

边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析

刘泽¹, 陈丽¹, 何砾¹, 楼华锋², 钟正³

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江杭州 310011;
3. 马克菲尔(长沙)新型支挡科技开发有限公司, 湖南长沙 410600)

摘要:针对降雨时边坡筋锚三维网柔性防护结构可能沿坡面滑动失稳的问题,基于极限平衡理论,考虑雨水击溅和坡面水流冲刷作用,建立了降雨条件下边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析模型,并进行了实例分析,探讨了边坡倾角、降雨强度、防护结构层厚度、锚钉间距、锚钉锚固长度对防护结构稳定性的影响。结果表明:与无降雨相比,降雨条件下边坡筋锚三维网柔性防护结构受到的下滑力增大,抗滑力减小,防护结构的稳定性明显降低;在相同的防护结构设计参数下,防护结构的稳定性随边坡倾角增加而减小,当坡面形成径流后,降雨强度对防护结构稳定性的影响比较小;在相同的边坡条件下,防护结构的稳定性系数随锚钉间距、结构层厚度的增大而减小,随锚钉锚固长度的增加而增大;锚钉间距和锚固长度对防护结构稳定性的影响最显著,锚钉间距可通过建立的模型合理确定,锚固长度不宜小于0.5 m。

关键词:柔性防护结构;筋锚三维网;降雨;边坡稳定性;极限平衡理论

中图分类号:U416.1⁺⁴

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)04-0065-06

Stability analysis of flexible protection structure for slope reinforced anchor 3D-geomat//LIU Ze¹, CHEN Li¹, HE Fan¹, LOU Huafeng², ZHONG Zheng³ (1. College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research Co., Ltd., Hangzhou, 310011, China; 3. Maccaferri (Changsha) Enviro-Tech Co., Ltd., Changsha 410600, China)

Abstract: Aiming at the problem of sliding instability along slope surface during rainfall for 3D mesh flexible protection structure with reinforcement and anchorage, a stability analysis model of slope protection structure under rainfall condition was established based on limit equilibrium theory, considering the splash of rainwater and the scouring effect of flow on the slope surface. Case study was performed and the effects of slope inclination, rainfall intensity, protective layer thickness, distance between anchors and anchorage length on the stability were discussed. The results show that under rainfall conditions, the sliding force of the slope protective structure increases, the anti-sliding force decreases, and the stability of the protective structure decreases obviously. Under the same design parameters for the protective structure, the stability of protective structure decreases with the increase of slope inclination. When runoff forms on the slope surface, the influence of rainfall intensity is relatively small. Under the same slope condition, the stability coefficient of the protective structure decreases with the increase of the distance between anchors and the thickness of the structural layer, and increases with the increase of anchorage length. The distance between anchors and anchorage length have the most significant influence on the stability of protective structure. The distance between anchors should be reasonably determined by the stability analysis model proposed in this paper, and the anchorage length should not be less than 0.5 m.

Key words: flexible protection structure; reinforcement anchor 3D-geomat; rainfall; slope stability; limit equilibrium theory

随着我国基础设施建设的快速发展,水利工程、公路、铁路出现前所未有的建设高潮,大量工程边坡也相继出现。在保证这些边坡稳定性的同时如何快速恢复边坡的生态功能是目前工程建设面临的挑战之一^[1]。将土工合成材料(如土工网、土工格室、加

