

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.012

结构缝对高碾压混凝土拱坝抗震性能的影响分析

魏国利,冯新,张宇,周晶

(大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 研究横缝和诱导缝的共同作用对高碾压混凝土(RCC)拱坝抗震性能的影响具有一定价值。首先,采用混凝土损伤塑性模型模拟坝体材料,用黏性(Cohesive)单元模拟结构缝,分析计算了同时设置横缝和诱导缝的试验模型,并将计算结果和试验结果进行比较,发现数值计算结果与试验结果十分相近,说明所采用的模拟方法具有一定的合理性。并将此模拟方法应用到沙牌拱坝原型上,通过动力加载分析,得到横缝和诱导缝的先后张开释放了坝体拱向应力,对提高坝体抗震性能有一定的积极影响。

关键词: RCC拱坝;横缝;诱导缝;cohesive单元

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0065-07

Analysis of the Impact of Structural Joints on Seismic Performance of High Roller Compacted Concrete Arch Dam

WEI Guoli, FENG Xin, ZHANG Yu, ZHOU Jing

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: There are many world-class high dams in the southwest of China where earthquakes occur frequently. So the seismic safety issues of high dams can not be ignored. At present, for the majority of high roller compacted concrete (RCC) arch dam dynamic analysis only involves the transverse joints. There are few studies taking both transverse joints and induced joints into account. So it is meaningful to study the impact of transverse joints and induced joints on seismic performance of high RCC arch dams. Dam material simulated with concrete damage plasticity model, and structural joints simulated with cohesive element. And calculated the model which set transverse joints and induced joints. Then compared the calculation results with the model experiment results, and found out that the two results were very similar. This result shows that the methods used in the numerical model has certain rationality. Then apply the simulation method to the Shapai Arch Dam. Through dynamic analysis it can be found that the opening of transverse joints and induced joints released the arch direction stress of the dam, and had a positive impact on seismic performance of the dam.

Keywords: RCC arch dam; transverse joints; induced joints; cohesive element

西南山区是我国地震高发区,而此地区亦是我国水能储藏量最丰富的地区,建设有大量的水电站,其中不乏有世界级的高坝,如小湾拱坝 292 m、溪洛渡拱坝 278 m、锦屏一级拱坝 305 m。大坝建设的越高,其抗震安全性就越不容忽视^[1]。在大坝建设时,为防止坝体不均匀沉降和热胀冷缩等问题对坝体造成不利影响,常常设置横缝。在碾压混凝土坝施工

时,由于其具有快速施工的特点,所以坝体内常常存在较大的温度应力,为防止温降造成坝体不规则开裂,时常在坝体中设置诱导缝。在坝体中设置横缝和诱导缝,虽然解决了影响坝体安全的一系列问题,但同时也削弱了坝体的整体性,对于坝体抗震安全性将会产生怎样影响,一直以来都是大坝抗震研究人员所要研究的内容。

收稿日期:2016-02-10

修稿日期:2016-03-09

基金项目:973计划课题(2013CB035906);国家自然科学基金重大研究计划集成项目课题(91215301)

作者简介:魏国利(1988—),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为大坝动力试验与数值模拟。E-mail: weiguolidlut@163.com

通讯作者:冯新(1971—),男,河南商丘人,教授,博士生导师,主要从事结构健康监测与安全评价、结构抗震理论及实验技术研究。

E-mail: fengxin@dlut.edu.cn

目前,对于横缝对坝体抗震安全的影响,无论是在数值分析还是在模型试验方面,前人都已经做了较多研究。在数值分析方面,对于横缝的模拟主要有三种类型:(1)用单元来模拟横缝。如使用一种无厚度的六面体八节点接触单元来模拟横缝的开合特性^[2],又或采用转角弹簧单元和平移弹簧单元来模拟横缝^[3]。(2)裂缝涂抹模型。该模型由 Kuo^[4]提出,优点是可以较为精确的模拟结构的整体行为,但同时也引入了接缝面没有滑动的假定。(3)动接触力模型。此模型是通过直接在裂缝界面引入接触条件来模拟缝的接触问题的^[5]。在考虑横缝影响的动力模型试验方面,研究人员也做了很多工作。比如使用橡胶材料制作坝体模型进行振动台试验来研究横缝对拱坝动力响应的影响^[6]。通过诸多高拱坝模型的振动试验来研究地震作用下横缝对拱坝破坏性态的影响^[7]。前人研究结果表明,拱坝在地震作用下,由于横缝的张开、闭合会调整和释放坝体的拱向内力,并使内力向梁向传递,从而避免拱向出现过大的应力,在一定程度上提高坝体的抗震性能。

