

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.017

防渗帷幕随机缺损的模拟及对坝基渗流的影响

许孝臣^{1,2}, 盛金昌¹, 何淑媛¹, 詹美礼¹, 许明华³

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江广川工程咨询公司, 浙江 杭州 310020;

3. 山东省垦利县黄河河务局, 山东 垦利 251500)

摘要: 为了模拟帷幕随机缺损对坝体及坝基渗流的影响, 从随机概念出发, 建立了模拟帷幕随机缺损的数学模型, 重点考虑防渗体缺损大小、分布随机性对渗流场的影响, 从而对防渗体施工的质量提出要求. 通过一工程实例, 说明了利用该随机缺损模型可以模拟帷幕的随机缺损, 并对其进行渗流分析.

关键词: 渗流分析 防渗帷幕 随机缺损模型 非均匀随机数

中图分类号: TV223.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)05-0582-04

防渗帷幕作为坝基防渗体的主要组成部分, 对大坝的安全及防渗起着关键作用, 而最常见的防渗处理措施之一就是帷幕灌浆. 由于防渗帷幕完全位于地下, 因此帷幕灌浆是一项隐蔽性工程. 帷幕灌浆的施工工程量较大, 工艺较复杂, 干扰较大, 所以在施工及日常运行中不可避免地会出现不同程度的施工缺陷. 帷幕灌浆的施工流程主要包括钻孔、冲洗、压水试验、水泥制浆、灌浆、封口等^[1-2]. 由于各种因素的影响, 防渗帷幕难以完整和连续, 工程中的防渗帷幕体系不可避免地存在缺陷. 例如, 在灌浆阶段, 灌浆压力的大小、灌浆方法的选择、灌浆的连续性等都会造成帷幕的缺损. 这些缺陷必然降低防渗体系的功能, 影响工程效益, 如果缺陷严重, 还有可能导致严重的工程事故. 因此, 如果能考虑防渗体系的缺陷, 将对水利工程的渗流控制分析和工程安全评价更加有利.

许多学者对随机有限元渗流进行了分析研究, 提出了许多模拟方法, 如摄动展开随机方法、泰勒展开随机方法、Monte-Carlo 随机方法等, 但这些方法对于工程问题都不太适合. Monte-Carlo 法^[3-4]需要较多的样本, 否则很难达到精度要求. 泰勒展开法^[5-6]和摄动展开法^[7-8]对渗透系数的影响都较小, 而施工缺陷部分的渗透参数与防渗体的渗透参数可能有几百倍的差距.

本文从随机概念出发, 建立了模拟帷幕随机缺损的数学模型, 重点考虑防渗体缺损大小、分布随机性对渗流场的影响, 从而对防渗体施工的质量提出了要求.

1 帷幕随机缺损的模拟方法

帷幕随机缺损的模拟主要通过引入随机数的概念, 随机生成缺损的大小和位置, 采用等效流量的方法, 修改原来帷幕的渗透系数, 从而达到模拟随机缺损的效果.

1.1 随机缺损大小个数的随机性分析

实际工程中随机缺损的大小是不同的. 十分小的缺损对工程渗流没有显著影响, 本文不予考虑. 太大的缺损是不允许存在的. 本文采用分级的思想, 对于在工程中存在, 又能对渗流产生影响的随机缺损分成的不同级别来考虑. 对于不同级别的随机缺损, 用缺损总面积占分析区域总面积的比例来反映, 以对缺损进行总体控制. 对于任一级损伤其半径和面积可以随机生成. 缺损的个数则由该级缺损的总面积和随机产生的缺损半径决定.

1.2 防渗体缺损的随机分布

本文考虑的随机缺损在防渗体分析区域内可以均匀分布, 也可以非均匀分布. 现在通用的计算机语言只能产生 0~1 之间服从均匀分布的伪随机数, 因此必须经过转换才能生成服从一定分布规律的随机数. 生成

收稿日期: 2008-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779012) 教育部留学回国人员科研启动基金

作者简介: 许孝臣(1982—), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程渗流及其流固热化学多场耦合研究.

服从任意概率分布的随机数的主要方法有反函数法、变化法和舍选法等^[9-11]. 本文采用反函数法来生成服从任意概率分布的随机数^[10].

假定连续随机变量 x 是连续随机变量 r 的函数,

$$x = \varphi(r) \tag{1}$$

由概率统计知识可知, x 与 r 在对应点分布函数的数值应当相等,即产生 r 的反变换

$$F(x) = F(r) \tag{2}$$

式中 r 为式(2)的解,即 $r = \varphi^{-1}(x) = \psi(x)$.

