

# 面板堆石坝模型动力破坏试验与数值仿真分析

## Dynamic failure test and numerical simulation of model concrete-faced rockfill dam

孔宪京, 刘 君, 韩国城

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 通过类比试验方法, 观察、比较了振动台上面板堆石坝和普通堆石坝的破坏过程及其破坏性态, 分析了面板对坝坡稳定性的影响。由于堆石颗粒之间以及堆石体与面板之间的位移不连续, 采用非连续变形分析方法对两种模型坝进行了数值模拟, 结果表明: 数值模拟的结果与振动台模型试验的结果很相似, 从而从模型试验和数值仿真分析两个方面探讨了地震时面板堆石坝的破坏过程及其破坏形态, 对面板坝的抗震设计提供了依据。

**关键词:** 面板堆石坝; 动力破坏; 非连续变形分析; 模型试验

中图分类号: TV 312

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)01-0026-05

**作者简介:** 孔宪京(1952-), 男, 博士, 教授, 大连理工大学水工结构工程博士生导师。主要从事土工建筑物的模型试验与数值计算方面的研究。

KONG Xiar jing, LIU Jun, HAN Guo cheng

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

**Abstract:** In this paper, the dynamic failure phenomena of two kinds of model dams, i. e., homogeneous rock-fill dams and faced rock-fill dams, are investigated by large scale shaking table tests. Numerical simulations of model dams are performed by Discontinuous Deformation Analysis that takes the displacement discontinuity of filled materials and contact between facing slab and dam body into consideration. The results obtained from numerical simulations are consistent with those from the corresponding dynamic experiments. Based on the results from the experiments and numerical simulations, some beneficial conclusions are obtained.

**Key words:** concrete-faced rock-fill dam; dynamic failure; DDA; model tests

## 0 前 言\*

随着面板堆石坝(以下简称面板坝)的兴起, 面板坝的抗震性能引起国内外许多学者的关注。但总的来看, 涉及面板坝地震破坏机理及其抗震对策方面的研究尚不多见, 多数学者主要是运用数值分析技术对面板坝进行地震反应和永久变形分析<sup>[1-4]</sup>。由于面板坝经受地震考验的实例不多, 因此, 室内振动台模型试验自然受到重视。不可否认, 土石坝模型试验中由于相似率还没有很好解决, 在模型材料、地震动输入、测试手段、实验方法等方面也存在很多问题, 但近十几年来的研究表明<sup>[5]</sup>: 土石填筑料堆筑的模型坝自振频率随地震输入强度增大而降低、坝体对地震波的放大效应等都与实际地震中原型观测到的现象一致, 而且实际地震中的主要震害如裂缝、滑坡、坍塌等可通过选取不同的土石材料使他们在模型上得以充分表现。这些成果对人们深化对土石坝抗震性能的认识, 为理论分析提供有益的启示。尽管人们至今还不能根据现有的认识水平从理论上推导出原模型这些相似现象的方程表达式或定量的换算关系, 但是, 对于它们之间存在着相似性是肯定的<sup>[6]</sup>。本文通过类比试验方法, 观察、比较面板坝与普通堆石坝(试验采用均质坝形式)地震破坏

模式及动力稳定性的差别, 并通过数值仿真分析验证模型试验结果的可靠性。目前, 面板坝的数值计算分析一般都把堆石体也看成一个连续体, 通过节理单元或薄层单元形式来模拟堆石体与面板之间的相互作用, 采用有限元法来计算坝体和面板的动力反应。但是这种方法很难模拟堆石与堆石之间, 坝体与面板之间的位移不连续, 更无法模拟坝体的整个动力破坏过程。