前人对诱导缝也做过较多研究,但多集中在诱导缝等效强度方面。如曾昭扬等^[8]将实际诱导缝简化为无限大板穿透裂缝模型,计算混凝土失稳时的应力,并将之作为诱导缝的等效强度;宋玉普等^[9-11]进行了一系列含诱导缝试件的断裂试验,研究诱导缝的等效强度;陈媛等^[12]进行沙牌 RCC 拱坝模型试验,探讨了含诱导缝坝体的开裂破坏机理,并根据断裂力学理论推导出诱导缝的开裂相似条件。

综合分析前人研究结果可以看出,考虑横缝对坝体影响的动力试验和数值分析中,很少有考虑到诱导缝的情况。同时,考虑诱导缝影响的研究中又很少涉及到动力问题。所以,研究诱导缝和横缝共同作用对 RCC 拱坝抗震性能的影响具有一定的实际意义。作者在前期已进行了一系列的拱坝动力模型试验,试验中同时考虑了横缝和诱导缝的影响,试验成果^[13]为本文数值模型计算结果的验证提供了科学依据。本文首先针对试验模型建立了沙牌高拱坝的三维非线性有限元模型,根据试验数据对有限元模型进行了验证,然后将此模型推广到原型大坝上,分析了结构缝对沙牌高拱坝抗震性能的影响。

1 模型大坝的数值模拟

本文以动力模型试验中的物理模型为依据,建立相对应的三维有限元模型。该模型以沙牌高 RCC

拱坝为原型,在大连理工大学的水下地震模拟系统上进行试验。模型高 1 176 mm,坝顶轴线长度 2 215 mm,坝顶厚度 85 mm,坝底最大厚度 257 mm,坝体基岩沿上下游有 1 倍坝底厚度的延伸,模型下部通过一块 120 mm 厚的混凝土垫板与振动台固定连接。整个模型采用六面体八节点单元进行网格剖分,有限元模型如图 1 所示。

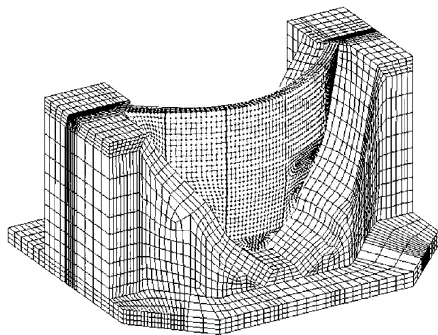


图 1 三维有限元模型

1.1 坝体模型材料参数及本构关系的选取

由于试验模型与实际原型之间的几何比尺较大,因此模型的材料参数应满足一定的比例关系才能较为可靠的反映原型的真实结果。为此,大连理工大学的朱彤、林皋等^[14]研制了一种仿真混凝土材料,该材料具有低弹模、低强度、高密度等特点,使得模型的基频可以控制在振动台的工作频率范围之内,能够进行共振试验,同时较好的满足与真实混凝土材料本构关系的相似性。在进行模型试验之前,已进行一系列仿真混凝土材料试验,得到了该材料的具体参数^[15]。

本文选用混凝土损伤塑性本构模型,该模型是由 Lubliner^[16]提出的,后又经过了 Lee^[17]的改进。该模型同时考虑了混凝土材料的塑性与损伤特性,能够较为真实的反映混凝土的力学特性。王佩珏等^[18]采用此模型对高拱坝强震作用下的损伤破坏情况进行了分析,验证了此模型的合理性。之后结合由材料试验和规范得到的相关材料参数及应力应变关系曲线确定数值计算所需参数,进而进行数值分析。

