

DOI: 10.11779/CJGE202209022

## 对《“矢量和法”抗滑稳定计算模型的力学概念错误》一文的回应

郭明伟<sup>1</sup>, 李春光<sup>1</sup>, 刘艳章<sup>2</sup>, 吴振君<sup>1</sup>, 邓 琴<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)09-1760-03

作者简介: 郭明伟(1981—), 男, 河南商丘人, 副研究员, 主要从事边坡工程、深基础工程及计算岩土力学方面的研究。E-mail: mwguo@whrsm.ac.cn。

## Reply to “Mechanical concept errors in anti-sliding stability computational model of vector sum method”

GUO Ming-wei<sup>1</sup>, LI Chun-guang<sup>1</sup>, LIU Yan-zhang<sup>2</sup>, WU Zhen-jun<sup>1</sup>, DENG Qin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

论文《“矢量和法”抗滑稳定计算模型的力学概念错误》<sup>[1]</sup> (以下简称《质疑》)中, 质疑矢量和法计算模型的力学概念问题, 认为矢量和法计算模型力学概念错误。作为参与矢量和法研究的研究者, 笔者对《质疑》做以下回应。

### 1 关于矢量和法安全系数中法向应力对抗滑能力的贡献问题

边坡矢量和法以整个潜在滑体为研究对象, 其安全系数定义为坡体潜在滑面上提供的抵抗坡体滑动的合力矢与坡体在当前荷载作用下促使坡体滑动的合力矢分别在整体下滑方向上投影的比值(式(1))。这里抵抗坡体滑动的合力矢指的是对阻止坡体滑动有贡献的所有力的矢量和, 下滑合力指的是在当前荷载作用下对坡体滑动有贡献的所有力的矢量和。

矢量和法认为潜在滑体存在一个主滑方向 $d$ , 使得边坡的抗滑安全系数 $F$ 等于作用在滑面上的抗滑力矢在 $d$ 上的投影与下滑力矢在 $d$ 上的投影之比。二维情况下可将 $F$ 表示为

$$F = \frac{\int_l (s_n + s'_t) \cdot d dS}{\int_l (s_n + s_t) \cdot d dS} \quad (1)$$

式中 $l$ 为滑面;  $s_n = s_n n$ ,  $s'_t = s'_t \tau$ 和 $s_t = s_t \tau$ ;  $n$ 为单位外法线矢量,  $\tau$ 为单位切向量且与下滑方向一致;  $s_n$ 和 $s_t$ 为滑面微元上的法向应力和切向应力,  $s_n + s_t$ 为滑体作用在基岩微元体上的应力矢量,  $s'_t$ 为对应于 $s_n$ 的抗剪强度;  $d$ 称为主滑方向。以上解释可见图1。

需要指出的是这里采用了矢量形式, 但安全系数定义并无任何本质改变。另外, 式(1)中的分子和分母可理解为阻止

坡体滑动的合力矢量与驱动坡体滑动的合力矢量在主滑方向 $d$ 上的投影, 为了与传统土力学教材中边坡安全系数定义相一致, 这里也分别称为坡体抗滑力和下滑力。

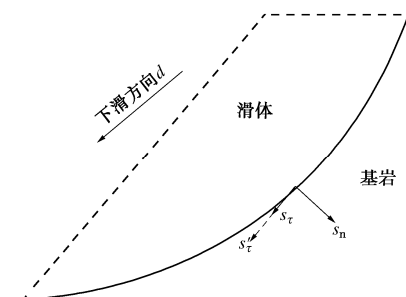


图1 矢量和法安全系数公式中定义的矢量

Fig. 1 Sketch of the vector of the safety factor in the vector sum method

现行《土力学》<sup>[2]</sup>及相关专业教材是按照下式来定义安全系数的:

$$F = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_i)}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

