

考虑地质成因的土坡可靠度分析

吴振君, 葛修润, 王水林

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 不同地质成因的边坡在土体参数统计变异性相同的情况下, 由于空间变异性不同, 其稳定状态并不一定相同, 传统的边坡稳定性确定性分析和基于随机变量模型的边坡可靠度分析方法无法考虑坡体的特定地质成因。由地质成因估计土体参数的波动范围, 从而通过土体参数波动范围这一指标把地质成因纳入边坡稳定性分析框架, 提出考虑地质成因的边坡可靠度分析方法, 介绍具体的分析流程, 采用一维随机场模拟和验算点法完成边坡可靠度分析。算例计算结果显示岩土参数空间变异性对边坡稳定性的影响很大, 由地质成因估计土体参数的波动范围, 为在边坡可靠度分析中合理考虑土体参数空间变异性提供一条现实的解决途径, 值得在工程应用中推广。

关键词: 边坡工程; 土坡; 可靠度; 概率分析; 地质成因; 空间变异性; 波动范围

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)09 - 1904 - 08

RELIABILITY ANALYSIS OF SOIL SLOPE STABILITY CONSIDERING GEOLOGIC ORIGIN

WU Zhenjun, GE Xiurun, WANG Shuilin

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Because spatial variability often exists in natural soil slope, which is mainly dominated by its geologic origin under the same soil parameters statistical variability, the slope stability is not really same. Traditional deterministic slope stability analysis method and reliability slope stability analysis method based on random variable model can not deal with the geologic origin of slope mass. The scale of fluctuation of soil parameters can be estimated by its geologic origin. Thus geologic origin can be included in the slope stability analysis framework by means of scale of fluctuation of soil parameters. Reliability analysis of soil slope stability considering geologic origin employing 1D random field and first order reliability method(FORM) is proposed and its specific analysis flow is also introduced. The proposed analysis method is illustrated by an example of embankment. Example calculation results indicate that spatial variability of parameters of rock and soil has great influence on slope stability. Estimation of scale of fluctuation of soil properties through geologic origin provides a realistic solution for the reasonable consideration of spatial variability of soil parameters in reliability analysis of slope stability. The proposed method is practically applicable and quite valuable for practice.

Key words: slope engineering; soil slope; reliability; probabilistic analysis; geologic origin; spatial variability; scale of fluctuation

收稿日期: 2011 - 04 - 15; **修回日期:** 2011 - 05 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40802077)

作者简介: 吴振君(1977 -), 男, 博士, 2003年于南京大学地球科学系水文地质工程地质专业获硕士学位, 现任助理研究员, 主要从事岩土工程监测和边坡稳定性分析等方面的研究工作。E-mail: shocking@sina.com

1 引言

土体参数的变异性研究是土坡可靠度分析的基础,人们很早就认识到了土体抗剪强度的不确定性对岩土工程问题的影响。随着研究的深入,人们认识到了土体参数空间变异性的存在, P. Lumb 等^[1-2]指出忽略空间变异性,采用随机变量模型来模拟土体参数的变异性是不合适的。随机场理论^[3]和地质统计学中的区域化变量理论能够较好地描述这种空间变异性。然而可靠度理论应用到边坡稳定性分析,为了简化起见,目前最常见的仍然是采用随机变量模型,用离散试验点变异性来表征土体参数的变异性。随机变量模型可以看作成这样一种特殊情况,即某一点的参数和其研究尺度内任意一点的参数完全相关,显然这并不总是符合实际情况。因此边坡尺度和土体参数空间变异性的关系将决定随机变量模型是否适用。

传统的边坡稳定性确定性分析方法无法考虑边坡土体的特定成因,对于不同成因的土坡,只要具有相同的物理力学参数,那么在相同的条件下,其安全系数值是相等的,认为其具有相同的安全储备。随机变量模型下的边坡可靠度分析认为土体参数完全相关,也无法考虑土体的成因。研究表明土体参数的波动范围主要取决于土体沉积过程的地质作用,而非特定的土体性质,因此考虑到土体参数的空间变异性的存在,可通过波动范围这一指标将土体成因纳入边坡可靠度分析框架中,这样即使边坡土体物理力学参数相同,在相同的条件下,不同成因的边坡,其可靠指标(破坏概率)也是不同的,这更能真实地反映边坡的安全程度。

本文在土体参数空间变异性模拟的基础上,通过地质成因估算土体参数的波动范围,提出了考虑土坡地质成因的可靠度分析方法,通过算例介绍了该方法的应用。

2 土体参数的空间变异性模拟方法

2.1 土体参数的空间变异性

自然土体由于矿物构成、沉积条件、应力历史、风化以及其他地质作用的差异,其土体性质的空间变异总是存在的,不同点的性质虽有差别,但又有一定的相关性,这种相关性随两点间距离的增大而减小。由离散点试样试验得到的土体参数统计特性