筋麦克垫等)与植生绿化技术相结合的生态护坡技术具有植物生长快、抗冲刷性能好、施工简单、工人劳动强度低、成本低等优点,近年来深受工程建设者的关注。

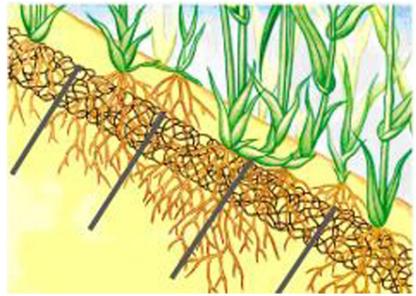
近年来国内外学者对土工合成材料生态护坡技

术开展了广泛的研究。王广月等^[2]开展了三维土工网防护下边坡侵蚀模型试验,建立了累积侵蚀量与雷诺数的关系。张宝森等^[3]将理论分析和现场试验相结合,探讨了三维网垫护坡在提高边坡抗冲刷能力、降低坡面径流速度和促进植物生长方面的作用;彭俏健^[4]采用原位试验研究了降雨对三维植被网生态防护体系稳定性的影响,认为三维植被网可以防止降雨引起的边坡局部冲蚀破坏。肖成志等^[5-6]对土工网的抗冲蚀机制进行了研究,推导了水头损失和径流速度的计算方法,并对柔性生态防护边坡的稳定性进行了数值分析,认为柔性网垫可分散坡内应力、提高整体稳定性、降低滑坡的可能性。肖衡林等^[7]提出了边坡柔性生态防护时三维土工网厚度的确定方法,为三维土工网的设计和选择提供了依据。肖成志等^[8-9]通过现场试验分析了边坡角度、土工网类型、边坡土体性质、草籽喷洒密度等因素对边坡浅层土体抗剪强度、平均渗透系数、侵蚀量的影响及其相互关系。Mao 等^[10]研究了植物类型、植物密度和土壤环境等对坡面土体黏聚力的影响。Rahardjo 等^[11]通过现场试验研究了降雨后边坡孔隙水压力的分布。袁俊平等^[12-13]结合工程实际对边坡生态防护中的材料选择进行了探讨。这些研究有力地促进了边坡防护由圬工结构向柔性生态结构的转变^[14-15]。

将加筋麦克垫和锚钉作为护坡结构的骨架,配合高性能生态基材和营养土构成的筋锚三维网生态护坡技术近年来在国内的边坡防护工程中得到了尝试性应用,结果表明,这种方式具有比传统土工网护坡更显著的抗冲刷性能、长期稳定性与工程复绿效果。为探讨筋锚三维网柔性防护结构的稳定性,本文考虑降雨的影响,建立边坡筋锚三维网柔性防护结构稳定性分析模型,分析边坡倾角、降雨强度、防护层厚度、锚钉间距、锚固长度等因素对防护结构稳定性的影响,以期对筋锚三维网生态护坡技术的工程应用提供参考。

1 筋锚三维网柔性防护结构的组成及特点

筋锚三维网柔性防护结构是以加筋麦克垫和锚钉(或锚杆)作为护坡骨架,配合高性能生态基材、营养土构成的一种新型边坡防护结构(图1(a))。结构中所用的加筋麦克垫(图1(b))是一种以机编双绞合钢丝网为骨架,将聚乙烯(或聚丙烯)热融、挤压成丝状并随机黏结在骨架上,形成具有一定厚度、不规则孔隙的三维网。与传统土工网相比,加筋麦克垫具有强度高、厚度大、孔隙率高、孔隙分布随机的特点。与其他边坡防护结构(如浆砌片石骨



(a) 防护结构



(b) 加筋麦克垫

图1 筋锚三维网生态护坡结构

架、锚杆框格梁护坡)相比,筋锚三维网柔性防护结构具有以下优点:

a. 抗侵蚀效果好,植被恢复快。加筋麦克垫是一种柔性结构,可以很好地贴合工程中裸露的边坡,其三维孔隙性结构能够消解雨水动能,防止坡面土体被雨水击溅和冲刷,使坡面土颗粒、草籽等受到有效的保护而不被冲刷流失,还可截留雨水,保持水分,易于草籽发芽,促进植被的生长;植物生长时其根系可穿过加筋麦克垫并能对坡面浅表层土起到加筋作用,同时加筋麦克垫还能将坡面植被及受植被根系影响的浅表层土体连成整体,增强坡面浅表层土体的整体稳定,提高抗侵蚀性能。

b. 适用范围宽、边坡稳定性好。锚杆可有效提高边坡的整体稳定性;加筋麦克垫可有效保护土体表层,防止锚杆之间土体的流失,在土体发生位移时协调锚杆一起工作,提升边坡稳定性;高性能生态基材为植被的生长提供必要的营养条件。筋锚三维网柔性防护结构不仅可用于贫瘠干旱的路堤边坡,也可用于高大陡峭、缺土少肥的路堑边坡和陡峭的岩质边坡。同时筋锚三维网柔性防护结构是一种开放性结构,渗入坡体的水可以自由排放,避免坡内渗水积蓄造成边坡失稳。

c. 强度高、耐久性好。加筋麦克垫中的双绞合钢丝网纵向抗拉强度最高可达 50 kN/m,使结构整体强度得到提高;同时双绞合钢丝网采用金属镀层防腐处理,材料耐久性好。

