

基于矢量法安全系数的边坡与坝基稳定分析

刘艳章, 葛修润, 李春光, 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: 滑动是一个矢量概念, 基于矢量法安全系数的边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法, 以边坡与坝基的整体抗滑稳定性为研究对象, 根据边坡与坝基的整体滑动趋势方向确定安全系数的计算方向 θ , 在方向 θ 上由抗滑力与滑动力的矢量特征定义矢量法安全系数 $F(\theta)$, 以 $F(\theta)$ 进行边坡与坝基的抗滑稳定分析。在边坡与坝基的荷载和滑裂面已知的情况下, 运用有限元法计算滑裂面上的真实应力分布, 滑裂面上各处静滑动摩擦力合力方向的反方向就是 θ , 沿此 θ 方向 $F(\theta)$ 的求解公式直接根据滑裂面上的真实应力分布情况和莫尔-库仑强度准则导出。矢量法安全系数 $F(\theta)$ 的定义以力的矢量分析为基础, 具有明确的物理和力学意义, 求解时不需要引入过多的人为假定, 并以显式格式求解, 计算过程简便, 便于工程应用。运用矢量分析法求解 ACADS 两道标准考题算例的 $F(\theta)$, 得到与考题标准答案一致的结果; 应用矢量分析法求解三峡工程 3# 坝段坝基抗滑稳定问题的 $F(\theta)$, 计算结果与已有的有限元强度折减法模拟该坝段坝基渐近破坏的定性分析成果相吻合。通过实例分析表明矢量分析法的可行性和工程实用性。

关键词: 边坡工程; 边坡与坝基; 稳定分析; 矢量分析法; 矢量法安全系数

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)10 - 2130 - 11

STABILITY ANALYSIS OF SLOPE AND DAM FOUNDATION BASED ON VECTOR METHOD SAFETY FACTOR

LIU Yanzhang, GE Xiurun, LI Chunguang, 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: Sliding is a vector concept. The vector analysis method(VAM) of slope and dam foundation stability is put forward on the basis of vector method safety factor. It studies the overall stability of the sliding mass, determines the calculating direction θ according to the tendency direction toward sliding of the whole sliding mass, defines the vector method safety factor $F(\theta)$ in terms of the vector characteristics of forces against and driving sliding in θ , and analyzes the stability of slope and dam foundation with $F(\theta)$. As the loads and sliding surface of slope and dam foundation are given, the real stress distribution of the sliding surface can be calculated by finite element method. The opposite direction of the sum of the static sliding fractional forces along the sliding surface is θ ; and the formula of $F(\theta)$ is directly derived from the real stress distribution of the sliding surface and the Mohr-Coulomb criterion, not requiring redundant assumptions. The definition of $F(\theta)$ based on the force vector analysis is clear in physics and mechanics. Because the formula of $F(\theta)$ is an explicit expression and is simple to calculate, it is convenient to apply VAM to engineering. As a verification, $F(\theta)$ is solved by applying VAM to two standard testing slopes of ACADS; and the results are almost the same as those by ACADS. By applying VAM to

收稿日期: 2007 - 03 - 16; **修回日期:** 2007 - 06 - 23

基金项目: 中国科学院岩土力学重点实验室开放课题资助项目(Z000601)

作者简介: 刘艳章(1969 -), 男, 1989年毕业于辽宁科技学院采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学与岩土工程稳定性方面的研究工作。E-mail: liuyanzhang@163.com

the dam section #3 foundation stability analysis of the Three Gorges Project, the results are coincident with qualitative analysis—finite element strength reduction method simulating the gradual damaging process of the dam foundation. These case studies show the feasibility and the engineering practicability of VAM.

Key words: slope engineering; slope and dam foundation; stability analysis; vector analysis method(VAM); vector method safety factor

1 引言

边坡与坝基抗滑稳定分析一直是岩土力学的一个重要研究领域, 现已形成了内容十分丰富的分析方法^[1, 2]。进行边坡与坝基抗滑稳定分析最主要的目的之一就是求解抗滑稳定安全系数, 根据安全系数的大小来判断边坡与坝基是否稳定。要计算安全系数首先就必须定义安全系数, 对于同一个计算对象, 按照不同的安全系数定义所计算出的安全系数值一般都存在着差异^[3]。按各种分析方法所依据的安全系数定义的不同, 目前工程中常用的边坡与坝基抗滑稳定分析方法可以归结为两大类: 第一类是基于超载安全系数定义的抗滑稳定分析方法, 坝基抗滑稳定分析的超载法^[4]和边坡稳定分析的传递系数法^[5]通常是基于此安全系数定义的分析方法; 第二类是基于强度折减安全系数定义的抗滑稳定分析方法, 边坡与坝基抗滑稳定分析的极限平衡条分法和有限元强度折减法^[2, 6~14]就是基于此安全系数定义的分析方法。

滑动是一个矢量概念, 而上述两类边坡与坝基抗滑稳定分析方法的安全系数定义式中, 沿滑裂面对力积分(求代数和)的力学意义不明确; 这两类分析方法在计算安全系数时, 都暗含有将安全系数视为与方位无关的常数, 在滑裂面上各处及各方向安全系数相同的假定^[15]。这都不能反映“滑动”这个矢量概念的内涵。而在第 1 类分析方法中, 沿着不同的方向增大外载, 计算体系所受的合外力的大小和方向都必然不同, 其超载系数即安全系数必然不同, 这种分析方法的安全系数应具有明显的方向性。S. G. Wright 等^[16~18]已证实第 2 类分析方法中的极限平衡法的安全系数在滑裂面的不同部位其值并不相等, 而在滑面的不同部位其滑动力的方向、大小以及滑裂面岩土体强度特性一般都不同, 因此, 在滑裂面不同部位和不同方向上的安全系数也在变化; 在第 2 类分析方法中, 对岩土体的强度参数黏聚力 c 和内摩擦因数 $\tan \varphi$ 按同一系数进行折减, 这与岩土体的实际强度特性有较大差别; 另外, 超

载与强度折减都是对现有状态的人为假定, 在此基础上计算的安全系数并不能真正地反映边坡与坝基在现实状态下的安全性。因此, 这两类安全系数定义的物理或力学意义受到一些学者^[15, 19~22]的质疑。

