

文章编号:1006-2106(2008)12-0033-04

黄土边坡稳定性分析方法研究*

李 帆¹ 杨建国^{2**}

(1. 河北工业大学, 天津 300130; 2. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘要:研究目的:为了寻求一种新的黄土边坡稳定性分析方法,解决极限平衡法不能将黄土垂直节理发育特性纳入到分析过程中的弊端,本文采用 ABAQUS 软件,利用有限元法对黄土路堑边坡进行数值模拟,在黄土边坡稳定性分析中对岩、土体内部节理、裂隙参数进行计算。

研究结论:利用有限元法对黄土边坡的稳定性进行分析,能够考虑黄土边坡垂直节理发育的特性,与极限平衡法相比,有限元法对黄土边坡稳定性分析具有明显的优越性。算例表明 ABAQUS 有限元软件中的节理材料模型适用于黄土边坡,ABAQUS 软件在黄土边坡稳定性分析方面具有良好的适用性。

关键词:黄土边坡;垂直节理;边坡稳定性;有限元分析

中图分类号:P642 **文献标识码:**A

Study of Analysis Method for Loess Slope Stability

LI Fan¹, YANG Jian-guo²

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: Research purposes: In this paper, a new method for analyzing loess slope stability is proposed, with which the vertical joints character of loess can be calculated. Using ABAQUS software and finite element method, the analysis of the loess slope is made through numerical simulation, and the calculation is made on the parameters of the joints and crack inner of rock or soil in the course of stability analysis of loess slope.

Research conclusions: This paper utilizes the finite element method to analysis the stability of loess slope, which can consider the vertical joints of loess slope. Compared with limit equilibrium method, the finite element method is much better in analysis of loess slope stability. The calculation example shows that the joint material model in ABAQUS is suitable for loess slope and ABAQUS finite element software applies to the study on stability of loess slope.

Key words: loess slope; vertical joints; stability of slope; finite element analysis

黄土是一种第四纪松散沉积物,在世界上分布较广,在世界各国中以我国西北地区黄土地层最厚,最完整。黄土的主要特征有:颜色为淡黄、褐黄或灰黄色;颗粒组成以粉粒为主;具多孔性;富含碳酸钙;垂直节理发育,具湿陷性等。由于黄土本身固有的特性,其边坡稳定分析方法目前仍然处于研究和探索的阶段,黄土路堑边坡的稳定性分析是黄土山区铁路面临的重要技术问题。

1 常见的黄土边坡稳定性分析方法

当前边坡稳定性分析与评价方法,基本上可概括为自然地质条件分析法、工程地质类比法、力学分析法 3 种。自然地质条件分析法只能得出定性结论,但它是其它各种方法的基础;工程地质类比法和力学分析计算法为半定量和定量的分析方法,可直接为工程设计提供所必需的数据,是边坡稳定分析论证的发展方

* 收稿日期:2008-10-06

** 作者简介:李帆,1975 年出生,女,讲师;杨建国,1973 年出生,男,高级工程师。

向。在实际工作中,3种方法应相互验证、彼此补充,才能得出准确的结论。

1.1 自然地质条件分析法

自然地质条件分析法是通过野外的大量观察和统计分析,必要时结合勘探、试验等手段,查明边坡体所处地形地貌条件,岩土的类型与结构特征,岩体主要结构面产状、性质与组合关系,水文地质条件等。对已有的斜坡变形和破坏的迹象进行深入研究,确定变形破坏模式,查明引起变形破坏的主导因素及滑动体边界条件,判定边坡稳定现状和发展趋势。对将要进行人工改造的边坡,以上述同样的方法,查明边坡体所处的工程、水文地质条件,并取得边坡稳定计算所需的岩土物理力学性质参数。

1.2 工程地质类比法

工程地质类比法主要是利用自然地质条件分析法所查明的边坡工程地质条件,与已进行较多研究并取得设计和治理经验的相同或相似条件的边坡进行比较,从而对所研究边坡的稳定性进行分析、评价,提出边坡设计和治理的建议。

1.3 力学分析法

力学分析法以岩土力学理论为基础分析边坡稳定性,得出稳定性的定量评价,代表了边坡稳定分析的发展方向,因此被认为是真正意义上的边坡稳定分析方法,通常包括极限平衡法和有限元法等。

