

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.04.024

基于矢量分析方法的边坡下滑推力计算

沈华章¹, 张国发², 王水林¹, 郭明伟¹, 葛修润¹

(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. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 边坡抗滑稳定分析一直都是岩土力学与工程中的重要研究方向之一, 研究成果众多。针对规范不平衡推力法在实际工程应用中的不合理现象, 根据边坡抗滑稳定矢量和分析方法原理, 提出了基于矢量分析的边坡矢量下滑推力计算方法, 推导了二维及三维边坡强度储备型和超载储备型矢量下滑推力表达式。采用矢量分析方法计算了两个二维算例及一个三维算例的下滑推力, 二维算例结果表明: 矢量下滑推力方向受滑面倾角变化影响较剩余下滑推力小, 矢量下滑推力在滑面不同位置处的变化比剩余下滑推力光滑, 避免了剩余下滑推力精度受折线形滑面倾角变化影响过大的问题, 当滑面为单折线时矢量下滑推力与剩余下滑推力相同。三维算例结果与对边坡稳定的已有认识保持一致。最后, 采用这两种方法对西部某工程滑坡的下滑推力进行了分析, 计算中主要考虑 3 种工况, 分别为自重、暴雨和地震工况。结果表明, 矢量下滑推力较剩余下滑推力有很好的改善。探讨了矢量下滑推力较剩余下滑推力的进步之处。

关 键 词: 边坡; 矢量和法; 不平衡推力法; 剩余下滑推力;

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 04-1096-13

Calculation of downslide thrust of slope based on vector analysis method

SHEN Hua-zhang¹, ZHANG Guo-fa², WANG Shui-lin¹, GUO Ming-wei¹, GE Xiu-run¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Guizhou Transportation Planning, Survey & Design Academe Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: The stability analysis of slope has been a classic research field in geomechanics and geotechnical engineering. Numerous research results and analytical methods have been proposed in this regard. To overcome the defects of imbalance thrust force method adopted in the practical specification, both two-dimensional and three-dimensional formulations of strength margin and overload margin downslide thrust are developed, based on the principle of the vector sum analytical method of slope stability. Two 2D numerical examples and a 3D numerical example are investigated. The results of 2D numerical examples indicate that the variation of obliquity of sliding surface has less significant influence on the direction of vector downslide thrust than on the direction of residual downslide thrust. The vector downslide thrust curve is smoother than the residual downslide thrust curve, which helps avoid the problem that the precision of the residual downslide thrust is significantly influenced by the variation of obliquity of the polyline-shaped sliding surface. The results of vector downslide thrust and residual downslide thrust are the same when the sliding surface is a single polyline, and the result of 3D numerical example by the proposed method is consistent with the common understanding of the slope stability. The proposed procedures are used to calculate the downslide thrusts of a landslide in the western China under three working conditions, including the gravity condition, rainfall condition and seismic load condition. The results show that the vector downslide thrust result has been better improved compared to the residual downslide thrust. Finally, the potential improvements in the vector downslide thrust method are discussed.

Keywords: slope; vector sum method; imbalance thrust force method; residual downslide thrust

1 引 言

边坡抗滑稳定分析一直是岩土力学与工程的一

个重要研究领域。目前, 边坡稳定性分析方法主要有极限平衡法、有限元法(滑动面应力分析法、强度折减法、超载法)、极限分析法等。剩余推力法,

收稿日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51179185, No. 41472289, No. 41302236); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2014CB047100)资助。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC)(51179185, 41472289, 41302236) and National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB047100).

第一作者简介: 沈华章, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事应变软化和边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: scott918@163.com

也称为不平衡推力法和传递系数法, 是在我国工程实践中发展出来的一种稳定性分析方法, 是极限平衡法中的一种。该方法能够计算出安全系数, 对边坡稳定性进行评价, 同时由其得到的剩余下滑推力也是进行边坡加固支护的重要依据, 在工程实践中得到了广泛的应用, 不少科研人员对该方法进行了研究并取得了丰硕的成果: ①在方法改进方面: 考虑非饱和带基质吸力对岩体抗剪强度的贡献和暂态附加水载荷的不利作用^[1-2]、孔隙水压力^[3]、条间力方向^[4]、滑面(带)抗剪强度的不同取值^[5], 潜在滑面的确定与搜索^[4]、三维剩余推力法^[6]。②将剩余推力法与其他方法理论相结合: 考虑土的流变力学效应, 提出边坡渐进破坏的力学模型^[7]; 采用不平衡推力法和其他理论方法, 运用地下水管网状排泄系统的理论, 揭示降雨作用下滑坡变形解体破坏的机制^[8-11]; 考虑与可靠度分析结合起来得到新的可靠度分析方法^[12-13]; 考虑土条块底边力学特性, 结合不平衡推理法, 提出临界状态条块确定方法^[14]。③在方法误差分析及应用范围方面: 陈祖煜^[15]指出, 在某些情况下误差很大, 偏于不安全; 时卫民^[16]和郑颖人^[17]等认为, 折线形滑面的计算精度与滑面控制点处滑面倾角的变化密切相关; 张鲁渝等^[18]指出, 圆弧滑面时剩余推力法与严格条分法相当, 非圆弧滑面时剩余推力法误差可能很大; 易朋莹等^[19]指出, 牵引式滑坡的稳定系数达到稳定, 但存在较大的下滑推力的矛盾; 邵宁生^[20]指出, 基于强度储备的安全系数, 下滑力随安全系数呈非线性增加, 更符合边坡破坏的实际情况; 李荣建等^[21]指出, 该法在分析边坡的局部滑动问题中具有明显的局限性。尽管该方法有一些不足, 考虑到其在实际工程的广泛应用, 对剩余下滑推力的研究仍然是有意义的。而矢量和法作为一种新的边坡稳定分析方法, 葛修润等^[22-29]于 1983 年提出该方法, 其安全系数计算时采用滑体的整体下滑趋势方向作为投影方向, 有明确的物理意义, 避免了许多稳定性分析方法的安全系数简单沿滑面对力求代数和而不能反映滑动矢量概念内涵的问题。另外, 矢量和法可以采用有限元等数值方法计算得到的应力场, 相比极限平衡法, 其平衡条件等完全可以满足; 而与强度折减法等相比, 其不存在失稳判据难以选择及黏聚力与内摩擦系数等比例折减的假设。刘艳章^[30]、吴振君^[31]、郭明伟^[32]等给出了矢量和安全系数的表达式以及边坡整体下滑趋势方向, 推动了矢量和法理论的发展以及在工程中的应用。

本文借鉴矢量和法的思想, 提出一种基于矢量

分析的边坡下滑推力计算方法(后面简称为边坡矢量下滑推力), 认为滑面各处下滑推力的方向与该处滑体的整体下滑趋势方向相同, 其值由抗滑力矢量与下滑力矢量经过矢量运算并在下滑趋势方向上投影后得到, 不需要假设条间力的传递方向, 为边坡下滑推力的计算提供了一个新的思路。

2 基于矢量的边坡下滑推力

根据矢量和法原理, 分别推导了二维、三维边坡矢量下滑推力。

2.1 二维边坡矢量下滑推力

如图 1 所示, 在滑体中某一竖直断面 BC 上部滑体 Ω (滑体 $BCDE$ 部分), 其滑面长度为 s , 图中所示 σ_τ 、 σ_n 为滑面上 A 点处滑体对滑床的作用力 σ_s 的分解, 分别对应为潜在滑面上的剪应力、法向应力矢量; $\vec{d}$ 为滑体 Ω 部分下滑趋势方向。由图易知, 滑面上点 A 处滑床对滑体的抗滑法向应力 σ'_n 与滑体对滑床的下滑法向应力 σ_n 是一对作用力与反作用力, 即