非连续变形分析(DDA)方法<sup>[7]</sup>是近十年来发展起来的一种新的数值方法。DDA方法具有完备的块体运动学理论及其数值实现、严格的平衡假定、正确的能量耗散过程和较高的计算效率。由于DDA方法将刚体位移和块体变形采用统一的类似于有限元的格式求解, 所以不仅允许块体自身有位移和变形, 而且允许块体间有滑动、转动、张开等运动形式, 能够模拟多块体系统的大位移和大变形。本文的数值仿真分析就是采用了DDA数值分析方法, 进而从模型试验与数值分析两个方面探讨了面板坝的动力破坏过程及其破坏形态, 为研究面板坝的抗震对策提供了依据, 也为面板坝的抗震设计提供参考。

\* 收稿日期: 2002-05-13

# 1 模型试验

本试验在日本东京大学千叶实验所液压伺服式二维地震模拟台上进行。振动台台面尺寸 3 m × 3 m, 最大载荷力 7 t, 满载时, 水平最大加速度 2.0g, 竖向最大加速度 1.5g。振动台配有完整的测量和数据分析系统。

模型坝坝高 60 cm, 坝顶长 230 cm, 坝体采用石灰岩碎石(最大粒径 13 mm), 面板采用砂浆(小名浜砂、铁粉、生石灰、水按一定比例)直接抹在上游坡面上, 砂浆面板与堆石体之间有一过渡层, 厚 3~4 cm, 最大粒径 5 mm。面板厚度 0.4 cm, 垂直分缝间距 10 cm。模型坝做成置放 60 h 后开机进行试验。干燥后的面板容重 2.1 g/cm<sup>3</sup>, 弹模 1.5 GPa, 抗拉强度约 0.11 MPa。

在坝的中央断面选 8 个加速度反应观测点, 其中坝内有 5 个, 坝面附近有 3 个, 见图 1。图中 AH 表示水平加速度计(压阻式), AV 为垂直加速度计。坝内埋置条状彩色砾石柱, 以便试验结束后确认滑裂面的位置。

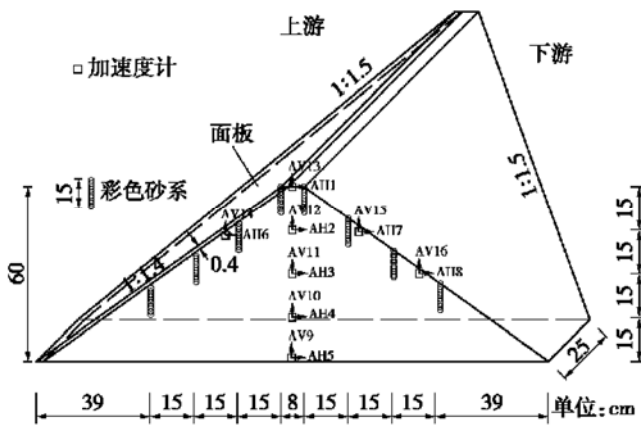


图 1 模型坝加速度计埋置位置  
Fig. 1 Arrangement of accelerators

振动台由计算机控制, 按图 2 的方式输入地震波。加速度幅值以 0.0085g s<sup>-1</sup> 的速率增加, 当面板上出现第一条裂缝后, 由计算机键盘输入信号, 于是振动台将以等幅振动 10 周后按 0.085g s<sup>-1</sup> 的速率停机, 本试验振动台的振动频率固定在 10 Hz。

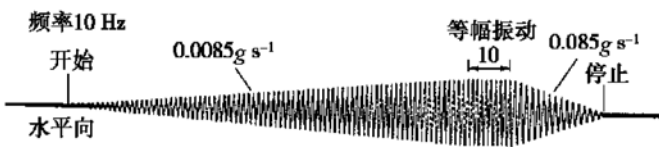


图 2 振动台输入波形  
Fig. 2 Input earthquake wave

由振动台模型试验的结果可以得到: 随着振动台加速度的增大, 无面板堆石坝在坝轴线中央断面 3/4 坝高以上的上、下游两侧坝坡上首先出现碎石颗粒滚动、滑落并逐渐扩展成大面积的表层滑动, 滑动范围也

