

碾压混凝土重力坝的广义损伤可靠度及敏感性

王亚军^{1,2}, 张我华³, 张楚汉¹, 金峰¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 浙江海洋学院船舶与建筑工程学院, 浙江舟山 316000; 3. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘要:为深化模糊随机损伤力学研究,基于自适应模糊随机损伤力学模型,对材料裂纹尖端广义损伤应力场进行分析,证实了数值模型的可靠性。以碾压混凝土重力坝为例,并考虑材料参数空间变异,就模糊随机损伤增益下的宏观场分布做敏感性研究,结果表明,碾压混凝土抗压强度极限值是影响大坝安全的主控指标。采用不同模糊分布对自适应损伤力学模型做激励分析,揭示了各分布对混凝土及岩石类材料广义损伤场演化的控制特征。

关键词:碾压混凝土重力坝; 模糊激励; 模糊随机损伤模型; 敏感性

中图分类号:TV223.42;TV432.2;TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)01-0077-10

Generalized Damage Reliability and Sensitivity Analysis on Rolled-Concrete Gravity Dam

WANG Ya-jun^{1,2}, ZHANG Wo-hua³, ZHANG Chu-han², JIN Feng²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China;
2. School of Naval Architecture and Civil Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, Zhejiang, P. R. China;
3. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China)

Abstract: Based on fuzzy self-adapting stochastic damage model, the characteristics of generalized damage stress field on material crack tip are studied. The results express that the numerical algorithm is reliable. Sensitivity of rolled-concrete gravity dam under fuzzy-stochastic damage gaining is implemented by considering the spatial variation of material parameters. It is found that the compression strength of rolled-concrete is the governing index on gravity dam reliability. The activation simulations on fuzzy self-adapting stochastic damage model were carried by adopting different fuzzy distributions, which indicated the governing characteristics of the distribution on generalized damage evolution of rock-like material.

Key words: rolled-concrete gravity dam; fuzzy activation simulation; fuzzy self-adapting stochastic damage model; sensitivity

基于材料损伤的不确定性(Uncertainty),随机损伤力学(Stochastic Damage Mechanics)观念丰富了工程力学的研究领域,这样,经典损伤力学中质点

的损伤不动场被拓展到随机空间内,并以具有明确物理背景的概率分布形式定义下来^[1],使更为复杂的工程课题得以深入研究。Yang等人发展了非均

收稿日期:2010-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50379046);教育部博士点基金资助项目(A50221)

作者简介:王亚军(1976-),男,博士(后),主要从事岩土工程力学研究,(E-mail)aegis68004@yahoo.com.cn。

质内聚力断裂模型,借助细观裂缝随机场,对裂隙扩展路径、峰值荷载、材料整体可靠性等关键力学参数进行模拟,进而完成了对材料宏观强度特性的分析研究^[2];Yang 等人还基于 Weibull 随机场,采用拉伸及剪切软化本构模型下的预插入内聚力单元模拟潜在裂隙,分析了混凝土之类准脆性材料的损伤可靠性^[3];Seweryn 等人提出了非比例加载条件下的疲劳损伤发展方程,对复合屈服面下,材料循环加载诱发的损伤累积发育进行分析计算^[4];Tovo 基于多模态分布假设并借助损伤当量准则,建立了 1 个当量 Weibull 损伤分布模型^[5];Emery 等人提出了多层次、多尺度损伤及耐久性评价策略,方法的核心是借助 Monte Carlo 模拟及统计分析,生成材料的随机微观缺陷分布模型,从而实现了对结构全域内工作寿命标量场的计算,但此计算的实质仍是确定性的^[6];Popescu 等人就软土材料提出了内空间变异性及强度随机变量混合求解的观念,并用总体破裂曲线来刻画非均质软土材料的非确定损伤破坏及承载特性^[7];Vořechovský 将材料的强度尺度效应归结为 3 个诱因:确定性能量准则、随机尺度效应、优势薄弱层效应,并结合非线性断裂力学与材料随机场模拟技术,对混凝土之类的准脆性材料强度自相关随机场下形成的断裂损伤进行研究^[8];Kowalsky 等人考虑了金属材料参数的空间随机波动,在粘塑性非线性与连续损伤模型耦合的基础上,采用 K-L 扩张理论,对引入相关方程的随机场进行离散,实现了随机有限元框架下的损伤材料可靠度分析^[9];Ihara 等人定义了材料的位错密度及位错弹性能,采用随机损伤累积模型,对 I 类疲劳裂纹的萌生及扩展进行研究^[10];Li 等人基于冻土随机微观缺陷,建立了随机损伤本构模型,对温变条件下的高温冻土及富冰高温冻土损伤力学特征进行研究^[11]。但损伤度量外延并不明确,此特征之本质(Nature)不同于概率分布,其刻画损伤场发育、演化程度的模糊性(Fuzzy)。然而,当前损伤力学的不确定性分析理论仅限于单一数学模型。笔者基于前期研究,进一步就碾压混凝土重力坝的广义损伤场在自适应模糊激励下的敏感性做深入分析。

1 模糊随机损伤本构模型下自适应数值算法及程序验证

自适应模糊处理后,结构广义损伤场由模糊随机损伤泛函 Ω 定义^[1]。因为双层数学覆盖下的损伤

场服从 β 分布,为实现结构模糊随机损伤可靠度分析,必须要对系统进行当量正态化的变换,从而可借助不同破坏准则做广义损伤可靠度分析。该文采用四参数破坏准则^[12-13],损伤功能函数梯度由文献[1]所确定。

材料损伤扩散时,因矢量重分布、细观颗粒堵塞、微观粒子滑移强化,破坏区局部会出现弥合;此外,对于长期加载,破坏时临界损伤分布具有较宽的分散带、而并非是一个确定数值。自适应数值方法通过广义损伤泛函对本构方程中的弹性矩阵做模糊识别,并借助模糊格运算,对矢量场进行协调,拓展了损伤分析域,避免了常规的刚性损伤计算模型过分依赖“唯像”的不足。

