

doi:10.3799/dqkx.2013.019

条块间作用力倾角的假定及其对条分法计算结果的影响

苏爱军¹, 王建^{2,3}, 周涛³

1. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

2. 中国煤炭科工集团武汉设计研究院, 湖北武汉 430064

3. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 以猴子石滑坡为例, 利用数值模拟方法, 计算了滑坡条块间作用力倾角. 对比分析了半精确条分法中传递系数法、罗厄法、美国陆军工程师团法、简化的简布法及实用递推法所确定的条块间作用力倾角与数值模拟值计算结果的差别. 讨论了半精确条分法关于条块间作用力倾角的假定对滑坡稳定系数计算精度的影响, 并与精确条分法的计算结果和基于数值模拟值的条块间作用力倾角所计算的力的平衡条件下的稳定系数进行了比较. 详细论证了现行主要半精确条分法的精度与适用性.

关键词: 条分法; 滑坡; 数值模拟; 稳定系数; 工程地质.

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2013)01-0188-07

收稿日期: 2012-02-20

Assumption of the Slices' Force Dips and Its Effect on Results Calculated by Slice Method

SU Ai-jun¹, WANG Jian^{2,3}, ZHOU Tao¹

1. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Wuhan Design & Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430064, China

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The dips of slices' force were determined by numerical simulation method by taking Monkey Stone landslide the study subject in this paper. The differences between the dips calculated by numerical simulation and those determined by the semi-precise slice method including the transfer coefficient method, Rohre law, the U. S. Army Corps of Engineers, simplified method and practical recursive method were analyzed. The effect of assumption of the slices' force dips based on semi-accurate slice method on the accuracy of landslide stability coefficient was discussed, and the results calculated by accurate slice method were compared with those calculated by numerical simulation. The study proves the accuracy and applicability of those current major semi-precision slice methods.

Key words: slice method; landslide; numerical simulation; stability coefficient; engineering geology.

以满足条块和整体静力平衡为条件, 假定条块间作用力方向满足某种函数关系, 求得稳定系数的条分法是半精确条分法的一个重要类型. 此类方法原理清楚, 计算简单, 特别是给定安全系数后能很方便地求得防治工程所需要的抗滑力, 被广泛地用于边坡和滑坡稳定性计算和工程防治. 自滑坡后缘至前缘条块间作用力方向究竟如何, 目前基本上是以各种假定为前提, 以方便求得稳定系数. 但从理论上还是实际监测方面, 如何确定条块间作用力方

向, 其研究程度还很不够.

Morgenstern and Price(1967)研究了不同条分方法, 最早提出了条块间作用力假定合理性限制必要条件: (1) 条块间不产生拉力; (2) 作用于土条界面上的剪力不超过按摩尔-库仑法则提供的抗剪强度(陈祖煜, 2003). 事实上, 在滑动面倾角较陡时, 常用的传递系数法、罗厄法就不满足作用于土条界面上的剪力不超过按摩尔-库仑法则提供的抗剪强度的必要条件.

基金项目: 国家“973”计划项目(No. 2011CB710600).

作者简介: 苏爱军(1962—), 男, 教授, 长期从事地质灾害防治研究和水利水电工程地质勘察研究. E-mail: aijun318@vip.sina.com

Duncan(1996)和 Duncan and Wright(1980)曾指出:仅使用静力平衡的方法(半精确条分法)的结果对所假定的条间力方向极为敏感,条间力方向假定不合适将导致所计算的稳定系数严重偏离正确值.因此,条块间作用力方向的假定准确性就决定了各种半精确条分法的精度.为此,本文以三峡库区奉节县猴子石滑坡为例,在忽略条块变形的情况下,通过数值模拟方法计算出条块间的作用力倾角并从以下 3 个方面对半精确条分法进行讨论:(1)现行主要半精确条分法关于条块间作用力方向的假定与条块间作用力实际方向的差异;(2)条块间作用力方向不同假定对半精确条分法精度的影响;(3)现行主要半精确条分法的精度与适用性.

