

文章编号:0559-9350(2013)11-1352-07

重力坝与坝基体系地震损伤破坏分析

郭胜山¹, 陈厚群¹, 李德玉¹, 熊 堃²

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;

2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了揭示重力坝坝基体系地震破坏过程, 需要同时考虑坝体和地基的损伤破坏。本文建立了较为完整重力坝-地基-库水非线性动力分析模型, 同时利用笔者开发的程序模拟了重力坝地基体系的地震破坏。结合印度 Koyna 坝震害, 研究了坝体和地基岩体均采用损伤模型重力坝地基体系的地震破坏过程。作为比较分析, 对坝体采用损伤模型、地基采用 Drucker-Prager 弹塑性模型进行了重力坝地基体系的地震破坏研究。计算结果表明, 地基分别采用损伤模型和 Drucker-Prager 弹塑性模型, 得到不同的破坏模式。坝体地基均采用损伤模型模拟的结果与实际震害接近, 能更好反映重力坝地震损伤破坏。

关键词: 重力坝; 地基; 地震; 损伤模型; Drucker-Prager 弹塑性模型

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

1 研究背景

以典型重力坝震害 Koyna 坝为例, 众多学者采用了多种方法对其震害进行了模拟研究, 常用的方法有边界元和离散元方法^[1-2]、断裂力学方法^[3]、流行元方法^[4]、塑性损伤模型的有限元方法^[5]以及扩展有限元法^[6-7]。这些研究工作基本再现了 Koyna 大坝折坡处上、下游裂缝的发展过程, 但是由于未考虑地基的破坏, 不可避免在坝踵位置产生了沿坝基交界面的裂缝, 并且开裂深度已经危及帷幕位置。震后 Koyna 坝在廊道位置钻孔取芯发现坝基胶结良好, 并且坝基渗流量并未显著增加, 说明并未出现沿坝基交界面的裂缝。这就给研究者提出了新的要求, 必须同时考虑坝体与坝基的破坏才能较好地揭示重力坝体系的地震破坏过程。于沐等^[8]、段庆喜等^[9]将弹塑性模型应用到重力坝坝体和地基破坏分析中, 应用强度折减法对重力坝抗滑稳定问题进行了研究, 但未考虑坝体与地基材料的损伤破坏。

混凝土、岩体类非均质准脆性材料的破坏, 是由于其中的微裂缝在荷载作用下继续萌生和拓展, 形成宏观裂缝的不断发展最终导致结构失效破坏。宏观力学参数演化表征为随着微裂缝的发展, 其强度和刚度逐渐降低, 最终形成宏观裂缝。因此, 采用损伤力学模型来表征混凝土、岩体的破坏较为切合实际。

本文在已有研究^[10-11]基础上, 探讨地基岩体材料非线性对重力坝及其坝基体系地震破坏分析的影响。通过对遭受地震的印度 Koyna 坝实例分析, 研究坝体和地基岩体均采用损伤模型重力坝地基体系的地震破坏过程。作为比较分析, 也对坝体采用损伤模型、地基采用 Drucker-Prager 弹塑性模型进行重力坝地基体系的地震破坏研究。

2 荷载施加方式及地基阻尼

在坝基渗透系数较小时, 要达到稳定的渗流场需要较长的时间。在研究库水压力影响时, 建坝

收稿日期: 2012-08-28

作者简介: 郭胜山(1985-), 男, 河南新乡人, 博士生, 主要从事水工结构与高坝抗震研究。E-mail: guoss@iwhr.com

初期的库水按照边界力施加在坝基表面，运行较长时间的库水按照渗流体积力施加在坝基单元上^[12]。如图1所示，模型按边界力施加坝面水荷载，按渗流体积力施加坝基水荷载。求出渗流场水头 H 后， x 、 y 方向的坝基渗流体积力 f 分别为：

$$\begin{aligned} f_x &= -\gamma \frac{\partial H}{\partial x} \\ f_y &= -\gamma \frac{\partial H}{\partial y} + \gamma \end{aligned} \quad (1)$$

