

微型FBG应变传感器在大坝模型实验中的应用*

任亮, 姜涛, 李东升, 范书立, 李宏男

(大连理工大学建设工程学部 大连, 116024)

摘要 为了对大坝的地震安全性能进行准确可行的评价,在大坝模型实验中应用了自行开发的微型光纤光栅(fiber bragg grating,简称FBG)应变传感器。通过分析FBG应变传感器在每级地震作用下产生的残余应变、峰值应变,得到大坝的内部变形和裂缝发展情况,进而对大坝的地震安全性能进行评价。实验结果表明,该传感器能够及时准确地监测大坝模型在地震荷载作用下内部混凝土变形以及开裂情况,对结构的损伤进行识别和预警。通过对比有筋坝段和无筋坝段的变形和开裂情况得知,在模型的薄弱位置布设钢筋可以有效抑制裂缝的产生以及发展,提高大坝的抗震性能。

关键词 大坝; 光纤光栅; 损伤识别; 应变传感器; 抗震; 监测

中图分类号 TV32⁺1; TV32⁺3; TP212.9

引言

在我国,许多水利设施都集中在中西部地区,而这些地区都是高烈度地震的频发地区。一旦大坝不能抵抗地震作用而破坏,就会引发灾难性的后果;因此,对大坝的抗震安全性进行评价至关重要^[1]。尽管通过数学模型对大坝抗震安全性进行评估取得了很大进展^[2-3],但是理论模型分析仍然不能对大坝在临界状态下的地震安全性进行准确可行的评价^[4];因此,动力模型实验目前仍然是分析大坝抗震潜力和抗震薄弱环节的重要手段^[5]。

坝体和坝基的变形是大坝稳定性和潜在破坏的直接反映,变形监测对于及时发现缺陷、掌握大坝的健康状况、评价安全性等具有重要的意义^[2-6]。根据观测对象的性质,结构的变形分为外部变形和内部变形^[7]。对于大坝模型来说,外部变形一般可以通过表面安装式传感器进行检测,如位移计、电阻应变花等^[8]。对于模型内部变形的监测,不仅要求传感器对模型影响小,具有防水、抗干扰等特点,而且要求传感器坚固耐用,使用寿命长。现有的传统传感器难以满足实验要求,大坝模型内部的应变监测一直是大坝模型实验中的难点^[7]。

近年来,FBG传感技术在工程监测领域发展迅速^[9]。FBG作为一种新型的智能传感组件,具有精巧轻柔、稳定性好、耐腐蚀、抗电磁干扰和精度高^[10-11]等优点,十分适用于各种模型实验。对于裸FBG,其直径仅有125 μm,抗剪能力差,在使用中易折断,不适合实际应用^[12];因此,需要对其进行封装。传统的封装形式如基片式^[13]和嵌入式^[14]具有结构简单、封装容易、便于安装的优点,但是这两种方法都会在被测物和封装材料之间产生较大的应变传递损失,在被测物弹性模量较小的情况下,这种应变传递损耗尤为显著,导致FBG应变传感器的灵敏度降低^[14];因此,对于采用低弹性模量材料制作的大坝模型,亟需一种与仿真混凝土结合良好、应变传递损耗低并且能够准确监测其应变变化的传感器。

针对这一需求,笔者提出一种基于夹持式方法封装的FBG应变传感器,该传感器具有与被测结构结合良好、尺寸小、精度高、使用寿命长、应变传递损耗低以及增敏系数可调的优点。通过理论分析和万能试验机的标定试验,研究了该传感器的应变响应特性。将这种微型FBG应变传感器用于阿海水电站碾压混凝土大坝模型实验中,以监测大坝在地震作用下内部变形以及裂缝发展情况,对大坝的抗震安全性能进行评价,并且通过设置配筋和未配筋坝段

* 国家自然科学基金委创新研究群体基金资助项目(51121005);国家自然科学基金资助项目(51108059, 10902073, 50909015);沈阳建筑大学建筑结构工程省级重点实验室开放基金资助项目(JG-200909);国家自然科学基金重大研究计划重点资助项目(90815026)