1 条块间作用力方向与主要半精确条分法的假定比较

1.1 猴子石滑坡

奉节县猴子石滑坡为基岩切层古滑坡,位于三峡库区长江左岸,重庆市奉节新县城城区的三马山小区前缘临江地带,南抵长江河床,前缘高程 100 m,后缘高程 256 m,南北长约 372 m,东西宽 320~420 m,滑坡平面呈扇形,面积 $12.19 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均堆积厚度约 37 m,最厚处 66 m,体积约 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$.剖面上滑动面为前缓后陡的弧形,地表陡坡平台相间分布.

受三峡水库蓄水影响,滑坡一旦失稳将直接威胁奉节新县城城市基础设施及居民生命财产安全,并破坏城市功能完整性,严重影响当地社会稳定与经济发展.为此,国家拨款近 1.5 亿元人民币对其进行了专项勘查和治理.猴子石滑坡主要物理力学参数如表 1.

表 1 滑坡及滑床岩土体物理力学参数设计建议值

Table 1 Recommended physical mechanical parameters of the landslide and sleigh bed

项目	密度		滑带土抗剪指标			弹性模量(GPa)	泊松比	抗拉强度(MPa)	体积模量(GPa)	剪切模量(GPa)			
	$\gamma_{\text{天然}}$ (kN/m ³)	$C_{\text{天然}}$ (kPa)	$\varphi_{\text{天然}}$ (°)	弹性模量(GPa)	泊松比						抗拉强度(MPa)	体积模量(GPa)	剪切模量(GPa)
	$\gamma_{\text{饱和}}$ (kN/m ³)	$C_{\text{饱和}}$ (kPa)	$\varphi_{\text{饱和}}$ (°)										
滑带土	23.0 23.5	35.0 23.0	23.4 20.7	0.026	0.34	0.005	0.027	0.010					
滑体(碎块石土)	23.0 23.5	60.0 50.0	28.0 25.0										
泥质粉砂岩、 粉砂质泥岩	25.3 25.6	1 700.0 1 400.0	47.0 42.0						6.500	0.25	0.050	5.600	2.800

* 原始数据来源于长江水利委员会综合勘测局内部资料(2002),苏爱军(2008).

1.2 数值模型

应用理想弹塑性模型和 Mohr-Coulomb 准则,基于 Flac3D 建立猴子石滑坡所在斜坡的数值模型.建模采用三维空间右手坐标系:沿剖面水平方向为 X 坐标,垂直剖面水平方向为 Y 坐标,垂直向上高程为 Z 坐标.设置水平方向 $X=0$ 、 $X=600$ 、 $Y=0$ 、 $Y=5$ 和 $Z=0$ 处位移边界.将斜坡岩土体划分为在 X 方向垂直平行、间距 3~4 m、高 2.5~3 m 的不对称四边形计算单元.猴子石滑坡滑体后缘和前缘 X 坐标为 81.85 m 和 454.17 m,按照间距基本相等的原则,考虑地形起伏变化,在滑体内沿 X 方向将剖面长约 372.32 m 的滑体划分为 20 个条块,每条块水平间距 18~20 m.同时将滑体中每一条块沿 X 方向划分 5 单元,沿 Z 方向划分 10 单元;滑带部分沿 X 方向划分 5 单元,沿 Z 方向为 1 单元.为求得滑坡体分条界面上的作用力,在滑体中条块分界处计算单元垂直边界与条块边界重合(图 1).

滑床岩体和滑体仅采用天然状态下的物理力学参数,对于滑带土分别采用天然状态和饱和状态下的物理力学参数进行了模拟计算.

1.3 条块间作用力的倾角

根据数值模型计算求得在给定的滑带土两种状态下,斜坡及滑坡体的应力分布状态(图 2).忽略计算单元变形的影响,将滑坡每个条块右边界上每个单元的沿 XX 水平正应力和 XZ 剪应力乘以相应单元边界面积后,累加求和,可大致得到每个条块对下一条块的垂直作用力和水平作用力.通过求解各条块分界面上垂直作用力除以水平作用力的正切的反函数,得到每个条块作用于下一条块的作用力的倾角(表 2).