对结构地震反应而言，由于地基相对结构而言是无限域，对结构的地震反应分析实际就是进行由无限地基和结构组成的开放体系中地震波传播过程的模拟，其中既包括了结构由入射波激发产生的振动，又包括了结构作为散射波源向无限域辐射能量。由于有限元计算规模的限制，不可能取无限地基，由此提出了人工边界的概念用来模拟无限地基对近场波动的影响。本文以黏弹性人工边界模拟地基辐射阻尼的影响，黏弹性人工边界是局部人工边界中的一种，它克服了黏性边界引起的低频漂移，能够模拟人工边界外半无限介质弹性恢复性能，具有良好的频率稳定性，黏弹性人工边界实质是用弹簧和阻尼器来代替无限地基弹性和阻尼的影响。人工边界上的面荷载表达式为：

$$F_b = K_b U_b + C_b \dot{U}_b + \sigma_b \quad (2)$$

式中： F_b 为边界的面荷载； K_b 为边界的弹簧系数； C_b 为边界的阻尼系数； σ_b 为边界截断处自由场应力； U_b 、 \dot{U}_b 分别为自由场反应位移和速度。

3 混凝土及岩体材料非线性模型

3.1 混凝土及岩体损伤模型 混凝土损伤破坏有以下特点：(1)这类非均质准脆性材料的损伤过程，是由微裂纹拓展、萌生、贯通的损伤演化发展至形成宏观裂缝和破坏；(2)混凝土材料抗拉强度远低于其抗压强度安全储备，损伤及破坏由抗拉强度控制；(3)由于裂纹不能完全恢复引起的残余变形；(4)材料弹性模量和强度随损伤演化而降低；(5)在拉压转化时，由于裂缝闭合，弹性模量恢复至初始值，呈现单边效应。

文献[10-11]根据混凝土损伤的特点，为避免套用塑性理论，提出了残余变形损伤模型，如图2所示。其主要思想为：根据单轴拉、压循环荷载试验资料，可以直接求得损伤过程中残余变形的增长以及卸载与再加载过程中考虑残余应变影响的非线性损伤弹性模量，从而避免套用并不适用于混凝土的塑性理论，并使损伤演化规律更符合试验结果。

将上述损伤模型应用到岩体材料中，鉴于岩体材料损伤试验资料缺乏，本文暂根据岩体抗拉强度对应混凝土抗拉强度相应折减，确定基岩材料损伤参数。

3.2 基岩 Drucker-Prager 弹塑性模型 Mohr-Coulomb 屈服准则的六边形屈服面是不光滑且是有尖角的，而这些六变形尖角在计算流动势时存在数值计算的困难，而 Drucker-Prager 正是对 Mohr-Coulomb 屈服面的光滑近似，Drucker-Prager 屈服准则屈服面函数数学表达式为：

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (3)$$

式中： I_1 、 J_2 分别为第一应力张量不变量和第二应力偏量不变量； α 、 k 分别由摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 确定，本文以外接边界确定， $\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$ ， $k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$ 。

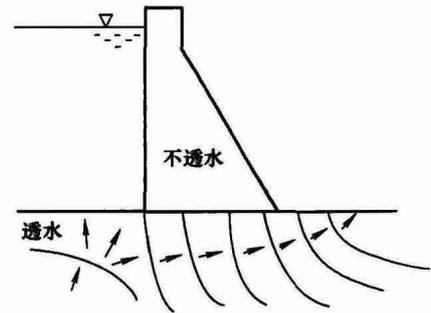


图1 重力坝及坝基水荷载施加方式

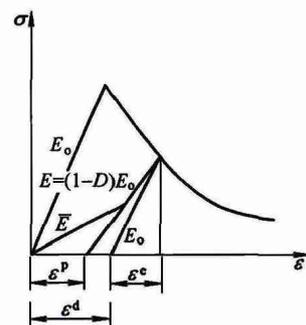


图2 残余变形损伤模型

按相关流动法则，塑性势函数 g 与屈服面函数 f 重合。

4 Koyna坝地震损伤破坏分析

为探索地基岩体非线性对重力坝地基体系地震损伤的影响，本文坝体采用损伤模型、地基岩体分别采用损伤模型和Drucker-Prager弹塑性模型，编制了相应程序，以遭受震害的印度Koyna重力坝为实例，分析坝体-地基体系在地震作用下的破坏过程。

