

文章编号: 1001-4888(2013)04-0460-09

基于石膏材料的小结构重力坝损伤本构模型研究^{*}

李润璞, 杜成斌, 王山山

(河海大学 力学与材料学院, 江苏南京 210098)

摘要:大坝模型试验的模型材料力学性能是试验成功与否的关键影响因素。基于石膏模型材料基本力学性质和混凝土材料基本相似的实际情况, 考虑石膏模型材料的孔隙率, 在能量损伤理论模型的基础上, 结合工程规范, 建立了石膏模型材料的受拉损伤本构模型。同时, 分析了模型材料应变率对材料峰值应力的影响, 引入动应力提高系数, 并给出了与应变率相关的模型材料受拉损伤本构模型。利用该本构模型模拟了动荷载下石膏模型重力坝的破坏过程, 并与模型试验结果进行对比。结果表明: 数值模拟得到的重力坝开裂破坏的位置、形式与模型试验结果较为接近。

关键词:模型材料; 受拉损伤; 力学性能; 损伤本构关系; 重力坝

中图分类号: TV41

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-154

0 引言

混凝土大坝安全关系国计民生, 但在地震荷载下其破坏的实例并不多, 世界范围内只有新丰江大头坝、Sefid Rud 大头坝、Koyna 重力坝和 Pacoima 拱坝在强烈地震下出现明显的震损等现象。强烈地震作用下混凝土高坝地震资料的缺乏, 使研究工作者转向高坝模型试验, 在实验室研究高坝模型的整个破坏过程。物理模型试验中, 选择合适的模型材料是模型试验的关键。迄今为止, 国内外有很多学者对模型材料进行了研究, 其材料性能各有优劣。Riyaz^[1]在大坝模型的振动台试验中用石膏、硅藻土、砂和水等混合物制作模型材料并取得了良好的效果。Donolon 和 Hall^[2]用石膏、铅粉、砂和水制成了模型材料, 并研究了此种材料制作的重力坝模型的裂纹形成和有损伤坝体的可靠性。朱彤^[3]等利用水泥、重晶石砂、矿石粉、速凝剂制作模型材料进行了重力坝和拱坝的破坏研究。但模型室内试验不能够反映影响坝体的全部影响因素, 同时在模型材料的动力相似性方面很难满足要求, 需要结合数值方法进行进一步研究分析。

最初由 Kachanov^[4]提出连续性因子和有效应力的概念, 现在损伤理论已发展成为固体力学的一个重要分支, 在金属、岩石、混凝土以及复合材料等方面得到广泛应用。混凝土损伤理论主要通过损伤变量建立材料损伤本构关系, 联立力学基本方程, 预测结构的失效过程^[5], 近期学者开始引入一些数学物理方法对损伤理论进行了研究改进。李杰等^[6]把概率分布引入损伤模型建立了非线性与随机性相耦合的混凝土随机断裂滑移模型。刘军等^[7]依据热力学定律研究了混凝土非线性损伤本构模型, 分析了缺口梁的破坏过程。张全胜等^[8]则以初始损伤状态作为基准无损伤状态研究了岩石的损伤本构关系。不同加载速率引起材料内部微裂纹不同细观特征的扩展, 受力面面积的折减率相应变化, 进而影响材料的宏观力学特性。孔隙材料的孔隙率和连续损伤力学中损伤变量的定义是等价的, 可通过材料的孔隙率

^{*} 收稿日期: 2012-11-02; 修订日期: 2013-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(11132003, 50779011)资助项目

通讯作者: 李润璞(1985—), 男, 博士生, 主要研究领域: 结构试验与工程抗震。E-mail: lirunpu2006@163.com

来分析应变率对模型材料损伤发展的影响。

本文在模型材料相关试验的基础上,以模型材料孔隙率作为模型材料损伤变量的影响因子,应用损伤力学的基本原理,对掺入石膏配料的模型材料进行分析,提出了一种含参数的石膏基混合模型材料的损伤模型。考虑应变率对模型材料抗拉性能的影响,给出了动荷载下模型材料的损伤模型,并在此基础上进行了重力坝模型动载试验模拟分析。

1 模型材料试验

以石膏、水、重晶石粉等材料制备了混合模型材料,并利用这种模型材料吸水的性质,测定了孔隙率。将烘干的模型材料试件(质量为 m)垂直插入水中,测量其吸水高度 h ,得到吸水后模型材料试件的质量 m' 。模型材料的孔隙率 ω 可通过式(1)计算:

$$\omega = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{specimen}}} = \frac{m' - m}{\rho_{\text{water}} \cdot h l w} \quad (1)$$

