

这样理解就没有抗力与荷载的错位问题。

从文献[1]中提到的 Bishop 方法计算公式(文献[1]中的式(2)、(3))同样可看出安全系数是如上定义的。按 Bishop 方法只能给出通过迭代计算安全系数的方程,不能写出计算安全系数的显式表达式,也就不能表达为抗力比荷载的形式。但是,将那方程(文献[1]中式(2))稍加推导即可清晰看出式中所含有的黏聚力 c_i 和 $\tan\varphi_i$ 都是以除以安全系数 K 的形式出现的,也就是采用了前面所述的不同于地面结构的安全系数定义。对 Janbu 法等条分法均可做同样分析,不再赘述。实际上,有些土力学教科书^[7]中在推导边坡稳定安全系数计算公式时,就是首先将强度折减,再用折减后的强度列平衡方程,由平衡方程求解安全系数。

综上所述,边坡稳定条分法所计算安全系数的定义并非抗力与荷载之比,而是采用对于此类问题更为合理的一种安全系数定义,即土体所具有的强度与保持边坡恰好稳定所需要的强度之比,因此也就没有付文所说的抗力与荷载错位问题。这是笔者据自己的理解所给出的看法,供文献[1]作者及广大读者参考。不妥之处欢迎批评指正。

参考文献:

- [1] 付文光, 陈双, 王振威. 稳定安全系数计算公式中荷载与抗力错位影响探讨[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(3): 556–563. (FU Wen-guang, CHEN Shuang, WANG Zhen-wei. Discussion of dislocation phenomena of resistance and load in formula for stability safety factor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(3): 556–563. (in Chinese))
- [2] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(2): 1–7. (SONG Er-xiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(2): 1–7. (in Chinese))
- [3] 郑颖人, 赵尚毅, 时卫民, 等. 边坡稳定分析的一些进展[J]. 地下空间, 2001(4): 262–271, 337. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, SHI Wei-min, et al. Progress in analysis of slope stability[J]. Underground Space, 2001(4): 262–271, 337. (in Chinese))
- [4] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 343–346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 343–346. (in Chinese))
- [5] 宋二祥, 孔郁斐, 杨军. 土工结构安全系数定义及相应计算方法讨论[J]. 工程力学, 2016, **33**(11): 1–10. (SONG Er-xiang, KONG Yu-fei, YANG Jun. Discussion of safety factor definitions and computation methods for geotechnical structures[J]. Engineering Mechanics, 2016, **33**(11): 1–10. (in Chinese))
- [6] 宋二祥. 土力学理论与数值方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. (SONG Er-xiang. Theory and Numerical Methods in Geomechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese))
- [7] CRAIG R F. Soil Mechanics[M]. Boston: Springer US, 1983.

DOI: 10.11779/CJGE202111023

对“条分法计算边坡稳定安全系数的定义”的答复

付文光

(1. 深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东 深圳 518063; 2. 广东省岩土与地下空间工程技术研究中心, 广东 深圳 518063)

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)11-2143-03

作者简介: 付文光(1970—), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计咨询、工程实践与试验研究等工作。E-mail: zgjy1992@126.com。

Reply to “on the safety factor definition of slope stability calculated by the slices method”

FU Wen-guang

(1. Shenzhen GongKan Geotechnical Group Co., LTD, Shenzhen 518063, China; 2. Guangdong Engineering and Technology

Research Center for Geotechnique and Underground Space, Shenzhen 518063, China)

宋二祥老师对敝人《稳定安全系数计算公式中荷载与抗力错位影响探讨》^[1] (以下简称原文) 提出了宝贵的指导及讨论意见, 非常感谢!

