

不同施工工况下的边坡稳定性变化研究

张录明 黄哲隽

中交一公局第四工程有限公司 广西南宁 530000

摘要: 在国内基础设施建设过程中边坡的稳定问题是比较突出的, 诱发边坡失稳的主要原因为坡顶过量堆载、未按要求及时施作防护体系、长时间降雨、边坡坡度过陡等。尽管因边坡稳定而引发的安全事故频发, 但是由于广大施工人员对不同施工工况下边坡的稳定性变化缺乏一个定量、清晰的认识, 所以实际施工过程中不按设计与方案施工的情况时有发生, 进而导致边坡施工安全风险增高, 本文以广西藤县西江二桥项目的路堑高边坡为依托, 以摩尔-库伦和弹性本构模型为基础, 以强度折减法为理论, 通过有限元数值模拟手段, 简要分析研究不同施工工况下的边坡稳定性变化情况; 研究表明, 不同施工工况下的边坡稳定系数变及锚索应力化较大, 边坡安全状态变化明显。

关键词: 不同工况; 边坡; 稳定; 变化; 有限元分析

Study on slope stability change under different construction conditions

Luming Zhang Zhejun Huang

CCCC No. 4 Engineering Co., LTD, Nanning, 530000

Abstract: In the process of infrastructure construction in China, the problem of slope stability is quite prominent. The main causes of slope instability are excessive pile loading at the top of the slope, failure to implement the protection system in time as required, long-term rainfall, and steep side slope. Despite the frequent safety accidents caused by slope stability, but because of the construction personnel on the stability of the slope under different construction conditions change quantitative, lack of a clear understanding, so often appear in the process of actual construction according to the design and the situation of the project construction, resulting in increased risks of construction safety of slope, this paper takes guangxi wuzhou of the high cutting slope of highway project as the background, Moore - cullen and elastic constitutive model as the foundation, on the theory of strength subtraction, through the finite element numerical simulation method, the brief analysis of the research of slope stability under different construction conditions change situation; Research shows that the slope stability coefficient under different construction conditions change and anchor stress is larger, the slope safety state change is obvious.

Keywords: Different working conditions; Slope; Stable; Change; The finite element analysis

引言

在基础设施建设领域, 边坡工程的设计与施工是非常常见的, 从公路工程的路堑开挖到建筑工程的基坑开挖, 再到市政工程的管沟开挖, 都会涉及到边坡工程的稳定性问题, 尤其是在周边建筑密集、环境复杂、地质条件不良、地下水较高、降雨频繁等情况下进行岩土开挖施工时, 关于边坡的稳定问题就显得尤为突出。

根据目前整个国内的基础设施建设情况来看, 因为受制于理论支撑方面的缺乏和实践经验方面的不足, 所以岩土工程开挖施工过程中开挖与防护的同步性控制依旧存在较多的不规范性, “先开挖多级、后一次防护”的情况时有发生, 由此而导致的安全事故触目惊心、教训也非常深刻。



图1 边坡失稳影像

但是尽管如此, 由于缺乏具体的数据支撑、不能直观的把控不同施工工况下的边坡稳定性变化, 所以人们往往存在侥幸心理, 在实际施工过程中为了追求进度和工效而忽视了边坡工程的稳定性问题。因此, 研究不同施工工况下边坡的稳定性变化程度及规律, 为具体的施工生产提供参考依据对确保边坡工程施工安全具有重要意义。

一、边坡稳定分级与评价

关于边坡的分级与稳定评价主要是采用定性和定量

相结合的方法进行，首先按照边坡的规模和发生破坏后造成的后果来确定出边坡的安全等级，然后根据不同的安全等级规定出不同的稳定要求，再通过实际的边坡稳定情况来判断是否能够满足现行规范的要求，若不能满足要求，则要及时采取调整开挖方案、加强支护结构、坡顶卸载、坡脚反压等应对措施。

边坡安全等级的划分可参照表 1 进行。

表 1 边坡稳定分级表

边坡类型		边坡高度	破坏后果	安全等级
岩质边坡	岩体类型为 I、II 类	小于 30m	很严重	一级
			严重	二级
			不严重	三级
	岩体类型为 III、IV 类	15m- 30m	很严重	一级
			严重	二级
		小于 15m	很严重	一级
土质边坡 小于 10m		10m- 15m	很严重	一级
			严重	二级
		很严重	一级	
		严重	二级	
		不严重	三级	

