

基于二维逾渗相变重整化群的混凝土重力坝断面破坏评价

顾培英^{1,2}, 邓 昌^{1,2}, 肖仕燕^{1,2}, 章道生^{1,2}, 汤 雷^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210029;

2. 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:针对混凝土重力坝失效路径具有方向性,可认为类似于渗流通道的特性,提出基于二维逾渗相变重整化群的混凝土重力坝断面破坏评价方法。在传统正方形单元等损伤概率逾渗模型的基础上,推导了正方形单元不等损伤概率模型,确定了梯形原胞、三角形原胞破坏情况,建立了三角形断面逾渗相变重整化群模型,并以某混凝土重力坝断面为例,针对上、中、下部不同单元损伤概率下的整体断面破坏概率进行比较研究。迭代计算结果表明,当单元损伤概率小于0.40时,大坝断面整体处于安全状态;当损伤概率在0.40~0.60时,整体安全性降低,结构由安全向整体破坏过渡;当损伤概率大于0.60时,整体安全性极低,此时若外界环境恶化,极有可能发生整体贯穿破坏。

关键词:混凝土重力坝;逾渗相变;重整化群;不等局部损伤概率;断面贯穿破坏

中图分类号:TV331

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)06-0031-06

Development of cross-section damage based on two-dimensional percolation transition with renormalization group theory for concrete gravity dam//GU Peiying^{1,2}, DENG Chang^{1,2}, XIAO Shiyan^{1,2}, ZHANG Daosheng^{1,2}, TANG Lei^{1,2}(1. *Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Key laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*)

Abstract: With regard to failure paths in concrete gravity dams, which have similar characteristics to seepage channels, the cross-section damage method for evaluating concrete gravity dams is proposed on the basis of a two-dimensional percolation transition renormalization group. First, according to the percolation transition model of square units with equal local damage probabilities, the unequal local damage probability model is determined. Then, the trapezoid and triangle primitive cell damage types are determined. The percolation transition model with triangular sections is established. Finally, taking a concrete gravity dam section as an example, the probability of cross-section damage is analyzed. The structure is divided into three parts: the upper, middle, and lower parts. The local damage probabilities of the three parts are unequal. The results of iterative calculation show that when the local damage probability is less than 0.40, the dam section is safe. When it varies from 0.40 to 0.60, the overall safety decreases, with a transition from safe to damage overall. When the probability is greater than 0.60, the overall safety is very low. Cross-section damage may occur if the external environment worsens.

Key words: concrete gravity dam; percolation transition; renormalization group; unequal local damage probability; cross-section damage

目前水工混凝土结构安全评估一般是通过外观破损调查了解损伤状况,借助多种无损或局部有损专项检测技术,并结合部分复核计算来进行,但从某种意义上讲难以进行整体安全性评价。顾培英等^[1]提出了一种基于重整化群理论的混凝土结构整体安全性评价新方法。重整化群方法是威尔逊在量子场理论中提出的^[2-4],他把量子场论中的重整化

群方法应用于临界现象研究,主要有3个方面的应用:①多孔介质中的渗流;②岩石破碎;③断层破裂。笔者分别针对损伤概率不等正方体单元、三棱柱单元,建立了基于岩石破碎模型的局部损伤与正方体、三棱柱整体结构破坏概率的关系^[1,5-6]。已开展的研究在水工混凝土整体安全评价方面取得一定成果,但研究发现,岩石破碎模型重整化群方法忽略了

结构失效路径,而混凝土重力坝失效路径不容忽视。

为解决上述问题,本文主要讨论逾渗相变重整化群方法。逾渗模型是 Broadbent 提出的模拟流体在无序连通介质中流动的模型^[7-8]。如单元渗透概率 p_0 小于渗透阈值 p^* 时,多孔介质整体渗透概率很小,几乎不渗透;当 $p_0 = p^*$ 时,液体开始流动;当 $p_0 > p^*$ 时,多孔介质总是渗透的。该模型在其他诸多领域也得到广泛应用,如森林火灾传播、聚合物凝胶化、传染疾病传播、流化床烧结过程、稀释磁体等,甚至被应用于研究地区经济发展状况。1995 年 White 等^[9]发展了针对流体的重整化方法,国内外不少学者对其进行了改进^[10-14]。假定最小单元渗透概率相等,根据一定准则,推得稍大的 1 级原胞渗透概率,再由 1 级原胞渗透概率推得 2 级原胞渗透概率,依此类推,尺度越来越大,建立 $n+1$ 级与 n 级原胞渗透概率递推公式,求得不动点,其中不稳定不动点即为渗透临界点。朱大勇等^[15]给出了 4×4 单元网格渗透概率解析表达式。吴国雄等^[16]运用重整化群方法分析了沥青混凝土路面开裂破坏渗流模型,求出渗流阈值,以确定沥青混凝土路面开裂破坏的临界条件。何超等^[17]在不同尺度变换元胞数下采用重整化群法计算四邻域规则和八邻域规则下二维导电点的渗流参数。姜春露等^[18]借助重整化群理论,推导了脆性岩石临界破坏强度与峰值应力比值的表达式,预测伺服渗透试验渗透突变点位置。张蕊等^[19]推导了脆性岩石渗透率峰值点应变与渗透率急剧增大点应变的数学表达式。薛雷等^[20]把岩体脆性破坏过程看作一个逾渗相变过程,在利用重整化群方法在求得一维和二维系统逾渗阈值的基础上,研究了岩体脆性破坏三维逾渗阈值附近的临界特性。