d. 施工简单,质量容易控制。边坡粗平后即可铺设施工;加筋麦克垫重量轻,人工搬运即可,工人

劳动强度低;采用锚钉(或锚杆)固定,效率高,可有效缩短工期。加筋麦克垫与锚杆等材料均为工厂定型产品,质量可靠。

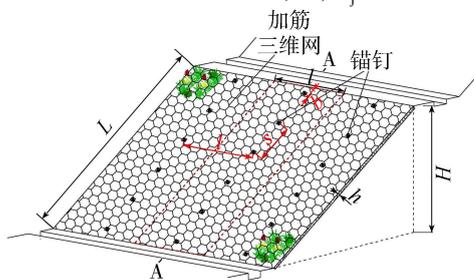
2 稳定性分析模型

当边坡采用筋锚三维网柔性结构防护时(图2),在防护初期,由于坡面植被尚未生成或植物根系尚不发达,不能起到锚固作用,可忽略其作用。降雨时雨水将入渗到坡面土体,使坡面土体含水量增加,容重增大,土体与防护结构间界面强度减小^[16],使防护结构可能沿防护结构与原坡间的界面发生滑移失稳。设边坡坡长为 L ,采用柔性防护时锚钉的横向和纵向间距分别为 l 和 s (图2(a)),取一系列锚钉的作用宽度(l)为计算宽度,建立边坡柔性防护结构的受力分析模型,如图2(b)所示。降雨时防护结构的受力主要有:防护结构的自重 G 、三维网与坡面之间的摩擦力 R_f 、锚钉(或锚杆)提供的阻力 R_s 、雨滴降落在边坡上产生的击溅力 Q 、坡面径流的冲刷力 F_s 、雨水入渗引起的渗透力 J_d 。当柔性防护结构沿结构与原坡面的交界面发生整体滑移破坏时,可定义防护结构的抗滑移稳定性系数 K 为

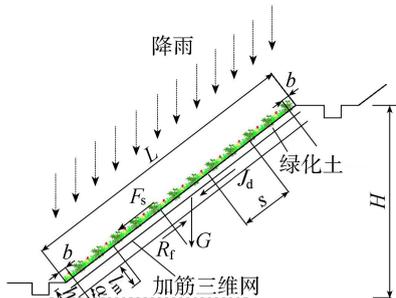
$$K = \frac{R_f + R_s}{G \sin \alpha + J_d + F_s + Q} = \frac{R_f + nR_j}{G \sin \alpha + J_d + F_s + Q} \quad (1)$$

其中 $n = \frac{L - 2b}{s} + 1$

式中: n 为计算宽度内设置的锚钉个数; b 为顶排和底排锚钉距坡顶、坡底的距离,m; R_j 为单个锚钉提



(a) 边坡柔性防护示意图



(b) 柔性防护结构的作用力系(A-A剖面)

图2 筋锚三维网柔性防护结构稳定性分析模型

供的阻力,kN; α 为坡角,(°);式中各种荷载如下计算:

a. 柔性防护结构的自重 G 。 G 为计算宽度内三维网与植生绿化土(客土、高性能基材及植物种子)的总重。由于三维网的自重小、网孔大,植生绿化土将进入三维网内并形成一定厚度的植生垫层(总厚度8~15 cm),而相较于植生绿化土的质量,三维网的质量可以忽略不计,故 G 可按式计算:

$$G = \gamma L h l \quad (2)$$

式中: γ 为植生绿化土的容重,kN/m³; h 为植生垫层厚度,m。

b. 坡面径流的冲刷力 F_s 。 F_s 可按式计算:

$$F_s = \gamma_w L h_w l s \sin \alpha \quad (3)$$

式中: γ_w 为水的容重,kN/m³; h_w 为坡面径流深度,m,其值与降雨量、土体渗透率等多种因素有关,可按式简化计算:

$$h_w = 0.37 m^{\frac{1}{3}} (\psi q L \cos \alpha)^{\frac{2}{3}} \sin^{-\frac{1}{3}} \alpha \quad (4)$$

