

DOI: 10.11779/CJGE201702022

基于混凝土不均匀性面板堆石坝面板损伤分析

徐斌^{1,2}, 刘小平², 邹德高^{1,2}, 孔宪京^{1,2}, 余翔²

(1. 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; 2. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 将混凝土面板堆石坝中面板混凝土视为宏观上均质、细观上不均匀的材料, 结合统计学原理, 考虑材料参数分布的随机性, 通过二维有限元数值分析, 研究了混凝土的弹性模量和抗拉强度随机性对面板堆石坝面板动力损伤分布规律的影响。计算结果表明: 不考虑面板混凝土材料参数随机性时, $(0.65\sim0.85)H$ (H 为坝高) 处面板顺坡向应力较大, 拉损伤主要发生在 $0.8H$ (H 为坝高) 附近的面板处; 随着混凝土材料不均匀性增大, 发生拉损伤的部位趋于分散, 但主要集中在 $(0.4\sim0.9)H$ 范围内的面板。因此这部分面板应该是抗震设计的重点区域。采用混凝土弹脆性细观损伤模型, 考虑材料参数的随机性, 能够直观地阐明混凝土面板的地震破坏过程和损伤分布, 便于了解面板薄弱环节, 研究成果可以为混凝土面板堆石坝抗震设计提供参考。

关键词: 面板堆石坝; 混凝土; 细观损伤模型; 随机分布; 损伤

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)02-0366-07

作者简介: 徐斌(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高土石坝抗震和岩土地震工程等方面的教学和科研。E-mail: xubin@dlut.edu.cn。

Slab damage of concrete face rockfill dam based on heterogeneity of concrete

XU Bin^{1,2}, LIU Xiao-ping², ZOU De-gao^{1,2}, KONG Xian-jing^{1,2}, YU Xiang²

(1. State Key Laboratory of Coastal & Off shore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Considering the heterogeneity characteristics of concrete materials, the method of the mesoscopic mechanics is used to investigate the dynamic damage of slabs of concrete face rockfill dam (CFRD) combined with the statistical principle. The mechanical properties, including the elastic modulus and tensile strength, of concrete are assumed to conform to the Weibull distribution law. The elastic-brittle damage model is adopted to simulate the whole deformation and failure process for concrete on a meso-scale through 2D finite element analysis. The results show that the maximum slope-direction tensile stresses in the slabs mainly occur at the height of $0.65H$ to $0.85H$ (H is the height of the dam), and the tensile damage of slabs mainly occur at the height of $0.8H$ when the randomness of concrete materials is neglected. With the decrease of homogeneity index, the region of the dynamic damage of slabs is scattered, but it is mainly concentrated at the height of $0.4H$ to $0.9H$. Thus, this part of the slab should be the key area of seismic design for CFRD. The micromechanical damage model for concrete can reflect the damage process of slabs precisely. The research may provide guidance for the seismic design of CFRD.

Key words: CFRD; concrete; mesoscopic damage model; random distribution; damage

1 研究背景

与心墙坝相比, 混凝土面板堆石坝优势主要在于安全性和经济性更好, 还能适应不良的气候、地形和地质条件。近年来, 随着中国水利事业的迅速发展, 一大批高面板堆石坝正处在建设或设计中, 如茨哈峡、古水等水电站设计坝高均接近或达到300 m级。高面板坝的修建对于施工工艺水平和质量都提出了更高的要求, 尤其是防渗体系。混凝土面板作为面板坝的主要防渗结构, 其安全可靠的运行是大坝正常工作的重要保障。

面板混凝土是一种力学特性复杂的非均匀准脆性材料。在细观层次上, 由于混凝土骨料、孔隙等在基质中随机分布, 使其宏观力学特性具有较强的随机性。此外, 施工过程中搅拌、运输、浇筑等因素, 也导致面板不同位置的混凝土力学性能的差异。目前对面板堆石坝分析时, 面板基本被视为均质材料并采用线弹性模型^[1]模拟, 导致计算的应力往往远超过混凝

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215301);
国家自然科学基金项目(51379028, 51379028, 51508071)

收稿日期: 2015-11-19

土的强度。事实上, 线弹性模型仅能表达低荷载下混凝土的应力应变关系, 不能描述随应力的增加, 混凝土发生损伤开裂造成的刚度退化和应变软化的特性。因此, 有必要采用混凝土的损伤模型并考虑材料的不均匀性来描述面板的非线性性能, 这对高面板堆石坝的抗震设计尤为重要。