式中, ρ_{water} 为水的密度; l 为烘干后模型试件的长度; w 为烘干后模型材料试件的宽度。

加载设备为 CSS44100 型万能试验机,数据采集系统是试验机自带的动态信号实时分析系统(DSPS),数据采集频率 10^5 s^{-1} ,基本保证了试验过程中试验数据收集的准确性和完整性。

采用 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ 的试件进行了轴心抗拉强度的测定。轴心抗拉强度按下式计算:

$$f_t = \frac{P}{A} \quad (2)$$

式中, f_t 为轴心抗拉强度, MPa; P 为破坏荷载, N; A 为试件断面面积, mm^2 。

抗拉弹性模量按下式计算:

$$E_t = \frac{\sigma_{0.5}}{\epsilon_{0.5}} \quad (3)$$

式中, E_t 为轴心抗拉弹性模量, MPa; $\sigma_{0.5}$ 为 50% 的破坏应力, MPa; ϵ_t 为 $\sigma_{0.5}$ 所对应的应变值, 1×10^{-6} 。

变形测量采用东华 DH3818 动静态应变测试系统,其中电阻应变片标距为 100 mm。试验结果如图 1 所示,无量纲化后的模型材料试件应力应变关系曲线与规范中混凝土单轴受拉应力应变关系曲线近似,验证了模型材料的可行性。

2 受拉本构关系

在材料受力破坏的过程中,外力功主要转化为三部分:弹性应变能、塑性应变能和材料损伤^[9]。材料处于

无损理想状态时,其应力应变曲线为直线,即 $\sigma = E\epsilon$ 。Jerzy Najjar^[10]定义了无损理想状态下材料的应变能:

$$W_{\text{perf}} = \frac{1}{2} E \epsilon^2 \quad (4)$$

式中, E 为材料无损状态下的弹性模量; ϵ 为均匀应变。

由图 1 可知,材料实际应力—应变曲线并非在整个材料受力全过程中都为线性,如峰值点时材料已经达到极限强度,内部损伤已经扩展,此时外力功为:

$$W_{\epsilon} = \int \sigma(\epsilon) d\epsilon = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \quad (5)$$

Jerzy Najjar^[10]定义损伤为:

$$D = \frac{\Delta W_{\epsilon}}{W_{\text{perf}}} = \frac{W_{\text{perf}} - W_{\epsilon}}{W_{\text{perf}}} = 1 - \frac{W_{\epsilon}}{W_{\text{perf}}} \quad (6)$$

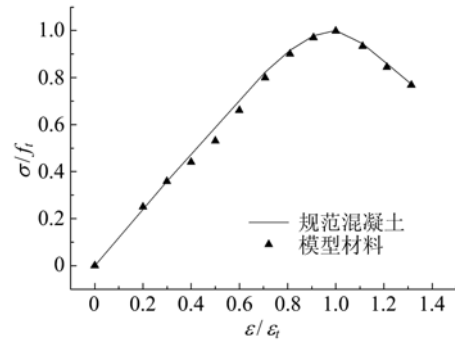


图1 模型材料和混凝土材料的无量纲化应力—应变曲线对比

Fig. 1 Dimensionless stress-strain curves of model material and concrete

综合式(3)~(5),得损伤变量:

$$D = 1 - \frac{W_\epsilon}{W_{\text{perf}}} = 1 - \frac{\sigma\epsilon/2}{E\epsilon^2/2} = 1 - \frac{\sigma}{E\epsilon} \quad (7)$$

上式是基于能量尺度的损伤变量 D 表达式,从唯像学的角度看,这种结构损伤参数表达方法应用更具广泛性,且不受裂纹(损伤)分布和几何形状的影响,反映了材料内部能量耗散和结构内部微观结构的劣化,从而可以在不对材料内部细观裂纹研究的情况下,对材料结构进行损伤分析。从式(6)的形式不难看出,材料的外力功 W_ϵ 与材料无损状态下的应变能 W_{perf} 之间的关系直接反映了材料的损伤状态,当 $\frac{W_\epsilon}{W_{\text{perf}}}$ 等于 1 时,材料处于理想无损状态; $\frac{W_\epsilon}{W_{\text{perf}}}$ 小于 1 时,材料处于损伤状态。