式中: ψ 为径流系数; m 为坡面粗糙度; q 为降雨强度,mm/s。

c. 防护结构中雨水的渗透力 J_d 。 J_d 可按式计算:

$$J_d = \gamma_w L h l s \sin \alpha \quad (5)$$

d. 雨滴的击溅力 Q 。 Q 可根据能量守恒定律获得^[16]:

$$Q = 10^{-9} \frac{\gamma_w}{g} q l l d v_d \cos \alpha \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度,取9.8 m/s²; d 为雨滴直径,mm; v_d 为雨滴降落速度,m/s,在雨滴降落过程中会受到空气阻力,雨滴最终会匀速降落地面^[17], v_d 可由下式计算:

$$v_d = \begin{cases} 10^6 \left(\frac{0.787}{d^2} + \frac{503}{\sqrt{d}} \right)^{-1} & d < 1 \text{ mm} \\ (17.2 - 0.844d) \sqrt{0.1d} & 1 \text{ mm} \leq d < 3 \text{ mm} \\ \frac{d}{0.113 + 0.0845d} & 3 \text{ mm} \leq d < 6 \text{ mm} \end{cases} \quad (7)$$

e. 防护结构与坡面之间的摩擦力 R_f 。 R_f 可按式计算:

$$R_f = (G + Q) \cos \alpha \tan \varphi_f \quad (8)$$

式中: φ_f 为防护结构与边坡间的界面摩擦角,(°)。

f. 锚钉阻力 R_j 。锚钉的作用是使三维网紧贴坡面,使防护结构与边坡成为一个整体。对于填方边坡而言,边坡表面的土层比较松软,而锚钉长度较小,插入土层的深度小,相对于土体而言锚钉刚度较大。当防护结构下滑时,锚钉将对其前方的土体产生挤压作用,单个锚钉能提供的抗滑阻力可按锚钉

直径宽度范围的被动土压力计算:

$$R_j = \frac{1}{2} B_p \gamma l_m^2 K_p \quad (9)$$

其中 $B_p = 0.9(1.5D + 0.5)$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$$

式中: B_p 为锚钉计算直径, m; D 为锚钉的直径, mm; l_m 为锚钉的锚固部分长度, m; K_p 为被动土压力系数; φ 为土的内摩擦角, ($^\circ$)。

3 实例分析

3.1 工程背景与防护结构稳定性计算

某公路路堤边坡坡高 $H=10$ m, 边坡坡率 1 : 1.5, 坡面采用筋锚三维网生态防护方案, 防护层厚度为 10 cm, 植生绿化土的天然容重 $\gamma = 19.1$ kN/m³, 其降雨后饱和容重 $\gamma_{sat} = 22.6$ kN/m³, 降雨前、后防护结构与原坡面的界面摩擦角 φ_f 分别为 25 $^\circ$ 、21 $^\circ$ 。筋锚三维网垫的厚度为 12 mm, 抗拉强度为 35 kN/m; 锚钉采用 HPB300 钢筋制作, 直径为 8 mm, 长为 0.6 m (其中锚固部分长度为 0.48 m), 间距为 1 m×1 m。

根据建立的模型计算正常工况(无降雨)和 12 h 降水量为 100 mm(暴雨-特大暴雨)时防护结构稳定性, 结果见表 1。由表 1 可见, 正常工况下该设计方案的边坡防护结构稳定性较高, 但降雨后边坡防护结构的稳定性有较大幅度的下降(下降了 41.3%)。因此, 在边坡柔性防护设计时应当考虑降雨的影响。

表 1 防护结构稳定性计算结果

| 工况 | G/kN | R_f/kN | R_j/kN | F_s/kN | J_d/kN | K |
|-------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| 正常 (无降雨) | 51.64 | 20.03 | 34.1 | | | 2.08 |
| 降雨 | 61.1 | 19.51 | 34.1 | 0.12 | 10 | 1.22 |

3.2 防护结构稳定性影响因素分析

3.2.1 边坡倾角(坡率)的影响

图 3 为防护结构稳定性系数随边坡倾角变化的关系曲线。由图 3 可知, 防护结构的稳定性系数随边坡倾角的增大逐渐减小。当边坡高度一定时, 边坡倾角的增加会引起防护结构重力的下滑分量增加和边坡长度的减小, 而在锚钉间距保持不变情况下, 边坡长度的减小使锚钉数量减少, 总锚固力减小, 从

