

文章编号:1673-2049(2006)04-0049-05

基于重度增加法的边坡稳定性三维有限元分析

康亚明,杨明成,胡艳香,任克峰

(宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021)

摘要:提出了分析边坡稳定性的三维非线性有限元重度增加法。利用 ANSYS 软件,基于 D-P 准则,考虑了关联的流动法则,先保持土体强度指标粘聚力和内摩擦角不变,通过逐步增加重度的方法使土体达到临界状态,采用坡顶水平位移与重度增加系数关系曲线上位移陡然增大作为边坡的破坏标准。充分考虑了土体的空间作用机制和变形协调机制,通过计算得到可能的半球形或复合形滑动面的位置和形式,而不是事先去假定,得到的安全系数也与其他方法相近。该方法可以更好地模拟土坡的破坏,有助于了解土坡的破坏机理,其结果对工程实践具有指导作用。

关键词:三维非线性有限元;安全系数;边坡稳定性;重度增加法

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A

3-D FEM Analysis of Slope Stability Based on Gravity Increase Method

KANG Ya-ming, YANG Ming-cheng, HU Yan-xiang, REN Ke-feng

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: A new stability analysis method, 3-D nonlinear finite element gravity increase method was developed by ANSYS software, in which associated flow rule was employed while D-P criterion was used as the yield function. The principle of this method is keeping the cohesion and inner friction angle for constant, then, carrying on the analysis again and again until the slope attains critical break appearance through increasing the gravity acceleration gradually. The failure criterion was defined to be corresponding to the jump point in the curve relating the computed displacement of the slope top to the gravity increase factor. This method fully takes into account the spatial action mechanism and cooperative deformation mechanism of soil. By using the proposed method, the possible shape or location of sliding for a semispherical failure surface or a composite failure is a part of the analytical solution, rather than assumption in advance, and this method generates safety factors comparable to those obtained by using other existing methods. It is found that the method can properly simulate the destruction of slope and it is conducive to comprehend the destructive principle of the slope. The result plays the directive guide function to project practice.

Key words: 3-D nonlinear finite element; safety factor; slope stability; gravity increase method

0 引言

自然界发生的滑坡绝大多数呈三维形态,但在

边坡稳定分析领域,将边坡稳定分析视为二维平面问题仍然占主导地位,当然这主要是为了简化计算。在一般情况下二维处理能够满足工程要求,但事实

收稿日期:2006-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50568003);教育部科学技术研究重点项目(205174)

作者简介:康亚明(1980-),男,宁夏西吉人,工学硕士研究生,E-mail:kangsir_1184020@126.com。

上,边坡稳定性分析是一个三维问题,特别是对于那些坡顶或坡面上有局部堆载作用、曲线形或折线形边坡、土体材料沿长度方向分布不均匀的边坡,是不能按平面问题分析的,这些已经引起了工程界的广泛重视。早在 1977 年 Hovland 就将边坡稳定视为三维问题并利用极限平衡法对其进行了分析求解。此后,Cavounidis、Chen 和 Chameau 也利用极限平衡方法对这一问题进行了研究。极限平衡法虽然简单易行,但由于该方法不能考虑土体中的应力-应变性质,因此只能属于一种粗糙的近似解答。

实际工程中分析的对象往往是一个具有一定安全储备的边坡。边坡稳定性分析的提法往往是:对某一稳定的边坡,需要一个多大的外部干扰因素方可将其过渡到极限状态,因为引起滑坡的根本原因是由于滑动面上滑动力的增加和抗滑力的降低所致。有限元强度折减法正是从导致滑坡的内因出发,不断降低土体的强度指标,使其过渡到临界状态,求得边坡整体稳定性指标^[1-6]。本文中所要介绍的重度增加法是从外因出发,通过不断增加土体的重度,使土体进入临界状态,获得稳定性评价指标。

1 重度增加法的 ANSYS 实现

1.1 基本原理

重度增加法的基本原理是保持土体的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 为常量,通过逐步增加重力加速度 g 的方式,反复进行有限元分析,直至边坡达到临界破坏状态,而此时采用的重力加速度 g' 与实际重力加速度 g 之比 F 称为重度增加系数或超载系数。其实逐步增大重力加速度和增加土体的重度是等同的,故称为重度增加法^[7],其中 g 取为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

