

文章编号: 1000-7598(2012)10-3020-05

降雨条件下土工格室柔性护坡的稳定性分析

王广月, 韩 燕, 王杏花

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘 要: 土工格室柔性护坡是一种既经济、简便并有绿色环保的护坡模式, 越来越被广泛应用于实际工程。但由于该类护坡受周围环境及气候的影响比较大, 很多土工格室柔性护坡的失稳破坏是降雨入渗产生的。针对格室防护体系的整体剪切破坏模式, 采用极限平衡法建立了降雨条件下防护边坡稳定性分析模型, 并通过模拟计算分析了土体含水率、边坡角度、铆钉间距、格室坡长、坡面冲刷和格室深度对其稳定性的影响。研究结果可为土工格室柔性护坡的合理设计和稳定性评价提供技术支持。

关 键 词: 土工格室; 稳定性; 含水率; 抗剪强度; 坡度; 铆钉间距

中图分类号: TU 457

文章编号: A

Stability analysis of geocell flexible slope protection in rainfall

WANG Guang-yue, HAN Yan, WANG Xing-hua

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Flexible slope protection geocell is an economic, convenient and eco-friendly technique; and it is increasingly used in practical projects. However, geocell is sensitive to the ambient environment; and it might lose its stability due to rainfall infiltration. In this paper, the shear failure behavior of the geocell system under rainfall infiltration is analyzed. By adopting the limit equilibrium method, a slope stability analysis model is established; and the influences of soil moisture content, slope angle, rivet space, slope length, slope wash and geocell depth on stability are analyzed. The research result would provide technical support for the design and stability analysis of flexible slope protection geocell system.

Key words: geocell; stability; moisture content; shear strength; slope; rivet space

1 引 言

土工格室是一种采用高密度聚乙烯(HDPE)片材焊接而成的蜂窝状三维立体网格结构(见图1), 伸缩自如, 可以折叠, 施工时张拉成格网, 具有材质轻、耐磨损老化、耐腐蚀、拉伸强度高、抗冲击力强、运输方便等优点。土工格室植草护坡是指将土工格室展开, 通过铆钉将其固定在坡面上, 然后在格室内充填种植土, 喷播草籽, 再浇水养护的一种复合型生态护坡技术。这种柔性护坡形式具有良好的防护作用和绿色环保效应: (1) 种植土包裹于蜂窝状的格室单元内, 大大减少坡面土壤流失; (2) 直接在格室中填土种草, 发达的植物根系起到联接、加筋坡面土体的作用, 其保持水土的作用可减缓雨水冲刷和入渗, 且绿化环境; (3) 降雨形成

的坡面水流受到格室片材的限制, 分散坡面径流, 使得水流路径加长, 水流冲刷作用相对分散, 起到消能防冲的作用^[1]; (4) 水流可以从格室侧壁的孔洞流出, 或经特设的土工复合排水体排出, 避免形成暗流, 避免坡面与防护体之间形成潜蚀性破坏^[2]。

土工格室植草边坡防护技术成本低, 施工简便, 且具有较高的环保、生态效益, 在工程中得到了广泛应用。但对于土工格室边坡防护稳定性的理论研究相对落后于工程实践, 现有研究成果主要集中在坡面侵蚀防护、施工工艺和水土流失对环境影响评价方面。对土工格室受降雨等因素的影响还缺乏了解, 以至于在设计时无理论可寻, 使得已建工程的防护边坡多处出现冲刷破坏, 边坡一旦发生整体破坏, 不仅不能达到土工格室防护、绿化边坡的目的, 而且将带来经济上的损失和可能的人员伤亡。例如:

收稿日期: 2011-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11072133)。

第一作者简介: 王广月, 男, 1963年生, 教授, 主要从事土工合成材料应用及坡面侵蚀动力特性方面的研究。E-mail: wgyue@sdu.edu.cn

济青高速公路复线有多处如图 2 所示的冲刷破坏。因此,研究降雨条件下土工格室边坡的稳定性,为进行土工格室防护边坡的工程设计提供理论依据,具有十分重要的工程意义。



图 1 土工格室基本结构形式
Fig.1 Structural system of geocell



图 2 土工格室剪切破坏
Fig.2 Shear failure of geocell

2 降雨条件下格室防护体系的稳定性分析

格室防护体系的稳定性包括抗冲刷性和抗滑动性。由于格室护坡初期,植物根系不发达,稳定性主要取决于其抗滑动性。降雨对格室防护体系稳定性的影响,主要表现为对土体的综合软化效应。降雨过程中,随着雨水入渗,非饱和土含水量逐渐增大,土体重度 γ 增大,基质吸力、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 降低,从而造成土体抗剪强度减小,使得格室防护体系的力学状态发生改变,重建力学平衡,甚至可能导致失稳破坏。平铺式土工格室护坡的稳定分析模型见图 3。