以图 1 悬臂结构为研究验证对象,分别采用弹性力学方法(解析法)、MSC. Marc 软件及该文程序(简称程序)分析验证。

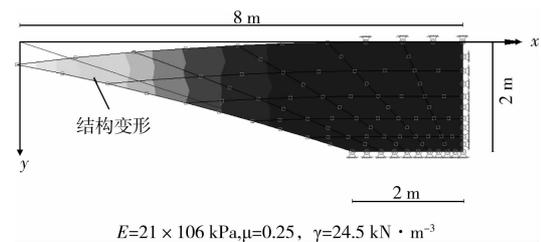


图 1 结构计算模型

此结构平面应变下应力分量的弹性力学解为 σ_x 、 σ_y 、 σ_{xy} ^[17]。其中, x 、 y 为笛卡儿坐标系统。

令 E 、 μ 、 γ 分别为材料弹性模量、泊松比、容重,考虑材料有变异,则三者的方差分别为 σ_E^2 、 σ_μ^2 、 σ_γ^2 ,从而应力分量方差的解析解 $\sigma_{\sigma_x}^2$ 、 $\sigma_{\sigma_y}^2$ 、 $\sigma_{\sigma_{xy}}^2$ 可计算如式(1)。

$$\begin{aligned} \sigma_{\sigma_x}^2 &= \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial \gamma} \right)_{|M}^2 \sigma_\gamma^2, \sigma_{\sigma_y}^2 = \\ &\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial \gamma} \right)_{|M}^2 \sigma_\gamma^2, \sigma_{\sigma_{xy}}^2 = \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial \gamma} \right)_{|M}^2 \sigma_\gamma^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,应力分量关于随机参数的梯度计算在参数均值 M 处获得。应变分量 ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} 的方差解析解 $\sigma_{\epsilon_x}^2$ 、 $\sigma_{\epsilon_y}^2$ 、 $\sigma_{\gamma_{xy}}^2$ 计算如式(2)。

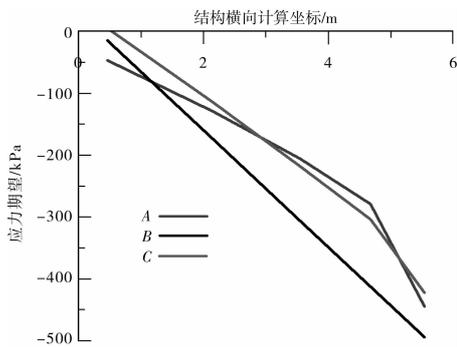
$$\begin{aligned} \sigma_{\epsilon_x}^2 &= \left\{ \left[\frac{1-\mu^2}{E^2} \left(\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_y \right) \right]_{|M} \right\}^2 \sigma_E^2 + \\ &\left\{ \left[\frac{2\mu}{E} \left(\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_y \right) + \frac{1+\mu}{E \cdot (1-\mu)} \sigma_y \right]_{|M} \right\}^2 \sigma_\mu^2 + \\ &\left\{ \left[\frac{1-\mu^2}{E} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial \gamma} - \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial \sigma_y}{\partial \gamma} \right) \right]_{|M} \right\}^2 \sigma_\gamma^2 \\ \sigma_{\epsilon_y}^2 &= \left\{ \left[\frac{1-\mu^2}{E^2} \left(\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_x \right) \right]_{|M} \right\}^2 \sigma_E^2 + \\ &\left\{ \left[\frac{2\mu}{E} \left(\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_x \right) + \frac{1+\mu}{E \cdot (1-\mu)} \sigma_x \right]_{|M} \right\}^2 \sigma_\mu^2 + \end{aligned}$$

$$\left\{ \left[\frac{1-\mu^2}{E} \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial \gamma} - \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial \sigma_x}{\partial \gamma} \right) \right]_{|M} \right\}^2 \sigma_\gamma^2$$

$$\sigma_{\sigma_{xy}}^2 = \frac{4(1+\mu)^2}{E^4} \tau_{xy}^2 \sigma_E^2 + \frac{4}{E^2} \tau_{xy}^2 \sigma_\mu^2$$

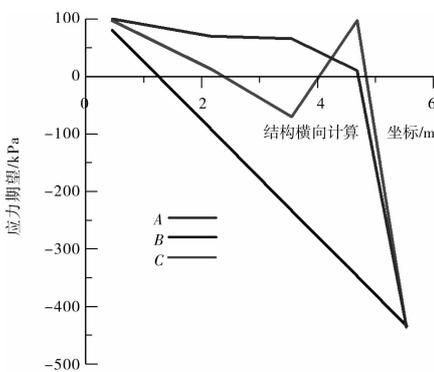
$$+ \frac{4(1+\mu)^2}{E^2} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial \gamma} \right)^2 \sigma_\gamma^2 \quad (2)$$

首先对照应力场数字特征,程序计算的 σ_y 期望与解析解在纯拉、压剪区最接近(图 3), σ_x 期望的程序解与 Marc 解相当接近(图 2), σ_{xy} 期望的程序解在复合区数值稍大(图 4), 差别的主因在于程序和 Marc(本文) 分别采用的是常体积应变和假定应变。