极限平衡法是当前国内外应用最广的边坡稳定分析方法,常用的极限平衡法主要有库仑土压力计算法、朗肯土压力计算法、条分法(瑞典法、Bishop法、Janbu法等)、裂隙法等。极限平衡法将边坡的土体分为破裂面(滑动面)以上和以下两个部分,在破裂面(滑动面)上建立静力平衡方程,通过求解方程获得边坡稳定分析的结果,对破裂面(滑动面)以上和以下土体内部的应力、应变关系不做分析。

有限元法的基本原理是将边坡土体离散为很多小单元体,根据单元体的应力应变关系及平衡条件建立变形协调方程,然后根据各单元体间的变形协调关系及边坡边界条件建立边坡整体稳定的应力和位移方程,最后通过计算机求解方程,得出边坡体中的应力、应变及位移。

2 黄土边坡稳定性分析方法的选用

当前,工程实践中一般以极限平衡法为基础,结合自然条件分析法和工程地质类比法对边坡的稳定性进行评价。对于黄土边坡来说,极限平衡法无法将土体内部垂直节理发育的重要特性纳入到计算分析中,不能反映出这些节理在边坡变形中的状态和发挥的作

用,没有从本质上将黄土边坡与其它土质边坡区别开来,存在较大的局限性。

随着计算机技术的迅猛发展和有限元计算软件的不断完善,利用有限元法进行边坡稳定性分析的优势逐渐凸显出来;该方法可通过建立土体的本构模型将黄土垂直节理发育的特性纳入到计算程序中,弥补了极限平衡法计算黄土边坡的缺陷。在当前常见的有限元计算软件中,尤其以ABAQUS有限元软件自带的节理-裂隙材料模型最为完善,计算黄土边坡具很好的针对性和适用性,本文选用该软件进行计算分析。

3 有限元法分析黄土路堑边坡实例

以某在建铁路新建车站内一处黄土路堑高边坡为例,选用ABAQUS有限元软件,采用有限元法对预应力锚索桩板墙加固黄土边坡的工程实例进行计算和分析,现加以介绍。

3.1 ABAQUS中节理材料模型

节理裂隙的尺寸与模型的尺寸相比可以考虑成一种连续滑动体系。在此系统中提供开裂和摩擦滑动。当所有裂隙在同一点闭合时认为此点材料是各向同性线弹性模型。

3.1.1 裂隙开裂和闭合的判断

裂隙材料主要应用在以压应力为主的区域内。

模型提供如下的本构关系:当垂直节理面方向的应力变为拉应力时,认为节理开裂。在此种工况下垂直节理面方向的刚度矩阵变为零。

ABAQUS/Standard采用一种基于应力判断的开裂理论,通过应变监控裂隙是否闭合;当材料间作用力出现拉应力时裂隙开裂。此时 $p_a \leq 0$,裂隙开裂,材料在积分点处弹性各向异性,模型保持张开。

$$\varepsilon_{an(p)}^{el} \leq \varepsilon_{an}^{el} \quad (1)$$

式中 ε_{an}^{el} ——通过裂隙积分点处的弹性应变分量;

$\varepsilon_{an(p)}^{el}$ ——通过平面应力理论计算出来的弹性应变。

$$\varepsilon_{an(p)}^{el} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_{a1} + \sigma_{a2}) \quad (2)$$

裂隙的剪应力特性是通过抗剪强度参数 f_{sr} 来确定,它表征了裂隙张开后材料的残余弹性剪切模量(当裂隙张开时 $f_{sr}=0$;剪切模量为零; $f_{sr}=1$:剪切模量与弹性模型相同;所选值线性内插)。

当节理裂隙张开时,剪切特性可能破坏,由 f_{sr} 值来决定,同时垂直节理面方向的刚度矩阵突然变为零。基于以上原因,在计算域内压应力比较低,或出现拉应力时,裂隙系统会经历一种开裂或闭合状态的振动,这种振动在系统应力内平衡需要一定时间,收敛速度可

能较慢。改善裂隙开裂模型收敛方法:将固定弹性矩阵赋予固定节点上,在分析过程中不会因为开裂与否而发生变化。压缩裂隙滑动,在裂隙体系 a 中破坏面定义如下:

$$f_a = \tau_a - p_a \tan \beta_a - d_a = 0$$

(3)