1.2 结构缝的模拟

本文对于结构缝的模拟采用 Cohesive 单元, Cohesive 单元对于复合材料的粘结界面、两结构之间的交界面、不同构件之间的衬垫等部位的模拟是十分有效的,可以做到模拟结构沿一个界面撕裂的情况。同时,相比于弹簧单元,采用 Cohesive 单元来模拟结构缝具有更好的模拟效果,因为 Cohesive 单元

可以模拟损伤过程,并且在损伤程度达到控制值时可以进行单元删除,更为真实的模拟结构缝的开裂破坏过程。本文在模拟结构缝时采用 3 维 8 节点 Cohesive 单元。

Cohesive 单元类似于平面单元,虽然其 6 个应力分量都存在,但应变方面仅考虑其沿厚度方向的正应变和两个垂直厚度方向的剪应变。因此,在建模时需要指定其厚度方向。垂直于厚度方向的两个面之间的相对运动,代表了交界面的张开、闭合与剪切等行为,如图 2 所示。

在本文中, Cohesive 单元的本构关系采用基于牵引-分离准则的本构响应,此响应适用于界面厚度相对于结构来说十分小,可以忽略的情况。该准则假定在损伤出现之前的响应是线弹性的。对于 Cohesive 单元的应力应变关系,本文采用如图 3 所示的双线性模型。

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \\ \epsilon_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\epsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \epsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}, \epsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0} \quad (2)$$

式中: $t_{n(s,t)}$ 代表牵引应力, $\delta_{n(s,t)}$ 代表 Cohesive 单元上下底面分离量, T_0 代表单元厚度。

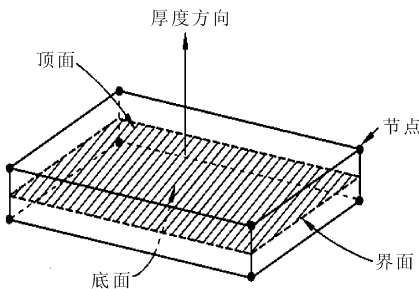


图 2 三维 Cohesive 单元的空间结构

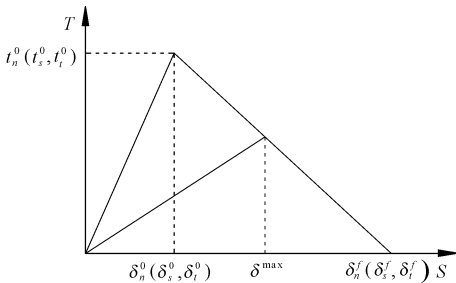


图 3 牵引分离准则对应的双线性关系曲线

Cohesive 单元的损伤准则采用最大应力准则,即当垂直于单元厚度方向的应力值达到控制值时,单元进入损伤阶段。损伤发展如公式(3)所示。

$$t = \begin{cases} (1 - D)\bar{t}, & \bar{t} \geq 0 \\ \bar{t}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 代表损伤因子,取值从 0 到 1,0 代表没有损伤,1 代表完全损伤;损伤因子 D 的取值由公式(4)决定。

$$D = \frac{\delta^f(\delta^{\max} - \delta^0)}{\delta^{\max}(\delta^f - \delta^0)} \quad (4)$$

1.3 地震动输入方式

在模型试验中采用的是弹性重力相似关系,于是可根据此相似关系得到缩尺后的规范谱人工波用于试验中加载,但缩尺后的人工波的卓越频率超出了振动台的工作频率。针对此问题,模型试验中所使用的解决方法是采用与试验模型基频相对应的谐波来代替人工波,此法更容易激发共振,了解坝体损伤发展过程,同时降低了随机波给试验带来的不确定性,增加了试验的可重复性。文献[19]也验证了此方法的合理性。本文在数值计算时的地震动输入方式采用与模型试验一致的谐波加载方式。

