

Nam Ngum5 水电站分缝重力拱坝地震响应分析

江守燕,杜成斌,陈灯红

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要 针对老挝在建的 Nam Ngum5 水电站重力拱坝,利用基于 ABAQUS 平台的非线性指数型动接触模型和混凝土塑性损伤本构模型,研究了该重力拱坝在地震荷载作用下横缝的张开、闭合和滑移的非线性动力特性以及坝体的动力响应.计算结果表明 横缝张开使得大坝的坝踵主拉应力大幅增加至 3.0 MPa,考虑诱导短缝时,坝体整体性下降,刚度减弱,坝顶顺河向动位移响应有一定幅度的提高,同时横缝的开度也有所增加,但诱导短缝对坝体应力的影响较小.大坝能承受的最大峰值加速度为 0.40g,大坝可能的破坏模式为从横缝底端与岸坡交界面处起裂,损伤部位逐渐向坝踵以及左岸坝肩、右岸坝肩延伸.

关键词 重力拱坝 横缝 诱导短缝 动接触模型 破坏模式 Nam Ngum5 水电站

中图分类号 TV642.4 **文献标志码** A **文章编号** 1000-1980(2010)03-0308-05

由于大体积混凝土温度应力和施工的需要,拱坝通常采用分层分块方式进行浇筑,而且在施工过程中设置伸缩横缝,有时根据需要还设置一定量的防裂诱导缝.这些缝尽管采取了灌浆措施,但仍然是大坝的薄弱面,地震作用下缝面极易被拉开,呈现出明显的非线性特征.过去在进行拱坝的结构分析计算时,通常忽略横缝的影响^[1-2],将坝体看作一个整体结构进行分析研究.随着研究的深入和计算技术的发展以及工程的需要,人们逐步认识到坝体横缝对拱坝应力状态的影响不容忽视^[3].迄今为止,很多学者提出了用于模拟缝接触问题的模型^[4-7],这些模型在解决实际问题时各有利弊.如文献[4]提出的 Goodman 单元虽然在模拟横缝接触时方便易行,但计算时为防止过量嵌入设置的大法向刚度往往会使法向应力出现波动.文献[5]提出的三维非线性接触单元引入了非线性弹性本构关系,但仍然采用的是有厚度单元,需加载步长很小才能有效防止嵌入现象.文献[7-8]提出了使用基于 ABAQUS 平台的非线性指数型动接触模型模拟横缝,但并没有考虑坝体材料的非线性特性.

笔者在 Nam Ngum5 水电站重力拱坝静动力学分析及安全性评价研究中,发现基于 ABAQUS 平台的指数型动接触模型在模拟横缝、诱导短缝的动接触特性时具有较好的模拟效果.此外,由于该模型在缝面接触时能使接触面之间的法向特性光滑过渡,从而使得采用隐式迭代算法时的收敛性相对较好.本文同时考虑了横缝的接触非线性以及坝体混凝土材料的非线性特性,研究了 Nam Ngum5 水电站重力拱坝在地震荷载作用下横缝的张开、闭合和滑移的非线性动力特性以及坝体的动力响应,并基于混凝土塑性损伤本构模型研究坝体开裂损伤的模式,对大坝的破坏模式进行了探讨,使得研究成果对工程设计更有指导意义.

1 工程概况

Nam Ngum5 水电站位于老挝 Nam Ngum5 河上游右岸支流 Nam Ting 河上,电站坝址坐落于老挝北部山区,主坝位于万象省,厂房位于邻近的川圹省,电站的开发任务主要是发电,以满足当地工农业建设用电的需要,兼有减轻下游洪水灾害以及发展旅游、水产养殖等综合效益.Nam Ngum5 水电站大坝枢纽工程主要建筑物大坝为 2 级建筑物,其他次要建筑物为 3 级建筑物,导流洞等临时性水工建筑物为 4 级建筑物.

