

应力重塑方法及其工程实现

The new method of remolding stress on slope and its application in practice

王国体

(合肥工业大学 土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009)

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)06-0750-04

作者简介: 王国体(1951-), 男, 安徽太和人, 教授, 主要从事岩土工程的教学与科研工作。

0 引言*

工程中的一切构筑物、构件, 在其组成材料的一定强度许可应力范围内, 当其保持稳定形式时, 必有稳定的应力状态。一旦这一稳定所对应的应力状态被破坏或被其他应力状态所取代, 其必会寻求这一新的应力状态下所具有的稳定形式, 当新的应力状态超越某一界限许可时, 其必处于破坏状态, 破坏状态的完成结束, 也是新的稳定形式的呈现, 这显然是大家能接受的公理。换句话说, 处于稳定形式的一切受力构件、构筑物、物体, 必有其对应稳定的应力状态, 研究与利用它们不同形式稳定时的应力状态, 对保持其稳定或安全有着重要的工程应用意义。人们正在更好地运用这一原理为工程建设服务, 以实现工程建设的投资节省、安全运行和耐久可靠等。

1 工程活动的应力作用与过程

天然形成的地表和地形都是稳定状态和具有对应的应力状态, 只要没有受到其他应力作用, 它们必然保持所具有的稳定状态和对应的应力状态。人类为了向自然索取和自身发展的需要, 总是在不断地破坏着地表和地貌的组成, 破坏着其稳定的状态和对应的应力状态, 大范围的建筑物兴建和地下水的抽取, 大规模水库的兴建, 引起大范围的地层应力改变和可能的地层下沉。局部的、小范围的工程活动, 也改变着其所对应的原本处于稳定的应力区域。处于有地表平面的任何土体本身, 无论是新填软弱土, 还是沉积老黏土、砂土, 毫无疑问它们处于稳定的状态。以工程中的开挖为例, 原本稳定及其对应的应力状态受到了破坏, 土坡保持稳定的状态只有靠土体的强度发挥来维持, 虽然建立了土坡稳定分析的种种方法和评价体系^[1-3], 却没有系统地建立考虑开挖卸荷的过程所对于原本稳定时应力变化影响的计算方法和稳定的评价影响。建筑工程中的基坑修建, 水利工程中开挖渠道, 由于原本稳定的应力状态受到了破坏, 新的应力状态的出现将导致

土体寻找所对应的稳定状态。对于永久性的渠道坡体工程建筑, 在长期的使用中, 一般说来多会出现不同程度上的滑坡。以安徽淠史杭灌区为例, 60年代开挖的淠史杭灌区的主、分干渠, 到目前为止, 已有1200多处发生了滑坡。虽然形成滑坡的原因是多方面的, 如水文、地质、气象、气候、风化、人类的工程活动等, 但最为重要的是应力状态的改变和发展的结果所致。

典型开挖工程的滑坡成因有

(1) 开挖工程的地质土层应力释放后对形成的坡面应力状态的影响。

(2) 工程的堆载(堆放土)对坡体的应力扩散传播影响。

(3) 应力的释放对坡体临坡面土层强度的时间滞后影响。

(4) 自然环境对坡体土层强度的风化侵袭、交融变化所引起的应力效应。

(5) 环境水的渗透作用对坡体应力与强度的影响。

总之, 外部的条件及其所引起的内部应力的变化和发展改变过程, 是导致滑坡发生的主要因素。

2 土体开挖应力释放对坡体的作用

处于平面半空间应力状态土体是稳定的, 其应力状态用满足半无限大平面弹性体系来描述, 设土体均质, 则自重应力体系为

$$\tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_x = \gamma Z, \quad (2)$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = K_0 \gamma Z. \quad (3)$$

式中 σ_x 、 σ_{xz} 、 K_0 、 γ 、 Z 依次为竖向自重应力、侧向自重应力、侧压力系数、土体容重和距地表的深度。

对于一开挖工程, 其最终开挖后的应力释放可以用图1所示的应力图形来近似模拟。

2.1 挖坡工程对坡体应力释放的弹性影响

如图 1 所示开挖释放荷载的土体自重应力,按目前计算土体附加应力的弹性理论 Boussinesq 解答及 Flamant 的平面问题的系列解答,可以计算出在坡面处开挖土体荷载的所引起的应力释放值的大小^[4],当边坡为 1:1 时,参见图 2,卸荷土体所引起的应力如表 1 所示。