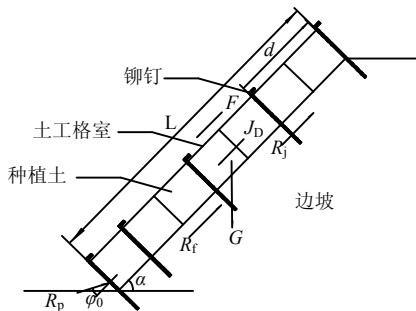


图 3 土工格室防护体系稳定分析模型
Fig.3 Stability analysis model of geocell system

由于土工格室防护体系都是在原坡面上铺设,因此,其破坏模式一般都是沿原坡面整体滑动破坏。考虑到格室厚度远小于其长度,故可采用无限边坡法,将土工格室防护体系看作一个刚体,并以它为脱离体,采用极限平衡法分析其稳定性。定义安全系数 K 为整个滑动面上的抗滑力 R 与下滑力 S 之比,即

$$K = \frac{R}{S} = \frac{R_f + R_j/K_j + R_p \cos \varphi_0}{G \sin \alpha + F + J_D} \quad (1)$$

式中: R_f 为充填土的阻滑力; R_j 为坡面铆钉传递的附加阻力; K_j 为抗剥离安全系数,一般取为 1.5; R_p 为坡脚对下滑土工格室防护体系产生的被动土压力; G 为格室防护体系自身的重力; F 为坡面水流冲刷力; J_D 为渗流力; α 为坡脚; φ_0 为被动土压力与刚性支撑接触面法线方向夹角。

以单位宽度坡面格室为研究对象,则可得到各个作用力:

$$G \sin \alpha = \gamma L t \sin \alpha \quad (2)$$

式中: γ 为种植土的重度; L 为格室的长度; t 为格室高度。

$$F = \gamma_w L h \sin \alpha \quad (3)$$

式中: γ_w 为水的重度; h 为径流深度。

$$J_D = i \gamma_w L t = \gamma_w L t \sin \alpha \quad (4)$$

$$R_f = G \cos \alpha \tan \varphi_f + c_f L = \gamma L t \cos \alpha \tan \varphi_f + c_f L \quad (5)$$

式中: φ_f 、 c_f 分别为种植土与边坡界面的黏聚力、内摩擦角, i 为水力坡度。

$$R_j = (f_j L) / d^2 \quad (6)$$

式中: f_j 为单位深度格室焊接点的剥离强度; d 为铆钉间距(纵、横向等间距布置)。

坡脚刚性支撑:采用库仑被动土压力计算公式^[3],将黏性土的强度指标 c 和 φ 折算成一个等效内摩擦角 φ_d ,

$$R_p = \frac{1}{2} \gamma K_p (t \cos \alpha)^2 \quad (7)$$

其中

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi_d + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha - \varphi_0) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi_d + \varphi_0) \sin(\varphi_d + \alpha)}{\cos(\alpha - \varphi_0)}} \right]^2} \quad (8)$$

式中: K_p 为被动土压力系数; φ_d 为等效内摩擦角。

$$\varphi_d = 2 \left\{ 45^\circ - \arctan \left[\tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{2c}{\gamma t \cos \alpha} \right] \right\} \quad (9)$$

式中: c 、 φ 分别为格室内种植土的黏聚力、内摩擦角。

$$\varphi_0 = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) \varphi_d \quad (10)$$

