

极限平衡法与有限元法相结合的 某护坡稳定性分析

王海鹏^{1,4}, 张举华^{2*}, 杨建贵³, 景 陈³, 周 丹⁴

(1. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
2. 南京工业大学, 江苏 南京 210009; 3. 南京市秦淮河道管理处, 江苏 南京 210012;
4. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要:以南京秦淮新河格子桥上游右岸迎水坡为算例,进行护坡的稳定分析。利用极限平衡法和有限元强度折减法计算不同护坡比(1:2,1:3,1:4)和有无铺设生态绿化混凝土等条件下护坡稳定安全系数,深入研究护坡的稳定性。同时,根据计算得到降雨入渗后护坡的水平向位移来探讨生态绿化混凝土对护坡稳定的影响。

关键词:极限平衡法;有限元强度折减法;护坡稳定分析;降雨入渗

中图分类号:TU435 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2019)08-0026-05

Stability analysis of a slope protection combined with limit equilibrium method and finite element method

WANG Haipeng^{1,4}, ZHANG Juhua², YANG Jianguai³, JING Chen³, ZHOU Dan⁴

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu; 2. Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu; 3. Nanjing Qinhuai River Management Office, Nanjing 210012, Jiangsu; 4. Nanjing Ruidi Construction Science and Technology Co., Ltd., Nanjing 210029, Jiangsu)

Abstract: Taking the slope of the right bank upstream of the new Qinhuai River Lattice Bridge in Nanjing as an example, the stability analysis of slope protection was carried out. Using the limit equilibrium method and the finite element strength reduction method to calculate different slope protection ratios (1:2, 1:3, 1:4) and the slope stability safety factor under the conditions of presence or absence of longitudinal laying eco-greening concrete and other conditions, and the stability of slope protection was studied in depth. At the same time, the horizontal displacement of the slope after rainfall infiltration was obtained to explore the influence of eco-greening concrete on slope stability.

Key words: limit equilibrium method; finite element strength reduction method; slope stability analysis; rainfall infiltration

0 引言

传统的河道护坡中,常以石料、混凝土等为土
工材料修筑硬质护坡,但该护坡方式较少考虑景观环境及生态系统的影响。近年来,绿化网防护、厚层基料喷射、植被型混凝土等已经广泛应用于边坡

收稿日期:2019-06-21

基金项目:江苏省水利科技项目(2016036);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y416014)。

作者简介:王海鹏(1980—),男,硕士,高级工程师,主要从事水利工程、岩土工程相关的科学研究、项目管理工作。

通讯作者:张举华(1992—),男,硕士研究生,主要从事数值模拟、土与结构相互作用的研究工作。

防护。生态绿化混凝土护坡采用的材料主要是由粗骨料和水泥胶凝材料等组成的,同时在混凝土上表面覆盖植被基床材料,包括上覆土、草皮等。此类型生态护坡运用植被护坡结合工程加固方式进行的,有利于提高护坡的稳定,也利于生态系统的保护,具有深远的应用前景^[1]。

河道生态绿化混凝土护坡常年受到雨水的冲刷,对生态绿化混凝土护坡的稳定性具有一定的影响,因此,分析生态绿化混凝土护坡在不同环境下的安全具有一定的现实意义。王旭等^[2]运用可靠度的方法对边坡的稳定性进行分析,分析了岩土参数的随机性、变异性对边坡稳定性的影响。崔中良等^[3]根据边坡的地质条件、工程条件等,采用刚体极限平衡法,对一般工况下的边坡稳定进行了分析,对比分析了不同工况下的安全系数,证明极限平衡法在边坡稳定分析中的应用是可靠的。夏圆圆^[4]通过 ABAQUS 软件与有限元强度折减法相结合,以特征部位的位移拐点和塑性区贯通作为边坡失稳的判定标准,结合算例分析,认为该方法是合理可行的。李炎隆等^[5]以南水北调中线工程淇河倒虹吸基坑边坡为研究对象,分析了降雨入渗对边坡稳定性的影响。

本文以南京秦淮新河格子桥上游右岸迎水坡为算例,利用极限平衡法和有限元强度折减法计算不同护坡比(1:2,1:3,1:4)和有无铺设生态绿化混凝土等条件下护坡稳定安全系数,研究护坡的稳定性,同时通过分析降雨后护坡的水平向位移来探讨生态绿化混凝土对护坡稳定的影响。