向左右两岸方向以及坝面下方扩展。面板坝与无面板堆石坝的破坏形式基本相同, 即下游坝坡从碎石颗粒的滚动直至发展到大面积的表层滑动, 但上游坝面却没有任何反应。图 3 给出两个模型坝各测点的加速度波形, 图 4 给出了振动停止后两个模型坝的破坏状态。由此可见, 在相同的填筑材料、坝体几何尺寸、输入地震动情况下, 无面板堆石坝的破坏严重, 而面板坝的破坏仅发生在下游坡, 这也充分说明了面板在提高坝面稳定、增强坝体整体性方面的作用。

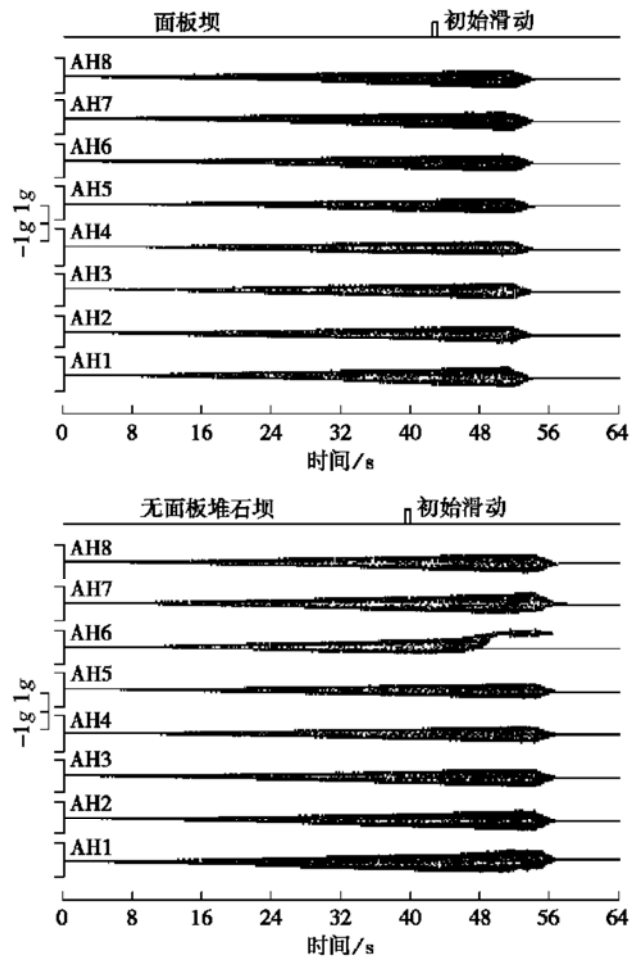


图 3 坝内各测点加速度波形

Fig. 3 Accelerograms from sensors placed within dams

# 2 DDA 方法的基本原理

## 2.1 块体的位移和变形

DDA 方法求解的是被不连续面切割而成的离散块体组成的块体系统。块体系统的大位移和大变形是由每一荷载步或时间步的增量位移累积而成。在每一时间步内, 块体的运动及变形由 6 个变形参数确定:

$$\{D_i\} = \{d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}, d_{4i}, d_{5i}, d_{6i}\}^T = \{u_0, v_0, r_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \chi_{xy}\}^T \quad (1)$$

式中 (u<sub>0</sub>, v<sub>0</sub>) 是块体 i 内某点(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)沿 x, y 方向的刚体位移; r<sub>0</sub> 是块体绕点(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)的转角; ε<sub>x</sub>, ε<sub>y</sub> 和 χ<sub>xy</sub>

