

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0571-08

基于认知聚类分区方法的边坡可靠度分析

唐小松^{1,2}, 李典庆^{1,2}, 周创兵^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 提出了边坡可靠度分析的一种新的全局优化方法——认知聚类分区方法。该方法主要包括 5 个步骤: 分区、随机抽样、计算极径 L 、回代、计算可靠指标及验算点。给出了相应的计算流程图, 并编写了基于 C 语言的计算程序 KCPREL。最后, 以岩质边坡稳定可靠度问题为例证明了所提方法的有效性。结果表明, 认知聚类分区方法能同时计算出可靠指标和验算点, 并能获得全局最优解。该方法的计算精度和蒙特卡洛模拟方法相当, 计算效率远远高于传统的蒙特卡洛模拟方法。此外, 该方法在分析含有复杂的隐式及非线性功能函数的边坡稳定可靠度问题方面体现出明显的优越性。等步长认知聚类分区方法能全面且均匀地搜索角度, 从而得到更准确的验算点。为了保证足够的计算精度及减小计算量, 建议步长取 10° 以内。

关 键 词: 边坡; 可靠度; 认知聚类分区方法; 验算点; 等步长

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Knowledge-based clustered partitioning method for reliability analysis of slope stability

TANG Xiao-song^{1,2}, LI Dian-qing^{1,2}, ZHOU Chuang-bing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Education Ministry, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new global optimization reliability method, knowledge-based clustered partitioning (KCP) method, is proposed. The proposed method includes five steps, namely, partitioning, random sampling, calculation of the polar radius, backtracking, and calculations of reliability index and design points. A flowchart for the proposed method is presented. Moreover, a C-language based computer program is developed to carry out the reliability computations. Two examples of reliability analysis for rock slope stability with plane failure are presented to demonstrate the validity and capability of the proposed method. The results indicate that the proposed method can obtain the reliability index and the design points simultaneously. Furthermore, the global optimization solutions can be obtained. The proposed method can ensure sufficient accuracy for reliability computations; and its efficiency is significantly higher than the traditional Monte Carlo simulations, which can be considered as a potential method for reliability analysis of slope stability, especially for slope stability involving implicit and nonlinear performance function. The proposed KCP method with equal-step-length can search the angles systematically, which results in the accurate design points. It is recommended that angle below ten degree should be adopted to ensure sufficient accuracy and reduce the computational effort as low as possible.

Key words: slope; reliability; knowledge-based clustered partitioning (KCP) method; design point; equal-step-length

1 引 言

边坡是一种地质体, 经过上万年的风化剥蚀, 其组成和结构构造都存在较大的不均匀性, 表现出的工程特性的差异很大。因此, 边坡岩体的力学参数具有较大的变异性, 这种变异性主要来自于参数本身固有的变异性。此外, 参数测量过程中由于仪

器精度、操作人员熟练程度及操作程序造成一定的测量误差, 以及计算方法中假定引起的模型不确定性^[1]。长期以来, 边坡稳定性分析采用安全系数来综合考虑这些不确定性的影响, 在考虑不确定性因素的框架下来判断边坡安全度问题时, 传统的安全系数存在一定的问题, 如安全系数为 1.3 的边坡安全度比 1.2 到底高多少? 这很难用定量的指标来回

收稿日期: 2010-03-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 50839004); 教育部新世纪优秀人才计划 (No. NCET-08-0415); 湖北省青年杰出人才基金项目 (No. 2008CDA091)。

第一作者简介: 唐小松, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程可靠度和风险分析方面的研究。E-mail: dianqing@whu.edu.cn

