

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0905-04

挡墙加固非饱和土边坡整体稳定性分析

李荣建, 于玉贞, 邓丽军, 李广信

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(筹) / 水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 在对挡墙加固边坡进行设计和评价时应综合考虑基质吸力和挡墙对边坡整体稳定性的影响。应用可以考虑基质吸力的弹塑性强度折减有限元程序, 分析了挡墙加固非饱和土边坡的整体稳定性, 揭示了基质吸力对加固边坡整体稳定性的影响程度, 同时亦分析了整体潜在滑动面位置的变化情况, 并进行了关于吸力摩擦角的敏感性分析。

关 键 词: 非饱和土; 基质吸力; 边坡; 挡墙; 强度折减有限元法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Stability analysis of unsaturated soil slopes reinforced with retaining wall

LI Rong-Jian, YU Yu-Zhen, DENG Li-Jun, LI Guang-xin

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The retaining wall commonly existing in slope engineering, the effects of matric suction and retaining wall are important in the design and safety evaluation of the reinforced slopes. In order to decrease the occurrence of failure it is essential to properly evaluate the global stability of unsaturated soil slope reinforced with retaining wall. By using the strength reduction finite element program to implement considering matric suction, the global stability of reinforced slope is analyzed; and the computational results reveal the contribution of matric suction and indicate the variation trend of global potential sliding surface. Sensitivity analysis of suction friction angle is also presented.

Key words: unsaturated soil; matric suction; slope; retaining wall; stability; strength reduction FEM

1 引 言

挡墙是加固天然边坡或填土边坡的常用工程措施之一。设计挡墙加固边坡时, 通常先计算土压力, 然后校核挡墙的抗滑和抗倾覆稳定性以满足工程设计与应用。实际上有些挡墙加固边坡失稳属于包括地基和墙后土体的整体滑动, 例如笔者 2005 年 9 月在重庆三峡库区做过地质灾害调查时, 观察到一个 4.2 m 高挡墙加固后的边坡发生整体失稳的现象, 土坡顶部出现一个宽约 8 cm 的裂缝, 挡墙墙趾前缘土体出现明显隆起, 严重危及到位于挡墙前的云阳龙洞乡政府办公楼的安全。

考虑到上述分析方法的局限性, 国内学者采用了一些有限元法进行分析, 如杨万托等^[1]进行了重力式挡土墙有限元分析, 张友葩等^[2]进行了失稳挡土墙加固的数值分析, 段建等^[3]运用有限单元法进行了挡土墙设计, 在挡墙加固边坡的数值分析方面

做出了有意义的探讨。然而, 在实际工程中挡墙加固边坡的事故频发仍较为频繁, 原因之一是土体强度参数和基质吸力考虑不当, 一方面, 在计算中所需要的土体强度参数通常是采用天然状态下土样通过直剪试验得出, 强度指标中已隐含了基质吸力的部分, 若整个土体均采用这些强度指标值, 计算结果对基质吸力部分的量化贡献并不能被有效地计算出来, 一旦吸力强度部分丧失, 则极易引发工程事故, 这种处理方式显然较为粗糙; 另一方面, 非饱和土边坡中基质吸力在空间上的非均匀分布会导致边坡土体强度的非均匀性, 由于传统分析方法难以细致地考虑这种强度非均匀性, 往往需要做一些基质吸力分布的简化假设, 尚军^[4]在简化基质吸力分布后对水泥搅拌桩挡土墙结构稳定分析进行了有意义的研究与探讨。由于实际上基质吸力是非均匀分布的, 应该合理地考虑基质吸力及其不均匀分布对挡土墙加固非饱和土边坡整体稳定性的影响。

收稿日期: 2006-04-15

作者简介: 李荣建, 男, 1969 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值分析与计算、边坡及加固的稳定分析研究工作。E-mail: lrj03@mails.tsinghua.edu.cn

实际工程中的挡墙排水设施往往使得墙后土体处于非饱和状态,但排水设施失效、降雨或地下水位上升都可能使墙后土体非饱和状态发生变化,导致吸力重分布甚至完全丧失,此时往往需要选择合适的方法重新评价加固边坡的安全性及加固措施的有效性。

强度折减有限元法的概念最早由 Zienkiewicz 等(1975 年)提出, Ugai(1989 年)和 Griffiths 等(1999 年)推动了该方法的发展及应用。近些年来,国内外学者利用该法对挡墙加固边坡进行了一些研究,如 Dawson 等^[5]利用强度折减有限元法探讨了挡墙加固砂土边坡的整体稳定性,钟国强等^[6]用强度折减有限元法分析了加筋土挡墙边坡的整体稳定性,但是采用该法研究挡墙加固非饱和土边坡稳定性方面的文献尚较为少见,本文则对于这一问题作一些有益地探索。