传统逾渗重整化群理论成功地解释了逾渗模型的突变现象,利用标度不变性处理相变和临界点问题,建立局部与整体关系,已在诸多领域中得到应用,该方法在处理大体积结构上具有优越性,可用于重力坝整体安全评价。传统逾渗模型假设若原胞从一侧至对边(面)存在连续渗流通道,则该原胞是可渗透的。笔者认为,混凝土重力坝整体贯穿破坏与失效路径有关,具有方向性,类似于渗流通道,若原胞从一侧至对边(面)存在一个连续失效路径,则该原胞是破坏的。将传统逾渗模型中的单元渗透概率替换成单元破坏概率,即可根据逾渗重整化群理论,开辟混凝土重力坝整体破坏风险研究新思路。本文主要在传统正方形单元等损伤概率逾渗模型基础上,推导正方形单元不等损伤概率模型,确定梯形原胞、三角形原胞破坏情况,建立三角形断面逾渗相变

重整化群模型,并以某一混凝土重力坝断面为例,对上、中、下部不同单元损伤概率下的断面整体破坏情况进行比较研究。

1 传统二维逾渗模型

传统 2×2 二维逾渗模型示意图如图 1 所示。取 1 级单元为最小单位,按重整化群方法组成越来越大的原胞,最低一级即 1 级原胞由 2×2 二维单元即 4 个单元方阵组成。传统逾渗模型讨论的是每个单元渗透概率相等情况,根据每个单元渗透概率 p_0 确定 1 级原胞渗透概率 p_1 。如果从原胞的左方至右方存在一连续渗流通道,则该原胞是可渗透的。问题被重整后,4 个 1 级原胞变成 2 级原胞的 4 个 2 级单元。2 级原胞渗透概率 p_2 由 2 级单元(即 1 级原胞)渗透概率确定。这个过程不断重复至越来越大的标度。 2×2 二维单元网格模型 $n+1$ 级原胞渗透概率 p_{n+1} 与 n 级原胞渗透概率 p_n 之间的关系见式(1),该模型临界渗透概率为 0.618^[21]。

$$p_{n+1} = -p_n^4 + 2p_n^2 \tag{1}$$

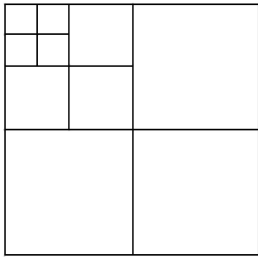


图 1 传统 2×2 二维逾渗模型示意图

2 正方形单元不等损伤概率逾渗相变重整化群模型

传统重整化群方法处理的是损伤概率相等的情况,由于实际混凝土结构各局部损伤概率常常不等,需建立不等局部损伤概率的正方形平面破坏评价模型,即分别推导各损伤破坏情况下的递推公式。以下通过图 2 所示的正方形二维原胞破坏情况示意图来说明。图 2(a) 为破坏情况示意图,图 2(a) 中的数字为破坏单元个数, a、b、...、f 为某破坏单元数不变情况下的不同组合。假设左方至右方存在一连续破坏路径,则该原胞是破坏的,存在 $2a_2$ 、 $2f_2$ 、 $3a_3$ 、 $3b_3$ 、 $3c_3$ 、 $3d_3$ 和 4 共 7 种破坏情况。图 2(b) 为单元编号,设定 1 级原胞中的 4 个单元损伤概率依次为 p_{01} 、 p_{02} 、 p_{03} 、 p_{04} 。

首先推导 7 种破坏情况下的 1 级原胞损伤概率,分别用 $p_{1,2a_2}$ 、 $p_{1,2f_2}$ 、 $p_{1,3a_3}$ 、 $p_{1,3b_3}$ 、 $p_{1,3c_3}$ 、 $p_{1,3d_3}$ 、 $p_{1,4}$ 表示,计算公式为