式中 τ_a ——破裂面处的剪应力;
 p_a ——垂直破裂面的压应力;
 β_a ——摩擦角;
 d_a ——裂隙体系的粘聚力。

当 $f_a < 0$ 时,裂隙不滑动;当 $f_a = 0$ 时,裂隙滑动。此时,塑性应变为:

$$d\gamma_{\alpha\alpha}^{pl} = d\bar{\varepsilon}_a^{pl} \frac{\tau_{\alpha\alpha}}{\tau_a} \cos \psi_\alpha$$

(4)

$$d\varepsilon_{\alpha\alpha}^{pl} = d\bar{\varepsilon}_a^{pl} \frac{\tau_{\alpha\alpha}}{\tau_a} \sin \psi_\alpha$$

(5)

式中 $d\gamma_{\alpha\alpha}^{pl}$ ——在裂隙面处 α 方向的塑性应变速率, α 采用正交系;
 $d\bar{\varepsilon}_a^{pl}$ ——非线性塑性应变速率;
 $\tau_{\alpha\alpha}$ ——节理面处的剪应力分量;
 ψ_α ——膨胀角;
 $d\varepsilon_{\alpha\alpha}^{pl}$ ——垂直节理面的塑性应变。

在同一点处的不同节理体系的滑动相互独立,因此一个体系的滑动不会改变其它体系的破坏准则和膨胀角。节理模型规定通过材料中的某一点可以有 3 个节理方向。

3.1.2 土体材料的塑性行为

除了裂隙体系外,裂隙之间土体材料的破坏机理满足 $D-P$ 塑性法则,即

$$q - p \tan \beta_b - d_b = 0$$

(6)

式中 q ——等效 Mises 偏应力, $q = \sqrt{3/2 S : S}$,
 S ——偏应力, $S = \sigma + pI$;
 p ——等效压应力, $p = -\frac{1}{3} I : \sigma$;

β_b ——土体材料的摩擦角;
 d_b ——土体的粘聚力。

当土体达到塑性屈服时,塑性流动定义为:

$$d\varepsilon_b^{pl} = d\bar{\varepsilon}_b^{pl} \frac{1}{1 - \frac{1}{3} \tan \psi_b} \cdot \frac{\partial g_b}{\partial \sigma}$$

(7)

式中 $g_b = q - p \tan \psi_b$ ——流动势函数;
 $d\bar{\varepsilon}_b^{pl}$ ——塑性流动速率;
 ψ_b ——膨胀角。

3.2 边坡概况与参数选取

本工程位于一新建车站内,路堑边坡高 40 m,土层分 4 层,自上而下依次为:新黄土、老黄土、圆砾土、

砂岩,其中新黄土厚 30 m,老黄土厚 10 m,圆砾土厚 18 m。边坡采用预应力锚索桩板墙加固,钢筋混凝土桩桩长 30 m,悬臂端长 10 m,埋深 20 m,截面尺寸 2 m × 3 m,桩间距 6 m,桩间设钢筋混凝土挡土板,桩顶设一排预应力锚索,锚索长 60 m,与水平方向呈 30° 夹角。桩顶后设 2.0 m 宽边坡平台,其上边坡每 8 m 一级,分级处设 2.0 m 宽边坡平台,如图 1 所示。模型材料相关参数如表 1 所示。

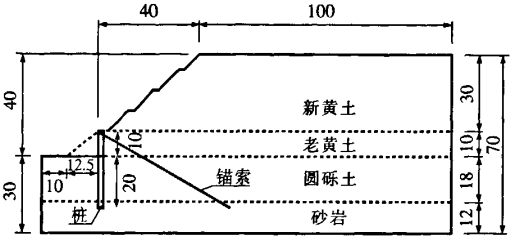


图 1 黄土边坡有限元模型(单位:m)

表 1 模型材料参数表

材料名称	E/MPa	ν	C/kPa	$\Psi_b/(\text{^\circ})$	f
新黄土	10	0.35	25	30	0.4
老黄土	20	0.35	40	35	0.5
圆砾土	40	0.35	20	40	0.5
砂岩	1 000	0.35	100	45	0.5
桩	3.6e4	0.2	—	—	—
锚索	2.0e5	0.2	—	—	—