从计算结果看,条块间作用力的倾角不仅与滑体和滑带的变形参数相关,而且在很大程度上受地

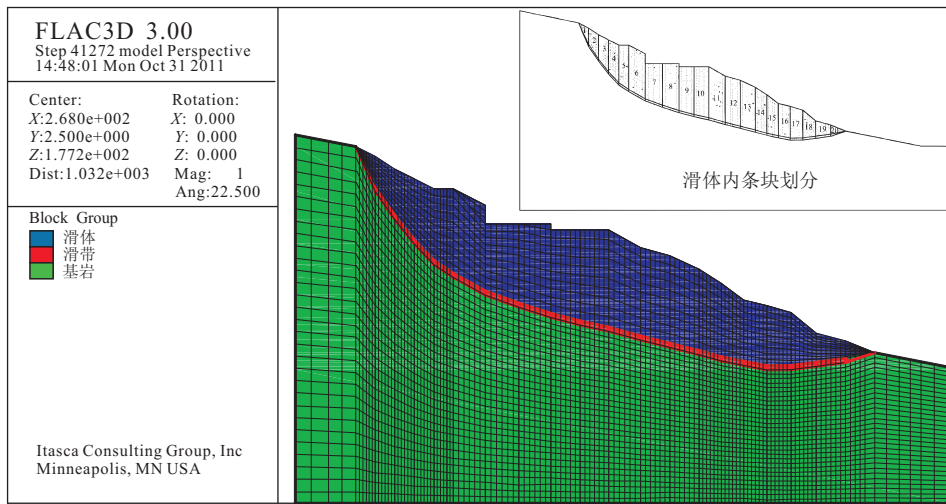


图 1 数值模拟单元划分与滑坡体条块模型

Fig. 1 Unit of numerical simulation and landslide slice model

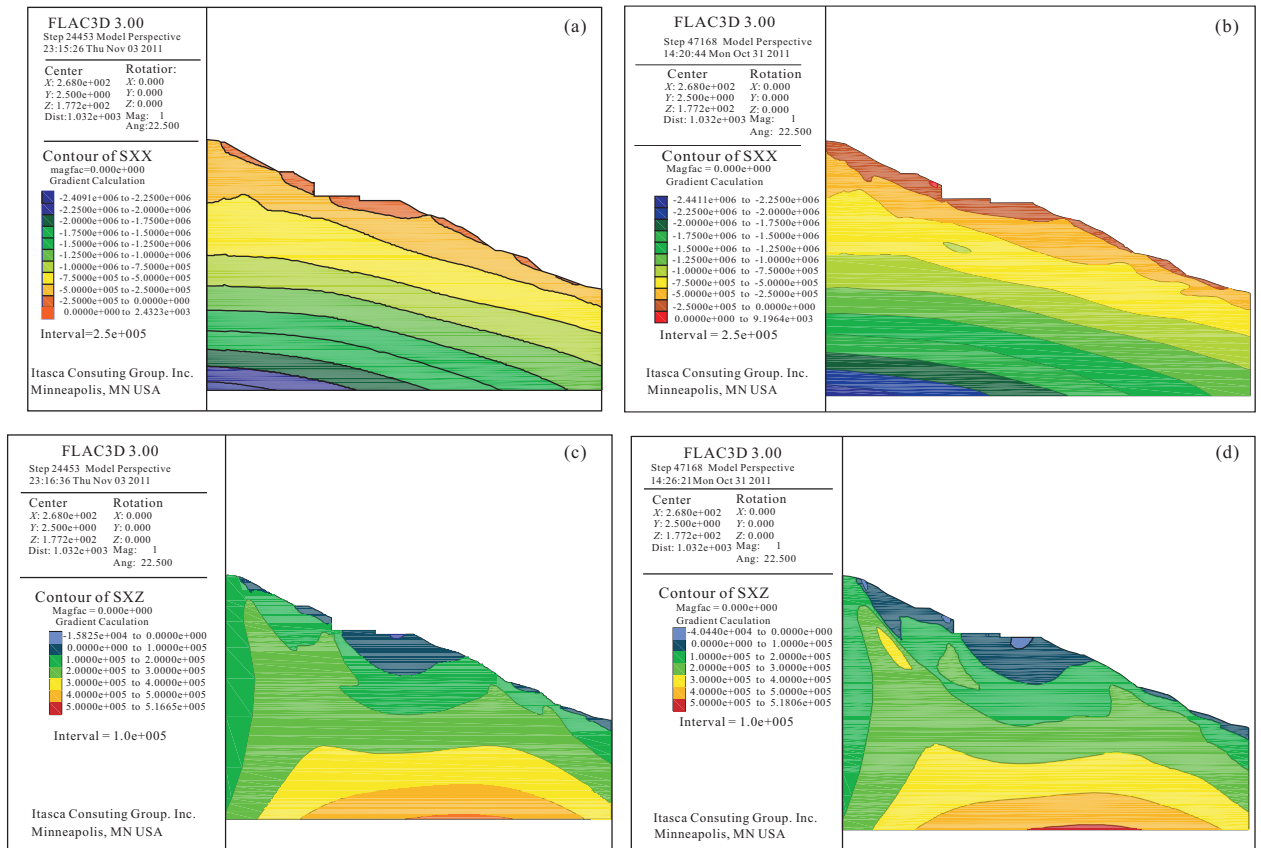


图 2 滑带土在天然和饱和状态下 XX 方向应力云图和 XZ 方向剪应力云图

Fig. 2 Stress contours of XX direction and XZ direction in natural state and saturated state

a. 滑带土天然状态下 XX 方向应力云图; b. 滑带土饱和状态下 XX 方向应力云图; c. 滑带土天然状态 XZ 方向剪应力云图; d. 滑带土饱和状态下 XZ 方向剪应力云图

表形态的影响. 条块相对滑带土天然状态, 由于给定的滑带土饱和状态下内摩擦角较低, 滑坡后缘第 1~5 条块间作用力倾角相应降低, 滑坡前缘第 16~20

条块间作用力倾角略有增大, 但其最大值遵循 Mohr-Coulomb 准则. 其他部位变化不明显. 此变化说明, 自然界中的滑坡随着各种不利因素增加、稳定

表 2 滑坡体条块间作用力的倾角($^{\circ}$)
Table 2 Dips of slices' force of the landslide

条块	滑带土天然状态下 数值模拟值	滑带土饱和状态下 数值模拟值	传递系数法	罗厄法	美军陆军工程 师团法	简化的简布法	实用递推法 (SU-U法)
1	23.17	12.74	64.41	45.50	21.66	0	20.43
2	24.55	13.02	55.29	44.28	21.66	0	21.32
3	23.81	16.52	51.26	38.83	21.66	0	21.54
4	23.12	18.91	46.50	36.64	21.66	0	21.66
5	23.30	20.54	33.36	16.68	21.66	0	21.22
6	23.65	22.00	28.97	38.35	21.66	0	20.82