由于力的矢量特征, 在受力分析基础上计算出的抗滑稳定安全系数必然是与计算方向有关的量, 葛修润等^[20~22]曾对力的矢量和意义下的安全系数进行过探讨。既然滑动是一个矢量概念, 那么抗滑稳定性的安全系数就应以力的矢量比来定义^[23]。前述两类分析方法安全系数定义的物理意义不明确的根本原因就在于其没有充分考虑滑动的矢量特征, 特别是没有考虑矢量问题的方向性, 定义的安全系数与方向无关。本文根据葛修润等^[20~22]的思想提出了基于矢量法安全系数的边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法, 给出了安全系数计算方向的确定方法, 定义了物理意义明确, 考虑滑动方向、反映边坡与坝基在现实受力状态下整体安全性的矢量法安全系数, 推导出了矢量法安全系数的定义表达式; 运用本方法计算了两个简单的边坡算例和一个坝基工程实例的抗滑稳定矢量法安全系数, 并将该法的计算结果与已有的运用传统分析方法的计算结果进行了对比分析。

2 基于矢量法安全系数的分析方法

各种边坡与坝基抗滑稳定分析方法都是在对可能的滑动体进行受力分析的基础上, 定义和求解抗滑稳定安全系数, 根据安全系数的大小来判定其稳定性。安全系数 F 最原始的定义为潜在滑动面上总的抗滑力 ΣR 与总的滑动力 ΣT 的比值, 即

$$F = \frac{\Sigma R}{\Sigma T} \quad (1)$$

由于抗滑力与滑动力都是矢量, 所以式(1)中对抗滑力与滑动力的求和都应是矢量的求和。为此, 本文提出边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法, 将安全系数的定义建立在力的矢量分析基础上, 并将其称为“矢量法安全系数”。

2.1 基本假定与原则

(1) 以二维问题为研究对象，边坡或坝基所构成的计算区域为 Ω ，在 Ω 内的潜在滑裂面 l 已知，构成的滑动区域为 S 。此处暂不讨论搜索最危险滑裂面的方法，实际工程中，对于某一具体的边坡或坝基进行稳定分析的前提条件就是通过地质勘察，获得各潜在滑动面的空间形态及滑体、滑带、滑床等要素的物理力学参数^[24]。

(2) 边坡与坝基的荷载、边界条件、岩土体的基本物理力学参数已通过勘察获得，用有限元法可计算出边坡与坝基内的应力分布情况。

(3) 滑裂面上岩土体的强度特性服从莫尔-库仑强度准则。在应力分布已知时，岩土体的抗剪强度 τ_f 为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{2}$$

(4) 以边坡与坝基的整体抗滑稳定性为研究目的，安全系数的计算方向由边坡与坝基的整体滑动趋势确定。

(5) 矢量法安全系数 $F(\theta)$ 定义为：沿计算方向 θ ，滑裂面上提供抗滑力的各力沿此方向投影的代数和 $\Sigma R(\theta)$ 与提供滑动力的各力沿此方向投影的代数和 $\Sigma T(\theta)$ 的比值：

$$F(\theta) = \frac{\Sigma R(\theta)}{\Sigma T(\theta)} \tag{3}$$

2.2 安全系数的计算方向

如图 1 所示，假定在边坡与坝基的荷载、边界条件、滑裂面位置、岩土体的基本物理力学参数已知的情况下，用有限元法计算的滑裂面上任意一点 i 处在其局部坐标系 $X'O'Y'$ 下的应力为 σ_i 和 τ_i ， i 处的一微弧段为 Δl_i ，点 i 处滑裂面的切线与总体坐标系 X 轴正向的夹角为 α_i 。

应力的正负号按岩土力学的规定；角度的正负规定为：从 X 轴正向出发，沿逆时针方向的角度为正，沿顺时针方向的角度为负，图 1 中的 α_i 为负。

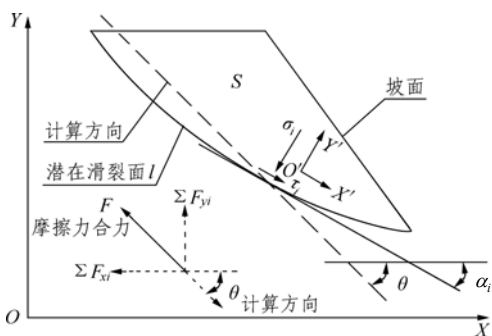


图 1 确定计算方向示意图

Fig.1 Sketch for determination of calculating direction

根据摩擦理论，边坡与坝基的潜在滑裂面上的任意一点 i 的滑动趋势方向应沿着该点的滑裂面的切向方向，因此该点的应力在滑裂面切向方向的分量 τ_i 与 Δl_i 的乘积就是该点处静滑动摩擦力的大小，该点的滑动趋势方向与其静滑动摩擦力方向相反。对于整个滑体而言，其静滑动摩擦力就是滑裂面各点处静滑动摩擦力的合力，合力方向的反方向就是整个滑体的潜在滑动趋势方向。而矢量法安全系数的计算方向就是滑体的整体滑动趋势方向，也就是滑裂面各点处静滑动摩擦力合力方向的反方向。

$\tau_i \Delta l_i$ 在 X 方向的投影 F_{xi} 为

$$F_{xi} = \tau_i \Delta l_i \cos \alpha_i \tag{4}$$

$\tau_i \Delta l_i$ 在 Y 方向的投影 F_{yi} 为

$$F_{yi} = \tau_i \Delta l_i \sin \alpha_i \tag{5}$$

因此，计算方向 θ 为

$$\theta = \arctan \frac{\Sigma F_{yi}}{\Sigma F_{xi}} \tag{6}$$

2.3 矢量法安全系数的求解表达式

图 2 所示为抗滑稳定分析时计算安全系数的示意图。以滑裂面为研究对象，在滑裂面上一点处，岩土体的黏聚力为 c_i ，内摩擦角为 φ_i ，滑体作用于基岩上的荷载为正应力 σ_i 和剪应力 τ_i ，基岩作用在滑体上的反力为 σ'_i 和 τ'_i ，它们相互之间分别构成作用力与反作用力，在数值上相等，即

$$\sigma'_i = \sigma_i, \quad \tau'_i = \tau_i \tag{7}$$

安全系数计算方向和滑裂面切线与 X 轴正向的夹角分别为 θ 和 α_i ， θ 由式(6)确定。

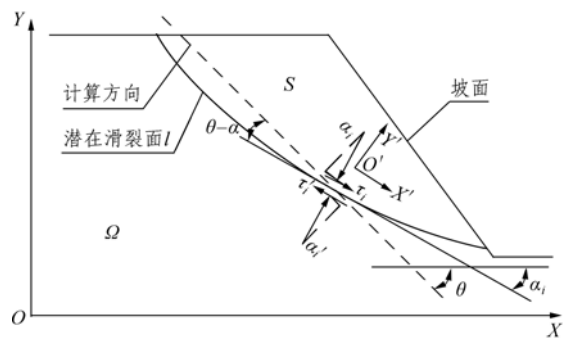


图 2 安全系数求解示意图

Fig.2 Sketch for calculating safety factor

以下推导式(3)的具体表达式：

(1) 滑裂面上的滑动力由自重及外载引起，在滑裂面的一个微段 Δl_i 内，就是由滑裂面上该处的 σ_i ， τ_i 引起，将各种引起滑动力的力沿安全系数计算方向的反方向进行投影，然后求和即为式(3)中的