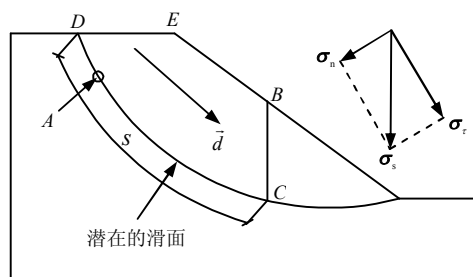


图 1 边坡滑床受力示意图

Fig.1 Forces acting on the slide bed of a slope

$$\sigma'_n = -\sigma_n \quad (1)$$

潜在滑动面上的最大抗剪力为

$$\sigma_f = (c - \sigma_n \tan \varphi) \vec{d}_\tau \quad (2)$$

式中: $\vec{d}_\tau$ 为滑面上极限抗滑剪应力方向单位矢量; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。最大抗滑应力矢量为

$$\sigma'_s = \sigma_f + \sigma'_n \quad (3)$$

滑体 Ω 部分下滑趋势方向 $\vec{d}$ 为^[32]

$$\vec{d} = \frac{-\int_s \sigma_f ds}{\left\| \int_s \sigma_f ds \right\|} \quad (4)$$

滑面上滑体 Ω 部分的抗滑合力在滑体 Ω 部分

下滑趋势方向 $\vec{d}$ 的反方向投影 R 为

$$R = \int_s \sigma'_s \cdot (-\vec{d}) ds \quad (5)$$

滑体 Ω 部分的下滑合力在滑体 Ω 部分的整体下滑趋势方向上的投影 T 为

$$T = \int_s (\sigma_s \cdot \vec{d}) ds \quad (6)$$

在极限状态下, 边坡在 T 、 R 的作用下保持平衡, 则滑体 Ω 部分在某一安全系数 K 下超载储备型下滑推力 F_{VDT_O} 和强度储备型下滑推力 F_{VDT_S} 分别为

$$F_{VDT_O} = KT - R \quad (7)$$

$$F_{VDT_S} = T - R/K \quad (8)$$

将 T 、 R 的表达式代入式 (7)、(8), 则得滑体 Ω 部分的下滑推力为

$$F_{VDT_O} = K \int_s (\sigma_s \cdot \vec{d}) ds - \int_s \sigma'_s \cdot (-\vec{d}) ds \quad (9)$$

$$F_{VDT_S} = \int_s (\sigma_s \cdot \vec{d}) ds - \frac{1}{K} \int_s \sigma'_s \cdot (-\vec{d}) ds \quad (10)$$

式 (9)、(10) 分别为二维超载储备和强度储备的矢量下滑推力表达式。其求得的是竖直断面 BC 上部滑体 Ω 部分的下滑推力, 方向是滑体 Ω 部分整体的下滑方向, 当 BC 在滑面的右端时, 即得到整个滑体的下滑推力, 通过改变竖直断面 BC 的位置, 就能求得滑体任一处的下滑推力, 后面的三维矢量下滑推力也与此相同。

2.2 三维矢量下滑推力

为了方便推导三维边坡的矢量和法下滑推力, 这里采用弹性力学中拉正压负的约定。如图 2 所示, 从坡顶至某一竖直断面 BC 处, 体积为 Ω 的部分滑体 (即滑体 $BCDE$ 区域部分), Ω 部分滑体的整体下滑趋势方向为 r , 其滑面面积为 A , 对于 A 上任一微面 dA , 该处应力张量为 σ , 规定指向滑体内部为正向, 其法线方向为 n , 该微面处滑体对滑床的作用力为 σ_a , 其法向和切向分量分布为 σ_n 和 σ_τ , σ_a 、 σ_n 、 σ_τ 可由弹性力学中相关理论对 σ 计算得到。

潜在滑面上局部下滑切应力方向单位矢量为

$$\sigma_\tau^0 = \frac{\sigma_\tau}{\|\sigma_\tau\|} \quad (11)$$

Ω 部分滑体的整体下滑趋势方向 $r^{[32]}$ 为

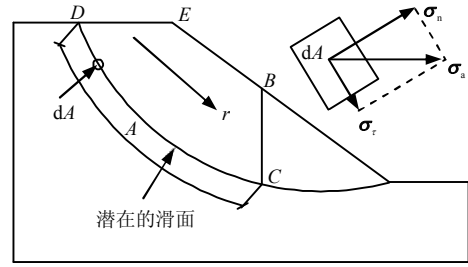


图 2 滑体潜在滑面受力示意图
Fig.2 Forces acting on slip surface of a 3D slope

$$r = \frac{\int_A (c - \sigma_n f) \sigma_\tau^0 dA}{\left\| \int_A (c - \sigma_n f) \sigma_\tau^0 dA \right\|} \quad (12)$$

式中: f 为内摩擦系数。

则 Ω 部分滑体的抗滑力合力和下滑力合力在计算方向上的投影 R 、 T 分别为

$$R = \int_A [(c - \sigma_n f) \sigma_\tau^0 + \sigma_n] \vec{dA} \cdot r \quad (13)$$

$$T = \int_A \sigma_a dA \cdot r \quad (14)$$

将式 (13)、(14) 代入式 (7)、(8) 可得

$$F_{VDT_O} = K \int_A \sigma_a dA \cdot r - \int_A [(c - \sigma_n f) \sigma_\tau^0 + \sigma_n] \vec{dA} \cdot r \quad (15)$$

$$F_{VDT_S} = \int_A \sigma_a dA \cdot r - \frac{1}{K} \int_A [(c - \sigma_n f) \sigma_\tau^0 + \sigma_n] \vec{dA} \cdot r \quad (16)$$

式 (15)、(16) 即为超载储备型和强度储备型三维边坡矢量下滑推力计算表达式。显然, 式 (9)、(10) 分别为式 (15)、(16) 在二维情况下的特例。需要注意的是, 因为边坡一般处于受压状态, 故式 (2)、(12) 中 σ_n 大多数为负值。在法向应力 $\sigma_n \geq 0$ 时, 可令式 (13) 中的 $c=f=0$ 。

由上述推导过程可以看出, 边坡某处矢量下滑推力由该处及其上方滑面的抗滑力矢量和下滑力矢量在该部分滑体的整体下滑趋势方向上投影计算得到, 相比剩余下滑推力法, 不需要假设条间力的传递方向, 同时可由有限元数值方法得到应力场后计算得到, 能完全满足平衡协调条件并考虑材料的本构关系。

3 算例分析

本节采用上述推导出的矢量和法下滑推力表达式, 结合简化条块法得到应力场, 从而得到矢量和法下滑推力。并与强度储备型剩余下滑推力方法^[33]以及规范^[34]中的超载储备型剩余下滑推力方法进行对比分析。

3.1 算例1——ACADS 边坡考题算例

3.1.1 计算模型与计算条件

1987 年澳大利亚计算机应用协会(ACADS)发布了 10 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^[15],考核边坡稳定分析程序的准确性,这里选用 ACADS 考题 1 的 EX1(a)。

考题 EX1(a)为一均质土坡,其计算模型及尺寸如图 3 所示,材料参数如表 1 所示。滑动面为 STAB 程序(陈祖煜^[15])求得的临界滑动面。

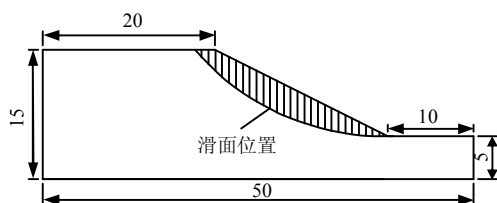


图3 ACADAS 考题 EX1(a)计算模型(单位: m)
Fig.3 Test problem EX1(a) of ACADAS (unit: m)

表1 ACADAS 考题 EX1(a)材料参数

Table 1 Material parameters of EX1(a) of ACADAS				
黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
3.0	19.6	20.0	10	0.25

3.1.2 计算过程

采用简化的条块法计算滑面处的应力与规范^[34]提供的剩余下滑推力(后面称为剩余下滑推力)的假定一致,认为条块作用在滑面上的力为该条块自身的重量,这样就很容易求得滑面处的应力,从而由前面推导的表达式得到矢量下滑推力。由于滑面是圆弧,划分条块的数目对计算结果的精确程度会有影响,这里分别计算了安全系数 $K=1.2$, 条块数目分别为 5~100 个时 4 种下滑推力的大小,假定条块数为 10 000 时的下滑推力的结果是精确的,则可得 4 种下滑推力的相对误差与条块数目的关系,如图 4 所示。从图中可以看出,条块数相同时,相比剩余下滑推力,矢量下滑推力的相对误差更低,这是由于矢量下滑推力不需要假定条间力的方向,以整体下滑趋势方向作为下滑推力方向。在条块数为 30 时,两种矢量下滑推力的相对误差低于 0.35%,两种剩余下滑推力的相对误差在 1%~2% 左右,精度比较高,故本算例共划分 30 个条块,如图 3 所示。作为对比,计算了强度储备型和超载储备型剩余下滑推力。