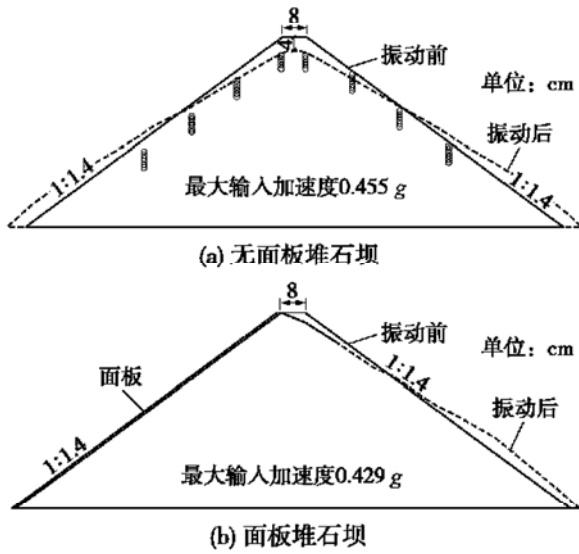


图4 中央断面破坏性态

Fig.4 Failure states of model dams

为块体的正应变和剪应变。

在完全一阶位移近似下,块体内任意一点的位移可由变形变量 $\{D_i\}$ 表示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = [T_i] \{D_i\}, \quad (2)$$

其中,

$$[T_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & \frac{y - y_0}{2} \\ 0 & 1 & (x - x_0) & 0 & -(y - y_0) & \frac{x - x_0}{2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

### 2.2 系统方程的建立与开-合迭代

块体与块体之间不是相互独立的,块体之间的相互约束构成块体系统。假定系统由  $n$  个块体组成,则系统的总体方程具有下列形式:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中 矩阵元素  $K_{ij}$  由块体  $i$  和块体  $j$  之间的接触关系确定,每个  $K_{ij}$  是  $6 \times 6$  子矩阵;  $F_i$  是  $6 \times 1$  列阵代表块体  $i$  所受的荷载。方程(4)可以写成更简洁的形式:  $KD = F$ , 其中,  $K$  是  $6n \times 6n$  的刚度矩阵,  $D$  和  $F$  分别是  $6n \times 1$  的位移和荷载矩阵。

系统总体方程(4)由总势能  $\Pi$  的最小化求得。总势能是所有势能的总和,包括 ①应变能  $\Pi_e$  生成弹性刚度子矩阵; ②初应力产生的势能  $\Pi_s$  生成初应力子矩阵; ③点荷载产生的势能  $\Pi_p$  生成点荷载子矩阵; ④体积荷载产生的势能  $\Pi_v$  生成体积荷载子矩阵; ⑤惯

性势能  $\Pi_i$  生成质量矩阵; ⑥接触弹簧(法向和切向弹簧)产生的势能  $\Pi_c$  生成接触子矩阵。

通过总势能的最小化,块体矩阵由下式确定:

$$F_i = \left. \frac{\partial^2 \Pi}{\partial d_{ir} \partial d_{js}} \right|_{\{D_i\}=0}, \quad \text{其中 } r, s = 1, 2, \dots, 6; \quad (5)$$

式中,  $d_{ir}$  和  $d_{js}$  分别是块体  $i$  和块体  $j$  的变形变量。

求出方程(4)的解后,由式(2)可以计算出块体变形后的位移和块体之间的接触状态。由无拉伸、无嵌入条件和库仑摩擦定律,在相应接触位置施加或去掉罚弹簧,修正总体方程。对修正后的总体方程再进行求解,直到所有接触界面满足无拉伸和无嵌入接触条件,完成当前步的开-合迭代,进入下一时间步计算。

### 2.3 能量损失

在最初的 DDA 方法中,没有考虑由于块体之间的相互碰撞产生的能量损失。这意味着 DDA 方法完全遵守能量守恒。但实际上,由于颗粒间的摩擦以及块体内微裂纹的产生等会导致部分能量的损失。因此,系统的部分能量会转换成其它形式的能量,比如热能等。裴觉民<sup>[8]</sup>在这方面作了较详细的研究。