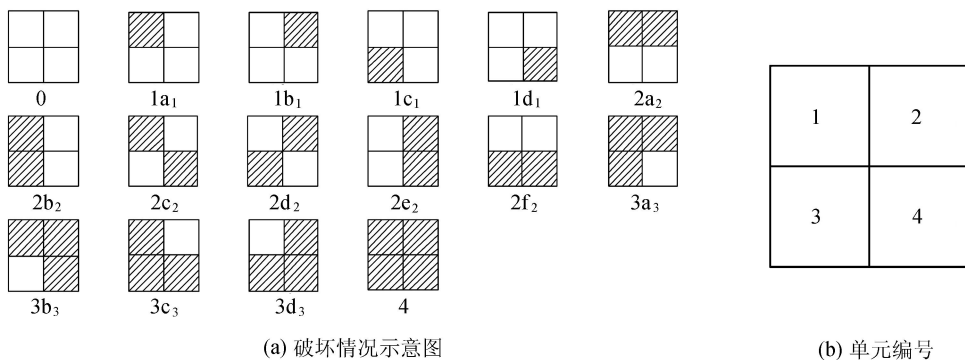


图 2 正方形二维原胞破坏情况示意图

$$\begin{cases} p_{1,2a_2} = p_{01}p_{02}(1 - p_{03})(1 - p_{04}) \\ p_{1,2f_2} = p_{03}p_{04}(1 - p_{01})(1 - p_{02}) \\ p_{1,3a_3} = p_{01}p_{02}p_{03}(1 - p_{04}) \\ p_{1,3b_3} = p_{01}p_{02}p_{04}(1 - p_{03}) \\ p_{1,3c_3} = p_{01}p_{03}p_{04}(1 - p_{02}) \\ p_{1,3d_3} = p_{02}p_{03}p_{04}(1 - p_{01}) \\ p_{1,4} = p_{01}p_{02}p_{03}p_{04} \end{cases} \quad (2)$$

求和得到 1 级原胞损伤概率

$$p_1 = p_{1,2a_2} + p_{1,2f_2} + p_{1,3a_3} + p_{1,3b_3} + p_{1,3c_3} + p_{1,3d_3} + p_{1,4} \quad (3)$$

重整化后,同样得 $n+1$ 级损伤概率

$$p_{n+1} = p_{n+1,2a_2} + p_{n+1,2f_2} + p_{n+1,3a_3} + p_{n+1,3b_3} + p_{n+1,3c_3} + p_{n+1,3d_3} + p_{n+1,4} \quad (4)$$

显然,不等概率递推公式比等概率复杂得多,式(4)是一个通式,传统等概率渗透概率递推公式(1)只是针对单元损伤概率相等情况下的一个特例。

3 三角形断面逾渗相变重整化群模型

上述讨论情况只适用于正方形断面结构,并划

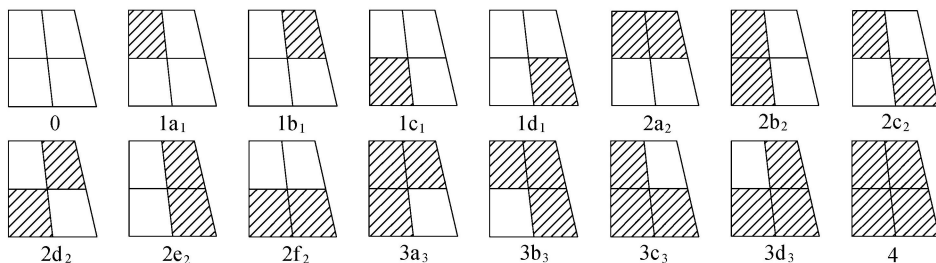


图 4 梯形原胞破坏情况示意图

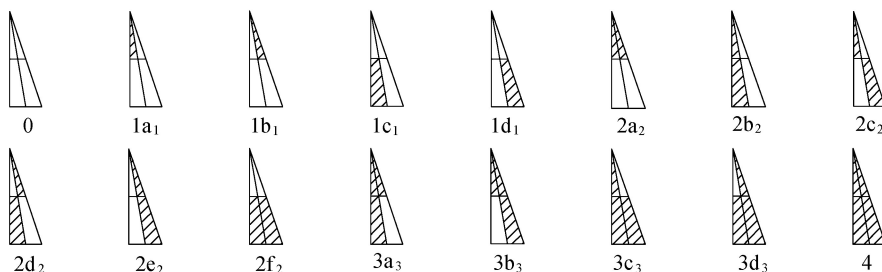


图 5 三角形原胞破坏情况示意图

分成正方形单元,混凝土重力坝断面不具备此条件,通常其断面呈三角形,所以需分别对重力坝断面和单元进行处理,建立符合实际重力坝断面的逾渗相变重整化群模型。三角形断面等间距分成 2^n 等份,若 $n=3$,则分成 8 等份。三角形断面逾渗模型示意图如图 3 所示,图 3(a)中共有 64 个单元,单元类型包括梯形和三角形,梯形、三角形原胞分别如图 3(b)、图 3(c)所示。

