压力过于保守,库水域长度大于三倍坝高时系统反应趋于稳定。李德玉等<sup>[13]</sup>利用振动台试验研究重力坝动力特性与库水作用的关系,并将试验结果与数值结果进行比较,指出有限元附加质量模型比Westergaard模型能更好的模拟坝库相互作用。王铭明等<sup>[14]</sup>开展了重力坝-库水系统振动台模型试验,将研究结果与数值结果进行对比,指出基于欧拉公式的流固耦合有限元模型与试验结果相近,并给出了沿坝高程的动态效应分布系数。与重力坝相比,有关拱坝坝库相互作用的振动台研究较少,中国水利水电科学研究院部分学者在此开展了试验攻关,取得了卓有成效的成果。陈厚群等<sup>[15]</sup>考虑了水库淤沙,研究了可压缩库水的共振效应,并通过白山拱坝比较了流固耦合模型与Westergaard模型的优劣。Wang等<sup>[16]</sup>通过黏滞液体模拟边界切向阻尼,并通过数值方法论证法向边界阻尼影响较小,阻尼边界的精确模拟使得振动台试验考虑因素更加全面。李德玉等<sup>[17]</sup>对坝体-库水-地基相互作用进行科学攻关,同时考虑了阻尼边界以及缝的非线性响应,多种技术的联合运用为评价拱坝抗震安全提供了更多研究途径。以上科研成果增进了对坝库相互作用的理解,但均放松了模型相似关系的要求,特别在坝体模型材料进入破坏阶段。

本文拱坝-库水振动台试验是在前期空库模型研究基础上开展的。在文献[18]中,笔者利用考虑材料率相关性的脆性模型材料制作高坝模型,使得材料进入破坏阶段仍可近似满足弹性力-重力相似律;横缝的模拟考虑键槽的影响,诱导缝的模拟满足裂纹尖端开裂相似条件;利用压电传感器网络监测拱坝内部损伤的产生与发展,同时监测关键位置的动态应力;综合运用以上试验技术探究空库情况下拱坝地震失效模式。本文试验在综合考虑试验成本及可操作性情况下,以天然水模拟库水,并对模型坝体进行防水处理,将振动台试验结果与空库模型试验结果进行对比,建立拱坝-库水相互作用与地震破坏机理的内在联系,以期高拱坝的抗震设计提供参考。

## 2 振动台模型试验描述

**2.1 试验背景** 沙牌拱坝坐落于四川省汶川县境内,是岷江支流重要枢纽工程,坝址距汶川县城约47 km,距成都约136 km。该拱坝为三心圆单曲拱坝,拱冠附近布置两条诱导缝,坝肩位置各布置一条横缝。拱坝高132 m,坝顶高程为1867.5 m,水库正常蓄水位以及校核洪水位均为1866.0 m,死水位1825.0 m。顶拱轴线全长257.92 m,最大坝高为132.0 m,顶拱厚度9.5 m,弧高比2.13,厚高比0.238,最大中心角92.48°。该坝分别经受了2008年的汶川强震以及2013年的芦山强震考验,本文以沙牌为例进行拱坝坝体-库水相互作用研究。

**2.2 模型设计** 本文模型试验选择林皋等<sup>[19]</sup>提出的弹性力-重力相似律进行模型设计,拱坝模型系统包括两岸山体、基础、坝体和水库。动力模型试验在大连理工大学工程抗震研究所的水下振动台系统开展,该系统工作平台尺寸3 m×3 m,模型比尺选为118.86。通过前期材料试验探索,配制了一种脆性好、低弹性模量、低强度、高密度、易于加工和脱模的模型材料<sup>[20]</sup>,坝体材料密度比尺和弹性