不同类别及安全等级下的边坡稳定安全系数 F_{ST} 要求如表 2。

表 2 安全系数表

类别		一级	二级	三级
永久边坡	一般工况	1.35	1.30	1.25
	地震工况	1.15	1.10	1.05
临时边坡		1.25	1.20	1.15

不同稳定系数下的边坡稳定性评价如表 3。

表 3 边坡稳定评价

稳定性系数 F_{ST}	$F_S < 1.00$	$1.00 \leq F_S < 1.05$	$1.05 \leq F_S < F_S >$	F_{ST}
稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

不同的技术规范与指导性文件当中关于边坡的分级与稳定评价会有不同的规定，鉴于边坡稳定问题的复杂性，在实际工程中建议采用多种方法进行评价，然后在结合周边环境、社会影响、以往经验的基础上综合确定评价结果。

二、工程背景

广西藤县西江二桥项目的路堑边坡高 74m，分 7 级进行开挖和防护，每级之间留有宽度为 1.5m 的边坡平台，第一至六级边坡开挖高度为 10m、第七级开挖到顶的高度

为 8m，第一级边坡坡度为 1:0.75、第六至七级为 1:1，边坡防护形式为锚索框架梁 + 重力式挡墙。其中锚索的竖向和横向间距为 3m、水平角为 20 度，单束锚索由 6 根直径为 15.2mm 的低松弛钢绞线组成，锚索长度为 30m、其中锚固段 10m，锚索张拉控制力为 520KN；坡脚设计有 C30 片石混凝土重力式挡土墙，挡墙高 6m、墙顶宽 1.5m。

边坡所处的地质条件由上到下依次为粉质黏土、全风化砂岩、强风化砂岩、中风化砂岩，各土层的岩土参数如表 4。

表 4 岩土参数表

土质指标	粘聚力 (Kpa)		内摩擦角 (。)		重度 (KN/m ³)		压缩模量 (Mpa)	容许承载力 (Kpa)
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和		
粉质黏土	30	27	19	17	18.4	18.7	5.31	160
全风化砂岩	35	33	22	20	19.0	19.2	7.10	220
强风化砂岩	60	50	28	26	25.3	25.5	8.30	450
中风化砂岩	100	90	43	40	27.0	27.1	11.21	1500

边坡断面如下图 2:

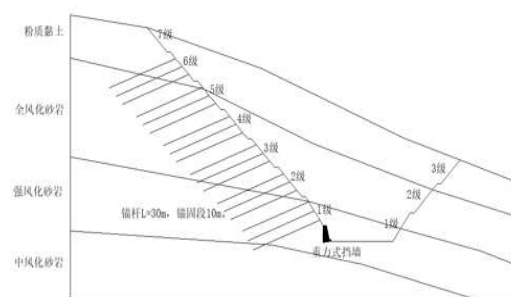


图 2 边坡断面图

三、分析模型建立

1. 本构模型及参数取值

在进行边坡稳定性分析过程中，各类材料的本构模型是不同的，一般而言常规的岩土建议采用“摩尔-库伦”本构模型，淤泥和砂土等则建议采用“修正摩尔-库伦”本构模型，而混凝土及锚杆则采用“弹性”本构模型、并注意勾选“结构”特性。

参数取值中最关键的参数为压缩模量、粘聚力、内摩擦角、天然重度，当考虑雨季期间的边坡稳定时还要输入饱和重度、渗透系数等相关参数；这些参数的取值需要根据工程地勘报告来确定，当地勘资料中缺少相关参数时可以参照岩土方面的规范综合确定。

2. 模型建立

边坡的稳定分析可以建立三维空间模型，也可以建立二维平面模型，但是当边坡比较复杂，设计有抗滑桩、挡墙、锚杆等相关防护结构时，需要采用三维空间模型，以便准确体现边坡的设计状态。