梯形原胞、三角形原胞破坏情况示意图分别如图 4、图 5 所示,同样存在 7 种破坏情况。

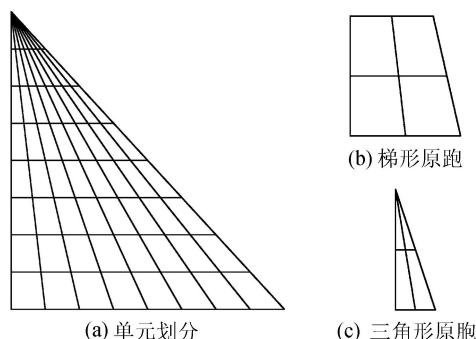


图 3 三角形断面逾渗模型示意图

若单元损伤概率相等,则 7 种破坏情况下的 1 级原胞损伤概率分别为

$$\begin{cases} p_{1,2a_2} = p_{1,2f_2} = p_0^2(1 - p_0)^2 \\ p_{1,3a_3} = p_{1,3b_3} = p_{1,3c_3} = p_{1,3d_3} = p_0^3(1 - p_0) \\ p_{1,4} = p_0^4 \end{cases} \quad (5)$$

求和可得到 1 级原胞损伤概率 p_1 ,重整化后, p_{n+1} 与 p_n 间的关系同式(1)。由此可知,传统 2×2 正方形单元逾渗模型渗透概率递推公式也适用于图 4、图 5 划分方式的等概率梯形、三角形单元。

由于结构老化、渗流、水平荷载、工作环境、地震、洪灾等对结构各部位造成的损伤不同,各单元局部损伤概率往往不等。同理,只要梯形、三角形单元编号方式与图 2(b) 相同,则单元损伤概率不等的 1 级、 $n+1$ 级原胞损伤概率推导过程类似,其结果同式(2)~(4)。

若最大级原胞对应于某一混凝土重力坝断面,则可通过式(4)递推得到该断面整体破坏概率 P 。需要指出的是,虽然 2×2 正方形单元逾渗模型递推公式形式上适用于梯形、三角形单元,但由于单元形状、大小、位置、受力状态各不相同,单元损伤概率确定方法也不同于渗透概率的确定方法,单元损伤概率的确定可参考文献[22]。

4 混凝土重力坝断面破坏评价算例

根据以上算法,利用 MATLAB 自编计算程序。根据前期研究成果,原胞级数一般取 3 即可满足实际工程需要^[23],所以本文原胞级数选 3 级和 4 级。以某混凝土重力坝断面为例,分别划分成 3 级原胞和 4 级原胞,即对边长进行 8 等分、16 等分划分,分别有 64 个、256 个 1 级单元。为便于确定计算工况,从上至下 1 级单元依次称为 1 层、2 层、……、8 层或 1 层、2 层、……、16 层。计算网格示意图如图 6 所示,计算工况列于表 1。 p_{11} 、 p_{12} 、……、 p_{116} 分别为第 1 层、第 2 层、……、第 16 层单元损伤概率; $p_{0,m}$ 、 $p_{0,e}$ 分别为中部和上、下部区 1 级单元损伤概率。对于实际结构而言,结构底部损伤对抗渗、受力不利,极有可能使损伤进一步加剧;水利工程往往位于地震多发区,若遭受地震,则上部结构地震响应较大,其损伤概率也较大。为便于比较上下部及中部区不同损伤范围的影响,将重力坝断面单元损伤分上、中、下部三个区讨论,计算中假设中部区和上、下部区单元损伤概率区内相等。

计算得到结构断面整体破坏概率 P 的变化曲线如图 7 所示,图中横坐标为上下部区 1 级单元损伤概率值 $p_{0,e}$,并以中部区单元损伤概率 $p_{0,m}$ 为系