基于经典力学理论提出的混凝土本构模型, 往往忽略了混凝土内部细观结构的非均匀性, 因此很难准确的描述混凝土整个变形过程中的力学特性。国内外一些学者从混凝土的细观结构角度出发, 利用细观力学研究方法并结合统计学理论进行相应的本构关系研究。Bazant 等假设材料为圆形颗粒组成, 并考虑粒子分布的随机性, 以模拟混凝土骨料的力学特性, 提出了随机粒子模型^[2], 但模型中忽略了各粒子间的摩擦力与剪力; 武明鑫等^[3]基于颗粒元建立混凝土细观模型, 通过混凝土动力弯曲试验, 进行了率效应的研究; Tang 等^[4]、Zhu 等^[5]用带有残余强度的弹脆性本构关系来表达, 基于微元强度的统计分布建立了反映材料非均匀性与变形非线性的弹性损伤模型, 模型简单容易实现。Zhong 等^[6]采用该模型模拟了拱坝的破坏模式, 并与振动台试验进行了对比, 结果得到很好的吻合。唐欣薇等^[7]、Tang 等^[8]基于细观损伤力学模型进行了 Koyna 大坝的模拟, 模拟坝体破坏形式与实际相一致。田威等^[9]通过细观损伤理论建立了混凝土三维损伤演化方程, 并通过 CT 试验进行验证, 成功的模拟的混凝土微裂纹的萌生、扩展、贯通, 到宏观裂纹的产生过程。

本文在前期筑坝堆石料弹塑性本构模型和广义塑性接触面模型研究的基础上, 采用唐春安等提出的带有残余强度的混凝土弹脆性细观本构模型, 建立了面板堆石坝面板动力损伤的弹脆性分析方法。通过考虑面板由于施工及材料本身等因素引起的不均匀性, 研究混凝土面板在地震荷载作用下的损伤过程和分布规律。

2 混凝土细观单元模型

2.1 混凝土的不均匀性

由国内外大量的试验资料可知, 混凝土是典型的非均匀材料, 由于其构成为多项材料的复合物, 加上施工工艺的影响, 混凝土内部总不可避免的存在大量的微裂纹、微孔洞等。这些缺陷使混凝土内部存在着强度不同的薄弱环节, 并且这部分微元体的力学性质(强度、弹性模量等)也不能保持一致。

在数值模拟混凝土受力破坏过程时, 为了描述其材料性质的非均匀性, 混凝土面板经有限元离散后,

认为各个细观单元的材料特性符合一种随机分布—Weibull 分布^[10]。目前, Weibull 分布被广泛应用于可靠性研究和断裂力学研究之中, 可以很好的反映材料特性分布的随机性, 其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{m}{x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{m-1} e^{-(x/x_0)^m} \quad (1)$$

式中 m 为材料的均质度, 反映统计模型中参数的均匀程度, $m > 0$, 其中 m 值越大, 表示微元体的力学性质分布越窄, 材料越均匀, 当 m 趋于无穷大时, 则统计模型趋于理想的均匀分布; x 表示满足的统计参数(本文指弹性模量和抗拉强度), x_0 为统计参数的平均值。图 1 表示混凝土的概率密度值随 x/x_0 变化曲线, 由图可以看出随着 m 的增大, 概率密度曲线越趋近平均值, 表示均质度增大, 混凝土材料趋近均匀。

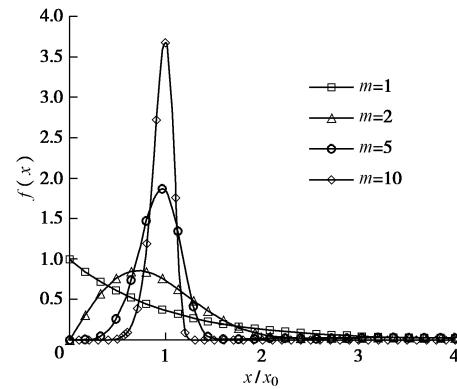


图 1 Weibull 分布概率密度曲线

Fig. 1 Probability density curves of Weibull distribution

数值分析时, 将面板单元看作为宏观上均匀, 细观上不均匀的材料。由于单元尺寸较小, 可以将面板离散后的单元作为一个总体样本空间, 各个单元力学特性均符合 Weibull 分布。通过取不同的均质度, 来反映面板的不均匀性的强弱。给定混凝土单元材料参数平均值和均质度参数 m 后, 按式(1)对每个混凝土单元材料参数进行随机赋值, 均质度参数 m 则保证所有单元材料参数整体满足 Weibull 分布。图 2 表示在不同均质度时面板单元数与抗拉强度关系图。从图中可以看出随着均质度 m 值增大, 靠近平均值强度的单元数目增多。图 3, 4 分别表示不同的 m 取值, 混凝土面板单元弹性模量和抗拉强度的分布云图, 其中颜色越深表示单元弹性模量(抗拉强度)越高。由于目前没有关于面板混凝土材料随机分布的均质度试验相关报道, 故本文分别取材料均质度 m 为 2, 5 和 10 进行敏感性的数值分析。