对于如何考虑基质吸力的非饱和土边坡稳定性分析原理及数值算法实现在文[7]中已有详细地叙述。本文考虑了土体强度参数的合理选择、非饱和土坡的基质吸力在空间上的非均匀分布以及挡墙的加固,全面的考虑了三者对边坡整体稳定性的影响。

2 挡墙加固非饱和土边坡稳定性分析

挡墙加固黏性土边坡如图 1 所示,混凝土挡墙高 4 m,底宽 1 m,顶宽 0.5 m,混凝土弹性模量为 27.8 GPa,泊松比为 0.2,混凝土的重度为 25.0 kN/m³。黏性土的天然重度为 18.0 kN/m³,饱和重度为 19.8 kN/m³,固结不排水条件下的黏聚力为 10 kPa,内摩擦角为 12°。固结排水条件下的有效黏聚力为 8 kPa,有效内摩擦角为 20°,地下水位见图 1。

基于 Fredlund 双应力变量强度理论,本文应用开发的可考虑基质吸力的强度折减有限元程序分析该土坡采用挡墙加固后的整体稳定性,给出考虑基质吸力存在、丧失和不考虑等 3 种极端情况下对比分析,揭示了基质吸力对加固边坡整体稳定性的影响大小,同时对吸力摩擦角进行了敏感性分析,最大的吸力摩擦角取为 20°,最小的吸力摩擦角取为 0°。

采用二维有限元模型分析,有限元网格见图 2,单元数为 650 个,节点数为 710 个,边界条件为左右两侧水平约束,下部固定。非饱和土边坡基质吸力实际上在空间上是非均匀分布的,本文采用给土坡中各单元赋一个基质吸力值,来模拟基质吸力分布,土坡的一个原状基质吸力分布见图 3,最小值为 0,最大值为 110 kPa。

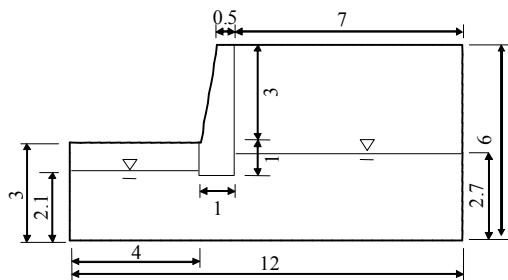


图 1 土坡挡墙示意图(单位: m)

Fig.1 Slope reinforced retaining wall(unit: m)

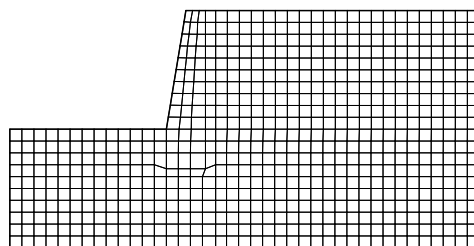


图 2 有限元网格

Fig.2 Finite element mesh

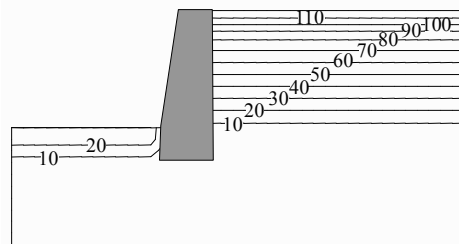


图 3 计算工况 1~6 基质吸力分布等值线图(单位: kPa)

Fig.3 Contour map of suction distribution in case 1-6(unit: kPa)

下面针对 8 种计算工况进行强度折减有限元分析,不同之处在于基质吸力和吸力摩擦角的考虑上有区别,如 1~6 工况为考虑同一个基质吸力分布的情况,但对应的吸力摩擦角不同,第 7 种工况为基质吸力丧失的情况,第 8 种工况为针对于工况 1~6 而不考虑基质吸力作用的情况,具体见表 1。

表 1 各计算工况说明
Table 1 Description of cases

工况	吸力情况	吸力摩擦角 / (°)	工况	吸力情况	吸力摩擦角 / (°)
1	赋存	20	5	赋存	4
2	赋存	14	6	赋存	0
3	赋存	10	7	丧失	
4	赋存	7	8	不考虑	

本文的强度折减有限元程序是利用相邻折减系数间的位移增量等值线来描述边坡内的特性的，临近破坏时，可根据等间距值位移增量等值线的梯度来判断是否具有明显的潜在滑动面及其相应位置，这是本文采用的强度折减有限元法突出优点之一。