模量比尺分别为0.76和85.23。拱坝模型结构缝的模拟方法参见文献[18]，横缝考虑了梯形键槽的影响，诱导缝的模拟基于断裂力学理论。根据相似律要求，原模型库水密度比值与原模型材料密度比值一致，然而现实中很难找到满足此要求的液体，故本文试验利用天然水模拟库水液体，原模型库水密度比尺为1.0。图1为拱坝模型浇筑完成后未加库水的沙牌拱坝模型，此时传感器已布设完毕，上游水池长度为坝高2.5倍。由于拱坝模型材料不能防水，模型内置的传感器也没有进行防水处理，所以需要采取一定防水措施。试验前利用厚度0.2 mm的防水塑料制成特制形状对坝体上游面进行防水处理，在坝体下游两岸山体上用挡板对模型下游坝体进行隔水处理，两岸山体和模型基础用改性沥青涂抹防水。图2为防水处理完成后，注入库水的模型试验图。

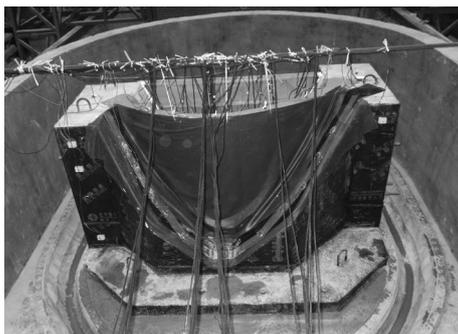


图1 试验前未加库水的拱坝模型



图2 加库水的拱坝试验模型

**2.3 模型内部应力监测与损伤监测** 振动台试验为有水试验，这给拱坝上游面布置传感器以及观察宏观裂纹带来不便。本文试验利用压电传感器压电效应进行模型内部动态应力监测，并监测拱坝内部由于裂纹产生与发展造成的损伤。由于模型材料力学性能(如强度、弹性模量)与混凝土材料差异较大，在振动台试验前需要摸索出特定的模型损伤监测技术，如信号频率和类型、传感器的有效监测距离、信号处理与分析方法。

在一个长度为1200 mm，截面尺寸为150 mm×150 mm的梁上开展损伤监测探索试验，如图3所示。4个传感器间隔300 mm，布置在梁中轴线位置，并利用细尼龙线固定。在位置1和位置2处依次切割，深度分别为20、40、60和80 mm，用以模拟不同程度的裂纹。一个传感器作为信号发射器，其余传感器为接收端，在多个工况下开展试验研究。通过函数发生器生成1000 Hz至5000 Hz的扫频电压信号，功率放大器将生成的信号幅度放大到90 V，数据采集系统采集数据，采样频率为100 kHz。通过不同传感器接收同一信号的时差，估算出在模型材料中波传播速度为360 m/s，比在混凝土中波传播速度(约3500 m/s)要慢得多，模型材料更易吸收应力波的能量，信号随距离衰减情况不能忽略。根据摸索试验不同工况的试验结果，再通过快速傅里叶变换得到损伤监测结果，发现传感器间直线监测距离在不超过600 mm时，模型材料内部损伤的监测结果有效性是能够保证的。

为定量描述两传感器间模型材料的损伤程度，定义损伤指数如下式所示：

$$D_i = \int \frac{|s_i(x) - s_0(x)|}{s_0(x)} dx \quad (1)$$

式中： $D_i$ 为工况*i*时的损伤指数； $s_0(x)$ 为初始状态下接收到的傅里叶变换后的信号； $s_i(x)$ 为不同振动台工况*i*后接收到的傅里叶变换信号； $x$ 为1000 Hz至5000 Hz区间信号频率。

需要说明的是，这种损伤监测方法不能确定具体坐标位置的损伤，只能监测某一区域(传感器之间)的损伤程度。

**2.4 振动台试验工况** 将9个压电传感器布置在模型顶拱中轴线位置，5个压电传感器布置在模型拱冠梁中轴线位置，如图4所示。其中，横缝位置处由于存在连续隔板不能进行损伤监测，诱导缝处隔板是间断的，可以开展损伤监测。振动台最高工作频率为50 Hz，选择与模型基频相对应的谐波激励