1.2 安全系数

有限元强度折减法是通过反复折减土体的两个强度指标 c 和 φ 使土体达到临界状态,此时的折减系数就是该边坡的整体安全系数^[8]。重度增加法恰恰相反,它是保持土体的抗剪强度指标 c 和 φ 为常量,通过逐步增加重力加速度 g 的方式,反复进行有限元分析,直至边坡达到临界破坏状态,这时对应的重度增加系数就是该边坡超载概念的安全系数。可以看出,重度增加法是给土体一个外界扰动因素(超载)使其达到临界状态,因此重度增加法可以归到超载法中。

1.3 屈服准则

岩石、混凝土和土体等都属于颗粒状材料,此类材料的一个显著特点是抗压强度远大于抗拉强度,

而且受剪切时颗粒会有不同程度的膨胀现象,而常用的 Von Mises 屈服准则不适合这类材料。在土力学中,常使用 Mohr-Coulomb 屈服准则描述这类材料的强度,另一个能更准确描述这类材料强度的是 Drucker-Prager 屈服准则,该准则既考虑了中间主应力 σ_2 对屈服强度的影响,又考虑了静水压力对屈服准则的影响,对 D-P 材料有较好的适用性,已广泛应用于 D-P 材料。使用 Drucker-Prager 屈服准则的材料简称为 D-P 材料,在岩石、土体的有限元分析中,采用该屈服准则可得到较为精确的结果^[9]。重度增加系数 F 为

$$F = 3\alpha\sigma_m + \left| \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{M} \mathbf{S} \right|^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0 \quad (1)$$

式中: $\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}}$; σ_y 为屈服应力, $\sigma_y = \frac{c\sqrt{3}\cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$; \mathbf{S} 为应力偏量; \mathbf{M} 为变换矩阵; σ_m 为平均应力。

1.4 流动法则

密实砂性土和超固结粘土在剪切过程中会表现出剪胀性。由于剪胀性反映了土体剪切屈服过程中的体积变松现象,而土体的变松必然对其抗剪强度有影响,因此剪胀性对土体的承载力计算有重要影响。在土体的分析过程中,考虑剪胀性(剪胀角 ψ)与否取决于采用的流动法则。当 $\psi = \varphi$ 时,为关联的流动法则,即土体会发生严重的体积膨胀;当 $\psi = 0$ 时,为非关联的流动法则,即不考虑剪胀性。由于关联的流动法会高估土的剪胀性,但边坡因受到较小的约束(比如相对于地基超载力问题),剪胀角的选择就不显得那么重要^[10],因此,本文中采用关联的流动法则,即 $\psi = \varphi$ 。

1.5 破坏标准

目前还没有统一的边坡破坏标准,就现有标准来讲,如以迭代次数达到一定值还没收敛为标准显然不合理,因为导致不收敛的因素是多方面的。就 ANSYS 软件来说,笔者经过多次试算,以广义剪切应变的贯通为破坏标准得到的结果误差很大,因为用广义剪切应变的贯通和失稳还有一段距离,二者之间没有必然的联系。土体的破坏总伴随着很大的位移,当土体的重度增加到一定程度时,土体的位移会持续增大,说明土体进入流动状态可以理解为此时即使重度不再增加,位移也将持续增加,边坡即将或正在发生滑坡。

2 工程应用

图 1 为一均质边坡的计算剖面,建模的基本思路:首先建立平面模型,网格划分完成后,再将平面模型拉伸成立体模型。边界的大小直接影响到应力与应变的分布,本文中取坡角到左端边界的距离为 20 m,坡顶到右端边界的距离为 40 m,坡底向下延伸 20 m,考虑空间作用,在垂直纸面的方向取10 m。基底采用刚性边界,两侧为滑动支承,只容许竖向沉降,上部为自由边界,各参数取值见表 1。

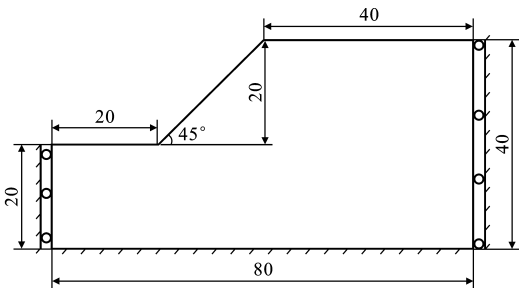


图 1 几何模型及边界约束条件(单位:m)

Fig. 1 Geometry Model and Boundary
Restrained Condition(Unit:m)