4.3 计算结果分析

4.3.1 总位移云图

根据图 1 模型的尺寸,设桩顶与边坡交界点处 $Y=0$ m,边坡顶 $Y=30$ m,由图 2 总位移云图可以看出,在锚索桩板墙的支持作用下,土层的滑动范围较小,由图 3 边坡位移曲线图分析可知,最大位移约发生在 $Y=12$ m 处,最大位移 51 cm。

4.3.2 桩体位移曲线图

由图 1 所示,设桩底 $h=0$,桩顶 $h=30$ m,桩体位移曲线如图 4 所示,由图 4 可知桩体在加锚索之后,桩顶最大水平位移 4.7 cm,满足设计规范要求。

4.3.3 土体塑性区云图

由图 5 可以看出,在作完桩板锚索结构后,土体进入塑性区的范围集中在桩板墙前侧,桩基底侧后缘,锚索锚固段,未发生贯穿桩体的塑性区,说明边坡整体稳定性良好,满足设计要求。

5 结论

通过本文的研究得出如下结论:ABAQUS 有限元软件中的节理材料模型适合于在黄土边坡稳定性分析

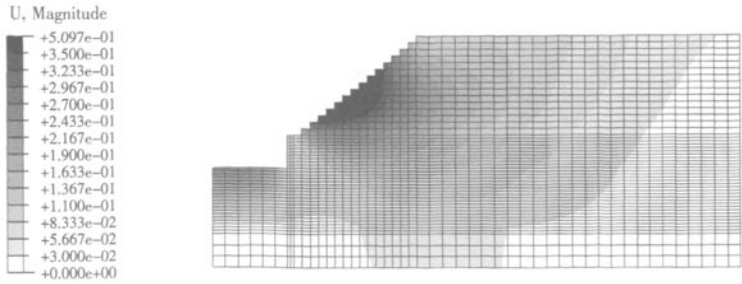


图 2 总位移云图

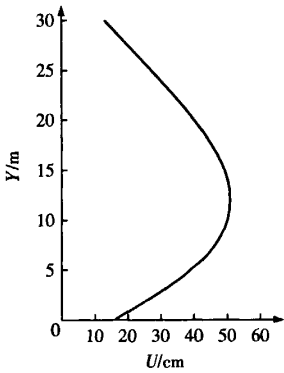


图 3 边坡位移曲线图

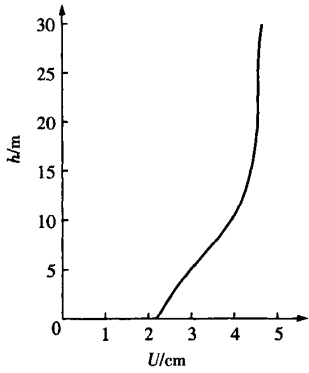


图 4 桩体位移曲线图

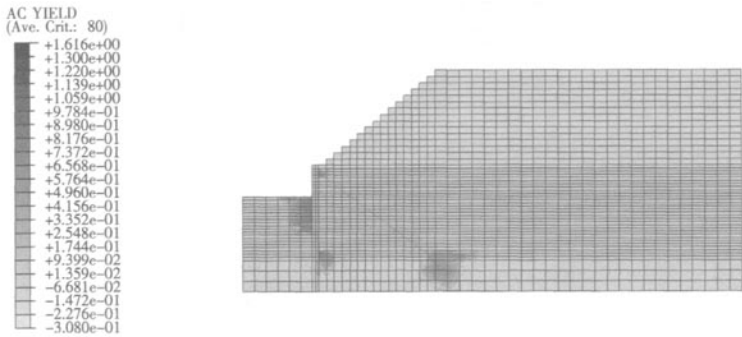


图 5 土体塑性区云图


中应用。与极限平衡法相比,利用有限元法对黄土边坡稳定性进行分析,具有明显的优越性,它可以考虑黄土边坡土体中垂直节理发育的特性,包括裂隙材料参数的方向、强度、弹塑性问题等,分析结果更加可靠,是黄土边坡稳定分析的一个有效方法和重要发展方向,为黄土边坡的设计提供了新的设计理念和发展空间。

参考文献:

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
[2] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

[3] 庄茁,等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005.
[4] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.
[5] 杨建国. 黄土路堑边坡设计技术研究[D]. 天津:天津大学,2008.
[6] TB 10035 - 2002,铁路特殊路基设计规范[S].
[7] 靳付成. 边坡稳定性分析方法的研究现状与展望[J]. 西部探矿工程,2007(4):5 - 9.
[8] 张发明,刘汉龙,赵维炳. 预应力锚索加固岩质边坡的设计实例[J]. 岩土力学,2000,21(2):177 - 179.