收稿日期:2011-07-13;修改稿收到日期:2011-10-10

来研究配筋对坝体抗震性能的影响。

$$\Delta\lambda_{\text{FBG}} = \frac{1.2L}{L_f}\epsilon \quad (5)$$

1 微型FBG应变传感器

1.1 微型FBG应变传感器工作原理

传感器主要由FBG、2个夹持部件以及2个固定支点组成,如图1所示。采用胶接的方法将FBG固定于夹持部件内,由于胶黏剂没有直接封装FBG区域,消除了胶黏剂对FBG应变传递的影响。夹持部件为钢管,直径为 d ,两端固定支点的距离为 L ,两端夹持部件之间的距离为 L_f 。假设两固定支点间发生 ΔL 的轴向变形,相应夹持部件和FBG的变形分别为 ΔL_s 和 ΔL_f 。忽略钢管内胶层和光纤的影响,由材料力学基本原理可得

$$\Delta L_s = P L_s / E_s A_s \quad (1)$$

$$\Delta L_f = P L_f / E_f A_f \quad (2)$$

其中: E_s, E_f 分别为钢和光纤的弹性模量; A_s, A_f 分别为钢管和光纤的截面积; P 为传感器结构的内力。

结构内部内力处处相等,由此可得

$$\epsilon_s / \epsilon_f = E_f A_f / E_s A_s \quad (3)$$

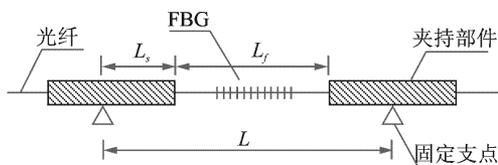


图1 微型FBG应变传感器原理及实物图

传感器的各项参数如表1所示。将表中的参数代入式(3)可得

$$\epsilon_s / \epsilon_f = 0.0084 \quad (4)$$

根据式(4),对两端夹持式FBG应变传感器工作原理的研究可知,在整个传感器的结构中,夹持部件的应变可以忽略,固定支点之间的变形量全部加载在了光纤上。对于中心波长处于1 550 nm波段的FBG,传感器中心波长变化 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 与外界应变 ϵ 的关系为

表1 光纤和中间层的机械性质

材料参数	符号	数值
光纤弹性模量/Pa	E_f	7.2×10^{10}
夹持部件(钢管)弹性模量/Pa	E_s	210×10^9
夹持部件(钢管)直径/mm	d_s	0.8
光纤直径/mm	d_f	0.125

由式(5)可以看出,通过调整 L_f 与 L 的比值,可以改变传感器的应变测量灵敏度。图1为实验中应用的自行开发封装的FBG应变传感器。其中,传感器两端固定支点的距离(即有效测量长度) L 为10 mm,两端夹持部件之间的距离 L_f 为10 mm。

1.2 微型FBG应变传感器标定试验

笔者利用黏结剂将微型FBG应变传感器黏贴在有机玻璃板上,并在相应位置布设裸FBG,然后将有机玻璃板固定在万能试验机上进行连续拉伸。所设计的FBG应变传感器有效测量距离为10 mm,两端夹持部件之间的距离为10 mm,由式(5)可得,理论应变传递率为 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。典型的标定试验结果见图2。标定试验结果表明,FBG应变传感器与裸FBG的变形一致,两者成线性关系,且线性相关度达到0.999。由标定试验得FBG应变传感器的灵敏度系数为 $1.1996 \text{ pm}/\mu\epsilon$,与理论计算结果 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 相近,表明这种基于夹持式原理的FBG应变传感器的封装工艺对FBG的灵敏度及应变传递影响很小,性能良好,适用于弹性模量较小的材料的应变测量。