2 结构缝作用下的模拟分析

模型试验中对于横缝的模拟考虑了键槽的作用^[13],因此数值分析时模拟横缝的 Cohesive 单元应具有一定的强度,对于诱导缝的模拟进行了简化处理,将诱导缝和诱导缝间距取为相同长度,均为 85 mm。通过一系列的试算得出,当横缝 Cohesive 单元的峰值强度取为坝体材料的 0.2 倍,诱导缝 Cohesive 单元的峰值强度取为坝体材料强度的 0.6 倍时,分析计算结果与试验结果吻合良好。

模型试验所采集部分位置加速度值列于表 1,数值计算中相应部位的加速度值也列于其中,可以看出,数值计算较好的还原了模型试验加载过程中的坝体响应,可以认定,此数值计算可以真实的模拟模型试验。

图 4 给出了计算工况加载后坝体上游面拉伸损伤的分布情况并与模型试验相应工况的结果进行对比。其中,0.1g 加载后,坝体并未出现损伤,仅两侧横缝位置出现了损伤,并且右侧横缝的损伤程度比左侧的要大一些。模型试验 0.1g 加载后,两侧横缝开裂程度与数值分析结果十分接近。0.2g 加载后,两侧横缝都已经完全损伤,两侧诱导缝也开始出现损伤,且右侧诱导缝的损伤程度比左侧的要大,从发展过程看,右侧诱导缝处的损伤也先于左侧出现。模型试验相应工况下的结果比数值计算的结果看起来偏小一些,是因为模型试验给出的结果是宏观裂

表 1 数值模拟与试验实测加速度值

单位: m/s^2

工况	左岸山体顶部加速度		右岸山体顶部加速度		拱冠梁顶部加速度		拱冠梁底部加速度	
	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值
0.1g	1.21	1.22	1.21	1.12	3.30	3.62	0.84	0.87
0.2g	2.99	2.97	3.00	2.91	5.77	5.14	1.87	1.98
0.3g	3.86	3.83	3.86	3.81	8.74	8.35	2.90	2.97
0.4g	4.51	4.43	4.50	4.46	10.38	10.03	3.97	3.91