1967年12月11日，印度Koyna重力坝遭受到6.5级地震作用，地震发生时库内水深91.75m。地震造成坝体产生多条水平裂缝，其主要集中于629m高程的坡面改变处，参见图3。

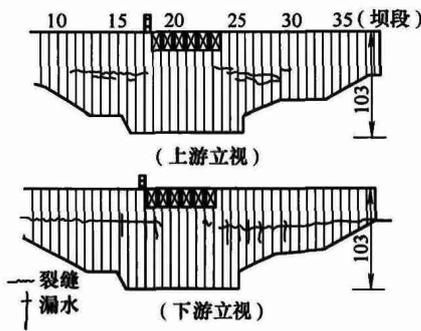


图3 Koyna大坝震害

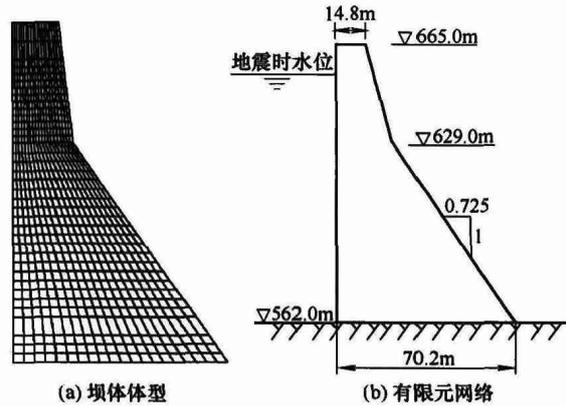


图4 坝体体型和有限元网格

4.1 计算模型及参数 选取Koyna坝体的一个典型挡水坝段进行分析，地基范围上、下游以及竖向各取200m，以黏弹性人工边界考虑地基辐射阻尼的影响。坝体体型和有限元网格如图4所示，坝体-地基整体有限元网格如图5所示。坝体材料取为损伤模型，地基材料分别取为损伤模型和Drucker-Prager弹塑性模型。静力荷载为自重、坝面水荷载、坝基初始地应力场和渗流荷载。输入实测的水平向和竖向地震波如图6所示，顺河向峰值加速度为 $0.53g$ ，竖向峰值加速度为 $0.35g$ 。库水动水压力按不计库水压缩性的Westergaard附加质量方法模拟。

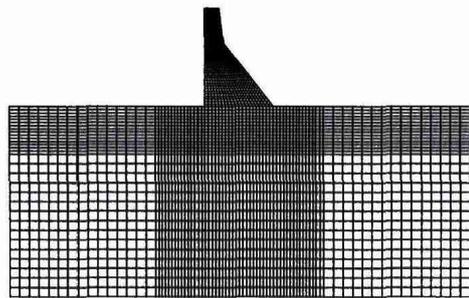


图5 坝体-地基整体有限元网格

计算采用的坝体混凝土材料参数为：初始弹性模量 31.027GPa ，泊松比 0.2 ，密度 2643kg/m^3 ，初始抗拉强度 $f_{t0}2.9\text{MPa}$ ，阻尼 $C=\alpha M+\beta K$ ，参照文献[5]考虑了阻尼力随着裂缝的张开闭合发生变化， $\alpha=0$ ， $\beta=0.00323$ ，断裂能 G_f 取为 200N/m 。计算采用的损伤演化关系如图7所示。

计算采用的基岩材料参数为：初始弹性模量 20GPa ，泊松比 0.2 ，密度 2700kg/m^3 ，摩擦角 $\phi 54.46^\circ$ ，黏聚力 $c2.0\text{MPa}$ ，初始抗拉强度 $f_{t0}1.28\text{MPa}$ ，断裂能 $G_f88.4\text{N/m}$ 。计算采用的损伤演化关系，如图8所示。