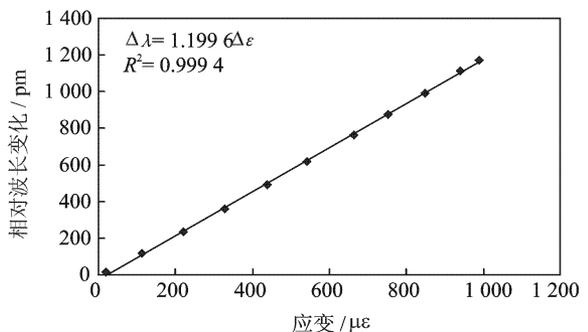


图2 FBG应变传感器标定实验

2 实验设计

2.1 实验背景

阿海水电站坝址位于云南省丽江地区金沙江中

游河段。挡水建筑物为碾压混凝土重力坝,最大坝高为138 m,共分19个坝段。阿海水电站为一等大(I)型工程,位于新构造运动强烈、活动断层繁多且地震活动频繁地区,区域地质构造背景复杂,属于构造稳定性较差的地区。

经国家地震烈度评定委员会审查,阿海水电站场地地震基本烈度定为Ⅷ度。根据《水工建筑物抗震设计规范》DL5073-2000规定,挡水建筑物设防烈度提高一度,按Ⅸ度设防。为了做好碾压混凝土重力坝的抗震设计,除了对坝体进行动力分析计算和抗滑稳定计算等数值分析之外,对大坝进行动力反应和地震模型实验十分必要^[4]。笔者对阿海水电站碾压混凝土重力坝典型坝段进行振动台模型实验,研究其抗震性能,通过实验对坝体抗震安全性能做出评价。

2.2 模型设计及激励系统

实验中将两个坝体同时浇筑在一个坝基之上,坝体之间用泡沫板隔开,使其保持独立。其中一个坝体配有钢筋,另外一个坝体不配钢筋,通过实验分析在地震作用下配筋对大坝变形和开裂的影响。因为在地震作用下水体也会大坝产生一定的作用,所以在大坝的迎水面放置了水槽,水槽内蓄水至实验设计高度,在地震波作用下水也产生振动,很好地模拟了大坝在地震以及动水压力作用下的实际情况。

模型实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)和0.7g(竖直),工作频率为0~50 Hz。实验采用人工波激励,根据规范反应谱分别生成水平向(顺河向)和竖直向地震波,地震波作用时间在50 s左右。实验中按地震加速度从低至高逐级载入,实现坝体从结构弹性微震、弹塑性强震直到断裂破坏的各个不同阶段的全过程动力

模拟。

实验使用仿真混凝土制作大坝模型,采用水泥、重晶砂、矿石粉等材料配合并严格控制含水量和浇筑施工工艺,制成一种低强度的混凝土仿真材料。该模型材料具有较好的线弹性和破坏断裂脆性,同时由于仿真材料强度较低,可以方便地进行从结构弹性微震、弹塑性强震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,能全面的反映大坝在地震中的动力特性及断裂破坏过程^[15]。

2.3 传感器布置

为了监测大坝在地震作用下的内部变形及裂缝发展的情况,在坝体的关键部位埋入微型FBG应变传感器。这些传感器的埋入位置如图3所示,传感器的波长如表2所示。其中一个坝体内部布设钢筋,在钢筋层的内外两侧相应位置也布设了微型FBG应变传感器,用于监测钢筋对坝体变形情况的影响。由于传感器埋设在坝体内部,所以要在模型浇筑之前就把传感器固定住。实验中先将细线通过模板固定,再把传感器黏在细线上,这样浇筑混凝土就不会改变传感器的位置。浇筑完成后在剪去细线两端,使之处于无应力状态,待混凝土养护完成后拆模进行实验。