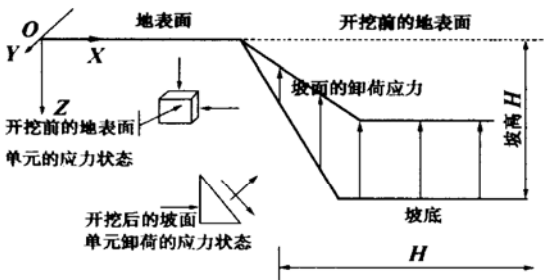


图 1 挖坡前后的坡面应力单元

Fig. 1 The stress in unit on slope before and after excavation

表 1 边坡 1:1 时外荷为土体自重引起的坡面应力

Table 1 The stress on slope caused by soil weight excavated

坡面竖向深度	竖向自重应力/ γH	坡面卸荷引起应力(-)/ γH	坡底宽度为 2H 时卸荷应力(-)/ γH
0	0	0	0.257
H/4	0.25	0.266	0.176
H/2	0.50	0.302	0.124
3H/4	0.75	0.167	0.097
H	1.0	0.053	0.088

2.2 挖坡工程对坡体的变形影响

考虑带有梯形荷载的自重应力荷载卸荷作用的半平面无限大体系,经简化为集中力系统的等效作用后,计算它们在坡面处产生的弹性位移,其结果见表 2。

表 2 边坡 1:1 时外荷为土体自重所引起的坡面位移
($E_s=5600\text{ kPa}$, $\mu=0.56$)

Table 2 The displacements of inclined surface after excavation with slope 1:1

坡面竖向深度	坡面位移/m	坡底位移/m
0	0	0.600
H/4	0.047	0.231
H/2	0.098	0.240
3H/4	0.335	0.084
H	0.133	-0.402

依据以上得到:应力释放值较大的区域是潜在的膨胀值较大的区域,也应该是滑坡的潜在危险区域。

2.3 开挖工程对坡体的强度削弱与降低

开挖后的坡体,其表面坡线应力状态的真实结果是零应力状态。对于坡面上任意的单元体,按土的抗剪强度的库伦(Coulomb)定律,其沿坡面线方向上单位深度的抗剪强度为

$$\tau_t = c + \gamma \tan \varphi \cos \beta, \quad (4)$$

式中 τ_t 为土坡坡面单元在坡面方向的抗剪强度; γ 为坡面土体单元的天然容重; c 、 φ 为坡面土体的黏聚力、内摩擦角; β 为坡体的水平倾角。

考虑坡面原有土体原重的应力状态和开挖土体卸荷应力的共同影响,则在坡面上沿坡面线方向的土体抗剪强度的降低为

$$\tau_t = \gamma Z [(\sin \beta + K_0 \sin \beta) + (\cos \beta + K_0 \sin \beta) \tan \varphi], \quad (5)$$

式中 K_0 为坡面土体的侧压力系数; Z 为挖坡到原地面线的深度,其他同前。

因此可以得到,土体的卸荷应力区域也应是原土体强度的减低区域。

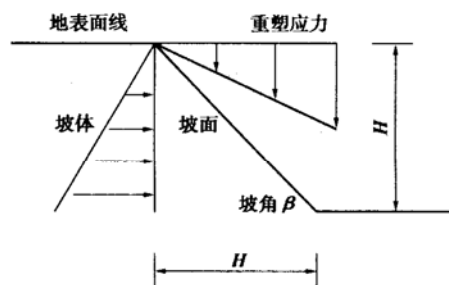


图 2 坡体各部分参数和应力重塑示意图

Fig. 2 Parameters in various part of slope and remolding stress

3 应力重塑方法的工程实现与发展

3.1 应力重塑治理滑坡的基本原理

依据以上挖坡对坡面应力和强度影响的基本分析,造成滑坡的主要内因是由于挖坡后的卸荷应力及其影响到土体抗剪强度的逐步缓减向降低发展,坡面土体呈现零应力下的超固结膨胀状态。在外界条件如降水等引起的渗流交替延续积聚和积累、气候气象的风化积累作用、加之可能的坡肩土方堆载等的附加应力影响(以及生物和工程活动的影响等),经过一段时间以后,陆续出现滑坡或险段应该是不可避免的。

由于具有半空间平面的任何土体,在自重应力的状态下必定处于稳定的。设想:由于工程的某种需求,需要开挖基坑或渠道的边坡,如果在开挖、卸去或除去土方的重量之后,再设法通过工程措施回复或恢复该土方重量所对于坡面处引起的应力,并使该应力等于未开挖之前的、原本稳定的应力状态,坡面就会象未被开挖之前一样,保持原来稳定的应力状态,这就是应力重塑的基本原理。

滑坡的治理与防治,最重要的方面是抓住内因,这个内因就是坡体及临坡面在开挖卸荷后的零应力状态及其相应的土体强度变化。而土体的强度又受土体的

历史应力状态所影响。因此,坡面土体的应力状态控制显得极为重要。采用特定的措施及手段,重塑原有土体的应力状态,使得挖坡后和挖坡前的土体应力基本一致,这样,挖坡后的土体就会一直保持原本天然土体的稳定状态,这就是应力重塑方法。同时,采用重塑应力的措施又使其有利于增加坡面土体的抗剪能力。