宋文提出“边坡稳定安全系数的定义……是边坡土体所具有的抗剪强度与保持边坡刚好稳定所需要的强度之比, 所以没有抗力与荷载错位的问题”。正如宋老师在其文献^[4]^[2]所指出的, 边坡稳定安全系数目前主要有两种定义方法: ①为抗滑力矩与下滑力矩之比 (可简化为抗力荷载比), 相应的稳定安全系数计算方法一般采用单一安全系数法; ②即为上述的抗剪强度比, 毕肖普、简布等将之定义为滑动面上的抗剪强度与实际产生的剪应力之比, 相应的稳定安全系数计算方法一般采用强度 (抗剪强度) 折减法。宋文认为自然边坡等土工结构的稳定更适合采用第二种定义形式而不是第一种。原文没有讨论哪种安全系数定义更合理, 讨论的是业界按第一种定义编写的安全系数计算公式有时并不完全符合第一种定义这种现象, 现在讨论边坡稳定工程中按第二种定义会不会有抗力与荷载错位现象及强度折减法适用性问题。

仍以瑞典条分法为例, 当滑弧中心点 O 位于边坡上方时, 如图 1 所示, 土条 $1 \sim (m-1)$ 的重力产生下滑力 $\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui}$, 土条 $m \sim n$ 的重力产生抗滑力 $\sum_{i=m}^n G_{ui}$, 两者作用方向相反, 稳定安全系数 K 计算公式按第一种定义、当抗力与荷载发生原文所示第 1 类错位现象时可写为

$$\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui} - \sum_{i=m}^n G_{ui} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{ni} \tan \varphi_i + c_i l_i)}{K} \quad (1)$$

按笔者建议的抗力与荷载归位时可写为

$$\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{ni} \tan \varphi_i + c_i l_i)}{K} + \frac{\sum_{i=m}^n G_{ui}}{K} \quad (2)$$

按强度折减法可写为

$$\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui} = \sum_{i=1}^n \left(G_{ni} \frac{\tan \varphi_i}{K} + \frac{c_i l_i}{K} \right) + \frac{\sum_{i=m}^n G_{ui}}{1} \quad (3)$$

将式 (1) ~ (3) 进行比较可知:

(1) 式 (3) 与式 (1) 相同。式 (3) 在形式上用强度指标除以 K , 直观地表达了强度折减法, 因为 K 只涉及到抗剪强度而没有涉及其它抗力或荷载, 即 $\sum_{i=1}^n G_{ui}$ 等作为荷载还是抗力都不会影响到 K 计算结果, 也就不存在错位与否, 故从第二种定义角度来看, 式 (1) 所表达的第 1 类错位问题不存在。

(2) 原文中总结了抗力与荷载错位现象的 3 类基本形式及 2 类组合形式 (原文式 (5) ~ (9)), 其中第 2 类形式以图 1 为例可写为

$$\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui} + \sum_{i=m}^n G_{ui} = \sum_{i=1}^n \left(G_{ni} \frac{\tan \varphi_i}{K} + \frac{c_i l_i}{K} \right) \quad (4)$$

第 2 类错位现象把部分抗力 $\sum_{i=m}^n G_{ui}$ 作为荷载直接与荷载

$\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui}$ 相加, 可认为是对抗力与荷载概念的理解有误或故意为

之 (目的是在目标安全系数 K 维持不变时提高设计抗力、以使工程变得更安全), 这与采用第一种或第二种定义无关, 故采用第二种定义亦不能解决; 第 3 类错位现象对部分荷载也除以了安全系数, 采用第二种定义时因为安全系数不涉及荷载, 故也不存在这类错位现象; 第 4 类错位现象是第 1 类与第 3 类的组合, 从第二种定义角度来看也没有错位问题; 第 5 种错位现象是第 2 类与第 3 类的组合, 存在着与第 2 类同样的问题, 具体不再赘述。总之, 在对抗力与荷载的概念理解及应用无误时, 采用第二种定义的安全系数计算公式, 如宋文所言, 确实不存在采用第一种定义时的抗力与荷载错位问题。