1 护坡计算基本原理

1.1 极限平衡法

极限平衡法是解决护坡稳定工程的基本方法,且该方法更适用于均质土坡。极限平衡法建立在摩尔库仑强度准则基础上,其特点是只考虑静力平衡条件和土体的摩尔库仑破坏准则。常用的极限平衡法有多种,本文主要讨论瑞典圆弧法和毕肖普(Bishop)法在护坡稳定分析中的运用。瑞典圆弧法由瑞典 K. E. Peterson 提出,该方法指在均质粘性土坡滑动时,其滑动面近似为圆弧状。假定滑动面以上的土体为刚性体,即设计中不考虑滑动土体内部的相互作用力,土坡稳定属于平面应变问题。毕肖普(Bishop)法是土坡稳定分析考虑土条间相互作用力的圆弧滑动分析法,具体为把滑裂土体当作刚体绕圆心旋转,并分条计算其滑动力与抗滑力,最后

求出稳定安全系数,是一种改进的圆弧滑动法。

1.2 有限元强度折减法

强度折减法的基本原理是将土体抗剪强度指标 c 、 φ 值,用折减系数 F_r 进行折减,得到多组不同的 c_m 和 φ_m 值的组合。其中, c_m 、 φ_m 分别根据公式(1)和(2)求得,当护坡土体达到临界破坏状态时所对应的折减系数 F_r 即为对应条件下的护坡最小稳定安全系数。

$$c_m = \frac{c}{F_r} \quad (1)$$

$$\varphi_m = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_r}\right) \quad (2)$$

目前强度折减法判断土坡能否达到临界破坏状态的评价标准有3种:(1)根据数值计算结果能否收敛为评价标准。(2)以特征部位的水平位移关于强度折减系数关系曲线图上的位移拐点作为评价标准。(3)以塑性应变等值线云图中的滑动破裂面是否连续贯通作为评价标准。

2 工程应用分析

2.1 工程概况

南京秦淮新河格子桥上游右岸迎水坡全长约290 m,对该段迎水坡进行生态绿化混凝土护坡设计。具体的设计方案之一为将原有20 cm 混凝土护坡拆除,压实土基,在土基上铺设生态绿化混凝土,铺设厚度为20 cm。见图1。

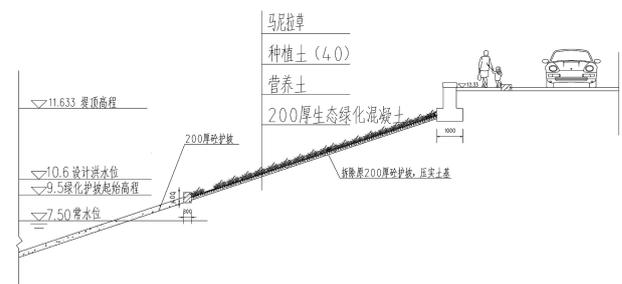


图1 河道护坡前后对比及生态绿化混凝土护坡结构示意图

2.2 设计参数

本文的护坡稳定计算土层为均质土,如表1所示。对比分析不同工况下护坡稳定安全系数,为边坡设计与稳定性评估提供理论依据,使经济与社会效益最大化。

2.3 极限平衡法理论计算

本工程案例采用 STAB2008 程序进行极限平衡法的护坡稳定分析。通过计算不同坡度、是否铺设生态绿化混凝土等情况下的稳定安全系数来对比分析不同因素对生态护坡的影响。具体计算结果

表1 护坡稳定设计参数

土层	重度 γ /(kN/m^3)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	弹性模量 E /(GPa)	泊松比 μ
均质土层	19.2	18	22	0.1	0.35
生态绿化混凝土	24	—	—	20	0.17

(备注:生态绿化混凝土厚度为20cm,有限元强度折减法中 c 、 φ 值的折减系数的范围为0.25~5)

如下:

(1) 原护坡计算模型及计算结果(坡度比1:2)