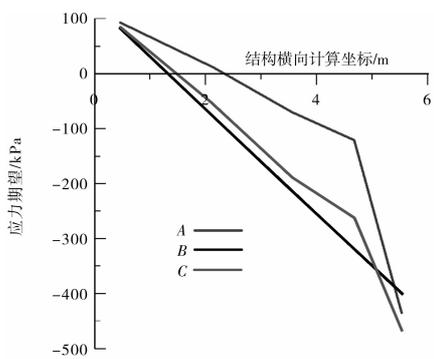
A—本文程序解 B—解析解 C—Marc 数值解

图 2 σ_x 期望计算对照



A—本文程序解 B—解析解 C—Marc 数值解

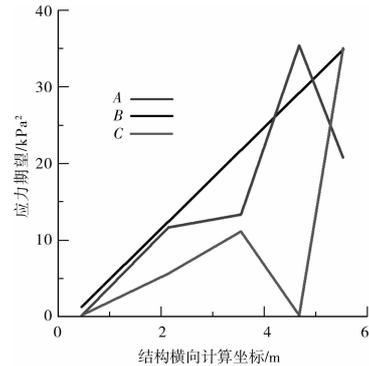
图 3 σ_y 期望计算对照



A—本文程序解 B—解析解 C—Marc 数值解

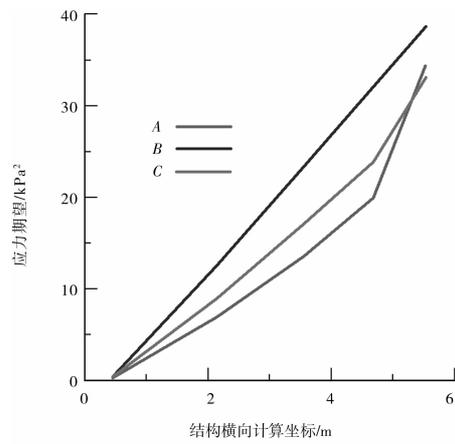
图 4 τ_{xy} 期望计算对照

应力场方差分布中, σ_y 离散最大(图 5), 程序解与解析解方差总体一致; σ_x 离散最小(图 6), 程序解、Marc 解与解析解方差在拉剪区几乎重合, 压剪区由于弹性力学解基于 Saint-Venant 原理, 所以非精确解, 程序解与 Marc 解的方差和解析解相差稍大; 程序解与 Marc 解的 σ_{xy} 方差在压剪区已经很接近, 而且分布趋势与解析解也很相似(图 7), 3 种解的 σ_{xy} 离散性均介于 σ_x 、 σ_y 之间。



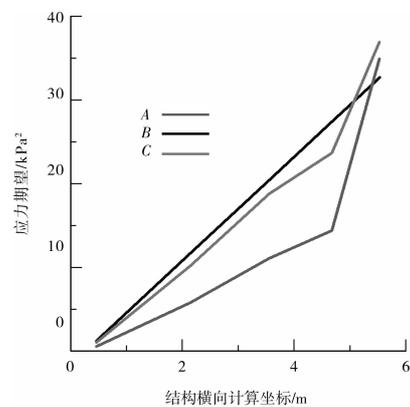
A—本文程序解 B—解析解 C—Marc 数值解

图 5 σ_y 方差计算对照



A—本文程序解 B—解析解 C—Marc 数值解

图 6 σ_x 方差计算对照



A—本文程序解 B—解析解 C—Marc 数值解

图 7 τ_{xy} 方差计算对照

由程序与 Marc 软件计算的结构位移场期望对照可见,从压剪区到拉剪区, x 向位移期望逐渐接近,反映了 Saint-Venant 边界对结构水平向位移的影响(图 8)。

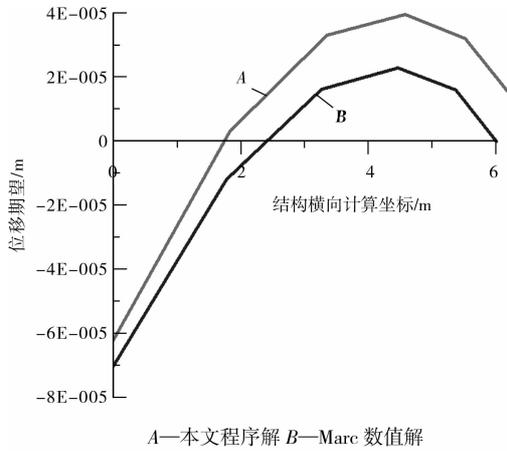


图 8 x 一方向位移期望对照

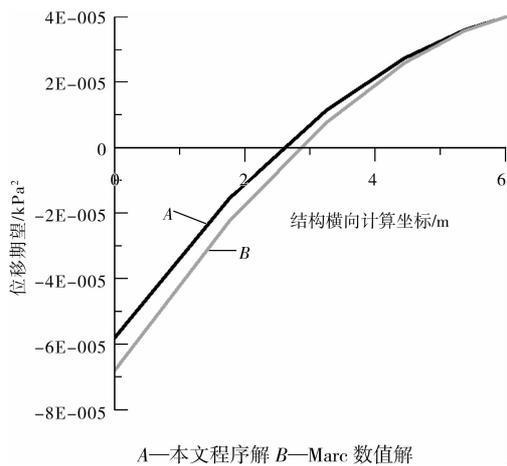


图 9 y 一方向位移期望对照

y 向位移期望从拉剪区到压剪区逐渐接近(图 9),最后在约束边界处收敛,完全符合受体荷载作用的结构位移特征。

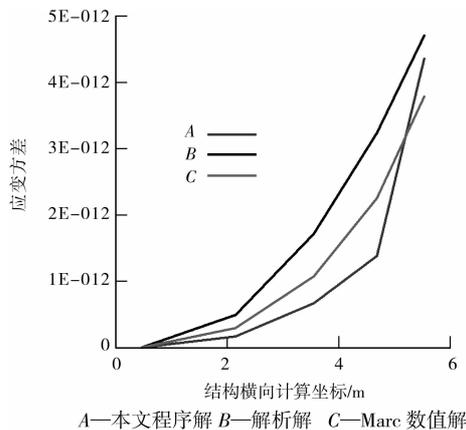


图 10 ϵ_x 方差对照

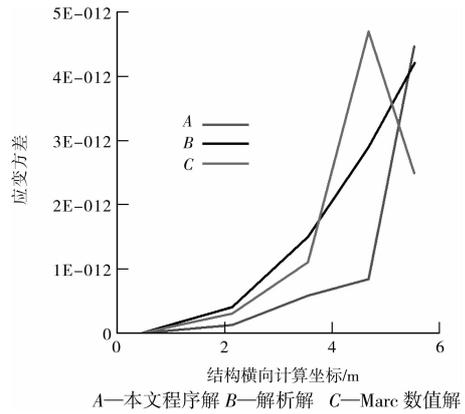


图 11 ϵ_y 方差对照

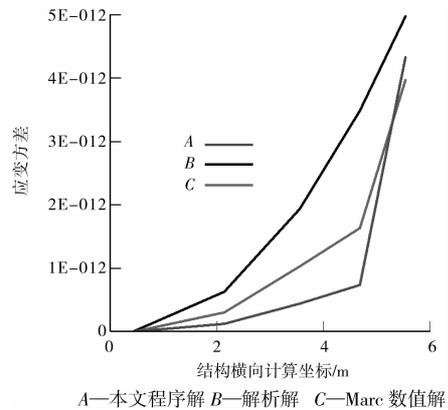


图 12 γ_{xy} 方差对照

2 种数值方法所得的拉剪区应变方差与解析结果都很接近, ϵ_x 与 ϵ_y 在拉剪区的离散分布都比较缓(图 10、11),而在此区域 γ_{xy} 的离散梯度则较大(图 12)。受边界条件影响,弹性力学方差解在复合区与压剪区域的变化剧烈。常量应变条件下的程序解与解析方差有比较明显的收敛趋势,而假定应变条件下只有 ϵ_y 的计算结果可以较好的拟合解析解。