分母项。

$\tau_i \Delta l_i$ 的投影为 T_τ^i , 且

$$T_\tau^i = \tau_i' \Delta l_i \cos(\theta - \alpha_i) = \tau_i \Delta l_i \cos(\theta - \alpha_i) \quad (8)$$

$\sigma_i \Delta l_i$ 的投影为 T_σ^i , 且

$$T_\sigma^i = \sigma_i' \Delta l_i \sin(\theta - \alpha_i) = \sigma_i \Delta l_i \sin(\theta - \alpha_i) \quad (9)$$

则

$$\sum T(\theta) = \sum T_\tau^i + \sum T_\sigma^i \quad (10)$$

(2) 滑裂面上的抗滑力由岩土体的黏聚力、摩擦力及基岩对滑裂面的法向反力提供; 滑裂面的一个微段 Δl_i 内, 黏聚力与摩擦力之和就是滑裂面岩土体的抗剪强度 τ_{fi} , 其值由莫尔 - 库仑强度准则计算, 基岩对滑裂面的法向反力为 σ_i' ($=\sigma_i$); 将这些力沿安全系数的计算方向投影, 然后求和即为式(3)中的分子项, 即

$$\tau_{fi} = c_i + \sigma_i \tan \varphi_i \quad (11)$$

$\tau_{fi} \Delta l_i$ 的投影为 R_τ^i , 且

$$R_\tau^i = \tau_{fi} \Delta l_i \cos(\theta - \alpha_i) \quad (12)$$

$\sigma_i' \Delta l_i$ ($=\sigma_i \Delta l_i$) 的投影为 R_σ^i , 且

$$R_\sigma^i = \sigma_i \Delta l_i \sin(\theta - \alpha_i) \quad (13)$$

则

$$\sum R(\theta) = \sum R_\tau^i + \sum R_\sigma^i \quad (14)$$

(3) 将式(10)与(14)代入式(3), 得矢量法安全系数的表达式:

$$F(\theta) = \frac{\sum R(\theta)}{\sum T(\theta)} = \frac{\sum R_\tau^i + \sum R_\sigma^i}{\sum T_\tau^i + \sum T_\sigma^i} \quad (15)$$

将 $f_i = \tan \varphi_i$ 代入式(15)并写成积分形式:

$$F(\theta) = \frac{\int [(c_i + \sigma_i f_i) \cos(\theta - \alpha_i) + \sigma_i \sin(\theta - \alpha_i)] dl}{\int [\tau_i \cos(\theta - \alpha_i) + \sigma_i \sin(\theta - \alpha_i)] dl} \quad (16)$$

前述分析中, 仅用到了滑裂面上的应力, 安全系数的求解表达式中不含外载, 实际上, 滑面上的应力就是由外载引起的, 对滑体取隔离体, 对其进行分析, 求出滑动力和抗滑力, 代入安全系数的定义式, 可以证明用外载表示的安全系数的表达式与式(15)是等价的。

图 3 是从图 2 中取出的滑体, 将其作为隔离体, 所受的外载有重力 G , 集中荷载 P_1, P_2, \dots , 分布荷载 q , 以上这些力的合力假定为 P , P 的作用方向与安全系数计算方向的夹角为 β , 如图 3 所示; 在一点 i 处滑裂面反力为 σ_i', τ_i' ; 其他条件与前述计算相同。

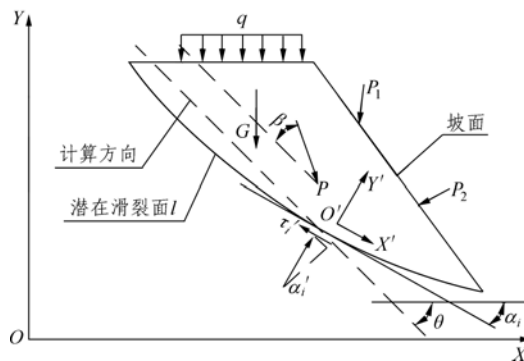


图 3 隔离体的平衡

Fig.3 Equilibrium of free body

滑裂面上的滑动力由合外载 P 引起, 其在安全系数计算方向的投影为

$$\sum T(\theta) = P \cos \beta \quad (17)$$

由于隔离体是一个平衡体, 它在任何方向上所受的合力必为 0, 沿安全系数计算方向, 隔离体所受的合力也为 0, 由 P 与 σ_i', τ_i' 并考虑式(7)得

$$P \cos \beta - \sum [\tau_i \cos(\theta - \alpha_i) + \sigma_i \sin(\theta - \alpha_i)] \Delta l_i = 0 \quad (18a)$$

即

$$P \cos \beta = \sum [\tau_i \cos(\theta - \alpha_i) + \sigma_i \sin(\theta - \alpha_i)] \Delta l_i \quad (18b)$$

或

$$P \cos \beta = \int_l [\tau_i \cos(\theta - \alpha_i) + \sigma_i \sin(\theta - \alpha_i)] dl \quad (18c)$$

滑裂面上的抗滑力与前面的分析计算相同, 仍然为式(14), 由式(3), (14)和(17)得

$$F(\theta) = \frac{\sum R(\theta)}{P \cos \beta} \quad (19)$$

将式(18)代入式(19)即可得到式(15), 写成积分形式就得到式(16), 所以用外载表示的安全系数的表达式(19)与用滑裂面上的应力表示的安全系数的表达式(15)或(16)是等价的。由式(15)或(16)可知, 安全系数的求解式是一个显示表达式, 不需要进行迭代计算。

2.4 矢量法安全系数的求解步骤

根据前述矢量法安全系数定义式的理论推导, 边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法求解矢量法安全系数的主要步骤如下:

- (1) 根据地质勘察资料建立有限元数值计算模型, 在模型中反应地质勘察的滑面。
- (2) 对模型进行常规的有限元弹(塑)性分析计算, 得到各点的应力状态。
- (3) 根据有限元弹(塑)性计算结果, 计算滑面上

各处剪力的矢量和，该剪力矢量和的方向即为安全系数的计算方向。通常按有限元网格划分的节点，将滑面分为若干个小段进行计算。

(4) 在安全系数的计算方向上按式(10)和(14)计算滑面上各处滑动力与抗滑力沿此方向投影的代数和，按式(15)就可得到边坡或坝基整体的安全系数。

3 两个简单的边坡算例

1987 年澳大利亚计算机应用协会(ACADS)发布了十道边坡稳定分析考题，并有“裁判程序”的答案，用以对该国边坡稳定分析程序进行考核，其中的考题 1 可作为经典的考核题^[2]，考核边坡稳定分析程序的准确性，本文选用的算例是 ACADS 考题 1 中的 EX1(a)和 EX1(c)。