《混凝土结构设计规范》附录^[11]建议混凝土单轴受拉应力应变曲线:

$$\sigma = \begin{cases} \rho_t(1.2 - 0.2x^5)E_c\epsilon, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_t \\ \frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} \cdot E_c\epsilon, & \epsilon_t \leq \epsilon \leq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c\epsilon_{t,r}}$$

式中, x 为 $\epsilon/\epsilon_{t,r}$ 的比值; $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度; $\epsilon_{t,r}$ 为与 $f_{t,r}$ 相对应的混凝土峰值拉应变; α_t 为单轴受拉应力应变曲线下降段参数值。

令 $y = \frac{\sigma}{f_{t,r}}$, 式(8)简写为:

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^5, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_t \\ \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}, & \epsilon_t \leq \epsilon \leq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (9)$$

根据材料单轴受拉应力应变曲线,材料在无损状态下,其应力应变有如下关系:

$$\sigma = E\epsilon, \quad f_{t,r} = E\epsilon_t \quad (10)$$

模型材料的孔隙率是影响材料力学性能的重要影响因素^[12]。实际测得的模型材料试件的孔隙率 ω 为 20%~35%。在模型材料损伤模型中引入与孔隙率相关的材料损伤影响因子 β :

$$\beta = \kappa\omega \quad (11)$$

式中, κ 为与材料相关的影响因子。

模型材料损伤状态可以表示为:

$$(E\epsilon)(E\epsilon_t) = \sigma f_{t,r} \cdot \beta = \sigma f_{t,r} \cdot \kappa\omega \quad (12)$$

于是:

$$\frac{y}{x} = (1 - D)^2 \beta \quad (13)$$

模型材料受拉全过程损伤变量可表达为,

$$D_t = \begin{cases} 1 - \left[\frac{1.2 - 0.2x^5}{\kappa\omega} \right]^{0.5}, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_t \\ 1 - \left[\frac{1}{\alpha_t} \cdot \frac{1}{\kappa\omega(x-1)^{1.7} + x} \right]^{0.5}, & \epsilon_t \leq \epsilon \leq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (14)$$

经典的损伤模型如 Loland 模型以及分段曲线模型考虑了材料峰值前损伤发展,这与声发射试验结果比较符合^[13],而其他损伤模型没有考虑峰值前损伤,但是 Loland 模型峰值应力之后损伤为线性发展,与试验结果不符。常用的损伤模型材料受拉损伤曲线见图 2,可以看到,各个损伤模型中损伤变量值在应力跌落之后渐渐趋于平缓,与试验中材料损伤发展趋势相符^[14]。不同材料孔隙率对模型材料受拉损伤变量值 D_t 的影响见图 3,可以看出随着材料孔隙率的变大,模型材料的初始损伤显著增大。模型材料力学性能参数试验材料孔隙率为 25%,影响因子 κ 取为 5。从图 3 中可以看到,模型材料的损伤变量值在峰值应变之前已有损伤发展,且峰值后损伤曲线非线性,损伤程度积累高,适于描述模型材料损伤演化过程。

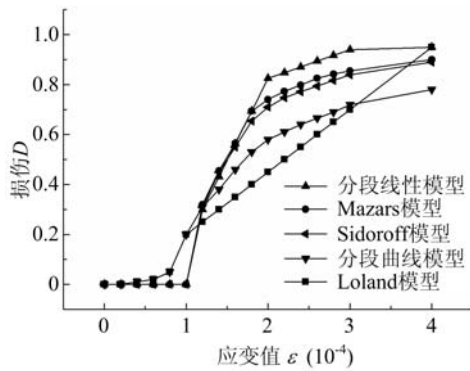


图2 经典受拉损伤模型的损伤曲线

Fig. 2 Classic tension damage curve

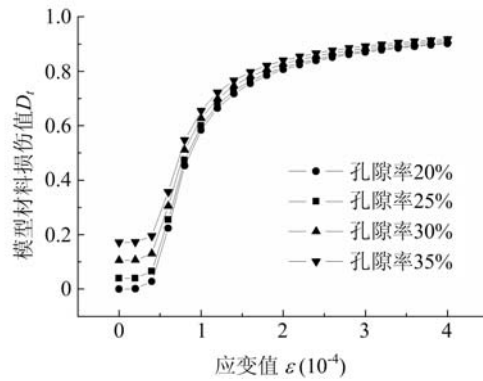


图3 不同孔隙率下含参数的模型材料受拉损伤曲线

Fig. 3 Tension damage curve of model material with different porosity

应变速率对材料力学性质的影响是建立材料动力本构关系的难点。如果能够利用材料静力成果对其进行某些修正,得到满足工程精度要求的材料动力本构关系,不失为一种研究方法。本文在计算重力坝模型冲击试验时引入动应力提高系数 $K^{[11-12]}$,得到动力损伤变量方程:

$$D_{dt} = |1 - K(1 - D_s)|$$

$$K = \frac{\sigma_{dt}(\dot{\epsilon})}{\sigma_s(\dot{\epsilon})} \quad (15)$$

式中, D_s 为静力损伤变量; D_{dt} 为动力损伤变量; K 为动力情形下的材料应力, $\sigma_{dt}(\dot{\epsilon})$ 为与拟静力情形下材料应力 $\sigma_s(\dot{\epsilon})$ 的比值; $\dot{\epsilon}$ 为不同加载速率对应的模型材料应变率。

为了研究动态荷载对模型材料强度的影响,在不考虑材料率效应的背景下,采用不同的加载速率对模型材料制作的梁进行四点弯曲仿真分析。共分为五个工况,加载速率从工况一(10^{-4} m/s)到工况五(1 m/s)依次增加,各工况间加载速率依次增加倍数为十倍,对应应变率分别为: 0.0003s^{-1} 、 0.003s^{-1} 、 0.03s^{-1} 、 0.3s^{-1} 和 3s^{-1} ,部分加载时程如图4所示。为对比静力试验结果,图5给出了五个工况的荷载位移曲线。

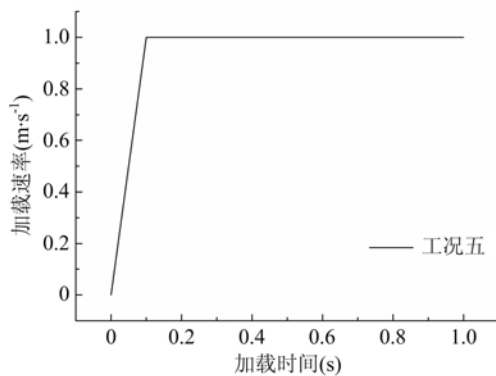


图4 加载曲线

Fig. 4 Loading curves for calculation

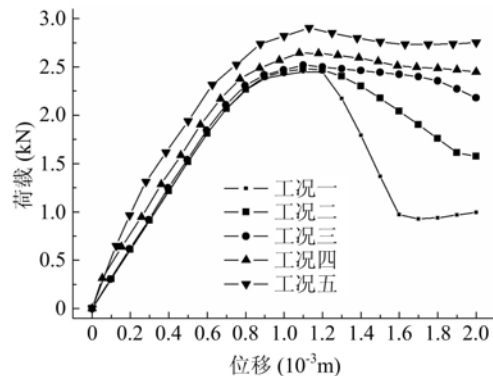


图5 跨中的荷载—挠度曲线

Fig. 5 Curves of load-displacement at mid-span

表1为五个工况不同加载速率下的数值结果。表中数据显示加载速率对模型材料力学性能的影响明显,各工况依次较准静态加载时对应的抗拉强度增加了约15%、17%、19%、25%和37%,随着加载速率(或应变率)数量级的增加,模型材料的抗拉强度较准静态抗拉强度呈指数增加的趋势。

结合以上仿真数据,动态荷载下模型材料的峰值应力与应变率之间可以用指数函数表示,见图6所示,相关系数 $R=0.998$,拟合公式见下式:

$$\sigma_{dt}(\dot{\epsilon}) = 0.01088\dot{\epsilon}^{0.3544} + 0.08335 \quad (16)$$

表 1 模型材料仿真数据

Tab. 1 Simulation data of model material

工况	加载速率(m/s)	最大荷载(N)	峰值应力(Pa)	应变率(s)
工况一	0.0001	2450.14	83908.90	0.0003
工况二	0.001	2480.10	84934.93	0.003
工况三	0.01	2518.50	86250.00	0.03
工况四	0.1	2644.38	90560.96	0.3
工况五	1	2902.02	99384.25	3