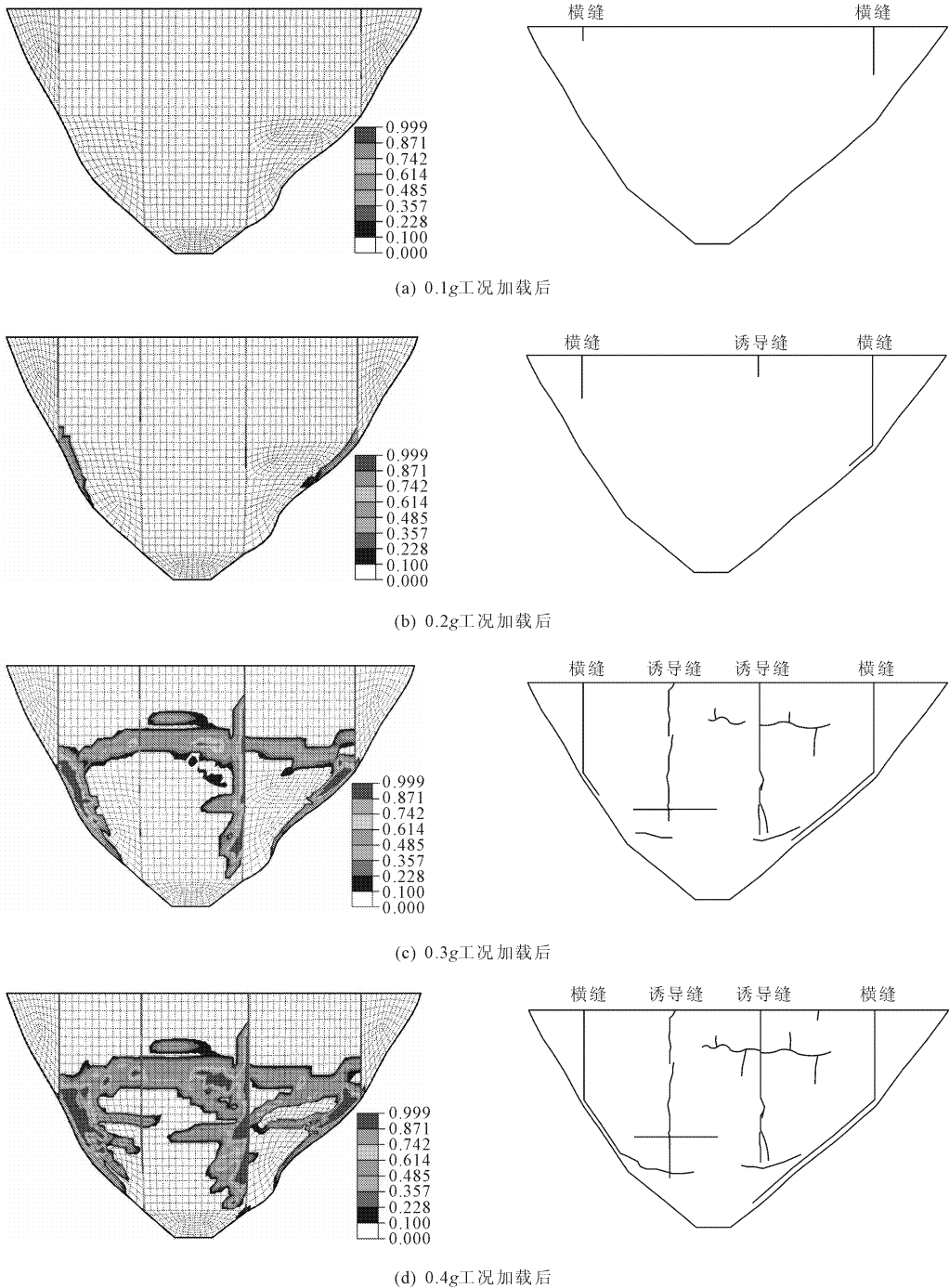


图 4 各工况加载后坝体上游面拉伸损伤分布计算与试验结果比较图

缝的发展过程,而数值计算给出的结果是损伤的发展过程,只有在损伤值比较大时,才可能产生宏观裂缝,所以 $0.2g$ 工况的数值计算结果也是合理可靠的。无论是横缝还是诱导缝,都是右侧的部分先出现破坏,这是由于坝体的不对称性导致的。 $0.3g$ 加载后,损伤除了沿着横缝下部继续向下发展外,在坝体中部偏上位置也出现了较大范围的损伤,且损伤是沿着横向发展的。这是由于横缝和诱导缝开裂后,坝体拱向应力得到很大程度的释放,拱向的作用被削弱,梁向的作用增强。相对应 $0.3g$ 加载后模型试验的结果也是在坝体中部偏上位置出现了横向宏观裂缝。 $0.4g$ 加载后,损伤范围在原有区域上进一步扩大,两侧横缝下部的损伤区域横向发展较明显,但并没有新的损伤区域出现。相应模型试验得出了相似的结果。

由以上数值计算结果与模型试验结果的对比情况可知,计算结果与试验结果基本吻合,说明本文所采用的数值模型是比较合理的,包括材料本构、用 Cohesive 单元来模拟结构缝等。所以可以将此模拟方法做进一步推广,用于计算模型试验无法实现的