7	14.87	12.82	19.74	9.87	21.66	0	19.59
8	12.21	10.79	17.74	14.05	21.66	0	19.26
9	10.48	9.49	14.68	7.34	21.66	0	18.70
10	13.13	12.11	12.27	6.14	21.66	0	18.23
11	16.28	15.43	15.34	22.21	21.66	0	18.83
12	19.74	18.90	14.05	14.74	21.66	0	18.58
13	23.21	22.29	14.04	19.42	21.66	0	18.58
14	24.57	23.87	15.56	24.02	21.66	0	18.87
15	23.75	23.54	11.28	23.98	21.66	0	18.02
16	22.65	23.41	11.00	12.25	21.66	0	17.96
17	24.42	25.20	-0.62	7.75	21.66	0	15.15
18	23.82	25.39	-7.38	15.99	21.66	0	13.22
19	19.97	23.35	-7.60	3.58	21.66	0	13.16

性不断降低,作用于滑体内后缘直立面上合力的倾角将减小;前缘为应力集中区,作用于直立面上合力的倾角增大。尽管因忽略单元变形影响滑坡条块间作用力倾角计算精度,但数值分析的结果仍然能大体上反映滑坡条块间作用力倾角的变化规律,且完全满足 Morgenstern and Price(1967)提出的条块间作用力假定合理性限制必要条件。

2 条块间作用力倾角的假定与数值模拟结果比较及其稳定性分析

2.1 条块间作用力倾角的假定与数值模拟结果比较

表 2 和图 3 分别是传递系数法、罗厄法、美国陆军工程师团法、简化的简布法(潘家铮, 1980)及实用递推法(苏爱军, 2008)所假定的条块间作用力的倾角和数值模拟得到的滑带土天然状态和饱和状态下条块间作用力倾角和对比曲线。采用皮尔逊相关系数(Pearson correlation)法和欧几里德距离(Euclidean distance)法,对传递系数法、罗厄法、美国陆军工程师团法、简化的简布法及实用递推法所假定的条块间作用力的倾角与数值模拟得到的滑带土天然状态和饱和状态下条块间作用力倾角之间的相关性进行了定量计算(表 3)。

