

土坡稳定分析应力状态新方法的过程解析

王国体^{1,3} 王婉娣²

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009;)

(2. 安徽建筑工业学院建筑学院, 合肥 230022; 3. 安徽水利水电职业技术学院, 合肥 231600)

[摘要] 依据土体应力状态、计算边坡稳定安全系数的思想,结合对土体根本性质的认识,对基本假定、公式推导过程和工程应用进行了详细的说明。由于土坡稳定安全系数的计算公式在理论分析依据是严密的,推证得到的计算公式是正确的,所以在工程实用是可靠的。文章为该方法的工程应用和深入开展相关的研究奠定坚实的基础。

[关键词] 土坡稳定分析方法;应力状态;稳定安全系数

[中图分类号] O34 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)01-0052-04

1 前言

近80年来,建立在极限平衡分析基础上的土坡稳定计算的方法,一直是在沿着假定滑动面(圆弧)、条分算法的思路研究和发展的,其派生出来的计算公式之多可以说首当其中^[1-6]。虽然安全系数的概念依然是当今工程界对各类土坡进行稳定评价和边坡防护的规范方法中的重要依据,但由于土的组成受生成历史、地域成因、环境条件等方面的不同影响,从而带来了土的工程性质的复杂性、多样性和易变性,进而对于工程中的各类土坡应用和天然土坡稳定分析问题,依然是具有困难性、不确定性。^[1-6]

当前,各类条分法在边坡工程稳定性分析中,计算软件和设计程序起到了一定的支持作用,但在实际土坡稳定分析与滑坡治理的工程中,这类方法的可行性、可信性、可靠性,受到了种种的质问(如不同软件计算的差异、不同条分公式的差异等)^[1-3]。虽然经历一代代学者潜心努力地条分法进行逐步修缮以后,对其计算结果的差异性质疑依然如故,究其原因,一方面是由于土的性质和工程环境的复杂

性,另一方面则是条分法本身理论背景和种种假定的欠缺^[3]。

笔者依据土体的应力状态参数和抗剪强度的理论上,初步给出了依据土体的应力状态,计算边坡安全稳定系数的相关公式^[1],现将该方法的系列公式的定义、假定依据和推导过程作一全面的说明,同时并对公式并作了修正,以期能为结合工程实际的应用中提供强有力度的依据和佐证。

2 边坡土体的应力状态对边坡稳定分析的影响

2.1 土体的应力状态和抗剪强度

土的复杂性除了在作为材料及其组成方面的表现之外,在工程应用方面其应力状态、力学性质的复杂性是分析、研究的重点。对于边坡稳定分析来说,应该以坡体的应力状态和土体的抗剪强度为主线,建立边坡的安全评价体系。例如,由平面地表到边坡的开挖过程,不能仅仅是土体重量卸荷,同时改变了边坡体面点的应力状态和应力的的大小,如超固结土体、正常固结乃至欠固结土体的应力状态的影响;坡顶的工程活动,不仅仅是坡顶荷载的简化作

[收稿日期] 2008-09-10

[基金项目] 安徽省自然科学基金项目(090414168)

[作者简介] 王国体(1951-),男,安徽太和县人,合肥工业大学教授,研究方向为岩土工程、基础工程与地下结构、地基与基础的数值分析等;E-mail:wgthome@126.com

用,也改变了坡体面点的应力状态和应力的的大小,如坡顶荷载对坡体的应力传播影响;坡体环境条件的改变(如降水、渗流作用等),同样改变了边坡体面点的应力状态。在边坡稳定分析中广泛应用的土的抗剪强度 Coulomb 定律,更是展现了强度与应力状态的关系,因此,边坡稳定分析,应该注重边坡的应力状态及其变化和和相关过程的分析 and 研究。