4.2 计算结果及分析

4.2.1 地基取损伤模型 图9给出了地基取损伤模型的坝体地基整体破坏结果，坝体裂缝在折坡处沿上下游贯穿，地基裂缝沿地基深度向下发展了 43m 。图11—图13给出了裂缝张开和闭合时程，坝体裂缝震后有一定残余张开度，地基裂缝震后处于闭合状态。坝踵未出现沿坝基交界面的损伤开裂，且防渗帷幕并未受到破坏，与实际震害接近。

4.2.2 地基取Drucker-Prager模型 图14给出了地基取Drucker-Prager弹塑性模型坝体地基整体破坏结果，坝体破坏用损伤因子表示，地基破坏用塑性区表示(黑色表示塑性区)。在坝踵位置沿坝基交

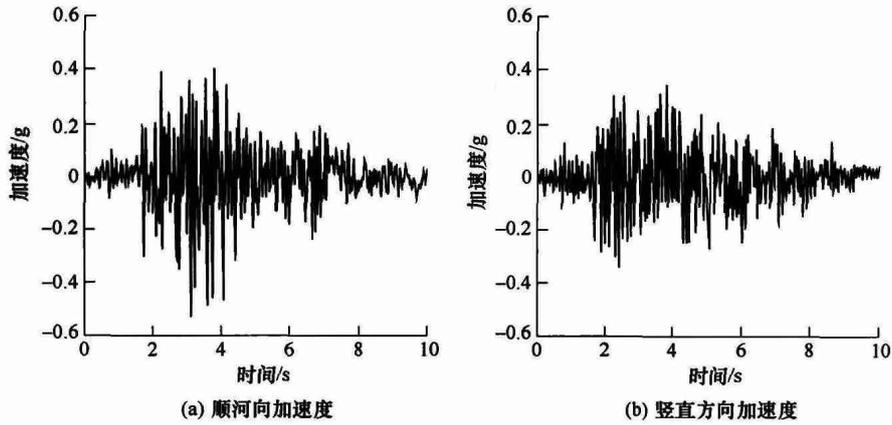


图6 实测地震波加速度

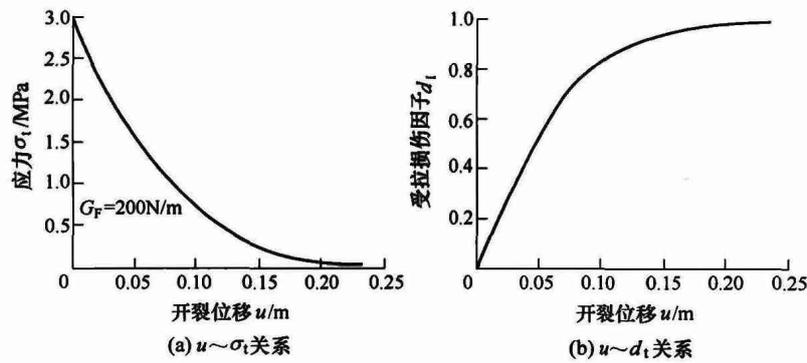