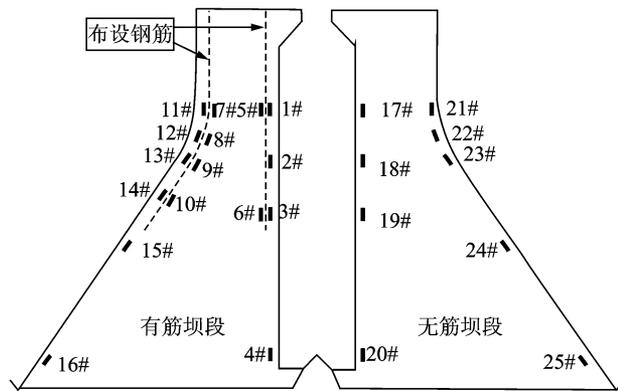


图3 坝体内FBG传感器布置图

表2 微型FBG传感器的中心波长及其对应的编号

钢筋	编号	1#	2#	3#	4#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	
有筋坝段	外侧	波长/nm	1 519.3	1 559.8	1 544.3	1 569.6	1 529.3	1 555	1 574.6	1 574.2	1 554.7	1 534.7
	钢筋	编号	5#	6#	7#	8#	9#	10#				
	内侧	波长/nm	1 560.1	1 579.7	1 519.4	1 539.9	1 559.9	1 564.2				
无筋坝段	编号	17#	18#	19#	20#	21#	22#	23#	24#	25#		
	波长/nm	1 564.5	1 564.5	1 529.4	1 539.4	1 514.4	1 534.5	1 549.5	1 569.2	1 549.5		

2.4 采集系统

FBG 中心波长的测量采用美国 Micron Optics 公司的四通道解调系统 SM-130, 该设备集成了扫描激光光源和可调光纤滤波器解调模块, 仪器的扫描频率为 500 Hz, 波长分辨率为 1 pm。工作波长范围为 1 470~1 630 nm。

3 实验结果分析

3.1 现场观测结果

实验中采用人工波进行激励, 地震等级按基底加速度的增加依次增大, 两个坝段的开裂情况如图 4 所示。

表 3 为坝体模型现场观测记录。观测结果表明, 两个坝段的上、下游弧形弯折处和上游直坡面处为坝体的薄弱位置。

实验结束后, 检测发现所使用的 FBG 传感器均完好无损。这些传感器又在以后的多个大坝模型实验中重复使用, 表明这种 FBG 应变传感器坚固耐用, 可靠性高, 使用寿命长。

表 3 坝体现场观测记录

地震等级	破坏描述	基底最大加速度/g
1~7	无明显裂缝	0.068 8~0.688
8	有筋坝段和无筋坝段的下游弯折处同时出现裂缝, 但有筋坝段的裂缝比无筋坝段向上游扩展的小	0.791 2
9	无筋坝段上游直坡面坝头处出现裂缝, 同时第 8 级地震出现的裂缝继续扩展; 有筋坝段第 8 级地震出现的裂缝继续向上游扩展, 上游直坡面并无裂缝出现	0.894 4
10	无筋坝段的下游坝头处出现新的裂缝, 同时前两个工况上、下游出现的裂缝贯穿; 有筋坝段下游坝中出现了微小裂缝, 上游坡面出现裂缝, 下游的裂缝向两个方向扩展, 坝头处裂缝扩展基本贯穿	0.997 6

3.2 数值分析与实验结果对比

图 5 的数值分析结果显示, 地震波作用主要使坝体上、下游表面产生较大的动力响应, 下游弧形弯折处 (21# 传感器位置) 是拉应力较大的部位, 同时坝踵处 (20# 传感器位置) 有拉应力集中现象。从无筋坝段第 4 级地震作用下各个传感器测得的峰值应变可以看出, 在相同的地震作用下, 20# 传感器的峰值应变明显高于其他部位, 证明坝踵处出现了应力集中现象, 这与理论分析结果相吻合。

图 6 显示 17#、18#、19# 传感器应力水平较低, 20# 传感器应力水平较高。与理论值对比可以发现, 通过传感器测得的应力分布情况与理论分析结果非常吻合, 在实验中也并没有观测到 17#、18#、19# 传感器位置有裂缝产生。

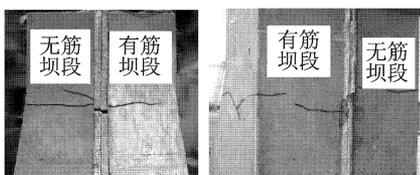
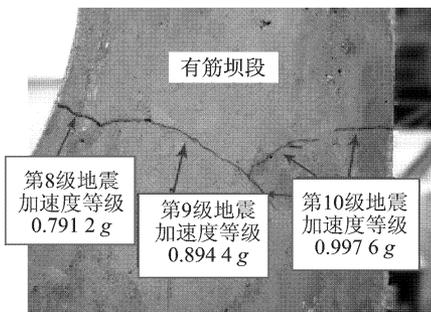
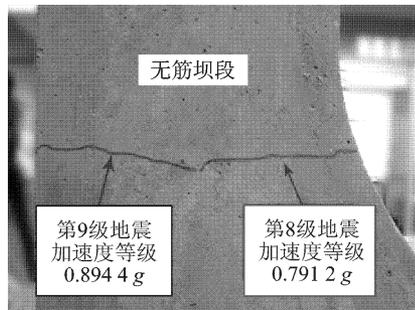