2.2 土性的历史性、记忆性和信息性

土性复杂的集体表征,应该体现在以下 3 个主要的宏观方面:即历史性、记忆性和信息性。土体的生成条件和过程全方位的表现出工程性质的历史性特点,如风化、搬运和沉积等,构成了各类区域、特殊、不同的工程土性;同一种土、不同土的工程性质不仅记录了土的形成的历史里程,也记录了历史上的受力过程,同时表现出不同的工程力学特性,如先期固结压力 Casagrande 求取的方法,来源、依据于该类土体对历史上受力的记忆和影响;土的信息性则表现在工程应用过程中各类土的不同力学性质和测取参数的差异,构成了各种工程土的应用力学参数在性质识别、采集选取、控制方法而区别,例如抗剪强度参数受土质、测试方法(如直剪、三轴仪上不同的试验方法)表现不同的大小,等等;在土的宏观复杂性中,从边坡工程应用的力学性质出发,土的应力状态应是土体历史性、记忆性和信息性的重要集合表征之一。

基于以上认识,笔者依据边坡应力状态变化的特征进行边坡稳定分析时^[1,4],把土体的应力状态和抗剪强度作为考虑的主线,尤其是记忆性,记录了所受的应力状态,提出了依此为依据的边坡稳定分析的相关公式。

3 以应力状态为依据的边坡稳定安全系数度量与计算公式

3.1 边坡安全系数的定义

对于平面土坡的稳定分析,通常基于安全系数评价边坡的安全性,假定圆弧滑动面法,边坡安全系数的定义为抗滑力矩与滑动力矩之比,从条分方法到微分到一点、乃至数值分析的应用,即土体内一点的安全系数定义为该点的抗剪强度 τ_f 与剪应力 τ 之比:

$$F_s = \tau_f / \tau \text{ 或 } = (c + \sigma \operatorname{tg} \varphi) / \tau \quad (1)$$

依据土的抗剪强度的 Morn - coulomb 准则,土体内一点的应力,展现出在任意方向上的剪应力的

大小不同,其抗剪强度的发挥也不同,即公式(1)所定义土体内一点的安全系数各个方向上也不相同,因此,带来了各类土坡稳定分析方法的复杂性、困难性和计算理论上的假定多样性。为了使土体内一点的安全系数的唯一性,本方法对安全系数的定义为:土体内任一点在确定的应力状态下,该点安全储备应该是该点的对应于最大剪应力的抗剪强度 τ_{fm} 和最大剪应力 τ_{\max} 之比,参见图 1 所示,即

$$F_s = \tau_{fm} / \tau_{\max} = (c + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi) / \tau_{\max} \quad (2)$$

对于坡体的安全储备,有:边坡稳定安全系数 F_s 的度量为坡体高度内抗剪强度的积累与坡体高度内最大剪应力的积累之比,即

$$F_s = \int_0^H \tau_{fm} dz / \int_0^H \tau_{\max} dz \quad (3)$$

式中, H 为坡底点距地面的距离,即土坡的高度或深度, m; 参见图 2 所示。

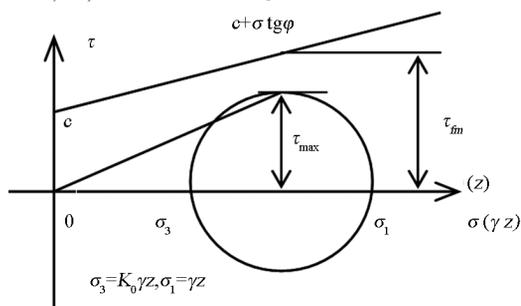


图 1 土体内安全储备计算示意图

Fig. 1 Sketch map of accumulated safety in soil

3.2 平面土体的安全储备公式

基于平面、均质土体的假设,必具有对任一深度 z 处,点的应力状态参数记录了历史受力的过程,应力状态一般描述为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \gamma z = \sigma_1 \\ \sigma_x &= K_0 \gamma z = \sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

土的抗剪强度的 Coulomb 定律公式(5)和 Mohr - Coulomb 极限平衡条件公式(6),

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (5)$$

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \operatorname{ctg} \varphi} \quad (6)$$

对于由地表平面任意深度 $H(z)$ 内的安全储备,可以依据土层的自重应力状态,由式(2)至式(6)得到公式(7),如图 2 所示,对式(7)进行了化简。

$$F_s = \frac{4c + \gamma z (1 + K_0) \operatorname{tg} \varphi}{\gamma z (1 - K_0)} \quad (7)$$