Nam Ngum5 地区的地震特点是由很多分散的较小级别的地震所表现出来的,南部地区的地震活动很少,Nam Ngum5 北部与中国云南接壤地带的的地震活动虽呈上升趋势,但这些地震均不会产生强烈的地面运动,

破坏性较小.在 Nam Ngum5 地区将来不会发生较大级别的地震,但由于该区域位于变质岩和花岗岩区附近,所以较可能发生浅层地震,最终可行性研究阶段对大坝抗震按输入地震峰值加速度为 0.15g 进行抗震设防.

2 缝的动接触本构模型

在地震荷载作用下,拱坝横缝两侧表现出开合、滑移的动力特性,这类问题属于接触非线性问题.数值计算要求缝两侧必须满足接触位移和接触力边界条件,即法向的不可贯入性,且法向接触力必须为压力,而沿切向的接触力条件是判断缝面接触时的具体接触状态.

本文基于 ABAQUS 平台的非线性指数型动接触本构模型,研究 Nam Ngum5 水电站重力拱坝在地震荷载作用下横缝的张开、闭合和滑移的非线性动力特性以及坝体的动力响应,文献[6]同时采用该模型与 ADAP-88 模型模拟某拱坝的动力特性,验证了该模型的合理性.该模型的法向本构关系为

$$p = \begin{cases} 0 & h \leqslant -c \\ \frac{p_0}{e-1} \left[\left(\frac{h}{c} + 1 \right) \left(e^{h/c+1} - 1 \right) \right] & h > -c \end{cases} \tag{1}$$

$$\frac{dp}{dh} = \begin{cases} 0 & h \leqslant -c \\ \frac{p_0}{e-1} \left[\frac{1}{c} \left(\frac{h}{c} + 2 \right) e^{h/c+1} - \frac{1}{c} \right] & h > -c \end{cases} \tag{2}$$

式中: c ——初始接触间距; h ——接触面之间的相对位移(以嵌入为正); p ——接触点对上的接触压力; p_0 ——特征接触力,见图 1.当 $h \leqslant -c$ 时,接触面处于张开状态,接触压力 $p = 0$;当 $h > -c$ 时,接触压力 p 和接触面相对位移 h 呈指数型关系.

根据经验,若选取 c 为一合理的微量,并保证 p_0 值足够大,以保证在静载作用下坝体无相互嵌入现象,那么在动力计算时可实现模拟缝两侧在张开状态无相互作用,而在缝面接触时能使接触面之间的法向特性光滑过渡,从而使得采用隐式迭代算法时的收敛性相对较好,当控制接触面间的嵌入深度为一可接受的微量时,这种模型仍然能近似地满足法向的不可贯入条件,精度也能满足要求.

对于缝面的切向接触条件,采用常规的库仑摩擦模型,缝面动摩擦因数取为 0.6.

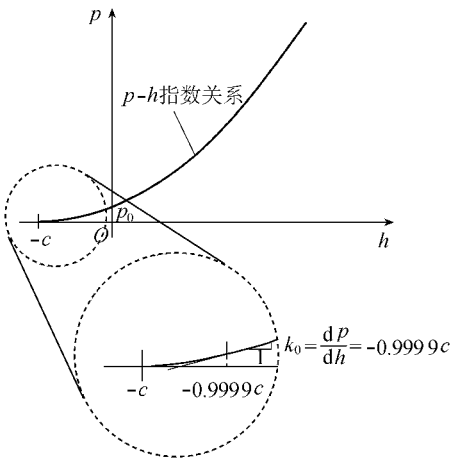


图 1 法向接触本构模型
Fig. 1 Normal contact model

3 重力拱坝的有限元模型

Nam Ngum5 水电站重力拱坝最大坝高 99m,建基面高程 1004m,坝顶宽度 6.0m,拱冠梁底宽 42.0m.计算采用的坝体-地基系统的有限元模型见图 2,沿坝体高度方向分 30 层,坝厚方向分 6 层.单元总数为 13 326,其中坝体单元数为 5 226,地基单元数为 8 100.计算采用的材料参数如下:坝体混凝土密度为 2.4 t/m³,高程 1 039 m 以下静弹性模量为 22 GPa,高程 1 039 m 以上为 25.5 GPa,泊松比 0.167;基岩按无质量地基考虑,其静弹性模量 12 GPa,泊松比 0.35;在抗震动力分析时材料的动弹性模量取为静弹性模量的 1.3 倍^[9].选取的坐

