# 碾压仿真混凝土大坝分段模型实验



二O一四年九月

大坝的安全监测对于人们的正常生活及安全有着至关重要的作用,国家也特别重视监测 手段的进展情况。我国在 50-70 年代兴修的一批水库大坝,因当时水平所限,基本上没有安 装坝体安全监测系统。随着服役年限的不断延长,这一批库、坝已呈现出不同程度的病险状 态,被列为病险库坝。在对其进行维护的同时,亟待安装一批现代化的安全监测系统对其状 态进行实时监控,据统计,我国在建的新库坝以及需要监测的病险库坝总计有 4000 多座, 还有大量的江河护提安全监测配套工程。鉴于上述情况,病险库坝急需采取有效手段监测和 评定其安全状况、修复和控制损伤。在不可抗拒因素下预警,新建的库坝应积极考虑增设长 期的"健康"监测与损伤控制系统,实时地把握工程结构的全寿命质量与安全状况,确保大坝 结构的安全、适用和耐久性。

光纤光栅(简称 FBG)是近 10 年来出现的一种新型智能传感元件,开始应用于桥梁、大坝、建筑等工程领域。光纤传感用于大坝监测比之传统技术具有明显优势:(1)精巧轻柔,不 致影响埋设部位的混凝土的性能和力学参数,不影响观测值的代表性:(2)稳定性好、耐腐蚀、 抗电磁干扰、准分布测量、体积小、重量轻、结构简单和精度高。

本节介绍了利用自行开发的管式光纤光栅应变传感器检测了混凝土结构内部的应变变 化,成功监测了碾压仿真混凝土大坝坝段模型在动荷载作用下的弹性应变和启裂应变变化趋势。

## 模型设计及激励系统

通过初步的稳定和应力应变分析,在地震工况下,现大坝体型难以满足抗滑稳定和应力 应变控制要求。因此,除了进行数值分析以外,进行大坝动力反应和地震破坏模型试验是十 分必要的。本项目对混凝土重力坝进行振动台模型试验,通过试验确定大坝的地震安全性。

该模型采用仿真混凝土材料制作而成,是一种采用水泥、重晶砂、矿石粉、速凝剂等材 料配合并严格控制含水量和碾压施工工艺,制成的一种低强度的混凝土仿真材料。此种仿真 材料具有较好的线弹性和破坏断裂脆性,同时由于采用与混凝土材料近似的配方,具有与混 凝土材料比较相似的材料应力-应变曲线、材料累积损伤曲线和材料断裂特性。同时,由于 这种仿真材料的低强度,可以比较方便地进行从结构弹性微振、弹塑性强振直到断裂破坏的 各个不同阶段的全过程模型动力模拟试验。是用来模拟碾压混凝土大坝的理想材料。

根据 Ansys 软件分析结果, 如图 7.1 所示, 我们在 3 个薄弱部位安装了光纤光栅应变传

## 引言

感器。该传感器为自行封装的管式光纤光栅应变传感器。



图 7.1 Ansys 分析结果

模型试验的激励装置采用大型电-液伺服控制地震模拟系统。该系统由振动台、驱动系统、中心控制系统组成。能进行水平和竖直两个方向的激振,可产生的最大加速度为 1.0g (水平)、0.7g (竖直),工作频率为 0-50Hz。

#### 传感器布设方法

根据规范反应谱,在薄弱部位(图 7.1)距离表皮 10mm 混凝土内部埋入光纤光栅(FBG) 传感器,用以测试在地震荷载作用下的应变变化。

由于碾压混凝土在凝结硬化前属于干性松散材料,同时,在大坝模型的制作过程中,需要对混凝土进行碾压,这对光纤光栅的布设很不利。为了便于安装传感器和碾压成型,本试验采用钢板模具,在布设传感器的相应位置留设预留孔(图 7.2),先将预留孔封好,待混凝土碾压结束后,将有铁板盖板的预留孔打开,按指定位置结合传感器的大小挖进 10mm 深度的方孔,将传感器放入固定后,用碾压混凝土一边填塞一边碾压,达到要求的碾压次数和混凝土填满孔道为止,然后将安装孔盖板用螺钉封好,待混凝土凝结硬化到要求的龄期后就可以拆模进行试验。