式中, K_0 为土体的初始应力状态和应力状态变化下的侧应力系数, 无量纲; z 为点距地面的距离, 即土层的深度, m; γ 土的平均重度, kN/m^3 。

公式(7)在应力和强度方面是十分严密的, 无论对于超固结土、正常固结土还是欠固结土, 只要测取、求得的土体的侧应力系数, 即可得到土体的抗剪安全储备。

3.3 开挖边坡的安全系数公式

开挖边坡土体的一点应力状态, 包括: 原平面土体记忆的应力状态、开挖部分土体的卸荷影响的应力两个部分。如图 2 所示。

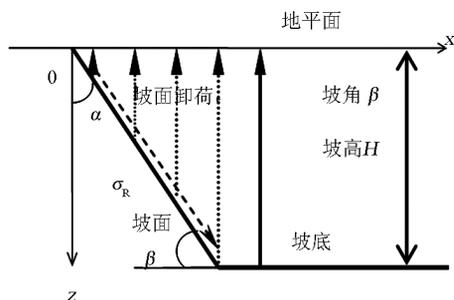


图 2 开挖边坡卸荷应力示意图

Fig. 2 Sketch of unload on slope by excavation

坡体的应力状态也就是这两个方面应力状态的响应和叠加。对于平面、均质土坡, 应用土的抗剪强度 Coulomb 定律和 Morn - Coulomb 摩尔 - 库伦准则, 主要前提和假定为:

- 1) 坡体未开挖的土体记忆保持原有的自重应力状态, 见图 2;
- 2) 开挖土体的自重应力卸荷的影响, 假定为公式(8);
- 3) 坡体的坡面所对应应力状态, 是 1) 与 2) 的应力状态的叠加;
- 4) 土体不能承受拉应力, 在坡面点上必有零应力状态, 因此, 满足主应力状态;

应用式(3)至式(6)和(8), 则边坡安全系数计算公式为公式(9)。其中, 笔者公式(9)对文献[1]的式(7)进行了化简和校正。

$$\sigma_s = K_0 \gamma z \sin^2 \beta \quad (8)$$

化简后

$$F_s = \frac{4c + \gamma H(1 + k_0 - k_0 \sin^2 \beta) \operatorname{tg} \varphi}{\gamma H[1 - k_0(1 - \sin^2 \beta)]} \quad (9)$$

式中, β 为土坡的坡角, ($^\circ$)。

3.4 假定公式(8)的基本依据

式(8)即影响边坡稳定分析所采用卸荷应力

$\sigma_s = \gamma z \sin^2 \theta$ 公式的依据。它来源于: 可以有坡面应力卸荷的平衡原理得到的 σ_R , 见图 2。 σ_R 代表了开挖土体卸荷的在坡面点的引起的应力状态变化; 开挖的坡角不同, σ_R 的大小和方向不同; 边坡的坡面线上的点, 等同于沿坡面的三角形单元体; 应将卸荷应力进行平面单元分解后, 即得式(8)。基于弹性半空间的假说, 由 σ_R 的形式可以按应力传播和平衡推导出鲍辛奈斯克(Boussinesq)附加应力解, 所以式(8)的假定符合土体卸荷的应力规律; 因而引证式(8)的计算形式的假定成立。考虑土体的非弹性材料、开挖边坡的特性以及卸荷特性和 2.2 的论述等, 采用 K_0 系数修正。

由于附加应力计算的基本解——Boussinesq 基本解, 它是迄今计算土体承受荷载计算附加应力的根本基础, 因此, 在开挖边坡土体的应力状态分析时, 卸荷应力的计算假定公式(8)在理论上严密的。

3.5 以应力状态计算边坡稳定安全系数公式的说明

由于引证了假定平面开挖土坡卸荷的点应力状态公式在理论上式(8)是严密的, 并且符合土坡、土体的基本性质, 理论依据体系完整, 所以开挖边坡的稳定安全系数公式(9)在理论上是严密的, 计算结果是正确的, 实际应用是可信的。

将公式(9)推广到一般土坡的应用时, 对以下三方面的典型参数: a. 对土体侧应力系数 $K_0 = 0, 1$; b. 对典型摩擦材料, 如抗剪强度参数分别为 $c = 0, \varphi = 0$; c. 坡角分别为 $0^\circ, 90^\circ$; 进行了公式的检验和讨论, 都具有相对应的物理意义和工程应用特定的意义, 具体论述可见文献[1]。一般土坡稳定分析, 只要研究测取、计算求得测向应力参数等 $K_0, \gamma, c, \varphi, \beta, H$, 应用公式(9)即可得到坡体的稳定安全系数。