只能反映点特性,而对于边坡问题,其稳定性通常受滑面上平均抗剪强度特性控制,而不是点特性,因此需要考虑空间范围内的平均特性。不考虑土体参数空间变异性的离散点统计方法,在均值和方差相同的情况下,其表现出的空间变异性可能有很大不同^[4-5]。另外,边坡工程中由于已知数据总是很有限,因此必须用合理的方法来描述这种空间变异性,随机场理论和地质统计学中的区域化变量理论能够很好地描述这种土性空间变异性。本文采用随机场理论来模拟土坡强度参数的空间变异性。

2.2 随机场的基本理论

2.2.1 方差折减函数

点变异性由标准差 σ 描述,空间平均特性 $X(z)$ 的变异性由标准差 σ_z 描述。将随空间平均范围的增加而减小的 σ_z 定义一个量纲一的函数 $\Gamma(z)$, 表示由于空间平均而使该区域方差折减的大小, $\Gamma^2(z)$ 一般称为方差折减函数,其表达式为

$$\Gamma(z) = \frac{\sigma_z}{\sigma} \quad (1)$$

2.2.2 波动范围

E. H. Vanmarcke^[2]提出如果存在下式:

$$\lim_{z \rightarrow \infty} z\Gamma^2(z) = \delta \quad (2)$$

那么对充分大的 z , 有如下近似公式:

$$z\Gamma^2(z) \approx \delta \quad (3)$$

式中: z 为两点间的距离; δ 为波动范围(scale of fluctuation), 在波动范围距离内,土性强烈相关,大于该距离可认为基本不相关。对于常见的相关函数, E. H. Vanmarcke^[2]提出如下近似公式:

$$\Gamma^2(z) = \begin{cases} 1 & (z \leq \delta) \\ \delta/z & (z > \delta) \end{cases} \quad (4)$$

即当两点间距离小于波动范围时,空间方差近似等于点方差;两点间距离越大、波动范围越小,那么方差折减就越大,空间特性趋于平均。

波动范围或相关距离(correlation length)是随机场理论的基本指标之一,是联系点变异性 and 空间平均特性的重要纽带。多数文献中都将相关距离和波动范围作为同一个概念,而 H. El-Ramly 等^[5-7]却明确表示,虽然相关距离和波动范围表达的意义相近,但其量值是不同的。包承钢等^[8]阐述了它们之间的关系,强调实际应用中应避免混淆。

2.2.3 相关函数

随机场的空间平均方差随着平均范围的增加而衰减，是由于空间各点的相关性造成的。相关函数有多种选择形式，如三角形函数、指数函数、高斯函数、指数余弦函数以及跳跃型函数等。K. S. Li 和 P. Lumb^[9]的研究表明，边坡可靠指标对相关函数并不敏感，由于在没有大量样本的情况下，很难估计相关函数的确切形式，因此建议可选择简单的指数函数形式，即

$$\rho = e^{-2z/\delta} \quad (5)$$

3 土体波动范围和地质成因的关系

在土坡可靠度分析中要考虑土体参数的空间变异性，首先得到土体参数的波动范围，计算方法较多，例如递推平均法、相关函数法、曲线极限法、半变异函数法、平均零跨法及统计模拟法等。利用上述方法计算土体参数波动范围的一个共同的难点就是要求有足够多的取样点，取样点间距也不能太大。由于数据过少无法整理出完整的函数，或者由于取样点间距过大而得不到实际的波动范围值。S. Lacasse 和 F. Nadim^[10]指出通常没有足够的数据库来准确地估算土体参数的空间变异性；李小勇等^[11]在计算中也发现，当取样间距较大时土体的变异性被均匀化，无法反映土体的真实变异性。

J. M. Duncan 等^[12]进一步指出，对于一般的边坡工程来说，如何通过较少的资料、简单的方法确定土体参数的波动范围是非常重要的，否则考虑土体参数空间变异性的方法很难在工程实践中获得更广泛的应用。

G. A. Fenton 和 E. H. Vanmarcke^[13]认为，土体参数波动范围主要取决于土体沉积过程中的地质作用，而不是特定的土体性质，这得到了人们的认同。下文将定性描述不同成因土体的波动范围大小：(1) 残积土：其分布主要受地形的控制，在不同的气候条件下，不同的原岩将产生不同矿物成分、不同物理力学性质的残积土。由于残积土没有层理构造，均质性很差，因而土体的物理力学性质很不一致，波动范围较小。(2) 坡积土：残积土经水流搬运，顺坡移动堆积而成，由于组成物质粗细颗粒混杂，土质不均匀，因此波动范围较小。(3) 洪积土：由于搬运距离短，颗粒的磨圆度不佳。此外，山洪是周期性产生的，每次大小不尽相同，堆积下来的物质也不一样。因此，洪积土常呈现不规则交错的层