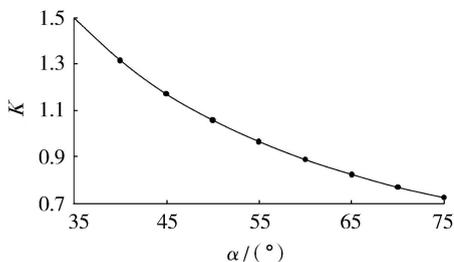


图 3 边坡倾角对稳定性系数的影响

而边坡稳定性系数减小。从图 3 还可以看出, 当边坡倾角大于 55 $^\circ$ 时, 稳定性系数小于 1, 防护结构将发生滑移失效, 需设法提高边坡防护结构的稳定性。

3.2.2 降雨强度的影响

分别取 12 h 降水量为 50 mm、100 mm、150 mm、200 mm, 其他参数不变, 计算防护结构的稳定性。计算结果显示不同降雨强度下的防护结构的稳定性系数基本相同。其主要原因在于: 当边坡雨水入渗稳定, 坡面形成径流后, 降雨强度的变化主要体现在坡面受到雨滴击溅力和径流冲刷力方面, 但这两者在防护结构下滑力中占的比重小, 对防护结构稳定性的影响也就很小, 即在防护结构稳定性分析中可以不考虑降雨强度的影响。但应当注意, 降雨时雨水的击溅将破坏坡面土颗粒的结构, 使其更为松散, 在坡面径流作用下水土流失将加重, 这需要通过加筋三维网的约束作用与后期坡面植被的水文效应、力学效应来控制。

3.2.3 结构层厚度的影响

分别取防护结构层厚度 $h = 6$ cm、8 cm、10 cm、12 cm、14 cm、16 cm, 其他参数不变, 计算防护结构的稳定性, 结果见图 4。当防护结构层厚度增加时, 其重力增大, 由于结构层的支撑面为斜面, 由重力引起的下滑力增量大于摩擦力的增量, 因此防护结构稳定性系数随结构层厚度的增加非线性减小。当结构层厚度等于 16 cm 时, 防护结构稳定性系数接近 1, 达到临界状态。可见, 防护结构层的厚度不宜过大, 但增加防护结构层厚度有利于坡面植被的生长与维护(特别是贫瘠土或岩质边坡), 此时宜通过减小锚钉间距、增加锚钉数量等来提高防护结构的稳定性。

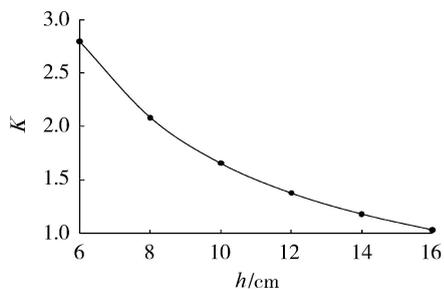


图 4 结构层厚度对稳定性系数的影响

3.2.4 锚钉间距的影响

分别取锚钉纵向间距 $s = 0.4$ m、0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m、1.6 m、1.8 m、2.0 m, 其他参数不变, 计算不同锚钉纵向间距下防护结构的稳定性, 结果见图 5。从图 5 可知, 随锚钉纵向间距增大, 防护结构稳定性系数非线性减小。这是由于锚钉纵向间距增大, 一定坡长范围内锚钉的数量减小, 锚钉提供的总抗滑力减小, 最终导致了稳定性系数的减小。

在锚钉间距小时,锚钉提供的抗滑力在总抗滑力中占比高,随锚钉间距增大,锚钉数量减少,锚钉提供的抗滑力在总抗滑力中占比也减小。因而锚钉纵向间距从0.4 m增大到0.8 m时,稳定性系数减小幅度较大,随后趋于平缓。

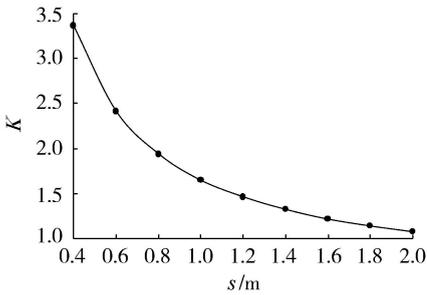


图5 锚钉纵向间距对稳定性系数的影响

分别取锚钉横向间距 $l=0.5\text{ m}$ 、 1.0 m 、 1.5 m 、 2.0 m 、 2.5 m 、 3.0 m 、 3.5 m 、 4.0 m ,其他参数不变,计算不同锚钉横向间距下防护结构的稳定性,结果见图6。从图6可以看出,与锚钉纵向间距的影响类似,防护结构的稳定性系数随锚钉横向间距增大而减小,其原因在于增大锚钉横向间距使得单列锚钉所要承担的防护结构宽度增加,防护结构受到的下滑力增大,而锚钉提供的抗滑力不变,最终导致了稳定性系数的减小。