坡面重塑应力要通过适当的、合理的工程措施和方法才能得以具体实现。

3.2 应力重塑实现的工程应用

在人们的工程实践中,应力重塑的方法在工程的开挖过程中得到了广泛的应用。如开挖工程中所采用的对支撑方法。其支撑的过程就是重塑或者施加大于、等于原来土体所产生应力的过程。如图 3(a) 所示。

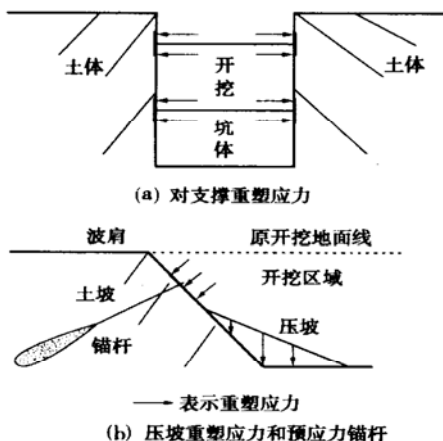


图 3 重塑应力的工程应用

Fig. 3 The method of remolding stress applied in practice

在基坑开挖和坡体施工中,为了增加已挖坡体的稳定性,在坡脚增加盖重的方法也是重塑应力的另一种形式。广泛应用于支护边坡和基坑的预应力锚杆也是在坡面重塑应力的一种形式(见图 3(b))。

3.3 应用膨胀锚实现坡面的应力重塑

如何实现、发展坡面应力重塑的这一概念,需要一定的可实施工程措施和条件,如支撑体系、锚杆的施工过程等。应用笔者已被国家授权的新型专利——膨胀锚^[5]也是一种可实施、方便、可靠的工程方法。

使用专利膨胀锚实现应力重塑方法的力学原理其工作原理如图 4 所示。可以由式(6)表达,式中, $P(X, Y, Z)$ 为膨胀锚作用区域 Ω 内土体应力分布使用函数; $p(\xi, \eta)$ 为重塑应力分布区域 Γ 的设计控制的应力函数;式中 n 为膨胀锚的膨胀枝个数。

$$\sum_{i=1}^n \iiint_{\Omega} P(X, Y, Z) d\Omega = \iint_{\Gamma} p(\xi, \eta) d\Gamma. \quad (6)$$

其主要实施的过程表述如下:

(1) 通过施工机械钻孔等成孔,人工的方法将带

有拉杆的膨胀锚(两种工作方式)置放到设计指定的深度位置处。

(2) 膨胀锚由于只能前进,不可倒退,实现自我各枝的膨胀和扩张功能,依靠土体接触处的自重应力作用,使得膨胀锚具有产生很大的抗拔能力。

(3) 膨胀锚头的抗拔能力通过锚具的拉杆作用转移到坡面上,具体通过施加预拉力后使其反作用力施加于坡体的表面,达到所需的应力重塑要求。

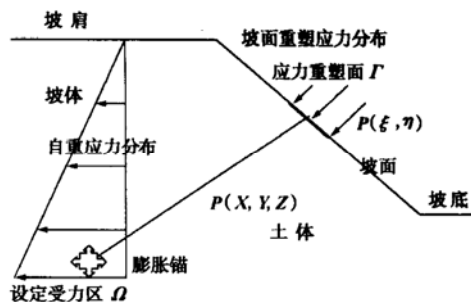


图 4 膨胀锚重塑坡面应力实施原理示意图

Fig. 4 The principle of expanding anchor in slope

3.4 应力重塑的工程实施的分析

传统的滑坡治理的方法主要是:依据土坡稳定分析的基础方法上,其表现为利用结构措施的辅助作用增加土体的抗滑能力,如支撑挡墙、抗滑桩、抗滑刚架、树根桩、板桩墙、土钉墙或喷面混凝土等(以及包括施加锚杆相配合),这些措施的主要出发点是发挥结构措施本身的结构、强度特点,力图弥补滑动土体的本身抗滑能力不足。

应力重塑方法本身的重点是恢复坡体在开挖以前的稳定应力状态,应用膨胀锚主要是借助于坡面以外非影响区的土体自重应力,经拉杆传递到坡体表面。类比锚杆应用来说,①不同于锚杆主要是沿长度方向与坡面土体结合产生的摩擦力;②锚杆与借助土体产生的摩擦力需要相对位移的配合,这一位移也是坡体稳定所不希望的;③锚杆与土的结合产生摩擦力在施工过程中需要灌浆控制。而膨胀锚可以克服这些不足,又不需要进行灌浆,而且具有增加结构措施抗滑能力效能,并随着滑坡可能性的增加这种抗滑能力愈强,这样就大大增加了土坡的安全因素;同时,施加预应力措施也可以成为疏导渗流和抵御自然交融风化土体的措施于一体;这样,应力重塑方法的工程应用过程主要是膨胀锚(可设计加工多种应用型号、现场组装)应用的施工设计。因而施工工艺不复杂且易于控制、工期短,类比其他的治理措施,其造价因此较低。