答,而可靠度方法可为考虑不确定性因素的边坡稳定分析提供一种系统的、定量分析的工具^[2]。在可靠度分析中,常用的 FORM 方法分析具有显式功能函数的可靠度问题是非常有效的^[3]。然而,边坡稳定性分析中的功能函数常为隐式且高度非线性,如边坡稳定分析中的剩余推力法、Sarma 法、Morgenstern-Price 法等,这些方法需要反复迭代才能求得安全系数,此时 FORM 方法无能为力。响应面法^[4-5]和蒙特卡洛模拟^[1]方法(MCS)虽能求解上述问题,但响应面法需要在验算点附近用多项式拟合复杂的功能函数,再采用 FORM 方法计算可靠指标,过程较繁琐。蒙特卡洛模拟方法计算量大,尤其是小失效概率问题,如失效概率为 10^{-4} 时至少要进行 100 万次模拟,计算效率很低。本文目的在于提出一种新的边坡可靠度计算方法——认知聚类分区(knowledge-based clustered partitioning, KCP)方法,这是一种全局优化方法,其核心是采用了认知聚类分区技术^[6],由于它是在一些认知前提下对求解区域进行分区,这种分区技术能将优解聚集在一起,从而缩短搜索时间并保证收敛于全局最优解。认知聚类分区技术最早应用于图书收藏管理和检索方案的制定^[6]。随后,Shi 等^[7]在求解旅行商问题时采用了 KCP 技术对求解区域进行分区,有效地降低了搜索工作量并快速地获得全局最优解;Park 等^[8]将它应用于基因表达图谱,克服了解的初始化敏感及陷入局部最优解的问题;Lee 等^[9]采用二分 KCP 方法计算了地震引起沙土液化的失效概率,但文献^[9]只给出了 6 个变量时赋值变量的计算公式、分区及抽样方法,而且功能函数是基本随机变量的显示表达式。此外,二分 KCP 方法在优化求解可靠指标时存在如下问题:极坐标角度跨越较多且不均匀,从而对 θ_i 搜索不全面,导致验算点的定位较粗糙。

对于复杂边坡稳定可靠度问题来说,除了简单的瑞典圆弧法以及简化毕肖普方法的安全系数有显示表达式以外,其他的方法如剩余推力法、Sarma 法、Morgenstern-Price 法等,安全系数都是基本随机变量的隐式表达式。此外,复杂边坡稳定分析中涉及的随机变量也较多。传统的 KCP 方法不能求解上述边坡稳定可靠度问题,因此有必要对现有 KCP 方法进行拓展,以能够广泛地应用于边坡稳定可靠度问题。本文提出了边坡可靠度分析的认知聚类分区方法,推导了随机变量数为 n 时赋值变量的计算公式,并给出了相应的分区及抽样方法。在此基础上,给出了基于等步长法的认知聚类分区方法计算流程图,并编写了基于 C 语言的计算程序 KCPREL。

最后以岩质边坡稳定可靠度问题为例证明了所提方法的有效性。

2 可靠指标的几何涵义

从本质上讲,可靠指标 β 的求解是一个优化问题,即在独立标准正态空间中搜索极限状态曲面到坐标原点的最短距离,如何搜索出全局最优解并缩短搜索时间是可靠指标优化求解中关键问题之一。针对上述问题,本文采用 KCP 技术对求解区域进行分区和抽样来求解可靠指标。假设随机变量 x_i 服从正态分布(对于非正态随机变量,按照等概率原则将它映射为标准正态变量),它可以表示为如下形式:

$$x_i = \mu_i + K_i \sigma_i, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n 为随机变量个数; μ_i 、 σ_i 分别为第 i 个随机变量的均值和标准差; K_i 为标准正态随机变量。因此,原始空间中用 x_i 表示的极限状态曲面可以转化为独立标准正态空间用 K_i 表示的极限状态曲面。在独立标准正态空间中,坐标原点到极限状态曲面的最短距离即为 β ,交点为验算点 K_i^* 。假设极限状态曲面由 n 个随机变量表达,为了确定验算点 K_i^* 和极限状态曲面到坐标原点的最短距离 β ,就必须求解包含 n 个变量的优化问题。当 n 较大时,优化求解将十分耗时。为了缩短优化求解时间,将 K_i 用极坐标表示,即 K_i 由极径 L 和 d 个角度 θ_1 、 θ_2 、 \dots 、 θ_d 表达。本文推导了优化求解时随机抽样过程中赋值变量 u_i 的计算式(2)~(8)。