图 7.2 光纤光栅 (FBG) 传感器安装方法

# 数据采集系统

使用光纤光栅四通道解调系统监测 λ<sub>B</sub>的变化。该设备集成了扫频激光光源和可调光纤 滤波器解调模块,仪器的扫描频率为10Hz,波长分辨率为1pm。工作波长范围为1510-1590nm。 可以同时检测 32 路光信号,通过数据采集卡与计算机联机,由采集软件自动记录 λ<sub>B</sub>的变化。

#### 试验过程

对碾压仿真混凝土重力坝进行了多组的动力模型试验。对排砂坝段和挡水坝段进行现场观测和应变分析。在白噪声、正弦波、随机波三种动力荷载作用下,对碾压仿真混凝土大坝坝段模型结构各个工况下的应变进行分析。

1. 白噪声作用确定基频范围

对坝段进行白噪声激励,可以初步确定坝段的基频范围。如

图 7.3 为坝段 FBG-1 光纤传感器测得的基频范围,两种坝段基频都在 30Hz-50Hz 范围内,在 40Hz 左右摆动。



2. 正弦波作用确定基频

根据测得的基频范围,对坝段进行了正弦波激励,进一步来确定坝段的基频。如图 7.4 所示, 39Hz 峰值点的应变最大,为光纤传感器测得的基频。在正弦波的激励下,光纤光栅传感器测得的大坝模型的应变响应波形与输入的正弦波型虽有响应滞后现象,但是它们的基本变化趋势是一致的(图 7.5),说明埋入碾压混凝土内部的光纤光栅传感器能够准确监测到大坝模型的应变变化趋势,为大坝在地震作用下的应变分析提供可靠依据。



图 7.5 正弦波输入波形与传感器响应波形对比

3. 随机波激励下坝段的响应分析

混凝土大坝震害的特点是动态断裂,因此可选择大坝薄弱部位(一般为重力坝的头部) 首次出现裂缝时的光纤光栅应变反映作为大坝健康状况的评价指标。采用现场实际观测与光 纤光栅传感器监测数据对比分析的方法,对在地震荷载作用下的大坝模型进行应变分析。



1. 厂房坝段



图 7.6 厂房坝段光纤光栅传感器布置图

表 7.1 光纤光栅 (FBG) 传感器布置位置及波长

厂房坝段	1#FBG)	2#FBG	3#FBG









由现场实验观测和光纤光栅(FBG)应变监测的数据对比分析可知,对于厂房坝段, 地震输入到第五级,大坝开始启裂,模型不同位置3个光纤光栅的应变幅值同时出现了明 显的衰减趋势(见图7.8),FBG-1测得最大启裂应变84.13µɛ(图7.8)。此时开裂坝段不 能保持弹性的整体工作状态。在峰值应变发生以前,坝段处于整体的弹性工作阶段,3个 光纤光栅传感器测得的应变变化趋势是均匀一致上升的。坝头启裂后,随着地震输入加速 度的增加,3个光纤光栅的应变幅值都开始衰减。地震输入第6级后,FBG-1测得的应变幅值衰减最快,FBG-2处于坝体的中部,应变衰减要比FBG-3快一些,FBG-3衰减的最慢,这正是大坝的开裂从坝头开始随着震级的增加和质量中心的不断转移而逐渐向坝基发展的结果。

	厂房坝段	
等级	破坏描述	坝顶加速度(S)
1		0.855
2		0.924
3		1.4
4		2.11
5	35cm 背水面出现裂缝	2.79
6		2.36
7	坝顶部出现裂缝	1.98
8	42cm 迎水面出现裂缝	1.89
9	4	1.48
10		1.48
11	78cm 坝腰开裂	1.09
12		0.987