图4为工况1整体稳定分析的位移增量等值线图，等间距的等值线梯度较大处为潜在滑动面。图5~9分别为工况2、工况4、工况6~8的整体稳定分析的位移增量等值线图。

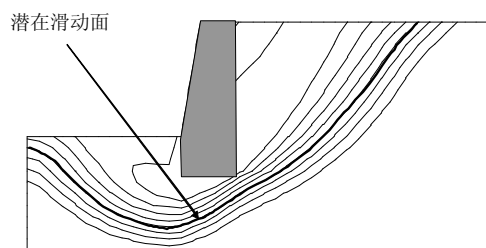


图4 计算工况1的位移增量等值线图
Fig.4 Contour map of displacement increment
in case 1

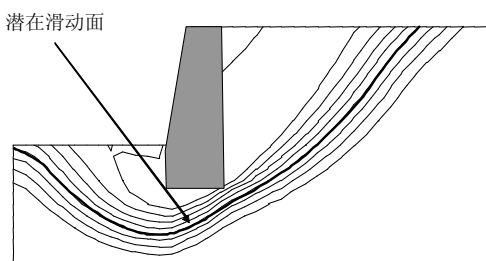


图5 计算工况2的位移增量等值线图
Fig.5 Contour map of displacement increment
in case 2

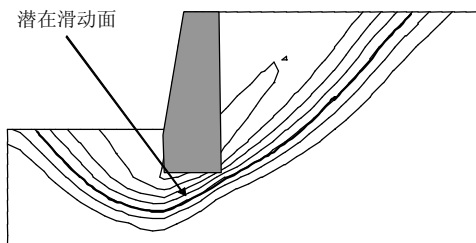


图6 计算工况4的位移增量等值线图
Fig.6 Contour map of displacement increment
in case 4

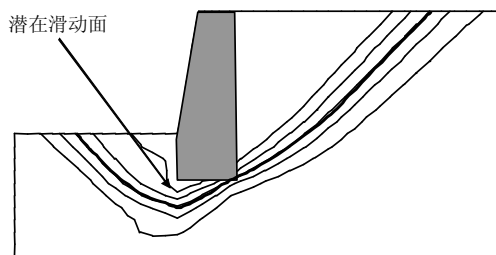


图7 计算工况6的位移增量等值线图
Fig.7 Contour map of displacement increment
in case 6

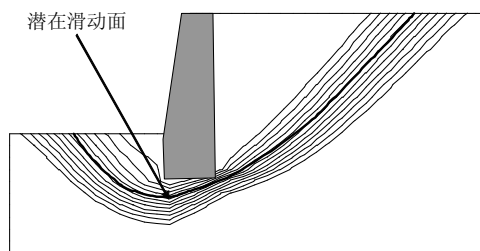


图8 计算工况7位移增量等值线图
Fig.8 Contour map of displacement increment
in case 7

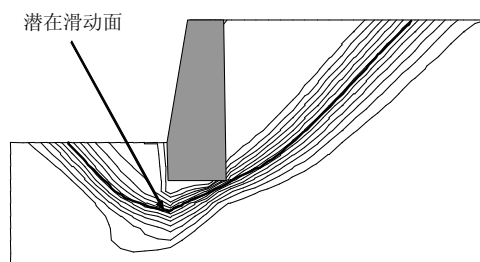


图9 计算工况8位移增量等值线图
Fig.9 Contour map of displacement increment
in case 8

表2为8种计算工况的整体稳定性分析计算结果汇总。由计算结果可以看出，挡墙加固边坡的整体安全系数由于基质吸力的丧失有所减小，基质吸力对加固边坡的整体安全系数有较大影响。进一步结合各工况的位移等值线图的结果，明显看出工况1稳定安全系数较大为2.54，潜在滑动面位置比其他工况的位置较深些，由于基质吸力的存在使加固边坡更加趋于稳定；图4~7中的潜在滑动面位置表现为逐步上移，安全系数相应地逐步下降；在工况7中，由于基质吸力的完全丧失，安全系数减小到1.61，潜在滑动面位置较浅，表明基质吸力对挡墙加固边坡的整体稳定性的贡献不容忽视。

表 2 各计算工况结果汇总
Table 2 Global safety factors

工况	吸力情况	吸力摩擦角/(°)	安全系数
工况 1	赋存	20	2.54
工况 2	赋存	14	2.37
工况 3	赋存	10	2.21
工况 4	赋存	7	2.12
工况 5	赋存	4	2.02
工况 6	赋存	0	1.80
工况 7	丧失		1.61
工况 8	不考虑		1.80