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L \sin \theta_1 \\ u_2 &= L \cos \theta_1, \quad (n=2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ u_2 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ u_3 &= L \cos \theta_1, \quad (n=3) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ u_2 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ u_3 &= L \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ u_4 &= L \cos \theta_1 \cos \theta_2, \quad (n=4) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_2 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_3 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_4 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_5 &= L \cos \theta_1, \quad (n=5) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_2 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_3 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_4 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_5 &= L \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ u_6 &= L \cos \theta_1 \cos \theta_2, (n=6) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_2 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_3 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_4 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_5 &= L \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_6 &= L \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_7 &= L \cos \theta_1 \cos \theta_2, (n=7) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_2 &= L \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_3 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_4 &= L \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_5 &= L \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_6 &= L \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ u_7 &= L \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ u_8 &= L \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3, (n=8) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： n 为随机变量个数； u_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 为独立标准正态空间中 K_i 的可能值，即赋值变量；极径 L 和角度 θ_1 、 θ_2 、 \dots 、 θ_d 为优化求解时需要确定的未知量。

同理，可得 n 为其他值时 u_i 的计算公式，限于篇幅，这里不再列出。极坐标系中 d 个角度 θ_1 、 θ_2 、 \dots 、 θ_d 最多能求解包含 2^d 个随机变量的可靠指标，如 $d=4$ 时，最多能求解含有 16 个随机变量的可靠度问题。因此，KCP 法计算可靠指标不受随机变量个数的限制，可以求解包含任意数目随机变量的可靠度问题。

可以证明：

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i)^2} = L \quad (9)$$

因此， L 是独立标准正态空间中极限状态曲面上任意点到坐标原点的距离，这时对 β 的求解转化为对最小 L 的优化求解，而且原先包含 n 个变量的优化问题简化为包含 $1+d$ 个变量的优化问题。以 $n=8$ 为例，按照公式 (8)，8 个变量需 3 个角度，即 $d=3$ ，再加上极径 L 从而有 $1+d=4$ ，可见 8 变量优化问题简化为 4 变量优化问题，极大地提高了计算效率。

3 可靠度分析的认知聚类分区方法

3.1 认知聚类分区技术

认知聚类分区方法是一种全局优化方法，该方法首先根据目标函数及所研究问题的特点获取认知，然后在这些认知的基础上对求解区域进行分区。如文献[7]中求解旅行商问题时城市之间的距离是已知的，从而距离每个城市最近和最远的城市也是已知的，分区时将距离某城市较近的城市分在一个区，较远的分在另一个区。在这样一些认知的基础上进行分区，就能将优解聚集在一起，并集中精力在这些优解较集中的区域搜索最优解，从而有效缩短计算时间，最终获得全局最优解。

通过观察式 (2)~(8) 可以发现一些规律：从 u_1 开始每相邻一对 u_i 具有共轭的性质，如 u_1 和 u_2 、 u_3 和 u_4 等；当随机变量个数 n 为奇数时， u_n 与 u_{n-1} 、 u_{n-2} 也共轭。基于这些认知，认知聚类分区技术将相共轭的 u_i 分在一个区，在同一区内， u_i 的顺序不重要，从而有效地减少 u_i 赋值给 K_i 的可能组合数，提高计算效率。当随机变量个数 n 为奇数时， u_i 可以划分为 $(n-1)/2$ 个区；当 n 为偶数时， u_i 可以划分为 $n/2$ 个区。