图7 计算采用的坝体混凝土材料损伤演化关系

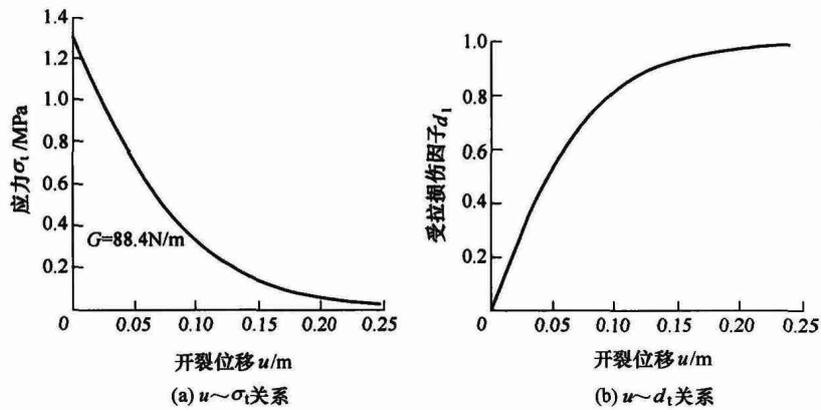


图8 计算采用的基岩材料损伤演化关系

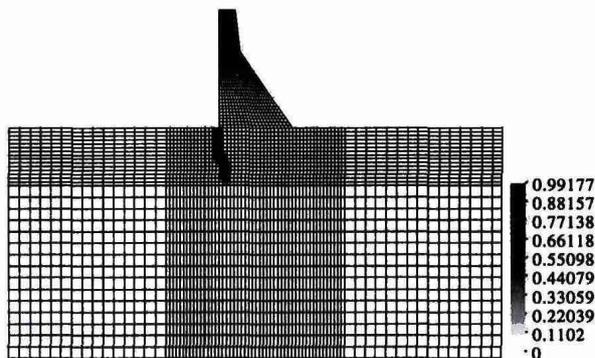


图9 整体损伤

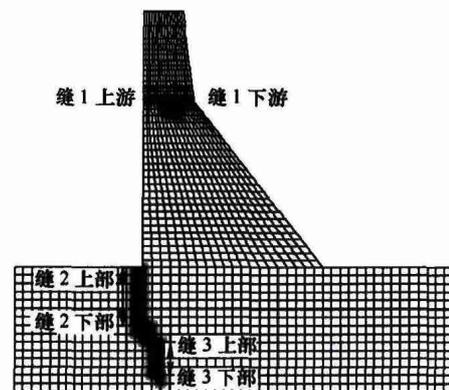


图10 损伤局部放大

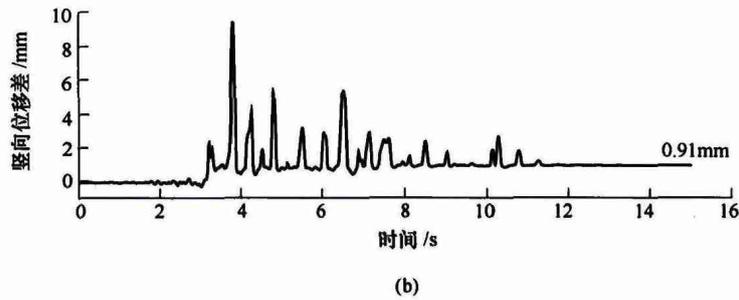
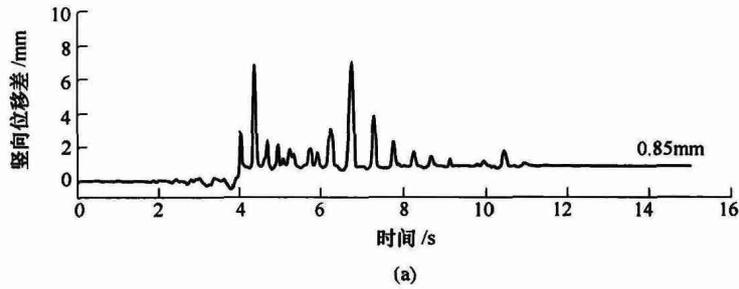


图 11 缝 1 上下游节点对竖向位移差时程

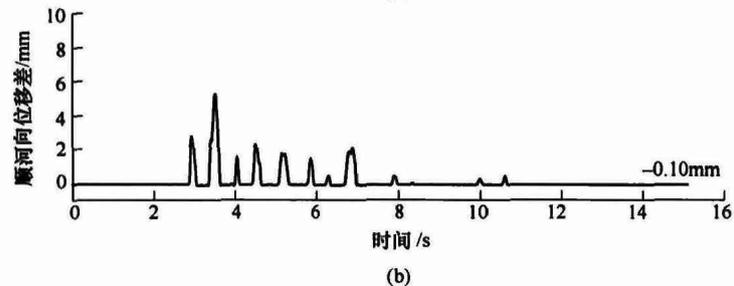
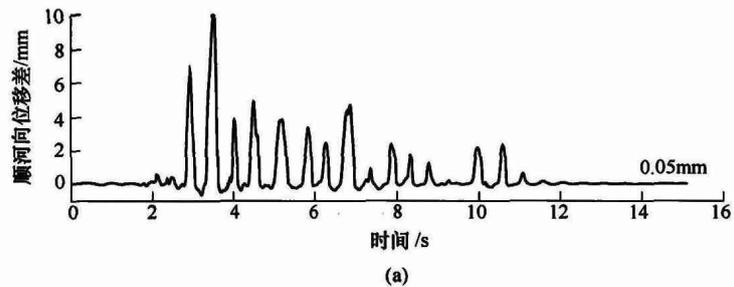


