

非线性强度下的边坡稳定性

王建锋

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘要: 解释土体强度非线性的物理本质, 结合常规直剪试验、三轴试验结果, 给出了几个非线性强度准则的确定方法, 其中, 强调优化处理的作用。接着, 基于 Janbu 普遍条分法, 运用 SPREADSHEET 模板程序, 提出一个能将非线性强度准则逐点等效到 Mohr-Coulomb 直线强度准则处理上的迭代方法, 准确方便地获得了非线性强度下的边坡稳定性分析。最后的算例展示方法的使用过程。

关键词: 边坡工程; 非线性强度准则; 边坡稳定性; 普遍条分法; SPREADSHEET 模块; 最优化

中图分类号: TD 827.4

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5896 - 05

SLOPE STABILITY ANALYSIS WITH NONLINEAR FAILURE ENVELOPES

WANG Jian-feng

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: The nonlinearity of shearing resistance in soil could be explained as “interlocking” or “dilatancy”. The dilatancy is generally stress level dependent and it lies on the stress range of interest in particular problems, especially for slope stability. Based on such a concept, analytical expressions for the nonlinear failure envelopes in terms of effective stresses are critically reviewed. They are classified in three major groups as power type, parabolic type, and hyperbolic type. The nonlinear failure envelopes can be obtained from routine laboratory shear test and triaxial test by optimization technique using commonly used SPREADSHEET software, and then they can be used in limit equilibrium, stress-stain analyses, and the development of the constitutive models as better approximation than the classical linear relation. On the base of Janbu’s generalized procedure of slice(GPS), an iterative method that incorporated several nonlinear failure envelopes in the SPREADSHEET setup by the authors is presented. The basic principle is to transfer equivalently the shearing resistance of each point on the concerned nonlinear envelope to the Mohr-Coulomb linear relation that is tangent to the nonlinear envelope with relevant cohesive and frictional parameters. Finally, an example is resolved to show the methodology that how the iterative technique is used.

Key words: slope engineering; nonlinear failure envelope; slope stability; generalized procedure of slice(GPS); SPREADSHEET template; optimization

1 引言

迄今为止, 边坡稳定性分析中广泛使用 Mohr-

Coulomb 直线强度准则, 然而, 试验清楚表明对于几乎所有土类, 破坏包络线均呈现曲线状^[1]。尤其是边坡稳定性分析所涉及的低应力范围内, 强度非线性特征更加明显。虽然有少量研究探讨如何在边

收稿日期: 2004 - 05 - 07; **修回日期:** 2004 - 07 - 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40372126); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2 - 5W - L1); 国家重点基础研究规划(973)项目(2002CB412703)

作者简介: 王建锋(1964 -), 男, 博士, 1997 年于中国地质大学获博士学位, 现任副研究员, 主要从事边坡稳定、概率岩土工程等方面的研究工作。
E-mail: wangjf@imech.ac.cn.

坡稳定性分析中耦合非线性强度准则，但都限于极其简单的圆弧滑动分析^[2~7]，尚不能达到广泛的实用，尤其是如何在通用的“精确”条分法中，耦合非线性强度准则仍然是尚未解决的问题。文[8]曾预计，不远的将来非线性强度准则将代替目前广泛使用的、物理意义不明确的 Mohr-Coulomb 准则。

为此，本文首先建议几个非线性强度准则的确定方法，接着提出了一个能将非线性强度准则逐点等效到 Mohr-Coulomb 直线强度准则处理上的迭代方法，以期获得非线性强度下的边坡稳定性分析。

2 非线性强度包络线的确定

土体表现出的非线性强度性质的原因，主要归于剪胀速率的不均匀性，剪切带中土颗粒相互接触和挤压所造成的破损，以及随着滑动进行在滑动带中所产生的各种软化效应，如细粒化效应、滚轴效应等。为了描述滑动带强度特征，土力学领域已经提出了多种土体非线性强度准则，如幂、抛物线、双曲线等关系^[5]。

一般来说，不同的滑动带其物质组成、结构构造均有较大差别，因此，对于具体场地的土体类型其合适的强度准则必须借助于较多的试验才能确定。判定所建立的非线性强度准则是否合理，其基本标准是在其滑动带可能遇到的应力范围内是否有效，以及准则的物理意义是否明确。