3.2 基于认知聚类分区方法的可靠度计算步骤

基于可靠指标的几何涵义和认知聚类分区技术，本文提出了可靠指标计算的等步长 KCP 方法，该方法的流程图如图 1 所示，主要包括 5 步：①分区；②随机抽样；③计算极径 L ；④回代；⑤计算可靠指标及验算点。下面以 8 个变量为例进行说明。

①分区 由 3.1 节知，8 个变量时 u_i 可以划分为 4 个区： u_1 和 u_2 第 1 个区， u_3 和 u_4 第 2 个区， u_5 和 u_6 第 3 个区， u_7 和 u_8 第 4 个区。

②随机抽样 在随机抽样过程中， K_i 可能被任一 u_i 所赋值，为了确保成功地搜索验算点，每个 K_i 只能被一个 u_i 所赋值。因此， K_1 可以从 u_1, u_2, \dots, u_n 中任取一值，即有 n 种可能取值；剩下的 K_2 到 K_n 分别只有 $n-1, n-2, \dots, 1$ 种可能取值。因此，没有分区时 K_i 共有 $n! = n(n-1)(n-2) \cdots \times 1$ 种可能的取值组合，搜索时就得重复 $n!$ 次计算，显然很费时。分区后的情况，与 u_i 一样， K_i 也可以分为 4 个区。因此，抽样时一次选中 2 个 u_i ，同时赋给 2 个 K_i 。如图 2 所示，整个抽样过程分为 4 个阶段，第 1 阶段为 K_1 和 K_2 抽样，有 28 ($C_8^2 = 28$) 种赋值给 K_1 和 K_2 的可能组合；第 2 阶段为 K_3 和 K_4 抽样，有 15 ($C_6^2 = 15$) 种赋值给 K_3 和 K_4 的可能组合；第 3 阶

表 1 随机变量的统计参数
Table 1 Statistical parameters of random variables

统计参数	f_1	f_2	c_1 / kPa	c_2 / kPa	α_1	α_2
均值	0.939	0.277	249.09	39.22	30°	59°08′
标准差	0.123	0.010	84.34	4.90	7°15′	6°20′

由于极限状态方程为随机变量的显式表达式，因此，一般可靠度计算方法如 FORM 方法可以直接计算可靠指标及验算点。本文用 C 语言编写了基于等步长 KCP 法的可靠指标计算程序 KCPREL。由于算例中随机变量个数为 6 个，采用 KCP 法计算可靠指标时 u_i 采用式 (6) 计算。为了比较，本文采用 FORM、MCS (20 万次) 及等步长 KCP 法 (步长取 1°) 计算了该边坡的可靠度，结果见表 2。可以看出，等步长 KCP 法的计算精度是很高的，将 MCS 结果视为精确值，等步长 KCP 法的可靠指标

相对误差仅为 0.72%。此外，等步长 KCP 法得到的验算点和 FORM 方法的结果也非常一致，这也进一步证明了等步长 KCP 法的正确性。

例 2. 以大岗山工程为例进行分析，大岗水电站^[10]位于四川省西部大渡河中游石棉县境内，由于边坡具有高地应力、高地震烈度及卸荷风化强烈的显著特点，边坡稳定问题较为突出。大岗水电站坝址 50 年超越概率 10%基岩水平向峰值加速度为 0.251g，相应地震基本烈度为Ⅷ度。通过分析坝址区Ⅶ-Ⅶ剖面左岸天然边坡 (图 4，图中符号 V2、V1、Ⅳ、Ⅲ1、Ⅱ为岩体质量分级) 发现，岩脉 β_{28} 和断层 f_{68} 切割边坡岩体组合成潜在滑动体。本算例将岩脉 β_{28} 的抗剪断强度 f'_1 和 c'_1 、断层 f_{68} 的抗剪断强度 f'_2 和 c'_2 视为正态分布的随机变量，参数统计特性见表 3。此外，边坡岩体重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ 。

表 2 不同方法可靠度结果的比较
Table 2 Comparison of reliability results among different reliability methods