表 7.2 厂房坝段现场观测记录

2. 挡水坝段(模拟碾压层)



图 7.9 排沙挡水坝段光纤光栅传感器布置图

	归小块权	III (IBO	211 (100	3# (FBG-	
		1)	2)	3)	
-	波长	1525.2 nm	1545.1nm	1546.9nm	
		图 7.10 挡水坝路	段破坏状态		
			न म्या		
		光 7.4 当小众役 挡 水 圴	〔 段		
等级		<u> </u>	【 段	基底加速度(S)	)
等级 1		<u> お</u> 水 リ 破坏描述	【段	基底加速度(S) 0.083	)
等级 1 2 3		<u> </u>	【 段	基底加速度(S) 0.083 0.181 0.342	)
等级 1 2 3 4	上部 23cm	<b> </b>	【 段	基底加速度(S) 0.083 0.181 0.342 0.549	)
等级 1 2 3 4 5	上部 23cm 光岩	社 水 共 当 小 次 (社)       当 水 共       道 水 共       破坏描述       と 部横缝出现裂缝       处裂缝贯通,上 部椅       千か 混凝土横鋒开裂	<b>夏</b> 黄缝发展	基底加速度(S) 0.083 0.181 0.342 0.549 0.712	)
等级 1 2 3 4 5	上部 23cm 光约	<b>挡水</b> <b>挡水</b> 一 一 一 一 一 一 一 二 二 六 秋 礼 一 二 二 六 秋 礼 一 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二	<b>民</b> 黄缝发展	基底加速度(S) 0.083 0.181 0.342 0.549 0.712 0.864	)
等级 1 2 3 4 5 6 7	上部 23cm 光约	<b>挡水</b> <b>挡水</b> 一 一 一 一 一 一 一 一 一 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二	<b>夏</b> 黄缝发展	基底加速度(S) 0.083 0.181 0.342 0.549 0.712 0.864 1.009	)
等级 1 2 3 4 5 6 7 8	上部 23cm 光约	<b>挡水</b> <b>挡水</b> 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二	<b>夏</b> 黄缝发展	基底加速度(S) 0.083 0.181 0.342 0.549 0.712 0.864 1.009 1.178	)
等级 1 2 3 4 5 6 7 8 9	上部 23cm 光约	<b>挡水</b> <b>挡水</b> 一 一 一 一 一 一 一 一 一 前 横 雄 出 现 裂 缝 贯 通 , 上 部 構 雄 出 现 裂 缝 、 上 部 構 雄 出 现 裂 缝 、 上 部 構 雄 土 飛 裂 雄 貴 通 , 上 部 構 千 处 混 凝 土 横 缝 开 裂 中 部 横 缝 开 裂 中 部 横 缝 开 裂 中 部 横 鐘 开 裂 中 部 横 鐘 开 裂 中 部 横 雄 开 裂 中 部 構 本 一 新 秋 一 、 二 部 樹 千 か 元 新 秋 一 、 二 部 樹 千 か 記 一 二 前 本 一 和 新 一 一 新 秋 一 、 二 前 本 前 、 上 部 柄 千 か 記 殿 土 南 横 塗 开 裂 中 部 横 鐘 开 裂 中 部 横 鐘 开 裂 中 部 横 鐘 开 裂	<b>夏</b> 黄缝发展	基底加速度(S) 0.083 0.181 0.342 0.549 0.712 0.864 1.009 1.178 1.356	)

挡水坝段在地震输入三级的情况下,距离坝顶 230mm 左右出现贯通的裂缝;继续激振,中部横缝在原型地震输入六级左右的情况下开裂,十级的情况下,中部裂缝贯通(表 7.4、图 7.11)。