理构造，其波动范围也是很小的。(4) 冲积土：搬运距离越长，沉积的物质越细，成分就越均匀，因此波动范围与其搬运距离关系密切。(5) 海洋沉积土：一般空间过渡均匀，波动范围较大。(6) 湖泊沉积土：分选性好，具有明显的均匀薄层水平层理，差异性小，其波动范围也是很大的。(7) 冰碛土：分选性差，杂乱无层次，极不规律，变异性较大而波动范围很小。(8) 风积土：其颗粒磨圆度好，分选性好，波动范围较大。

另外，土体由于沉积过程通常表现出明显的各向异性，同一土层内不同方向的土体参数波动范围是不同的。垂直方向波动范围很小，而水平方向波动范围较大。

H. El-Ramly 等^[5, 14]统计的不同来源、不同成因的土体波动范围资料结果表明，土体垂直方向的波动范围一般为 0.5~6.0 m，水平向波动范围一般为 30~80 m。

本文综合了 H. El-Ramly 等^[5, 11, 14-16]统计了土体参数波动范围结果，并由有据可查的地质成因对其进行了整理、分类，结果见表 1，土体波动范围都是基于强度参数得到的。值得注意的是：没有收集到残积土、坡积土的统计资料，但是通过其地质成因可认为这 2 种土的波动范围不大于表 1 中的洪、冲积土的波动范围，实际应用中可以洪、冲积土为参考。表 1 中的风积土波动范围是根据典型风积土——黄土的统计资料得到的，通常的研究中都假定黄土的水平波动范围无限大，因此本文可以认为风积土的水平波动范围大致和海洋沉积土的水平波动范围相当。另外，目前能检索到的冰碛土波动范围统计资料极少，且只有垂直波动范围值，据其成因推算其水平波动范围应小于洪、冲积土的水平波动范围。实际应用中，表 1 中的资料可以作为参考。

表 1 不同地质成因土体的波动范围

Table 1 Scales of fluctuation of soils with different geologic origins

土体类型	垂直向波动范围/m	水平向波动范围/m
洪、冲积土	0.2~0.9	30~49
海洋、湖泊沉积土	1.3~8.0	40~80
冰碛土	2.0	-
风积土	1.2~7.2	-

土体参数空间变异性各向异性可用等效各向同

性来模拟^[3, 6, 9]，用和相关函数椭圆等面积的圆来近似表示各向异性，等效各向同性波动范围 δ_E 可以表示为

$$\delta_E = \sqrt{\delta_x \delta_y} \quad (6)$$

式中： δ_x 、 δ_y 分别为水平向、垂直向波动范围。

上述资料为本文通过地质成因来估算土体的波动范围提供了基本依据。通过地质成因估算边坡土体的波动范围，可较好地解决 J. M. Duncan 等^[12]提出的问题，使得在边坡可靠度分析中考虑土体参数的空间变异性能够很方便地实现。

4 考虑地质成因的土坡可靠度分析

4.1 分析方法框架

由上述可知，通过土体波动范围可以和其地质成因建立联系，因此可以通过波动范围这一指标把地质成因纳入土坡可靠度分析框架，在试验数据有限的情况下也能较好地估计边坡土体的空间变异特征，使得可靠度分析结果更为可靠，能更真实地评价边坡的稳定性。该分析方法框架介绍如下，具体的分析流程见图 1。

(1) 确定土坡可靠度分析中的不确定性因素，得到土体参数及各种影响因素等的变异性，若勘查资料有限，边坡计算模型可能也存在着变异性。

(2) 根据土体的成因参考不同成因土体波动范围的统计资料(见表 1)，确定其波动范围的大致范围，实际应用中可利用波动范围的取值对边坡可靠度的影响进行敏感性分析^[5]，以验证分析结果。

(3) 根据估计的土体波动范围和潜在滑面的长度，选择合理的分析模型。如果滑面长度小于土体参数的波动范围，其方差折减函数接近于 1，因此可认为空间平均方差和点方差相等，此时可选择随机变量模型分析，使得问题得到简化；如果滑面长度相对于土体参数的波动范围很大，那么不能忽略空间平均特性的影响，需要采用随机场模型分析。根据实际问题选择何种方式模拟土体参数的空间变异性如采用各向同性随机场还是各向异性随机场，采用何种随机场模拟方法如方差折减法、中心点离散法或局部平均离散法等。