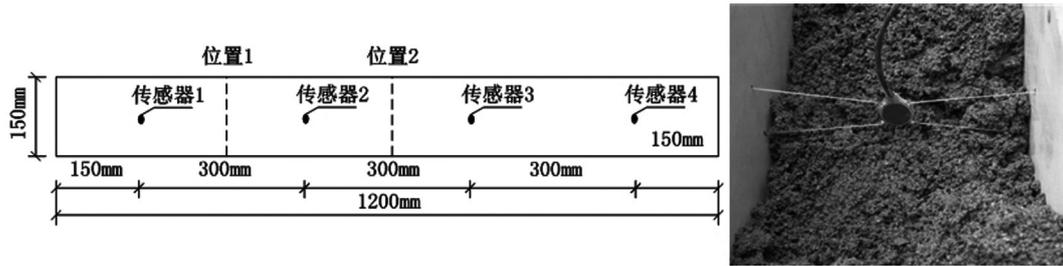


图3 损伤监测探索试验

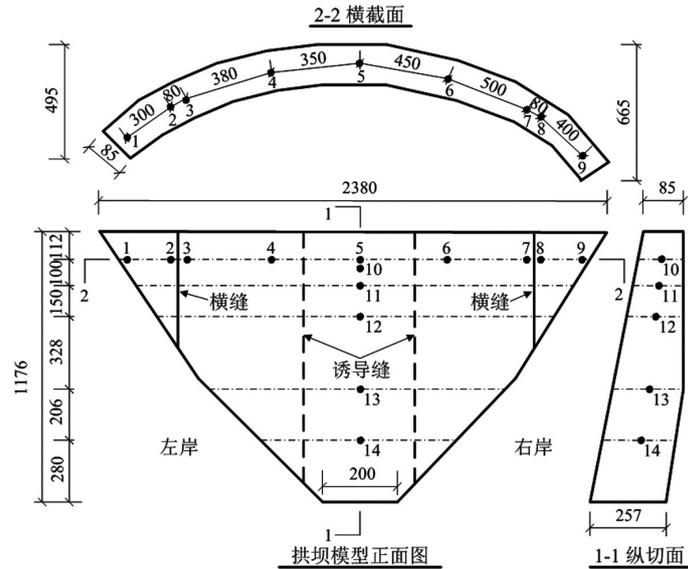


图4 埋置于模型内部的分布式传感器 (单位: mm)

表1 拱坝模型内部损伤监测路径

监测路径	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
发射端	2	4	4	6	6	8	11	11	13	13
接收端	1	3	5	5	7	9	10	12	12	14

加载, 增加试验可靠性。振动台试验逐次进行 0.05g、0.1g、0.15g、0.2g、0.25g、0.3g 和 0.4g 共 7 种水平正弦波激发, 每次激发前后均开展模型内部损伤监测, 并通过微幅白噪声确定下一次加载频率。拱坝模型共 10 条监测路径, 如表 1 所示, 通过分析模型内部应力和损伤指数来探究结构强震破坏机理。

### 3 试验结果与分析

**3.1 模型基频与动态应力分布** 通过布置在模型拱冠梁上部的加速度传感器测得拱坝满库模型基频为 19.80 Hz, 相应的文献[18]中拱坝空库模型基频为 23.60 Hz, 表明库水的存在使得拱坝系统基频减小。拱坝模型拱冠梁动态应力最大值分布情况如图 5 所示。从图 5 中可知, 工况 1 至工况 2 时, 拱冠梁的动态拉应力与动态压应力基本上呈对称分布, 且工况 2 较工况 1 时各高程处应力均按比例增加, 说明前两个工况时, 拱冠梁受力体系没有发生大的改变。工况 3 时, 下部高程的压应力不增反降, 而此工况的各高程处拉应力依旧增大, 说明此时拱冠梁梁向应力传导途径开始遭到破坏, 在上游库水挤压和其它荷载联合作用下产生了损伤。工况 4 时, 拱冠梁顶拱处的动态应力明显减小, 此处已发生较大损伤, 应力得以释放。工况 5 以后, 各高程处应力变化规律无章可循, 拱冠梁破坏较严重。

模型顶拱拱向动态拉应力最大值分布情况如图 6 所示。从图 6 中可知, 在整个加载过程中, 拱冠处动态拉应力较大, 向坝肩逐渐减小, 其中靠近坝肩的横缝附近动态拉应力最小, 说明横缝的存在