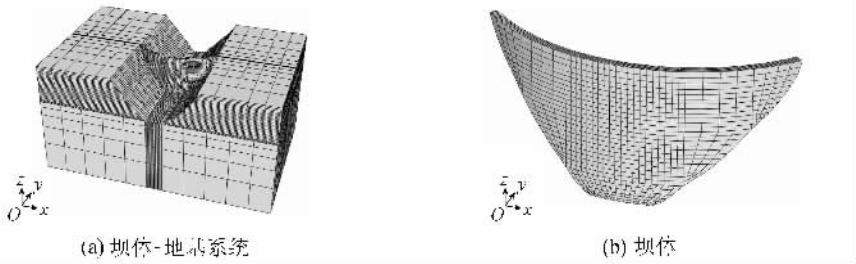


图 2 有限元网格
Fig. 2 Finite element meshes

标系 y 方向为顺河流向(指向下游为正), z 方向正向竖直向上, x 方向垂直 yOz 平面按右手坐标系确定(横河向, 正向由左岸指向右岸). 根据现行规范^[10]及工程实际, 考虑的荷载有坝体自重、静水压力、扬压力、动水压力以及地震荷载. 地震荷载按 7 度地震计算, 依据水工抗震规范反应谱^[9]生成人工加速度时程曲线, 时程动力法计算时地震波采用顺河流向、横河向和竖向三向输入.

Nam Ngum5 水电站碾压混凝土重力拱坝共设置 2 条横缝, 分成 3 个坝段, 横缝间距为 60 ~ 70 m, 横缝布置采用通缝. 每个坝段中部上下游面各设置一条防裂诱导短缝, 短缝深度 3 m. 为了研究诱导短缝对缝开度的影响, 计算考虑了 2 种模型(图 3), 第 1 种模型仅考虑 2 条横缝(以下称模型 1), 第 2 种模型考虑 2 条横缝、3 条诱导短缝情况(以下称模型 2), 其中诱导短缝为非贯穿型裂缝.

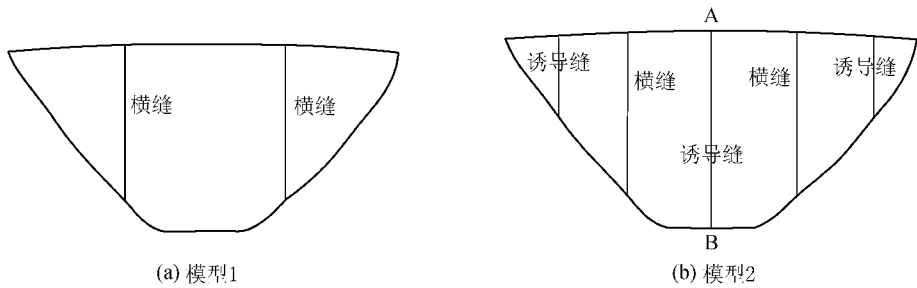


图 3 横缝、诱导短缝位置
Fig. 3 Positions of contraction joints and induced joints

4 计算结果及分析

图 4 给出了 2 种模型下横缝顶拱上游面的开度时程(由于诱导短缝为非贯穿型裂缝, 其开度很小, 仅为 0.1 mm 左右, 故其时程曲线未画出). 从计算结果看, 当每个坝段中部设置诱导短缝时, 坝段整体性受到削弱, 刚度降低, 导致横缝的开度增大. 仅考虑 2 条横缝时, 法向最大开度为 1.29 mm; 同时考虑诱导短缝影响时, 最大开度达 1.75 mm, 且最大开度值均出现在右横缝处. 表 1 列出了 2 种模型下拱冠梁顶(图 3(b) A 部位)顺河向特征位移值, 从表中可看出考虑诱导短缝时, 顺河向位移最值均增大, 最大值提高了 1.32%, 最小值提高了 0.1%, 从数值看虽然提高的幅度不大, 但说明增加缝的条数时, 坝体刚度减弱, 位移响应会增加, 从而缝的开度也会随之增加.