工况 6 和工况 8 的安全系数和潜在滑动面的位置基本一致, 工况 6 采用基于 Fredlund 双应力变量且考虑基质吸力功能的强度折减有限元程序进行计算, 但由于吸力摩擦角为 0, 导致坡体基质吸力的贡献为零, 而工况 8 本身不考虑基质吸力, 采用常规强度折减有限元程序进行计算, 二者实质上是采用不同的计算程序计算的同一种情况, 因此工况 6 和工况 8 能得出一致的计算结果, 同时也验证了 2 个计算程序的有效性。

图 10 为吸力摩擦角与整体安全系数的关系, 可见吸力摩擦角越大, 导致基质吸力的作用越强, 边坡趋于稳定, 整体安全系数也就越大。

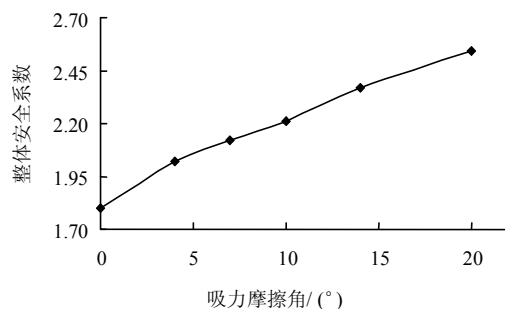


图 10 吸力摩擦角对安全系数的影响
Fig.10 Relation of suction friction angle and safety factors

本文采用的计算方法可以较细致地考虑基质吸力的非均匀分布, 可以把基质吸力对挡墙加固非饱和土边坡稳定性的量化贡献合理地体现出来, 这对于挡墙加固边坡的排水设施失效后的稳定性评价颇为重要。

3 结 语

结合非饱和土力学理论和强度折减有限元法, 本文分析了挡墙加固非饱和土边坡的整体稳定性, 通过分析和计算得出如下结论:

(1) 考虑了坡体内基质吸力不均匀分布以及挡墙的加固作用, 给出挡墙加固边坡的整体安全系数以及相应的潜在滑动面, 揭示了极限状态下挡墙加

固边坡发生整体失稳时的位移变形趋势。

(2) 合理地揭示了基质吸力作用对挡墙加固边坡整体稳定性的影响程度, 基质吸力的丧失将使安全系数减小, 潜在滑动面位置上移。

(3) 对吸力摩擦角的参数敏感性分析表明, 对同一个基质吸力场, 吸力摩擦角越小, 挡墙加固边坡的整体安全系数也越小, 相应的潜在滑动面也随着略有上移, 表明吸力摩擦角控制着基质吸力作用的整体发挥程度。

在实际工程中, 排水设施失效以及降雨、地下水位上升, 均可能使得土体的非饱和状态发生变化, 导致吸力重分布甚至丧失, 从而对挡墙加固边坡整体稳定性产生一定的不利影响, 因此对基质吸力非均匀分布的定量考虑及其对挡墙加固边坡整体稳定性影响的分析有着工程实际意义。

参 考 文 献

- [1] 杨万托, 殷海华, 王光军, 等. 重力式挡土墙有限元分析[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(5): 27-28.
YANG Wan-tuo, YIN Hai-hua, WANG Guang-jun, et al. Finite element analyses of gravity retaining wall[J]. *Building Technique Development*, 2002, 29(5): 27-28.
- [2] 张友葩, 高永涛, 吴顺川, 等. 失稳挡土墙加固数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 17-21.
ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Numerical analysis of reinforcement for unstable retaining wall[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(4): 17-21.
- [3] 段建, 言志信. 如何运用有限单元法进行挡土墙设计[J]. 森林工程, 2004, 20(5): 67-68.
DUAN Jian, YAN Zhi-xin. Design of retaining wall by applying finite element method[J]. *Forest Engineering*, 2004, 20(5): 67-68.
- [4] 尚军. 考虑非饱和土强度理论的水泥搅拌桩挡土墙结构稳定分析研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2004, 10(4): 245-251.
SHANG Jun. Applications of unsaturated soil strength theory in the analysis of general stability of cement mixed pile retaining wall[J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2004, 10(4): 245-251.
- [5] Ethan Dawson, Farid Motamed. Geotechnical Stability Analyses by Strength Reduction[M]. Slope Stability AMERICA, ASCE. [s. l.]: Geotechnical Special Publications. 2000. 99-113.
- [6] 钟国强, 周亦唐, 葛晓旭, 等. 用有限元强度折减法求加筋土挡墙的稳定安全系数[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2003, 28(1): 123-126.
ZHONG Guo-qiang, ZHOU Yi-tang, GE Xiao-xu, et al. Analysis on safety coefficient of reinforced earth walls with FEM c-reduction[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2003, 28(1): 123-126.
- [7] 李荣建, 于玉贞, 邓丽军, 等. 非饱和土边坡稳定分析方法探讨[J]. 岩土力学, 待刊.