由表 2、图 3 和表 3 可知:(1)传递系数法对条块间作用力倾角的假定与数值模拟计算结果偏离最大,滑动面较陡的滑坡后缘尤甚。其假定的条块间作用力倾角与数值模拟值的欧几里德距离,在滑带土剪切强度参数取低值(饱和状态)时达 99.62;在滑带土剪切强度参数取大值(天然状态)时仅比简化的简布化小,达 83.66。从相关系数看,二者相关性很小或负相关。由于滑坡前缘滑面反倾,甚至出现条块间作用力倾角小于零,即后一滑块超覆于前一滑块滑动的不合理情况。罗厄法所存在的问题与传递系数法是一样的,但由于考虑了地表形态变化对条块间作用力倾角的影响,缩小了传递系数法的偏离值。(2)美军陆军工程师团法和简化的简布法均假定条块间作用力的倾角为常数。美军陆军工程师团法的假定值为滑坡斜面坡度(即滑动面前后沿连线的倾角),近似于滑带土的平均内摩擦角(数值模拟计算的条块间作用力倾角值在该值上下波动)。尽管二者相关系数为零,但欧几里德距离是最小的(表 3),即二者的偏离值最小。而简化的简布法假定值为零,即条块间作用力为水平,远远偏离数值模拟计算结果。(3)实用递推法和美军陆军工程师团法的假定值与数值模拟值计算结果之间的欧几里德距离基本相等。虽然实用递推法考虑了滑动面倾角和滑带土内摩擦角对条块间作用力倾角的影响,但从相关系数来看,效果仍然不理想。

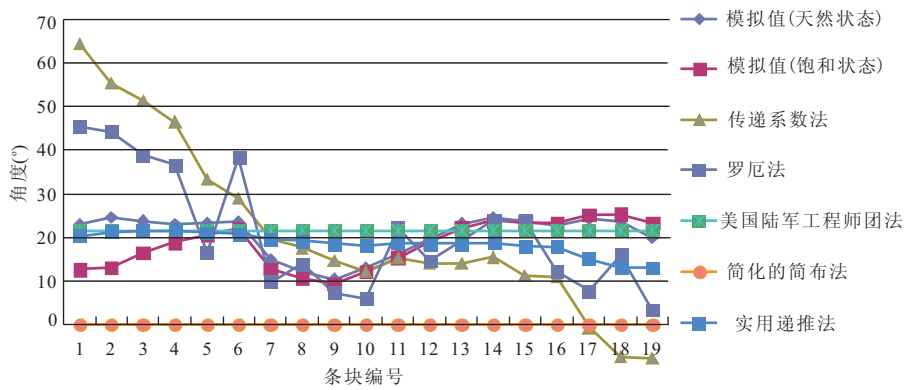


图 3 滑坡体条块间作用力倾角对比曲线

Fig. 3 Comparison of dips of slices' forces of the landslide

表 3 各条分方法与数值模拟法条块间作用力倾角欧式距离和相关系数对比

Table 3 Comparison of Euclidean distance and correlation coefficient of the slices' force dips between different slice methods and numerical simulation

滑带土状态	相关性	传递系数法	罗厄法	美军陆军工程师团法	简化的简布法	实用递推法
天然	欧式距离	83.66	49.33	20.52	91.83	23.75
	相关系数	0.24	0.53	0		0.03
饱和	欧式距离	99.62	64.69	26.69	83.51	29.43
	相关系数	-0.46	-0.11	0		-0.49

表 4 基于数值模拟值的条块间作用力倾角所计算的力的平衡条件下稳定系数与多种条分法的比较

Table 4 The comparison of stability coefficient calculated by accurate slice method and numerical simulation