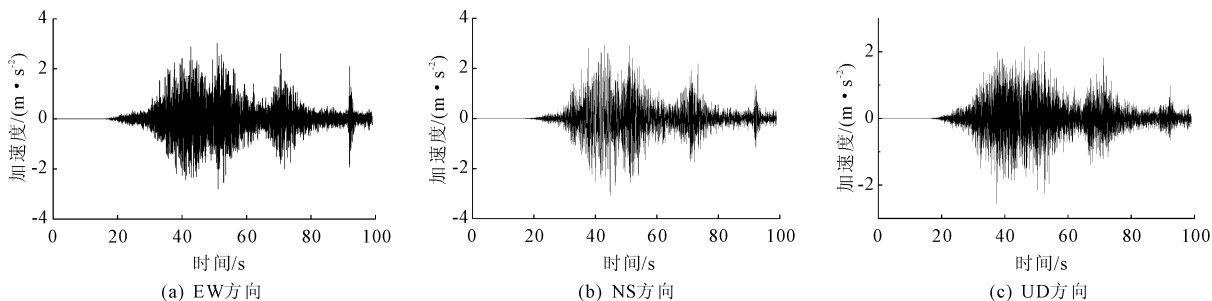


图5 茂县实测加速度时程

计算结果如图6所示,结果显示坝体在整个加载过程中一直未出现损伤,损伤仅出现在横缝所在位置。在加载的第16.6s时,坝体右侧横缝首先出现了损伤,这与汶川地震后沙牌拱坝仅右侧横缝顶部有轻微张开的检测结果一致。随着加载的持续,坝体左侧的横缝也出现了损伤,此结果比汶川地震后的实际检测结果偏大,是由于本文中采用实测波的峰值地面加速度较大,张翠然等^[20]研究表明,汶川地震中沙牌坝址处极端地震动的峰值加速度仅为 2.62 m/s^2 。由此可说明本文对于原型坝的模拟结果同样是合理的。

在茂县实测波加载过程中,坝体诱导缝位置始终没有出现损伤,为研究动力荷载作用下诱导缝的

工况和原型坝的数值分析。

3 原型坝的扩展分析

沙牌拱坝位于四川省汶川县境内,是岷江支流草坡河上的龙头电站,是一座 RCC 拱坝,坝高 132 m。沙牌拱坝分别于 2008 年和 2013 年经历了 8.0 级汶川大地震和 7.0 级芦山地震,其中汶川地震遭遇烈度高达 IX 度。本文建立沙牌拱坝原型的数值模型,同时考虑横缝和诱导缝的共同作用,研究原型大坝在地震作用下的动力响应,以便得到诱导缝对于大坝抗震性能的影响。此处结构缝的峰值强度沿用试验模型的控制强度,横缝取为坝体材料强度的 0.2 倍,诱导缝取为坝体材料强度的 0.6 倍。

3.1 原型坝验算

由于缺乏沙牌坝址处的地震波记录,本文采用其附近茂县地办测站所采到的实测地震波数据进行加载,其加速度时程如图5所示。此实测波水平方向的峰值加速度为 3.07 m/s^2 ,数值计算中以最不利的方式将其施加在模型上。本文为节约计算时间,只截取加速度时程 30 s ~ 65 s 的地震动剧烈部分进行计算。

性态,仍需增大施加的地震动荷载。

3.2 诱导缝影响分析

为更好的了解诱导缝对于坝体抗震性能的影响,本文中采用水平方向峰值加速度为 $0.5g$ 的规范谱人工波进行加载,竖直方向的峰值加速度取为水平方向的 $2/3$,加载时长为 15 s。同时,为方便进行对比分析,对没有设置诱导缝的坝体也进行了同样的加载分析。计算结果如下所示,其中工况一代表仅设置横缝的情况,工况二代表同时设置横缝和诱导缝的情况。

由图7顶拱拱冠位置的应力时程对比结果可以看出,在加载 7.4 s 之前,两工况拱向和梁向的应力时程基本重合,在此时刻之后,两工况的应力时程开

始出现差别。原因是在加载的第 7.4 s, 工况二坝体右侧的诱导缝开始出现损伤。在诱导缝出现损伤后, 工况二的拱向应力相对于工况一有明显减小趋势, 且应力幅值也有所减小。与之相反, 工况二梁向