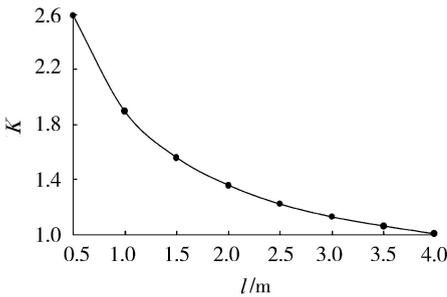


图6 锚钉横向间距对稳定性系数的影响

综合前面的分析可知,锚钉的布置对防护结构的稳定性影响很大,锚钉布置过疏,防护结构的稳定性不够;锚钉布置过密,边坡材料用量与施工费用增加,经济性降低。因此在选择锚钉间距时,可根据实际工程状况和目标稳定性系数,先按常规确定锚钉的横向间距(一般为1~3 m),再根据式(1)求得计算宽度内所需要的锚钉数量,然后进一步确定锚钉的纵向间距(一般等间距布置)。

3.2.5 锚钉锚固长度的影响

分别取锚钉锚固长度 $l_m=0.3\text{ m}$ 、 0.4 m 、 0.5 m 、 0.6 m 、 0.7 m 、 0.8 m 、 0.9 m ,其他参数不变,计算不同锚固长度下防护结构的稳定性,结果见图7。由图7可见,锚固长度越长,稳定性系数越大,防护结构越稳定。由式(9)可以看出,锚钉阻力 R_j 与锚固长度呈二次函数关系。因此,在锚固长度从0.3 m增加

到0.9 m过程中,锚固长度每增加0.1 m,稳定性系数增长23%~39%,可见锚钉锚固长度对结构稳定性有显著影响。考虑经济性和锚钉施工难度,在边坡采用筋锚三维网防护方案时,锚固长度一般不宜小于0.5 m。

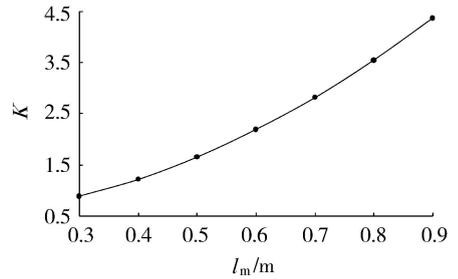


图7 锚钉锚固长度对稳定性系数的影响

4 结论

a. 与无降雨相比,降雨条件下边坡筋锚三维网柔性防护结构的下滑力增大,抗滑力减小,防护结构的稳定性明显降低。

b. 在相同的防护结构设计参数下,防护结构的稳定性随边坡倾角增加而减小;当坡面形成径流后,降雨强度对防护结构稳定性的影响很小,在边坡防护结构稳定性设计时可不考虑降雨强度的影响。

c. 在相同的边坡条件下,防护结构的稳定性系数随着锚钉间距、结构层厚度的增大而减小,随锚钉锚固长度的增加而增大,其中锚钉间距与锚固长度的影响最显著。实际工程中锚固长度不宜小于0.5 m,锚钉间距宜通过建立的模型(式(1))合理确定。

参考文献:

[1] 杨玉冬,高明生,徐永福. 植物根系土的剪切强度简化计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 535-540. (YANG Yudong, GAO Mingsheng, XU Yongfu. Simplified calculation method of shear strength for root-permeated soils[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(6): 535-540. (in Chinese))

[2] 王广月,王艳,徐妮. 三维土工网防护边坡侵蚀特性的试验研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 79-84. (WANG Guangyue, WANG Yan, XU Ni. Test and study on erosion characteristics of 3D geonet protection slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 79-84. (in Chinese))

[3] 张宝森,荆学礼,何丽. 三维植被网技术的护坡机理及应用[J]. 中国水土保持, 2001(3): 34-35. (ZHANG Baosen, JING Xueli, HE li. Slope protection mechanism and application of 3D-geomat technology [J]. Soil and Water Conservation in China, 2001(3): 34-35. (in Chinese))