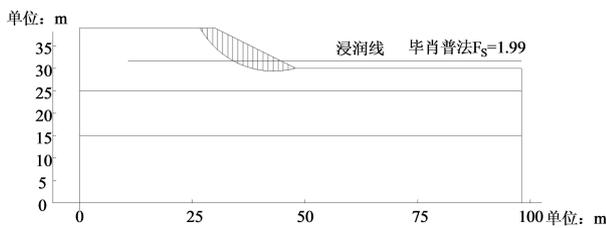


图2 毕肖普法计算原护坡稳定安全系数

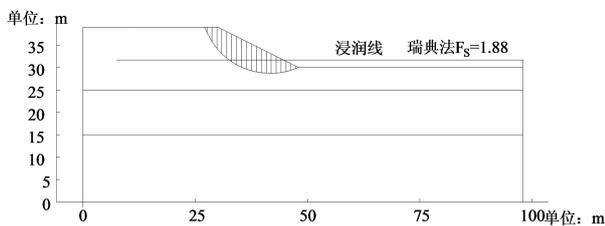


图3 瑞典法计算原护坡稳定安全系数

图2和图3为在坡度比1:2的情况下原护坡的安全稳定计算结果。由图可知,护坡的滑弧方向为由左向右,水位线位于坡底之上。图2采用毕肖普法得到的安全稳定系数是1.99,图3采用瑞典法计算得到的安全稳定系数是1.88。

(2) 铺设生态绿化混凝土的计算模型及计算结果(坡度比1:2)

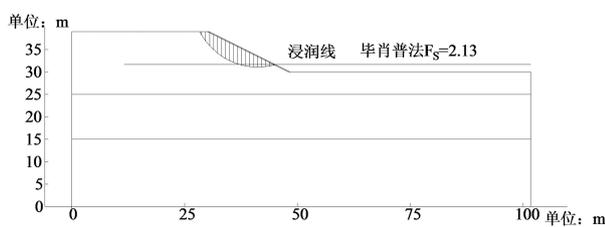


图4 毕肖普法计算铺设生态绿化混凝土护坡稳定安全系数

图4和图5为在坡度比1:2情况下铺设生态绿化混凝土的护坡安全稳定分析结果。从图中可知,护坡滑弧的方向由左向右,水位线位于坡底之上,生态绿化混凝土底部出现滑裂面。图4采用毕肖普法计算得到的安全稳定系数为2.13,图5采用瑞典法计算得到的安全稳定系数为2.08。

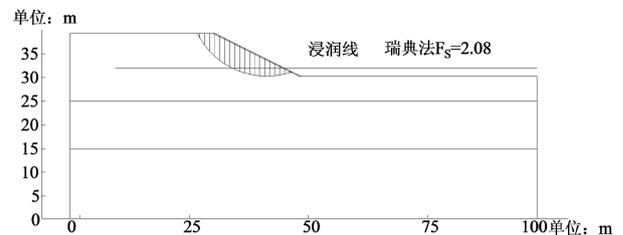


图5 瑞典法计算铺设生态绿化混凝土护坡稳定安全系数

综合图2~5可知,在护坡坡度相同的情况下,随着生态绿化混凝土的铺设,护坡的刚度相较原护坡刚度增大,约束了护坡变形的发展,护坡的稳定安全系数也随之增大。

2.4 有限元强度折减法理论计算

本工程案例采用ABAQUS有限元软件进行强度折减法的护坡稳定分析。根据相关图纸及资料,建立三维有限元模型。模型自护坡底向下30m作为底部边界,取护坡底向左50m作为左侧边界,取护坡顶向右30m作为右侧边界,沿护坡纵向取20m作为计算边界。模型底部施加三向约束,模型四周施加法向约束。具体计算结果如下:

(1) 原护坡模型及等值线云图计算结果(坡度比1:2)

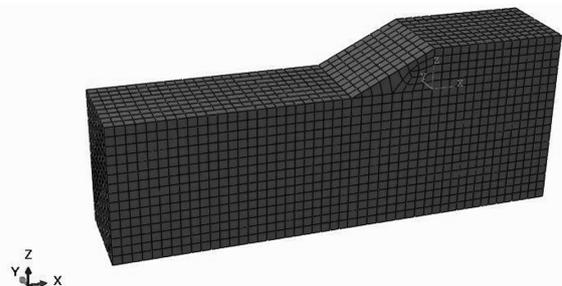


图6 原护坡有限元模型

图6和图7为在坡度比1:2的情况下原护坡的有限元模型及计算结果。结合计算结果,该护坡的稳定安全系数为 $F_s = 2.16$ 。由图7可清楚地判断出滑动面的位置,其与极限平衡法分析中的一样,呈大致的圆弧状,且通过坡脚点。