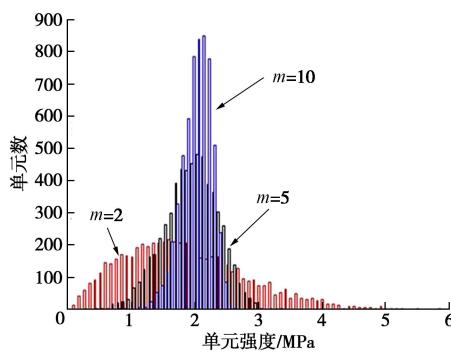


图 2 不同均质度时面板单元数与抗拉强度图
Fig. 2 Graph of unit number of slab with tensile strength

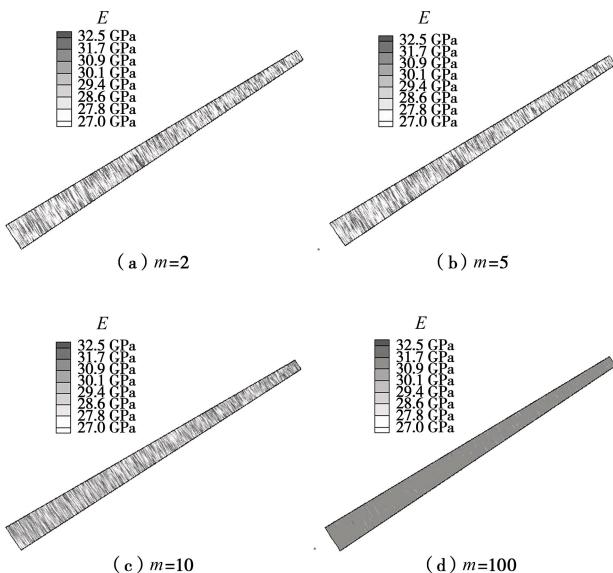


图 3 不同均质度面板单元弹性模量分布云图
Fig. 3 Nephogram of elastic modulus distribution for different homogeneity indices

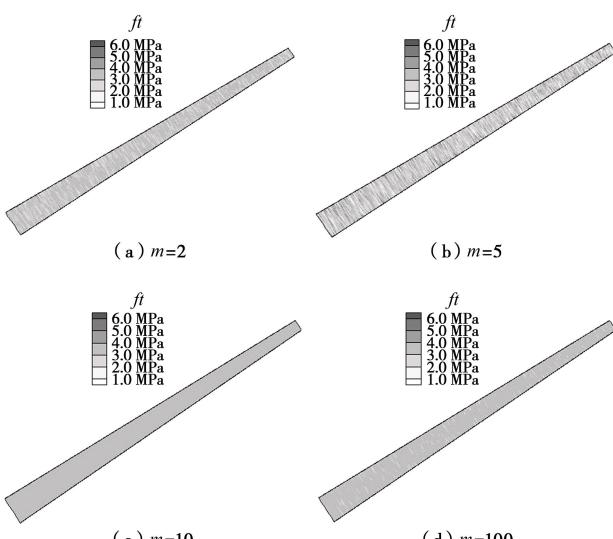


图 4 不同均质度面板单元抗拉强度分布云图
Fig. 4 Nephogram of tensile strength distribution for different homogeneity indices

2.2 混凝土拉伸和损伤演化方程

一般认为, 混凝土类准脆性材料在受力时, 应力应变关系表现出的非线性。主要是由于混凝土在受力后, 出现损伤引起微裂纹的产生和扩展造成材料性质不断弱化的结果, 而不是因为塑性变形的原因^[11]。因此采用弹性损伤本构关系描述混凝土在细观层面上的力学性质是合适的。根据损伤力学中应变等效原理:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} = \frac{\bar{\sigma}}{E_0} = \sigma / (1 - D) E_0 \quad . \quad (2)$$

式中 E_0 为初始弹性模量; D 为损伤变量。 $D=0$ 时表示无损状态, $D=1$ 时表示完全损伤, 宏观表现为出现裂纹, $0 < D < 1$ 对应不同程度的损伤, 一般认为 $D \geq 0.8$ 时认为出现严重损伤^[9], σ 表示为名义应力; $\bar{\sigma}$ 为有效应力。