该定义是与条分法相关联的, 它将安全系数表示为各滑块抗滑力数值的代数和与下滑力数值的代数和之比。

但是, 定义(2)仅对直线或圆弧形滑移面有相应的物理意义: 对于直线型滑面, 各条块的抗滑力与下滑力皆平行于滑面方向, 可以对力的代数值进行求和; 对于圆弧形滑面, 式(2)所给出的安全系数可视为各条块的抗滑力矩之和与下滑力矩之和的比值。

收稿日期: 2022-03-02

对于非直线非圆弧滑面, 式 (2) 是没有物理意义的, 按照式 (2) 给出的安全系数与以 Spencer 法为代表的严格条分法所算得的安全系数相差巨大<sup>[3]</sup>。因严格条分法满足全部平衡条件, 且不同的严格条分法所算得的安全系数相差较小 (最大相差 12% 但通常小于 6%), 因此可认为严格条分法给出的安全系数比较可信<sup>[4]</sup>, 而所有严格条分法的安全系数都是基于强度储备概念的安全系数。

例如, 显式余推力法就是基于式 (2) 来计算安全系数的, 对于坡角反翘较大的边坡, 显式余推力法所算得的安全系数误差可达 40% 以上。正因如此, 显式余推力法已被《水利水电工程边坡设计规范》(SL386—2007)、《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013) 等剔除。

正是针对式 (2) 未考虑力的矢量特性, 基于边坡传统安全系数概念并力图使基于新定义所求得的安全系数与基于严格极限平衡法安全系数相一致、同时又避免像有限元强度折减法那样的迭代, 才提出了由式 (1) 所定义的安全系数。

《质疑》认为式 (1) 的分子和分母中不应出现法向应力  $s_n$ , 即

$$F = \frac{\int_L s'_t \cdot ddS}{\int_L s_t \cdot ddS}, \quad (3)$$

它强调了剪切效应是驱动下滑和阻止下滑的唯一因素。

笔者认为: 既然  $s_n$  实实在在地作用在滑体上, 它兼有驱动下滑和阻止下滑的双重作用, 那么为了客观反映它的效应, 为什么不能将其含在安全系数的定义中呢?

其实, 按照庞加莱所倡导的约定主义, 定义是一种约定, 无所谓对错, 只要定义本身与先前认可的命题都不发生矛盾。显然, 这里可将“先前认可的命题”理解成“由严格条分法所算得的安全系数”。因此, 只要有系统的方法来确定式 (1) 和 (3) 中的方向  $d$ , 并使得计算求得的  $F$  与严格条分法的计算结果接近, 而且  $d$  的指向不违反常识, 那么这个安全系数的定义就是合理的。因此, 笔者对《质疑》作者提出的安全系数定义正确与否不做深究, 而仅考察两种方法所算得的结果与严格条分法的接近程度, 并考察中间结果是否符合常识。

如果按照式 (1) 来计算边坡安全系数, 则主滑方向  $d$  与水平方向的夹角可由下式决定<sup>[5]</sup>:

$$\tan \theta = \frac{\int_L (n_x n_y \sigma_{sx} + (n_y^2 - 1) \sigma_{sy}) dS}{\int_L (n_x n_y \sigma_{sy} + (n_x^2 - 1) \sigma_{sx}) dS}, \quad (4)$$

式中,  $n_x$ ,  $n_y$  为滑面外法线单位方向  $n$  在  $x$  轴和  $y$  轴的分量,  $\sigma_{sx}$  和  $\sigma_{sy}$  为抗滑应力矢  $s_n + s'_t$  在  $x$  和  $y$  方向的分量。

## 2 对比分析

为了检验矢量和法的合理性和可靠性, 现选取澳大利亚标准考题算例 EX1C 进行说明<sup>[3]</sup>, 其中的应力场采用 ABAQUS 软件计算得到。为了和质疑者已有计算结果进行对比<sup>[6]</sup>, 这里选用与其相同的 D-P 本构模型, 且临界滑移面位置也完全一

致, 即圆心坐标 (34.52 m, 43.44 m), 半径 19.111 m, 网格为四边形平面应变单元, 边界条件与考题确定的边界条件完全一致。计算结果及相关研究文献的成果见表 1。