3.1 计算条件

考题 EX1(a)为一均质土坡，其计算模型及尺寸如图 4 所示，材料参数如表 1 所示；考题 EX1(c)为非均质土坡，其轮廓尺寸与 EX1(a)相同，但坡体由 3 种土层组成，计算模型及尺寸如图 5 所示，材料参数如表 2 所示。表 1 和 2 中， γ 为容重， E 为弹性模量， μ 为泊松比， K_0 为侧压系数，其他符号意义同前。

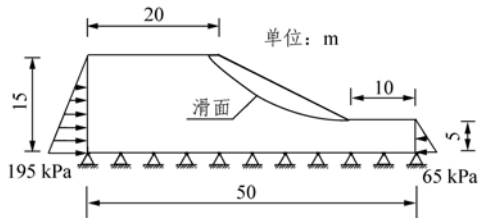


图 4 ACADS 考题 EX1(a)计算模型

Fig.4 Model of test problem EX1(a) of ACADS

表 1 ACADS 考题 EX1(a)材料参数

Table 1 Material parameters of EX1(a) of ACADS

c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/kPa	μ	K_0
3.0	19.6	20.0	1.0×10^4	0.25	0.65

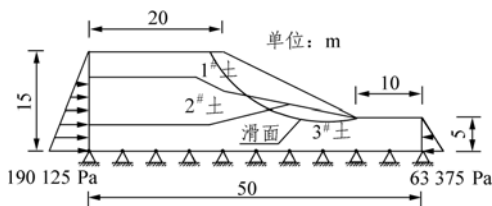


图 5 ACADS 考题 EX1(c)计算模型

Fig.5 Model of test problem EX1(c) of ACADS

表 2 ACADS 考题 EX1(c)材料参数

Table 2 Material parameters of EX1(c) of ACADS

土号	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/kPa	μ	K_0
1#	0.0	38.0	19.5	1.0×10^4	0.25	0.65
2#	5.3	23.0	19.5	1.0×10^4	0.25	0.65
3#	7.2	20.0	19.5	1.0×10^4	0.25	0.65

本文暂不讨论边坡与坝基稳定矢量分析法的临界滑裂面的搜索问题，图 4 和 5 中的滑裂面为陈祖煜^[2]采用 STAB 程序求得的临界滑裂面，本算例即以此滑裂面计算边坡稳定的矢量法安全系数，其中考题 EX1(c)的滑裂面同时穿过 3 种土层。

ACADS 的考题主要用于考核极限平衡分析方法及计算程序，没有给出具体的边界条件，由于本文介绍的基于矢量法安全系数的边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法需运用有限元法求得应力场，而有限元法求解时，这 2 个算例由于给出的计算范围较小，由弹性理论，其边界条件将对计算结果产生比较大的影响，本文采用图 4 和 5 中所示的边界条件，即左、右两个侧面边界均采用三角形分布的水平侧压力约束，侧压力 σ_h 的值采用下式计算：

$$\sigma_h = K_0 \gamma H \quad (20)$$

式中： H 为计算荷载处距侧面边界顶点的垂直距离。

3.2 计算结果及分析

本文基于大型有限元商用程序 ANSYS 的二次开发，根据前述矢量法安全系数的定义式和求解步骤，为两道考题算例编写了相应的计算程序，计算结果与裁判答案^[2]如表 3 所示，表 3 中同时也列出了矢量法安全系数的计算方向。

表 3 裁判答案与计算结果^[2]

Table 3 Referee's and calculated results^[2]

分析方法	计算程序	EX1(a)		EX1(c)	
		安全系数 $F(\theta)$	计算方向 $\theta/(\text{°})$	安全系数 $F(\theta)$	计算方向 $\theta/(\text{°})$
	Donald(推荐)	1.000		1.390	
	SSA(Baker)	1.000		1.390	
极限平衡法裁判答案	STAB(Chen)	0.991		1.385	
	GWEDGEM	1.000	22.58	1.390	21.28
	EMU	1.000		1.390	
	Fredlund	0.990		1.406	
本文方法	自编	0.999		1.389	

通过对比表 3 中各种方法所得到的安全系数可知, 运用本文提出的分析方法对两个标准考题计算的结果与依据极限平衡法得到的各裁判答案非常接近, 考题 EX1(a)和 EX1(c)运用本文提出的方法的计算结果与推荐的 Donald 的裁判答案相相比, 其相对误差分别只有 0.07% 和 0.08%。

尽管本文提出的分析方法定义的安全系数与极限平衡法中的安全系数定义意义不同, 但由表 3 可知, 运用两种方法对两个算例计算的安全系数值几乎相同。这主要是因为此处所选的算例是圆弧滑面, 而在滑裂面为圆弧这种特殊情况下, 强度折减安全系数的定义式中, 滑裂面上抗滑力与滑动力代数和之比具有明确的物理意义的, 此时代数和之比定义的安全系数表示的是: 滑裂面上各处的抗滑力对滑弧圆心的力矩与各处滑动力对滑弧圆心的力矩之比, 所以在此具有明确物理意义的特殊情况下, 基于强度折减安全系数的极限平衡法求得的安全系数与应用本文的矢量分析法求得的矢量法安全系数应该一致, 这一点可以从理论上进行证明。

对于这两个算例, 本文还运用有限元强度折减法进行对其稳定性进行了分析, 分析时以计算不收敛作为破坏标准, 屈服准则为 Druker-Prager 准则。考题 EX1(a)和 EX1(c)的有限元强度折减安全系数分别为 1.188 和 1.578, 比极限平衡法的结果分别高出了 18.75% 和 13.53%。由于这两个算例中所有土体的泊松比都等于 0.25, 这些土体的内摩擦角 φ 与泊松比 μ 之间的关系都不满足郑宏等^[8]提出的不等式:

$$\sin \varphi \geq 1 - 2\mu \quad (21)$$

将 μ 值直接用标准考题的值代入时, 在运用有限元进行强度折减法分析时, 无法得到与极限平衡相似的滑裂面, 而是在坡体的底部形成贯通的塑性区。所以本文在计算时按照式(21)对 μ 值进行了调整, 对考题 EX1(a)的 μ 值从 0.25 逐步调整到了 0.40, 对考题 EX1(a)的 1[#], 2[#], 3[#]土体的 μ 值分别逐步调整到了 0.30, 0.37, 0.40, 通过调整, 运用有限元强度折减法得到的坡体塑性贯通区与极限平衡法所搜索到的临界滑裂面基本一致, 但安全系数值都比极限平衡法的计算结果高出很多。在调整有限元网格和 μ 值的过程中, 考题 EX1(a)和 EX1(c)的有限元强度折减安全系数的变化范围分别是 0.922~1.242 和 1.429~1.648; 同时, 矢量法安全系数值的变化范围分别是 0.985~0.999 和 1.349~1.389, 其计算方向角度(倾斜向下与水平面的夹角)的变化范围分别是

