

重力坝深层抗滑稳定可靠度分析研究

朱建明¹, 张宏涛², 陈祖煜³

(1. 北京航空航天大学土木系, 北京 100083; 2. 北京科技大学土木系, 北京 100083; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要:为了解决三维安全系数在现有的重力坝设计规范中无法参照的问题, 利用基于塑性极限分析理论的三维边坡稳定分析方法对重力坝抗滑稳定的安全系数进行了求解, 并且采用 Rosenbleuth 法计算求解了可靠度指标, 从而对重力坝深层抗滑稳定的可靠性进行了研究分析。算例和工程实例表明, 通过可靠度指标可以对三维边坡的稳定性从失效概率方面加以解释说明。

关键词:重力坝抗滑稳定; 三维边坡稳定分析; 可靠度

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)10-1444-05

作者简介:朱建明(1963-), 男, 江苏人, 副教授, 从事边坡与岩石力学研究。E-mail: zjm2000@buaa.edu.cn。

Reliability analysis on deep slide of gravity dams

ZHU Jian-ming¹, ZHANG Hong-tao², CHEN Zu-yu³

(1. Department of Civil Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Department of Civil Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. Institute of Water Resource and Hydropower Research of China, Beijing 100044, China)

Abstract: To apply the safety factor of three-dimensional slope stability into the design of gravity dams, the reliability of deep slide was studied. The reliability index was calculated using the Rosenbleuth method, where the safety factor was obtained by use of the three-dimensional limit analysis method of slope stability. It was indicated that the three-dimensional slope stability could be explained by the failure probability through the reliability index.

Key words: slide stability of gravity dam; three-dimensional slope stability; reliability

0 引言

长期以来, 工程界广泛使用安全系数这样的安全度指标来进行边坡的稳定性评价。这一做法具有简单易操作的优点, 但是也带有较多的经验成分。首先, 这一方法将诸多的因素囊括在一个指标中, 必定是十分粗糙的, 不利于对具体情况进行具体分析; 另外, 这一指标的物理意义不够明确。安全系数从 1.5 降至 1.3 或升至 1.7, 到底意味着安全储备有多大程度的改变, 很难说清, 尤其在三维边坡稳定分析中, 由于安全系数与二维相比都有不同程度的提高, 而相应的设计规范并没有对三维情况加以说明。因此, 探索更为有效、合理的评价边坡安全储备的途径, 已经成为工程界普遍关注的问题。

我国《岩土工程规范》(GB50021-94)指出: 对大型边坡设计除了按照边坡稳定系数值计算边坡稳定性外, 尚宜进行边坡的可靠性分析。1995年, 美国科学院下属的岩土工程减灾可靠度方法研究委员会提出了“岩土工程中的可靠度方法”研究报告, 指出: 可靠度方法, 如果不是把它作为现有传统方法的替代物

的话, 确实可为分析岩土工程中包含的不确定性提供系统的、定量的途径。在工程设计和决策中, 用这一方法来定量的驾驭和分析这些不确定因素尤为有效。

国外对于岩土工程可靠度的研究始于 20 世纪 70 年代, 且已在边坡稳定、挡土墙设计等方面得到应用^[1-5]。我国关于岩土可靠度的研究始于 80 年代初^[6-10]。边坡稳定的可靠度分析一般是基于现有边坡稳定性的确定性分析程序或者有限元方法, 结合可靠度数值计算方法对可靠性指标进行求解。本文利用基于塑性极限分析理论的三维边坡稳定分析方法对重力坝抗滑稳定的安全系数进行了求解, 并且采用 Rosenbleuth 法计算求解了可靠度指标, 从而对重力坝深层抗滑稳定的可靠性进行了研究分析。

1 安全系数的求解

在重力坝深层抗滑稳定的可靠度分析中, 定义系统的功能函数 G 为

$$G = g(R, S) = R - S \quad (1)$$

其中, R 和 S 分别为结构抗力和荷载效应。相对应的极限状态方程为

$$G = R - S = 0 \quad (2)$$

在边坡稳定分析领域, 通常用安全系数来评价边坡的稳定性。安全系数可以表达为输入参数的函数,

$$K = g(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3)$$

其中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为计算安全系数时输入的强度指标、孔隙水压等一系列参数。由于这些参数都是随机变量, 因此, K 也是随机变量。系统的极限状态方程为

$$G = K - 1 = g(x_1, x_2, \dots, x_m) - 1 = 0 \quad (4)$$

显然, R , S 和 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 均为随机变量。

2001 年, Chen 等^[11-12]利用三维边坡极限上限分析方法求解得到了边坡的安全系数。该方法将滑坡体离散为一系列具有倾斜界面的条柱, 以此作为三维边坡稳定的破坏模式。在材料服从 Mohr-Coulomb 屈服准则与相关联流动法则的理论框架下求解各条柱的速度场, 并根据功能平衡方程求解安全系数。下面对这一方法进行介绍。