(4) 分析边坡是否有多个潜在滑动模式，若存

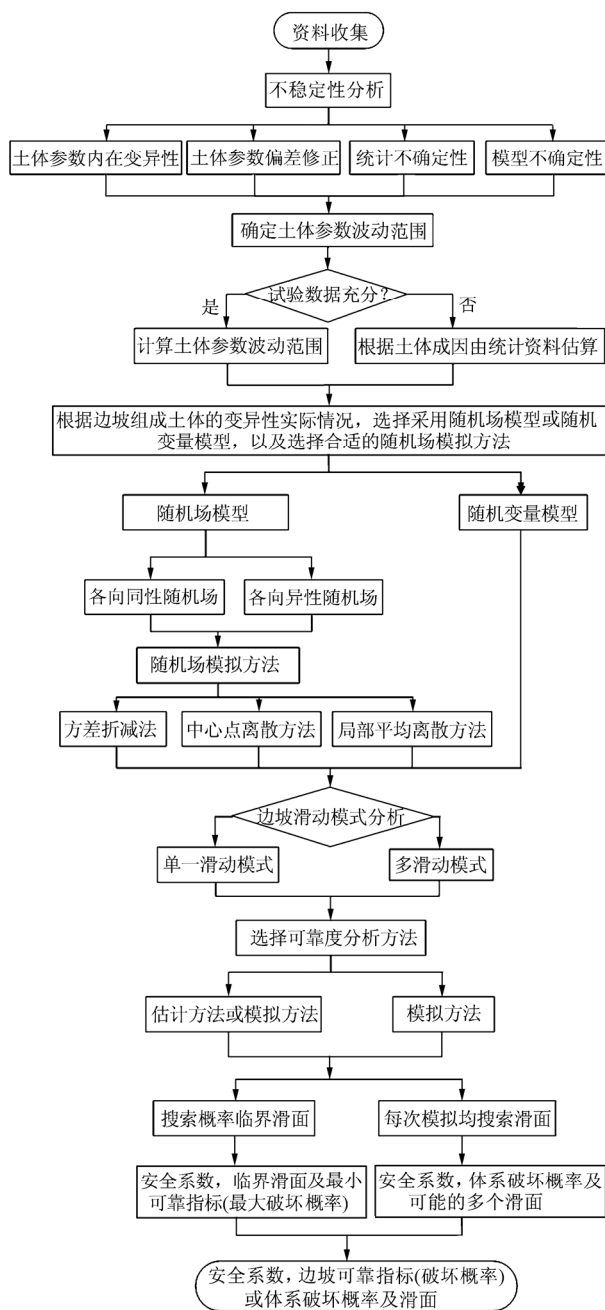


图 1 土坡可靠度分析流程图

Fig.1 Flow chart of reliability analysis of soil slopes

在，则需考虑边坡的体系可靠度，采用模拟方法(如蒙特卡罗模拟)进行可靠度计算，得到边坡的体系破坏概率和潜在的各个滑面；否则可采用模拟方法或估计方法(如中心点法、验算点法、概率矩点估计法、响应面法等)进行计算，最后得到概率临界滑面及对应的最小可靠指标或最大破坏概率。

值得指出的是，此方法虽然是基于极限平衡方法提出的，其实是一个通用的分析流程，因此不管是采用极限平衡方法、有限元方法还是有限差分方法来进行边坡可靠度分析，都是适用的。

4.2 具体的分析方法

本文的土坡可靠度分析基于极限平衡方法实现，不考虑多滑动模式的情况，因此采用估计法计算。边坡安全系数计算采用极限平衡方法中的 Morgenstern-Price 法。

用一维随机场来模拟边坡滑面上土体参数的变异性。采用中心点离散法来离散随机场，以一个或多个条块为单位进行离散，条块上土体参数的变异性性和点变异性相同，用相关函数来描述其空间变异性。

滑面上土体参数的相关矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{2,1} & \dots & \rho_{n,1} \\ \rho_{1,2} & 1 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & 1 & \rho_{n,n-1} \\ \rho_{1,n} & \dots & \rho_{n-1,n} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： n 为随机场的离散个数， $\rho_{i,j}$ 为条块 i 和 j 的相关系数，由式(5)得到。