目前，确定土强度的常规土工试验是直剪试验和三轴试验。本文结合这两类试验方案，以及常用的几种非线性破坏准则，提出运用常规试验资料确定非线性强度准则的基本方法。

2.1 直剪试验方法

土体破坏时剪切面上的剪应力 τ_f 与法向有效应力 σ'_n 通常可呈现幂函数关系，

$$\tau_f = A(\sigma'_n)^b \tag{1}$$

式中：无量纲参数 b 规定了曲线的弯曲程度；参数 A 为比例系数，这一准则最早由 Charles 提出^[1, 3]。

类似地，文[6]提出了如下 2 个修正的幂型破坏准则，即

$$\tau_f = m(\sigma'_n)^r + q \tag{2}$$

$$\tau_f = m_1(\sigma'_n + q)^r \tag{3}$$

式中： m, m_1, q, r 均为常数。

上述两类准则均可通过普通直剪试验结果直接由数据拟合得到，唯一需要注意的是试验的精细设计。运用通用的 SPREADSHEET 模板程序，可方便实现这一拟合过程。

对于正在活动的滑坡而言，尤其是古滑坡的复活，文[5, 6]提出另外一类准则，能更好反映滑坡机制。这一准则认为剪切带摩擦角与有效正应力之间呈双曲关系(如图 1 所示)：

$$\varphi' = \varphi'_B + \frac{\Delta\varphi'}{1 + \frac{\sigma'_n}{p_N}} \tag{4}$$

其中，

$$\varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_f}{\sigma'_n}\right) \tag{5}$$

式中： φ'_B 为基本摩擦角，也可理解为残余内摩擦角； $\Delta\varphi'$ 为峰残内摩擦角间的最大差； p_N 为峰残内摩擦角的均值对应的法向有效应力。

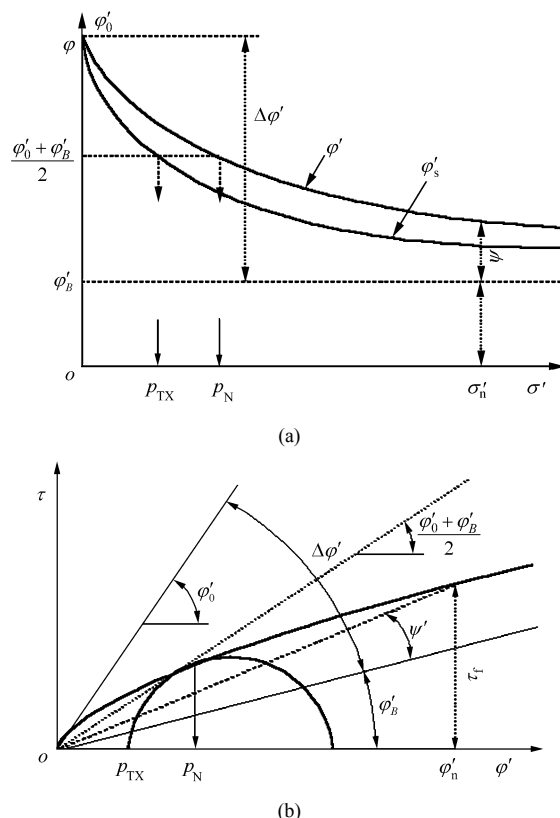


图 1 剪切带内摩擦角的双曲模型
Fig.1 Variation of secant angle of shearing resistance φ' assuming holding a hyperbolic type

这一准则运用的关键是如何获得 p_N ，可以运用一些数值方法得到^[9]。一般地，经过精细试验可以获得 $\tau - \sigma'_n$ 关系曲线，其中低应力区中曲线的拐点

即对应 p_N ，而峰残内摩擦角则较易得到。

更一般地，这一准则可表示为

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \left(\varphi'_B + \frac{\Delta\varphi'}{1 + \frac{\sigma'_n}{p_N}} \right) \quad (6)$$

2.2 三轴试验方法

同上述的直剪试验，运用三轴试验同样可方便得到双曲线准则(见图 1):

$$\varphi'_s = \varphi'_B + \frac{\Delta\varphi'}{1 + \frac{\sigma_3}{p_{TX}}} \quad (7)$$

其中，

$$\varphi'_s = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \quad (8)$$

上述直剪试验和三轴试验双曲线模型，实际上反映了剪切带由峰值强度演化为残余强度的一般过程。其内摩擦角典型地由两部分组成，第一部分对应于体积不变情况下的摩擦角 φ'_B ；第二部分包含了 $\Delta\varphi'$ ，主要是粒状土的最大剪胀效应的贡献，其用来描述强度的非线性特征，因而更具一般意义。