计算方法	可靠度结果							
	f'_1	f'_2	c'_1 / kPa	c'_2 / kPa	α'_1	α'_2	β	$(\beta - \beta_{\text{MCS}} / \beta_{\text{MCS}}) \times 100\%$
MCS							1.668	0.00
FORM	0.859	0.277	189.38	39.026	39°43′	58°36′	1.654	0.84
等步长 KCP 法	0.857	0.277	189.09	39.342	39°42′	58°50′	1.656	0.72

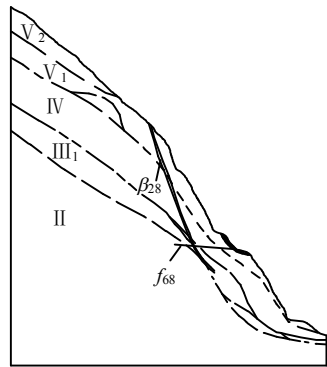


图 4 坝址区Ⅶ-Ⅶ剖面天然边坡
Fig.4 Natural slope on Ⅶ-Ⅶ section at the dam site

表 3 基本变量的统计参数
Table 3 Statistical parameters of basic random variables

统计参数	基本变量			
	f'_1	c'_1 / kPa	f'_2	c'_2 / kPa
均值	0.400	30	0.450	50.0
标准差	0.036	3.6	0.049	7.5

本文考虑 3 种计算工况：天然工况 (不考虑降雨和地震因素)、降雨工况 (地下水位高度取为滑体高度的 10%) 和Ⅷ度地震工况 (计算中水平向地震加速度取为 0.251g)。边坡稳定安全系数采用极限

平衡法中的剩余推力法计算，安全系数需要反复迭代才能求得，因此极限状态方程 $g = F_s - 1 = 0$ 没有显示表达式。此时，FORM 方法就无能为力了，但是，本文提出的等步长 KCP 法却能有效地计算隐式极限状态方程的可靠度问题。由于算例中随机变量个数为 4 个，采用 KCP 法计算可靠指标时 u_i 采用式 (4) 计算。本文采用计算程序 KCPREL (步长取 8°) 计算了边坡可靠度及验算点，为了比较，还给出了 MCS 方法 (30 万次) 的结果，结果见表 4。

由表 4 可以看出，本文提出的 KCP 法能够有效地分析隐式极限状态方程的可靠度问题，它能同时计算出验算点和可靠指标，这两点是传统的 FORM 方法无法比拟的。3 种工况下 KCP 法可靠指标的最大误差为 0.42%，可见 KCP 方法的计算精度是非常高的。而且，KCP 法需要的模拟次数根据步长的取值而变化，如本例中步长取 8° 时只需要进行 2025 次模拟，而传统的 MCS 方法需要进行 30 万次模拟，可见在保证足够的计算精度条件下 KCP 法的计算效率也很高。此外，3 种工况下等步长 KCP 法得到的随机变量验算点都在均值附近，代表抗力作用的随机变量 f'_1 、 c'_1 、 f'_2 、 c'_2 的验算点都小于其均值，

这进一步说明计算结果是合理的。从表4中还可以看出,对于大岗山水电站坝址区VII-VII剖面左岸天然边坡由岩脉 β_{28} 和断层 f_{68} 切割边坡岩体组合成的潜在滑动体来说,在天然状态下(中心安全系数为1.595)的可靠指标为3.850,相应的失效概率为 5.91×10^{-5} ,说明该潜在滑动体在天然状态下具有足

够的安全度,这与边坡开挖前总体稳定的结论相吻合。在VIII度地震工况下(中心安全系数为1.108)的可靠指标仅为0.949,相应的失效概率为0.171,可见在VIII度地震工况下该潜在的滑动体失稳的概率较大。因此,采取锚固支护措施提高边坡稳定性是很有必要的。

表4 3种工况下边坡稳定可靠度结果

Table 4 Reliability results of the considered slope under three different working conditions