可靠度分析采用验算点法，用 B. K. Low 和 W. H. Tang^[17]提出的改进优化方法求解。可靠指标表达式为

$$\beta = \min_{x_i \in \Psi} \sqrt{\left(\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right)^T [R]^{-1} \left(\frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \right)} \quad (8)$$

式中： x_i 为随机变量， m_i 为随机变量 x_i 的均值， $[R]$ 为变量的相关矩阵， Ψ 为破坏区域。

该方法直接在变量原始空间内求解，不必计算变量的当量正态均值和标准差^[17]。可靠指标为

$$\beta = \min_{x_i \in \Psi} \sqrt{[n]^T [R]^{-1} [n]} \quad (9)$$

式中： $[n]$ 为由变量 n_i 组成的向量。

$$n_i = \frac{x_i - m_i}{\sigma_i} = \Phi^{-1}[F(x_i)] \quad (10)$$

$$x_i = F^{-1}[\Phi(n_i)] \quad (11)$$

n_i 反映了边坡可靠度对变量 x_i 的敏感性相对大小，将其记作敏感性因子。

常见概率分布的 $F^{-1}[\Phi(n_i)]$ 变换如下：

- (1) 正态分布： $x = \mu_x + n\sigma_x$ ；
- (2) 对数正态分布：

$$x = e^{\lambda + \xi n}, \quad \xi = \sqrt{\ln[1 + (\sigma_x / \mu_x)^2]}, \quad \lambda = \ln \mu_x - 0.5\xi^2$$

其他概率分布的变换详见 B. K. Low 和 W. H. Tang^[17]的研究。

5 算例分析

5.1 算例简介

以詹姆斯湾堤坝^[18-19]为例，本文考虑其中的一种设计方案：坝高 12 m，设置平台，堤坝的典型剖面见图 2，坝体为砂土，地表以下为平均厚 4 m 的黏土壳，黏土壳下面为 8 m 厚的海相黏土层，然后是湖积黏土层，平均厚约 6.5 m，其厚度取决于下部的冰碛层深度，冰碛层平均深度为 18.5 m。冰碛层的强度相对黏土层较高，认为是滑动面的底界。

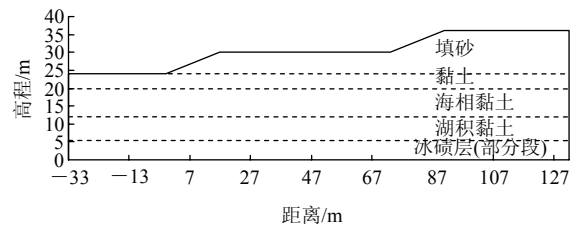


图 2 詹姆斯湾堤坝计算剖面

Fig.2 Profile of James bay dyke

堤坝稳定性控制性因素是海相黏土和湖积黏土的强度，1983 年在堤坝很多位置处进行了深度间隔 1 m 的现场十字板剪切试验，由于结果比较离散，需要考虑其变异性。海相黏土和湖积黏土的平均不排水强度分别为 35.0, 31.2 kPa。

J. T. Christian 等^[18]研究了堤坝数据的离散性之后，考虑了如下 8 个随机变量：砂土的容重和内摩擦角、黏土壳的厚度、海相黏土的不排水强度及十字板剪切试验修正系数、湖积黏土的不排水强度及十字板剪切试验修正系数、冰碛层深度。所有随机变量均假设正态分布，变量的统计特征详见表 2^[19]，表 2 中的内在变异性是土体参数试验结果统计得到的方差 σ^2 ；统计不确定性是由于样本数有限产生的，其值为 σ^2 / n ；试验修正系数是对试验结果进行偏差修正的系数，这个系数是一个随机变量，具有均值和方差，具体如何处理下文将会介绍。海相黏土的试验修正系数均值为 1，方差为 0.006，湖积黏土的试验修正系数均值为 1，方差为 0.023。黏土壳的黏聚力作为常量处理，为 43 kPa，黏土壳、海相黏土、湖积黏土的容重分别为 18.8, 18.8, 20.3 kN/m³。

5.2 不确定性分析和建模

根据 J. T. Christian 等^[18]的研究，土体参数的空间变异性可由各向同性波动范围描述， $\delta_E = 30$ m，并假设各参数的波动范围相同。这样的处理显然具有局限性，没有考虑到不同成因土体可能具有不同

表 2 随机变量的统计特征^[19]
Table 2 Statistical characteristics of random variables^[19]