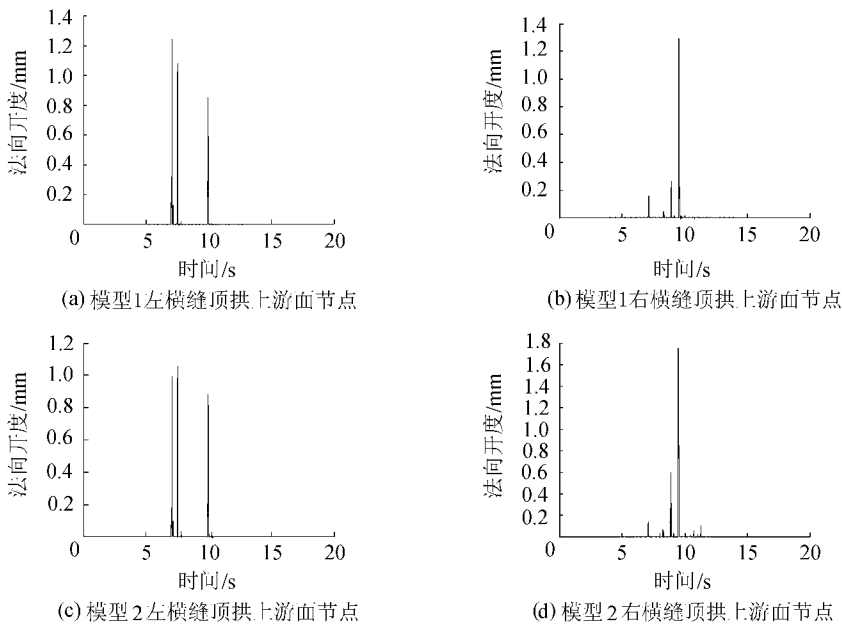


图 4 横缝法向开度时程
Fig. 4 Histories of opening of contraction joints

对于混凝土拱坝,根据其受力特点,一般在坝踵处拉应力较大,坝趾处压应力较大,同时坝踵处的梁向应力也值得重点关注.表 2 给出了这些关键部位的应力极值,坝踵处的应力取图 3(b)中的上游面 B 部位值,而坝趾处应力取下游面的 B 部位值.从表 2 可看出,相比不分缝模型,由于横缝形成了薄弱面,分缝后坝体应力发生了显著变化,这些关键部位的应力均有较大提高,以坝踵处梁向应力及主拉应力变化最为显著,不分缝时拉应力较小,考虑横缝后,最大主拉应力近 3.0 MPa.对于分缝的 2 种模型,当考虑诱导短缝时,大坝刚度有所降低,亦会导致这些部位的应力有所增加,但变化的幅度并不大.

表 1 拱冠梁顶顺河向位移特征值
Table 1 Characteristic displacements of dam cantilever crest along river

模型	最大值/mm	最大值出现时间/s	最小值/mm	最小值出现时间/s
模型 1	29.699	7.32	- 11.750	7.08
模型 2	29.959	7.32	- 11.762	7.08

表 2 坝体关键部位应力极值
Table 2 Peak stress values of key dam positions MPa

模型	坝踵主拉应力	坝踵梁向应力	坝趾主压应力
模型 1	2.63	2.24	- 5.85
模型 2	2.93	2.51	- 6.08
不分缝模型	1.23	0.46	- 3.35