22.58°~24.18° 和 21.28°~22.86°, 计算结果的波动幅度较小。通过这两个算例可知, 矢量法安全系数的计算结果对 μ 值和有限元网格变化的敏感性, 明显低于有限元强度折减法的计算结果对其变化的敏感性。

4 工程实例分析

三峡大坝是目前在建的规模最大的混凝土重力坝, 大坝的安全与稳定问题, 特别是左厂 3[#]坝段坝基的深层抗滑稳定问题是三峡工程的重大工程技术问题之一^[25~27], 原因是 1[#]~5[#]坝段坝基地质条件相对较差, 其中 3[#]坝段的地质条件最差。因此三峡大坝左厂 3[#]坝段坝基的深层抗滑稳定问题一直是业主和设计部门极为关注的问题, 也是岩石力学界及相关学科的科研工作者与工程技术人员研究的热点问题, 相关的研究成果也很多。研究方法既有模型试验也有数值计算与分析, 但现有研究方法计算的安全系数都是超载安全系数或强度折减安全系数。

模型试验主要根据设定的几何相似常数建立地质力学模型, 用超载法求得超载安全系数^[28~29]; 数值计算与分析方法主要包括经典的二维极限平衡法与极限分析法^[30~32]、块体单元法^[33], 二维和三维的有限元法等^[34~38]。以上研究除上海交通大学^[35]的研究报告是根据各结构面在空间的实际产状建立计算模型, 较好地模拟了实际工程地质情况外, 其余各研究的计算模型都是在对缓倾角结构面进行理想概化的条件下得到的, 具体讲就是沿设定的概化潜在滑移路径, 将不同倾向、不同倾角的缓倾结构面视为同一产状, 简化成一条直线或折线。而实际上不同产状的缓倾角结构面的倾向相差可达 30°, 倾角相差 10° 以上, 这样的概化与实际情况有一定的差别。

以上各研究所得到的抗滑稳定安全系数各不相同, 且相差较大, 造成这些差异的原因主要有:

- (1) 分析方法不同, 各种分析方法的安全系数的定义有差别;
- (2) 即使是同一种分析方法, 所采用的分析条件不同;
- (3) 在应用有限元法进行分析计算时, 单元的个数和形状都对计算结果有明显的影 响, 且与计算程序的效率和一些人为因素有关; 另外各研究所选取的破坏失稳标准不同。

本文以三峡左厂 3[#]坝段坝基抗滑稳定问题作为工程实例, 运用边坡与坡基抗滑稳定的矢量分析法

求解其矢量法安全系数。

4.1 3#坝段坝基工程地质概况

三峡工程坝址为元古代前震旦纪结晶岩体，基岩是完整坚硬的闪云斜长花岗岩，总体上地质地形条件优越，但这一古老的结晶岩体仍然存在许多局部的地质缺陷，而对大坝安全有影响的主要地质问题之一就是局部较发育的倾向下游的缓倾角结构面，左厂 1#~5#坝段坝基中这些结构面比较发育，其中 3#坝段坝基中缓倾角结构面最为发育。

大坝坝基开挖竣工时的地质勘察资料^[39]表明，左厂 1#~5#坝段坝基岩体中，优势结构面走向与坝轴线的夹角仅为 15.5°，向下游的倾角为 15°~30°，缓倾角结构面均为硬性结构面。3#坝段长大缓倾角结构面平均垂直线密度为 0.121 条/m，而相邻的 2#和 4#坝段只有 0.071~0.078 条/m。1#~5#坝段坝基岩体中，断层发育，但这些断层主要倾向大坝上游，走向与坝轴线交角较小，倾角大于 60°。3#坝段坝基深层抗滑稳定分析的主要控制结构面的空间位置、性状、充填特征及断层产状见清华大学等^[34, 39]的研究报告。

4.2 计算模型

所取典型断面为长江水利委员会三峡勘测研究院^[39]提供的坝基开挖竣工后的 3#坝段坝基的地质剖面，剖面位置位于大坝坐标系 $y = 48\ 193.0\text{ m}$ 处，离 2#与 3#坝段的分缝线距离为 17.4 m，结构面和断层概化后的情况如图 6 所示，但图 6 的概化与前述各研究的理想概化有所不同，它直接依据开挖竣工后经过补充勘察得到的地质剖面图上的各结构面和断层的实际产状进行概化，克服了前述一些研究中在计算时按滑移路径将结构面产状进行人为调整的缺点，因为此时经过几个阶段的勘察工作以后，已经基本查明了结构面和断层的准确空间位置与产状，这种概化方式能最大限度地反应实际的工程地质情况。

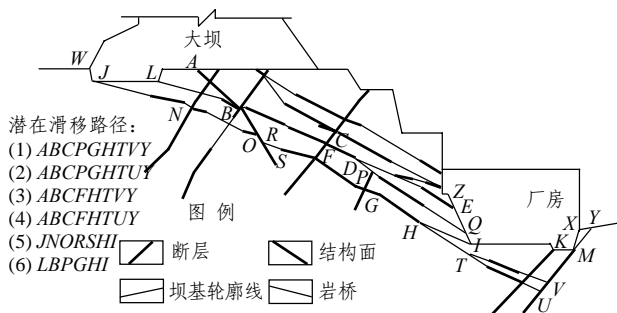


图 6 3#坝段潜在滑移路径

Fig.6 Potential slip paths of dam section #3

由于浅层的滑移路径在开挖施工时都实施了有效加固措施，所以要进行抗滑稳定分析的都是深层的潜在滑移路径。本文对长江水利委员会三峡勘测研究院^[39]中根据工程需要指定的全部 6 条深层潜在滑移路径进行计算，这 6 条潜在滑移面都是与厂坝联合抗滑稳定分析有直接联系的滑移路径，滑移路径的具体位置如图 6 所示。3#坝段坝基的深层抗滑稳定分析的计算模型如图 7 所示。