在进行模型建立时，可以再先在 AUTO CAD 中绘制出

边坡断面图，将其导入到 MIDAS GTS NX 软件中，然后通过扩展的方式建立无材料属性的几何模型。

三维几何模型建立好以后通过网格划分的方式将材料属性赋予相应的工程部位（如边坡土体、挡墙、抗滑桩、锚杆等），网格划分时建议采用“混合网格生成器”来进行划分，同时要合理确定网格单元的尺寸大小，一般单元大小在 1—2.5m 为宜，若网格太小的话虽然计算精度高、但是计算的时间会过长，甚至会出现几十个小时都无法计算完成的情况，若网格太大则会影响计算精度。

锚杆的建立可以采用“植入式桁架”来建立，该种单

元不需要人为进行节点耦合的设置与操作，当建立的杆件全部埋入土层时模型可以自动进行耦合匹配。同时锚杆也可以采用“锚建模助手”功能进行建立，在采用该助手功能建立时，只需要输入锚杆的三维坐标、注浆段长度、锚固段长度、张拉内力等参数的话锚杆便可自动生成，但是当对利用“锚建模助手”建立的锚杆进行复制时，其锚杆的预应力无法自动复制，需要对复制完成后的锚杆重新进行预应力的添加，锚杆建立完成之后可以通过显示预应力的方式来检查锚杆建立是否正确。

四、不同工况下的边坡稳定分析

1. 施工工况

在常见的边坡工程当中，原设计的方案一般为开挖一级防护一级，自上而下进行开挖的过程中每完成一级边坡的开挖后及时施作该级边坡的坡面防护、框架梁、锚索系统等防护结构，一方面降低降雨过程中雨水的渗入及冲刷，另一方面及时形成有效的锚拉支护体系、确保边坡安全。

但在实际施工过程中，出于施工进度、工效等方面的考虑，往往会出现连续开挖两级或是多级后一次性进行防护工程施工的情况，在这种情况下下坡的防护施工比较滞后，不能及时形成有效的锚拉支护体系，在一定程度上降低了边坡施工安全性。

2. 不同工况下的稳定性

土体采用摩尔-库伦本构模型、锚索及 C30 片石砼挡墙采用弹性本构模型，通过 MIDAS 有限元数值模拟分析，得到不同施工工况下不同阶段的边坡稳定、累计变形与锚索应力情况如表 5、表 6、表 7。

不同施工工况下不同阶段的边坡滑动面、变形情况云图如图 3、图 4、图 5。

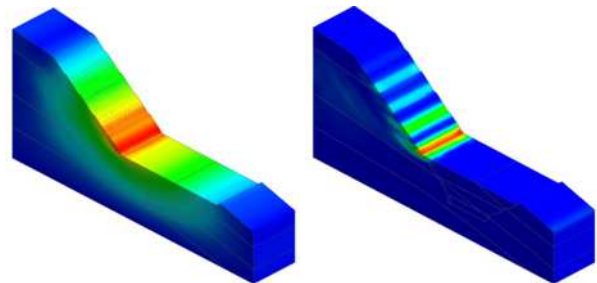


图 3 开挖一级防护一级时边坡的滑动面(左)与变形(右)

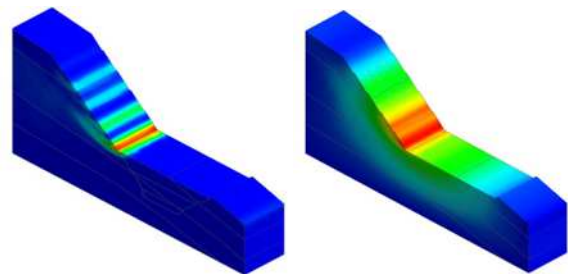


图 4 开挖两级一次防护时边坡的滑动面(左)与变形(右)

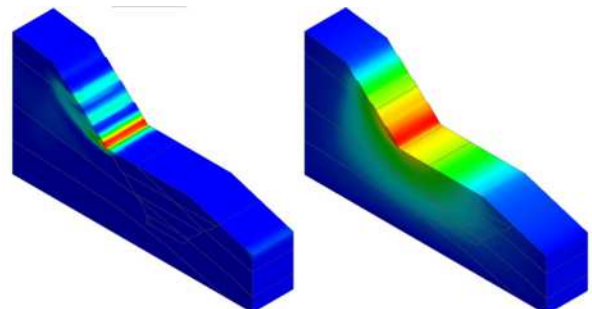


图 5 开挖三级一次防护时边坡的滑动面(左)与变形(右)