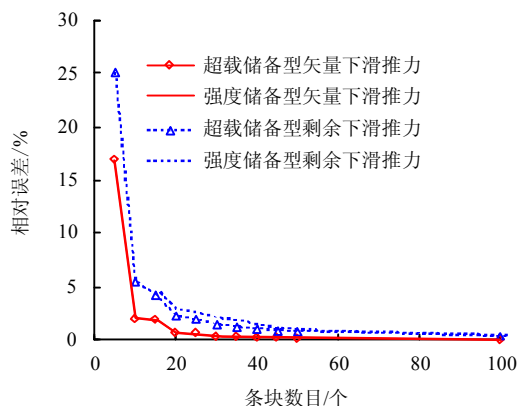


图4 相对误差与条块数目关系
Fig.4 Relationships between relative error and number of slice

3.1.3 计算结果与分析

该算例的下滑推力计算结果如图 5、6 所示。图 5 为滑面上某一位置 X 处的整体下滑趋势方向,即图中区域 Ω (即滑体中的 $BCDE$ 部分)的整体下滑趋势方向,并与滑面倾角进行了对比。区域 Ω 的 BC 边与坡顶(滑面顶部)水平距离为 X ,当 BC 在滑面的最右端时,便得到边坡整个滑体的计算方向。从图中可以看出,当 BC 较靠近坡顶时,即 X 值较小时,滑面相对较陡,整体下滑趋势与水平方向夹角 θ 较大;当 BC 向滑面右端移动即 X 值增加时,滑面越来越平缓,夹角 θ 逐渐减小;当 BC 达到滑面最右端时,该处滑面的计算方向为整个滑体的整体下滑趋势方向,其与水平方向夹角 θ 为 24.1° 。图 5 中滑面倾角 α 随着 X 值增加均匀地减小,而整体下滑趋势与水平方向夹角 θ 减小幅度逐渐变缓,并小于倾角 α 的减小幅度,这一点从整体下滑趋势方向定义来看是不难理解的。

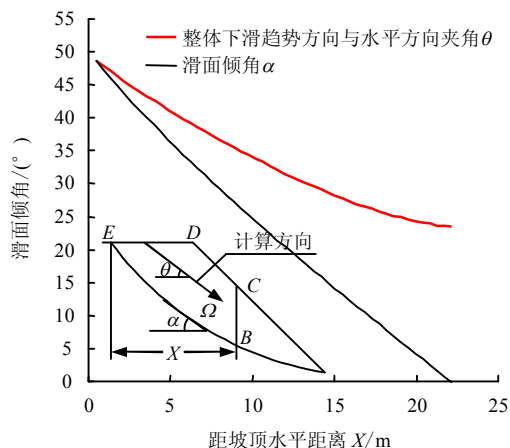


图5 整体下滑趋势方向与滑面角度的对比(算例1)
Fig.5 Vector sum sliding direction(θ) and the angle(α) of the slip surface in example 1

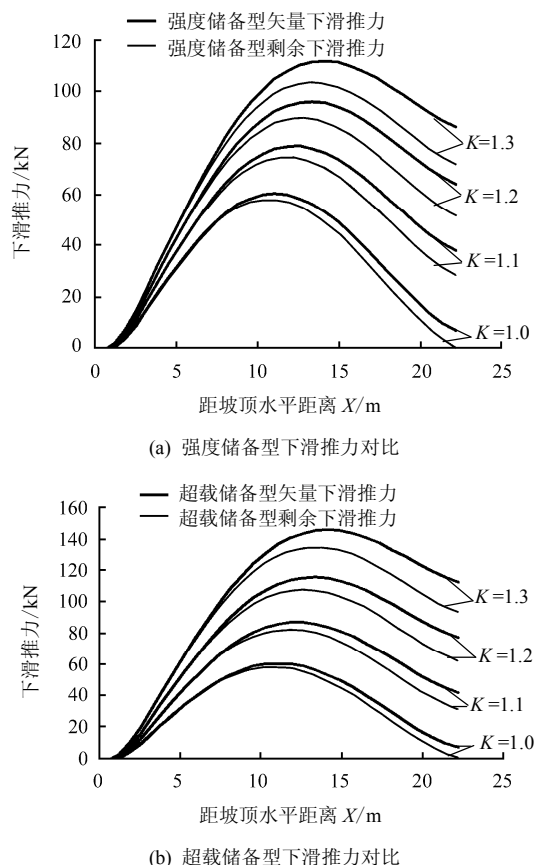


图6 矢量下滑推力与剩余下滑推力结果对比(算例1)

Fig.6 Vector downslide thrust and residual downslide thrust in example 1

图6(a)为强度储备型矢量下滑推力与剩余下滑推力曲线的对比情况,图6(b)为超载储备型矢量下滑推力与剩余下滑推力曲线的对比情况。文中二维滑体厚度为1 m,推力的单位可以使用N(kN、MN)。从整体上看,强度储备型和超载储备型矢量和法下滑推力具有与相应剩余下滑推力类似的下滑段和抗滑段。在距滑面顶部水平距离比较近的地方,由于滑面相对较陡,其下滑力大于抗滑力,起到促进边坡滑动的作用,即为下滑段,矢量下滑推力不断增加。在距坡顶较远的地方,滑面与水平方向夹角较小,滑面比较平缓,其抗滑力大于下滑力,起到阻碍滑体滑动的作用,即为抗滑段,矢量下滑推力开始逐渐减小。矢量下滑推力计算结果与剩余下滑推力计算结果基本一致,二者抗滑段与下滑段的位置基本相同,下滑推力沿着滑面的变化规律相同。另外,在距坡顶水平距离 X 比较小($X < 10$ m)时,整体下滑趋势与滑面切向方向差异不大,矢量下滑与剩余下滑推力曲线几乎完全相同,当 X 值较大时,整体下滑趋势方向与滑面切向方向差异较大,矢量下滑推力要略大于剩余下滑推力。除了方向不同导

致矢量下滑推力要略大于剩余下滑推力之外,矢量和安全系数要略小于剩余推力法的安全系数,也会使相同安全系数时矢量下滑推力要略大于剩余下滑推力。随着安全系数由 $K=1$ 增加到 $K=1.3$,矢量下滑推力与剩余下滑推力的差异随之增加,不过总体上来看这种差别仍在较小的范围内。表明矢量下滑推力的提法是合理的,得到了与剩余下滑推力类似的结果。

3.2 算例2——带有软弱夹层的不排水黏土边坡

Griffiths等^[35]研究过的带有软弱夹层的不排水黏土边坡是岩土工程中较为典型的一类边坡,通常用于不排水边坡的稳定性分析。这里分析了两种矢量下滑推力,分别与两种剩余下滑推力进行了对比。

3.2.1 计算模型与条件

几何模型及相应的尺寸如图7所示。软弱夹层及地基土的摩擦角 $\varphi_u = 0$,且地基土不排水抗剪强度 C_{u1} 满足关系:

$$C_{u1} = 0.25\gamma H \quad (17)$$

软弱夹层不排水抗剪强度 C_{u2} 则可以改变。边坡体中的软弱夹层一部分与边坡平行,在地基的部分水平,最后地面出露的部分与坡踵成 45° 夹角。Griffiths等^[35]在1999年的研究表明,当 $C_{u2}/C_{u1} \approx 0.6$ 时,由软弱夹层控制的非圆弧与圆弧之间的过渡阶段很清楚地显示其不连续性;当 $C_{u2}/C_{u1} > 0.6$ 时,边坡体的破坏模式主要为圆弧形,安全系数本质上不受软弱夹层薄层的影响;当 $C_{u2}/C_{u1} < 0.6$ 时,边坡体的破坏模式主要受软弱薄层的控制。郭明伟^[32]的计算结果表明,当 $C_{u2}/C_{u1} = 0.4 \sim 0.5$ 时,其矢量和安全系数与极限平衡安全系数介于 $0.96 \sim 1.24$ 之间,这属于工程中边坡可能需要加固的情况,因而,这里计算了 $C_{u2}/C_{u1} = 0.40, 0.45, 0.50$ 三种情况下的两种矢量下滑推力,分别与相应的剩余下滑推力做对比分析。模型尺寸中 $H = 10$ m,材料参数见表2。