图 12 缝 2 上、下部节点对顺河向位移差时程

界面出现了一定程度的破坏，并且已危及帷幕安全。地基取 Drucker-Prager 弹塑性模型模拟结果与震害不符。

5 结论

本文建立了较为完整的重力坝坝体-地基-库水非线性动力分析模型。本文将文献[10-11]提出的混凝土残余变形损伤模型应用于坝体，地基岩体材料分别采用损伤模型和 Drucker-Prager 模型，对经受地震的印度 Koyna 重力坝地基体系进行了地震损伤破坏分析。研究表明：(1)坝体采用损伤模型，地基分别采用损伤模型和弹塑性模型，地基岩体得到不同的破坏模式。坝体和地基岩体均采用损伤模型模拟结果与实际震害接近，地基岩体采用 Drucker-Prager 弹塑性模型，坝体地基交界面发生破坏，并危及防渗帷幕，与震害不符；(2)混凝土岩体类准脆性材料的破坏是由微裂纹的萌生、发展引起的，而塑性力学是基于金属晶格滑移或错位建立的理论，两者的破坏机制不同，因此塑性力学表

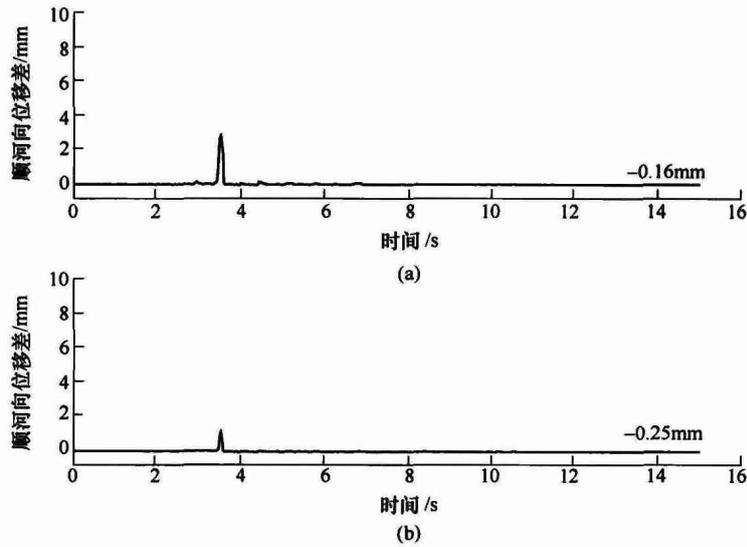


图13 缝3上、下部节点对顺河向位移差时程

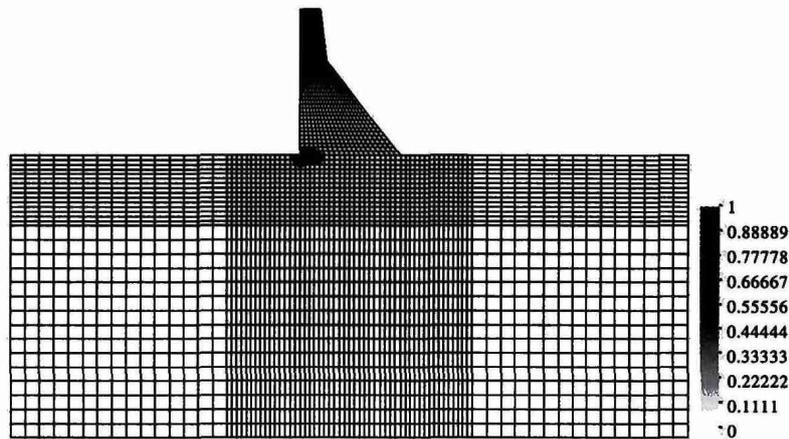


图14 整体破坏结果

述岩体的破坏是不合适的。事实上，岩体在破坏后，裂纹的萌生和发展必然引起刚度和强度降低，塑性力学也无法表征这一力学机制，损伤力学能够表述岩体损伤破坏后的刚度和强度降低。因此损伤力学模型要优于弹塑性模型；(3)鉴于岩体材料动力破坏特性的复杂性以及无法对岩体进行试验验证，因此目前国内外尚未有普遍认可的岩体损伤演化模型，有待深入研究；(4)地基裂缝的开裂深度和开裂范围除与材料参数有关外，还与地应力、渗透压力等因素有关，由于缺乏详细资料，本文结合了国内的规范进行了简单模拟，下一步可结合国内有详细地质资料的工程进行研究探索。

参 考 文 献：

- [1] Batta V, Pekau O A . Application of boundary element analysis for multiple seismic cracking in concrete gravity dams[J] . Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25: 15-30 .
- [2] Pekau O A, CuiY Z . Failure analysis of fractured dams during earthquakes by DEM[J] . Engineering Structures, 2004, 26: 1483-1502 .
- [3] Wang G L, Pekau O A, Zhang C H, et al . Seismic fracture analysis of concrete gravity dams based on nonlinear fractures mechanics[J] . Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65(1): 67-87 .
- [4] 张国新, 金峰, 王光纶 . 用基于流形元的子域奇异边界元法模拟重力坝的地震破坏[J] . 工程力学, 2001, 18(4): 18-27 .

- [5] Lee J, Fenves G L. A Plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Journal of Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 1998, 27: 937-956.
- [6] 方修君, 金峰, 王进廷. 基于扩展有限元法的 Koyna 重力坝地震开裂过程模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2065-2069.