进一步考虑材料局部损伤劣变,借助程序中广义损伤分析模块对结构裂纹尖端模糊随机损伤应力场进行分析。但工程结构实际加载过程中应力状态非常复杂,该文采用拉-压-剪切组合的形式模拟裂纹尖端应力场。经坐标转换可得极坐标下组合应力区裂纹尖端应力场如式(3)^[18]。其中, K_I 、 K_{II} 分别为张开及滑开型裂纹尖端应力强度因子, r 、 θ 为尖端计算点处的极坐标。

$$\sigma_r = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{2 \sqrt{2\pi r}} K_I (3 - \cos \theta) + \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{2 \sqrt{2\pi r}} K_{II} (3 \cos \theta - 1),$$

$$\sigma_\theta = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{2 \sqrt{2\pi r}} [K_I (1 + \cos \theta) - 3 K_{II} \sin \theta],$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{2 \sqrt{2\pi r}} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] \quad (3)$$

基于假定“裂纹沿最大周向应力方向开展”^[19-20],则有裂纹尖端开裂角的必要条件如式(4),从而可得开裂角的计算式(5)。

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}(K_I, K_{II}, \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \arccos \frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \\ &= \arccos \frac{3\tau_{\max}^2 + \sqrt{\tau_{\max}^4 + 8\sigma_1^2 \tau_{\max}^2}}{\sigma_1^2 + 9\tau_{\max}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

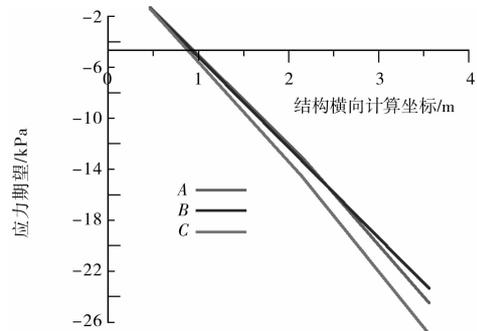
基于模糊随机损伤应力场,由式(6)计算应力强度因子 K_I^* 、 K_{II}^* 。

$$K_I^* = \sigma_1^* \sqrt{\pi a^*}, K_{II}^* = \tau_{\max}^* \sqrt{\pi a^*} \quad (6)$$

式中 σ_1^* 、 τ_{\max}^* 分别是损伤材料的大主应力和最大剪应力, a^* 为裂纹长度的一半。将式(5)、(6)代入式(3)并做极坐标—笛卡儿坐标转换,可得模糊随机损伤应力场下裂纹尖端复合应力分布。

复合区程序广义损伤应力解的期望与解析解几乎重合,而 Marc 计算的 Cauchy 应力解期望值,正应力总体偏小(图 13、14),剪应力偏大(图 15)。因为计算的是结构重力加载工况,所以 y 向正应力数量级最大。受材料裂纹尖端开裂角的影响,剪应力

期望值在复合区受组合拉、压应力的作用,必然会围绕解析解有上下波动(图 15),程序解完全符合这个特征。



A—本文程序广义损伤应力解 B—解析解 C—Marc Cauchy 应力数值解

图 15 裂纹尖端广义损伤应力 τ_{xy} 期望对照

综上所述,采用考虑局部劣化的广义损伤应力场对结构作受力分析是适用、可靠的,还可弥补复杂受力状态下常规非损材料计算方法局部精度不足的缺点。

2 工程应用

图 16 为某碾压混凝土重力坝数值模型及其主要几何尺寸,用于模糊输入的广义损伤场随机种子指标分布由文献[21]确定。结构在重力工况下的变形见图 17。

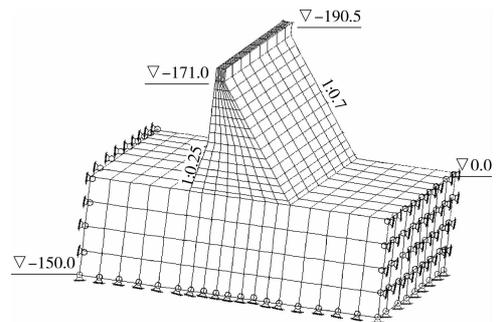


图 16 大坝数值模型

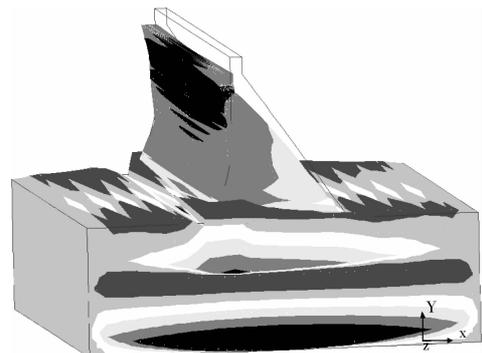
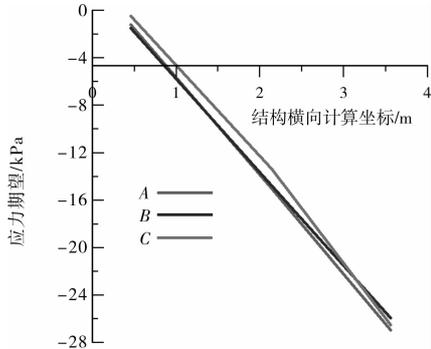
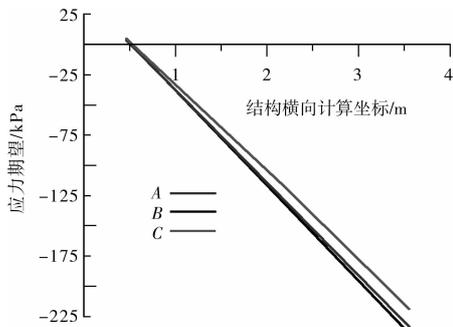