表 1 D-P 准则有限元参数

Tab. 1 Finite Element Parameters for D-P Criterion

重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	20
内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	20
粘聚力 c/kPa	40
剪胀角 $\psi/(^{\circ})$	20
弹性模量 E/MPa	20
泊松比 ν	0.30

2.1 有限元网格划分

本例中 1# 单元定义为 Solid45,用来模拟土体。

该单元用于构造三维固体结构,通过 8 个节点来定义,每个节点有 3 个沿着 x 、 y 和 z 轴方向平移的自由度,具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。2# 单元定义为 Plane42,用来拉伸实体。

网格疏密对计算精度的影响是很明显的,网格划分太稀,则计算误差很大,太细需要耗费很多的机时,本文中单元尺寸设为 2 m,然后沿 z 轴拉伸 10 m,共得到单元 6 732 个,节点 7 370 个,最后所得有限元模型如图 2 所示。

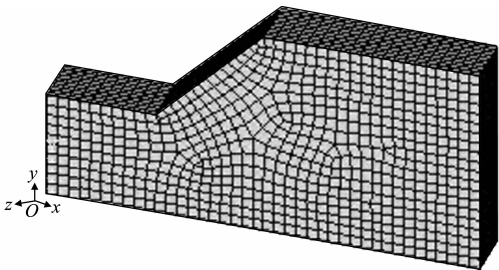


图 2 均质边坡三维有限元模型

Fig. 2 3-D Finite Element Model of Homogenous Slope

2.2 计算过程及数据处理

在利用 ANSYS 分析中,采用大变形,加载子布设为 5,最大循环次数为 100,取剪胀角与内摩擦角相等,收敛精度为 0.005,从重度增加法的原理可知,利用 ANSYS 实现重度增加法有两种途径:一是保持重度不变,在 ANSYS 中输入一个增大的重力加速度,二是保持重力加速度不变,输入增大的 γ 。首先进行初始应力场的模拟,需要指出的是每次增加重度后,进行模拟计算所得的位移,要减去初始应力场下的位移后才是实际的值,具体数据见表 2。

为了避免由于个别观测点数据不准确引起的误差,取每个观测点位移的平均值,在平面坐标系中绘

表 2 坡顶水平位移

Tab. 2 Horizontal Displacement of Slope Top

F	A 点位移/mm	B 点位移/mm	C 点位移/mm	D 点位移/mm	E 点位移/mm	位移平均值/mm
1.00	-202.50	-237.510	-235.650	-238.36	-226.48	-228.10
1.10	-248.03	-211.640	-238.400	-247.92	-221.33	-233.46
1.20	-321.21	-309.223	-310.532	-308.17	-298.01	-309.43
1.25	-302.58	-288.710	-320.180	-342.55	-307.27	-312.30
1.27	-299.00	-313.510	-351.000	-379.83	-332.21	-335.11
1.29	-328.42	-365.120	-343.200	-354.34	-318.65	-341.95
1.30	-447.35	-445.850	-422.380	-413.62	-402.54	-426.35
1.31	-497.20	-459.430	-450.790	-406.04	-441.22	-450.94
1.32	-508.53	-487.540	-458.300	-475.37	-513.44	-488.64
1.33	-523.63	-512.010	-545.030	-506.17	-535.61	-524.49
1.34	-577.22	-568.300	-610.250	-637.82	-591.77	-597.07
1.35	-801.37	-1 092.150	-1 430.230	-1 231.35	-936.01	-1 098.22

注:所选取的坡顶观测点在图 2 中的坐标依次为 A(40,40,-3)、B(40,40,-4)、C(40,40,-5)、D(40,40,-6)、E(40,40,-7)。

出坡顶水平位移与重度增加系数的关系曲线,如图 3 所示。

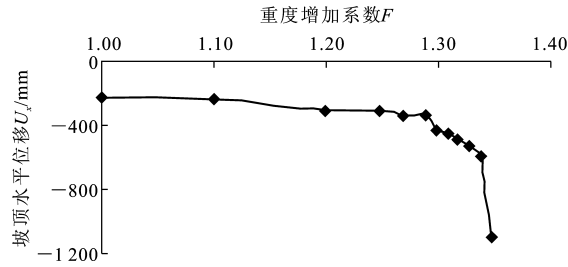


图 3 坡顶水平位移与重度增加系数的关系
Fig. 3 Relation of Horizontal Displacement of Slope Top and Gravity Increase Factor