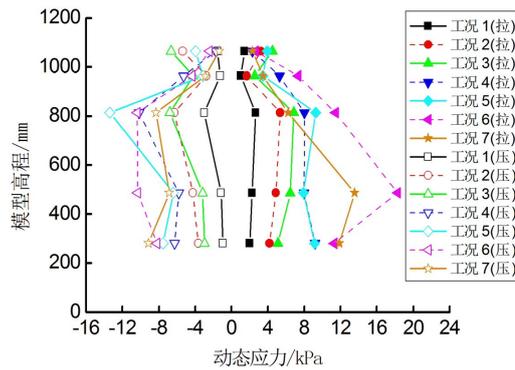


图5 拱冠梁动态应力最大值分布

有效地释放了坝肩拱向应力，保护坝体。与工况2相比，工况3时拱冠处的拉应力略有减少，说明此时顶拱已有损伤出现。工况4时，拱冠处拉应力下降明显，说明此时拱向拉应力传导途径遭到严重破坏，特别是拱冠右侧接近诱导缝的位置应力下降特别明显，拱冠发生了较大破坏，拱向拉应力得以释放。工况5以后，拱冠附近拉应力变化无明显规律，说明此后拱冠处又出现了多处损伤。

将此次模型试验结果与文献[18]无库水试验结果进行对比，选取两次试验0.05g正弦波激发时（此级加载拱坝没有发生损伤）的顶拱拱向拉应力分析，如图7所示。从图7中可知，相比于无库水情况，由于库水对拱坝上游面的挤压作用，使得拱冠附近的应力明显降低，顶拱拱向应力分布更均匀，受力更加合理。两次试验坝肩附近的应力分布基本一致，库水的存在对此影响较小。

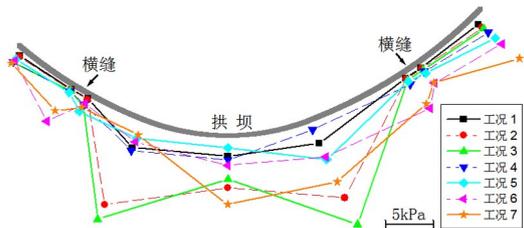


图6 顶拱拱向动态拉应力最大值分布

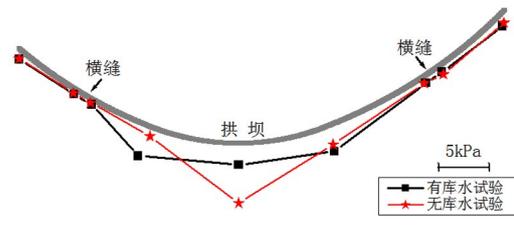


图7 0.05g正弦波激发时顶拱拱向拉应力对比

**3.2 模型损伤监测** 为了更加直观的表现拱坝模型在整个试验过程中内部损伤发展情况，将损伤指数划分成4个等级，每个等级对应不同颜色，具体损伤等级划分如表2所示，拱坝模型不同监测路径损伤发展过程如图8所示。

表2 损伤水平与损伤指数关系

损伤水平	无损伤	轻微损伤	中等损伤	严重损伤
损伤指数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.7	0.7~1

从图8中可知，考虑动水压力影响下，工况2之前，拱坝模型关键路径上并没有监测到明显的损伤。其原型沙牌拱坝在有库水情况下经受住了汶川地震的考验，试验和实际情况均表明沙牌拱坝的体型设计和分缝处理是科学的。强震时，坝肩常常是拱坝结构应力较集中部位，此次振动台试验全过程坝肩位置均未出现损伤，说明坝肩附近设置横缝的必要性。工况3时，拱向与梁向几乎同时破坏，拱冠梁上部以及顶拱拱冠处均监测到轻微损伤。与文献[18]无库水试验结果对比发现，由于库水的挤压作用，使得拱坝顶拱的破坏并没有明显早于拱冠梁的破坏，更加充分发挥了拱结构抗压的受力特点。工况4时，模型在顶拱拱冠右侧诱导缝出现了肉眼可见的宏观裂纹。工况4及以后，顶拱拱冠处以及拱冠梁位置均发生了中等或严重损伤，拱冠附近设置的诱导缝能有效引导损伤开裂发展方向，便于震后拱坝修复。从拱冠梁监测到的损伤情况以及动应力情况，建议在拱冠附近两诱导缝之间设置若干纵缝，以便拱冠梁发生损伤破坏时引导损伤开裂发展方向，设缝数量和具体位置可通