由于土体的侧应力系数是反映土体固结、历史性、记忆性的重要信息参数, 式(9)反映了土体固结特性所导致对边坡稳定的重要影响, 这与土坡在实际工程中的表现是一致的, 如图 3 所示。

4 典型应用算例与对比

选参考文献[2]中的计算资料最为典型算例, 均质土坡的计算参数为: 坡高 $H = 20 \text{ m}$, 容重 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, 凝聚力 $C = 42 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 17^\circ$, 求坡角 $\beta = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 时相应的边坡稳定安全系数。

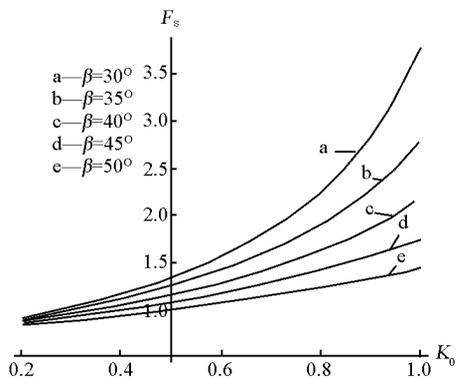


图3 不同侧应力系数对应边坡的安全系数
Fig. 3 Different side coefficient of stress from safety factor of slope

应用文章解析公式(9)的计算结果见图3,解析曲线的规律性表现为:a.反映了同一土体在同一坡角不变条件下,由于土性的固结、历史所影响的侧应力系数不同,边坡稳定安全系数不同,并随着侧应力系数的增长而增加,这与实际工程的概念是一致的。b.同一土性参数不变的土体,随工程应用的坡角增大边坡稳定安全系数减小,它符合工程应用的基本特征。这两点也是工程土坡稳定分析的根本规律。而现行的边坡稳定分析的各种方法只能反映后者,表现为不同的计算方法得到的安全稳定安全系数不同,参见文献[2]的表3、表4。而对前者规律特征却不能体现安全系数的不同。

因此,从边坡工程稳定分析角度出发,典型算例的计算结果表明,由于文章方法在理论体系上比较严密,不需要商业软件的支撑,解析公式(9)凸显出计算简便的优越性,类比当前各种安全系数分析方法的数值,也展现公式(9)计算结果的可靠性和正确性。

5 结语

1)文章从土的基本特性出发、以土体的应力状态为主线,考虑初始应力状态,开挖土体卸荷依据弹性体计算应力,依据土体抗剪强度 Coulomb 定律和 Morn - Coulomb 破坏准则,建立的边坡稳定分析安全系数的完整公式,由于该方法的基本假定少,在理论上是严密的,因而建立的解析公式是正确的、可靠的。

2)笔者等的方法完全改变了假定圆弧滑动方法试算边坡稳定安全系数的定义、计算方法,与现行边坡稳定分析安全系数计算的各类条分法对条间力的假定分布形式相类比,该方法统一了条间力分布假定,使其在公式推导上理论化、工程使用上参数化。

3)式(9)应用工程中土坡稳定安全系数的计算,既反映了土坡土体的根本特性,如应力历史、固结特征等,只要测取、计算相关参数,直接计算得到边坡的稳定安全系数,与现行的各类条分法相比,极大地减少计算工作量,凸显出工程应用的优越性。

参考文献

- [1] 王国体. 以土体应力状态计算边坡安全系数的方法[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 85 - 89
- [2] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 39 - 61
- [3] 陈祖煜, 汪小刚, 邢义川, 等. 边坡稳定分析最大原理的理论分析和试验验证[J]. 岩土工程报, 2005, 27(5): 495 - 499
- [4] 王国体. 应力重塑方法及其工程实现[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 750 - 753
- [5] 王国体, 赖焕枫, 陈登伟. 边坡应力重塑方法的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 729 - 732
- [6] 王国体. 地基基础计算与程序设计[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 67 - 85

(下转 60 页)