(2) 铺设生态绿化混凝土的计算模型及等值线

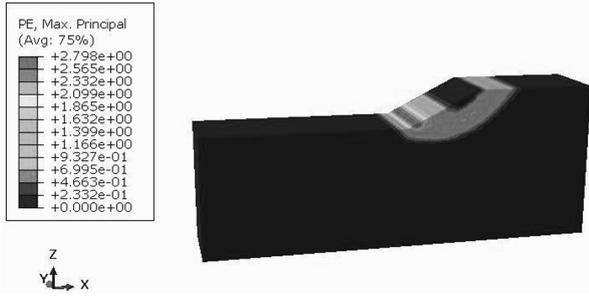


图 7 原护坡塑性应变区的等值线云图(最终)云图计算结果(坡度比 1:2)

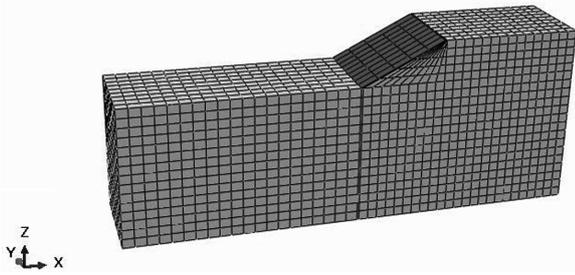


图 8 铺设生态绿化混凝土的护坡有限元模型

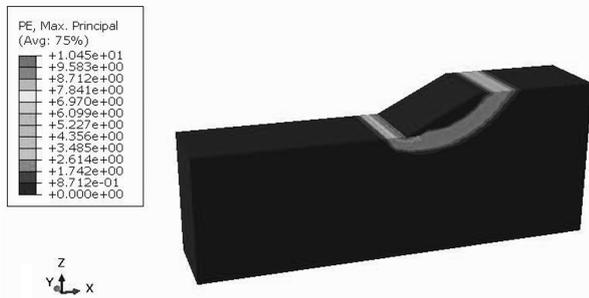


图 9 铺设生态绿化混凝土护坡塑性应变区的等值线云图(最终)

图 8 和图 9 为在坡度比 1:2 的情况下铺设生态混凝土板的护坡有限元模型及计算结果。根据结果可得护坡的稳定安全系数为 $F_s = 2.29$ 。由图 9 的塑性区等值线云图可清楚的判断滑裂面出现的位置,呈大致的圆弧状,且通过坡脚点。同时区别于原护坡的坡面塑性区的变化,对于图 9 坡面铺设生态混凝土板,没有塑性区的变化。

结合图 6~9,根据强度折减法计算得到的不同工况下的护坡安全系数知,随着生态绿化混凝土的铺设,护坡坡面的刚度的增大,约束了护坡变形的发展,安全系数也随之增大,护坡也更加稳定安全。

以上所述均为在坡度比 1:2 的情况下的计算分析,本文同时对 2 种方法在不同的坡度比条件下的护坡稳定分析,具体结果如表 2 所示。

结合极限平衡法和强度折减法的计算结果得,在相同工况下,采用强度折减法计算得到的安全系数略大于极限平衡法得到的安全系数,但 2 种方法

得到的安全系数均符合实际工程情况。在其他工况都相同的情况下,随着护坡坡度的增大,护坡的安全系数随之减小。同样,在坡度相同情况下,铺设生态混凝土的护坡的安全系数大于原护坡的安全系数。因此在实际工程中,为了保证护坡的稳定性可适当减小护坡的坡度,同时在护坡的表面铺设生态绿化混凝土。