表 7.3 挡水坝段光纤光栅 (FBG) 传感器布置位置及波长

挡水坝段的模型预先设置了横缝(图 7.11),来模拟碾压薄弱层对大坝的影响。碾压层 薄弱是造成挡水坝段在地震输入到第三级的时即开裂的原因;而排砂坝段无碾压薄弱层, 地震输入到第五级开始出现裂缝。

挡水坝段在弹性阶段测得的应变幅值衰减规律与坝段基本相同。当地震输入到第3级的时候,大坝头部开裂,此时最大启裂应变是21.67µɛ(图7.12)。由于出现裂缝,FBG-1在第四级地震时应变幅值开始减小。地震输入到第五级时,由于裂缝扩张,使得在1#FBG 传感器位置产生应力集中,应变幅值达到最大值,在第六级地震时,因为预先设置的横缝薄弱层在1#FBG 传感器处完全断开,应变幅值急剧衰减;而位于坝脚下的FBG-3观测的应变在坝头开裂后比FBG-2的应变幅值要大,这是由于坝腰横缝薄弱层对整体的削弱,改变了质量中心的位置,加大了坝脚处的应变幅值变化。



3. 挡水坝段(模拟水压力)



图 7.13 挡水坝段模型及光纤光栅传感器布置

表 7.5 挡水坝段光纤光栅(FBG)传感器布置位置及波长

挡水坝段	1#FBG	2#FBG	3#FBG	4#FBG
波长	1543	1525	1546	1550



(d) 地震等级 7

(e) 地震等级 9

(f) 地震等级 10

图 7.14 挡水坝段模拟静水压力模型裂纹扩展图



表 7.6 坝段裂缝扩张情况

图 7.15 挡水坝段模拟水压力模型光纤光栅应变传感器应变变化

该挡水坝段模拟了静水压力,但没有模拟碾压层。该模型裂纹扩展情况如图 7.14 所示。 在输入地震第 3 级时,模型上部横缝出现裂缝。由于裂缝位置远离光纤光栅传感器,因此传 感器所测得应变幅值仍继续增加,但增加趋势减缓。在地震第 4 级,应变幅值达到最大值。 在地震第 5 级,上部横缝贯通,光纤光栅传感器所测得应变幅值开始减小,在此之后,随着 地震级数的增加,裂缝的进一步扩张,坝顶和坝腰的应变幅值均呈减小趋势。

# 健康状况评价

由光纤光栅传感器应变响应的观测可知,三个坝段在应变幅值衰减之前,都处于弹性阶段, 随着地震输入加速度的增加,应变幅值的变化趋势是一致上升的,当出现应变幅值明显衰减后, 坝体失去整体性,质量重心位置改变,两个坝体应变幅值总体的变化趋势是衰减的,但是,衰 减的速度和平缓程度是各自不同的。特别是挡水坝段碾压横缝薄弱层的存在,对坝体整体性的 影响在裂缝出现后所表现的应变响应与无碾压横缝的排砂坝段坝体响应是不同的。由此,可以 断定,埋入混凝土内部的光纤光栅传感器可以准确监测到坝段应变响应的不同情况。



小结

本试验采用自行开发的毛细钢管封装的光纤光栅应变传感器监测了碾压仿真混凝土大坝 模型在不同工况下的动力应变反应特性,结果显示:

(1) 该封装结构可以有效地保护 FBG 在混凝土浇注过程中的存活; 分段振捣法可以实现

将封装传感器埋入到指定位置,并保证振捣的顺利进行;但是该方法会引起应变传递损失,需 对测量结果进行修正。先碾压成型,后开孔埋入的传感器埋设技术,可以保证其在碾压混凝土 大坝模型中埋设位置的准确性。

(2) 采用钢管封装结构可以准确测量在小应变范围内(试验梁弹性范围)混凝土的拉应变。坝 段幅值应变曲线开始出现明显衰减的趋势,预示大坝的整体性开始受到破坏,可以对大坝健康 状况进行监测和预警,也可以对大坝在各个震级作用下损伤程度给与客观的评价。