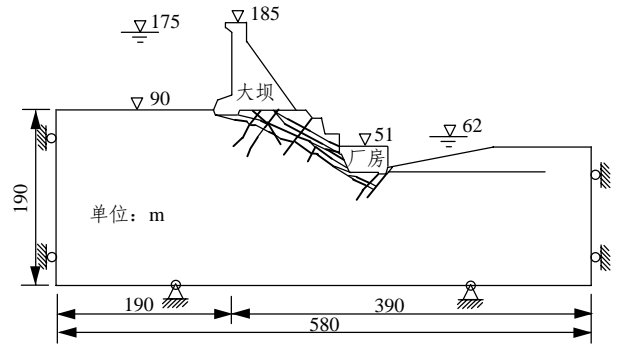


图 7 计算模型

Fig.7 Calculating model

4.3 计算条件

(1) 材料参数

计算所用的材料参数按上海交通大学等^[35, 39]所给参数选取，岩桥的参数按其建议取岩体参数的 88.5%，各种材料的计算参数见表 4。

表 4 材料计算参数

Table 4 Calculating parameters of materials

材料名称	弹性模量 E/GPa	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	抗剪断强度		残余抗剪强度	
				f	c/MPa	f'	c'/MPa
厂坝	26	24.5	0.167	1.1	3.0		
微风化	35	27.0	0.22	1.7	2.0	1.3	0.7
岩桥	31	23.9	0.25	1.5	1.8		
结构面				0.7	0.2	0.6	0.1
断层	10	26.0	0.28	0.9	0.8	0.8	0.6

(2) 荷载与边界条件

本文考虑坝基所受的荷载有坝体和厂房的重力、坝基岩体的自重、上下游水压力。大坝和 51 m 标高以下的厂房按实体混凝土计算质量，51 m 标高以上的厂房自重依据任建喜等^[37]按 331 kPa 均布荷载施加；水压力按库区正常蓄水时大坝上下游的特征水位施加，上游库水位为 175.0 m，下游水位为 62.0 m，特征水位已在计算模型图 7 中标出。

边界条件如图 7 所示, 坝基底面边界采用固定支座模拟, 上、下游的两个侧面边界采用限制侧向水平位移的滑动支座模拟。

4.4 计算结果及分析

本工程实例的分析计算仍然借助大型有限元商用程序 ANSYS 的二次开发实现, 本文计算了图 6 中由工程指定的 6 条潜在滑移路径的矢量法安全系数及安全系数的计算方向, 具体计算结果见表 5。

表 5 各潜在滑移路径的安全系数

Table 5 Safety factors of different potential slip surfaces

编号	滑移路径	安全系数	计算方向与水平线夹角/(°)
1	ABCPGHTVY	2.431	33.287
2	ABCDGHTUY	2.233	36.076
3	ABCFHTVY	2.274	36.079
4	ABCFHTUY	2.112	38.523
5	JNORSHI	3.607	23.986
6	LBPGHI	3.588	22.405

分析表 5 中的数据可知: 3[#]坝段各潜在滑移路径越陡、越深, 其矢量法安全系数越小, 安全系数的计算方向与水平线的夹角越大。这主要是因为滑移路径越陡, 滑面上正应力越小, 抗滑能力也就越小, 同时滑面上向下的剪应力越大, 滑动力越大, 所以安全系数就越小。3[#]坝段坝基抗滑稳定的矢量法安全系数值最低、计算方向与水平线的夹角最大的滑移路径是第 4 条滑移路径 ABCFHTUY, 安全系数为 2.112, 计算方向与水平线的夹角为 38.523°, 且包含 ABCFH 段结构面的第 3 条滑移路径 ABCFHTVY 的矢量法安全系数值也较低。

有限元强度折减法在定性描述边坡与坝基的渐近破坏方面有其合理性, 从清华大学^[34]应用有限元强度折减法对该坝基的渐近破坏分析过程可知, 首先出现屈服的机构面是坝体下方的 AB 段(具体位置见图 6), 该段在折减系数为 1 时就屈服了, 其后屈服的机构面逐渐向坝基下部发展, 在折减系数为 2.5 的时候, 沿 ABCFH 段塑性区首先连通。从定性的角度来说, 应用有限元强度折减法对坝基渐近破坏进行分析的结论, 与本文计算的凡包含 ABCFH 段结构面的滑移路径其矢量法安全系数都较低结论相吻合。

求解安全系数的目的是为了给边坡与坝基的抗滑稳定性提供一个定量评价指标, 从理论上讲, 现有的任何一种分析方法, 只要计算的安全系数大于

1, 边坡与坝基就是稳定的。但对于实际工程进行分析计算时由于计算模型只是对工程实际的近似反映, 所以通常都用一个大于 1 的安全系数作为抗滑稳定与否的判据。对于某种分析方法, 这个标准需要经过对大量的工程实例分析验证后才能得到, 即使有一个这样的标准, 对于具体的工程还需要结合工程的具体特点根据工程经验来确定该工程的抗滑稳定判据。由于安全系数的定义不同, 应用本文的矢量分析法计算的矢量法安全系数与已有文献分析方法计算的安全系数之间缺乏比较的基础, 但从对坝基的整体抗滑是否稳定这个结论出发, 本文方法的计算结果与已有文献的计算结果之间, 以及与工程实际之间还是存在着一定的联系, 由此可得出 3[#]坝段坝基的矢量法安全系数抗滑稳定性判据。

如前所述, 对于三峡工程左厂 3[#]坝段坝基的抗滑稳定问题, 各研究所得到的抗滑稳定安全系数各不相同, 且相差较大, 但各研究对 3[#]坝段坝基抗滑稳定分析的结论都一样, 都认为 3[#]坝段坝基的深层抗滑情况是稳定和安全的。而从三峡工程的实际运行情况来看, 三峡左厂大坝建成后现蓄水水位已到 156 m, 左厂的部分发电机组已正常工作几年, 到目前为止还未见大坝及坝基有较大变形问题的报道, 所以可以认为 3[#]坝段坝基深层抗滑稳定满足安全要求。因此根据本文的计算结果, 若以矢量法安全系数来评判坝基的深层抗滑稳定性, 在自重与水压荷载情况下, 本文认为矢量法安全系数 ≥ 2.0 时, 大坝坝基的整体深层抗滑是稳定的。这个评判值只是以 3[#]坝段这一特定的工程在特定的条件下得出的, 其适用性还有待检验。

5 讨论

由于本文的分析方法是建立在运用有限元进行应力分析的基础上的, 所以其计算精度依赖于有限元这种数值方法的计算精度, 而运用有限元进行弹塑性分析时, 常会出现计算不收敛的情况, 其原因既有可能是模型的物理原因或人为因素, 也有可能是有限元程序本身的缺陷, 此时可以只进行弹性分析, 以弹性分析的应力场来进行矢量法安全系数的计算。在本研究中, 对前述 ACADS 的两个考题进行过对比计算, 用有限元弹性分析的应力分布与用有限元弹塑性分析的应力分布求解的矢量法安全系数, 相互之间的最大相对误差为 3.58%, 计算方向