2.5 降雨入渗对护坡稳定的影响

降雨入渗条件下护坡的稳定性分析同样是评价护坡安全的主要依据,对工程施工具有重要的意义。本工程案例中降雨入渗分析通过建立三维有限元模型进行数值分析,其中土体的渗透系数为 5.0×10^{-6} m/s,降雨作用在整个分析区域的顶面,入渗强度为 15 mm/h,降雨时长为 72 h。通过分析降雨后护坡的水平向位移来探讨生态绿化混凝土对护坡稳定的影响,具体计算结果如下:

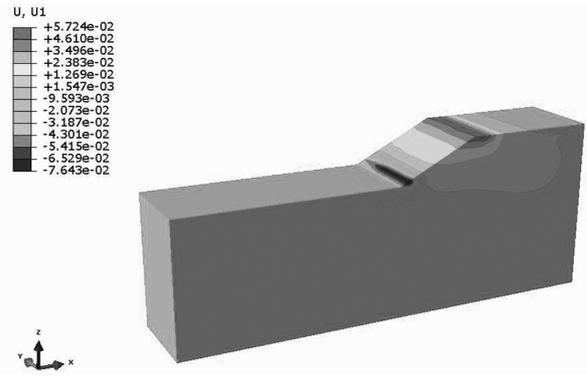


图 10 原护坡水平位移(单位:m,负值表示方向向左)

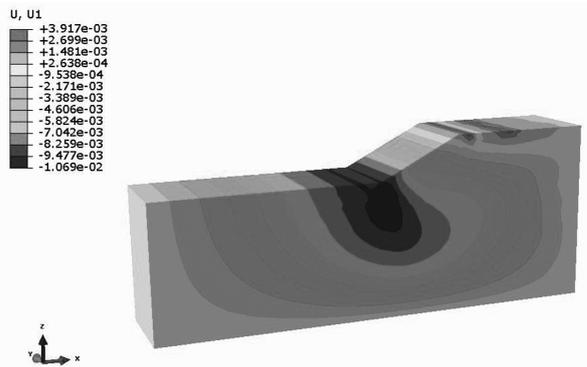


图 11 铺设生态绿化混凝土的护坡水平位移(单位:m,负值表示方向向左)

图 10 和图 11 分别给出了降雨 72 h 后的原护坡和铺设生态混凝土的护坡水平位移等值线云图,由图可见降雨入渗条件下原护坡的水平位移最大值出现在坡脚,为 7.64 cm,方向向左;铺设生态绿化混凝土的护坡的水平位移最大值出现在坡脚,为 1.06 cm,方向向左。因此,在降雨入渗条件下,铺设

表 2 采用极限平衡法与强度折减法在不同工况下得安全系数汇总

工况	坡度比	强度折减法	极限平衡法	
			毕肖普法	瑞典法
原护坡	1:2	2.16	1.99	1.88
	1:3	2.64	2.53	2.38
	1:4	3.18	3.07	2.89
铺设生态绿化 混凝土护坡	1:2	2.29	2.13	2.04
	1:3	2.77	2.66	2.53
	1:4	3.27	3.15	3.01

生态绿化混凝土可增加护坡的安全性,减小护坡的滑动。

3 结论

本文结合秦淮新河工程案例进行了护坡稳定分析。通过极限平衡法和有限元强度折减法计算分析不同条件下的护坡稳定性,得出以下结论:随着护坡坡度的增大,护坡的安全系数随之减小。在坡度相同情况下,铺设生态绿化混凝土的护坡的安全系数大于原护坡的安全系数;在降雨入渗的条件下,铺设生态绿化混凝土护坡的水平位移小于原护坡的水平位移,铺设生态绿化混凝土的护坡刚度相较原护坡刚度增大,约束了护坡变形的发展,减小了护坡的滑动,增强了护坡的安全性。

参考文献:

- [1] 郭琪. 生态护坡中生态混凝土的应用[J]. 山东工业技术, 2016 (2):75.
- [2] 王旭, 刘东升, 宋强辉, 等. 基于极限平衡法的边坡稳定性可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3):839-844.
- [3] 崔中良, 张东方, 姚艳领. 极限平衡法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国锰业, 2016, 34(5):135-137.
- [4] 夏园园. 基于 ABAQUS 有限元强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 价值工程, 2018, 37(31):198-202.
- [5] 李炎隆, 陈波, 马成成, 等. 基于 ABAQUS 的降雨入渗条件下基坑边坡稳定性分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1):155-161.