从表 1 可以看出, 孙建生<sup>[6]</sup>投影方向采用极值分析得到的安全系数为 1.431, 下滑方向为 45.33°; 采用矢量和法所推荐的式 (3) 确定的临界状态下滑方向为 23.19°, 矢量和法安全系数为 1.3939。

表 1 标准考题 EX1C 安全系数计算结果汇总表  
Table 1 The calculating results of the slope example EX1C

计算方法	安全系数	下滑方向 / (°)
推荐裁判答案	1.3900	—
Donald	1.3900	—
SSA(Baker)	1.3900	—
STAB(陈祖煜)	1.3850	—
EMU	1.3900	—
Fredlund	1.4060	—
平均值	1.3922	—
孙建生法	孙建生	1.4311 45.533
本文方法	矢量和法	1.3939 23.1938

需要指出的是: 按照文献[6]中安全系数计算公式, 计算得到的安全系数为 1.4988, 而不是其论文中所给出的 1.4311。论文给出的数值和实际计算得到的数值在小数点后第二位就有如此大的出入, 令人费解!

尽管矢量和法算得的 1.3939 比文献[6]所算得的 1.4988 更接近于推荐答案 1.390, 但文献[6]的误差也仅为 7.8%, 小于严格极限平衡条分法最大误差 12%, 仍在可接受的范围之内。但是文献[6]所求得的主滑方向角为 45.33° 远远高出该例的边坡角 26.57°, 如图 2 所示。按照这个主滑方向将使滑体转向坡体内部, 这显然是极不合理的, 严重违背了“约定主义”所要求的定义与“先前认可的命题”相一致的原则!

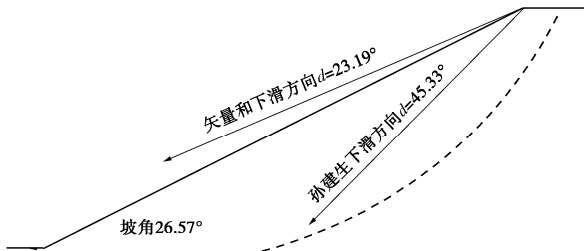


图 2 该算例不同方向角

Fig. 2 Different sliding angles of the slope example

## 3 《质疑》的其他问题

《质疑》还认为“当边坡体实际工程的安全度较高时, 矢量和法模型计算得到的安全系数小于实际值, 且最终模型安全系数趋近于 1.0, 其突出显现矢量和法模型的错误”。先以实例对此进行回应。

为了便于读者对结果进行重复, 这里仍选择上述考题算例 (EX1C) 进行详细的对比分析。算例 EX1C 标准安全系数答案为 1.390, 为回应上述质疑, 这里将 3 层土体强度参数黏聚力和摩擦系数以等比例进行变化, 比例系数从 0.6 至 4.0 以 0.2

的等级差逐次提高,由此可得到该边坡体算例不同安全度的计算工况。同时,也采用了严格的 Morgenstern-Price 法(M-P)进行计算,其中推力线函数为半正弦曲线。

图3为采用 GEO-SLOPE 软件建立的极限平衡计算模型,其中的滑移面为上述圆弧滑移面,圆心坐标为(34.52 m, 43.44 m),半径 19.111 m。