如果块体系统的运动遵守能量的守恒,那么系统的总能量  $E$  等于动能  $E_k$ , 即

$$E = E_k. \quad (6)$$

在碰撞过程中,动能  $E_k$  的一部分转换成应变能  $E_s$ , 另一部分转换成热能  $E_t$ , 那么

$$E = E_s + E_t. \quad (7)$$

碰撞之后,应变能  $E_s$  转换成新的动能  $E_{ks}$ 。因此,系统的总能量  $E$  可以写成

$$E = E_{ks} + E_t. \quad (8)$$

很明显,碰撞之后系统的动能  $E_{ks}$  将小于碰撞之前的动能  $E_k$ 。如果损失的能量  $E_t = K \cdot E_k$  ( $K < 1$ ), 那么,式(8)可以写成

$$E_{ks} = (1 - K) \cdot E_k = K_k \cdot E_k. \quad (9)$$

由于惯性力与动能成正比,因此,考虑能量损失后,惯性力可以写成

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = K_k \cdot M \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 v(t)}{\partial t^2} \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$

其中,  $M$  为材料密度。相应的惯性子矩阵为

$$[K_{ii}] = \frac{2MK_k}{\Delta t} \iint^T T dx dy. \quad (11)$$

笔者在 Windows 平台上开发了一个功能比较完善、界面友好的非连续变形分析程序——DDAW。由于它包含了前、后处理程序和高效的方程求解器,使得

DDAW 程序可以方便、高效地解决实际工程问题。

### 3 数值仿真分析

面板坝模型如图 5 所示<sup>[9]</sup>。模型坝高 1.4 m, 上、下游坡比均为 1:1.4。整个坝体被分成 4224 个块体, 面板以一个块体计算。计算中能量损失系数  $K$  取为 0.001。表 1 给出了堆石和面板材料的力学参数。计算中以 El-Centro 波作为输入地震动, 最大水平加速度  $0.45g$ 。计算时间步长为 0.0001 s。图 6 给出了无面板堆石坝的初始构形, 图 7~9 分别给出了无面板堆石坝在 4000、12000 和 21000 步时的系统变形图。图 10 给出了变形前后系统构形的比较。图 11~13 分别是面板坝在 8000、16000 和 24000 步时的系统变形图。图 14 给出了面板坝变形前后的比较。

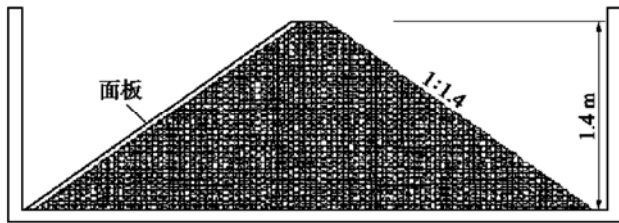


图 5 模型坝截面

Fig. 5 Cross section of model dam

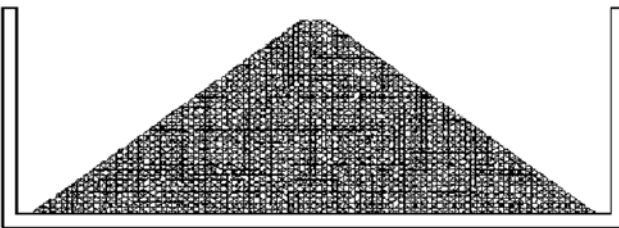


图 6 无面板堆石坝初始构形

Fig. 6 Initial configuration of the homogeneous rock-fill dam model

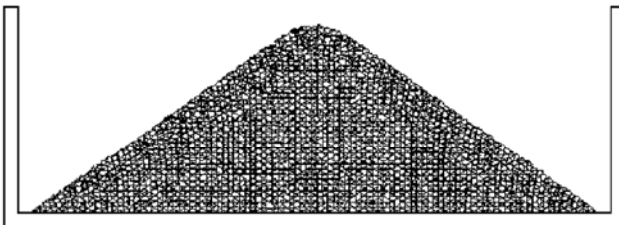


图 7 无面板堆石坝 4000 步时坝体构形

Fig. 7 Displacements of homogeneous model dam after 4000 steps

表 1 堆石和面板材料的力学参数

Table 1 Mechanical properties of rock-fill and facing slab materials

材料	$\rho$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$E$ /MPa	泊松比	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
堆石材料	1.55	42	210	0.30	0.1	0.1
面板材料	1.60	42	1100	0.28	0.1	0.1