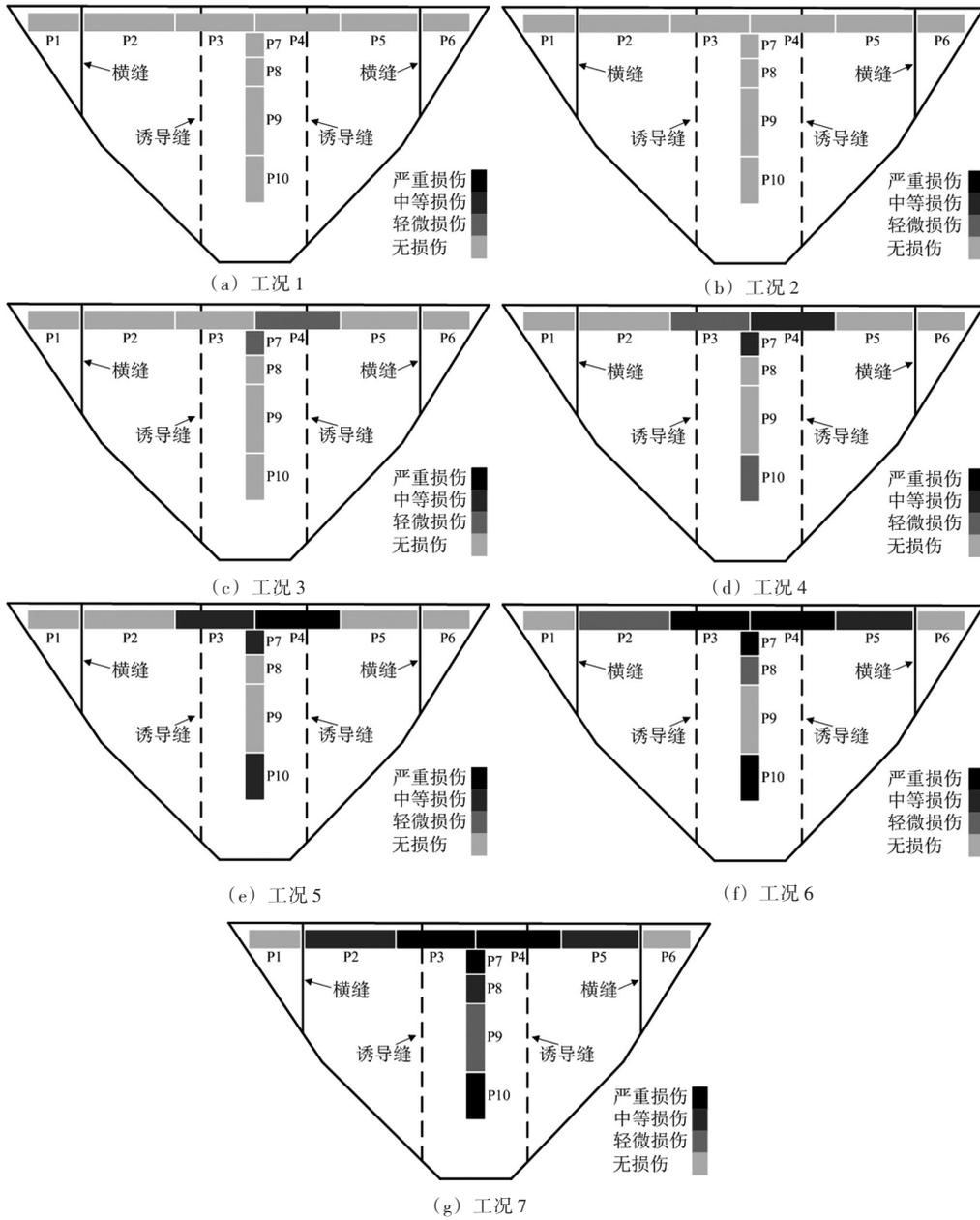


图8 拱坝模型损伤发展过程



图9 拱坝模型下游面顶拱损伤破坏图

过模型试验和数值模拟结果确定。

拱坝模型下游面顶拱损伤破坏情况如图9所示。从图9中可知, 试验全部工况完成后, 设缝处均发生张开错动现象, 顶拱位置破坏严重, 使得布置在顶拱附近的多处传感器掉落或无法正常采集信息, 模型局部甚至发生坍塌。需要说明的是, 由于振动台试验采用与模型基频对应的谐波加载, 拱坝模型在缝开裂后形成若干较大块体, 后期加载过程中块体间持续不断发生碰撞、挤压, 导致缝间坝体损伤。谐波加载方式与地震波加载方式相比, 试验结果夸大了拱坝地震损伤破坏程度。

## 4 结论

在振动台上开展了考虑拱坝-库水相互作用的振动台破坏试验研究, 分析了拱坝强震破坏过程以及坝库相互作用对拱坝破坏机理的影响, 得到以下结论: (1)利用振动台破坏试验的方法来研究坝库相互作用, 初步揭示其强震破坏过程。试验结果与不考虑库水的试验结果进行对比, 为研究库水的存在对拱坝地震超载能力和失效模式的影响提供了试验依据。(2)综合本次试验结果和未考虑库水的研究结果可知, 库水的预压作用主要发生在地震前期或者较低荷载激励情况下, 此时拱结构能够充分发挥抗压作用, 拱向应力分布更均匀, 使得顶拱与拱冠梁更加趋于同时破坏。若以拱坝出现第一条裂纹时对应的加速度定义拱坝的极限承载能力, 本次试验表明库水的存在没有降低高坝的极限承载能力。(3)本次试验原模型库水密度比值与原模型材料密度比值不一致, 不能严格满足相似率要求。相关数值分析表明, 此种库水模拟方法对坝体结构的建基面和上游面的拉主应力分布有一定影响, 对结构强震损伤破坏路径以及结构压主应力分布的影响可以忽略。相比于不考虑库水作用的振动台试验, 仍能在一定程度上反映实际地震中坝库相互作用对高坝失效模式的影响。(4)开展振动台有水试验, 使用能够监测模型内部损伤和动态应力的试验技术, 可以有效地解决传感器布置与宏观裂纹观察的难题。(5)开展高拱坝坝库相互作用振动台试验的难点在于需要多种技术的联合运用, 既要找到满足相似关系要求且考虑率效应的模型材料, 又要求对横缝、诱导缝等进行合理模拟, 还需要使用多种监测技术相互佐证, 以及注意防水处理等技术细节, 未来需要进一步发展更加先进的模型试验理论和更加精细的模型试验技术, 实现对考虑坝库相互作用的拱坝强震破坏全过程模拟。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] WESTERGAARD H M . Water pressures on dams during earthquakes[J] . Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933, 98: 418-433 .