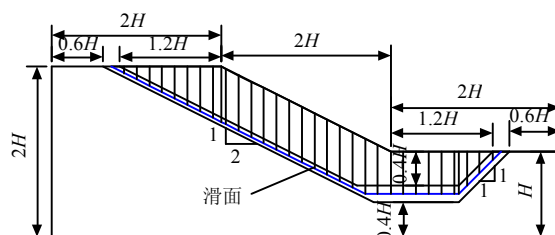


图7 带有软弱夹层的不排水黏土边坡计算模型

Fig.7 Calculating model in Example 2

表2 材料参数

Table 2 Material parameters in Example 2

强度比 C_{u2}/C_{u1}	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
0.40	22.00				
0.45	24.75	0	22	100	0.35
0.50	27.50				

对于折线型滑面，在边坡表面几何形状和滑面角度发生改变的地方划分条块后，条块数的多少对计算结果影响不大，故不计算条块数对计算结果的影响，滑体共划分条块 33 个，如图 7 所示。计算过程与算例 1 相同。

3.2.2 计算结果与分析

计算结果如图 8~10 所示。该算例中内摩擦角为 0，不同 C_{u2}/C_{u1} 下仅黏聚力在变化，抗滑力合力的方向不变，即滑面某一位置处的整体下滑趋势方向不随着 C_{u2}/C_{u1} 变化而变化。图 8 表示从坡顶到滑面某一竖直断面 BC 处的滑体的 Ω 部分（图中的 $BCDE$ 区域）的整体下滑趋势与水平方向夹角 θ 的变化情况，作为对比，图中也显示了滑面倾角 α 的变化情况，角度以下滑趋势方向或滑面切向逆时针旋转到水平方向的角度为正。 $X < 30$ m 时，滑面为一线段，没有转折， θ 与 α 相等； $X = 30$ m 时，滑面由斜线段变为水平线段， α 从 30° 直接变为 0° ， $X = 41$ m 时，滑面由水平线段变为斜线段， α 从 0° 直接变为 -45° ， $30 \text{ m} < X < 41 \text{ m}$ 和 $41 \text{ m} < X < 50 \text{ m}$ 时， α 保持不变， θ 缓慢降低。从图中可以看出，当滑面发生改变时，由于 θ 代表滑体的整体下滑趋势方向， θ 的变缓幅度小于 α 的变缓幅度，因而矢量下滑推力方向受滑面改变的影响要小于剩余下滑推力方向受滑面改变的影响。

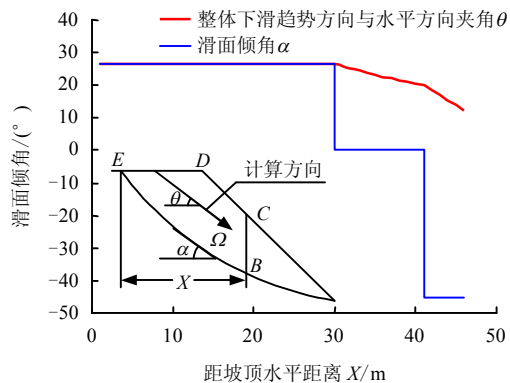


图8 整体下滑趋势方向与滑面角度的对比（算例2）

Fig.8 Vector sum sliding direction(θ) and angle(α) of slip surface in example 2

图 9 表示 $C_{u2}/C_{u1}=0.40、0.45、0.50$ 三种情况

下的强度储备型矢量下滑推力和剩余下滑推力曲线，可以看出，三种情况下，强度储备型矢量下滑推力表现出下滑段、抗滑段的特征： $X < 30$ m 时，滑面较陡，下滑力大于抗滑力，矢量下滑推力不断增加； $30 \text{ m} < X \leq 41 \text{ m}$ 时，滑面为一水平线段，抗滑力大于下滑力，矢量下滑推力逐渐减小； $X > 41$ m 时，滑面为一反倾的斜线段，滑面倾角为负，下滑力矢量在整体下滑趋势方向上投影远小于抗滑力矢量的投影，此时矢量下滑推力减小较快。在同一个图中，安全系数越大，相应的强度储备型矢量下滑推力越大，由图 9(a)~(c)滑面的强度参数在增加，同一个安全系数的下滑推力在减小，与稳定性分析理论认识相符。总体上来说，强度储备型矢量下滑推力结果与强度储备型剩余下滑推力结果相似，但也有一些不同之处。

在图 9 中， $X < 30$ m 时，滑面为一斜线段，没有变化，强度储备型矢量下滑推力曲线与强度储备型剩余下滑推力曲线完全相同； $30 \text{ m} < X \leq 46 \text{ m}$ 时， θ 与 α 差别较大（如图 8 所示），强度储备型剩余下滑推力在两处角度 α 发生变化的地方剧烈减小，而强度储备型剩余下滑推力则变化比较光滑，验证了算例 1 得出矢量下滑推力受滑面变化影响比剩余下滑推力所受影响小的结论，而剩余下滑推力法受滑面角度变化影响大在某些时候会影响其准确性，郑颖人和时卫民等^[16-17]指出，折线形滑面的剩余推力法计算精度与滑面控制点处滑面倾角的变化密切相关，滑面控制点处的倾角变化大于 10° 时不建议使用剩余推力法。从滑面变化对下滑推力的影响方面来看，矢量下滑推力相比剩余下滑推力有了很大的改善。

图 10 表示 $C_{u2}/C_{u1}=0.40、0.45、0.50$ 三种情况下的超载储备型矢量下滑推力和剩余下滑推力曲线，分析后可以得出与强度储备型矢量下滑推力类似的结论。综合以上分析，本算例表明，矢量下滑推力结果合理，矢量下滑推力在滑面不同位置处变化较剩余下滑推力光滑，矢量下滑推力方向受滑面变化影响较小，避免了剩余下滑推力方法中存在的一些不足。

3.3 算例 3——三维边坡算例

三维算例边坡模型如图 11(a)所示。图中各点坐标分别为： $A(0\ 0\ 0)$ 、 $B(50\ 0\ 0)$ 、 $C(50\ 0\ 5)$ 、 $D(40\ 0\ 5)$ 、 $E(20\ 0\ 15)$ 、 $F(0\ 0\ 15)$ 、 $G(0\ 50\ 15)$ 、 $H(20\ 50\ 15)$ 、 $I(40\ 50\ 5)$ 、 $J(50\ 50\ 5)$ 、 $K(50\ 50\ 0)$ 。滑面为一球面，球心坐标和半径分别为 $(39.5\ 25\ 33.77)$ 、 28.77 m，球面

与边坡表面交线如图中所示。采用一系列等间距的法向分别平行 X 轴和 Y 轴的平面切割滑体, 将滑体分成很多小条块, 如 11(b)所示, 这里平面间隔取

0.25 m, 共有 7 430 个条块。计算条块抗滑力和下滑力时, 假定条块的不平衡力只沿法向传递给相邻的两个条块。

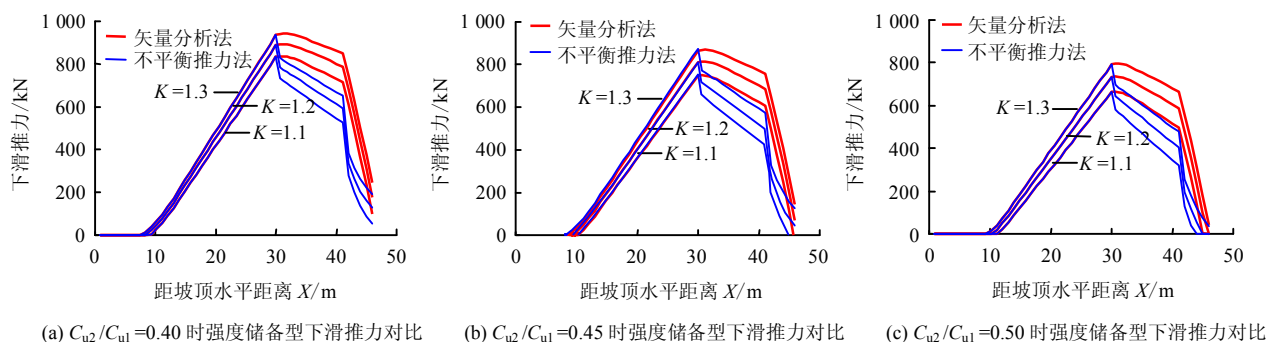


图 9 强度储备型矢量下滑推力与强度储备型剩余下滑推力对比 (算例 3)