图 4 有筋坝段和无筋坝段的破坏情况

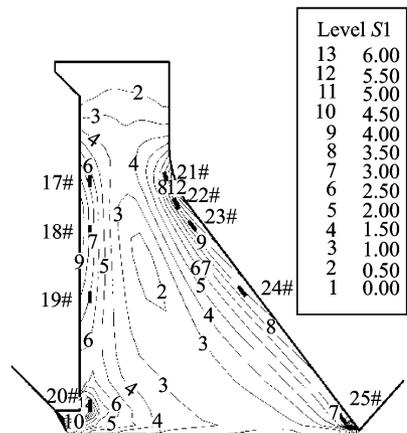


图 5 无筋坝段原型数值分析最大第 1 主应力分布图 (单位: MPa)

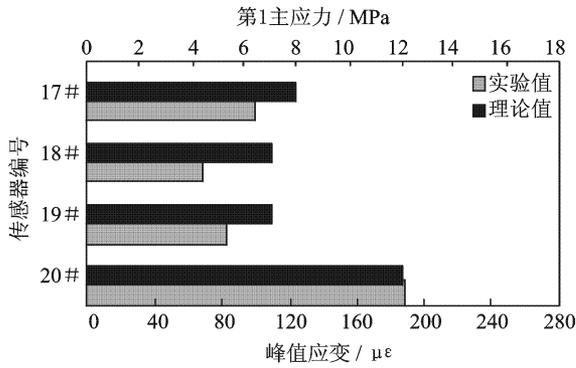


图6 4级地震下FBG传感器的峰值应变与理论结果对比

3.3 模型损伤识别

3.3.1 通过残余应变进行模型损伤识别

FBG传感器埋在混凝土中,它的变形和混凝土的变形是一致的。假定一次地震之前传感器的初始应变为零,之后每次地震结束后传感器的应变与初始应变的差为残余应变。由图7,8可以看出,当结构处于弹性工作状态时,传感器的残余应变基本保持不变。无筋坝段在6级地震以后21#,22#传感器的残余应变开始增长,说明传感器产生了不可恢复

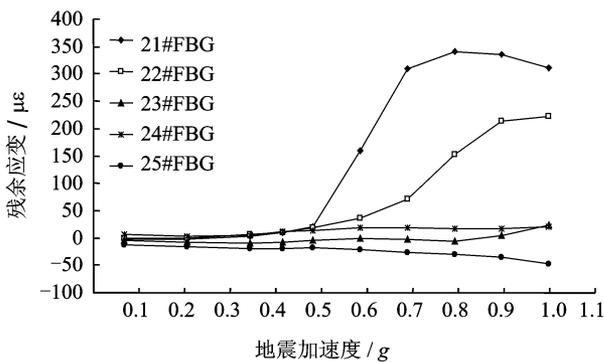


图7 无筋坝段传感器在不同震级下的残余应变图

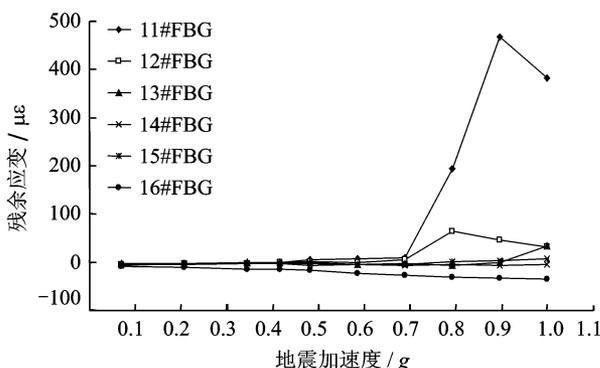


图8 有筋坝段传感器在不同震级下的残余应变图

的变形,此时传感器所在位置混凝土已经产生裂缝。随着震级的增加,坝体的裂缝也不断发展,传感器残余应变随之增长。10级地震作用后有筋坝段11#传感器残余应变急剧下降,说明此时11#传感器位置的混凝土已经出现贯穿裂缝,结构应力重新分布,导致混凝土残余应变突然减小。如果在工程中使用FBG应变传感器对结构进行健康监测,可以根据残余应变的大小以及变化趋势,结合工程实际情况,判断结构是否满足安全性、适用性、耐久性的要求。