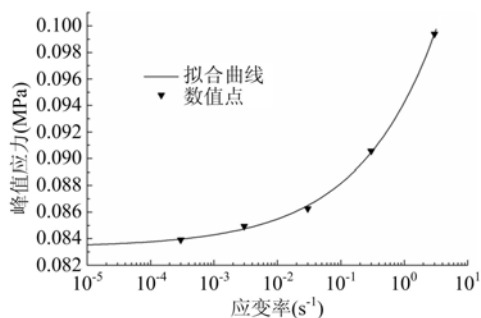


图 6 峰值应力—应变率关系

Fig. 6 Peak stress-strain ratio curve of model material

图 6 给出了石膏模型材料峰值应力与其应变率之间的关系曲线,从图中可以看出,模型材料的峰值应力随着应变率的增加而增加,当应变率较小时,其变化对材料的力学性质影响较小,当应变率超过 0.3s^{-1} 时,模型材料峰值应力增加明显。改进的欧洲混凝土规范^[17]提出的混凝土动态抗拉强度建议公式考虑动态应变率转折点,得到动态应变率的指数成线性关系的分段函数,曲线为单调增加的双线性直线。建议石膏基模型材料以应变率 0.3s^{-1} 为其动态应变率转折点,因此本文提出的石膏基模型材料的动应力提高系数 K 曲线性态是合适的。结合式(14)、式(15)和式

(16),可以得到模型材料在不同应变率下的损伤变量表达式:

$$D_{dt} = \begin{cases} \left| 1 - K \left(\frac{1.2 - 0.2x^5}{\kappa\omega} \right)^{0.5} \right|, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_t \\ \left| 1 - K \left(\frac{1}{\alpha_t} \cdot \frac{1}{\kappa\omega(x-1)^{1.7} + x} \right)^{0.5} \right|, & \epsilon_t \leq \epsilon \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (17)$$

$$K = 0.1305\epsilon^{0.3544} + 1.0000$$

3 算例分析

3.1 静力加载算例

采用石膏基模型材料制作的标准试件进行四点弯曲试验,以验证本文提出的含参数的模型材料受拉损伤模型的适用性。模型试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$,在自然条件下养护 45d,万能试验机(型号 CSS44100)由长春试验机研究所生产,模型材料试件加载条件及其破坏形式见图 7,模型材料试件试验位移荷载曲线如图 8 所示。有限元模型见图 9,剖分的单元总数为 3332,节点总数为 3449,单

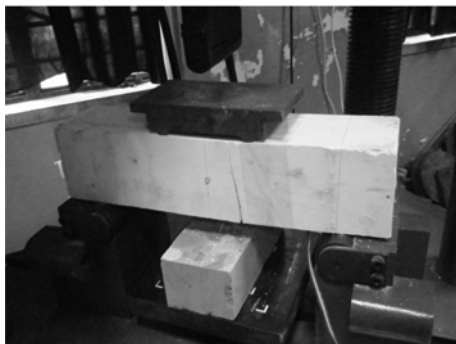


图 7 模型材料试件四点弯曲破坏效果图

Fig. 7 The damage of four-point bending specimen

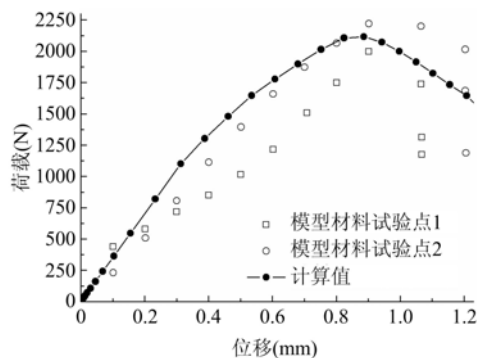


图 8 模型材料试件四点弯曲荷载位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of four-point bending specimen

元形状均为四边形单元。石膏模型材料的弹性模量为 2.943MPa , 泊松比为 0.20 , 抗拉强度为 0.08MPa , 容重为 $9830\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ 。利用含参数的模型材料受拉损伤模型编写 ABAQUS 子程序, 计算得到试件的损伤区域如图 9。