表 5 开挖一级防护一级工况下的边坡稳定系数、变形及锚索应力

项目 工况	挖 7 级	挖 6 级	挖 5 级	挖 4 级	挖 3 级	挖 2 级	挖 1 级	挖挡墙	浇挡墙
稳定系数 (F_s)	1.69	1.49	1.61	1.43	1.31	1.48	1.45	1.47	1.49
最大位移 (mm)	33.5	100.5	151.7	218.6	286.7	346.5	354.1	367.0	367.5
锚索应力 (Mpa)	—	—	572.3	652.2	797.9	1078.4	1070.8	1091.9	1093.9

表 6 开挖两级一次防护工况下的边坡稳定系数、变形及锚索应力

项目 工况	挖 7 级	挖 6 级	挖 5 级	挖 4 级	挖 3 级	挖 2 级	挖 1 级	挖挡墙	浇挡墙
稳定系数 (F_s)	1.69	1.48	1.28	1.45	1.20	1.48	1.31	1.48	1.49
最大位移 (mm)	33.5	100.6	156.3	217.9	328.4	389.6	401.6	416.1	416.7

锚索应力 (Mpa)	—	—	—	647.2	869.3	1044.9	1086.5	1093.1	1094.5
------------	---	---	---	-------	-------	--------	--------	--------	--------

表 7 开挖三级一次防护工况下的边坡稳定系数、变形及锚索应力

项目 工况	挖 7 级	挖 6 级	挖 5 级	挖 4 级	挖 3 级	挖 2 级	挖 1 级	挖挡墙	浇挡墙
稳定系数 (F_s)	1.69	1.48	1.28	1.13	1.31	1.18	1.16	1.48	1.49
最大位移 (mm)	33.5	100.6	156.3	256.6	288.8	460.9	485.6	495.3	495.9
锚索应力 (Mpa)	—	—	—	—	775.2	1479.9	1577.6	1588.1	1590.6

由表 5 可见, 在开挖一级防护一级工况下的最危险的阶段为开挖完成第 3 级边坡后, 安全系数为 1.31。

由表 6 可见, 在开挖二级一次防护工况下的最危险的阶段为开挖完成第 3 级边坡后, 安全系数为 1.13。

由表 7 可见, 在开挖三级一次防护工况下的最危险的阶段为开挖完成第 4 级边坡后, 安全系数为 1.20。

五、边坡稳定变化程度分析

绘制不同施工工况下不同阶段的边坡稳定系数及最大累计变形发展曲线如图 7、图 8。

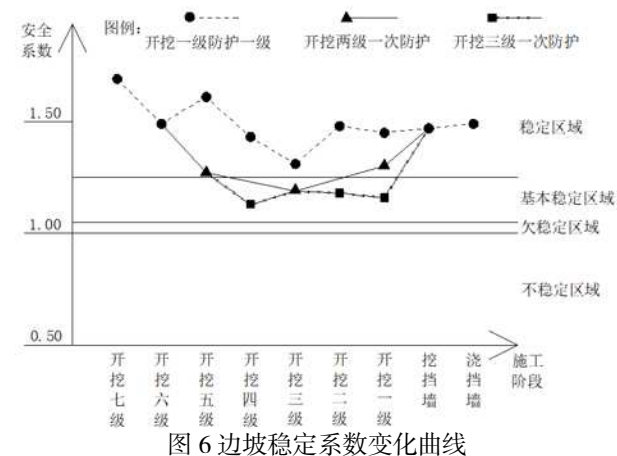


图 6 边坡稳定系数变化曲线

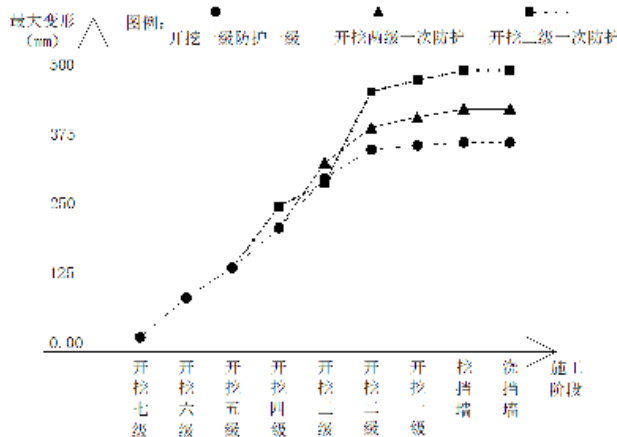


图 7 边坡累计最大变形发展曲线

通过上述发展曲线图可见, 按照开挖一级防护一级的方案进行施工时, 边坡的稳定系数位于 1.31-1.69 之间; 按照开挖二级防护两级的方案进行施工时, 边坡的稳定系数位于 1.20-1.69 之间; 按照开挖三级防护三级的方