图 17 结构变形图



A—本文程序解 B—解析解 C—Marc Cauchy 应力数值解

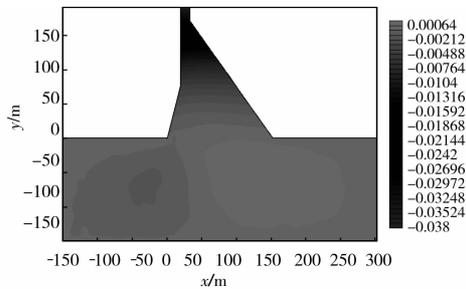
图 13 裂纹尖端广义损伤应力 σ_x 期望对照



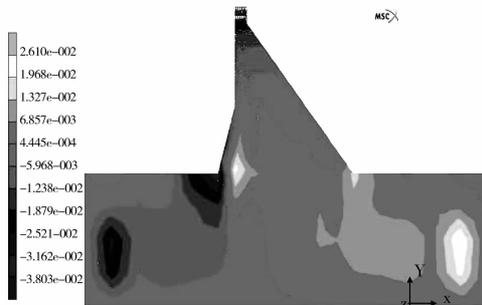
A—本文程序广义损伤应力解 B—解析解 C—Marc Cauchy 应力数值解

图 14 裂纹尖端广义损伤应力 σ_y 期望对照

对照损伤前位移场,程序与 Marc 计算结果主要差异在坝基边界处,前者比后者的计算结果低 3~4 倍(图 18),建议对部分岩基,应考虑局部损伤劣化(另文讨论),其他区域如坝顶、坝踵处,2 种计算方法的结果都很接近。



(1)程序计算结果



(2)Marc 计算结果

图 18 损伤前 x 方向位移等值线(单位:m)

2.1 广义损伤位移场敏感性

保守地取各参数变异扰动量为+0.01,重点考察大坝对弹性模量 E 、混凝土抗压强度极限值 R 的敏感性。

弹性模量(E)的随机扰动对广义损伤位移场的期望影响不很明显。位移期望最大扰动值在 10^{-5} 以下(图 19),位移场变异分布对于弹性模量的随机扰动相对明显,最大扰动值发生在下游坝趾及坝顶处(图 20),量级达到 10^{-3} ,运行中应注意该处材料的局部裂变,尤其是坝趾处可能会在高水头作用下产生恶化。

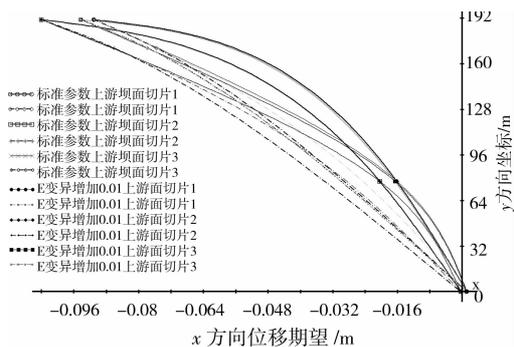


图 19 x 方向广义损伤位移期望对照(1)

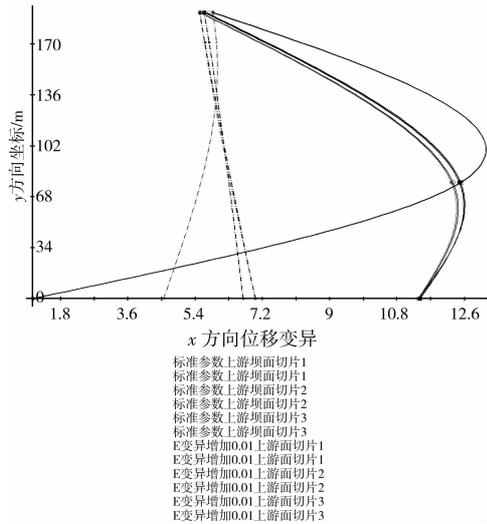


图 20 x 方向广义损伤位移变异对照(1)

大坝广义损伤位移场对材料的抗压强度极限值 (R)的扰动极为敏感,坝顶位移期望最大扰动量级达到 10^{-2} (图 21),证明重力坝碾压质量对安全起控制作用。位移场变异分布对于 R 的随机扰动也很敏感,重力工况下变异最大处位于上游坝踵,接近 12,而且坝趾处位移场变异最高涨幅达到 8 倍(图 22)。

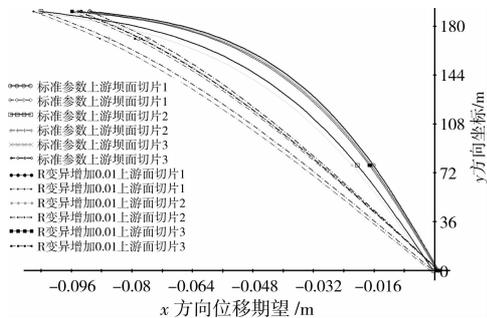


图 21 x 方向广义损伤位移期望对照(2)

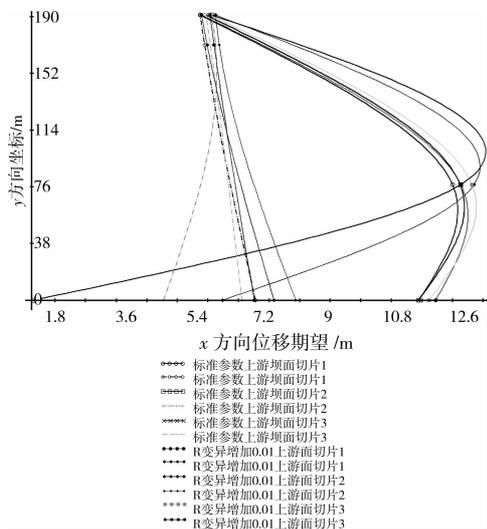


图 22 x 方向广义损伤位移变异对照(2)

2.2 模糊激励下的广义损伤场敏感性

模糊激励之目的是透视材料的劣化响应及损伤演化,而材料损伤的模糊本质(Fuzzy nature),恰需要借助广义损伤泛函对结构的激励来揭示,故采用不同模型,对材料随机分布的广义损伤进行外部激励,以反映材料损伤演化的不确定内核。