5 大坝破坏模式研究

采用混凝土塑性损伤本构模型^[11-12],在考虑缝的接触非线性时同时考虑坝体材料非线性,将损伤指标引入模型,研究大坝的整体安全度和可能破坏模式.图 5 给出了不同峰值地面加速度下,坝体上游面损伤部位.在峰值地面加速度为 0.15g 时,坝体于 4.6 s 起裂,起裂部位为横缝底端与岸坡交界面处,这时坝体开裂损伤的程度较小,仅集中在横缝底端附近小范围内.当峰值地面加速度为 0.3g 时,坝体于 3.8 s 起裂,起裂时刻提前,坝踵处以及左右岸坝肩处开始出现较大范围损伤,坝面局部范围内出现损伤,但损伤值低于 0.3;当峰值地面加速度为 0.40g 时,坝体于 2 s 左右开裂,损伤部位仍集中在左岸坝肩、右岸坝肩以及坝踵处,但坝体的损伤范围进一步变大;当峰值地面加速度达到 0.45g 时,数值计算到 7.23 s 即发散.

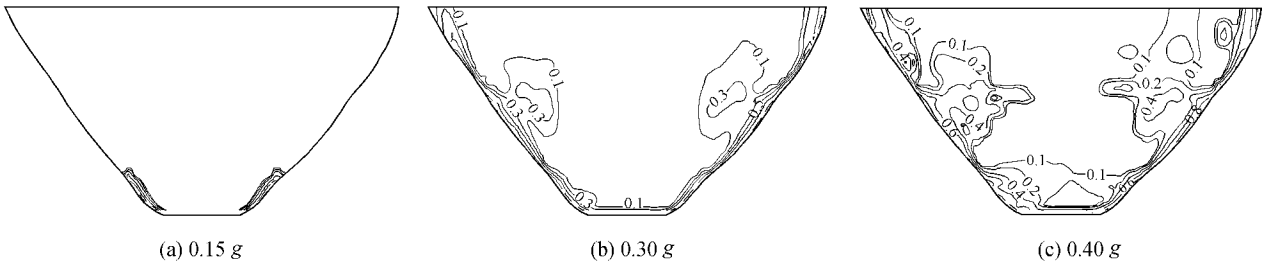


图 5 不同峰值地面加速度时坝体损伤部位及损伤因子等值线

Fig. 5 Positions of dam damage and damage factors under different peak ground accelerations

综合以上分析结果来看,大坝能承受的最大峰值地面加速度为 0.40g,大坝可能的破坏模式为从横缝底端与岸坡交界面处起裂,损伤部位逐渐向坝踵以及左岸坝肩、右岸坝肩延伸.

6 结 论

- a. 基于 ABAQUS 平台的指数接触模型在模拟横缝张开闭合的动特性时,具有较好的效果,能够解决一定的实际工程问题.
- b. 根据经验,在该模型中,若选取 c 为一合理的微量,并保证 p_0 值足够大,通过试算以保证在静载作用下坝体缝面两侧无相互嵌入现象,那么在动力计算时可实现模拟缝两侧在张开状态无相互作用,而在缝面接触时能使接触面之间的法向特性光滑过渡,从而使得采用隐式迭代算法时的收敛性相对较好,控制接触面间的嵌入深度为一可接受的微量,此模型仍能近似满足法向不可贯入条件,精度也能满足要求.
- c. 考虑诱导短缝时,坝体整体性降低,刚度削弱,坝顶顺河向位移响应有一定幅度的提高,同时横缝的开度也将增大.
- d. 相比不分缝模型,由于缝间形成了薄弱面,分缝后坝体应力发生了显著变化,一些关键部位的应力(坝踵拉应力以及梁向应力、坝趾压应力)均有较大提高.对于分缝的 2 种模型,当考虑了诱导短缝时,大坝刚度有所降低,亦会导致这些部位的应力有所增加,但变化幅度并不大.

e. 采用混凝土非线性塑性损伤模型,同时考虑缝的接触非线性以及坝体材料的非线性,引入损伤指标,可以模拟大坝开裂损伤的模式. Nam Ngum5 水电站大坝能承受的最大峰值加速度为 $0.40g$, 大坝可能的破坏模式为从横缝底端与岸坡交界面处起裂, 损伤部位逐渐向坝踵以及左岸坝肩、右岸坝肩延伸.