式(4)，(7)中的中值摩擦角 $(\varphi'_0 + \varphi'_B)/2$ 或 $(\varphi'_0 + \varphi'_s)/2$ 对应的应力水平间存在如下解析关系:

$$p_N = p_{TX} \frac{\cos^2 \left(\varphi'_B + \frac{\Delta\varphi'}{2} \right)}{1 - \sin \left(\varphi'_B + \frac{\Delta\varphi'}{2} \right)} \quad (9)$$

此关系有助于数据转换并将非线性准则用于不同数值计算中，如非线性强度下有限元计算。

如图 2 所示，Zambrano-Mendoza 提出了直接运用三轴试验数据获得强度包络线的“变量误差”分析方法^[10]。其基本假定是包络线或呈抛物线、或呈双曲线，即

$$\tau_f = \sqrt{\theta_0 + \theta_1 \sigma'_n} \quad (10)$$

$$\tau_f = \sqrt{\theta_0 + \theta_1 \sigma'_n + \theta_2 (\sigma'_n)^2} \quad (11)$$

利用由 Mohr 圆圆心到包络线上切点的连线垂直该点切线，将此问题转化为求图 2 中距离 d_1 ， d_2 的目标函数为最小的无约束优化问题，求控制变量 θ_0 ， θ_1 和 θ_2 。这一方法是由三轴试验数据获得强度包络线的理想途径。

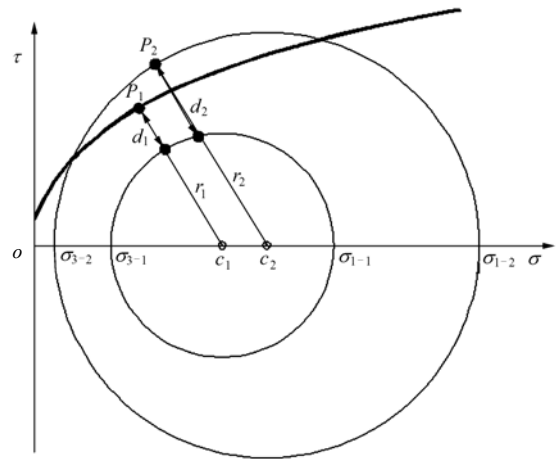


图 2 由三轴试验数据获得非线性强度包络线方法
Fig.2 Error-in-variables approach applied to failure envelope determination in Mohr space

3 非线性强度下的边坡稳定性

在低应力范围内，滑动面强度主要取决于破坏面上的法向应力水平，非线性强度包络线能够描述这一关系。当要根据已有破坏事例反算滑动面上的强度参数时，也必须考虑这一非线性关系才为合理。通常，所反演的 Mohr-Coulomb 直线强度准则中的参数 c ， φ 实际上都是对应于某特定法向应力水平的精确值，很显然将这一数值用于滑动面法向应力水平不同的边坡加固设计将是缺乏依据的。

区别于以往将非线性强度准则直接代入 Bishop 平衡方程的繁琐做法，借助于 Janbu 普遍条分法^[11,12]，这里采用将不同法向应力水平上的剪切强度逐点等效到 Mohr-Coulomb 强度线上并反复迭代的方法(见图 3)，方便快速地获得了边坡稳定性分析中的非线性强度准则耦合。其具体方法如下:

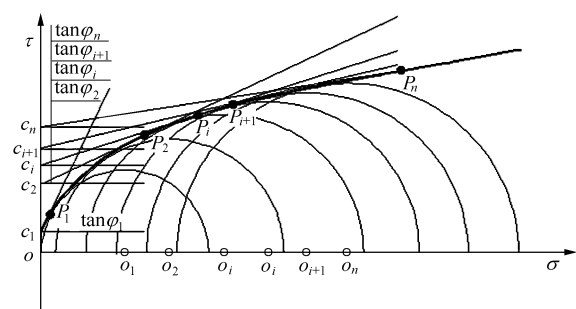


图 3 非线性强度逐点等效到 Mohr-Coulomb 强度线的方法
Fig.3 Schematic diagram of equivalently transferring of nonlinear shearing resistance to Mohr-Coulomb linear relation

(1) 初始地, 利用 Mohr-Coulomb 直线强度参数, 借助于 Janbu 普遍条分法(GPS)计算每个条块底面上的有效法向应力 σ'_n ;