工况		f_1''	c_1'' / kPa	f_2''	c_2'' / kPa	β	P_f	$(\beta - \beta_{MCS} / \beta_{MCS}) \times 100\%$
天然	MCS					3.846	6.010×10^{-5}	0.00
	等步长 KCP 法	0.395	29.95	0.261	46.98	3.850	5.910×10^{-5}	0.10
降雨	MCS					3.539	2.010×10^{-4}	0.00
	等步长 KCP 法	0.396	29.95	0.276	47.22	3.542	1.990×10^{-4}	0.08
地震	MCS					0.945	0.172	0.00
	等步长 KCP 法	0.399	29.99	0.403	49.26	0.949	0.171	0.42

5 讨 论

由前面的分析可以看出,等步长 KCP 法中,影响其计算精度和计算量的关键因素是步长 $\Delta\theta$ 。在满足计算精度要求的前提下,如何选取合适的 $\Delta\theta$ 使得计算量最小是关键问题之一。图5为例1中 $\Delta\theta$ 分别取 $1^\circ, 2^\circ, \dots, 10^\circ$ 时等步长 KCP 法的计算结果。由图可以看出,可靠指标总体趋势是随步长的增大而逐渐增加的。换句话说,计算精度逐渐降低,在局部点步长较大时的结果与步长较小时相同,如图5中步长取 2° 和 4° 时的可靠指标是相同的。这是因为该大步长和小步长都是验算点对应的最优极坐标角度 $\theta_{i\min}$ 的约数,从而同时定位到了该 $\theta_{i\min}$ 。总的来说,随着步长的增大,对极坐标角度 θ_i 的搜索越来越不全面,即“漏掉”的角度会越来越多。同时,角度的跨度也越大,导致验算点的定位越来越不准确。从保证计算精度及减小计算量两方面要求来看,建议步长选择 10° 以内,在该范围内可靠指标波动较小。

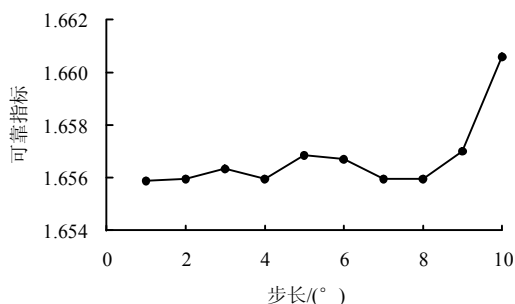


图5 步长对可靠指标的影响

Fig.5 Effect of step-length on reliability index

6 结 论

(1) 提出了边坡可靠度分析的一种新的全局优化方法认知聚类分区方法(KCP),给出了该方法的计算流程图,并编写了相应的计算程序KCPREL。该方法在可靠指标优化求解过程中,采用KCP技术大大地提高了计算效率,并能获得全局最优解。算例结果表明,KCP法的计算精度和蒙特卡洛模拟相当,计算效率远远高于传统的蒙特卡洛模拟方法。

(2) KCP方法在计算可靠指标过程中无需对功能函数求导,整个优化求解过程只需要用到功能函数值,无论功能函数是显式还是隐式,线性还是非线性,KCP方法都能直接求解,免去了用响应面拟合功能函数的麻烦,并避免了采用1阶泰勒展开近似非线性功能函数的误差。此外,KCP方法能同时获得可靠指标和验算点,这2点是传统的FORM方法无法比拟的。该方法对于具有复杂的隐式、非线性功能函数的边坡稳定可靠度问题来说,体现出明显的优越性。

(3) 等步长 KCP 法有效地克服了二分 KCP 法求解可靠指标时验算点定位较粗糙的缺点。当步长较小时,等步长 KCP 法能全面且均匀地搜索 θ_i ,验算点的定位更准确。

(4) 随着步长的增大,等步长 KCP 法的计算精度逐渐降低。在局部点步长较大时的结果与步长较小时相同。从保证计算精度及减小计算量两方面要求来看,建议步长取 10° 以内。