角度之间的最大相对误差为 1.20%。

对于 ACADS 的考题 EX1(a), 本文还进行过超载安全系数的计算, 具体的做法就是容重增大法。对于考题 EX1(a), 将其容重增加到 3 倍时进行弹塑性分析计算仍然收敛, 根据超载安全系数的定义, 此时的超载安全系数就应该大于等于 3。Y. K. Seo^[40]认为这种情况是由于容重增大时, 正应力的增大比例超过了剪应力的增大比例, 容重增大时其抗剪强度得到了提高, 所以得到了较高的超载安全系数, 而这种在超载假定下得到的安全系数与其他的安全系数之间在物理意义上缺乏比较的基础。

对于如图 6 所示的由各种产状的结构面组合而成的潜在滑移路径, 特别是有多处拐点和折线的潜在滑移路径, 应用本文的矢量分析法都可以求解其矢量法安全系数, 而现有极限平衡法的分析软件(如 GEO-SLOPE 和 Slide)都无法对图 6 中这种多折线潜在滑移路径进行安全系数的求解。因此本文的矢量分析法不仅适用于土质边坡的稳定分析, 也能较好地适用于滑裂面受各种结构面控制, 具有任意滑裂面的岩质边坡及坝基的抗滑稳定分析。

本文只是对边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法的原理和分析步骤进行了阐述, 算例很少, 并且只是对指定的滑裂面进行了分析。作为一种新的边坡与坝基稳定性分析方法, 还有许多问题有待研究, 如: 在矢量法安全系数定义基础上, 如何搜索最危险滑动面, 与目前常用的极限平衡法的计算结果之间差异有多大, 在工程应用中如何确定一个与极限平衡法相对应的安全判据, 以及如何将其推广到三维分析等等。这些问题都有待在以后的理论研究和工程实践运用中检验、发展、补充和完善。

6 结 论

基于矢量法安全系数的边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法, 在运用有限元分析得到边坡与坝基应力分布的基础上, 根据摩擦理论和滑裂面的受力情况, 由滑裂面上的应力水平计算出边坡与坝基的整体滑动趋势方向, 以此方向作为计算方向, 按照力的矢量特征, 将矢量法安全系数定义为在此计算方向上滑裂面上抗滑力投影的代数和与滑动力投影的代数和的比值, 矢量法安全系数的定义抓住了滑动是矢量问题这一本质, 考虑了滑动的方向性, 其物理力学意义明确。基于矢量法安全系数的边坡与坝

基抗滑稳定分析方法, 既不需要人为地增大荷载或折减材料的强度参数, 也不需要对比边与坝基各部分的内力进行人为假定, 而直接根据滑裂面的真实应力分布情况和滑裂面岩土体所能提供的抗滑能力, 计算边坡与坝基在现有受力状况下, 在其整体滑动趋势方向上的抗稳定安全系数。本方法的矢量法安全系数直接通过一个显式方程求解, 不需要迭代计算, 在边坡与坝基的应力分布已知的条件下, 安全系数计算过程简单, 便于工程应用, 且适用于具有任意滑裂面的边坡与坝基的抗滑稳定分析。

通过算例分析表明, 基于矢量法安全系数的边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法, 在运用有限元法进行应力分析时, 对单元网格的划分没有有限元强度折减法那样严格, 只要能进行弹塑性或弹性分析就可进行稳定分析计算。在圆弧滑裂面情况下运用本文方法得到的矢量法安全系数与标准考题结果一致; 并且对于传统极限平衡条分法无法计算的多折线滑裂面的情况, 本文方法也能容易地计算出边坡与坝基抗滑稳定的矢量法安全系数。在具有复杂滑裂面的实际工程算例中, 运用本文方法的计算结果与有限元强度折减法模拟边坡渐近破坏的定性分析结果相吻合。通过实例验证了基于矢量法安全系数的边坡与坝基抗滑稳定的矢量分析法的可行性和工程实用性。

参考文献(References):

- [1] DUCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 577 - 596.
- [2] 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 Zuyu. Stability analysis of soil slopes—theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))
- [3] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.(PAN Jiazheng. Analysis of building's stability against sliding and landslide[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980.(in Chinese))
- [4] 何江达, 范景伟, 张建海. 百色 RCC 重力坝坝基稳定性数值模拟研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1999, 3(6): 1 - 7, 12.(HE Jiangda, FAN Jingwei, ZHANG Jianhai. Numerical study of Baise RCC gravity dam foundation[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science), 1999, 3(6): 1 - 7, 12.(in Chinese))

- [5] 郑颖人, 赵尚毅. 边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 937 - 1 940.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Discussion on safety factors of slope and landslide engineering design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 937 - 1 940.(in Chinese))
- [6] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671 - 689.
- [7] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Géotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [8] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626 - 628.(ZHENG Hong, LI Chunguang, LEE C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626 - 628.(in Chinese))
- [9] 葛修润, 任建喜, 李春光, 等. 三峡左厂 3[#]坝段深层抗滑稳定三维非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 389 - 394.(GE Xiurun, REN Jianxi, LI Chunguang, et al. 3D-FE analysis of deep sliding stability of dam foundation of #3 left power house of the Three Gorges project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 389 - 394.(in Chinese))
- [10] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388. (in Chinese))
- [11] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique, 1955, 5(1): 7 - 17.
- [12] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [13] 唐春安, 李连崇, 李常文, 等. 岩土工程稳定性分析 RFPA 强度折减法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 522 - 1 530.(TANG Chun'an, LI Lianchong, LI Changwen, et al. RFPA strength reduction method for stability analysis of geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 522 - 1 530.(in Chinese))
- [14] 邹广电, 魏汝龙. 土坡稳定分析普遍极限平衡法数值解的理论及方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 363 - 370.(ZOU Guangdian, WEI Rulong. Study of theory and method for numerical solution of general limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 363 - 370.(in Chinese))
- [15] 郑宏, 田斌, 刘德富, 等. 关于有限元边坡稳定分析中安全系数的定义问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 225 - 2 230.(ZHENG Hong, TIAN Bin, LIU Defu, et al. On definition of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 225 - 2 230.(in Chinese))
- [16] WRIGHT S G, KULHAWY F G, DUNCAN J M. Accuracy of equilibrium slope stability analysis[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, 99(10): 783 - 791.
- [17] TAVENAS F, TRAK B, LEROUEIL S. Remarks on the validity of stability analyses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(1): 61 - 73.
- [18] CHUGH A K. Variable factor of safety in slope stability analysis[J]. Géotechnique, 1986, 36(1): 57 - 64.
- [19] 邵国建, 卓家寿, 章青. 岩体稳定性分析与评价准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 691 - 696.(SHAO Guojian, ZHUO Jiashou, ZHANG Qing. Research on analysis method and criterion of rock mass stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 691 - 696.(in Chinese))
- [20] 葛修润. 用 PC 型微机对岩体工程课题进行有限元分析[C]// 第一届全国计算岩土力学研讨会论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 1987: 74 - 85.(GE Xiurun. Finite element analysis of rock mass engineering by PC microcomputer[C]// Proceedings of the 1st National Symposium on Computational Rock and Soil Mechanics. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1987: 74 - 85.(in Chinese))
- [21] GE X R, FENG D X, GU X R, et al. Stability and deformation analysis of complex rock foundations of several large dams and hydropower stations in China[C]// YOSHINAKA R, KIKUCHI K ed. Rock Foundation: Proceedings of International Workshop on Rock Foundation. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 243 - 248.
- [22] 丰定祥, 吴家秀, 葛修润. 边坡稳定性分析中几个问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 1 - 9.(FENG Dingxiang, WU Jiaxiu, GE Xiurun. Some problems of slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 1 - 9.(in Chinese))
- [23] 沈珠江. 当前土力学研究中的几个问题[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(5): 1 - 8.(SHEN Zhujiang. Some considerations on recent research activities of soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(5): 1 - 8.(in Chinese))
- [24] 刘艳章, 王水林, 葛修润, 等. 高密度电法在三峡库区滑坡勘察中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 27(增 1): 519 - 523.(LIU Yanzhang, WANG Shuilin, GE Xiurun, et al. Application of high density resistivity method to landslide survey in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Supp.1): 519 - 523.(in Chinese))
- [25] 张超然, 戴会超. 三峡工程建设中若干重大技术问题的突破[J]. 中国工程科学, 2003, 5(2): 20 - 25.(ZHANG Chaoran, DAI Huichao.