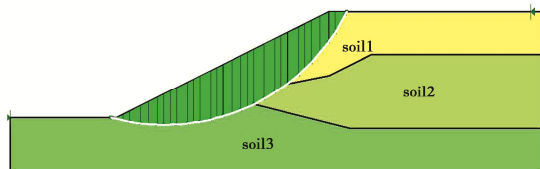


图3 极限平衡 M-P 法计算模型

Fig. 3 The calculating model of limit equilibrium M-P method

图4为采用矢量和法和 M-P 法计算得到的安全系数对比图,从图中可知,当土体强度参数比例系数由 0.6 逐渐增大至 4.0 时,矢量和法和 M-P 法安全系数均呈现线性增长规律,且两者得到的安全系数基本一致,在强度比例系数为 4.0 时,矢量和法安全系数为 5.337, M-P 法安全系数为 5.511,两者之间的相对误差仅为 3.16%。图5为矢量和法安全系数相对于 M-P 方法的误差,可见,当强度比例系数从 1.6 逐渐增大时,两者之间的相对误差也逐渐增大,最大相对误差为 3.16%。当比例系数从 1.0 逐渐减小时,两者之间的相对误差则逐渐增大,当比例系数为 0.6 时,矢量和法安全系数为 0.865, M-P 方法安全系数为 0.827,相对误差为 4.63% (严格条分法之间的通常相差 6%)。由此可见,对于该算例无论安全度高低,采用矢量和法均能合理地评估边坡稳定性程度。

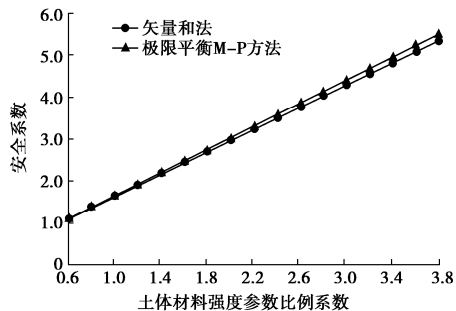


图4 两种方法安全系数对比图

Fig. 4 Comparison of safety factors with both methods

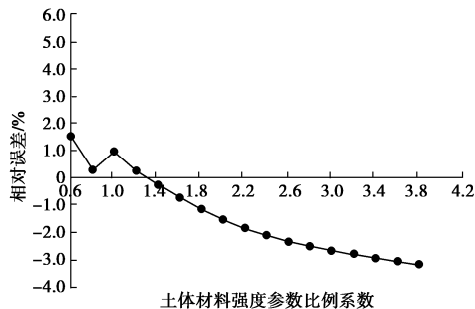


图5 矢量和法与 M-P 法结果相对误差

Fig. 5 Relative error of safety factors between the vector sum method and the limit equilibrium M-P method

## 4 结 语

通过计算分析可得:不是矢量和法的力学概念有什么错误或重大误差,倒是“基于有限元应力载荷宏观刚性滑裂面极限平衡抗滑稳定计算理论<sup>[6]</sup>”给出了不符合常识的计算结果。

矢量和法是数十年来在对边坡稳定性分析的不断研究和认识的基础上提出的,和传统的极限平衡法、有限元强度折减法等一样,矢量和法也必然要经历不断的发展和完善过程,逐渐形成可靠的分析方法,从而为实际工程服务。

已有的研究与实践证明,矢量和理论与方法是建立在科学认识边坡滑动破坏基础上的分析方法,我们欢迎更多的岩土工作者对矢量和法进行学术争鸣,以促进其发展;不反对学术争议,但坚决反对那些不尊重该方法提出者及相关研究者的表达方式,如:“严重破坏性影响”“对正确的抗滑稳定理论及其发展具有致命性破坏”“几乎已经推向死亡深渊绝路”等。

## 参考文献:

- [1] 孙建生. “矢量和法”抗滑稳定计算模型的力学概念错误[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 975 - 980. (SUN Jian-sheng. Mechanical concept errors in anti-sliding stability computational model of “vector sum method”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 975 - 980. (in Chinese))
- [2] 李广信, 张丙印, 于玉贞, 等. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2018. (LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen, et al. Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua university Press, 2018. (in Chinese))
- [3] 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[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [4] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1996, 122(7): 577 - 596.
- [5] GUO M W, LI C G, WANG S L, et al. Vector-sum method for 2D slope stability analysis considering vector characteristics of force[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(6): 04019058.
- [6] 孙建生. 基于有限元应力载荷宏观刚性滑裂面极限平衡抗滑稳定计算理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 862 - 875. (SUN Jian-sheng. Theoretical model of stability calculation of macro-rigid sliding planes with FEM stress load based on limit equilibrium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 862 - 875. (in Chinese))