坡脚锚固反压^[4]:

$$R_p = \gamma t^2 N_\gamma + c N_c \quad (11)$$

$$N_\gamma = \frac{3 \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)}{2(1 - \sin \varphi) \cos \varphi} \frac{\tan \varphi (e^{3\theta_0 \tan \varphi} - \cos \theta_0) + \sin \theta_0}{1 + 9 \tan^2 \varphi} \quad (12)$$

$$N_c = \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} + \frac{3(e^{2\theta_0 \tan \varphi} - 1)}{4 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)} \quad (13)$$

$$\theta_0 = \alpha + \pi/4 - \varphi/2 \quad (14)$$

式中: N_γ 、 N_c 分别为反压系数; θ_0 为变换角。

将式 (2) ~ (7) (或 (11)) 代入式 (1), 即可评价格室防护体系的稳定性或进行施工设计。

为了利用上述稳定性模型定量分析降雨入渗对格室-土系统稳定性的影响, 考虑到土工格室厚度一般较小 (在 50~200 mm), 可假定降雨入渗过程中格室内不同高度处土体含水率随降雨历时的变化规律相同。

对于分析模型中重力 G 的选取, 必须考虑由于雨水入渗而引起的土体重量的增加, 受降雨入渗的影响, 土的重度 γ 可按下式计算^[5]:

$$\gamma = \gamma_d + \theta \gamma_w \quad (15)$$

式中: γ_d 为土的干重度; θ 为土体的体积含水率。

降雨入渗的另外一个重要作用就是使得土体软化。不同土壤的抗剪强度指标随含水率增大而减小的幅度不同, 为方便起见, 本文直接依据文献[6]测定的非饱和黄土含水率与土强度参数的关系, 建立体积含水率 θ 与非饱和土的强度指标 c 、 φ 的关系, 采用拟合公式为

$$c = 4.905\theta^{-1.156} \quad (16)$$

$$\varphi = 24.0 - 8.262\theta \quad (17)$$

3 算例分析

3.1 算例

济青高速公路复线开挖山体形成的路堑边坡坡高 $H = 15.1$ m, 坡角 $\alpha = 52^\circ$ 。在边坡表面铺装土工格室以进行边坡防护, 坡脚采用刚性支撑, 铆钉间距 $d = 0.8$ m。格室型号为 TGGs 200×400×1.2-(4 m×5 m), 各项性能参数见表 1。格室沿坡面铺装长度 $L = H / \sin \alpha = 19.16$ m。填充前测得种植土各项参数: $\gamma_d = 17.6$ kN/m³, $\varphi_f = 16^\circ$, 初始体积含水率 $\theta_0 = 0.11$, 饱和体积含水率 $\theta_s = 0.42$ 。种植土与岩石边坡界面黏聚力 c_f 不稳定, 取为 0。

表 1 土工格室构造及力学参数

Table 1 Structure and mechanical properties of geocell

格室材料	高/mm	焊矩/mm	厚度/mm	焊点强度/(kN/m)	拉伸强度/MPa	延伸率/%
HDPE	200	400	1.2	10.8	24	600

利用本文建立的稳定性分析模型, 分别对降雨前与降雨后两种情况下该格室防护体系的稳定性进行分析。

(1) 降雨前: 根据降雨前测得的土体参数, 可以得到土工格室的土体参数:

$$\gamma = \gamma_d + \theta_0 \gamma_w = 17.6 + 0.11 \times 10 = 18.7 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 4.905\theta_0^{-1.156} = 62.92 \text{ kPa}$$

$$\varphi = 24.0 - 8.262\theta_0 = 23.09^\circ$$

则利用式 (1) ~ (7), 可得到防护体系的安全系数为

$$K = \frac{R_f + R_j / K_j + R_p \cos \varphi_0}{G \sin \alpha + F + J_D} = \frac{12.65 + 64.66 / 1.5 + 2.85}{56.47 + 0 + 0} = 1.04$$

(2) 降雨后

由于土工格室高度较小, 一般在 50~200 mm 之间, 一般降雨条件下, 可假设格室内的土体均可达到饱和状态。则可求得土工格室的土体参数如下:

$$\gamma = 21.8 \text{ kN/m}^3, c = 13.37 \text{ kPa}, \varphi = 20.53^\circ$$

降雨条件下, 还需要考虑水流的剪切作用。试验研究^[7]表明, 在相同坡度条件下, 坡面径流剪切力随着雨强的增大而增大, 但不论雨强大小, 历时 9 min 左右即基本达到稳定, 所以认为在同一坡度处, 径流剪切力为定值。工程实践表明, 坡面径流多为薄层水流, 水深较小, 特大暴雨时可达 2 cm 左