带有残余强度的弹脆性模型, 在单轴受拉作用下, 损伤演化方程为

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon \leq \varepsilon_{t0}) \\ 1 - \frac{\sigma_{rt}}{\varepsilon E_0} & (\varepsilon_{t0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{ut}) \\ 1 & (\varepsilon \geq \varepsilon_{ut}) \end{cases} \quad . \quad (3)$$

式中 σ_{rt} 为残余强度, $\sigma_{rt} = \lambda \sigma_t$; ε_{t0} 为初始损伤阀值, 弹性极限所对应的拉伸应变; ε_{ut} 为极限拉伸应变, $\varepsilon_{ut} = \eta \varepsilon_{t0} \eta$ 应变系数; λ 为残余强度系数。单轴拉伸是本构关系曲线如图 5 所示。

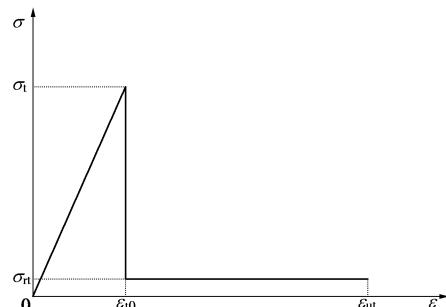


图 5 拉伸单元弹性损伤本构关系曲线
Fig. 5 Elastic constitutive law for element under uniaxial tension

对于多轴受力条件下, 假定损伤仍然是各向同性的, 通过等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 代替 $\varepsilon \cdot \bar{\varepsilon} = \sqrt{\langle \varepsilon_1 \rangle^2 + \langle \varepsilon_2 \rangle^2 + \langle \varepsilon_3 \rangle^2}$, ε_1 , ε_2 , ε_3 分别表示主应变。

当细观单元受力满足摩尔库伦准则时, 将发生剪切损伤, 因此单元可能同时出现拉损伤和剪切损伤。考虑混凝土的抗拉强度远低于抗压强度, 而且混凝土面板在动力荷载作用时, 出现裂缝主要是由于受拉裂缝而不是压碎。在计算过程中, 一旦单元出现拉损伤, 就不必考虑剪切损伤。

3 堆石料和接触面广义塑性模型

3.1 堆石料的广义塑性模型

广义塑性模型^[12](简称 P-Z 模型)是 Zienkiewicz 和 Pastor 等在广义塑性理论基础上提出的。最开始主要针对沙土液化的问题分析, 适用于围压变化较小的岩土工程问题。而针对于高土石坝, 平均主应力变化范围为 0~3 MPa。考虑筑坝材料的应力相关性, 笔者对上述广义塑性模型^[13-14]中的剪切模量 K , 体积模量 G 、加卸载模量 H_L 和 H_U 等进行了相应改进。

$$H_L = H_0 P_0 (P/P_a)^{m_s} H_f (H_v + H_s) H_{DM} H_{den}, \quad (4)$$

$$H_U = \begin{cases} H_{U0} P_0 (P/P_a)^{m_u} (\eta_u/M_g)^{-\gamma_u} & (|\eta_u/M_g| < 1) \\ H_{U0} & (|\eta_u/M_g| \geq 1) \end{cases}, \quad (5)$$

$$K = K_0 (P/P_a)^{m_v}, \quad (6)$$

$$G = G_0 (P/P_a)^{m_s}. \quad (7)$$

式中 H_0 为塑性模型参数, H_f , H_v , H_s 分别为计算模型参数, K_0 , G_0 为初始体积模量和剪切模量, M_g 为临界状态线在 $p-q$ 平面内的斜率, P_a 为标准大气压, 为了更好地反映堆石料的滞回特性, 修改历史函数 $H_{DM} = \exp((1-\eta/\eta_{max})\gamma_{DM})$, 其中 η_{max} 是历史最大应力比; 通过修改致密系数 $H_{den} = \exp(\gamma_d \varepsilon_v^p)$, 考虑堆石料循环硬化特性, ε_v^p 为塑性体积应变。

3.2 广义塑性接触面模型

广义塑性接触面模型是 Liu 等^[15]基于临界状态和广义塑性框架提出的接触面模型。但是该模型没有统一的考虑加载条件下的颗粒破碎的影响, 而且当卸载或者加载路径通过剪应力大小为 0 时, 需要区分两种加载状态, 刘京茂等^[16]通过采用边界面模型的思路, 在剪切面内定义峰值应力边界面和最大应力历史边界面, 综合考虑临界状态下颗粒破碎的影响, 发展修正了三维接触面模型。

$$f = \tau - M \sigma_n \left(\frac{\alpha}{\alpha-1} \right) \left[1 - \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^{\alpha-1} \right] = 0, \quad (8)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_{\tau_0} - \Delta \epsilon_c - \lambda \ln \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right), \quad (9)$$

$$\Delta \epsilon_c = c_3 (B_r)_{virgn} + c_4 (B_r)_{cyclic}, \quad (10)$$

$$B_r = \frac{W_p}{c_1 + c_2 W_p} dB_r = \frac{-c_1}{(c_1 + c_2 W_p)^2} dW_p, \quad (11)$$