由各模型的理论曲线与对相应的数值分析结果进行验证可见,组合秋千模型的数值分析结果与理论曲线总体最为接近(图 23),其他两个模型的数值分析结果和模型。

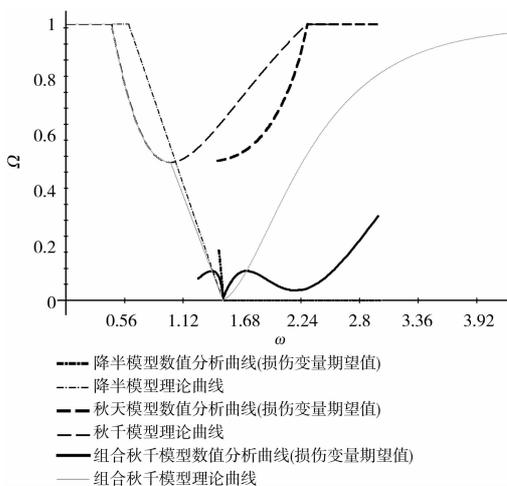


图 23 广义损伤数值分析与理论模型验证

理论曲线虽然也比较相近,但这种相近只是在损伤发育的某一阶段、如秋千模型在体应变较为发育时两者才贴近。

考虑不同广义模型激励下、广义损伤场的敏感性反馈,由图 24 可见:当量处理后,降半模型下损伤场的变异最大,而在组合“秋千”模型下损伤场的变异最小,秋千模型分析结果所得损伤变异数量级位于前述两者之间。

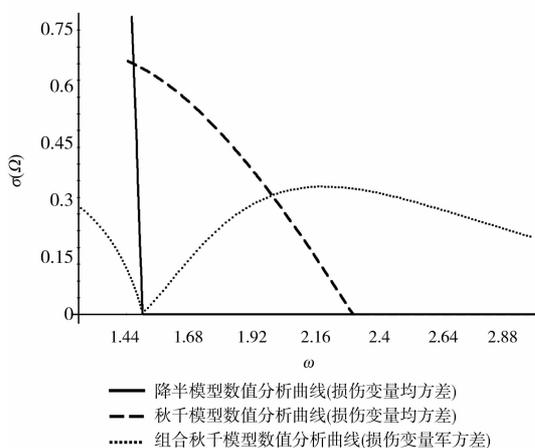


图 24 模糊激励下广义损伤变量均方差数值分析对照

组合秋千模型下,重力坝的损伤发育以坝轴线位置为核心,向坝踵、坝趾及坝基深处扩散(图 25),损伤变异也集中在这些区域(图 26)。由于坝体弯折处局部损伤水平较高,必引起裂化区域向其他刚性区域延伸,从而在完整材料之间形成带状损伤贯通区域,造成能量耗散程度较低的刚性材料在已劣化的材料中逐步滑移。同时,坝底以下基岩还是损伤辐射的主要区域,此处诱发的损伤变异最大可达 1.7。

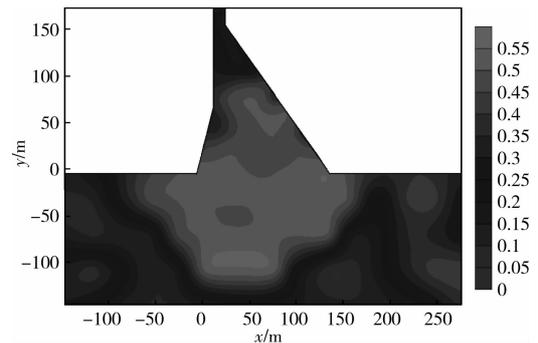


图 25 当量后组合秋千模型损伤变量期望切片云图

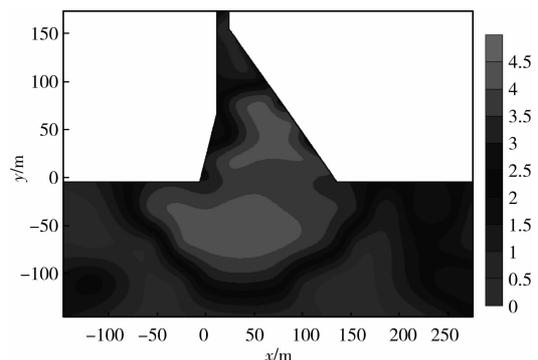


图 26 当量后组合秋千模型损伤变量均方差切片云图

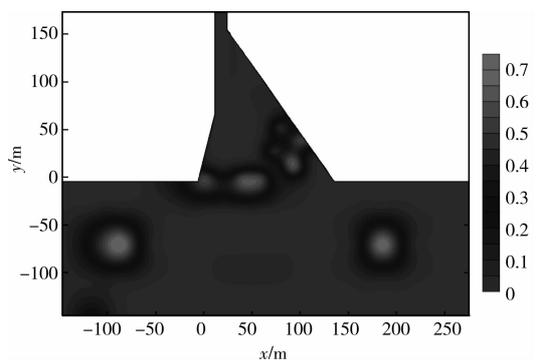


图 27 当量后降半模型损伤变量期望切片云图

降半模型强调材料的形变是损伤发育的主因,结构损伤破坏时体变只起到追加的作用,从图 27 看出:由于重力工况下坝踵处几乎全部处于压剪区域,而坝趾附近以上区域是典型的拉剪区,故这些地方会诱发较高量级的材料劣化^[22-23],损伤期望值较高,局部达到 0.5 以上。基岩中损伤辐射会引发远处区

域出现变异较大(1.5~3)的体变损伤(图 28),但损伤变异水平受基岩力学特性控制,应慎重处理。

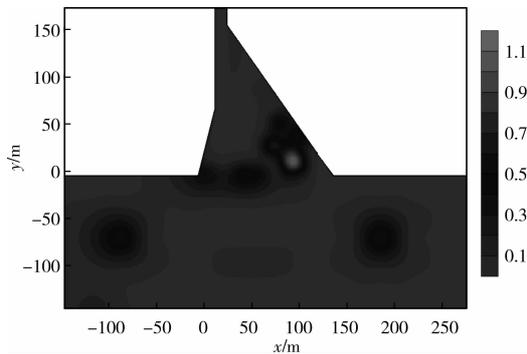


图 28 当量后降半模型损伤变量均方差切片云图

需要明确的是:秋千模型“最刚”。由图 29 可见,在坝体与坝基连接处局部损伤达到 0.75,而在其它模型下材料损伤极值一般只到 0.5 左右,且此处的损伤变异水平仅比降半模型下结果低 0.2 左右(图 30)。考虑到实际的混凝土材料抵抗拉应力能力有限,故本文建议,采用四参数准则时,应避免使用秋千模型之类过于“刚”的模糊泛函模拟损伤演化,除非分析对象是诸如已探明的完整母岩之类的可靠材料。