从图 3 可以看出,当重度增加系数(超载系数)达到 1.34 以前,坡顶水平位移呈缓慢上升趋势,局部有小幅振动,边坡土体变形随重度增加系数增加的变化趋势不明显。在 F 从 1.00 增加到 1.34 的过程中,可以看出边坡处于稳定状态; F 增加到 1.34 后,坡顶水平位移随 F 的增加而急剧增加,说明土体已经进入流动状态。从图 4 的水平位移场可以看出,滑动面已经非常清晰。

3 计算结果分析

用重度增加法分析该边坡坡顶水平位移和重度增加系数的关系,得到的安全系数为 1.35,而不考虑空间土体的相互作用,用传统方法得到的安全系数分别为 1.23(瑞典条分法,总应力模式)、1.27(简化毕肖普法,总应力模式)。由此可见,考虑土体的空间协同作用,用重度增加法得到的安全系数比用瑞典条分法和简化毕肖普法所得的平均值(1.25)大 8%。通过以上算例分析可知,用三维有限元重度增加法分析边坡时,得到一个比传统方法偏大的安全系数,其主要原因有:

(1)土体自重既产生下滑力,又产生抗滑力,也就是说,自重荷载既是有利因素,又是不利因素。由于重力的方向与剪切面的方向不重合,从土体抗剪强度公式 $\tau=c+\sigma\tan\varphi$ 可以看出,随着自重的增加,剪切面上的法向应力也在增加,从而使土体的抗剪强度也略有增加。这样,重度增加时,滑动面上的下滑力和抗滑力都在增加,从而使安全系数偏大。特别对于那些平缓、抗剪强度指标又比较高的边坡,重度增加时抗剪强度增加的幅度比其剪应力本身还要大,这样即使增加重度也不会发生滑坡,重度增加法就会不再适用,因此,重度增加法的适用范围(坡角的下限)还需要研究。

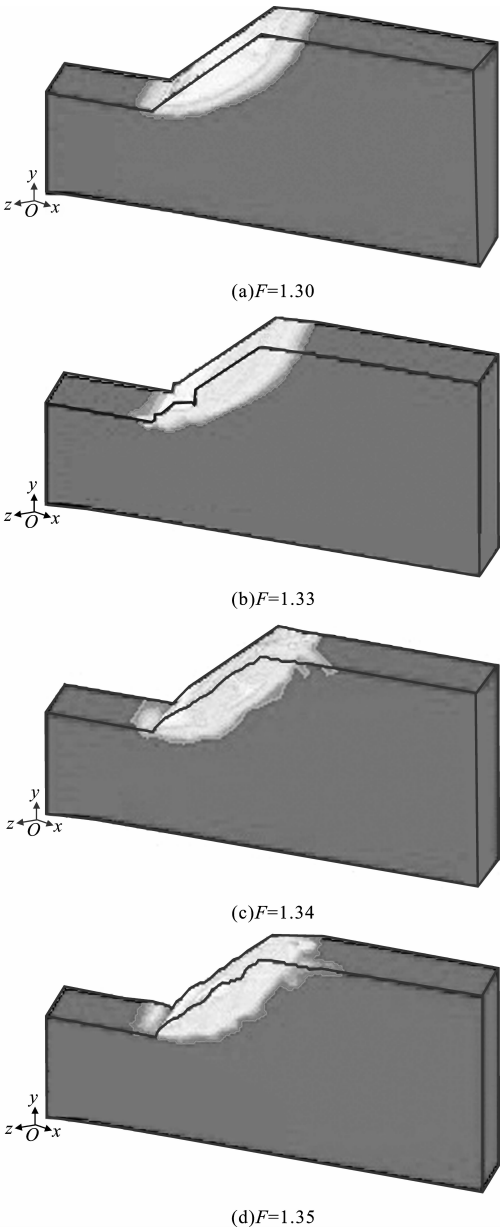


图 4 水平位移场
Fig. 4 Horizontal Displacement Field

(2)计算参数的影响。粘聚力 c 和内摩擦角 φ 是反映土体抗剪强度的两个最重要的参数,它们的精度直接影响到计算的结果。此外,弹性模量 E 、泊松比 ν 、网格疏密、边界范围的大小、边界条件、流动法则等都会对计算结果产生不同程度的影响。这些参数对安全系数的影响见文献[11]。