式中, f 为 $\tau - \sigma_n$ 空间中最大应力历史边界面, σ_n 为法向压力。 α , M 均为试验常数, σ_c 表示屈服面。 c_3 和 c_4 分别表示单调和循环荷载下颗粒破碎对临界空隙比的不同影响。 $(B_r)_{virgn}$ 表示单调荷载下的颗粒破碎量, $(B_r)_{cyclic}$ 表示循环荷载下的颗粒破碎量。

4 计算模型

4.1 有限元模型及计算参数

采用二维混凝土面板堆石坝作为有限元计算模型。坝高取 200 m, 上游坝坡为 1:1.4, 下游坝坡为 1:1.5, 大坝分 34 层进行填筑, 面板分三期浇筑(分期面板顶高程分别为 60, 130, 200 m)。正常蓄水位为 190 m, 二期面板浇筑完后开始蓄水。

混凝土面板有限元网格如图 6 所示, 面板、垫层和过渡层网格被局部加密如图 7 所示。面板网格沿法线方向分 20 层, 单元尺寸最大值 5 cm, 以便于研究面板损伤的发展过程。面板单元采用 4 节点等参单元, 面板与垫层间接触面, 周边缝采用 4 节点 Goodman 界面单元。模型共 37989 个单元和 37550 个节点, 其中面板共 24000 个单元。

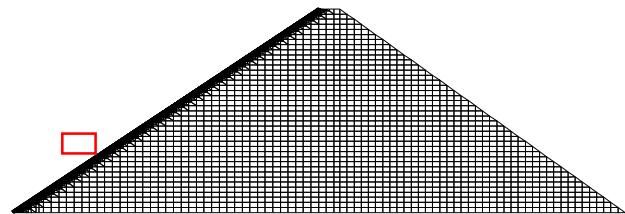


图 6 混凝土面板堆石坝有限元模型

Fig. 6 Finite element model for concrete face rockfill dam

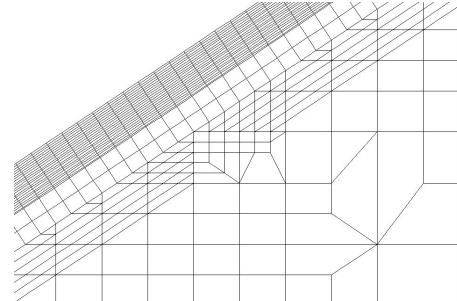


图 7 面板和过渡层局部放大图

Fig. 7 Partial enlargement of slab and transition layer

4.2 材料参数

堆石料广义塑性模型参数^[17]如表 1 所示, 面板与垫层间的接触面采用广义塑性接触面模型, 计算参数^[18]如表 2 所示, 面板混凝土标号为 C30, 本文主要考虑了弹性模量、抗拉强度的不均匀性, 表 3 给出了材料参数的平均值。

表 1 堆石料的广义塑性模型参数

Table 1 Parameters of generalized plastic model for gravel materials

G_0	K_0	M_g	M_f	α_f	α_g	H_0	H_{U0}	m_s
1000	1400	1.8	1.38	0.45	0.40	1800	3000	0.5
m_v	m_l	m_u	r_d	γ_D	γ_u	β_0	β_1	
0.5	0.2	0.2	105	50	4	35	0.022	

表 2 广义塑性接触面模型参数

Table 2 Parameters of generalized plastic contact model

D_{r0}	D_{n0}	M_g	λ	η	α	k_m	λ_d	k_{tn}
1000	1500	0.88	0.091	0.4	0.65	0.6	0.2	1.0×10^6
M_f	H_0	k_p	a	b	c	f_h	e_0	k_{ts}
0.65	8500	0.5	5000	1.38	0.1	2.0	0.25	1.0×10^5

表 3 混凝土面板的参数

Table 3 Parameters of concrete slabs

细观单元参数				不均匀度参数			
$\rho /(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	v	f_t/MPa	λ	η	m_1	m_2
2400	31	0.18	3.48	0.05	10	2	5
							10

4.3 地震动的输入

动力计算地震动的输入根据《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073—2000)规范谱^[19]合成人工地震波, 地震波时程曲线如图 8 所示。顺河向地震波峰值加速度为 $0.3g$, 垂直向峰值加速度取顺河向峰值加速度的 $2/3$, 取 $0.2g$ 。