(2) 以幂次准则式(1)为例, 用此 σ'_n 代入下式逐点计算 $\tan \varphi'_i$ 及 c'_i , 即

$$\tan \varphi'_i = Ab(\sigma'_n)^{b-1} \tag{12}$$

$$c'_i = A(\sigma'_n)^b - \sigma'_n \tan \varphi'_i \tag{13}$$

(3) 将上述 $\tan \varphi'_i$ 及 c'_i 代入 Janbu 平衡方程(通过 Janbu 的两重迭代), 以求得稳定系数 F_s 的第一个估算值;

(4) 用此 F_s (通过 t 值耦合在 σ'_n 中)计算每一条块底部的新的 σ'_n 值;

(5) 以新的 σ'_n 值, 按上述步骤(2)计算新的 $\tan \varphi'_i$ 及 c'_i 值;

(6) 以新的 $\tan \varphi'_i$ 及 c'_i 值, 计算新的稳定系数 F_s ;

(7) 如果第一次稳定系数与第二次稳定系数间差值大于 0.000 001, 返回到步骤(4), 用第二次稳定系数作输入, 重复上述计算, 直到收敛为止。

上述过程在 SPREADSHEET 中, 运用迭代运算技巧可方便实现。

4 算例

三峡库区云阳塞坝滑坡区内的崩滑堆积物平台前缘发育一次生滑坡, 称谓“柏杨湾次级滑坡”(图 4)。滑坡分布高程 290~355 m, 纵向长 270 m, 宽约 85 m, 平面呈长条状, 分布面积 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^2$, 体积 $28 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ m}^3$, 由粘土夹碎石、块石、大孤石组成, 结构松散。其成因为平台后缘土体边坡解体变形破坏堆积而成, 因滑坡发生时的分异作用, 前缘多大块石和大孤石, 后缘以粉质粘土夹碎石、碎块石为主。

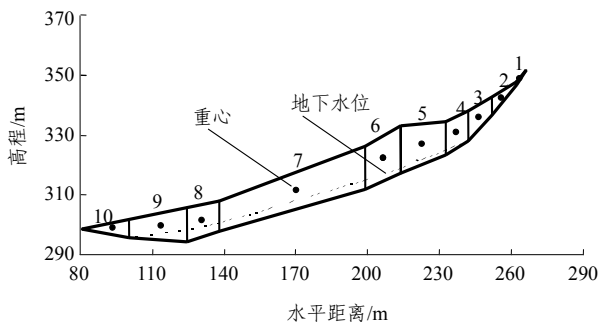


图 4 柏杨湾次级滑坡计算剖面

Fig.4 Boyangwan landslide of the Three Gorges Region in Yunyang county

滑坡前缘(见图 5)进行了 3 组 9 个试样的大剪试验^[13], 试验结果见图 6, 其中给出了直线型和幂次型强度拟合。现场重度试验结果为: 天然重度 $\gamma_n = 21.4 \text{ kN/m}^2$, 饱和重度 $\gamma_s = 22.5 \text{ kN/m}^2$ 。工程建议安全系数为 1.15~1.05。

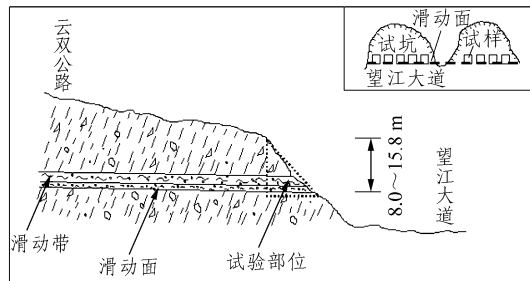


图 5 滑坡前缘滑动面原位大型剪切试验部位示意

Fig.5 Schematic section of in-situ shear test of Boyangwan landslide

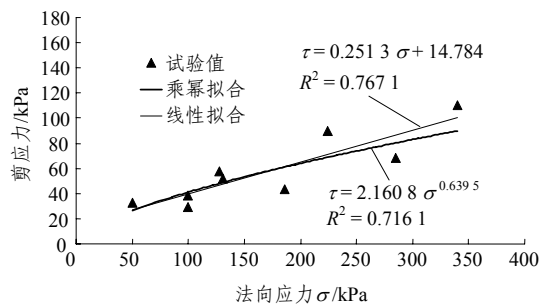


图 6 法向应力与剪切应力关系

Fig.6 Large scale in-site shear test results on the slip surface of Boyangwan landslide

计算结果表明, 原有滑坡在各种不同工况下的稳定性均不能满足要求(表 1), 需要整治。运用直线型、幂次型破坏准则, 计算结果大约差 8%, 即直线型准则高估了滑坡的稳定性。