- [ 2 ] 潘家铮 . 楔形重力坝在地震时动水压力作用下的应力计算[J] . 水利学报, 1963(6): 55-57 .
- [ 3 ] CHOPRA A K . Hydrodynamic pressures on dams during earthquake[J] . Journal of the Engineering Mechanics, 1967, 93(EM6): 205-223 .
- [ 4 ] MILLÁN M A, YOUNG Y L, PRÉVOST J H . The effects of reservoir geometry on the seismic response of gravity dams[J] . Earthquake Engineer and Structural Dynamic, 2007, 36(11): 1441-1459 .
- [ 5 ] CLOUGH R W . Reservoir interaction effects on the dynamic response of arch dams[C]//Proceeding of China-US Bilateral Workshop on Earthquake Engineering . Beijing: Water Resource and Hydropower Press of China, 1982 .
- [ 6 ] 许贺, 邹德高, 孔宪京, 等 . 基于SBFEM的面板坝与可压缩库水水力耦合弹塑性分析方法[J] . 水利学报, 2018, 49(11): 1369-1377 .
- [ 7 ] 孔宪京, 许贺, 邹德高, 等 . 不同激振方向下动水压力对高面板坝面板动压力的影响[J] . 水利学报, 2016, 47(9): 1153-1159 .
- [ 8 ] 杜修力, 王进廷 . 拱坝-可压缩库水-地基地震动波动反应分析方法[J] . 水利学报, 2002(6): 83-90 .
- [ 9 ] DU X L, WANG J T, HUNG J K . Effects of sediment on the dynamic pressure of water and sediment on dams [J] . Chinese Science Bulletin, 2001, 46(7): 521-524 .
- [ 10 ] LIN G, WANG Y, HU Z Q . An efficient approach for frequency-domain and time-domain hydrodynamic analy-