三维边坡稳定的上限法将滑坡体划分为一系列具有倾斜界面的条柱。在建立三维边坡稳定的上限方法时, 为了对各条柱构筑一个机动许可的速度场, 引入了中性面的假定, 即假定在滑坡体中间存在着一个平面, 其走向代表主滑方向, 并假定该面内的各点均在该面内移动, 这个平面称为中性面。在该面内建立 $ox-oy$ 坐标系, 其中 oy 与重力方向相反, ox 垂直 oy 且与滑动方向相反, oz 方向根据右手法则确定, 如图 1 所示。

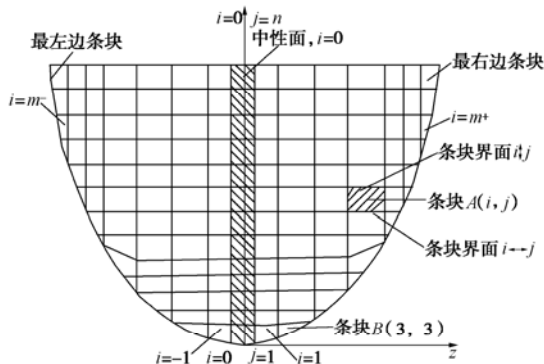


图 1 三维滑体的离散模式(平面视图)

Fig. 1 A plan view of the discretization pattern for a three-dimensional failure mass

如图 2 为呈六面体的单个离散条柱。底面 $ABCD$ 是滑面的一部分, $EFGH$ 是边坡表面的一部分。 $ABFE$ 和 $DCGH$ 分别为前后侧面即行与行的界面, 以下简称行界面, 用符号 $\leftrightarrow$ 代表, 它们垂直于 xoy 面。左右侧面 $ADHE$ 和 $BCGF$ 垂直于 $yo z$ 平面, 以下简称列界面, 用 $\updownarrow$ 表示。

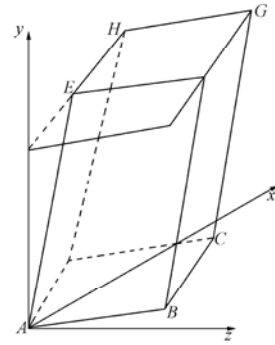


图 2 单个离散条柱

Fig. 2 A hexahedral prism

1.1 三维速度场的求解

对编号为 i, j 的条块, 它的速度为 V_{ij} 。该条块相对 $i-1, j$ 条块的速度, 即列与列界面上的相对速度记为 $V_{i\updownarrow j}$ 。与此类似, $V_{i\leftrightarrow j}$ 代表条块 i, j 相对条块 $i, j-1$ 的速度, 如图 3 所示。

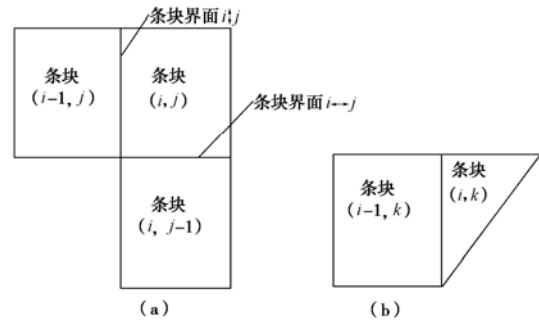


图 3 依据 $V_{i-1,j}$ 和 $V_{i,j-1}$ 确定 V_{ij}

Fig. 3 Calculation of the velocity V_{ij} by $V_{i-1,j}$ and $V_{i,j-1}$

根据流动法则和位移协调的要求, 某一条块的速度可由其相邻条块的速度来确定。具体的求解方法可根据条块所处的不同位置分为 3 类:

(1) 中性面条块的速度场

中性面各条块($i=0$)的速度场的求解可视为一个二维问题, 具体求解见文献[11]。

(2) 破坏体内条柱的速度场

对于编号为 (i, j) 的条块, 其速度 V_{ij} 可由与该条块相邻的左侧与下侧条块的速度 $V_{i-1,j}$ 和 $V_{i,j-1}$ 求出, 如图 3 所示。根据 Mohr-Coulomb 屈服准则与相关联流动法则, 有

$$\Phi(V_{i,j}, N_{i,j}) = \sin \varphi_{i,j} \quad (5)$$

$$\Phi(V_{i\updownarrow j}, N_{i\updownarrow j}) = \sin \varphi_{i\updownarrow j} \quad (6)$$

$$\Phi(V_{i\leftrightarrow j}, N_{i\leftrightarrow j}) = \sin \varphi_{i\leftrightarrow j} \quad (7)$$

速度协调条件要求

$$V_{i\leftrightarrow j} = V_{i,j} - V_{i,j-1} \quad (8)$$

$$V_{i\updownarrow j} = V_{i,j} - V_{i-1,j} \quad (9)$$

当 $V_{i-1,j}$, $V_{i,j-1}$ 已知时, 联立式 (5) ~ (7), 即可采用迭代法求出 V_{ij} 在 x, y, z 轴上的 3 个分量。

(3) 滑坡体边界条块的速度

对于每列的第一个条块 ($j=1$), 如图 3 (b) 所示, 由于不存在与其相邻的下侧条块, 此时需要引入一个假定才能求解该条块的速度。假定第一个条块速度的绝对值与相邻的 $j-1$ 条块的速率存在如下关系。

$$|V_{i,k}| = \xi_i |V_{i-1,k}| \quad (10)$$

有了这个附加假设, 即可联立式 (5)、(7)、(10) 确定每一列边界条块的速度, 作为一种简化计算方法, 通常取 $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \dots = 1.0$ 。

1.2 安全系数的求解

当滑坡体所有离散条块的速度场计算完毕后, 即可根据功能平衡方程式在三维边坡稳定领域的具体表达式求解安全系数 F :

$$\sum D_{i \leftarrow j, e}^* + \sum D_{i \rightarrow j, e}^* + \sum D_{i, j, e}^* = WV^* + T^o V^* \quad (11)$$

式中, 左侧三项分别表示条柱行界面、列界面与底滑面的内能耗散, 右侧第一项为滑坡体重力所做的功, 第二项为外荷载所做的功。安全系数 F 隐含在含下标 e 的变量中, 可根据迭代求解。

2 可靠度指标及其计算方法

2.1 可靠度指标

近似概率方法, 也称“水平 II”可靠度方法。这一方法并不要求知道所有随机变量的真实的概率分布情况, 但需定义作用和抗力的分布形状或类型。这些分布曲线可用已有数据的分布结果来近似, 而且假定作用和抗力在统计上是独立的, 一般采用正态和对数正态分布。分布曲线的概型一旦确定, 其 μ_F 和标准差 σ_F 即可唯一的表达其失效概率。也就是说, 如果定义可靠度指标 β 为

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (12)$$

那么, 失效概率就可表达为

$$P = \Phi(\beta) \quad (13)$$

如果 R 和 S 为正态分布, 则其可靠指标 β 为

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (14)$$

若 R 和 S 为对数正态分布, 则其可靠指标 β 为

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\mu_R}{\mu_S}\right)}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}} \quad (15)$$

式中, V_R 和 V_S 分别为 R 和 S 的变异系数。

2.2 计算可靠度指标的方法—Rosenbleuth 方法

可靠度指标计算方法中, Monte Carlo 法包含了数目极大的随机采样; FOSM 法则需要通过多次迭代求解。因此, 这两种方法在实际工程应用中均比较困难。Rosenbleuth 于 1975 年提出通过点估计的方式来计算岩土工程中的可靠度指标 β 。陈祖煜在边坡稳定分析

领域实际应用此法时发现这一十分简单的计算方法所得到的可靠度指标与前述两个方法十分吻合^[13], 因此, 该方法可成为一种实用的可靠度指标计算方法。

Rosenbleuth 法要求在某几个点上估计功能函数的值, 根据这些数据即可通过简单的计算公式确定可靠度指标。这些点是根据一定的原则由随机变量的均值以及标准差生成的。