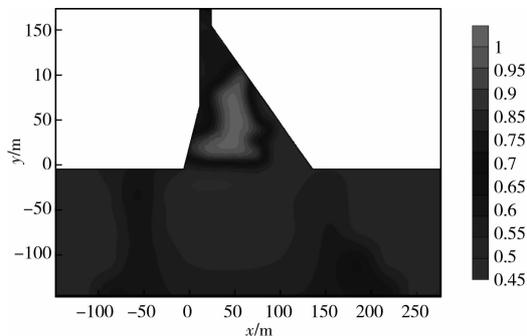


图 29 当量后秋千模型损伤变量期望切片云图

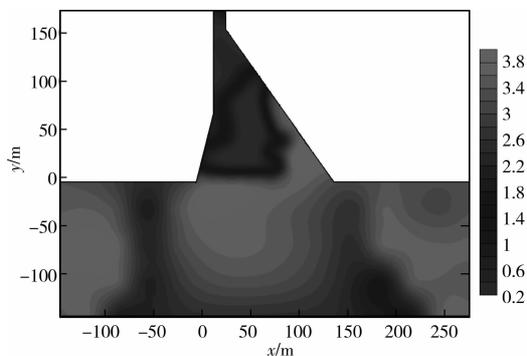


图 30 量后秋千模型损伤变量均方差切片云图

2.3 模糊激励下的广义损伤可靠度

广义可靠度在秋千模型下,水平较低的区域都是贯通于刚性材料之间的狭长劣化带,这里可靠度

只有 0.2 左右(图 31),这会导致:虽然损伤劣化区较小,但如果完成对结构不利地分割,同样会产生材料的极限滑移,形成安全隐患^[24]。

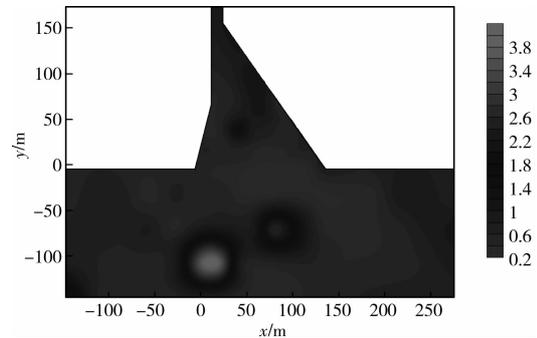


图 31 秋千模型下广义损伤可靠度切片云图

在坝基连接处,降半模型下的广义可靠度在 1.8 左右,但在上、下游坝面处都形成分布较广的损伤滑移区域,可靠指标最低只有 0.35(图 32),主要原因是场内局部损伤变异较大。

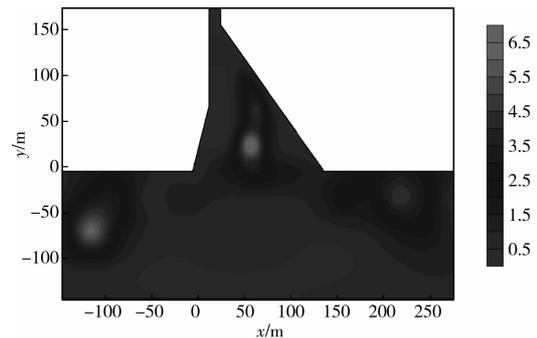


图 32 降半模型下广义损伤可靠度切片云图

考虑参数(R 、 E)的随机扰动,考察组合秋千模型下的大坝可靠度,标准随机参数的计算结果证明坝体与坝基连接段的可靠指标大于 1.5,结构总体安全状况良好,较为不利的损伤切割发生在上游坝面弯折处,局部形成可靠指标低于 1 的劣化带(图 33)。当弹性模量变异降低 0.03 后,此劣化带开始

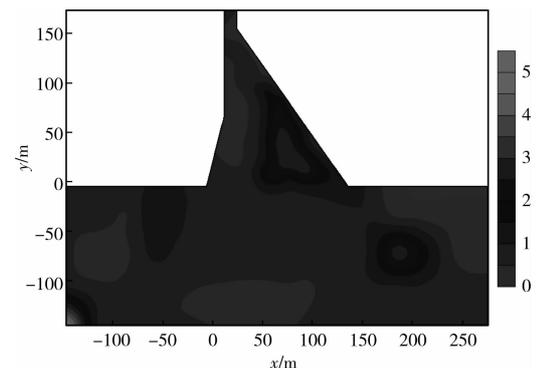


图 33 组合秋千模型下广义损伤可靠度切片云图(1)

向坝踵处移动,同时坝体与坝基连接段的可靠指标最大增加 0.15,表明弹性模量变异水平降低对于坝体结构的整体稳定是有利的(图 34)。但抗压强度变异增加 0.01 时,坝体与坝基连接段的可靠指标骤降至 0.8 左右,且在坝踵与坝趾间形成几乎贯通的分割劣化带,上游坝面弯折处可靠指标甚至低于 0.4 (图 35)。

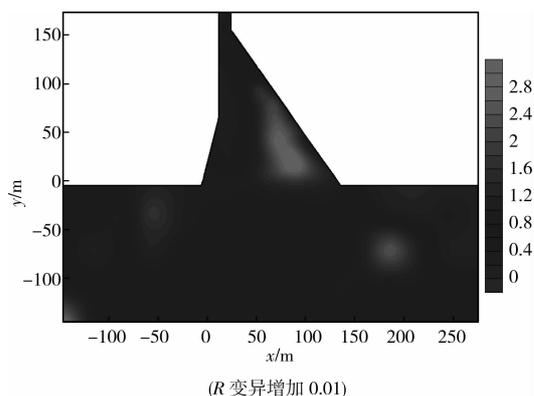


图 34 组合秋千模型下广义损伤可靠度切片云图(3)