- Technical breakthroughs in the construction of TGP[J]. Engineering Science, 2003, 5(2): 20 - 25.(in Chinese))
- [26] 王家柱. 三峡工程及其几个岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 597 - 602.(WANG Jiazhu. The Three Gorges Project and several rock mechanical problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 597 - 602.(in Chinese))
- [27] DAI H C. Some rock and soil mechanical issues in TGP construction[J]. Engineering Science, 2004, 2(3): 65 - 73.
- [28] 刘建, 冯夏庭, 张杰, 等. 三峡工程左岸厂房深层抗滑稳定的物理模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 993 - 998.(LIU Jian, FENG Xiating, ZHANG Jie, et al. Physical modeling on stability against sliding for left powerhouse dam of the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 993 - 998.(in Chinese))
- [29] 马良筠. 用试验验证抗滑稳定计算新方法[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 113 - 115.(MA Liangyun. Verification of a new calculation method for anti-slip stability by experiments[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(3): 113 - 115.(in Chinese))
- [30] 水利部长江水利委员会. 三峡大坝左厂 1[#]~5[#]坝段深层抗滑稳定综合分析报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 1997.(Changjiang Water Resources Commission, the Ministry of Water Resources of the Peoples Republic of China. Analysis report of dam section #1 - #5 deep sliding stability of left powerhouse of the Three Gorges Project[R]. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, the Ministry of Water Resources of the Peoples Republic of China, 1997.(in Chinese))
- [31] 清华大学. 三峡左岸厂房坝段深层抗滑稳定分析小结[R]. 北京: 清华大学, 1998.(Tsinghua University. Summary of deep stability analyses of left powerhouse of the Three Gorges Project[R]. Beijing: Tsinghua University, 1998.(in Chinese))
- [32] 中国水利水电科学研究院. 三峡工程 3[#]坝段 3 种滑移模式的稳定分析[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.(China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Stability analyses with 3 sliding modes of No.3 dam foundation of the Three Gorges Project[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2000.(in Chinese))
- [33] 任青文, 余天堂, 马良筠. 三峡大坝左厂 3 号坝段稳定性的数值分析和试验研究[J]. 中国工程科学, 1999, 1(3): 41 - 45.(REN Qingwen, YU Tiantang, MA Liangyun. Numerical analysis and experiment study of stability for dam section No.3 of the Three Gorges Project[J]. Engineering Science, 1999, 1(3): 41 - 45.(in Chinese))
- [34] 清华大学. 三峡水电站左岸 1[#]~5[#]厂房坝段二维及三维应力分析[R]. 北京: 清华大学, 1997.(Tsinghua University. 3D and 2D stress analyses of dam foundation No.1 - 5 of left powerhouse of the Three Gorges Project[R]. Beijing: Tsinghua University, 1997.(in Chinese))
- [35] 上海交通大学, 中国科学院武汉岩土力学研究所. 三峡工程左厂 1[#]~5[#]坝段深层抗滑稳定有限元分析研究[R]. 上海: 上海交通大学, 2002.(Shanghai Jiaotong University, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Finite element analysis of deep sliding stability of dam foundation #1 - #5 of the Three Gorges Project's left powerhouse[R]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2002.(in Chinese))
- [36] 葛修润, 任建喜, 李春光, 等. 三峡左厂 3[#]坝段深层抗滑稳定三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 389 - 394.(GE Xiurun, REN Jianxi, LI Chunguang, et al. 3D-FE analysis of deep sliding stability of dam foundation #3 of left power house of the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 389 - 394.(in Chinese))
- [37] 任建喜, 李春光, 葛修润. 结构面按薄层单元模拟的三峡左厂 3[#]坝段安全系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1066 - 1072.(REN Jianxi, LI Chunguang, GE Xiurun. Study on safety factor of dam foundation #3 of left power house of Three Gorges Project using slice joint element[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1066 - 1072.(in Chinese))
- [38] 丁秀丽, 盛谦, 徐平. 三峡大坝左厂 2[#], 3[#], 4[#]坝段坝基稳定性数值分析[C]// 陆培炎, 史永胜编. 第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 广州: 广东科技出版社, 1998: 231 - 237.(DING Xiuli, SHENG Qian, XU Ping. FE analysis on stability of the dam foundation of the left band power unit No.2, 3 and 4 in Three Gorges Project[C]// LU Peiyan, SHI Yongsheng ed. Proceedings of the 6th National Symposium on Numerical Analysis and Analytical Method in Rock and Soil Mechanics. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998: 231 - 237.(in Chinese))
- [39] 长江水利委员会三峡勘测研究院. 三峡工程施工阶段左厂 1[#]~5[#]机坝段抗滑稳定条件深化研究[R]. 宜昌: 长江水利委员会三峡勘测研究院, 2000.(Survey Institute of Three Gorges, Changjiang Water Resources Commission. Detailed study on sliding stability conditions of #1 - #5 dam foundation of left powerhouse of the Three Gorges Project during construction[R]. Yichang: Survey Institute of Three Gorges, Changjiang Water Resources Commission, 2000.(in Chinese))
- [40] SEO Y K. Computational methods for elasto-plastic slope stability analysis with seepage[Ph. D. Thesis][D]. Iowa: The University of Iowa, 1998.