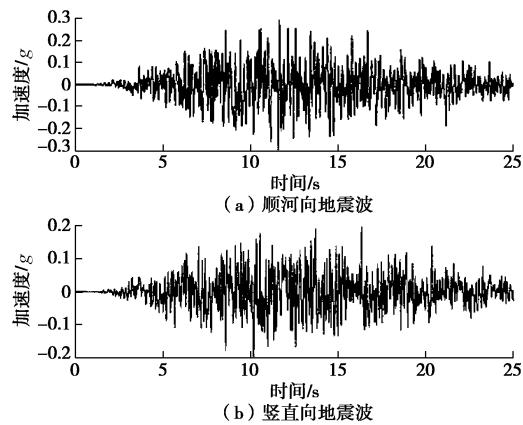


图 8 地震加速度时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of earthquake acceleration

4.4 计算结果分析

针对计算模型中的面板混凝土分别采用线弹性损伤模型和弹脆性损伤模型进行了动力有限元分析, 其中面板混凝土均质度 m 分别取 2, 5, 10 和无穷大(均匀材料), 以研究混凝土的均匀性对面板损伤发展过程和模式的影响。当面板为均匀材料时(均质度 m 取无穷大), 采用弹脆性损伤模型和线弹性模型计算的面板中间层单元顺坡向拉应力包络线随面板高度变化如图 9 所示。计算结果显示, 采用线弹性模型计算得到的面板顺坡向拉应力在 $(0.65 \sim 0.85) H$ (H 表示坝高) 范围内超过了混凝土的抗拉强度; 弹脆性损伤模型则反映了混凝土超过抗拉强度的损伤特性, 顺坡向拉应力最大值小于混凝土抗拉强度, 计算结果更为合理。上述两种方法计算结果均显示, 当面板作为均匀材料, 在地震荷载作用下, 面板在 $(0.65 \sim 0.85) H$ 范围内面板顺坡向拉应力较大, 为损伤发生的重点区域^[20]。

当考虑混凝土的不均匀性时, 为了消除随机分布函数取值造成计算结果的偶然性, 针对 m 分别取 2, 5 和 10 以考虑不同均质度时, 各计算 30 个算例, 并对每种工况条件下的算例结果进行分析。限于篇幅, 本文仅以 $m=2$ 为例, 给出了 5 组地震结束时的面板损伤分布, 如图 10 所示。可以看出, 在 $m=2$ 条件下, 面板单元满足相同的随机分布时, 损伤过程虽不完全相同, 但地震结束时面板整体损伤部位和损伤程度却大致相同。损伤主要发生在 $(0.4 \sim 0.9) H$ 坎高范围内, 这与图 9 中的动拉应力分布规律是一致的。

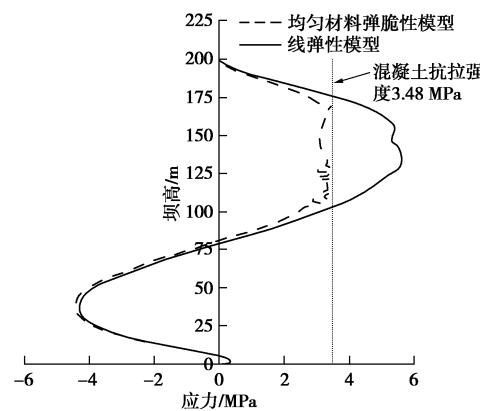


图 9 不同模型面板顺坡向应力

Fig. 9 Slope-direction stress of slabs

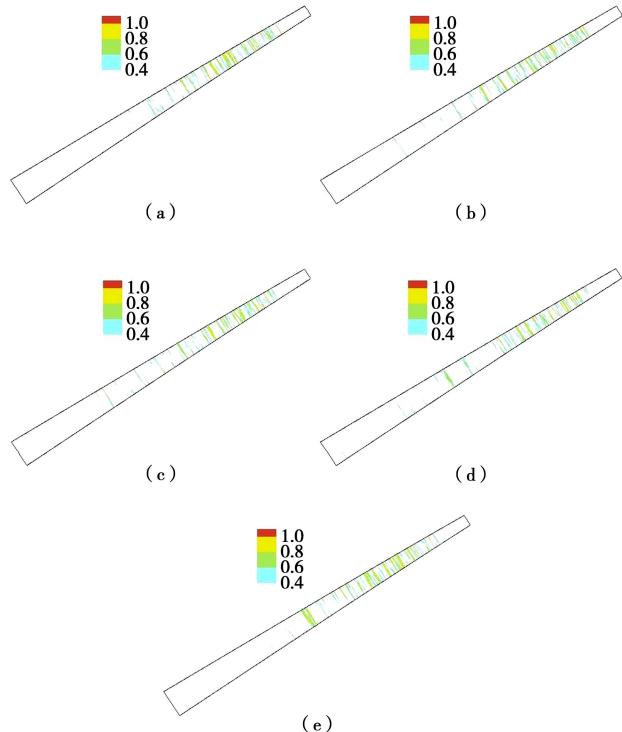
图 10 $m=2$ 时面板损伤分布云图Fig. 10 Damage distribution of slab with $m=2$