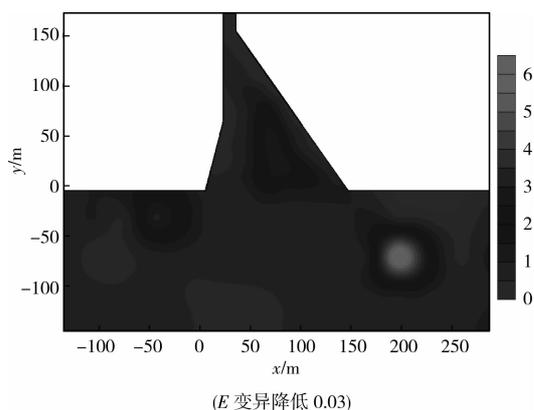


图 35 组合秋千模型下广义损伤可靠度切片云图(2)

由不同泛函模型的激励分析可以看出:结构破坏与失效形式复杂,尤其是工程结构系统,其灾变存在多种可能,至于岩土材料损伤,则必然是广域的,而非落于某一不动点的破坏;此外,唯像论下的工程分析结果反映了力学行为的某种可能,但可能不是唯一的,模糊激励下的广义损伤场,通过对材料损伤的模糊随机生成、建立模糊演化下的损伤随机分布、实现广义损伤可靠度评价,对结构系统各关键部位的劣化及损伤发育给出了多种可能,较合理地刻画了材料的损伤灾变。

3 结论

1)考虑材料局部劣化的模糊随机损伤应力场,可提高结构复杂受力状态下的局部计算精度,利于

正确定位结构的安全隐患。

2)基于模糊随机损伤应力场,可实现结构细观分析与宏观评价的统一,将材料局部损伤劣化与对结构整体稳定有机结合,由此提出的损伤劣化带对材料分割破坏观念,是对结构安全评价的有利补充。

3)自适应损伤模型有具体的适用范畴,实践中需结合材料本构模型做出调整。

4)碾压混凝土重力坝的主要安全控制指标是极限抗压强度,尤其是在各部浇注层连接段,应绝对保证施工质量,以便降低材料及损伤场的空间变异。

参考文献:

- [1] 王亚军,张我华. 岩石边坡模糊随机损伤可靠性研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2009,25(3):421-426.
- WANG YA-JUN, ZHANG WO-HUA. Rock slope reliability studies based on fuzzy stochastic damage theory[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009,25(3):421-426.
- [2] YANG Z J, XU X F. A heterogeneous cohesive model for quasi-brittle materials considering spatially varying random fracture properties[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, 197: 4027-4039.
- [3] YANG Z J, SU X T, CHEN J F, et al. Monte Carlo simulation of complex cohesive fracture in random heterogeneous quasi-brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46:3222-3234.
- [4] SEWERYN A, BUCZY SKI A, SZUSTA J. Damage accumulation model for low cycle fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2008,30:756-765.
- [5] TOVO R. A damage-based evaluation of probability density distribution for rain-flow ranges from random processes[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22:425-429.
- [6] EMERY J M, HOCHHALTER J D, WAWRZYNEK P A, et al. DDSim: A hierarchical, probabilistic, multiscale damage and durability simulation system-Part I: Methodology and Level I[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009,76:1500-1530.
- [7] POPESCU R, DEODATIS G, NOBAHAR A. Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005,20:324-341.
- [8] VOŘECHOVSKÝ M. Interplay of size effects in concrete specimens under tension studied via computational stochastic fracture mechanics [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007,

- 44:2715-2731.
- [9] KOWALSKY U, ZÜ MENDORF T, DINKLER D. Random fluctuations of material behaviour in FE-damage-analysis[J]. Computational Materials Science, 2007,39:8-16.
- [10] IHARA C, TANAKA T. Mode I fatigue crack-propagation mechanism based on the renewal stochastic damage-accumulation model[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007,74:1488-1498.
- [11] LI S Y, LAI Y M, ZHANG S J, et al. An improved statistical damage constitutive model for warm frozen clay based on Mohr-Coulomb criterion [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009,57:154-159.
- [12] 张楚汉. 论岩石、混凝土离散-接触-断裂分析[J]. 岩石力学与工程报, 2008,27(2):217-235.
- ZHANG CHU-HAN. Discrete-contact-fracture analysis of rock and concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(2): 217-235.
- [13] ZHANG CHU-HAN. Challenges of high dam construction to computational mechanics[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2007, 1(1):12-33.
- [17] 徐芝纶. 弹性力学(上)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:60-63.
- [18] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006:14-30.
- [19] SIH G C. Methods of analysis and solutions of crackproblems [M]. Netherlands, Leyden; Noordhoff International Pub, 1972:12-135.
- [20] GDOUTOS E E. Problems of mixed mode crack propagation[M]. USA Boston, Hingham; M. Nijhoff, Distributors for the U. S. and Canada, Kluwer Boston, 1984:57-113.
- [21] 王亚军, 张我华. 龙滩碾压混凝土坝随机损伤力学分析的模糊自适应有限元研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(6):1251-1259.
- WANG YA-JUN, ZHANG WO-HUA. Research on fuzzy self-adapting finite element in stochastic damage mechanics analysis for Longtan rolled-concrete dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(6):1251-1259.
- [22] 刘纲, 黄宗明, 杨溥. 恒载作用下梁和桥梁的损伤识别研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008,30(5):28-31.
- LIU GANG, HUANG ZONG-MING, YANG PU. Damage detection for beam and bridge under dead load [J]. Journal of Chongqing Jiangzhu University, 2008, 30(5):28-31.
- [23] 刘纲, 黄宗明, 高建莉. 基于损伤力影响线的静定梁损伤识别研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(8):23-27.
- LIU GANG, HUANG ZONG-MING, GAO JIAN-LI. Damage Identification based on Damage Load Influence Line to Statically Determinate Beam [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(8): 23-27.
- [24] 姜小春, 谢和平, 周宏伟. 压缩载荷下准脆性材料宏观损伤变量研究[J]. 岩土力学, 2008,29(9):2531-2536
- JIANG XIAO-CHUN, XIE HE-PING, ZHOU HONG-WEI. Analysis of relationship between macroscopic damage variable and mesoscopic damage variable of quasi-brittle materials under compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008,29(9):2531-2536.

(编辑 王秀玲)