3.3.2 模型损伤预警

由以上分析可知,有筋坝段在8级地震作用下产生裂缝,且主要在11#传感器所埋设的部位。图9,10为11#FBG应变传感器在地震作用下中心波长的时程曲线,可以看出,在7级地震作用下传感器中心波长保持不变,结构没有破坏。由8级地震作用下的时程图可以看出,7.5s和15s时11#传感器中心波长有2次很大的突变,说明在这两个时刻,传感器所在位置有裂缝产生。地震结束后,传感器中心波长也没有恢复到震前的初始状态,说明传感器所处位置发生了不可回复的变形,即残余应变(218 $\mu\epsilon$),此时11#传感器所在位置已经出现裂缝,坝体失去了整体性。通过传感器中心波长的时程图可以直观实时地判断结构发生破坏的时间及破坏程度。

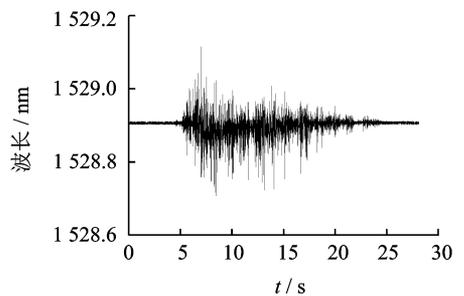


图9 7级地震作用下11#传感器中心波长变化图

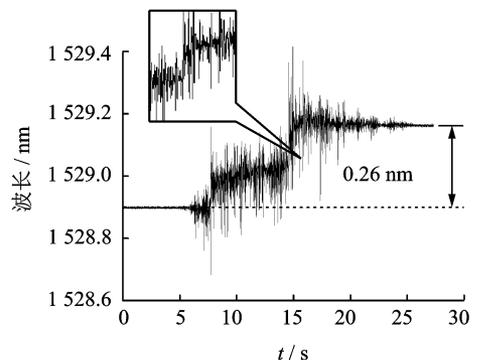


图10 8级地震作用下11#传感器中心波长变化图

3.3.3 坝体薄弱位置的判断

由图7和图8可以看出,无筋坝段21#,22#传感器和有筋坝段11#,12#传感器的残余应变突变很大,而它们都埋设在坝体的下游弧形弯折处。因为在相同的地震作用下只有这个位置产生很大的残余应变,由此可以判断弧形弯折处是大坝的薄弱位置。除了弧形弯折处以外,其他位置传感器的残余应变没有太大变化,说明这些位置的混凝土始终处于弹性工作状态,这与实验观测结果吻合。

以上分析说明,通过FBG应变传感器可以准确地监测结构内部裂缝何时产生以及分析结构的薄弱位置。根据现场观测显示,两个坝段均在第9级地震作用后才能观测到坝体表面出现裂纹。通过传感器的残余应变可以看出,早在第6级和第8级地震作用下,坝体内部就存在不可恢复的变形,比人工观测提前了2~4级。因此,通过埋入微型FBG应变传感器可以更早地监测到结构内部的损伤,对结构的破坏进行预警。

3.4 坝体中布设钢筋的作用

3.4.1 钢筋对裂缝产生及扩展的抑制作用

坝体的弧形弯折处是大坝的薄弱位置,通过图11中11#和21#传感器的残余应变可见,无筋坝段6级地震时开裂,而有筋坝段在8级地震时才开裂,比无筋坝段延迟了两级。当出现贯穿裂缝时,有筋坝段的残余应变达到 $470\ \mu\epsilon$,而无筋坝段只有 $350\ \mu\epsilon$,说明在大坝的薄弱位置布设钢筋可以有效抑制裂缝产生,并且使结构能承受更大的地震作用。

