

文章编号:1671-6833(2012)05-0001-04

含软弱夹层土坡稳定性的三维弹塑性数值模拟

袁伟^{1,2}, 黄茂松^{1,2}, 刘怡林^{3,4}, 王浩然^{1,2}

(1. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 4. 交通运输部道路结构与材料重点实验室, 北京 100088)

摘要: 分析了软弱夹层的存在对三维边坡稳定性和破坏模式的影响. 对一个经典的三维边坡算例进行了数值计算, 并将结果与极限平衡法进行了对比, 以验证强度折减弹塑性有限元法的可靠性. 然后对一个含软弱夹层三维边坡进行了分析, 计算结果表明: 强度折减弹塑性有限元法计算的椭圆破坏面在纵向长度上比极限平衡法要大; 与三维均质边坡相比, 三维软弱夹层边坡安全系数要低很多, 破坏面的范围更大, 塑性应变区的集中现象更加明显, 破坏模式有着明显的不同.

关键词: 三维夹层边坡; 强度折减弹塑性有限元法; 安全系数

中图分类号: TU457

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.001

0 引言

目前, 对边坡的稳定性问题主要集中在二维分析方法. 二维分析方法考虑平面应变, 其理论基础及分析方法已趋于完善. 然而实际边坡大多呈现三维状态, 且具有独特的地质环境和几何形态特征, 二维简化分析往往不能真实反映边坡的实际受力状态和失稳破坏模式, 因此三维分析在边坡工程安全性评估和加固设计中更具有实际意义. 同时, 在实际边坡中, 往往会有一些比边坡土强度低的夹层土, 这些软弱夹层的存在会对边坡产生很大的影响, 因此有必要分析软弱夹层的存在对边坡稳定性以及破坏模式的影响.

强度折减弹塑性有限元法用于三维边坡稳定性研究也已有一些报道. 郑颖人等^[1]建议对三维空间问题可采用传统的 Mohr-Coulomb 等面积 DP3 准则. 方建瑞等^[2]探讨了三维边坡安全系数定义方式、边坡破坏标准以及侧向边界对边坡稳定性的影响. Griffiths 等^[3]应用强度折减法探讨了边界条件、几何形状对三维边坡稳定性的影响. 邓建辉等^[4]对洪家渡水电站 1# 塌滑体反演分析认为基于强度折减概念的三维数值反演分析方法是可行的. 颜天佑等^[5]针对已知滑动面的三维边坡稳定分析问题, 在

塑性力学上限定理的基础上, 提出了求解安全系数的三维有限元弹塑性迭代解法.

强度折减弹塑性有限元法正广泛应用于三维工程边坡的稳定性分析, 并逐渐被许多学者和专家所接受. 尽管如此, 仍存在一些基本问题没有得到很好的解决. 作者在前人研究的基础上, 运用强度折减弹塑性有限元法, 分析软弱夹层的存在对三维边坡稳定性及破坏模式的影响.

1 均质土坡的三维数值模拟

Zhang^[6]通过极限平衡法分析了三维均质边坡的安全系数, 其他学者也运用各自的三维极限平衡法对此经典算例进行了分析 (比如陈祖煜等^[7], 顾晓强和陈龙珠^[8], 朱大勇等^[9], 袁恒等^[10]). 作者对其中的边坡稳定问题进行分析并将结果与这些学者的结果进行对比, 以验证三维边坡有限元强度折减法的可靠性.

图 1 为一三维均质边坡示意图, 具体尺寸如图所示. 土体强度参数为 $c = 29 \text{ kPa}$, 其他参数为 $E = 100 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, $\gamma = 18.8 \text{ kN/m}^3$. 边坡纵向长度 L 分为 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140 m 等 9 种情况进行计算.

边坡约束为全约束条件, 即左右两个面限制

收稿日期: 2012-04-01; 修订日期: 2012-05-31

基金项目: 国家“973”计划资助项目 (2012CB719803); 国家自然科学基金资助项目 (51108215); 西部交通建设科技项目 (200831822357)

通信作者简介: 黄茂松 (1965-), 男, 浙江玉环人, 同济大学教授、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的科研和教学工作. E-mail: mshuang@tongji.edu.cn.