Fig.9 Strength margin vector downslide thrust and strength margin residual downslide thrust in Example 3

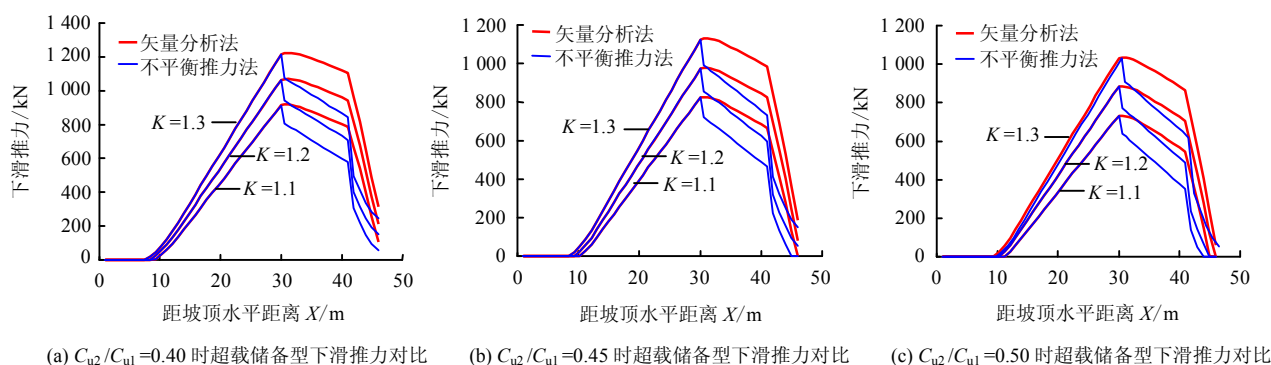
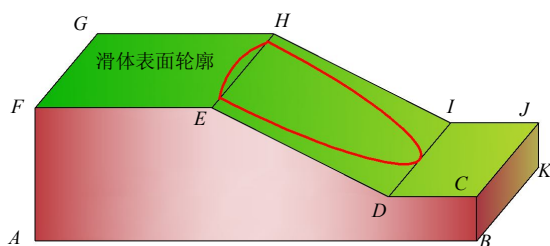
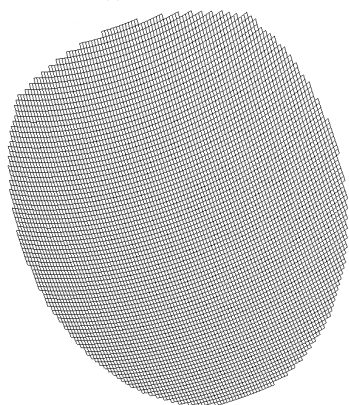


图 10 超载储备型矢量下滑推力与超载储备型剩余下滑推力对比 (算例 3)

Fig.10 Overload margin vector downslide thrust and overload margin residual downslide thrust in Example 3



(a) 边坡三维形态



(b) 底滑面网格

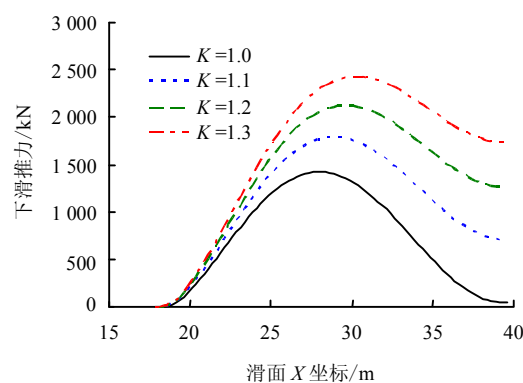
图 11 三维边坡算例模型

Fig.11 Calculating model in Example 3

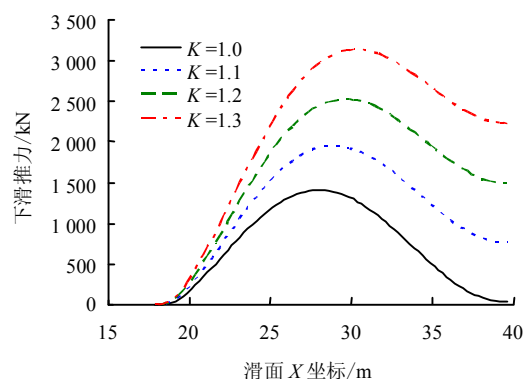
分别计算了安全系数 K 为 1.0、1.1、1.2、1.3 时的矢量分析法强度储备型和超载储备型下滑推力, 如图 12~14 所示。图 12 为不同横断面处矢量下滑推力的大小。图 13、14 为滑面各个条块处的矢量下滑推力, 条块方位如图中坐标方向所示。图 13 中, $K=1.0$ 时滑面中部条块处矢量下滑推力最大, 滑面边缘位置处条块矢量下滑推力基本为 0, 在横向上($X=\text{const}$)下滑推力大小呈对称分布; 随着 K 的增加, 各个条块处的矢量下滑推力均有增加, 最大矢量下滑推力位置逐渐向靠近坡脚处的条块转移, 坡脚处的矢量下滑推力有较大幅度增加, 这些特征与学者们对边坡已有的认识保持一致。图 14 呈现出相同的规律。

借助图 13、14 所求的各条块处的矢量下滑推力, 可以设计出更为合理的边坡支护方案, 就该算例而言, 在横向上($X=\text{const}$)靠近中部位置应设置较大支护力, 而在两端可以设置较小的支护力, 这是以往采用二维下滑推力计算方法无法做到的, 表明

三维矢量下滑推力在实际边坡工程中应该有良好的应用前景。



(a) 强度储备型矢量下滑推力



(b) 超载储备型矢量下滑推力

图 12 三维边坡矢量分析法下滑推力计算结果

Fig.12 Vector downside thrust of the 3D slope

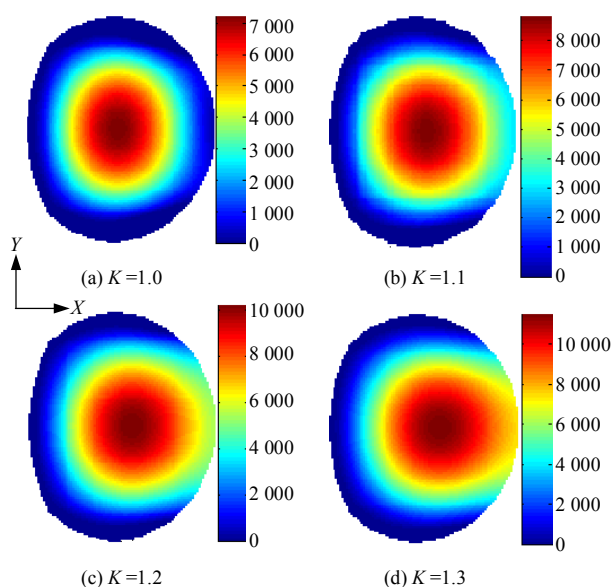


图 13 各个条块强度储备型矢量下滑推力 (单位: N)

Fig.13 Strength margin vector downside thrust of sticks (unit: N)

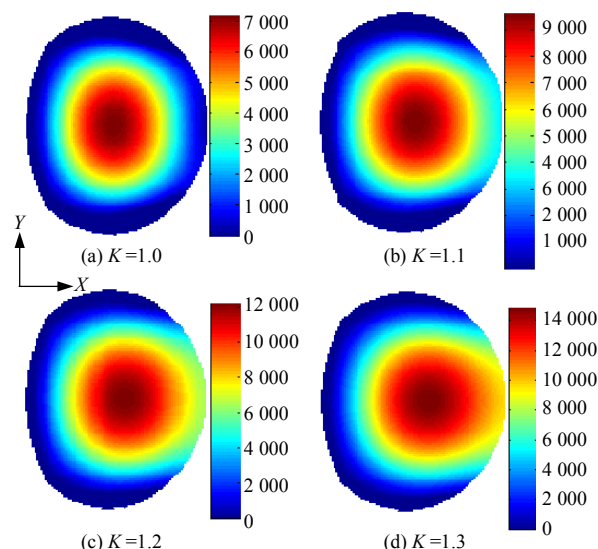


图 14 各个条块超载储备型矢量下滑推力 (单位: N)