表 1 稳定性计算结果

Table 1 Calculated results with linear and nonlinear failure envelopes using Janbu GPS method

工况	工况条件	建议安全系数	稳定系数 F_s		
			直线型准则	幂次型准则	误差/%
1	①+②	1.15	1.078 9	1.001 3	7.20
2	①+②+③	1.15	1.070 9	0.987 8	7.76
3	①+②+③+④	1.15	1.058 9	0.968 9	8.50
4	①+②+③+④+⑤	1.02	0.883 5	0.809 9	8.32

注: (1) “工况条件”中: ①为天然地下水位, ②为自重, ③为暴雨地下水位(按饱和重度计), ④为建筑外载(按 20 kN/m 计), ⑤为地震(V 度, $a = 0.05g$); (2) “工况”中: 暴雨地下水位取埋深为 2~3 m。

一般地, Mohr-Coulomb 直线强度准则都高估了

滑坡的稳定性,对于大型深厚滑坡体更是如此。高估的量值随具体滑坡而异,就本文中小型滑坡而言,差值可达8%,与稳定性分析中的各种引入误差^[14]相比已经是不小的量值,因此非线性强度准则引入的意义已经十分重要了。

5 结 论

土体强度非线性的物理本质可以归结于剪胀性。就此而言,无粘性土的非线性将更加明显。通过土工常规直剪试验、三轴试验,结合优化算法和广为使用的 SPREADSHEET,可以准确方便地获得土体非线性解析表达式。对于三轴试验,以待求包络线与 Mohr 圆间的距离为目标函数,可以方便优化地得到不同类型的强度包络线。运用此强度非线性解析关系,将滑动面上不同法向应力水平上的剪切强度逐点等效到 Mohr-Coulomb 强度线上并反复迭代,可以方便快速地获得非线性强度下的边坡稳定性。

参考文献(References):

- [1] Charles J A. Correlation between laboratory behaviour of rockfill and field performance with particular reference to Scammonden Dam[Ph. D. Thesis][D]. London: University of London, 1973.
- [2] Charles J A, Soares M M. Stability of compacted rockfill slopes[J]. Geotechnique, 1984, 34(1): 61 - 70.
- [3] Charles J A, Watts K S. The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill[J]. Geotechnique, 1980, 30(4): 353 - 367.
- [4] Charles J A, Soares M M. The stability of slopes in soils with nonlinear failure envelopes[J]. Can. Geotech. J., 1984, 21: 397 - 406.
- [5] Maksimovic M. Nonlinear failure envelope for soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(4): 581 - 586.
- [6] Maksimovic M. Limit equilibrium for nonlinear failure envelope and arbitrary slip surface[A]. In: The Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics[C]. Aachen: [s. n.], 1979. 769 - 777.
- [7] Lo K Y, Lee C F. An evaluation of the stability of natural slopes in plastic Champlain clays[J]. Can. Geotech. J., 1974, 11(1): 165 - 181.
- [8] Maksimovic M. New description of the shear strength for rock joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992, 25(4): 275 - 284.
- [9] Maksimovic M. A family of nonlinear failure envelopes for non-cemented soils and rock discontinuities[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 1996, (1): 1 - 62.
- [10] Zambrano M O, Valko P P, Russell J E. Error-in-variables for rock failure envelope[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 137 - 143.
- [11] Janbu N. Slope stability computation[A]. In: Embankment-dam Engineering, Casagrande Volume[C]. [s. l.]: Krieger Pub. Co., 1987. 47 - 86.
- [12] Low B K, Tang W H. Probabilistic slope analysis using Janbu's generalized procedure of slices[J]. Computer and Geotechnics, 1997, 21(2): 21 - 142.
- [13] 长江科学院重庆岩基研究中心实验室. 三峡库区云阳县新城塞坝滑坡原位直剪试验报告[R]. 重庆: 长江科学院重庆岩基研究中心实验室, 2002.(Test Center for Chongqing Rock Foundation, Yangtze River Scientific Research Institute. Consulting report: In-situ shear test to Zhaiba landslide, Three Gorges Reservoir[R]. Chongqing : Test Center for Chongqing Rock Foundation, Yangtze River Scientific Research Institute, 2002.(in Chinese))
- [14] USA National Research Council. Probabilistic methods in geotechnical engineering[A]. In: Committee on Reliability Methods for Risk Mitigation in Geotechnical Board on Energy and Environmental Systems Commission on Engineering and Technical Systems[C]. [s. l.]: [s. n.], 1995. 8 - 35.