砂土						黏土壳厚度 T_{cr}	海相黏土黏聚力 SuM			湖积黏土黏聚力 SuL			冰碛层深度 D_{III}				
内摩擦角 φ_{III}			容重 γ_{III}				均值 /m	方差/ m^2		均值 /kPa	方差/(kPa) ²		均值 /m	方差/ m^2			
均值 /($^{\circ}$)	内在变异性	统计不确定性	均值 /($kN \cdot m^{-3}$)	内在变异性	统计不确定性			内在变异性	统计不确定性		内在变异性	统计不确定性		内在变异性	统计不确定性		
30.0	1.00	3.00	20.0	1.00	1.00	4.0	0.19	0.04	34.5	66.26	0.90	31.2	74.82	3.00	18.5	-	1.00

的波动范围值，对于本算例，可进行具体分析。

由表 1 中归纳的土体波动范围资料进行分析，海相黏土和湖积黏土成因接近，波动范围较大，偏于安全起见，水平向和垂直向波动范围可均取较大值，分别为 80 和 8 m，那么可得到等效各向同性波动范围 $\delta_E = \sqrt{80 \times 8} = 25.3$ m。

在边坡可靠度分析中考虑土体地质成因之前，还采用随机变量模型进行了初步的计算。计算结果显示：滑面大部分通过湖积黏土，并与冰碛层相切，其次是海相黏土层和坝体的砂土层；另外敏感性分析结果显示，堤坝稳定性对湖积黏土和冰碛层的深度最为敏感。

海相黏土和湖积黏土对堤坝稳定性起控制作用，其等效各向同性波动范围可取值为 25.3 m，这和 J. T. Christian 等^[18]取值 30 m 是非常接近的，因此，为了与 J. T. Christian 等^[18-19]的分析结果对比，计算中海相黏土和湖积黏土的等效各向同性波动范围取 30 m。

坝体的砂土无法通过地质成因分析其波动范围，通常情况下坝体填筑砂料是比较均匀的，有理由认为其波动范围是很大的，因此等效各向同性波动范围取值 30 m 是比较合理的。

堤坝的滑面通过黏土壳的长度(6 m)很小，可按洪、冲积土对黏土壳的波动范围进行取值， $\delta_E = \sqrt{0.9 \times 49} \approx 6.6$ m。由于滑面通过黏土壳的长度小于 6.6 m，其方差是没有折减的。

随机变量模型的可靠度分析结果显示概率临界滑面长度约为 167 m，滑面通过湖积黏土层约 80 m，需要考虑其空间变异性。滑面通过海相黏土层、砂土层的长度都小于其等效各向同性波动范围 30 m，滑面通过黏土壳层的长度也小于其等效各向同性波动范围 6.6 m，因此可以将海相黏土、砂土层、黏土壳的强度参数用随机变量来模拟，海相黏土层包含两部分，由于其距离大于波动范围，可认为其强

度参数是不相关的，分别用 2 个独立的随机变量来表示。

砂土层容重应作为二维随机场来考虑，由于采用了等效各向同性波动范围来模拟，因此可将容重在水平向的变异性模拟为一维随机场。而边坡可靠度对砂土层的容重并不敏感，为了简化计算，直接将其进行方差折减，随机变量模型计算结果显示滑体内砂土层水平向长度约为 125 m，可得到方差折减函数 $\Gamma(z) \approx 30/125 = 0.24$ ，砂土层容重折减后的标准差为 0.49。

湖积黏土层的空间变异性用随机场模型描述，相关函数选择指数函数，在极限平衡方法计算中，随机场用中心点离散法离散，2 条块的平均宽度小于其等效各向同性波动范围(30 m)，因此为减少计算量，以 2 条块为随机场离散单位。

冰碛层深度也是堤坝稳定性的控制性因素之一，将冰碛层深度用随机变量模拟。

综上所述，本文堤坝可靠度分析中的不确定性变量有：(1) 湖积黏土不排水强度用随机场模型模拟，考虑其十字板剪切试验的修正系数不确定性和统计不确定性。(2) 海相黏土的不排水强度分别用 2 个独立随机变量模拟，考虑其现场十字板剪切试验的修正系数不确定性和统计不确定性。(3) 砂土的容重和内摩擦角模拟为随机变量，考虑其统计不确定性，并对容重的方差进行折减以反映其空间变异性。(4) 堤坝几何模型的不确定性：冰碛层深度和黏土壳厚度分别用随机变量模拟。建立的可靠度分析模型中实际的变量共有 23 个。