参考文献:

- [1] 黄文雄, 许庆春, 王德信. 拱坝的非线性开裂有限元分析[J]. 河海大学学报, 1994, 22(5): 100-103. (HUANG Wen-xiong, XU Qing-chun, WANG De-xin. Nonlinear cracking finite element analysis of arch dam[J]. Journal of Hohai University, 1994, 22(5): 100-103. (in Chinese))
- [2] 蔡新, 郭兴文, 王德信, 等. 拱坝整体非线性稳定分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999, 27(2): 74-80. (CAI Xin, GUO Xing-wen, WANG De-xin, et al. Nonlinear stability analysis of arch dams[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1999, 27(2): 74-80. (in Chinese))
- [3] 赵光恒, 杜成斌. 分缝拱坝的地震响应分析[J]. 河海大学学报, 1994, 22(5): 1-8. (ZHAO Guang-heng, DU Cheng-bin. Seismic response analysis of jointed arch dams[J]. Journal of Hohai University, 1994, 22(5): 1-8. (in Chinese))
- [4] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations, 1968, 94(3): 660-677.
- [5] 杜成斌, 任青文. 用于接触面模拟的三维非线性接触单元[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(4): 92-96. (DU Cheng-bin, REN Qing-wen. A new three-dimensional nonlinear interface element for modeling joints[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2001, 31(4): 92-96. (in Chinese))
- [6] 赵兰浩, 李同春, 牛志伟, 等. 有横缝高拱坝非线性地震响应接触模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 91-95. (ZHAO Lan-hao, LI Tong-chun, NIU Zhi-wei, et al. The dynamic contact model of nonlinear seismic response of high arch dams with contraction joints[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 91-95. (in Chinese))
- [7] 石建军, 孙冰, 周元德, 等. 不同横缝接触与库水模型对拱坝动力反应的影响[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 34-38. (SHI Jian-jun, SUN Bing, ZHOU Yuan-de. Effects of contraction joint contact and reservoir models on dynamic response of arch dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 34-38. (in Chinese))
- [8] 龙渝川, 周元德, 张楚汉. 基于两类横缝接触模型的拱坝非线性动力响应研究[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1094-1099. (LONG Yu-chuan, ZHOU Yuan-de, ZHANG Chu-han. A comparison study of nonlinear dynamic responses of arch dams based on two types of contraction joint models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1094-1099. (in Chinese))
- [9] DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S].
- [10] DL 5077—1997 水工建筑物荷载设计规范[S].
- [11] LUBLINER J, OLIVER J, OLLERR S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 229-326.
- [12] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.

Seismic response analysis of gravity jointed arch dam of Nam Ngum5 Hydropower Station

JIANG Shou-yan, DU Cheng-bin, CHEN Deng-hong

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The exponential nonlinear dynamic contact model and the concrete damage plasticity model based on the ABAQUS platform were employed to study the nonlinear dynamic characteristics of contraction joints, i. e., opening, closing and sliding, and dynamic responses, of the gravity arch dam of the Nam Ngum5 Hydropower Station in Laos during earthquakes. The results indicate that the principal tensile stress of the dam heel increases greatly, up to 3.0 MPa , owing to the opening of the contraction joints. Because of the induced joints, the dam integrity further decreases and it becomes less stiff, and the dynamic displacement of the dam crest along the river shows a certain increase. Simultaneously, the opening of the contraction joints increases. The induced joints have little influence on the dam stress. The dam can bear a peak acceleration of $0.40g$, and the possible failure mode is the development of cracks on the interface between the bottom of contraction joints and the slope, and then extension of damage to the dam heel and the dam abutments.

Key words: gravity arch dam; contraction joint; induced joint; dynamic contact model; failure mode; Nam Ngum5 Hydropower Station