应力的振动幅度却比工况一增加许多。说明随着诱导缝的损伤开裂, 坝体的拱向应力得到了释放, 但同时由于拱向作用的减弱, 坝体梁向的作用增强, 梁向应力开始增大。

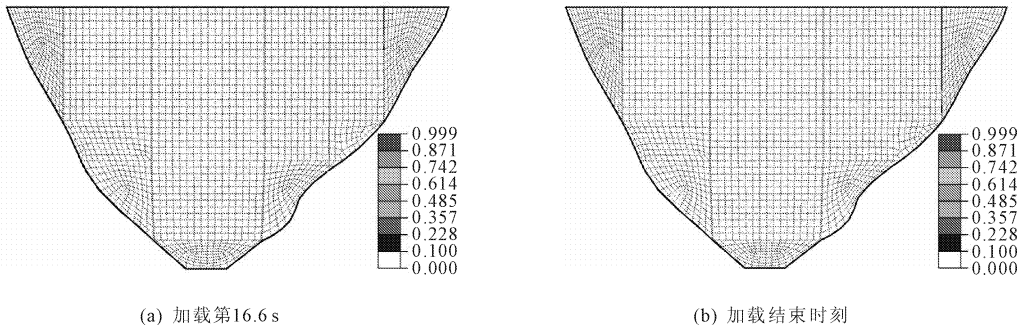


图 6 实测波作用下原型坝损伤分布图

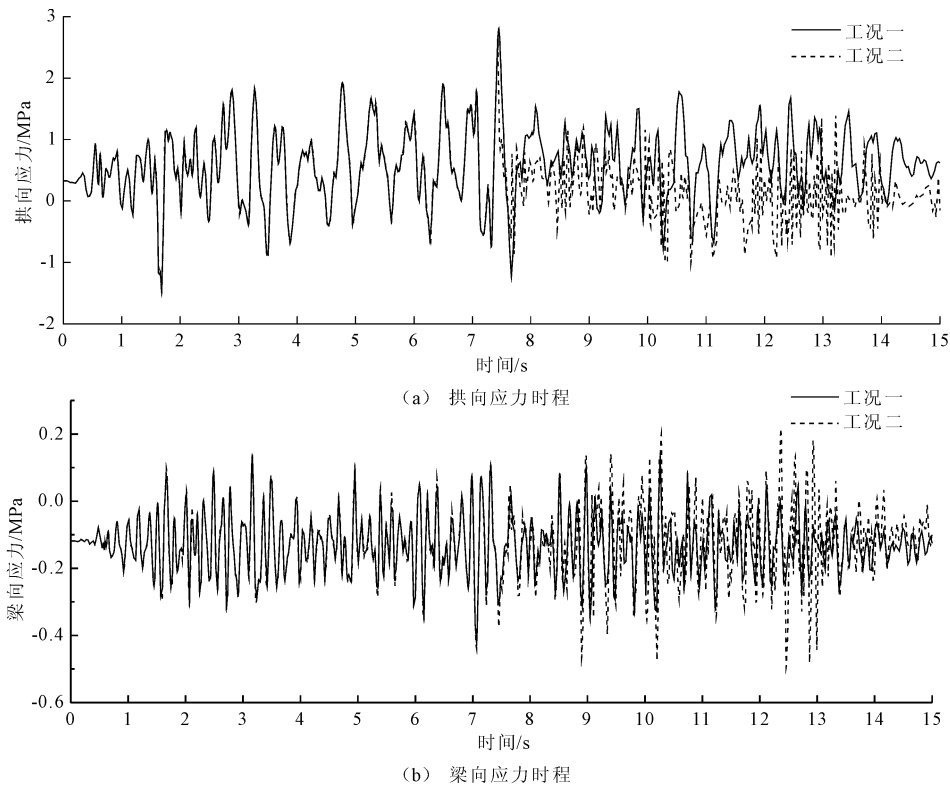


图 7 顶拱拱冠位置应力时程

图 8 为加载结束后坝体的损伤分布情况, 由图 8 可知, 只设置了横缝的工况一仅在横缝和横缝下部位置出现了损伤, 而设置了横缝和诱导缝的工况二, 除横缝和横缝下部位置出现损伤外, 诱导缝位置也出现了损伤。通过损伤发展过程分析可知, 诱导缝的损伤发生在横缝出现损伤之后, 且两侧诱导缝的损伤也不是同时出现的, 右侧诱导缝要先于左侧诱导缝出现损伤, 此结果与模型试验结果一致。

4 结 论

由模型数值计算结果和试验结果的一致性可知, 本文数值计算中所采用的材料参数、单元型式、单元本构以及结构缝的模拟情况等各方面都具有一定的可靠性, 能够真实的反映试验情况, 可以经过一定的改善, 用于模型试验无法实现的工况的计算和评价。另外, 沙牌原型坝的模拟计算结果与实际检测结果一致, 说明本文所采用的模拟方法同样适用于