(编辑 张 滨)

作者: 李帆, 杨建国, [LI Fan](#), [YANG Jian-guo](#)
作者单位: 李帆, [LI Fan](#) (河北工业大学, 天津, 300130), [杨建国, YANG Jian-guo](#) (铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津, 300142)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2008, 25 (12)
被引用次数: 6次

参考文献(8条)

1. 刘祖典 [黄土力学与工程](#) 1997
2. 郑颖人;陈祖煜;王恭先 [边坡与滑坡工程治理](#) 2007
3. 庄茁 [ABAQUS非线性有限元分析与实例](#) 2005
4. 王金昌;陈页开 [ABAQUS在土木工程中的应用](#) 2006
5. 杨建国 [黄土路堑边坡设计技术研究](#) 2008
6. TB 10035-2002. 铁路特殊路基设计规范
7. 靳付成 [边坡稳定性分析方法的研究现状与展望](#) [期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2007 (04)
8. 张发明;刘汉龙;赵维炳 [预应力锚索加固岩质边坡的设计实例](#) [期刊论文]-[岩土力学](#) 2000 (02)

本文读者也读过(10条)

1. 安婧 [有限元法在略阳电厂边坡稳定性分析中的应用与研究](#) [学位论文] 2008
2. 魏海斌. 冯国强. 李臣余. 萧宏 [地面沉降的有限元分析和预测](#) [会议论文]-2005
3. 李广益. [LI Guang-yi](#) [论不稳定边坡治理措施](#) [期刊论文]-[山西建筑](#) 2007, 33 (5)
4. 沈超. [Shen Chao](#) [天津响螺湾海河开启桥枢轴节点有限元分析](#) [期刊论文]-[城市道桥与防洪](#) 2010 (7)
5. 熊辉 [高路堑边坡的整治技术及其应用研究](#) [学位论文] 2009
6. 余宾宁. 李志亮 [框架梁与剪力墙直交节点弹性有限元分析](#) [期刊论文]-[中国新技术新产品](#) 2010 (12)
7. 孙莺. [SUN Ying](#) [郑西客运专线黄土边坡种植混合基材应用研究](#) [期刊论文]-[路基工程](#) 2010 (3)
8. 苏堆田. 侯克鹏. 朱国辉. [SU Dui-tian. HOU Ke-peng. ZHU Guo-Hui](#) [边坡稳定性分析中极限平衡法、三维有限元法和离散元法的联合应用研究](#) [期刊论文]-[湖南有色金属](#) 2003, 19 (6)
9. 邵坤. 陈文亮. 徐艳虎. [SHAO Kun. CHEN Wen-liang. XU Yan-hu](#) [复合材料固化过程中工装温度场的有限元分析](#) [期刊论文]-[中国制造业信息化](#) 2009, 38 (4)
10. 卜娜蕊. 赵辉. 谢军. [Bu Narui. Zhao Hui. Xie Jun](#) [DE-BP神经网络的边坡稳定性分析](#) [期刊论文]-[路基工程](#) 2009 (4)

引证文献(6条)

1. 曹雄 [二维边坡稳定性分析的通用极限平衡法](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2012 (6)
2. 吕扶君. 赵云刚. 文君 [陕北志丹侯市黄土边坡稳定性评价和治理建议](#) [期刊论文]-[山西建筑](#) 2010 (19)
3. 刘翔. 王鹏 [山阳县漫川关镇黄土滑坡有限元分析](#) [期刊论文]-[山西建筑](#) 2013 (18)
4. 杜磊 [黄土地区深基坑降水引起的地面沉降规律研究](#) [期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2013 (2)
5. 晏凤辉 [河南某黄土高边坡稳定性分析](#) [期刊论文]-[水科学与工程技术](#) 2012 (1)
6. 王念秦. 罗东海. 姚勇 [铁路黄土高边坡变形破坏机理及稳定性研究](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2009 (7)

引用本文格式：[李帆](#). [杨建国](#). [LI Fan](#). [YANG Jian-guo](#) [黄土边坡稳定性分析方法研究](#)[期刊论文]•[铁道工程学报](#)
2008(12)