定义功能函数为 $g(x_1, x_2, x_3)$, 则它的一、二阶矩阵 $E(g)$ 和 $E(g^2)$ 的计算公式为

$$E(g) \approx P_{+++}g_{+++} + P_{++-}g_{++-} + P_{+-+}g_{+-+} + \dots \quad (16)$$

$$E(g^2) \approx P_{+++}g_{+++}^2 + P_{++-}g_{++-}^2 + P_{+-+}g_{+-+}^2 + \dots \quad (17)$$

式中, g 为随机变量 x_1, x_2, x_3 的目标函数 (功能函数)。

式 (16) 和式 (17) 的右边分别包含了 8 项, g 和 P 的下标及正负号分别定义为

$$g_{+++} = g(\mu_{x_1} + \sigma_{x_1}, \mu_{x_2} + \sigma_{x_2}, \mu_{x_3} + \sigma_{x_3}) \quad (18)$$

$$g_{++-} = g(\mu_{x_1} + \sigma_{x_1}, \mu_{x_2} + \sigma_{x_2}, \mu_{x_3} - \sigma_{x_3}) \quad (19)$$

$$g_{+-+} = g(\mu_{x_1} + \sigma_{x_1}, \mu_{x_2} - \sigma_{x_2}, \mu_{x_3} + \sigma_{x_3}) \quad (20)$$

$$P_{+++} = (1 + \rho_{12} + \rho_{23} + \rho_{31})/8 \quad (21)$$

$$P_{++-} = (1 + \rho_{12} + \rho_{23} - \rho_{31})/8 \quad (22)$$

$$P_{+-+} = (1 + \rho_{12} - \rho_{23} + \rho_{31})/8 \quad (23)$$

式中, ρ_{ij} 为随机变量 x_i 与 x_j 的相关系数。

Rosenbleuth 法的可靠度指标 β 计算公式为

$$\beta = \frac{E(g)}{\sqrt{E(g^2) - E(g)^2}} \quad (24)$$

3 对称楔形体算例

本算例为一几何形状对称楔体, 其剖面划分如图 4 所示, 其物理力学参数为左右两滑面采用相同的抗剪强度指标: $c=50$ kPa, $\varphi=20^\circ$, 岩石重度为 26 kN/m³。楔体不受除重力外的其它外荷载作用。材料符合相关关联流动法则时, 该楔体的稳定安全系数为 1.579, 满足设计规范大于 1.5 的要求。利用 Rosenbleuth 方法进行了可靠度分析, 取不同的标准差进行了求解, 根据不同的强度变异系数, 作出了对应的可靠度指标变化情况图, 如图 5 所示。

由变化图看出, 当摩擦角的变异系数从 10% 变化至 50% 时, 楔体稳定的可靠度变化明显; 而当摩擦角的标准差不变, 黏聚力的变异系数从 10% 变化至 50% 时, 楔体稳定的可靠度变化比较平缓。因此摩擦角的变异对楔体的稳定起着决定作用。

当摩擦角和黏聚力的变异系数分别为 10% 和 40% 时, 此时该楔体稳定的可靠度为 3.989, 大于水利水电工程结构可靠度设计统一标准允许可靠度指标最低值 2.7。从结果来看, 摩擦角变异系数小于 20% 时该楔体稳定可靠度满足可靠度设计统一标准, 此时楔体的失效概率查表可得为 0.57%。结合安全系数 1.579, 可以