在特殊情况下,若 R 是在 $[0,1]$ 区间内均匀分布的连续随机变量,那么 $R < r$ 的概率 $P(R < r) = r$. 此时,式(2)可以简化为

$$F(x) = F(r) = r \tag{3}$$

其反函数

$$x = F^{-1}(r) \tag{4}$$

具有分布函数 F , 因为分布函数是单调递增函数,其反函数存在. 由概率知识可知,对任意实数 X , 有 $P(X < x) = P(F^{-1}(R) < x) = P(R < F(x))$. 因为 R 是在 $[0,1]$ 区间上均匀分布的连续随机变量,故 $P(R < F(x)) = F(x)$, 即 $F^{-1}(r)$ 具有分布函数 F .

式(4)表明,要产生一个服从某种分布的随机数,可以先求出其分布函数反函数的解析式,再将一个在 $[0,1]$ 区间内的均匀随机数的值代入其中计算就可以了.

这里可以根据帷幕的施工及水文地质条件,考虑帷幕缺损的 3 种分布形式:(a)均匀分布;(b)下部缺损的概率大;(c)上部缺损概率大. 其概率密度函数 $f(x)$ 为

均匀分布

$$f(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0, x > 1 \end{cases} \tag{5}$$

下部的概率大

$$f(x) = \begin{cases} 2x & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0, x > 1 \end{cases} \tag{6}$$

上部的概率大

$$f(x) = \begin{cases} -2x + 2 & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0, x > 1 \end{cases} \tag{7}$$

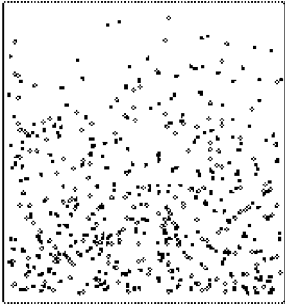


图 1 下部损伤概率大时缺损分布
Fig. 1 Distribution of damages under lower part with large probability of damage

考虑 1m^2 的正方形范围内随机坐标的产生,将 x 方向的坐标和 y 方向的坐标分开生成. 对于 x 方向的坐标假定其服从均匀分布,对于 y 方向的坐标假定分别服从本文介绍的 3 种分布. 对于 3 种分布分别生成了 500 个随机点,由于篇幅所限,图 1 仅给出了下部缺损率大时的缺损分布.

1.3 防渗帷幕圆型随机缺损的模拟方法

本文以双江口坝基部分的防渗帷幕为对象,讨论了随机缺损的模拟方法.

双江口坝基帷幕的三维模型如图 2 所示. 在 1.2 节中已经介绍了在一个正方形区域内产生服从不同分布随机点的方法,再对于每个随机点产生不同的随机半径,就可以得到一个正方形区域内服从不同分布的随机缺损. 但是,工程上的防渗帷幕不可能在同一个平面内,而且也不会是规则的矩形,然而可以把防渗帷幕分割

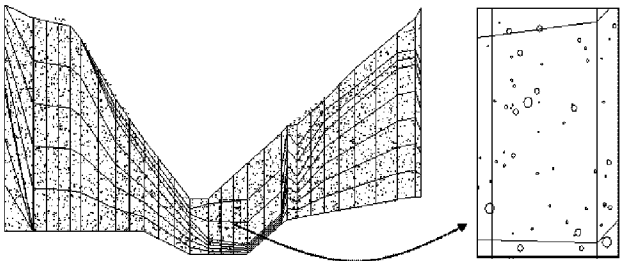


图 2 缺损的三维坐标及大小示意图
Fig. 2 3D coordinates and magnitude of damage

成几个不同的梯形(图 2),因此可以按梯形来生成帷幕的缺损. 具体步骤如下:(a)根据防渗帷幕的形状,把帷幕分解成几个梯形. 由此,把此防渗帷幕分解为 7 个梯形,然后计算每个梯形的面积,确定帷幕缺损的面积占总面积的比例,该比例为 1%. (b)按照 1.2 节的方法,在一个正方形区域内,生成随机缺损的坐标. 将缺损分为 4 级,假定每级的缺损面积相等. 缺损的大小就是在最大半径与最小半径之间随机产生. (c)由于产生的随

机缺损的位置是在一正方形的平面中产生的,必须将其转化到三维的帷幕模型中.在此采用等参有限元中的坐标变换方法将其转化到三维坐标中,如式(8)所示:

$$X = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) X_i \tag{8}$$

式中: X ——代表四边形 3 个方向的坐标值; $N_i(\xi, \eta)$ ——单元的形函数.通过式(8)就可以将在(b)中产生的随机缺损位置转化到帷幕的三维坐标中去.变化后的坐标位置及大小如图 2 所示.