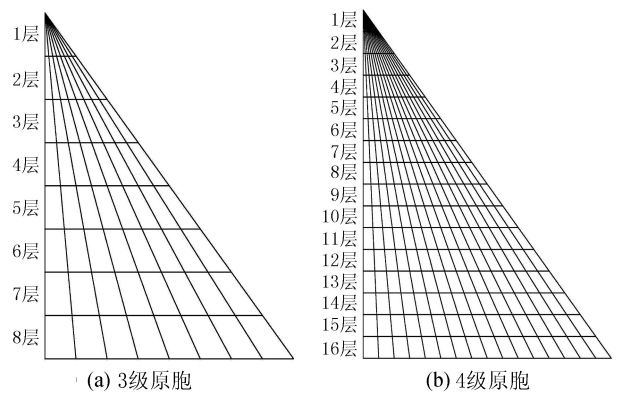


图 6 计算网格示意图

表 1 计算工况

计算 工况	原胞 级数	分区单元损伤概率假设		计算 组次
		中部	上下部	
1	3	$p_{14} = p_{15} = p_{0,m}$	$p_{11} = p_{12} = p_{13} =$ $p_{16} = p_{17} = p_{18} = p_{0,e}$	132
2	3	$p_{13} = p_{14} = p_{15} =$ $p_{16} = p_{0,m}$	$p_{11} = p_{12} =$ $p_{17} = p_{18} = p_{0,e}$	132
3	4	$p_{17} = p_{18} = p_{19} =$ $p_{110} = p_{0,m}$	$p_{11} = p_{12} = \cdots = p_{16} = p_{111} =$ $p_{112} = \cdots = p_{116} = p_{0,e}$	132
4	4	$p_{15} = p_{16} = \cdots =$ $p_{112} = p_{0,m}$	$p_{11} = p_{12} = p_{13} = p_{14} = p_{113} =$ $p_{114} = p_{115} = p_{116} = p_{0,e}$	132

注: $p_{0,m}$ 取值组次为 0.05、0.10、0.20、……、0.90、0.95; $p_{0,e}$ 取值组次为 0.05、0.10、0.20、……、0.90、0.95、1.00。

列。为便于研究临界概率,图中还给出了单元等损伤概率 $p_{0,m} = p_{0,e}$ 曲线、整体破坏概率等于单元损伤概率 $P = p_{0,e}$ 直线。

根据图 7,从结构断面整体破坏概率曲线趋势看,整体破坏概率 P 随单元损伤概率的增大而增大。当中部区单元损伤概率 $p_{0,m}$ 较小,上、下部区单元损伤概率 $p_{0,e} < 0.40$ 时, P 值很小,趋近于 0;当 $p_{0,e} \geq 0.40$ 时, P 开始增大,并随 $p_{0,e}$ 的增大而急剧增大,最后趋近于 1。当 $p_{0,m}$ 较大时,即使 $p_{0,e}$ 较小, P 也较大;当 $p_{0,m}$ 很大时, P 趋近于 1。此外, $p_{0,m} \leq 0.30$ 时, $p_{0,e}$ 与 P 关系曲线几乎重叠,即 $p_{0,m}$ 较小时, $p_{0,m}$ 对 P 影响很小。

$p_{0,m} = p_{0,e}$ 下的整体破坏概率曲线与 $P = p_{0,e}$ 直线的交点概率 0.618 即为传统单元等损伤临界概率,对于不等单元损伤概率,整体破坏概率曲线与 $P = p_{0,e}$ 直线交点定义为类临界概率,即为重力坝断面整体贯穿破坏临界概率 p^* , p^* 对应于 $p_{0,m}$ 下的上下部区单元损伤临界概率。由图 7 可知,在 $0.05 \leq p_{0,e} < 1.00$ 范围内,当 $0.05 \leq p_{0,m} < 0.50$ 时,整体破坏概率曲线与 $P = p_{0,e}$ 直线只有一个交点,曲线 $p_{0,m} = 0.50$ 、0.60、0.70 有 2 个交点, $p_{0,m} > 0.70$ 时没有交点。分析破坏状况相同下的 3 级、4 级原胞曲线趋势,即分别比较图 7(a) 与图 7(c)、图 7(b) 与图 7(d),可知随原胞级数的增加,2 个交点的曲线会逐步趋近于 1