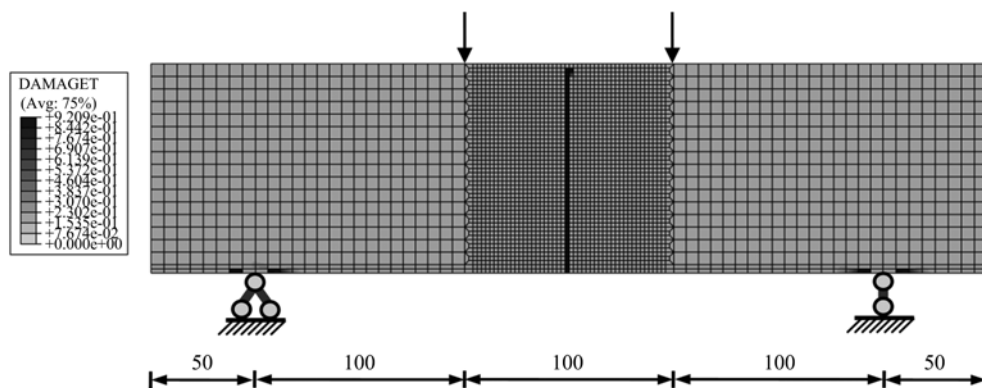


图9 模型材料试件四点弯曲损伤示意图

Fig. 9 Tensile damage of four-point bending specimen in simulation

采用本文建议的损伤模型模拟模型试件四点弯曲过程得到的塑性损伤区域, 与实际四点弯曲试验的破坏形式相似, 极限荷载计算值达到 2115.14N , 较试验平均值 2108.4N 大 0.3% ; 四点弯曲梁梁底中间部位的局部损伤达到 0.92 , 损伤区域在梁底中部几近贯通梁高, 具体见图 8 和图 9。

3.2 重力坝模型动力试验算例

根据本文建议的模型材料动力受拉损伤模型, 对用模型材料制作的重力坝小结构模型进行了损伤分析。动力损伤试验模型采用云南金安桥水电站混凝土重力坝的 5 号坝段, 模型比例 $1:200$, 模型材料为石膏混合料。有限元计算材料参数同 3.1 小节, 有限单元网格采用三角形网格, 剖分的单元总数为 28849, 节点总数为 14714, 动载计算时取阻尼比 0.02 , 加载时间步长 0.00001s 。冲击荷载^[18]采用 CL-YD-302 力锤施加, 冲击荷载施加的位置在重力坝模型试件顶部, 冲击荷载时程曲线见图 10。

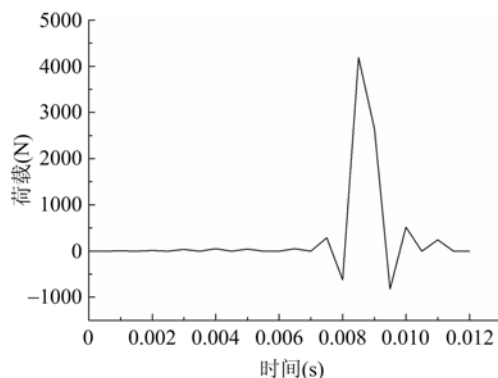


图10 小结构模型试验冲击荷载时程曲线

Fig. 10 Typical time history of the impact load

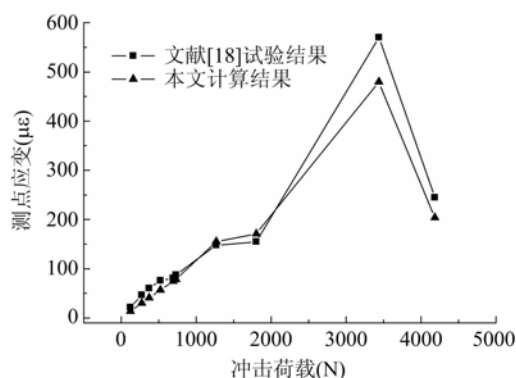


图11 上游坝面中部测点加速度响应最大值

Fig. 11 Curve of maximal acceleration response at the middle of the structure

上游坝面中部测点的加速度响应最大值及下游坝面中部测点的应变响应最大值分别见图 11 和图 12。分析计算结果显示, 在小结构模型破坏之前, 上游坝面测点的加速度响应最大值随着荷载的增加而变大, 下游坝面测点的应变响应最大值也随着荷载的增加而变大; 当小结构模型发生破坏时, 上下游坝面测点的加速度响应最大值和应变响应最大值都有所下降。可以看出, 损伤分析计算结果与小结构模型试验结果趋势相似, 值得注意的是, 坝面测点处加速度响应计算值比试验值小, 而坝面测点处的应变响应计算值较试验值大, 这与石膏基模型材料强度低、脆性较大有关, 模型材料的动强度提高能力并不能随其应变率的提高而持续下去, 这也是小结构模型响应在达到峰值之后变小的一个重要原因。