4 结 论

(1) 应力重塑概念是治理与防止滑坡的一种概念新提法,其主要原理是恢复挖坡前期的原本稳定的应力状态为依据,其工程措施的具体实现又有加强土体抗剪强度的趋势和对于坡面土体抵抗气候的交融变化所带来的风化影响。

(2) 配合应力重塑概念所实施方法的工程应用新措施是新型专利膨胀锚,其特点是通过自身的膨胀作用产生很大的抗拔力,依靠拉杆传递到坡面上,产生所需要的重塑应力,是坡体的土体恢复到未被开挖之前的稳定应力状态或处于压缩固结、提高强度的稳定状态。

(3) 本文所提出的滑坡治理的应力重塑方法,类比其他结构措施如抗滑桩、抗滑刚架、挡土墙、锚杆、树根桩等,既有重塑应力回复或加强了土体本身的强度的作用,又具有结构措施增加抗滑的功能,可以起到标本兼治的效果。

(4) 采用应力重塑方法治理滑坡的工程造价,由于膨胀锚的应用,可远低于其他治理方法的投资,开展进一步相关研究,逐步完善本方法的设计与计算水平,对于治理滑坡、进一步应用推广有着重要的作用。

参考文献:

- [1] 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,1991.67-86.
- [2] 王国体.高填土公路路堤的稳定性分析[J].岩土工程学报,1994,17(1):99-103.
- [3] 王国体,陈明昭.土坡稳定可靠度指标分析[J].合肥工业大学学报,2002,25(3):398-402.
- [4] ФЛОПНН В А.土力学研究原理(第一卷)[M].北京:中国工业出版社,1965.74-75.
- [5] 王国体,等.膨胀锚专利证书[P].中华人民共和国国家知识产权局.ZL 002460998,2001.

中国建筑学会地基基础分会 2004 年学术年会 征文通知(第 1 号)

中国建筑学会地基基础分会 2004 年学术年会将于 2004 年 9 月在四川成都召开。会议期间,将总结、交流建筑地基基础领域设计、勘察、施工、检测、监理、施工机械以及理论研究方面的新技术和经验。将邀请有关专家,对国内重点工程、典型建筑、地基基础领域的热点技术问题做专题报告。

本届年会向全国勘察、设计、施工、科研单位以及大专院校发出征文通知,请地基基础分会理事以及地方土建学会组稿,开好本届学术会议。

征文范围:①建筑地基基础设计理论与实践的新进展;②建筑地基基础工程勘察技术的新发展;③地地基基础施工工艺及施工机械新技术及其应用;④地基基础工程检测、监测新技术及其应用;⑤地基处理、复合地基等理论与实践的新发展;⑥地基基础工程加固新技术及其应用。

征文时间:征稿截止日期 2004 年 5 月 30 日,论文采用激光打印并附软盘(见打印格式要求),寄:中国建筑科学研究院地基基础研究所陶玲;邮编:100013;地址:北京市北三环东路 30 号建研院;电子信箱地址:陶玲:taoling_cabr@163.com;杨军:yj_cabr@vip.sina.com;联系电话:(010) 84272233-2471,13601266323(陶玲),(010) 84271066,13901088756(杨军)。

本届年会组成论文编辑委员会,经专家审查后,选优秀论文编辑论文集(有正式出版号)。

论文排版要求

中国建筑学会地基基础分会 2004 年学术会议征文,打印编排格式如下:

- (1) 版心尺寸为五号字 40×40 行,不编页码。
- (2) 论文标题采用三号黑体,占 5 行,居中。
- (3) 作者姓名,小四楷体,作者单位、所在城市及邮编一起占一行,居中,五号楷体。
- (4) “摘要”、“关键词”采用小五黑体,摘要、关键词的内容采用小五宋体。
- (5) 正文采用五号宋体。
- (6) 正文中的小标题、序号一律用阿拉伯数字,顶格排,空一格后接标题名,字体采用小四黑体,占 3 行。
- (7) 图序、图名用小五宋体。
- (8) 表头用小五黑体,表格内文字用六号宋体。
- (9) “参考文献”居中,采用五号黑体,参考文献条目采用小五宋体,格式如下:(期刊)作者、文题、刊名、年份、卷(期)、页码。(专著)作者、书名、出版地、出版单位、年份。

(中国建筑学会地基基础分会 供稿)