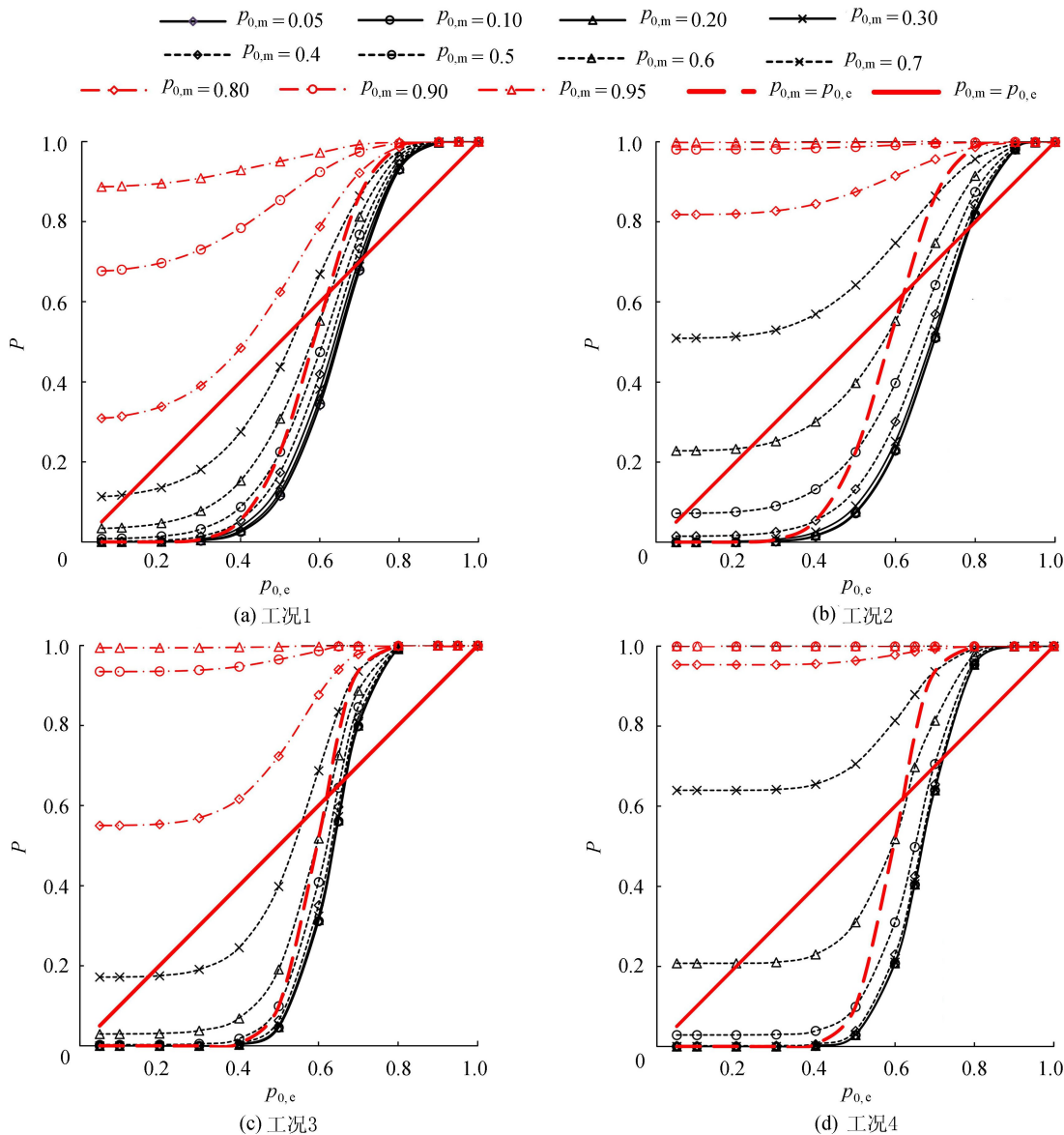


图7 结构断面整体破坏概率曲线

个交点或没有交点。如图7(a)中曲线 $p_{0,m}=0.70$ 有2个交点,图7(c)中该曲线虽仍有2个交点,但 P 值增大,曲线逐步上移,趋势是没有交点;图7(b)中曲线 $p_{0,m}=0.50, 0.60$ 都有2个交点,图7(d)中曲线 $p_{0,m}=0.50$ 只有1个交点,虽 $p_{0,m}=0.60$ 仍有2个交点,但 P 值减小,曲线逐步下移,趋势是1个交点。换句话说,对于临界概率附近的中部区单元损伤结构,随着计算精度的提高,要么只有1个交点 p^* ,要么没有交点。1个交点意味着单元即使损伤,但只要 $p_{0,e} < p^*$,断面就不会发生整体贯穿破坏,只有 $p_{0,e} > p^*$ 才会发生整体贯穿破坏。无交点说明中部区单元损伤概率已经较大,此时断面已发生整体贯穿破坏,此时可认为上下部区损伤状况的类临界概率为零。

此外,相对于单元等损伤临界概率而言,不等单元损伤概率下的类临界概率发生偏移,类临界概率

与中部区单元损伤概率的关系曲线如图8所示。

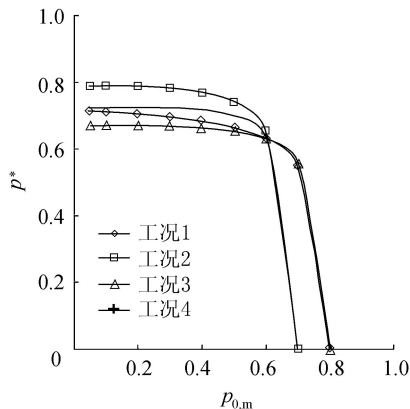


图8 类临界概率与中部区单元损伤概率的关系曲线

结合图7、图8可知,随着 $p_{0,m}$ 的增大, p^* 有所减小,但当 $p_{0,m}$ 较小时, p^* 变化不大,当 $p_{0,m} \geq 0.60$ 时, p^* 急剧降低。综合分析可知,当 $p_{0,e} < 0.40$ 时,坝断