认为该楔体的稳定性是可靠的。

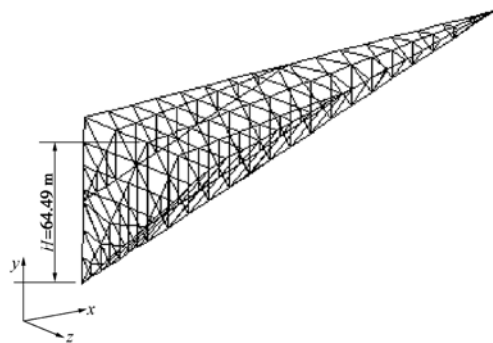


图 4 几何形状对称的楔体计算剖面
Fig. 4 A symmetric wedge pattern

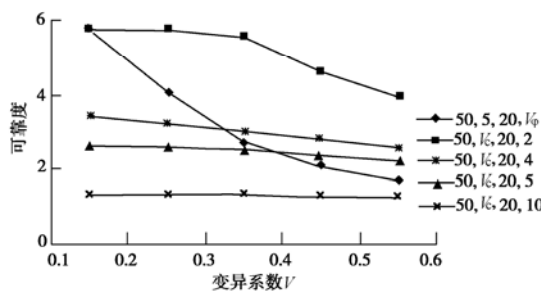


图 5 不同标准差对应可靠度计算结果
Fig. 5 Reliabilities with different variances

4 向家坝深层抗滑稳定可靠度分析

向家坝水电站为金沙江下游最末一个梯级，坝址下距宜宾市城区 20 km，距溪洛渡 175 km。重力坝顶长度为 868.98 m，坝高 161 m。根据大量的地质勘探工作和研究成果，受挠曲带的影响，向家坝工程坝址区基岩部分岩体条件较差，岩层陡倾、层间错动、破碎夹层和节理裂隙发育。本文研究了以 T_3^{2-3} 顶面或底面作为主滑面，下游基岩抗力体缓倾上游的结构面和岩桥的组合作为剪出面的滑移模式。厂房坝段和泄水坝段联合考虑，以泄 1 坝段为中性面， z 轴负方向为厂房坝段， z 轴正方向为泄水坝段，计算剖面 and 底滑面如图 6。计算采用的材料参数见表 1。

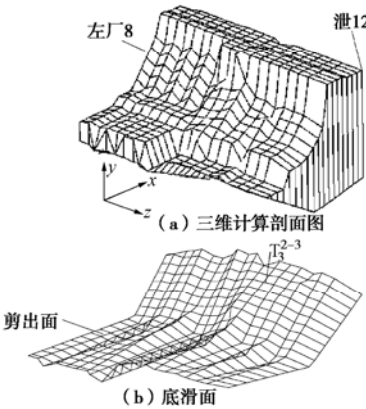


图 6 大坝沿 T_3^{2-3} 夹泥层滑动三维计算图大坝
Fig. 6 The 3D calculation of dam slide along T_3^{2-3}

在正常蓄水位条件下，上述坝段的二维稳定安全系数在 2.3~4.0 之间，部分泄水坝段的抗滑稳定安全系数小于 3.0，不能满足水利规范规定的允许最小安全系数的标准。当考虑上述坝段的联合作用后，根据二维剖面重量加权平均得到的三维安全系数为 3.333，采用三维极限分析方法得到三维安全系数为 4.711，提高幅度为 1.1。由于三维安全系数在现有的重力坝设计规范中无法参照，因此需要将确定性方法和可靠度分析相结合，通过可靠度指标作为设计可行性依据。

取软弱夹层和抗力体（II，III1 类岩体）作为随机土层，参考常用土工指标变异系数参考值^[4]，对联合坝段和泄水坝段的稳定可靠度进行了计算，结果如表 2。

结果表明，当软弱夹层和抗力体的黏聚力和摩擦角的变异系数为 40%和 10%时，泄水坝段和联合坝段的可靠度为 5.113 和 6.529，失效概率远小于 0.001%。因此可以认为整体坝段的稳定性是满足规范要求的。从结果看出，当软弱夹层的摩擦角变异系数小于 50%，抗力体的黏聚力和摩擦角变异系数小于 50%和 30%时，联合坝段的整体稳定可靠度大于 3.8，因此整体稳定安全系数大于 3.0 是满足设计规范要求的。而对于同样的变异情况，泄水坝段可靠度为 2.1 左右，根据水工建筑物结构可靠度要大于 3.8 的要求，此时泄水坝段安全系数大于 3.0 不能满足设计规范要求。

表 1 深层抗滑稳定分析岩体和地质结构面抗剪断参数计算采用值

Table 1 Cut-off parameters of rock and geological joint for analysis of deep slide

分类	材料特性	抗剪断强度		湿重度/(kN·m ⁻³)	饱和重度/(kN·m ⁻³)
		c'/MPa	$\phi'/(^{\circ})$		
岩体	混凝土	2.000	56.30	24.0	24.0
	II 类岩体	1.400	50.20	26.0	26.0
	III1 岩体	1.000	44.70	26.0	26.0
	III2 岩体	0.800	40.79	26.0	26.0
	IV 岩体	0.450	32.84	26.0	26.0
	V 岩体	0.175	24.20	26.0	26.0
地质结构面	破碎夹泥层 Pn*	0.100	19.30	23.0	23.0
其他	水	0.000	0.000	10.0	10.0
	条间界面	0.000	0.000	23.0	23.0