原型坝的计算。由此可见,用 Cohesive 单元来模拟结

构缝能够较好的反映坝体在动力荷载作用下反映。

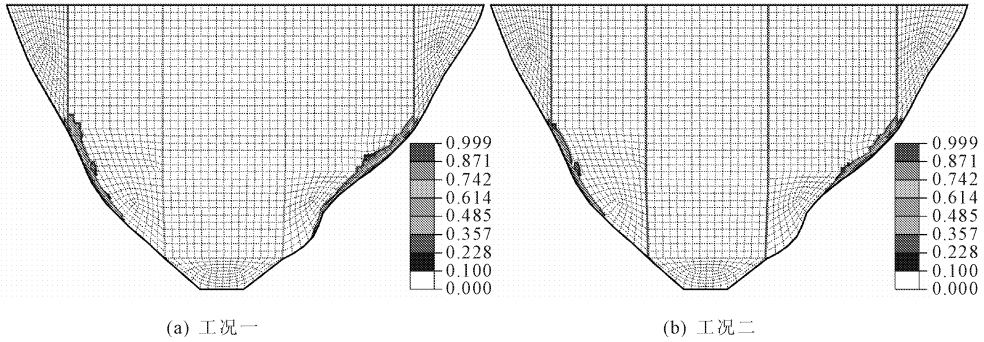


图8 坝体损伤对比图

参考文献:

- [1] 林 皋.混凝土大坝抗震安全评价的发展趋向[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(1): 1-12.
- [2] Fenves G L, Mojtahedi S, Reimer R B. Effect of contraction joints on earthquake response of an arch dam[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(4): 1039-1055.
- [3] Dowling M J, Hall J F. Nonlinear seismic analysis of arch dams[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(4): 768-789.
- [4] Kuo J S H. Joint-opening nonlinear mehanism; Interface Smeared Craek Model[R]. No. UCB/EERC82/09, University of Berkeley Calif; Nasa Sti/recon Technical Report N, 1982.
- [5] Liu J B, Wang D, Yao L. A contact force model in the dynamic analysis of contactable cracks[J]. ACTA Mechanica Solida Sinica, 1993, 6(4): 439-452.
- [6] 陈厚群,李德玉,胡 晓,等.有横缝拱坝的非线性动力模型试验和计算分析研究[J].地震工程与工程振动, 1995, 15(4): 10-26.
- [7] Zhou J, Lin G, Zhu T, et al. Experimental investigations into seismic failure of high arch dams[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 926-935.
- [8] 曾昭扬,马 黔.高碾压混凝土拱坝中的构造缝问题研究[J].水力发电, 1998(2): 30-33.
- [9] 黄达海,宋玉普,赵国藩.碾压混凝土拱坝诱导缝的等效强度研究[J].工程力学, 2000, 17(3): 16-22.
- [10] 刘海成,吴智敏,宋玉普.碾压混凝土拱坝诱导缝开裂试验研究[J].水利学报, 2004, 35(5): 99-105.
- [11] 张小刚,宋玉普,吴智敏,等.碾压混凝土穿透型诱导缝不同扩展阶段的强度指标试验研究[J].水力发电, 2005, 31(6): 21-23.
- [12] 陈 媛,张 林,周 坤,等.高碾压混凝土拱坝分缝形式及破坏机理研究[J].水利学报, 2005, 36(5): 519-524.
- [13] 张 宇,冯 新,侯 爽,等.结构缝对高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): 1222-1232.
- [14] 朱 彤,林 皋,马恒春.混凝土仿真材料特性及其应用的试验研究[J].水力发电学报, 2004, 23(4): 31-37.
- [15] 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.
- [16] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [17] Lee J, Fenves G L. A Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [18] 王佩珏,周 晶.基于 ABAQUS 的高拱坝强震作用下的损伤破坏分析[J].水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 60-65.
- [19] 朱 昆,冯 新,张 宇,等.地震输入对高拱坝动力模型破坏试验结果的影响[J].水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 14-19.
- [20] 张翠然,俞言祥,陈厚群,等.基于汶川和芦山地震的沙牌坝址地震动输入研究[J].水力发电学报, 2014, 33(3): 210-215.