面整体处于安全状态; $0.4 \leq p_{0,e} \leq 0.6$ 时, 整体安全性降低, 结构由安全向整体破坏过渡, 处于亚健康状态; 当 $p_{0,e} > 0.60$ 时, 坝断面整体安全性极低, 此时若外界环境恶化, 极有可能发生整体贯穿破坏。

5 结 语

在传统正方形单元等损伤概率逾渗模型的基础上, 提出了基于二维逾渗相变重整化群的混凝土重力坝断面破坏评价方法, 推导了正方形单元不等损伤概率逾渗相变重整化群模型, 得到了断面整体破坏概率, 传统的二维逾渗模型只是该模型针对正方形单元损伤概率相等情况下的一个特例。确定了梯形原胞、三角形原胞破坏情况, 建立了包括梯形、三角形单元的三角形断面逾渗相变重整化群模型。虽从形式上看, 正方形单元公式适用于梯形、三角形单元, 但由于其单元形状、大小、位置、受力状态各不相同, 单元损伤概率的确定方法也大不相同。

算例计算表明, 当单元损伤概率小于 0.40 时, 坝断面整体处于安全状态; 当单元损伤概率在 0.40 ~ 0.60 时, 整体安全性降低, 结构由安全向整体破坏过渡; 当单元损伤概率大于 0.60 时, 坝断面整体安全性极低, 此时若外界环境恶化, 极有可能发生整体贯穿破坏。

本文所提方法虽涉及逾渗模型, 但与传统逾渗模型有本质区别。传统逾渗模型是描述流体在多孔介质中的渗透情况, 渗流要服从流体力学规律, 建立的是单元渗透概率与整体渗透概率间的关系。而本文讨论的是单元损伤概率与整体贯穿破坏间的关系, 单元损伤需遵循结构静动力学规律, 研究的重点是单元损伤概率如何分布会引起重力坝的整体贯穿破坏, 借鉴贯穿破坏与渗流通道的相似性, 而渗流本身并不是关注重点。此外, 本研究与有限元也有本质区别。

参考文献:

[1] 顾培英, 黄勤红, 邓昌, 等. 基于重整化群的水工混凝土结构整体破坏概率研究[J]. 水利水运工程学报, 2010 (4): 1-5. (GU Peiying, HUANG Qinrong, DENG Chang, et al. Damaged probability of concrete for hydraulic structure based on renormalization group theory [J]. Hydro-science and Engineering, 2010 (4): 1-5. (in Chinese))

[2] 于禄, 郝柏林. 相变和临界现象[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

[3] 陈颢, 陈凌. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社, 2005.

[4] 阎贵卿, 阎毅. 近代数学物理理论计算与可视化技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.

[5] GU P, DENG C, ZHANG D S, et al. Probability of overall collapse for concrete gravity dam based on renormalization

group theory of unequal probability unit [C] // The 2nd SREE Conference on Hydraulic Engineering (CHE 2013). London: CRC Press, 2014: 135-140.

[6] 顾培英, 邓昌, 汤雷. 基于重整化群方法的三棱柱单元整体破坏概率模型[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (3): 16-19, 80. (GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. A model of overall damage probability of triangular prism unit based on renormalization group method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (3): 16-19, 80. (in Chinese))

[7] 孙霞, 吴自勤, 黄昀. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2003: 143-182.

[8] 刘志峰, 赖远庭, 赵刚, 等. 随机多孔介质逾渗模型渗透率的临界标度性质[J]. 物理学报, 2008, 57 (4): 2011-2015. (LIU Zhifeng, LAI Yuaning, ZHAO Gang, et al. The critical scaling property of random percolation porous media [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57 (4): 2011-2015. (in Chinese))

[9] WHITE J A, ZHANG S. Renormalization theory of nonuniversal thermal properties of fluids [J]. Chemical Physics. 1995, 103 (5): 1922-1928.

[10] 吴量, 蔡钧. White 流体重整化群理论的标度性质[J]. 化学学报, 2009, 67 (4): 283-288. (WU Liang, CAI Jun. Scaling properties of white's renormalization group theory of fluid [J]. Acta Chimica Sinica, 2009, 67 (4): 283-288. (in Chinese))

[11] CAI J, PRAUSNITZ J. Thermodynamics for fluid mixtures near to and far from the vapor-liquid critical point [J]. Fluid Phase Equilib, 2004, 219 (2): 205-217.

[12] MI J G, TANG Y P, ZHONG C L, et al. Prediction of global vapor-liquid equilibria for mixtures containing polar and associating components with improved renormalization group theory [J]. Physical Chemistry: Ser B, 2005, 109 (43): 20546-20553.