注：岩体实际值*：表示不把抗力体强度作为随机变量，采用实际的岩体参数。

表 2 向家坝深层抗滑稳定可靠度结果

Table 2 The reliability indexes of deep slide in Xiangjiaba

软弱夹层				抗力体				泄水坝段	联合坝段
黏聚力		摩擦角		黏聚力		摩擦角			
均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	可靠度	可靠度
100	40	19	2	1000	400	30	3	5.113	6.529
100	30	19	10	岩体实际值*		岩体实际值		5.457	9.950
100	50	19	10	岩体实际值		岩体实际值		5.423	9.916
0	0	19	10	岩体实际值		岩体实际值		5.299	9.797
0	0	19	10	1000	0	44	0	4.395	8.925
0	0	19	10	1000	200	44	10	3.715	不收敛
0	0	19	10	700	200	44	10	3.204	不收敛
0	0	19	10	700	400	44	10	2.894	不收敛
0	0	19	10	700	400	30	10	2.122	3.822

注：岩体实际值*：表示不把抗力体强度作为随机变量，采用实际的岩体参数。

5 结 语

作为向可靠度和风险分析方面发展的第一步，本文把传统性安全系数分析和风险分析结合，为重力坝抗滑稳定分析的研究提供了一种方法。利用 Rosenbleuth 法和三维边坡机动分析方法求解了边坡的可靠度指标，算例表明，通过可靠度指标可对三维边坡的稳定性从失效概率方面加以解释说明，从而使该方法在传统的确定性安全系数方法和建立在可靠度理论基础上的不确定性方法之间架起了一座桥梁。

将三维极限分析法和可靠度分析应用到向家坝深层抗滑稳定分析研究，通过最后求解得到的可靠度指标作为设计可行性依据，为三维方法在重力坝深层抗滑稳定中的应用提供了一种新思路。采用这一新的方法，可以较好地解决三维安全系数在现有的重力坝设计规范中无法参照的问题。

参考文献：

[1] LI K, LUMB P. Probabilistic design of slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, **24**(4): 520 - 535.

[2] CHRISTIAN J T, LADD C C, BAECHER G B. Reliability applied to slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(12): 2180 - 2207.

[3] HASSAN A M, WOLFF T F. Search algorithm for minimum reliability index of slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **124**(4): 301 - 308.

[4] DUNCAN J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(4): 307 - 316.

[5] HUSEIN M A I, HASSAN W F, ABDULLA F A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability[J]. Structural Safety, 2000, **22**: 161 - 178

[6] 姚耀武, 陈东伟. 土坡稳定可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(2): 80 - 87. (YAO Yao-wu, CHEN Dong-wei. Reliability analysis of soil slope stability[J]. Chinese Journal

of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(2): 80 - 87. (in Chinese))

[7] 李 亮, 刘宝琛. 边坡极限承载力的下限分析法及其可靠度理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(4): 508 - 513. (LI Liang, LIU Bao-chen. Lower bound limit analysis on bearing capacity of slope and its reliability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(4): 508 - 513. (in Chinese))

[8] 王 平, 刘东升. 简单土坡稳定可靠度计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2001, **22**(4): 494 - 498. (WANG Ping, LIU Dong-sheng. Calculative research on reliability of simple soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(4): 494 - 498. (in Chinese))

[9] 梧 松, 吴玉山. 土质边坡三维可靠度分析[J]. 岩土力学, 2003, **24**(2): 284 - 287. (WU Song, WU Yu-shan. Three-dimensional reliability analysis of earth slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(2): 284 - 287. (in Chinese))

[10] 谭晓慧, 王建国. 边坡的弹塑性有限元可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 44 - 50. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo. Slope reliability analysis using elasto-plastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 44 - 50. (in Chinese))

[11] CHEN Z Y, WANG X, HABERFIELD C, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, Part I: theory and methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**: 369 - 378.

[12] CHEN Z Y, WANG J, YIN J, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, Part II: numerical approaches, applications and extensions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**: 379 - 397.

[13] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis theory, methods, programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))