滑带土状态	半精确条分法							精确条分法		
	采用数值模拟值计算	传递系数法	改进的传递系数法	罗厄法	美国陆军工程师团法	简化的简布法	实用递推法	精确递推法	斯宾赛法	摩根斯坦—陈法
天然	1.46	1.57	1.53	1.51	1.50	1.38	1.49	1.49	1.49	1.46
饱和	1.25	1.33	1.31	1.29	1.29	1.18	1.27	1.27	1.27	1.25

2.2 稳定系数对比分析

基于猴子石滑坡滑带土取天然状态下和饱和状态下的剪切强度参数,分别采用传递系数法、改进的传递系数法(苏爱军和冯明权,2002)、罗厄法、美国陆军工程师团法、简化的简布法、实用递推法和精确条分法中的精确递推法(苏爱军,2008)、斯宾赛法、摩根斯坦—陈法(陈祖煜,1983,2003)进行了稳定性计算(表 4)。

计算结果表明:(1)精确递推法、斯宾赛法和摩根斯坦—陈法所计算的稳定系数相差仅 0.08%~0.16%,其平均值为滑带土天然状态下 1.48,滑带土饱和状态下 1.26。基于数值模拟值的条块间作用力倾角所计算的力的平衡条件下的稳定系数比平均值小 0.08%~1.35%。(2)半精确条分法中,自传递系数法、改进的传递系数法、罗厄法、美国陆军工程师团法、实用递推法至简化的简布法,稳定系数逐渐

减小;计算结果最大的传递系数法比最小的简化的简布法大 11.3%~13.1%。(3)实用递推法与基于数值模拟值的条块间作用力倾角所计算的力的平衡条件下稳定系数最接近,二者相差小于 2.05%。

3 主要半精确条分法的适用性

半精确条分法关于条块间作用力倾角的各种假定与数值模拟计算结果均存在不同程度的差异,对滑坡稳定系数计算结果也具有一定影响,但当假定的条块间作用力倾角不超过 Morh-Coulomb 准则所允许的极限值时,其影响有限。

属于半精确条分法的美国陆军工程师团法,尤其是实用递推法,关于条块间作用力倾角的假定与数值模拟值较接近,因此所计算的稳定系数也相差

很小,且与精确条分法所计算的稳定系数平均值相差不超过2.3%,特别是实用递推法不超过1.0%。计算精度相当高,适应于各种条件下的滑坡稳定性计算。

传递系数法、改进的传递系数法和罗厄法关于条块间作用力倾角的假定与数值模拟计算结果相差较大,尤其是传递系数法和改进的传递系数法在滑坡后缘滑动面倾角较大时,所假定的条块间作用力倾角往往超过了Morh-Coulomb准则所允许的极限值,导致稳定性计算结果大于实际值,从而忽视了潜在安全隐患而偏于危险。如采用传递系数法、改进的传递系数法和罗厄法进行心墙土坝稳定性评价时,由于心墙与过渡料接触面为长而陡软弱面,往往成为潜在可能滑动面,就会出现很大一部分滑体所假定的条块间作用力倾角超过了Morh-Coulomb准则所允许的极限值的情况,从而导致计算结果在较大程度上大于实际稳定系数。

简化的简布法假定条块间作用力倾角为零,即只考虑水平作用力而不考虑垂直作用力,稳定性计算结果偏小,而趋于保守。上例中,简化的简布法所计算的稳定系数比精确条分法的计算稳定系数的平均值低约6.5%。

当滑动面倾角较小,且较平直时,上述半精确条分法稳定系数计算结果差别不大。如滑动面倾角 $<25^\circ$ 时,稳定系数差别不会超过10%。当滑动面为平面时,改进的传递系数法、美国陆军工程师团法、实用递推法稳定性计算结果完全相等,传递系数法和罗厄法略有差别,简化的简布法偏小。

4 结论

尽管因忽略单元变形影响滑坡条块间作用力倾角计算精度,但数值分析的结果仍然能大体上能反映出滑坡条块间作用力倾角的变化规律,且满足Morgenstern and Price(1967)提出的作用于土条界面上的剪力不超过按摩尔-库仑法则提供的抗剪强度的必要条件。稳定性计算的对比分析对此作了很好地诠释。因此,基于数值模拟计算得到的条块间作用力倾角比现有关于条块间作用力倾角更为合理,据此所计算的力的平衡条件下的稳定系数精度高。特别是用于计算滑坡防治工程设计的滑坡推力时,更科学和安全。