对于圆型缺损,可以把它等效成一个杆单元,加入到有限元的计算中,但是由于缺损的数量较多,工作量巨大,因此采用流量等效的方法来模拟.假设单元原面积为 S_0 ,渗透系数为 K_0 ,等效后的渗透系数为 K ,这个单元的缺损面积为 S_1 ,缺损处的渗透系数为 K_1 ,则通过该单元的流量 Q 为

$$\begin{cases} Q = K_1 S_1 J + K_0 (S_0 - S_1) J & \text{等效前} \\ Q' = K S_0 J & \text{等效后} \end{cases} \tag{9}$$

由于等效前后流量相等,故由式(9)得到等效后的单元渗透系数

$$K = \frac{K_1 S_1 + K_0 (S_0 - S_1)}{S_0} \tag{10}$$

2 工程实例

双江口工程为土质心墙堆石坝,最大坝高 314 m.水库正常蓄水位 2 500 m,水库总库容约 27.32 亿 m^3 ,坝区覆盖层较为深厚,河床覆盖层一般厚 48~57 m,主要分布于现代河床及谷坡中下部坡脚地带,成因类型有冲洪积堆积和崩坡积堆积.建坝方案为心墙下部覆盖层全部挖除,下接帷幕灌浆.

本文主要计算了 4 种工况:(a)帷幕没有缺损;(b)帷幕缺损均匀分布;(c)帷幕下部缺损的概率大;(d)帷幕上部缺损的概率大.图 3 给出了几种工况的自由面.从图 3 可以看出,缺损后的自由面要比没有缺损时的自由面抬高较大,抬高值在 13 m 左右,坝体下游出溢点的位置也抬高了 8.6 m 左右,说明帷幕缺损对渗流场的影响较大.帷幕缺损的分布形式不同对自由面的影响不是很大,自由面的变化值都在 1 m 之内.但是仍然可以看出上部缺损时的自由面抬高最大,次之是均匀缺损,下部缺损概率大时最低,说明上部缺损时对渗流场的影响较大.图 3 同时给出了帷幕缺损均匀分布和无缺损时的渗流场.从图 3 可以看出,帷幕缺损对渗流场的影响较大,尤其是帷幕附近,渗流场变化更为剧烈,越是远离帷幕的位置,渗流场的差距越小.

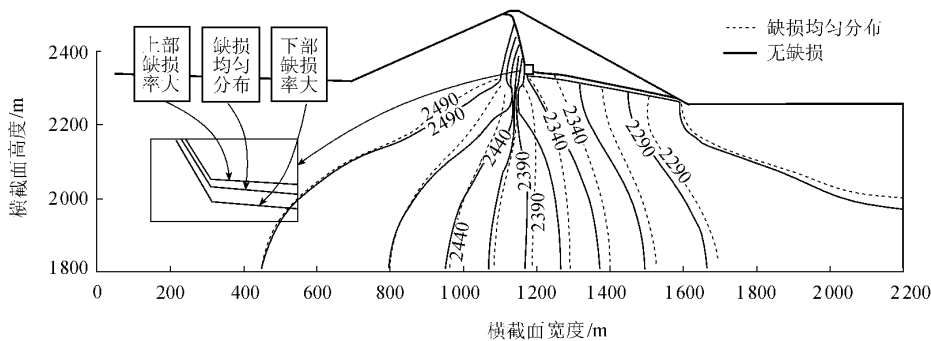


图 3 帷幕缺损不同分布情况下的渗流场

Fig. 3 Seepage field under different distribution of damage of grouting curtain

帷幕缺损对渗流场的梯度影响也较大,其中上部缺损概率大时对覆盖层渗透梯度的影响要大于下部缺损概率大时,部分覆盖层的渗透梯度达到了 1 以上,由于覆盖层的抗渗强度较小,所以发生渗透破坏的可能性较大.这是由于上部缺损的渗流半径要小于下部缺损的渗流半径,而上部缺损靠近覆盖层,所以覆盖层的渗透梯度有较大的增加.这说明帷幕上部的质量控制尤为重要.

3 结 语

帷幕是坝工工程普遍采用的一种防渗形式,但是由于帷幕施工老化等各个方面的原因,帷幕不可能完整连续,或多或少地会存在帷幕缺陷和不连续的部分.本文通过随机产生帷幕的随机缺损,建立了帷幕的随机

缺损模型. 其中考虑了帷幕缺损的不同分布形式,利用非均匀随机数生成了 3 种缺损分布形式,并对其渗流场进行了分析,发现考虑帷幕的缺损对渗流场有较大的影响,其中上部缺损的影响尤为明显,说明控制上部帷幕质量的重要性.