垂直方向位移,底部及前后两个面限制三个方向上的位移.运用有限元强度折减法分析边坡的安全稳定性,破坏点取边坡上点的位移(取坡顶的水平位移)出现突变.

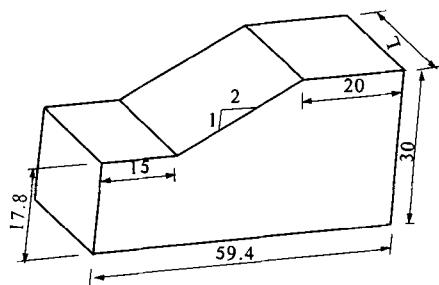


图1 三维均质边坡示意图(单位:m)

Fig.1 Sketch of a 3D homogeneous slope

绘制 $L = 80$ m 时边坡对称面坡顶水平位移 U_x 与折减系数 F_s 的关系曲线,取位移突变时的折减系数作为安全系数,如图2所示.

类似地,计算其它边坡纵向长度 L 对应的折减系数 F_s (为进行对比同时计算了该算例的二维情况),然后将其绘制曲线如图3所示.

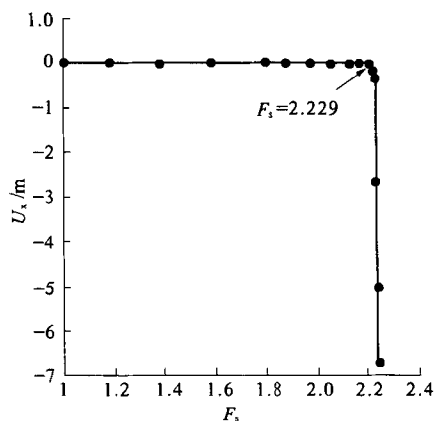


图2 坡顶水平位移 U_x 与折减系数 F_s 关系曲线

Fig.2 Relationship between U_x and F_s

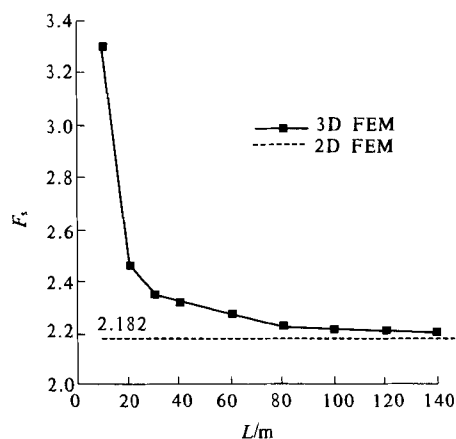


图3 边坡纵向长度 L 与折减系数 F_s 关系曲线

Fig.3 Relationship between L and F_s

其他学者用极限平衡法得出的安全系数如表1所示.

极限平衡法假设此三维边坡破坏面为一椭球面,其纵向长度为 $73.1 \text{ m}^{[6]}$,故取 $L = 80$ m 时的安全系数与之对比.由表1可以看出,用强度折减法计算的安全系数 2.229 处于几位学者计算的均值范围内,说明用强度折减法分析三维边坡的安全系数是可靠的.同时由图3可以看出,三维边坡的安全系数一开始随着纵向长度的增加而迅速降低,但到达一定长度后慢慢趋于稳定.三维边坡的安全系数始终要比二维平面应变边坡的大,随着边坡纵向长度的增大,两者无限接近.理论上,无限长三维边坡与二维边坡的安全系数是一致的;但由于实际模型受网格划分,单元类型以及边界约束效应等因素的影响,使得两者存在一定的差别.

表1 安全系数计算值的比较

Tab.1 Comparison of calculated safety factor

来源	安全系数
Zhang(1988)	2.122
陈祖煜等(2001)	2.187
顾晓强等(2007)	2.263
朱大勇等(2007)	2.168
袁恒等(2011)	2.243

2 含软弱夹层土坡的三维数值模拟

图4为一个三维含软弱夹层边坡的横断面尺寸示意图,纵向长度取 60 m. 软弱夹层位于坡底以下一定深度内,且厚度为 0.5 m. 土体的强度参数为边坡土 $c = 20 \text{ kPa}$, $\varphi = 10^\circ$, 夹层土 $c = 12 \text{ kPa}$, $\varphi = 5^\circ$. 其它参数分别为 $E = 5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. 对该边坡建立三维模型,运用强度折减弹塑性有限元法分析边坡的稳定性.