小结构模型在破坏荷载 4185.7 N 作用时重力坝模型上游坝面中部的加速度响应时程曲线见图 13, 可以看出, 此时小结构模型中部测点在整个时间历程中其最大加速度发生在峰值荷载之后, 其值为 269.4 m/s^2 , 较文献[18]的小结构模型试验结果 (245.0 m/s^2) 大 9%。

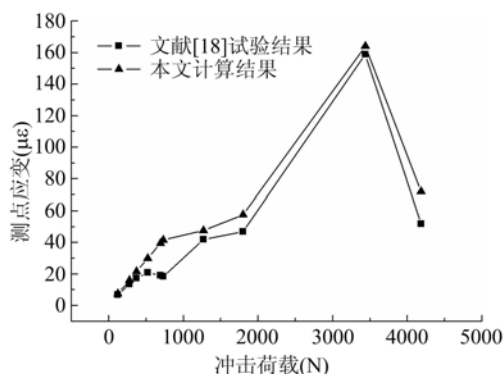


图 12 下游坝面中部测点应变响应最大值
Fig. 12 Curve of maximal strain response
at the middle of the structure

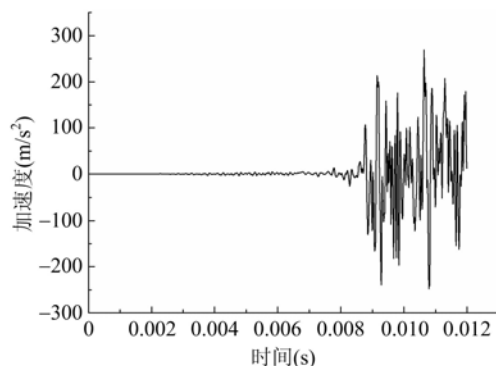
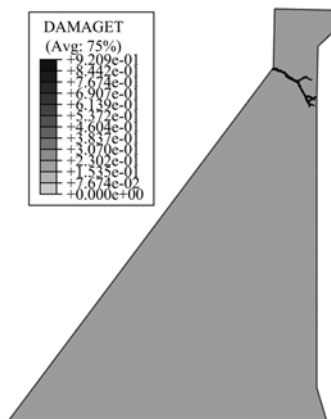


图 13 模型试验破坏加速度响应时程曲线计算结果
Fig. 13 Typical time history of acceleration response
at the damage stage in simulation

塑性损伤区域与实际试验的破坏形式对比见图 14, 从图中可以看出, 小结构模型破坏形式与含参数的模型材料受拉损伤模型计算得到的拉损伤区域相似, 坝顶折坡处的局部损伤达到 0.92, 损伤区域在重力坝顶部折坡处几近贯通。



(a) 小结构模型试验破坏形式^[18]



(b) 小结构模型受拉损伤示意图

图 14 试验破坏形式与数值损伤区域对比

Fig. 14 Comparison between test and simulation

4 结论

本文考虑模型材料孔隙率的影响, 基于应变能理论建立了模型材料受拉损伤模型, 把自编模型 ABAQUS 子程序嵌入 FEM 程序, 并对石膏基模型材料试件拟静力四点弯曲以及重力坝动力响应进行了试验对比。结果表明, 模型材料损伤影响因子取为 0.8 较为合适, 静载作用下四点弯曲梁极限荷载数值结果较试验结果平均值大 0.3%; 动力算例中, 小结构模型的响应没有随着冲击荷载的增加而持续增加, 验证了所建议的模型材料受拉损伤变量方程的适用性。研究了模型材料的孔隙对材料损伤的影响, 分析了模型材料动荷载作用下其应变率与峰值应力的关系, 为模型试验研究分析提供了参考, 为后续大模型试件试验提供了理论方法。

参考文献:

- [1] Riyaz A M, Taylor C A. An Experimental Investigation into Earthquake-Induced Failure of Medium to Low Height Concrete Gravity Dams [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24:373—393.
- [2] Donolon W P, Hall J F. Shaking table study of concrete gravity dam monoliths [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, 20:769—786.
- [3] 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 (ZHU Tong, LIN Gao, MA Hengchun. The test research on properties and applications of emulation concrete material [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(4):31—37 (in Chinese))
- [4] Kachanov L M. On the time to failure under creep conditions [J]. Izv. Akad. Nauk. USSR, Otd. Tekhn. Nauk., 1958, 8:26—31.
- [5] 何建涛, 马怀发, 陈厚群. 混凝土损伤本构理论研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3):89—94 (HE Jiantao, MA Huaifa, CHEN Houqun. Research review on concrete damage constitutive theory [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3):89—94 (in Chinese))
- [6] 李杰, 卢朝辉, 张其云. 混凝土随机损伤本构关系—单轴受压分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(5):505—509 (LI Jie, LU Chaohui, ZHANG Qiyun. Study on Stochastic Damage Constitutive Law for Concrete Material Subjected to Uniaxial Compressive Stress [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(5):505—509 (in Chinese))
- [7] 刘军, 林皋. 适用于混凝土结构非线性分析的损伤本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6):50—57 (LIU Jun, LIN Ben. Study of damage constitutive model applied to simulate nonlinear behavior of concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6):50—57 (in Chinese))
- [8] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1):30—34 (ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New Study of Damage Variable and Constitutive Equation of Rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1):30—34 (in Chinese))
- [9] 李淑春, 刁波, 叶英华 等. 反复荷载作用下的混凝土损伤本构模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(4):12—17 (LI Shushun, DIAO Bo, YE Yinhua, et al. Damage constitutive model of concrete under cyclic loading [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4):12—17 (in Chinese))
- [10] Jerzy Najar. Continuous damage of brittle solids [C]//Krajcinovic D, Lemaire J. Continuum damage mechanics theory and applications. New York: Springer—Verlag, 1987: 233—294.
- [11] GB50010—2010. 混凝土结构设计规范[S] (GB50010—2010. Code for design of concrete structure[S] (in Chinese))
- [12] 童明伟, 吴中正, 胡鹏 等. 石膏不同组份对孔隙率的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2011, 34(10):97—102 (TONG Mingwei, WU Zhongzheng, HU Peng, et al. Theoretical analysis and experimental study on the effect of the different components of porous medium gypsum on porosity [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(10):97—102 (in Chinese))
- [13] 过镇海. 混凝土的强度和变形[M]. 北京:清华大学出版社, 1997:172—175 (Guo Zhenhai. The strength and deformation of concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997:172—175 (in Chinese))
- [14] 于海祥. 基于理想无损状态的混凝土弹塑性损伤本构模型研究及应用[D]. 重庆大学, 2009 (Yu Haixiang. Research and Application on Elastoplastic Damage Constitutive Model for Concrete Based on Ideally Undamaged State [D]. Chongqing University, 2009 (in Chinese))
- [15] 李庆斌, 张楚汉, 王光纶. 单压状态下混凝土的动力损伤本构模型[J]. 水利学报, 1994(3):55—60 (Li Qingbin, Zhang Chuhan, Wang Guanglun. Dynamic damage constitutive model for concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(3): 55—60 (in Chinese))
- [16] 李庆斌, 邓宗才, 张立翔 等. 考虑初始弹模变化的混凝土动力损伤本构模型 [J]. 清华大学学报, 2003, 43(8): 1088—1091 (LI Qingbin, DENG Zongcai, ZHANG Lixiang, et al. Dynamic damage constitutive model for concrete accounting for the difference of the initial elastic modulus [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(8):1088—1091 (in Chinese))
- [17] L Javier Malvar, C Allen Ross. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. ACI Material Journal, 1998:735—739.

- [18] 王山山, 任青文. 重力坝在冲击荷载作用下破坏模型试验[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5):11—13 (WANG Shanshan, REN Qingwen. Experimental study of the gravity dam damage caused by impact load [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5):11—13 (in Chinese))

Damage of Gypsum Material Gravity Dam Model

LI Run-pu, DU Cheng-bin, WANG shan-shan

(Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Mechanical property of dam model material is the critical factor to success. Since the fundamental mechanical property of GMM (gypsum model material) is basically similar with that of concrete, so based on energy damage model, a tensile damage constitutive model for GMM was established by taking into account the porosity of GMM and engineering specifications. In addition, a quantitative analysis of the effect of model material strain rate on the GMM peak stress was conducted, a dynamic stress increase factor was introduced. Thus a tensile damage constitutive model related with strain rate for GMM was obtained. Using this constitutive model, the failure process of gravity dam gypsum model subjected to dynamic loading was simulated and its results were compared with experimental one. Results show that the crack damage position and crack pattern of gravity dam from numerical simulation are close to that from model experiment.

Keywords: model materials; tensile damage; mechanical properties; damage constitutive relation; gravity dam