由于统计不确定性和随机变量不相关，通过在随机变量或随机场变量的方差上叠加统计不确定性的方差来考虑统计不确定性。修正系数和待修正的随机变量之间也是不相关的。统计不确定性和修正系数不确定性通过下式考虑：

$$M = BX + \varepsilon \quad (12)$$

式中： B 为修正系数， X 为要修正的随机变量， ε 为统计不确定性， M 为考虑了统计不确定性和修正系数不确定性的随机变量。

5.3 可靠度分析及结果

J. T. Christian 等^[18-19]的计算中考虑了圆弧滑面，J. M. Duncan 等^[12]指出非圆弧滑面能够得到更小的安全系数。因篇幅所限，本文仅考虑圆弧破坏模式。

计算结果见表 3，由表 3 可知，本文计算结果与 J. T. Christian 等^[18-19]结果是比较接近的。堤坝的破坏概率较随机变量模型下的堤坝破坏概率降低一个数量级，显示了土体参数空间变异性的影响。

表 3 可靠度分析结果

Table 3 Analytical results of reliability

来源	可靠指标	破坏概率/%
本文	2.49	0.63
J. T. Christian 等 ^[18]	2.66	0.39
H. El-Ramly 等 ^[19]	2.32	0.47

J. T. Christian 等^[18]可靠度计算中采用方差折减法来估算空间变异性的影响，但是对所有变量所用的折减函数值都是相同的，这是不恰当的，因为滑面通过不同土层的长度是不同的，即便土体的波动范围相同，其折减的量值也是不同的，如滑面通过海相黏土层的部分不足 30 m，由式(4)可得到方差折减函数值为 1，因此他们的计算中低估了土体参数的变异性，得到的可靠指标偏大。

本文和 H. El-Ramly 等^[19]所考虑的变异性非常接近，计算结果也相近，但是破坏概率略大一些，可能的原因是他们在滑面搜索中为了简化计算，根据参数研究结果将滑面剪入口和圆弧圆心的 x 坐标固定，这样的限制可能错过了潜在更危险的滑面。本文在求解过程中，自动搜索概率临界滑面，得到最小可靠指标。另外值得注意的是：H. El-Ramly 等^[19]计算中采用的是蒙特卡罗模拟方法，因此可靠指标和破坏概率不是对应的，即破坏概率和可靠指标都是根据模拟结果统计得到的。

可靠度分析结果的概率临界滑面位置、敏感性分析结果见图 3，图 3 中参数具体含义见表 1， $SuL1 \sim SuL7$ 均为湖积黏土的随机场变量(变量所处滑面位置在图 3(a)依次从左至右)， $SuM1$ 和 $SuM2$

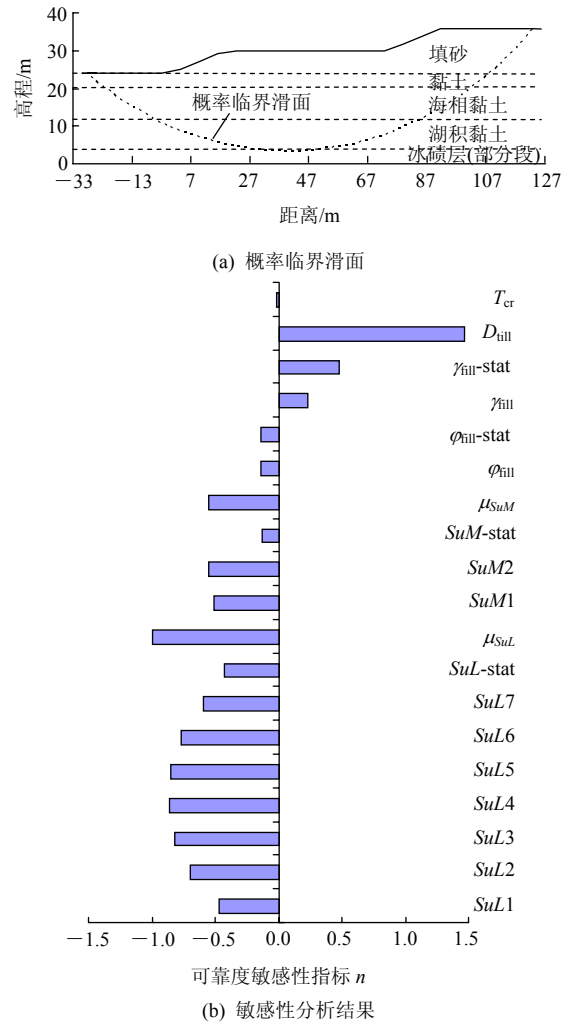


图 3 可靠度分析结果

Fig.3 Reliability analytical results

均为海相黏土的随机变量， $SuM-stat$ 和 $SuL-stat$ 分别为海相黏土和湖积黏土的统计不确定性。由图 3 可见，堤坝可靠度对冰碛层的深度是最为敏感的，其次是湖积黏土的试验修正系数及其不排水强度。