右。本文假定坡面各处径流深相同, 为保守计算取 2.5 cm。则坡面水流冲刷力为

$$F = \gamma_w L h \sin \alpha = 10 \times 19.16 \times 25 \times 10^{-3} \times \sin 40^\circ = 3.77 \text{ kN}$$

考虑渗流对土体的影响, 渗流力为 $J_D = \gamma_w L t \sin \alpha = 30.20 \text{ kN}$

同样, 利用式 (1) ~ (7) 可得到防护体系的在降雨条件下的安全系数为

$K =$

$$\frac{R_f + R_j / K_j + R_p \cos \varphi_0}{G \sin \alpha + F + J_D} = \frac{14.75 + 64.66 / 1.5 + 1.09}{35.63 + 3.77 + 30.20} = 0.85$$

可见, 降雨对土工格室防护体系的稳定性具有较大影响, 若按既有设计方法进行施工, 则遇降雨情况格室防护体系的将可能产生整体破坏。

3.2 影响因素分析

土工格室边坡防护体系的稳定性受到土体含水率、铆钉间距、坡长和坡角, 以及格室规格和坡面冲刷等多因素的影响。利用本文建立的稳定性分析模型, 对这几个主要因素对防护体系稳定性的影响规律进行分析。

降雨使得土体含水率增大直至饱和, 基质吸力减小, 从而使得土体的黏聚力和内摩擦角减小, 使得格室防护体系的抗滑力大大降低, 稳定性就会变差。图 4 为在不同铆钉间距下, 格室防护体系的安全系数随土体含水率 θ 的变化曲线。由图可见, 含水率和铆钉间距对格式防护体系的稳定性影响显著: 随着土体含水率的增加和铆钉间距的增大, 防护体系的安全系数 K 明显减小。因此, 降雨强度越大、降雨历时越长, 格室土体含水率增大越快, 稳定安全系数降低越快。在土工格室施工设计时, 必须考虑降雨影响, 避免降雨条件下格室发生整体剪切破坏。

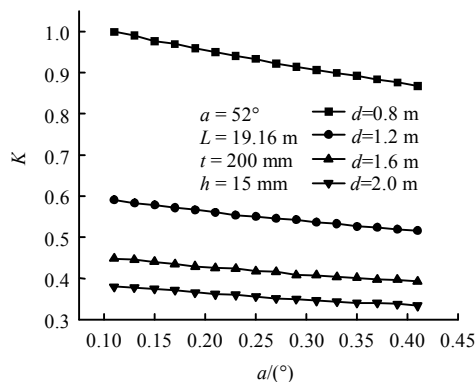


图 4 体积含水率和铆钉间距对 K 的影响
Fig.4 The influences of soil moisture content and rivet space on value of K

图 5 为在不同铆钉间距下, 格室防护体系的稳定性随边坡坡度的变化曲线。可见, 边坡越陡, 格室防护体系的稳定性越差, 安全系数越小, 降低幅度也随坡度的增加渐小。同时说明, 无论边坡陡、缓, 铆钉间距对格室防护体系稳定性的影响都很大, 且当铆钉间距超过一定值时, 再增大铆钉间距对 K 的影响较小, 如图 5 所示, 在 $d=1.6 \text{ m}$ 和 $d=2.0 \text{ m}$ 2 条 $K-\alpha$ 曲线即说明了这个特征。

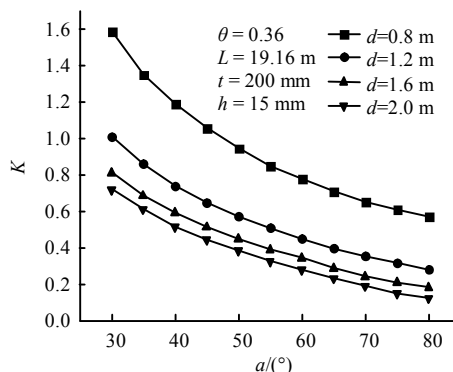


图 5 不同铆钉间距下的 $k-\alpha$ 曲线
Fig.5 Effect of rivet space upon $k-\alpha$ curves

随着边坡长度 L 的增大, 格室防护体系的抗滑力和下滑力均增大。图 6 的计算结果表明, K 随 L 的增大而减小。因此, L 增大造成的抗滑力的增大幅度小于下滑力的增大幅度。对于坡长较大的边坡, 可沿坡长方向分段施工 (加混凝土框格), 将格室防护体系分为独立的几个部分, 以增强其稳定性。坡度对 K 的影响显著, 对于缓于 1:1 的边坡, 格室防护体系的稳定性均较好, 但对于陡于 1:1 的边坡, 虽然可以通过减小铆钉间距和设置混凝土框格来增强其稳定性, 但会增加工程造价, 不值得推广。