- [7] 潘坚文, 张楚汉, 徐艳杰. 用改进扩展有限元法研究重力坝强震断裂过程[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 168-174.
- [8] 于沐, 陈祖煜, 王玉杰, 等. 用强度折减方法分析重力坝深层抗滑稳定性[J]. 水文地质工程地质, 2009, 3: 64-70.
- [9] 段庆伟, 陈祖煜, 王玉杰, 等. 重力坝抗滑稳定的强度折减法探讨及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 4510-1517.
- [10] 陈厚群, 郭胜山. 地震作用下混凝土高坝损伤模型的探讨[C]//第四届全国结构振动与动力学学术研讨会论文集. 苏州, 2011.
- [11] 陈厚群, 郭胜山. 混凝土高坝-地基体系的地震损伤分析[J]. 水利学报, 2012, 43(增刊1): 2-7.
- [12] 潘家铮. 重力坝设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

Seismic damage and failure analysis of gravity dam and foundation system

GUO Sheng-shan, CHEN Hou-qun, LI De-yu, XIONG Kun

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to reveal seismic damage and failure process of gravity dam-foundation system, both of dam and foundation damage should be considered. A relatively complete nonlinear dynamic analysis model of gravity dam-foundation-water reservoir system has been developed, while seismic damage and failure of gravity dam-foundation system is simulated by the program presented in this paper. According to the study of Koyna dam subjected to the actual earthquake, the seismic damage process of dam-foundation system is investigated by using damage model applied to dam-foundation system. As a comparative study, the seismic failure of dam-foundation system is investigated by using damage model for dam and using Drucker-Prager elastoplastic model for foundation rock. The result shows that different failure modes are got by using damage model and Drucker-Prager model for foundation, and the damage of dam-foundation system which has been simulated by using damage model for dam and foundation is close to the actual damage.

Key words: gravity dam; foundation; earthquake; damage model; Drucker-Prager elastoplastic model

(责任编辑: 王冰伟)