6 讨论

土体参数的空间变异性主要受其地质成因控制，波动范围与地质成因关系密切，土体参数波动范围的大小是考虑土体空间变异性的边坡可靠度分析方法的必需指标。然而一般的边坡工程中，现场勘察资料、试验数据都很有有限，根据这些有限的数数据难以准确计算土体参数的波动范围。因此各种成因土体参数的波动范围资料的积累能为实际边坡可靠度分析提供有价值的参考。目前尚未有学者根据地质成因对土体参数波动范围进行系统归纳和统计，因此建设这样一个专门的岩土工程参数数据库，

可为考虑土体参数空间变异性的边坡可靠度分析方法的实际应用提供必要的基础资料。

7 结 论

(1) 土体的波动范围与其地质成因密切相关, 试验数据有限的情况下, 建议通过地质成因估算土体参数的波动范围, 整理了不同地质成因土体的波动范围资料, 可为实际应用提供参考, 但是整理的资料还很不完善, 有待于继续补充, 建设一个专门的岩土工程参数波动范围数据库是必要的。

(2) 通过波动范围这一指标将土体成因纳入边坡可靠度分析框架。提出了考虑土坡地质成因的可靠度分析方法, 介绍了具体的分析流程和实现方法。

(3) 通过詹姆斯堤坝可靠度分析介绍了本文分析方法的应用。可靠度分析结果表明, 堤坝稳定性对冰碛层深度最为敏感, 其次是湖积黏土的试验修正系数。由于通常的可靠度分析中并不考虑几何模型不确定性, 试验修正系数估计的经验成分也较大, 这些都值得引起注意。

参考文献(References):

- [1] LUMB P. The variability of natural soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1966, 3(2): 74 - 96.
- [2] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(11): 1 227 - 1 246.
- [3] VANMARCKE E H. Random fields: analysis and synthesis[M]. Cambridge: MIT Press, 1983: 20 - 188.
- [4] BAECHER G B, CHRISTIAN J T. Reliability and statistics in geotechnical engineering[M]. New York: John Wiley and Sons., 2003: 205 - 219.
- [5] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on pre-sheared clay shale[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 192 - 208.
- [6] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Lodalen slide: a probabilistic assessment[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(9): 956 - 968.
- [7] KRAHN J. Stability modeling with SLOPE/W — an engineering methodology[M]. Calgary: GEO-SLOPE/W International Ltd., 2004: 251 - 252.
- [8] 包承纲, 高大钊, 张庆华. 地基工程可靠度分析方法研究[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997: 64 - 69.(BAO Chenggang, GAO Dazhao, ZHANG Qinghua. Study of reliability analysis method in ground engineering[M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1997: 64 - 69.(in Chinese))
- [9] LI K S, LUMB P. Probabilistic design of slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4): 520 - 535.
- [10] LACASSE S, NADIM F. Uncertainties in characterizing soil properties, in uncertainty in the geologic environment: from theory to practice[C]// SHACKELFORD C D, NELSON P P, ROTH M J S ed. Proceedings of Uncertainty'96. ASCE Geotechnical Special Publication No.58. Mdison: ASCE, 1996: 49 - 75.
- [11] 李小勇, 谢康和, 虞 颜. 土性指标相关距离性状的研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(8): 91 - 95.(LI Xiaoyong, XIE Kanghe, YU Yan. Research of the characteristics of correlation distance on soil properties indices[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(8): 91 - 95.(in Chinese))
- [12] DUNCAN J M, NAVIN M, WOLFF T F. Discussion of "Probabilistic slope stability for practice" by H. El-Ramly, N. R. Morgenstern and D. M. Cruden[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(3): 848 - 850.
- [13] FENTON G A, VANMARCKE E H. Spatial variation in liquefaction risk assessment[C]// Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Congress. Colorado: Boulder, 1991: 594 - 607.
- [14] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612 - 624.
- [15] 南亚林. 黄土地区土性参数的统计分析及其在公路边坡中的应用[硕士学位论文文][D]. 西安: 长安大学, 2006.(NAN Yalin. Statistical analysis of soil property parameter and its application to highway slope in loess area[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.(in Chinese))
- [16] JAKSA M B. The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff, overconsolidated clay[Ph. D. Thesis][D]. Adelaide: University of Adelaide, 1995.
- [17] LOW B K, TANG W H. Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(12): 1 378 - 1 387.
- [18] CHRISTIAN J T, LADD C C, BAECHER G B. Reliability applied to slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2 180 - 2 207.
- [19] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic slope stability analysis for practice[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 665 - 683.