案进行施工时, 边坡的稳定系数位于 1.13-1.69 之间。在不同的施工工况与施工阶段下, 边坡的稳定性变化非常明显, 若不及时施作防护体系, 边坡的稳定状态将由稳定向不稳定发生转变; 当发生降雨而导致边坡土体的重度增加、内摩擦角和粘聚力降低时, 边坡的稳定状态将进一步降低。同时也可以发现, 随着防护体系的滞后, 不同施工工况下的边坡最大变形也在逐步增大。

绘制不同施工工况下不同阶段的应力发展曲线如下图:

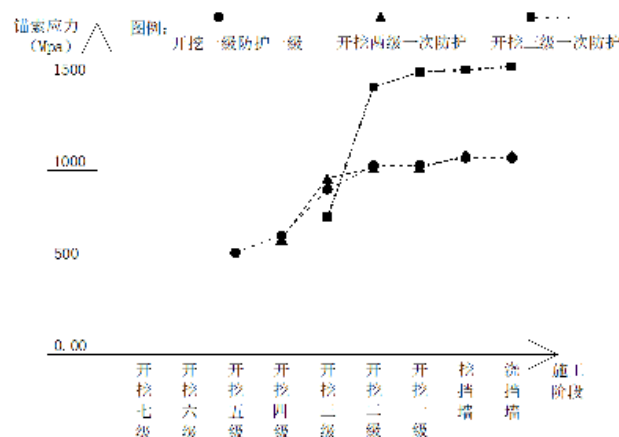


图 8 锚索最大应力发展曲线

同时也可以发现, 在不同的施工工况下锚索的应力变化较为明显, 在开挖一级防护一级的工况下锚索最大应力在 572-1093Mpa 之间, 应力变化较为平顺, 在开挖二级一次防护的工况下锚索最大应力在 647-1094Mpa 之间, 应力变化较为平顺, 在开挖三级一次防护的工况下锚索最大应力在 775-1590Mpa, 应力变化剧烈。随着防护体系施工滞后程度的增加, 锚索的最大与最小应力之差也在增加, 这也意味着边坡锚索的应力水平出现了不平衡转移, 锚索的受力状态在向着不利的方向进行转变, 可能会由此而导致部分锚索先行失效, 进而诱发整个边坡连续性破坏。

六、结束语

通过上述不同施工工况下不同阶段的边坡稳定性分析可以得到以下结论:

不同施工工况下的边坡稳定性变化较大, 防护体系滞后一级时整体稳定系数降低约 9%、滞后两级时整体稳定系数降低约 16%。

(2) 不同施工工况下的锚索应力水平有较大变化, 随着支护体系滞后程度的增加, 锚索的应力水平出现了不均衡转移, 最大与最小应力之差增加, 锚索受力趋于不利。

(3) 边坡的稳定评价应该更注重对定量指标的应用, 加强评价过程中的数据支撑、尽可能降低人为影响是得到合理评价结果的保障。

(4) 实际施工过程中要在结合勘察、设计、验算、评价的基础上综合确定边坡开挖与防护施工方案, 如果仅出于施工进度和工效方面的考虑而不及时施作防护体系的话会导致边坡稳定系数大幅下降, 发生安全事故的概率大幅增加。

(5) 边坡的稳定评价方法在不同的规范及指导性

文件当中有不同的规定, 由于边坡稳定的影响因素较多、评价指标的取值易受到评价人员的影响, 所以在实际进行评价的过程中有必要结合各类不同的评价方法进行综合评价, 同时要充分结合类似地质条件下边坡施工的成败经验。

参考文献:

[1] 《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013) 中国建筑工业出版社。

[2] 《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南》中华人民共和国交通运输部。

作者简介: 张录明 1989年9月, 男, 工程师, 大学本科, 主要从事公路工程施工技术研究。