Fig.14 Overload margin vector downside thrust of sticks (unit: N)

4 工程实例分析

某工程边坡位于我国西部某地区,该地区内地质灾害严重,存在较多的古滑坡,由于受地形条件的限制和对外贸易的需要,当地政府的主要办事机构及其大多数居民的房屋修建于地形相对较缓的古滑坡群上,近年来随着该地区小气候环境的改变和城镇建设的迅猛发展,古滑坡局部出现复活,地质灾害的活动明显加剧,虽然古滑坡在天然状态下整体仍属稳定,但在古滑坡的前、侧部位临空条件较好的地段出现了众多的浅层土体新滑坡,造成众多建筑物毁坏,地面沉陷,城镇的基础建设不能正常使用,某些部位老的地质灾害尚未得到根治,新的滑移又在不断形成,严重威胁到当地人民的生命财产安全。这里选最为典型的 A 滑坡进行研究。

4.1 边坡地质概况

区内地层较为单一,基岩以前震旦系变质岩为主,表部为第四系块、碎石土。滑体土主要由第四系崩塌积等松散堆积物组成,为块碎石土,褐黄色~灰色,角砾土和砂土充填,潮~潮湿,松散~密实。块碎石岩性主要为黑云斜长片岩、二云斜长片岩,其次为石英片岩,偶见榴黑云斜长片岩,与周围出露的基岩岩性一致。滑坡滑带基本位于呈浅灰色~青灰色残坡积粉质黏土或粉土层中,该层中常包裹全风化岩石角砾、石英和石榴石矿物砂粒,滑带为多层,最大埋深为 72.5 m,平均埋深约 53 m,稍湿,硬塑~可塑,硬结程度与含水率关系密切,滑带中后部埋深大,前部较小,滑面呈折线型,略有起伏。滑坡并未发生长距离的滑移。滑床为碎块石土和基

岩。地下水为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水, 补给来源主要为大气降水和冰雪融水, 没有统一、整体的地下水位。

4.2 计算模型与条件

根据工程地质资料, A 滑坡典型剖面计算模型如图 15 所示。考虑了 3 种工况: 自重工况、降雨工况、地震工况下的强度储备型和超载储备型矢量下滑推力, 同时计算了相应工况的两种剩余下滑推力。其条块划分情况如图 15 所示。材料强度参数如表 3 所示。地震烈度为 VIII 度, 根据公路工程抗震设计规范^[36]并乘以重要性修正系数和综合影响系数后可得地震载荷的水平加速度系数为 0.085。

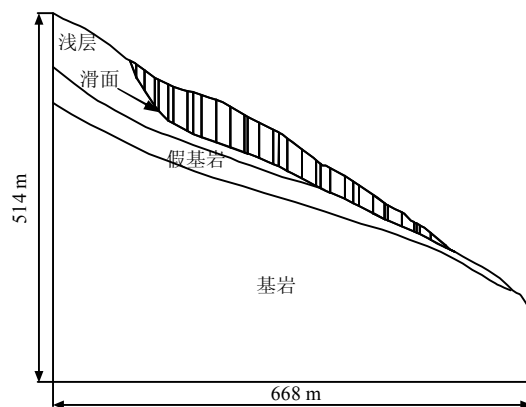


图 15 A 滑坡典型剖面
Fig.15 Model of A slope

表 3 A 滑坡稳定性强度参数
Table 3 Material parameters of slope A

状态	滑体			浅层			假基岩			基岩		
	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
天然状态	21	21	29	21	28	32	21	40	36	24	6 000	45
饱水状态	22	16	27	22	24	30	22	36	34	25	5 500	42

4.3 计算结果

计算结果如图 16~18 所示。图 16 为 3 种工况的整体下滑趋势方向(θ)变化情况, 作为对比也显示了滑面倾角(α)的变化情况。从中可以看出, 3 种工况滑面各处的整体下滑趋势方向一致, 地震工况的整体下滑趋势方向略微低一些。 $X < 100 \text{ m}$ 时, 滑面由陡变缓, 滑面倾角 α 由 69° 剧烈减小到 20° , 整体下滑趋势方向 θ 由 69° 下降到 35° , 降幅小于 α ; $X > 100 \text{ m}$ 时, 滑面倾角 α 在 18° 到 33° 内起伏变化, 整体下滑趋势方向由 35° 缓慢减小到 26° 并保持不变。表明整体下滑趋势方向能够反映滑体滑动方向的变化情况, 但不会像滑面倾角那样出现剧烈变化, 从方向这一点来说, 矢量下滑推力较剩余下滑推力有很好的改善。

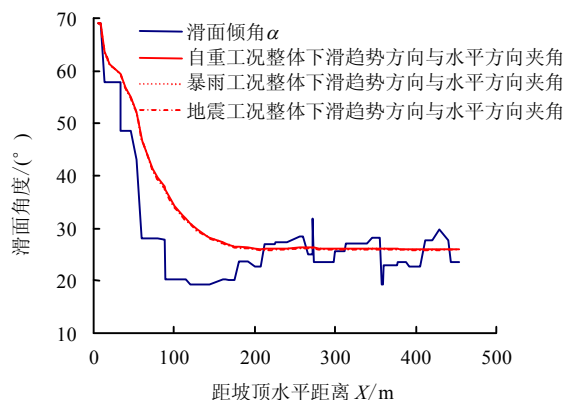


图 16 整体下滑趋势方向与滑面方向对比
Fig.16 Vector sum sliding direction (θ) and angle(α) of slip surface

图 17、18 分别为强度储备型和超载储备型矢量下滑推力与相应的剩余下滑推力曲线。对于自重工况、暴雨工况、地震工况分别计算了安全系数 $K = 1.2 \sim 1.3$ 、 $1.1 \sim 1.2$ 、 $1.0 \sim 1.1$ 的下滑推力曲线。图中矢量下滑推力曲线与剩余下滑推力曲线变化趋势基本一致, 最大下滑推力出现的地方几乎相同, 坡脚处的下滑推力差别较小, 同一种工况, 安全系数越大, 矢量下滑推力越大。结合图 16 进行分析: 在距坡顶水平距离 $X < 53$ 时, 整体下滑趋势方向 θ 与滑面倾角 α 差别不大, 矢量下滑推力曲线与剩余下滑推力曲线几乎相同; 在 $53 < X < 110$ 时, 整体下滑趋势方向 θ 与滑面倾角 α 差别较大, 矢量下滑推力与剩余下滑推力有较大的差别, 由于滑面倾角 α 的剧烈变化, 剩余下滑推力曲线呈现出 2 个类似锯齿的形态, 而整体下滑趋势方向 θ 虽然也在变化, 但要缓和很多, 矢量下滑推力增加速度变缓达到最大下滑推力后开始减小; 在 $110 \text{ m} < X < 454 \text{ m}$ 时, 整体下滑趋势方向 θ 与滑面倾角 α 相差不大, 矢量下滑推力曲线与剩余下滑推力也比较接近, 不同之处是 α 在 $18^{\circ} \sim 33^{\circ}$ 内起伏变化且在某些位置处变化剧烈, 剩余下滑推力曲线上局部呈现类似毛刺或锯齿的形态, 安全系数越大, 这种形态越明显, 而整体下滑趋势方向 θ 缓慢减小后保持不变, 矢量下滑推力曲线相对较为光滑。

对于这 3 个工况, 当达到安全控制标准 (自重工况 $K = 1.30$ 、暴雨工况 $K = 1.20$ 、地震工况 $K = 1.10$)

时, 地震工况靠近坡脚处的4种下滑推力均最大, 因此, 可以按照此工况进行抗滑加固设计, 邵宁生^[20]指出, 强度储备型剩余下滑推力较超载储备型剩余下滑推力更符合实际情况, 矢量下滑推力也如此, 加固设计时可依据图17(c)中的曲线确定下滑推力大小, 方向可由图16确定, 当然依据矢量下滑推力的加固设计还有待进一步探讨, 这里不再详述。