从无面板堆石坝和面板坝的变形图中可以看到:

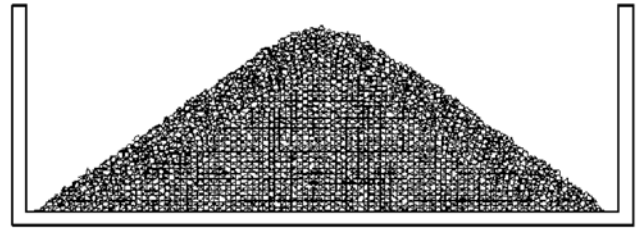


图 8 无面板堆石坝 12000 步时坝体构形

Fig. 8 Displacements of homogeneous model dam after 12000 steps

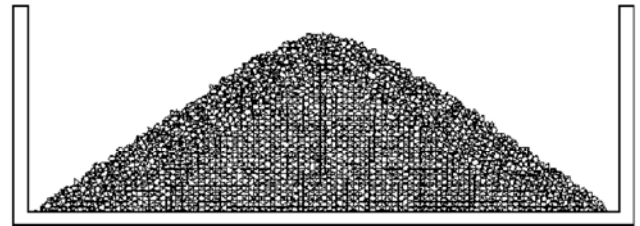


图 9 无面板堆石坝 21000 步时坝体构形

Fig. 9 Displacements of homogeneous model dam after 21000 steps

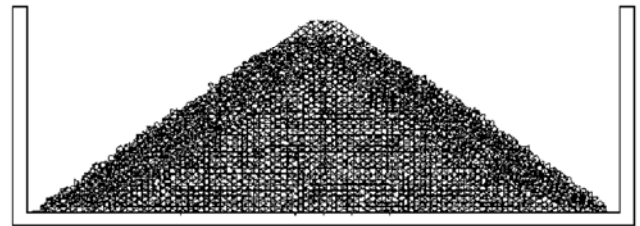


图 10 无面板堆石坝变形前后比较

Fig. 10 Comparison between initial and deformed homogeneous rock-fill dam



图 11 面板堆石坝 8000 步时坝体构形

Fig. 11 Displacements of faced rock-fill dam model after 8000 steps



图 12 面板坝 16000 步时坝体构形

Fig. 12 Displacements of faced rockfill dam model after 16000 steps

无论是无面板堆石坝还是面板坝其破坏形式都是坡面颗粒的松动并沿坡面的滑动, 然后坡面颗粒滑动的数量和范围逐渐扩大, 同时坝顶不断下沉, 没有形成特定的滑裂面。所不同的是, 无面板堆石坝为坝顶两侧对

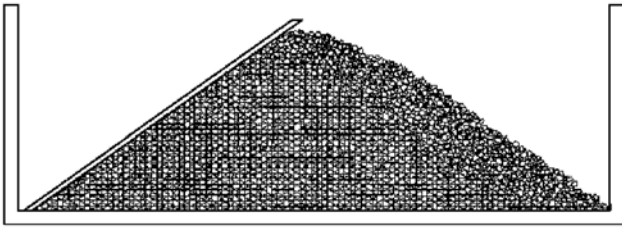


图 13 面板坝 24000 步时坝体构形

Fig. 13 Displacements of faced rock-fill dam model after 24000 steps

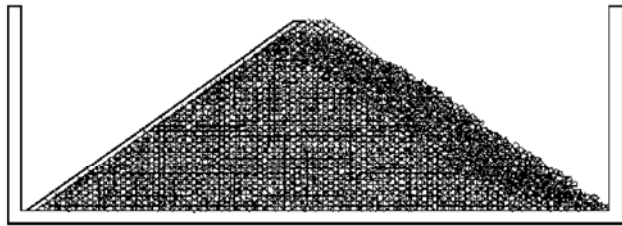


图 14 面板坝变形前后比较

Fig. 14 Comparison between initial and deformed faced rock-fill dam

称地滑动,而面板坝却仅发生在下游坝面,这些现象与振动台模型试验的结果很相似。

## 4 结 论

从振动台模型试验和数值仿真分析的结果可以得到如下结论:

(1) 动荷载作用下,由于坝顶部往复惯性力较大,使得坝顶及无面板的下游坝面表层土体松动、颗粒间咬合力丧失,因此面板坝的初始破坏主要发生在坝顶部下游坝坡表层,表现为颗粒的松动并沿浅层滑动,没有形成特定的滑裂面。上游坝面由于面板的作用而具有更高的稳定性。

(2) 保持面板坝下游坝坡的稳定是提高其整体抗震能力的关键问题,因此在地震区修建面板坝可采取

减缓下游坝坡、加宽坝顶、在下游坡设置马道以及在坝顶区采用抗剪强度较高的填筑材料等抗震有效措施。

(3) 数值仿真分析结果表明,DDA 方法能较好地模拟散粒体结构的动力破坏过程,即使在块体数目相当多的情况下仍能很快收敛。由于笔者采用了高效的方程求解器,使得 DDAW 程序有能力处理复杂的工程实际问题。

## 参考文献:

- [1] 顾淦臣,张振国. 钢筋混凝土面板堆石坝三维非线性有限元动力分析[J]. 水利发电学报, 1988, 1: 26-45.
- [2] Seed H B, et al. Seismic design of concrete faced rockfill dams [A]. Concrete Faced Rockfill Dams—Design, Construction, and Performance[C]. ASCE Convention, 1985. 459-478.
- [3] Bureau C, et al. Seismic analysis of concrete faced rockfill dams [A]. Concrete Faced Rockfill Dams—Design, Construction, and Performance[C]. ASCE Convention, 1985. 479.
- [4] 陈生水,沈珠江. 钢筋混凝土面板坝的地震永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 66-72.
- [5] 韩国城,孔宪京. 关于土石坝动力模型试验问题[A]. 岩土力学与工程[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1995. 82-87.
- [6] 韩国城,孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震研究进展[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(6): 708-720.
- [7] Shi Genhua. Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of deformable block structures[J]. Engineering Computations, 1992, 9: 157-168.
- [8] Pei Juemin. The effects of energy loss in block bumping on discontinuous deformation[A]. Proceedings of the 1st International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulations of Discontinuous Media [C]. Berkeley, California, 1996. 401-406.
- [9] 韩国城,孔宪京. 面板堆石坝抗震加固措施探讨[R]. 大连:大连理工大学土木工程系抗震研究室, 1993.

## 《广义塑性力学——岩土塑性力学原理》已经出版

由中国工程院院士郑颖人教授、中国科学院院士沈珠江教授和浙江大学龚晓南教授编著,既系统论述岩土塑性力学基础理论又反映我国岩土塑性力学水平与最新研究成果的新书《广义塑性力学——岩土塑性力学原理》,已于 2002 年 11 月由中国建筑工业出版社正式出版,大 16 开本,240 页,437 千字,定价 46.00 元。

本书是 2001 年度国家科学技术学术著作出版基金资助项目,该基金专项用于资助自然科学和技术科学方面优秀的和重要的学术著作的出版。内容包括岩土塑性力学概论、应力—应

变及其基本方程、屈服条件与破坏条件、塑性位势理论、加载条件与硬化规律、弹塑性本构关系、加卸载准则、应变空间表述的弹塑性理论、考虑应力主轴旋转的广义塑性力学、岩土非线性弹性模型、岩土弹塑性静力模型、土的动力模型等十二部分。全书内容新颖,系统详实,有相当的深度与广度。

本书可以作为土木、水利、地质、采矿等专业的高等学校和科研院所的研究生教材和本科高年级学生的选学教材,并可作为相关专业教师和工程技术人员进修的参考读物。

(后勤工程学院岩土工程研究所 供稿)