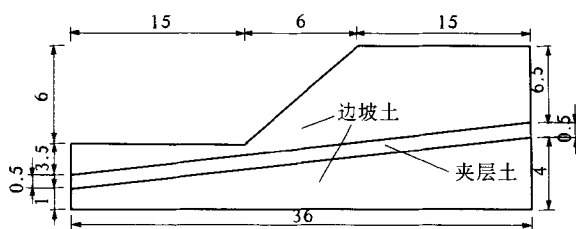


图4 横断面尺寸示意图(单位:m)

Fig.4 Cross-sectional dimensions

边界约束为全约束条件.建立的三维模型及网格划分如图5所示.

绘制三维边坡中部坡顶的水平位移 U_x 与折减系数 F_s 的关系曲线,如图6所示.把曲线突变处的折减系数和塑性应变区的贯通情况相结合,得出该边坡的安全系数 $F_s = 2.588$.为进行对比,同时计算了同尺寸的二维平面应变边坡和三维均质边坡,得到的安全系数分别为1.833和2.813.

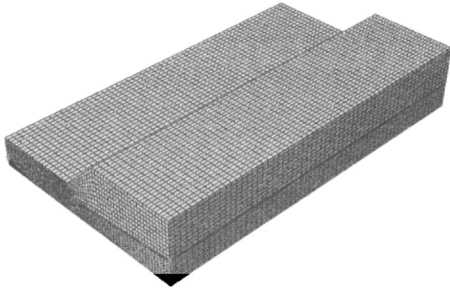


图5 网格划分示意图

Fig.5 Sketch of meshing

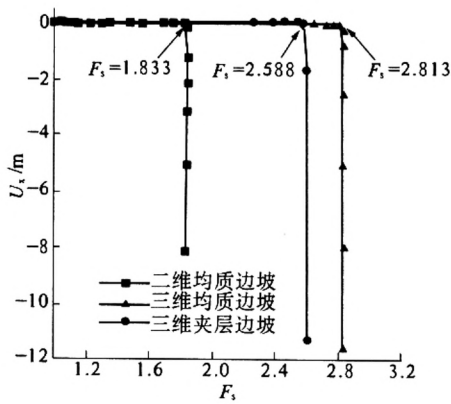
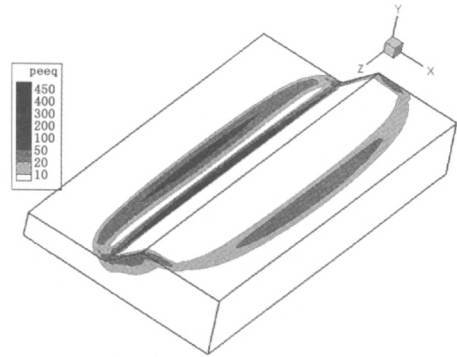


图6 坡顶水平位移 U_x 与折减系数 F_s 关系曲线

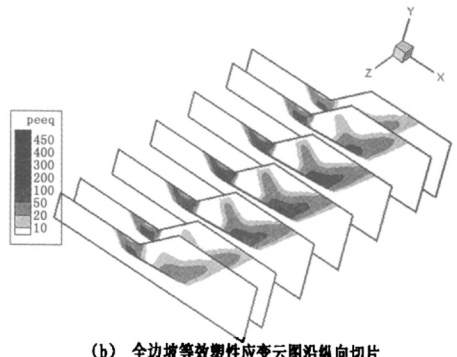
Fig.6 Relationship between U_x and F_s

三维含软弱夹层边坡等效塑性应变(PEEQ)云图如图7所示.

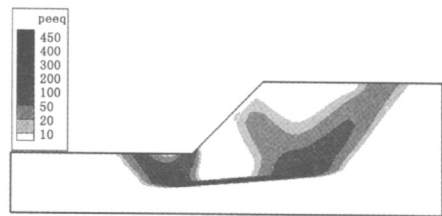
由图6可以看出,三维夹层边坡的安全系数介于二维平面应变边坡与三维均质边坡之间.从图7和图8可以看出:由于夹层的存在,使得三维夹层边坡破坏面的范围较均质而言更广,塑性区更集中.二维、三维夹层的塑性应变区域大致相同,中间一部分塑性区沿着夹层走向发展,在两端则分别向坡顶和坡脚方向延伸,与均质边坡的圆弧塑性应变区有所不同.区别在于,二维平面应变边坡在底部的塑性应变值比三维夹层的更大,塑性区域更集中.与三维边坡极限平衡法假设的破坏面形状一致,强度折减法计算的破坏面也呈一椭圆形,但是其破坏面的纵向长度远比极限平衡法假设的要大.