图 11 为 $m=2$ 时典型的面板损伤发展过程。通过损伤的发展可以看出, 当地震发生时, 面板在 $0.8H$ 坎

高附近范围处先发生损伤, 之后逐渐向中下部扩展。由于摩擦力的作用, 面板与垫层接触部位先出现较为严重的拉损伤, 然后向面板表层扩展。

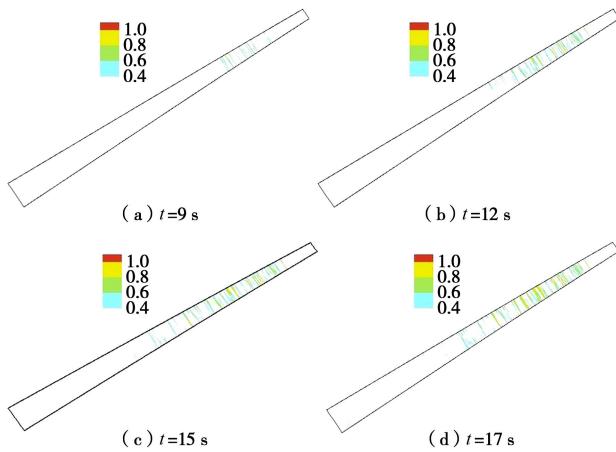


图 11 面板损伤发展过程

Fig. 11 Occurrence and development of slab damage

图 12 显示了不同均质度时, 面板在地震结束时的损伤分布。可以看出, 均质度越小, 面板上出现损伤的部位趋于分散。这主要由于均质度越小, 材料不均匀性增加, 面板中受力薄弱环节越多, 在地震荷载作用时, 更多的面板单元拉应力达到抗拉强度, 出现拉损伤破坏。而随着均质度的增大, 材料特性趋向于均匀材料, 各单元抗拉强度接近, 单元的抗拉强度也较大。在地震荷载作用时, 达到混凝土抗拉强度的单元较少, 出现损伤的部位主要在拉应力较大的部位。通过对面板取不同均质度时进行分析, 在地震荷载作用时, 面板发生损伤主要集中在 $(0.4 \sim 0.9) H$ 范围内。

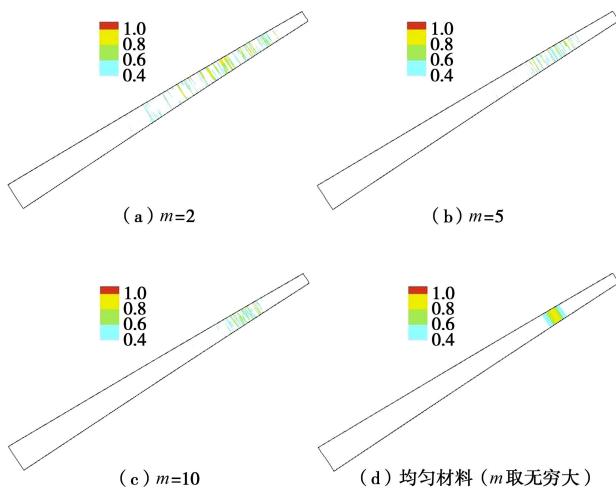


图 12 不同均质度时面板损伤

Fig. 12 Slab damage under different homogeneity indices

5 结 论

混凝土面板堆石坝面板浇筑为大体积混凝土施

工, 很难做到材料浇筑完全均匀, 保证材料属性完全一致。通过考虑面板施工工艺、材料自身特性等因素而引起的混凝土的不均匀性, 对 200 m 混凝土面板堆石坝进行二维有限元动力分析, 研究了混凝土弹性模量和抗拉强度随机性对混凝土面板堆石坝面板动力损伤分布规律的影响。

(1) 传统的堆石坝有限元分析, 将面板视为均匀材料, 忽略了混凝土内部微观结构的非均匀性, 很难描述面板变形过程中的力学特性。本文通过采用微观力学和统计学原理实现了考虑面板混凝土材料参数随机性的动力损伤分析方法。