综上所述,本文建立的随机缺损模型可用于帷幕缺损的渗流分析,还可以用于防渗墙、心墙的随机缺损研究,以分析渗流场的变化.

参考文献：

[1] 杨中文,郑新伟. 某大坝除险加固工程基础帷幕灌浆的施工[J]. 浙江水利科技,2003(6) :52-53. (YANG Zhong-wen, ZHENG Xin-wei. Curtain grouting construction of dam foundation in a danger removal and dam reinforcement project[J]. Zhejiang Hyrotechnics, 2003(6) :52-53. (in Chinese))

[2] 韦俊行. 大坝基础帷幕灌浆工作中值得商榷的几个问题[J]. 西部探矿工程,1993,5(6) :66-71. (WEI Jun-xin. Several problems discussed in the heavy curtain grouting of large-delta base[J]. West-china Exploration Engineering,1993,5(6) :66-71. (in Chinese))

[3] 崔秀,吴飞. 解地下水流的 Monte-Carlo 随机法与积分插值法[J]. 计算物理,1997,14(4) :597-599. (CUI Xiu, WU Fei. Monte Carlo stochastic method and integral interpolation method for solving groundwater flow problems[J]. Chinese Journal of Computation Physics,1997,14(4) :597-599. (in Chinese))

[4] BOHM T D, DELUCA P M, COX L J, et al. Monte Carlo calculations to characterize the source for neutron therapy facilities[J]. Medicine Physics,2000,27(5) :783-792.

[5] GIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique,1999,49(3) :387-403.

[6] 盛金昌,速宝玉,魏保义. 基于 Taylor 展开随机有限元法的裂隙岩体随机渗流分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(4) :485-488. (SHENG Jin-chang, SU Bao-yu, WEI Bao-yi. Stochastic seepage analysis of jointed rock masses by usage of Taylor series stochastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(4) :485-488. (in Chinese))

[7] 韩华,程凌鹏,孙维志. 基岩地下水流模型的摄动待定系数随机有限体积分法及应用[J]. 工程勘察,2001(4) :24-27. (HAN Hua, CHENG Ling-peng, SUN Wei-zhi. Perturbation coefficient stochastic finite method of fracture flow model and its application[J]. Geotechnical Investigation and Surveying,2001(4) :24-27. (in Chinese))

[8] 姚磊华. 地下水水流模型的摄动待定系数随机有限元法[J]. 水利学报,1999(7) :60-64. (YAO Lei-hua. Perturbation coefficient awaiting determination stochastic finite element method for groundwater flow models[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999(7) :60-64. (in Chinese))

[9] 朱晓玲,姜浩. 任意概率分布的伪随机数研究和实现[J]. 计算机技术与发展,2007,17(12) :116-118. (ZHU Xiao-ling, JIANG Hao. Study on pseudo-random number of arbitrariness probability distributing and its implementation[J]. Computer Technology and Development,2007,17(12) :116-118. (in Chinese))

[10] 胡性本,刘向明,方积乾. 非均匀分布随机数的产生及其在计算机模拟研究中的应用[J]. 数理医药学杂志,2000,13(1) :59-60. (HU Xing-ben, LIU Xiang-ming, FANG Ji-qian. Generation of non-uniformly distributed random numbers and their application to computer simulation[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2000, 13(1) :59-60. (in Chinese))

[11] 杨振海,杨爱军. 密度函数垂直表示及在非均匀随机数生成中的应用[J]. 数理统计与管理,2006,25(3) :371-378. (YANG Zhen-hai, YANG Ai-jun. The vertical representation of a density and its application of generating random vector for the non-uniform distribution with given density[J]. Application of Statistics and Management,2006,25(3) :371-378. (in Chinese))

Simulation of random damage of grouting curtain and its influence on seepage flows in dam foundation

XU Xiao-chen^{1,2}, SHENG Jin-chang¹, HE Shu-yuan¹, ZHAN Mei-li¹, XU Ming-hua³

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Corporation, Hangzhou 310020, China ;
3. Shandong Yellow River Agency, Kenli 251500, China ;)

Abstract : In order to simulate the influences of random damage of grouting curtain on dams and seepage flows in dam foundation, a mathematical model was established based on the concept of randomness. The influences of the damage size and the randomness of damage distribution of the anti-seepage grouting curtain on the seepage field were highlighted, accordingly, requirements were put forward to the construction quality of the anti-seepage grouting curtain. An engineering case indicated that the random damage model could be employed to simulate the random damage of the grouting curtain, and the seepage analysis was performed.

Key words : seepage analysis ; grouting curtain ; random damage model ; non-uniform random number