(a) 全边坡等效塑性应变云图



(b) 全边坡等效塑性应变云图沿纵向切片

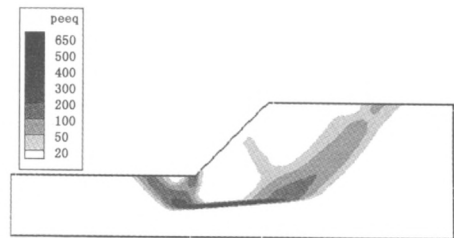


(c) 中截面等效塑性应变云图

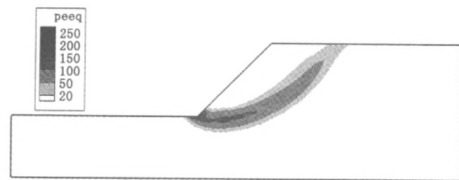
图7 等效塑性应变云图

Fig.7 PEEQ of slope

二维边坡及三维均质边坡等效塑性应变云图如图8所示.



(a) 二维边坡等效塑性应变云图



(b) 三维均质边坡中截面等效塑性应变云图

图8 边坡等效塑性应变云图

Fig.8 PEEQ of slope

3 结论

(1) 基于强度折减弹塑性有限元法, 分析了三维含软弱夹层边坡的稳定性和破坏模式, 并与二维平面应变含软弱夹层边坡以及三维均质边坡进行对比。

(2) 与极限平衡法假设的破坏面相比, 强度折减弹塑性有限元法计算得到的三维边坡破坏面在纵向长度上要大很多。

(3) 受软弱夹层的影响, 三维含软弱夹层边坡的稳定性降低, 其破坏滑动面形式与三维均质边坡也有较大的差别。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键. 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): 39-6.
- [2] 方建瑞, 许志雄, 庄晓莹. 三维边坡稳定弹塑性有限元分析与评价[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2667-2672.
- [3] GRIFFITHS D V, MARQUEZ R M. Three-dimensional slope stability analysis by elastoplastic finite elements [J]. Geotechnique, 2007, 57(6): 537-546.
- [4] 邓建辉, 魏进兵, 闽弘. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(I): 滑带土抗剪强度参数反演分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 896-900.
- [5] 颜天佑, 李同春, 赵兰浩, 等. 三维边坡稳定分析的有限元弹塑性迭代解法[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3102-3108.
- [6] ZHANG X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1988, 114: 659-671.
- [7] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525-529.
- [8] 顾晓强, 陈龙珠. 边坡稳定分析的三维极限平衡法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 970-973.
- [9] 朱大勇, 丁秀丽, 刘华丽, 等. 对称边坡三维稳定性计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 22-27.
- [10] 袁恒, 罗先启, 张振华. 稳定分析三维极限平衡条柱间力的讨论[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2453-2458.

Three-dimensional Stability Analysis of Slopes with Weak Interlayer Based on Elastoplastic Numerical Method

YUAN Wei^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}, LIU Yi-lin^{3,4}, WANG Hao-ran^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 4. Key Laboratory of Road Construction & Material of Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: This paper analyzes the impact of the weak interlayer on the 3D slope stability and failure mode. Example of a classic 3D slope is calculated and the results were compared with the limit equilibrium method to verify the reliability of strength reduction elastoplastic finite element method. And then an example of a 3D slope with weak interlayer is analyzed, the results show that: the ellipsoid failure surface in the longitudinal length calculated by strength reduction elastoplastic finite element method is larger than the limit equilibrium method; compared with the 3D homogeneous slope, the factor safety of 3D slope with weak interlayer is much lower, the scope of failure surface is much larger, the phenomenon of the concentration of plastic strain zone is more obvious, and the failure mode has many significant differences.

Key words: three-dimensional interlayer slope; strength reduction elastoplastic finite element method; safety coefficient