参考文献

- [1] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [2] DUNCAN J M. Factor of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(4): 307—316.
- [3] LOW B K. Efficient probabilistic algorithm illustrated for a rock slope[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2008, 41(5): 715—734.
- [4] WONG F S. Slope reliability and response surface method[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 111(1): 32—53.
- [5] 苏永华, 赵明华, 蒋德松, 等. 响应面方法在边坡稳定可靠度分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1417—1424.
SU Yong-hua, ZHAO Ming-hua, JIANG De-song, et al. Application of response surface method to reliability analysis of slope stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1417—1424.
- [6] MURTY M N, JAIN A K. Knowledge-based clustering scheme for collection management and retrieval of library books[J]. **Pattern Recognition**, 1995, 28(7): 949—963.
- [7] SHI L, OLAFSSON S, SUN N. New parallel randomized algorithms for the traveling salesman problem[J]. **Computers and Operations Research**, 1999, 26: 371—394.
- [8] PARK H S, YOO S H, CHO S B. Evolutionary fuzzy clustering algorithm with knowledge-based evaluation and applications for gene expression profiling[J]. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, 2005, 2(4): 1—10.
- [9] LEE Y F, CHI Y Y, LEE D H, et al. Simplified models for assessing annual liquefaction probability—A case study of the Yuanlin area, Taiwan[J]. **Engineering Geology**, 2007, 90: 71—88.
- [10] 周创兵, 卢文波, 姜清辉, 等. 大岗山水电站枢纽区工程边坡稳定性及支护措施研究报告[R]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [7] 齐添, 谢康和, 胡安峰, 等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(6): 1023—1028.
QI Tian, XIE Kang-he, HU An-feng, et al. Laboratorial study on non-Darcy seepage in Xiaoshan clay[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2007, 41(6): 1023—1028.
- [8] 刘忠玉, 孙丽云, 乐金朝, 等. 基于非 Darcy 渗流的饱和黏土一维固结理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 973—979.
LIU Zhong-yu, SUN Li-yun, YUE Jin-chao, et al. One-dimensional consolidation theory of saturated clay based on non-Darcy flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 973—979.
- [9] 鄂建, 陈刚, 孙爱荣. 考虑低速非 Darcy 渗流的饱和黏性土一维固结分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1115—1119.
E Jian, CHEN Gang, SUN Ai-rong. One-dimensional consolidation of saturated cohesive soil considering non-Darcy flows[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1115—1119.
- [10] 谢海澜, 武强, 赵增敏, 等. 考虑非达西流的弱透水层固结计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1061—1065.
XIE Hai-lan, WU Qiang, ZHAO Zeng-min, et al. Consolidation computation of aquitard considering non-Darcy flow[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1061—1065.
- [11] PASCAL F, PASCAL H, MURRAY D W. Consolidation with threshold gradients[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1981, 5(3): 247—261.
- [12] 刘忠玉, 刘忠广, 马崇武. 考虑起始水力梯度时饱和黏土的一维固结[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(3): 21—24.
LIU Zhong-yu, LIU Zhong-guang, MA Chong-wu. One-dimensional consolidation of saturated clays considering initial hydraulic gradient[J]. **Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)**, 2006, 27(3): 21—24.
- [13] SCHMIDT J D, WESTMANN R A. Consolidation of porous media with non-Darcy flow[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 1973, (EM6): 1201—1216.
- [14] ELNAGGAK H A, KRIZEK R J. Effect of non-Darcy flow on time rate of consolidation[J]. **Journal of the Franklin Institute**, 1973, 296(5): 323—337.
- [15] CHERUBINI C, VACCA G, GIASI CI. Modeling non-Darcian flow in one-dimensional consolidation[J]. **Computers and Geotechnics**, 1988, 6(4): 247—264.

上接第 558 页