7#,11#传感器分别埋在有筋坝段弧形弯折处钢筋网片的内侧和外侧。由图12,13可以看出,在7级地震作用时7#和11#传感器残余应变均为零,说

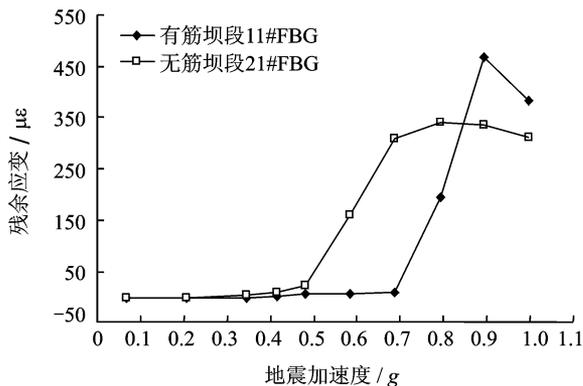


图11 无筋坝段下游弧形弯折处传感器残余应变图

明钢筋内、外侧混凝土均处于弹性阶段。8级地震作用下11#传感器残余应变出现很大增长,说明钢筋

外侧混凝土发生破坏,而钢筋内侧的混凝土在地震后并没有发生破坏,可见配筋阻止了裂缝向坝体内部开展,增强了大坝的抗震性能。

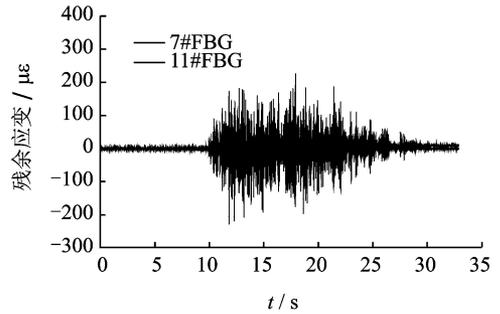


图12 7级地震作用下7#和11#传感器残余应变图

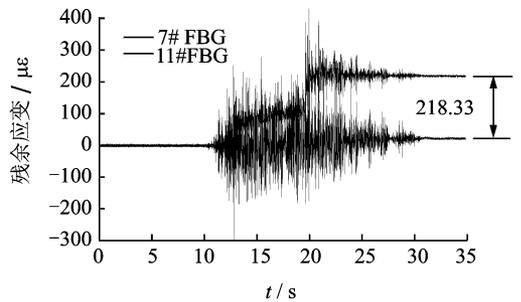


图13 8级地震作用下7#和11#传感器残余应变图

3.4.2 钢筋对应力分布的影响

7#和11#传感器分别埋在有筋坝段弧形弯折处钢筋网片的内侧和外侧。由图14可以看出,在最初的几级地震作用下它们的峰值应变相差不大,随着震级的增加,位于钢筋内侧的7#传感器峰值应变增长缓慢,而11#传感器峰值应变却急剧增长。由此

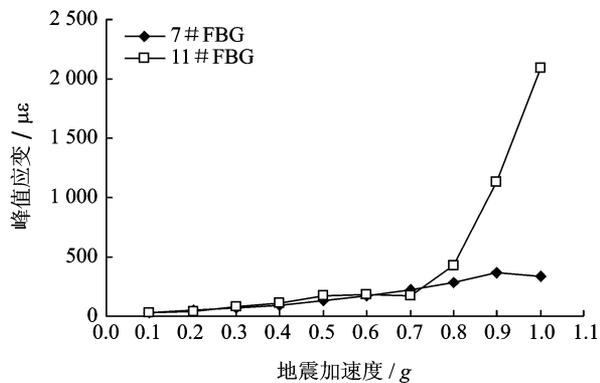


图14 7#和11#FBG应变传感器峰值应变图

可见,配筋改变了大坝在地震作用下应力分布情况,钢筋内侧应力比外侧的应力小,说明在地震荷载作用下,钢筋承担了很大一部分拉应力,使内部的混凝土所受的拉应力减小,配筋有效地提高了坝体内部的抗震性能。