(2) 对不同均质度造成材料参数随机性进行敏感性分析, 结果表明, 相同均质度条件下, 面板损伤的部位和程度基本一致。

(3) 地震动荷载作用下, 面板混凝土材料均匀度越小, 面板发生损伤的部位越趋于分散, 出现严重损伤的范围增大, 但主要集中在沿坝高 $(0.4 \sim 0.9) H$ 范围内, 因此这部分区域是面板抗震设计重点区域。

需要指出的是, 本文对面板混凝土不均匀性参数的取值涵盖范围较大, 实际工程中面板混凝土因施工引起的不均匀性对材料参数的确定影响尚有待通过现场实测进行统计分析。

参考文献:

- [1] ZHANG C. Challenges of high dam construction to computational mechanics[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2007, 1(1): 12 - 33.
- [2] BAZANT Z, TABBARA M, PIJAUDIER-CABOT G. Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(8): 1686 - 1705.
- [3] 武明鑫, 张楚汉, 王进廷. 基于微观颗粒元的混凝土弯曲试验模拟与率效应[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2014, 54(8): 999 - 1005. (WU Ming-xin, ZHANG Chu-han, WANG Jin-ting. Simulations of concrete bending and rate effects based on meso-scaled particle elements[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(8): 999 - 1005. (in Chinese))
- [4] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. Rock Mechanics, 1997, 34(2): 249 - 261.
- [5] ZHU W, TANG C A. Numerical Simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical mode[J]. Construction and Building Materials, 2001, 16(8): 453 - 63.
- [6] ZHONG H, LIN G, LI X Y, et al. Seismic failure modeling of

- concrete dams considering heterogeneity of concrete[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, **31**(12):1678 - 1689.
- [7] 唐欣薇, 周元德, 张楚汉. 考虑空间相关尺度特征的细观力学模型及其应用[J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 2021 - 2026. (TANG Xin-wei, ZHOU Yuan-de, ZHANG Chu-han. A mesomechanical model with spatial correlation scale character and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 2021 - 2026. (in Chinese))
- [8] TANG X, ZHOU Y, ZHANG C, et al. Study on the heterogeneity of concrete and its failure behavior using the equivalent probabilistic model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, **23**(4): 402 - 413.
- [9] 田威, 党发宁, 陈厚群. 基于细观损伤的混凝土破裂过程的三维数值模拟与 CT 试验验证[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 2): 428 - 433. (TIAN Wei, DANG Fa-ning, CHEN Hou-qun. 3D numerical simulation of concrete failure process and CT verification based on meso-damage[J]. Rock and Soil Mech, 2010, **31**(S2): 428 - 433. (in Chinese))
- [10] 张娟霞. 混凝土结构破坏机理的数值试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006. (ZHANG Juan-xia. Numerical investigation on failure mechanisms of concrete structures[D]. Shenyang: Northeastern University, 2006. (in Chinese))
- [11] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料断裂过程中声发射空间自组织演化特征及其在结构失稳预报中的应用[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(5): 15 - 19. (JI Hong-guang, CAI Mei-feng. Application of acoustic emission technique to predict unstable fracture in concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(5): 15 - 19. (in Chinese))
- [12] PASTOR M, ZIENKIEWICZ O C, LEUNG K H. Simple model for transient soil loading in earthquake analysis. II: non-associative models for sands [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1985, **9**(5): 477 - 498.
- [13] ZOU D G, XU B, KONG X J, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity mode[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **49**(4): 111 - 122.
- [14] XU B, ZOU D G, LIU H B. Three-dimensional simulation of the construction process of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2012, **43**(6): 143 - 154.
- [15] LIU H, LING H I. Constitutive description of interface behavior including cyclic loading and particle breakage within the framework of critical state soil mechanics[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, **32**(1): 1495 - 1514.
- [16] LIU J M, ZOU D G, KONG X J. A 3D state dependent model of soil structure interface for monotonic and cyclic loadings[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **61**(9): 166 - 177.
- [17] 孔宪京, 邹德高. 紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2014. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao. Zipingpu CFRD seismic damage analysis and numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [18] XU B, ZOU D G, KONG X J. Dynamic damage evaluation on the slabs of the concrete faced rockfill dam with the plastic-damage model[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **65**(4): 258 - 265.
- [19] DL5073—2000 混凝面板堆石坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011. (DL5073—2000 Specifications for seismic design of hydraulic structures[S]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [20] 孔宪京, 徐斌, 邹德高. 混凝土面板坝面板动力损伤有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1594 - 1600. (KONG Xian-jing, XU Bin, ZOU De-gao. Finite element dynamic analysis for seismic damage of slabs of CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1594 - 1600. (in Chinese))