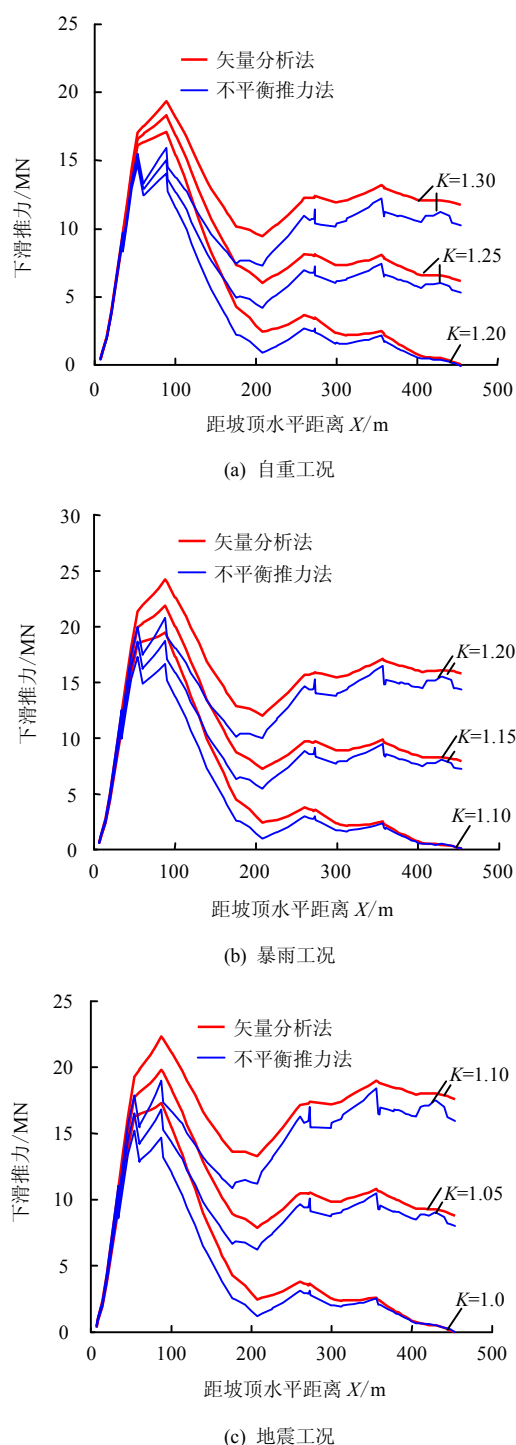


图17 强度储备型矢量下滑推力与剩余下滑推力对比
Fig.17 Strength margin vector downslope thrust and strength margin residual downslope thrust

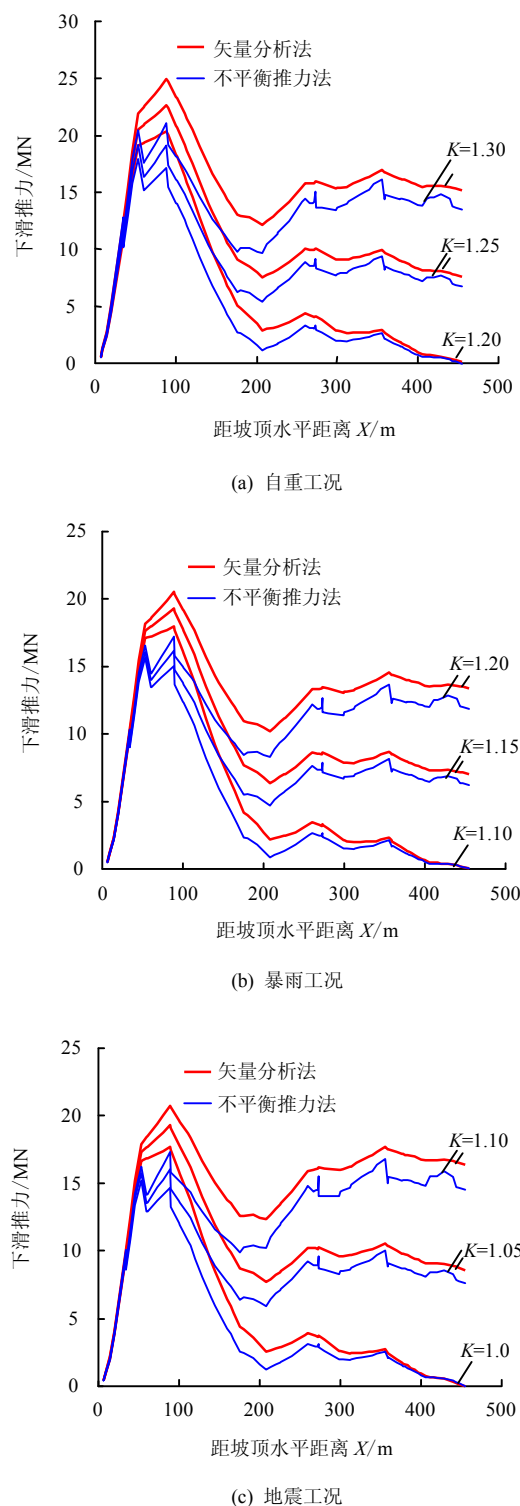


图18 超载储备型矢量下滑推力与剩余下滑推力
Fig.18 Overload margin vector downslope thrust and overload margin residual downslope thrust

综合以上对工程实例的分析表明, 矢量下滑推力能够得到类似剩余下滑推力的结果, 相对剩余下滑推力, 矢量下滑推力方向变化有较好的改善, 矢量下滑推力曲线也相对较为光滑, 其在工程实践中的应用效果值得期待。

5 讨 论

边坡体剩余下滑推力是边坡稳定性评价及抗滑加固设计的重要依据,而常用的不平衡推力法存在计算结果偏于危险的情况^[15]、折线型滑面倾角变化对其精度影响较大等问题^[16-17],而矢量下滑推力基于物理意义明确的矢量和法,该方法无需假定条间力的传递方向,下滑方向由坡体的整体下滑趋势方向确定,从理论上说,滑面倾角的变化对其计算精度的影响应该不大。为了对比分析矢量分析法与不平衡推力法计算结果,这里采用与不平衡推力法相同的应力场,对两个算例及一个工程实例进行了分析,分析结果验证了上面的结论。

实际工程的边坡都是三维的,而剩余下滑推力很难扩展到三维问题,即使能计算三维问题,则需要更多的条块力或下滑方向假设。三维矢量和法则根据坡体的真实应力经过应力矢量积分可得到滑体的整体下滑趋势方向^[32],不存在前述问题(文中已给出简单三维边坡算例),同时该方法所需的坡体应力场,不仅可以使条分法应力场,也可以使用有限元等数值方法的应力场,后者满足全部平衡及协调方程,相比不平衡推力法能够得到更为符合工程实际的矢量下滑推力,较现有的剩余下滑推力方法有较大的进步。对于牵引式滑坡存在剩余推力法安全系数结果为稳定时,而坡脚处剩余下滑推力大于0的矛盾。由于有限元法求解的牵引式滑坡滑面处的应力场,靠近坡顶的滑体一般不处于极限状态,而在靠近坡脚的滑体有可能处于极限状态,这样使用基于有限元应力场的矢量下滑推力则不会存在上述矛盾。综合以上分析,矢量下滑推力相对传统剩余下滑推力有其特有的优势,值得进一步在三维工程问题中研究应用。

6 结 论

(1) 本文基于矢量和法分析原理,得到强度储备型和超载型边坡矢量下滑推力求解公式。通过两个二维算例和一个工程实例分析表明,矢量法计算与不平衡推力法计算结果基本一致,验证了矢量分析法的合理性。算例3表明,三维矢量下滑推力结果合理,与边坡稳定已有认识一致。

(2) 矢量下滑推力与剩余下滑推力结果相似;矢量下滑推力方向为整体下滑趋势方向,相比剩余下滑推力,其方向变化更为光滑平缓;矢量法相对不平衡推力法受滑面倾角变化影响小一些;相比后者,前者的精度受滑面变化影响小;对于圆弧形滑