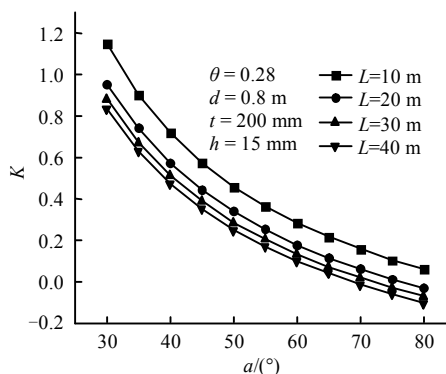


图 6 不同边坡长度的 $k-\alpha$ 曲线
Fig.6 Effect of slope length on $k-\alpha$ curves

考虑不同的土工格式深度以及不同的径流冲刷

条件, 计算不同坡度下的防护体系的稳定性, 其安全系数的变化分别如图 7、8 所示。结果表明, 土工格室的深度和坡面径流冲刷力对格式防护体系的稳定性影响甚微, 可忽略不计。

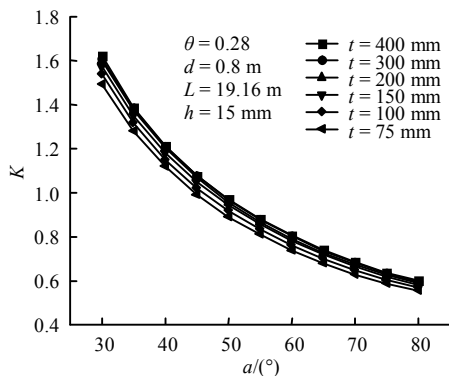


图 7 格室深度对 K 的影响

Fig.7 Effect of geocell depth on value of K

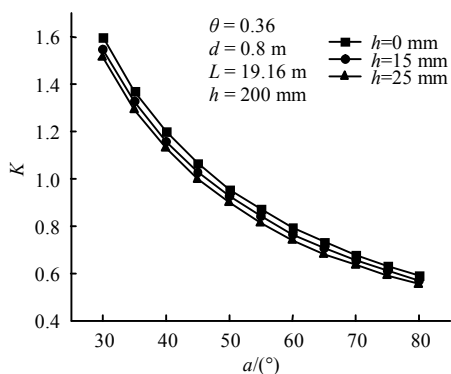


图 8 坡面径流深对 K 的影响

Fig.8 Effect of runoff depth on value of K

4 结 论

(1) 考虑降雨入渗和坡面冲刷作用, 采用极限平衡分析方法, 对格室防护体系进行抗滑稳定性分析, 建立了稳定分析模型, 用于土工格室植被护坡设计或进行稳定性评价。

(2) 降雨条件下, 格室土体的抗剪强度指标随土体含水率的增大而减小, 导致抗滑力大大减小, 安全系数降低, 导致格室防护体系的整体剪切

破坏。

(3) 分析计算表明, 格室防护体系的稳定性随格室土体含水率、铆钉间距、格室坡长和边坡角度的增大而减小, 且影响显著。此护坡技术适用于坡度缓于 1:1 的边坡。格室深度和坡面冲刷力对其稳定性影响甚微。

参 考 文 献

- [1] 李凌姜. 黄土公路边坡柔性防护技术试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [2] 曾锡庭, 于志强. 土工格室及其应用[J]. 中国港湾建设, 2001, 21(2): 33—37.
ZENG Xi-ting, YU Zhi-qiang. Geocell and its application[J]. *China Harbour Engineering*, 2001, 21(2): 33—37.
- [3] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2004.
- [4] 张季如, 朱瑞庚, 程序桥. 土工格室用于岩石边坡植被侵蚀防护的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 359—362.
ZHANG Ji-ru, ZHU Rui-geng, CHENG Xu-qiao. Stability analysis of geocells with vegetation used for controlling erosion of rocky slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3): 359—362.
- [5] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 447—450.
CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rainwater[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 447—450.
- [6] 王晓峰. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [7] 管新建. 不同土质坡面水蚀过程模拟试验及建模研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.