- Chinese))
- [4] 彭俏健. 土工三维植被网的护坡原理及应用[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(6): 282. (PENG Qiaojian. Slope protection principle and application of 3D-geomat [J]. West-china Exploration Engineering, 2006, 18(6): 282. (in Chinese))
- [5] 肖成志, 李雨润, 王朋, 等. 三维网垫植草护坡坡体稳定性数值分析[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 76-80. (XIAO Chengzhi, LI Yurun, WANG Peng, et al. Numerical analysis on general stability of 3-D vegetation mattress of slope protection [J]. Yangtze River, 2011, 42(9): 76-80. (in Chinese))
- [6] 肖成志, 孙建诚, 李雨润, 等. 三维土工网垫植草护坡防坡面径流冲刷的机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 453-458. (XIAO Chengzhi, SUN Jiancheng, LI Yurun, et al. Mechanism analysis of ecological slope protection against runoff erosion by grass jetting on 3D geomat [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 453-458. (in Chinese))
- [7] 肖衡林, 张晋锋. 三维土工网垫固土植草试验研究[J]. 公路, 2005(4): 163-166. (XIAO Henglin, ZHANG Jinfeng. Experimental study on 3D-geomat for planting grass [J]. Highway, 2005(4): 163-166. (in Chinese))
- [8] 肖成志, 孙建诚, 刘晓朋. 三维土工网垫植草护坡效果的影响因素试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(12): 1793-1799. (XIAO Chengzhi, SUN Jiancheng, LIU Xiaopeng. Experimental study of influential factors of slope protection through grass jetting on 3D geomat [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(12): 1793-1799. (in Chinese))
- [9] 卢涛. 岩质边坡锚杆-土工网垫喷播植草生态护坡植生层稳定性试验及数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [10] MAO Z, SAINT-ANDRE L, GENET M, et al. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: choosing cohesion models [J]. Ecological Engineering, 2012, 45: 55-69.
- [11] RAHARDJO H, LI X W, TOLL D G, et al. The effect of antecedent rainfall on slope stability [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, 19(3/4): 371-399.
- [12] 袁俊平, 韩春雷, 丁巍, 等. 膨胀土边坡防护方案比选研究[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 68-72. (YUAN Junping, HAN Chunlei, DING Wei, et al. Comparison study of four protection for expansive soil slope [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 68-72. (in Chinese))
- [13] 武小菲, 王强. 郑西客运专线黄土路堑高边坡植被防护技术[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 57-60. (WU Xiaofei, WANG Qiang. Protection technology of loess cutting high slope in Zhengxi passenger dedicated line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 57-60. (in Chinese))
- [14] 师新业, 陈志伟, 高逸成. 生态景观加筋材料挡土结构研究现状与展望[J]. 公路与汽运, 2016(1): 126-134. (SHI Xinye, CHEN Zhiwei, GAO Yicheng. Research status and prospect of reinforced soil retaining structure for ecological landscape [J]. Highway and Automotive Applications, 2016(1): 126-134. (in Chinese))
- [15] 张俊云, 周德培, 李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1400-1403. (ZHANG Junyun, ZHOU Depei, LI Shaocai. Study on greening method for rock slope in highway project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1400-1403. (in Chinese))
- [16] 陈婷婷. 地震及降雨条件下三维网垫防护体系的稳定性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [17] 贡力. 黄土高原降雨雨滴动能的侵蚀计算[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 43-45. (GONG Li. Erosion calculation of raindrops' kinetic energy of loess plateau's rainfall [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University (Natural Sciences), 2005, 24(4): 43-45. (in Chinese))
- (收稿日期: 2019-04-20 编辑: 雷燕)
- +++++
- (上接第 57 页)
- [17] HUO Jixiang, MA Fuheng, JI Xiaolei. Porosity and permeability variations of a dam curtain during dissolution [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(2): 155-161.
- [18] 王腾. 废轮胎胶粒再生混凝土氯离子侵蚀及碳化性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [19] 彭艳周, 高军, 徐港, 等. 盐冻融环境下钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 44-49. (PENG Yanzhou, GAO Jun, XU Gang, et al. Prediction for corrosion life of reinforced concrete structures under salt freeze-thaw environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 44-49. (in Chinese))
- [20] 徐金花, 冯夏庭, 陈四利. 橡胶集料对混凝土抗冻性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(6): 895-898. (XU Jinhua, FENG Xiating, CHEN Sili. Effects of rubber aggregate on the frost resistance of concrete [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(6): 895-898. (in Chinese))
- (收稿日期: 2019-08-01 编辑: 郑孝宇)