(3)破坏标准的选取。目前常用的破坏标准包括特征部位的位移(坡顶或坡角)、有限元迭代求解过程的步收敛性和广义剪切应变的贯通与否等。显然,以计算的收敛与否为标准是很粗糙的,因为导致不收敛的因素是很多的,而以广义剪切应变的贯通为破坏标准所得到的结果误差很大,因为广义剪切

应变的贯通并不意味着失稳,二者之间没有必然的联系,因此破坏标准还需要进一步探索。

(4)考虑了土体的空间协同作用。考虑协调作用对基于三维有限元重度增加法分析土坡稳定的影响值得深入研究。

4 结 语

(1)三维有限元重度增加法思路清晰,原理简单,容易掌握和应用用于工程实际,可以用于边坡、基坑和堤坝等的稳定分析。

(2)三维有限元重度增加法继承了有限单元法的所有优点,比如考虑了土体非线性应力-应变关系,从土坡破坏机理上寻求最可能的滑动面,而不用事先去假定,从而使土坡稳定性分析从理论上来说更加合理。

(3)充分考虑了土体的空间作用机制和变形协调机制。三维稳定性分析可以更加真实地反映边坡破坏的实际形态,这也是本文的出发点。

参考文献:

References:

- [1] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝.用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J].中国工程科学,2002,4(10):57-61.
ZHENG Ying-ren,ZHAO Shang-yi,ZHANG Lu-yu. Slope Stability Analysis by Strength Reduction FEM[J]. Engineering Science,2002,4(10):57-61.
- [2] 尉学勇,王晓谋,贺培峰.斜坡地基极限承载力下限解计算[J].建筑科学与工程学报,2005,22(4):77-82.
YU Xue-yong,WANG Xiao-mou,HE Pei-feng. Calculation of Low Limit Solution of Sloping Ground Ultimate Load Capacity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(4):77-82.
- [3] 赵尚毅,郑颖人,张鲁渝,等.用有限元强度折减法求边坡稳定性安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(5):343-346.
ZHAO Shang-yi,ZHENG Ying-ren,ZHANG Lu-yu, et al. Analysis on Safety Factor of Slope by Strength Reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(5):343-346.
- [4] 汪益敏,王秉纲.公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J].中国公路学报,2005,18(1):24-29.

- WANG Yi-min,WANG Bing-gang. Fuzzy Evaluation Method of Scouring Stability on Soil Subgrade Slope [J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(1):24-29.
- [5] 朱哈逐,汪会帮,尚岳全.边坡锚固中锚墩框架梁受力体系分析[J].中国公路学报,2004,17(1):16-19.
ZHU Han-ya,WANG Hui-bang,SHANG Yue-quan. Analysis of Bearing System of Frame Beams with Anchor Pier in Slope Engineering[J]. China Journal of Highway and Transport,2004,17(1):16-19.
- [6] 张鲁渝,时卫民,郑颖人.平面应变条件下土坡稳定有限元分析[J].岩土工程学报,2002,24(4):487-591.
ZHANG Lu-yu,SHI Wei-min,ZHENG Ying-ren. The Slope Stability Analysis by FEM Under the Plane Strain Condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(4):487-591.
- [7] 肖武.基于强度折减法和重度增加法边坡稳定性分析及工程应用[D].南京:河海大学,2005.
XIAO Wu. Slope Stability Study on Strength Reduction and Gravity Increase Method and Its Engineering Application[D]. Nanjing: Hohai University,2005.
- [8] 杨桂通.弹塑性力学引论[M].北京:清华大学出版社,2004:59-77.
YANG Gui-tong. Introduction to Elastoplasticity Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:59-77.
- [9] 郑颖人,沈珠江,龚晓南.岩土塑性力学原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:41-71.
ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. The Principles of Geotechnical Plastic Mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002:41-71.
- [10] GRIFFITHS D V,LANE P A. Slope Stability Analysis by Finite Elements[J]. Geotechnique,1999,49(3):387-403.
- [11] 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅,等.有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数精度研究[J].水利学报,2003,4(1):21-27.
ZHANG Lu-yu,ZHENG Ying-ren,ZHAO Shang-yi, et al. The Feasibility Study of Strength Reduction Method with FEM for Calculating Safety Factors of Soil Slope Stability[J]. Chinese Journal of Hydraulic, 2003,4(1):21-27.