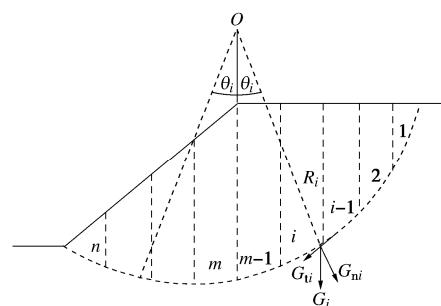


图 1 瑞典条分法边坡稳定分析简图

Fig. 1 Sketch about slope stability analysis by Swedish Slicing Method

(3) 和式 (3) 及式 (1) 相比, 式 (2) 对 $\sum_{i=m}^n G_{ui}$ 项等所有抗力均除以了同一安全系数 K , 符合单一安全系数法规定的安全系数为抗力与荷载之比这个定义, 故为单一安全系数法。从概率设计的角度, 可认为式 (3) 中 $\sum_{i=m}^n G_{ui}$ 项的抗力分项系数为 1, 而抗剪强度的抗力分项系数为 K , 因两者不等且通常 $K > 1$, 故式 (3) 表达的强度折减法具有了概率含义, 并非传统意义上的单一安全系数法。

采用强度折减法时:

(1) 因岩土重力的变异性小于抗剪强度的, 式 (3) 中 $\sum_{i=m}^n G_{ui}$ 项对应的抗力分项系数取 1, 小于 K 看起来也合理, 但仅取 1, 没有一点安全裕度是否合适? 式 (3) 比式 (2) 计算得到的 K 值更高, 对于工程而言更偏于不安全。

(2) 如图 1 所示, 按式 (3) 计算第二种定义的安全系数, $\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui} = \sum_{i=m}^n G_{ui}$ 时 K 值无穷大, $\sum_{i=1}^{m-1} G_{ui} < \sum_{i=m}^n G_{ui}$ 时 K 值为负, 但

显然安全系数不能无穷大甚至为负。这种情况而非完全虚拟，例如土石坝拦挡淤泥工程， $\sum_{i=m}^n G_u$ 项抗力由土石坝产生，土石坝足够稳定时就有可能发生类似计算结果；再如原文所示的锚固结构，锚杆提供的抗力足够大时也可能发生类似计算结果，也就是说当岩土体抗剪强度以外的因素产生了抗滑力且较大时，式（3）所示的强度折减法也可能产生安全系数计算结果不合理问题，如同发生抗力与荷载错位现象一样；但如果按原文所建议的抗力与荷载归位后的计算公式则没有类似问题。故强度折减法可能更适用于仅由岩土体抗剪强度提供抗滑力时的自然边坡稳定计算，这也许就是现有技术标准中不太采用第二种定义形式对有支挡结构的人工边坡进行稳定验算的主要原因。

总结：①原文边坡稳定安全系数计算公式中的抗力与荷载错位现象是按第一种定义总结的，部分错位现象是对抗力与荷载概念的理解及应用不当造成的，采用第二种定义并不能解决因此而导致的安全系数不准确问题；②在对抗力与荷载概念的理解及应用无误时，采用第二种定义则不存在第一种定义时抗力与荷载错位问题，宋文观点是正确的；③有岩土体抗剪强度以外的因素提供抗滑力且较大时，强度折减法计算结果与发生

了错位现象的抗力荷载比法一样，都存在着稳定安全系数计算结果不合理现象，对有支挡的人工边坡有时可能不太适用。

以上观点不妥之处，敬请宋老师及读者们继续批评指正。

参考文献：

- [1] 付文光, 陈 双, 王振威. 稳定安全系数计算公式中荷载与抗力错位影响探讨[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 556 - 563. (FU Wen-guang, CHEN Shuang, WANG Zhen-wei. Discussion of dislocation phenomena of resistance and load in formula for stability safety factor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 556 - 563. (in Chinese))
- [2] 宋二祥, 孔郁斐, 杨 军. 土工结构安全系数定义及相应计算方法讨论[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 1 - 10. (SONG Er-xiang, KONG Yu-fei, YANG Jun. Discussion of safety factor definitions and computation methods for geotechnical structures[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(11): 1 - 10. (in Chinese))

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司（原冶金勘察研究总院）主办的学术—技术类双月刊，是中国科技核心期刊、中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊，多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富，理论结合实际，适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行，双月刊，大 16 开本，双月 20 日出版。每期定价 10.0 元，全年 60 元。邮发代号 18-153。全国各地邮局均可订阅，也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告，价格适中，印制精良，注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址：河北省保定市东风中路 1285 号《勘察科学技术》编辑部，邮编：071069，Tel：0312-3020887，3094054，Fax：0312-3034561，E-mail：kckxjs@163.com。