尽管如此,我们不可能对每个滑坡都采用数值模拟计算条块间的作用力倾角,然后基于静力平衡

计算稳定系数。实际应用时,笔者在大量数值模拟计算和统计分析基础上,建立了能较真实反映滑坡条块间的作用力倾角与滑坡斜面倾角、条块滑动面倾角和地表倾角的通用函数关系式,并将其代入力的平衡方程,得到了一个新的、精度高、较真实反映滑坡条块间的作用力倾角的条分法——SU法。限于篇幅,不再赘述。

现有半精确条分法关于条块间作用力倾角的相关假定均未有效考虑滑动面倾角和地形变化对条块间作用力倾角的影响(传递系数法、改进的传递系数法考虑了滑动面倾角的影响,但证明不准确;罗厄法考虑了滑动面倾角和地形变化的影响,但证明对滑动面倾角影响的考虑也不准确,对于地形变化的考虑也不够全面),只有在所假定的条块间作用力倾角满足Morh-Coulomb准则的条件下,各种方法稳定系数计算结果才相差不大。然而在进行防治工程设计时,由于所假定的条块间作用力倾角不同,在给定安全系数计算所求得的滑坡推力方向和大小差别较大,对防治工程设计经济合理性具有较大影响。

References

- Chen, Z. Y., 1983. The Generalized Method of Slice for Slope Stability Analysis and Its Modification. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 5(4): 11-27 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Y., Morgenstern, N. R., 1983. Extensions to the Generalized Method of Slices for Stability Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(1): 104-119. doi: 10.1139/183-010
- Chen, Z. Y., 2003. Principles Method and Program of Soil Slope Stability Analysis. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).
- Duncan, J. M., 1996. State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7): 577-596. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577)
- Duncan, J. M., Wright, S. G., 1980. The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis. *Engineering Geology*, 16(1-2): 5-17. doi: 10.1016/0013-7952(80)90003-4
- Morgenstern, N. R., Price, V., 1967. A Numerical Method of Solving the Equations of Stability of General Slip Surfaces. *Computer Journal*, 9(4): 388-393.
- Pan, J. Z., 1980. Sliding Stability of Buildings and Landslide Analysis. China Water Conservation Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Su, A. J., 2008. Principles and Methods of Slope Stability

Evaluation-Improvement of Slice Methods. China University of Geosciences Press, Wuhan(in Chinese).

Su, A. J. ,Feng, M. Q. ,2002. Improving on Transfer Coefficient Method Applied to Landslide Stability Analyse and Landslide Thrust Value Calculation. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 13(3):51-55(in Chinese with English abstract).

京:中国水利水电出版社.

陈祖煜,1983. 土坡稳定分析通用条分法及其改进. *岩土工程学报*,5(4):11-27.

潘家铮,1980. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析. 北京:水利出版社.

苏爱军,2008. 滑坡稳定性评价原理与方法——条分法的改进. 武汉:中国地质大学出版社.

苏爱军,冯明权,2002. 滑坡稳定性传递系数计算法的改进. *地质灾害与环境保护*,13(3):51-55.

附中文参考文献

陈祖煜,2003. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序. 北

热烈祝贺中国地质大学《地球科学学刊》(英文版) 入选首批高校科技期刊精品工程

近日,教育部科技司公布了首批高校科技期刊精品工程入选名单(教技司[2012]343号),《地球科学学刊》(英文版)名列其中. 此次入选精品工程的14种期刊全是被SCI-E收录的期刊,其中13种英文版,1种中文版.

高校科技期刊精品工程是教育部科技司于2012年2月启动的,目的在于培育一批高校自主品牌国际一流科技期刊,大力提升我国科技期刊的国际影响力,促进我国优秀科研成果的对外传播与交流. 经过主办单位推荐、专家评审,最终确定首批入选名单.

《地球科学学刊》(英文版)自2007年被SCI-E收录以来,在稿源国际化、编委国际化、审稿国际化等方面狠下功夫,采取了一系列举措,实现了快速发展. 该刊已经连续三届荣获教育部科技司“中国高校精品科技期刊”和“湖北省优秀期刊”称号.

《地球科学》编辑部