[13] 龚岩, 倪建军, 梁钦峰, 等. 气化炉与辐射废锅接口壁面熔渣流动数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27 (7): 858-864. (GONG Yan, NI Jianjun, LIANG Qinfeng, et al. Numerical simulation of molten-slag flow in the connection wall of gasifier to radiant syngas cooler [J]. Computers and Applied Chemistry, 2010, 27 (7): 858-864. (in Chinese))

[14] 蔡文祥, 赵坚行, 胡好生, 等. 数值研究环形回流燃烧室紊流燃烧流场[J]. 航空动力学报, 2010, 25 (5): 993-998. (CAI Wenxiang, ZHAO Jianxing, HU Haosheng, et al. Numerical research of turbulent combustion in reversed-type annular combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25 (5): 993-998. (in Chinese))

[15] 朱大勇, 范鹏贤, 郭志昆, 等. 裂隙岩体逾渗模型中渗透概率递推矩阵[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (2): 262-267. (ZHU Dayong, FAN Pengxian, GUO Zhikun, et al. Recurrence matrix of permeable probability in percolation model for fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (2): 262-267. (in Chinese)) (下转第 85 页)

- 响的试验及分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(1): 95-98. (NING Baokuan, LIU Bin, CHEN Sili. Bearing capacity study of cement-mixed soil pile under environmental erosion[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(1): 95-98. (in Chinese))
- [11] 陈四利, 宁宝宽. 岩土材料的环境效应[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 17-69.
- [12] 陈四利, 史建军, 于涛, 等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 343-349. (CHEN Sili, SHI Jianjun, YU Tao, et al. Effect of freezing-thawing cycle on the mechanical behaviors of cemented soil [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 343-349. (in Chinese))
- [13] 刘新, 张文博, 齐园园, 等. 硫酸钠对水泥土强度影响的机理分析[J]. 中国科技论文, 2014, 9(3): 347-350. (LIU Xin, ZHANG Wenbo, QI Yuanyuan, et al. Mechanism of analysis of the effects of sodium sulfate on the strength of cement soil [J]. China Sciencepaper, 2014, 9(3): 347-350. (in Chinese))
- [14] 白晓红, 赵永强, 韩鹏举, 等. 污染环境对水泥土力学特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1260-1263. (BAI Xiaohong, ZHAO Yongqiang, HAN Pengju, et al. Experimental study on mechanical property of cemented soil under environmental contaminations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1260-1263. (in Chinese))
- (收稿日期: 2014-06-03 编辑: 熊水斌)

(上接第 36 页)

- [16] 吴国雄, 丁王飞, 张洋, 等. 沥青混凝土路面开裂破坏的渗流模型分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(6): 1016-1020. (WU Guoxiong, DING Wangfei, ZHANG Yang, et al. Percolation model of asphalt concrete pavement crack damage[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Sciences, 2009, 28(6): 1016-1020. (in Chinese))
- [17] 何超, 吕绪良, 高福银, 等. 二维导电点渗流参数的重整化群法计算[J]. 应用科学学报, 2010, 28(2): 170-174. (HE Chao, LÜ Xuliang, GAO Fuyin, et al. Calculation of 2D site percolation parameters of electrical conductivity using renormalization group method [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(2): 170-174. (in Chinese))
- [18] 姜春露, 孙强, 姜振泉, 等. 脆性岩石全应力应变过程中渗透性突变研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(2): 688-693. (JIANG Chunlu, SUN Qiang, JIANG Zhenquan, et al. Permeability catastrophe of brittle rock during complete stress-strain path [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(2): 688-693. (in Chinese))
- [19] 张蕊, 姜振泉, 孙强, 等. 脆性岩石变形机制与渗透率关系研究[J]. 高校地质学报, 2012, 18(4): 719-723. (ZHANG Rui, JIANG Zhenquan, SUN Qiang, et al. Study on the relationship of the brittle deformation mechanism and permeability of rocks[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(4): 719-723. (in Chinese))
- [20] 薛雷, 孙强, 王媛媛, 等. 岩体脆性破裂失稳临界应力特征重正化群研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(4): 710-724. (XUE Lei, SUN Qiang, WANG Yuanyuan, et al. Study on the critical stress state of brittle failure of rock based on renormalization group theory[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(4): 710-724. (in Chinese))
- [21] TURCOTTE D L. 分形与混沌: 在地质学和地球物理学中的应用[M]. 陈颢, 郑捷, 季颖, 译. 北京: 地震出版社, 1993.
- [22] GU P, DENG C, TANG L. Determination of local damage probability in concrete structure [C]//2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering. Nanjing: China Association of Hydraulic Engineering Education, 2012: 489-493.
- [23] 顾培英, 邓昌, 汤雷. 基于重整化群有限原胞级整体安全性分级评价[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 355-360. (GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. Safety classification evaluation of an overall structure based on limited primitive cell level using renormalization group theory [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(4): 355-360. (in Chinese))
- (收稿日期: 2014-07-16 编辑: 郑孝宇)