面,条块数相同时,矢量下滑推力相对剩余下滑推力精度更高。

(3) 矢量下滑推力可以使用精确的更符合实际工程的有限元法应力场,易于在三维边坡中应用;对于牵引式滑坡,可以避免剩余下滑推力法存在的矛盾。该方法具有非常好的应用前景,值得进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 胡云进,速宝玉,周维垣. 有地表入渗的岩坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1112—1116. HU Yun-jin, SU Bao-yu, ZHOU Wei-yuan. Analysis of the stability of rock slope with surface infiltration[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1112—1116.
- [2] 胡云进,速宝玉,詹美礼. 雾化雨入渗对溪洛渡水垫塘区岸坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 8—12. HU Yun-jin, SU Bao-yu, ZHAN Mei-li. Influence of atomized rain infiltration on stability of cushion pool slope of Xiluodu project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 8—12.
- [3] 严绍军,唐辉明,项伟. 地下排水对滑坡稳定性影响动态研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1639—1643. YAN Shao-jun, TANG Hui-ming, XIANG Wei. Dynamic effect of underground drainage on stability of landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1639—1643.
- [4] 孙聪,郑宏,李春光,等. 基于蚁群算法的严格最大剩余推力临界滑动面搜索[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 3021—3026. SUN Cong, ZHENG Hong, LI Chun-guang, et al. Critical slip surface search by using rigorous maximum residual thrust method based on ant colony algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(10): 3021—3026.
- [5] 许建聪,尚岳全,郑束宁,等. 不平衡推力法的弹塑性有限元改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4247—4252. XU Jian-cong, SHANG Yue-quan, ZHENG Shu-ning, et al. Elastoplastic finite element improvement of imbalanced thrust force method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4247—4252.
- [6] 陈胜宏,万娜. 边坡稳定分析的三维剩余推力法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(3): 69—73. CHEN Sheng-hong, WAN Na. Study on three-dimensional residual thrust method for slope stability analysis[J]. **Engineering Journal of Wuhan**

- University, 2005, 38(3): 69—73.
- [7] 刘忠玉, 陈少伟. 应变软化土质边坡渐进破坏的演化模型[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(2): 37—40.
LIU Zhong-yu, CHEN Shao-wei. Evolution model of progressive failure of strain-softening soil slopes[J]. **Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)**, 2002, 23(2): 37—40.
- [8] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264—2271.
XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2264—2271.
- [9] 许建聪, 尚岳全. 碎石土古滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 57—65.
XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Stability analysis of ancient debris landslide[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 57—65.
- [10] 许建聪, 尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 106—113.
XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 106—113.
- [11] 许建聪, 尚岳全. 降雨作用下浅层碎石土滑坡解体破坏机理研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 117—124.
XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Study on mechanism of disintegration and failure of shallow debris landslide under rainfall action[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2008, 17(3): 117—124.
- [12] 黄超, 王水林. 基于不平衡推力法的边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 613—615.
HUANG Chao, WANG Shui-lin. Slope's reliability analysis based on imbalance thrust force method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.1): 613—615.
- [13] 谭晓慧, 余兵, 王茂松, 等. 水库边坡稳定的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3427—3430.
TAN Xiao-hui, YU Bin, WANG Mao-song, et al. Reliability analysis of reservoir slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3427—3430.
- [14] 卢应发, 黄学斌, 刘德富. 边坡稳定分析条块力-位移法及其应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2787—2798.
LU Ying-fa, HUANG Xue-bin, LIU De-fu. Slice block force-displacement method of slope stability analysis and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2787—2798.
- [15] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 80—81.
CHEN Zhu-yu. Soil slope stability analysis: Theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003: 80—81.
- [16] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明, 等. 边坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 313—317.
SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren, TANG Bo-ming, et al. Accuracy and application range of imbalance thrust force method for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 313—317.
- [17] 郑颖人, 时卫民, 杨明成. 不平衡推力法与 Sarma 法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3030—3036.
ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, YANG Ming-cheng. Discussion on imbalance thrust force method and Sarma's method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(17): 3030—3036.
- [18] 张鲁渝, 郑颖人, 时卫民. 边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 177—182.
ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min. Discussion on slope stability analysis by imbalance thrust force method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(1): 177—182.
- [19] 易朋莹, 唐红梅. 对用传递系数法求滑坡稳定系数的商榷——以万州太白岩中东段欠稳定斜坡为例[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(1): 78—80.
YI Peng-ying, TANG Hong-mei. Discussion about calculating the stabilization coefficient through transferring coefficient method——Wanzhou Taibaiyan middle east segment unstable slopes as the example[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University**, 2004, 23(1): 78—80.
- [20] 邵宁生. 边坡下滑推力的计算分析[J]. 常州工学院学报, 2008, 21: 81—84.
SHAO Ning-sheng. The calculation and analysis of the slope downslope thrust[J]. **Journal of Changzhou Institute of Technology**, 2008, 21: 81—84.
- [21] 李荣建, 刘军定, 闫蕊, 等. 在边坡局部失稳中传递系数法与强度折减法的计算比较[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(3): 260—265.
LI Rong-jian, LIU Jun-ding, YAN Rui, et al. The Calculation comparison of transfer coefficient method with strength reduction finite element method in slope

- local instability[J]. **Journal of Xi'an University of Technology**, 2013, 29(3): 260—265.
- [22] GE Xiu-run, FENG Ding-xiang, GU Xian-rong, et al. Stability and deformation analysis of complex rock foundations of several large dams and hydropower stations in China[C]//YOSHINAKA R, KIKUCHI K. Rock Foundation: Proceedings of International Workshop on Rock Foundation. Tokyo: A A BALKEMA, 1995: 243—248.
- [23] NGUYEN V U. Determination of critical slope failure surface[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1985, 111(2): 238—250.
- [24] GU X R, LI J, GE X R. Analysis of stability against sliding of a gravity dam by means of microcomputer[C]//OLIVERIA E R. Proceedings of International Conference on Education, Practice and Promotion of Computational Methods in Engineering Using Small Computers. Guangzhou: [s. n.], 1987, 3: 474—477.
- [25] 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 Xiu-run. The finite element analysis for the subject of rock mass engineering using the personal computer[C]//The 1st Proceedings of the Symposium on Computational Rock and Soil Mechanics. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1987.
- [26] 葛修润. 岩石疲劳破坏的变形控制律、岩土力学试验的实时 X 射线 CT 扫描和边坡坝基抗滑稳定分析的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 1—20.
- GE Xiu-run. Deformation control law of rock fatigue failure, real-time X-ray CT scan of geotechnical testing, and new method of stability analysis of slopes and dam foundations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(1): 1—20.
- [27] GE Xiu-Run. The vector sum method: A new approach to calculating the safety factor of stability against sliding for slope engineering and dam foundation problems[C]//Proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering. Hangzhou: [s. n.], 2009.
- [28] 葛修润. 抗滑稳定分析新方法——矢量和分析法的基本原理及其应用[C]//第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2010.
- GE Xiu-run. A new method for anti-sliding stability analysis—basic principal of vector sum analysis method and its application[C]//The Proceedings of the 11th National Conference on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2010.
- [29] GE X R. Vector sum method: A new method for anti-sliding stability analysis[C]//Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. Beijing: [s. n.], 2011.
- [30] 刘艳章. 边坡与坝基抗滑稳定的矢量和分析法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- LIU Yan-zhang. Vector sum analysis method of slope and dam foundation stability against sliding[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [31] 吴振君, 葛修润. 求解边坡矢量和安全系数的条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 2337—2342.
- WU Zhen-jun, GE Xiu-run. Solving vector sum factor of safety of slope by method of slices[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 2337—2342.
- [32] 郭明伟. 边坡与坝基抗滑稳定矢量和分析法的研究及工程应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.
- GUO Ming-wei. Study on the vector sum analysis method of slope and dam foundation stability against sliding and its engineering application[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [33] 苏爱军, 冯明权. 滑坡稳定性传递系数计算法的改进[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(3): 51—55.
- SU Ai-jun, FENG Ming-quan. Improving on transfer coefficient method applied to landslide stability analyse and landslide thrust value calculation[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2002, 13(3): 51—55.
- [34] 中华人民共和国建设部. GB 5007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 5007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [35] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Géotechnique**, 1999, 49 (3): 387—403.
- [36] 中华人民共和国交通运输部. JTG B02—2013 公路工程抗震规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG B02—2013 Specification of seismic design for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.