- sis of dam-reservoir systems[J]. *Earthquake Engineer and Structural Dynamic*, 2012, 41(13): 1725-1749.
- [ 11 ] 王俊, 王铭明, 武亮, 等. 两种动水压力模型重力坝地震动力损伤比较分析[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(9): 27-31.
- [ 12 ] 宫必宁. 重力坝地震动水压力试验研究[J]. *西南科技大学学报*, 1997, 25(1): 98-102.
- [ 13 ] 李德玉, 张伯艳, 王海波, 等. 重力坝坝体-库水相互作用的振动台试验研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2003, 1(3): 216-220.
- [ 14 ] 王铭明, 陈健云, 范书立. 重力坝地震动水压力试验研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(5): 51-54.
- [ 15 ] 陈厚群, 侯顺载, 杨大为. 地震条件下拱坝库水相互作用的试验研究[J]. *水利学报*, 1989(7): 29-39.
- [ 16 ] WANG H B, LI D Y. Experimental study of dynamic damage of an arch dam[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 2007, 36(3): 347-366.
- [ 17 ] 李德玉, 王海波, 涂劲, 等. 拱坝坝体-地基动力相互作用的振动台动力模型试验研究[J]. *水利学报*, 2003(7): 30-35.
- [ 18 ] 张宇, 冯新, 侯爽, 等. 结构缝对碾压混凝土拱坝地震破坏机理影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(10): 73-83.
- [ 19 ] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. *大连理工大学学报*, 2000, 40(1): 1-8.
- [ 20 ] 张宇, 冯新, 朱昆, 等. 仿真混凝土材料动态拉伸试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(6): 18-25.

## Experimental study on impact of dam-reservoir interaction on dynamic failure mechanism of arch dam

ZHANG Yu<sup>1</sup>, FENG Xin<sup>2</sup>, QI Hanbing<sup>1</sup>, FAN Zhe<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to study the impact of dam-reservoir interaction on overload capability and failure mode of arch dam, a dynamic rupture test was carried out on the shaking table. The model was designed on the basis of elasticity-gravity similarity law, taking the material rate effect into account, and natural water is used to simulate the reservoir water. The effect of key grooves were considered in the simulation of contraction joints, while the simulation of induced joints was based on fracture mechanics. Sine waves corresponding to fundamental frequency loaded on the dam progressively to observe the responses of arch dam under overloading. Various techniques were used to monitor the whole process of model damage. The results show that the pre-compression of the reservoir water can fully exert the compression characteristics of the arch structure, making the arch stress distribution at the top of the arch dam. Compared with the research results without considering the reservoir water, this experiment concluded the reservoir water does not reduce the overload capacity of the arch dam. Before the appearance of macro cracks, the development of the dynamic stress of the top arch is restricted, which made the top arch and crown at the same time destruction. The research results in this paper can provide experimental basis for evaluating the impact of dam-reservoir interaction on the overload capacity and failure mode of arch dams.

**Keywords:** dam-reservoir interaction; failure mode; shaking table; similarity; dynamic model test

(责任编辑: 杨虹)