4 结 论

1) 实验中使用的微型FBG传感器能够很好地与混凝土结合,所测得的模型各个部位的峰值应变与理论分析结果吻合。

2) 通过分析微型FBG应变传感器的残余应变可以及时准确地获得大坝模型内部损伤情况,对大坝地震安全性进行评价。

3) 在大坝的薄弱位置配筋可以有效限制裂缝的产生和向结构内部扩展,使结构可以承受更大的地震作用。

4) 在地震作用下,钢筋承受很大一部分拉应力,使内部混凝土所受的拉应力减小,增加了坝体内部的抗震性能。

参 考 文 献

- [1] Donlon N W P, Hall J F. Shaking table study of concrete gravity dam monoliths[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 769-786.
- [2] Fenves G L, Mojtahedi S, Reimer RB. Effect of contraction joints on earthquake response of arch dam [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(4): 1039-1055.
- [3] Bruhwiler E, Wittmann F H. Failure of dam concrete subjected to seismic loading conditions [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(1-3): 565-571.
- [4] Zhou Jing, Lin Gao, Zhu Tong, et al. Experimental investigations into seismic failure of high arch dams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(8): 926-935.
- [5] 林皋,周晶,胡志强.丰满大坝抗震安全性评价[J]. *大坝与安全*, 1999(3): 31-35.
Lin Gao, Zhou Jing, Hu Zhiqiang. Seismic safety evaluation of fengman dam[J]. *Large Dam and Safety*, 1999(3): 31-35. (in Chinese)
- [6] Tinawi R, Leger P, Leclerc M, et al. Seismic safety of gravity dams: from shake table experiments to numerical analyses[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(4): 518-529.
- [7] 朱鸿鹄,殷建华,张林,等.大坝模型试验的光纤传感变形监测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(6): 1188-1194.
Zhu Honghu, Yin Jianhua, Zhang Lin, et al. Deformation monitoring of dam model test by optical fiber sensors[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(6): 1188-1194. (in Chinese)

- [8] 董建华,谢和平,张林,等.大岗山双曲拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(10): 2027-2033.
Dong Jianhua, Xie Heping, Zhang Lin, et al. Experimental study of 3D geomechanical model on global stability of dagangshan double curvature arch dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(10): 2027-2033. (in Chinese)
- [9] 李宏男,任亮,李东升,等.结构健康监测[M].大连:大连理工大学出版社,2005:30-51.
- [10] 孙丽,梁德志,李宏男.用FBG传感器监测框架-剪刀墙结构裂缝[J]. *振动、测试与诊断*, 2010(5): 496-499.
Sun Li, Liang Dezhi, Li Hongnan. Monitoring of cracks in frame-shear wall structure using fiber bragg grating sensors[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010(5): 496-499. (in Chinese)
- [11] Li Hongnan, Li Dongsheng, Song Gangbing. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(11): 1647-1657.
- [12] Li Hongnan, Li Dongsheng. Study and application of health monitoring by fiber optic sensors in civil engineering [J]. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division*, 2003, 468: 217-224.
- [13] Betz D C, Thursby G, Culshaw B. Advanced layout of a fiber Bragg grating strain gauge rosette [J]. *Light-wave Technology*, 2006, 24: 1019-1026.
- [14] Ren Liang, Li Hongnan, Zhou Jing, et al. Application of tube-packaged FBG strain sensor in vibration experiment of submarine pipeline line model [J]. *China Ocean Engineering*, 2006, 20(1): 155-164.
- [15] 范书立,陈健云,周晶,等.龙开口水电站溢流坝段动力模型破坏试验研究[J]. *水利学报*, 2007(S1): 195-199.
Fan Shuli, Chen Jianyun, Zhou Jing, et al. Experimental research on overfall section dynamic rupture of longkaikou project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007(S1): 195-199. (in Chinese)



第一作者简介:任亮,男,1979年7月生,博士、副教授。主要研究方向为结构健康监测、光纤光栅传感器的研制与应用以及健康监测系统的开发。曾发表《结构健康监测-光纤光栅传感技术》(北京:中国建筑工业出版社,2008年)等论著。
E-mail: renliang@dltu.edu.cn