

岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性分析

舒安平¹, 高小虎^{2,3}, 舒晓锐⁴

(1. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875; 2. 北京林业大学 草地资源与生态研究中心, 北京 100083;
3. 北京清大绿源科技有限公司, 北京 100084; 4. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031)

摘要: [目的] 讨论岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性计算方法, 为该类工程的稳定性评价提供依据。[方法] 模拟计算抗剪型和摩擦型根系产生的作用力, 转换为抗剪强度后作为客土稳定性的附加值, 进而推导出稳定性计算公式, 并通过济南—莱芜高速公路的客土喷播工程案例进行实测和验证。[结果] (1) 客土稳定性系数取决于无根土抗剪强度(F_s)、客土容重(γ)、客土厚度(d)、根系抗剪强度增量(τ_R); (2) 根系产生的抗剪强度可细分抗剪型根系抗剪应力(τ_{Rg})和摩擦型根系抗剪应力(τ_{Rf})二者之和; (3) 稳定性计算值始终小于实测值, 分布规律及偏差值较稳定, 植被恢复初期的 3~5 a 内客土稳定性系数与植被恢复期成明显的正相关关系。[结论] 客土稳定性系数计算可以作为岩石边坡植被恢复工程的参数设计和稳定性评价方法。

关键词: 岩石边坡; 植被恢复; 客土; 稳定性系数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0184-05

中图分类号: S152.4

文献参数: 舒安平, 高小虎, 舒晓锐. 岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 184-188. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.031; Shu Anping, Gao Xiaohu, Shu Xiaorui. Stability analysis of carrying soil in vegetation restoration project on rock slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 184-188. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.031

Stability Analysis of Carrying Soil in Vegetation Restoration Project on Rock Slope

SHU Anping¹, GAO Xiaohu^{2,3}, SHU Xiaorui⁴

(1. College of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Center of Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Beijing Tsingda Greens Tech Co., Ltd., Beijing 100084, China; 4. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Ji'nan, Shandong 250031, China)

Abstract: [Objective] The calculation method with regard to the carrying soil stability in a vegetation restoration project performed on the rock slope was discussed. [Methods] The acting forces both from resisting shear root and friction root were simulated, and then converted them into anti-shear strength and served as an added value to the stability of carrying soil. Further, a mathematical model associated with the soil stability on the rock slope was established, and was verified by the vegetation restoration project of the Jinan-Laiwu expressway. [Results] (1) The stability coefficient of carrying soil was a function of shear strength without root(F_s), bulk density(γ), thickness(d), and increment of root shear strength(τ_R). (2) The anti-shear strength of the root could be the sum of resisting shear root(τ_{Rg}) and friction root(τ_{Rf}). (3) The stability coefficient is persistently smaller than its measured counterpart, and the deviation rate is small. Also, the soil stability coefficient was positively correlated with the initial vegetation restoring period (i. e. 3~5 years). [Conclusion] The determination of carrying soil stability coefficient could be employed as the parametric design and evaluation for the vegetation restoration project on the rock slope.

Keywords: rock slope; vegetation restoration; carrying soil; stability coefficient

随着“一带一路”战略和西部开发进程的加快,基础设施建设不可避免地开挖、填筑形成大量的裸露边坡,植被恢复工程正是为解决边坡植被恢复和防护而产生的新兴行业。绝大多数植被恢复工程都是以客土或替代材料在坡面覆盖一定厚度的土壤,通过植物生长实现浅层防护为最终目的^[1-3]。因此,浅层防护非常依赖于浅层土体自身的稳定程度,其稳定性系数计算是植被恢复工程安全评估的重要指标^[4]。目前国内外公开有关土壤材料、护坡植被的特性方面研究成果较多,现有研究中的植被恢复工程客土厚度一般不超过10~15 cm,属于浅层防护类型^[5-6],少量客土稳定性分析只集中于根系对土体的“加筋”作用及防护机理的认识^[7-12]。万娟等^[13]通过多花木兰的单一植物根系的抗拉特性来讨论了边坡稳定性,而杨永红、冯国建、陈怿旸等^[14-16]开展了包括草本、灌木等不同植被对浅层土体的抗剪强度、土体稳定性的分析,肖宏彬等^[17]测试了根系对边坡土体抗崩解能力影响。尽管已开展的研究证实了根系的存在能增加客土稳定性,提出了根系力学影响土体抗剪强度和边坡稳定性的思路,但少有研究能定量分析客土稳定性大小。同时,植被恢复工程往往会在坡面挂贴金属网或土工网,从而形成与自然坡面不一致的受力结构,极大地使客土受力复杂化。有鉴于此,本文以山东省济南—莱芜段高速公路岩石边坡植被恢复工程为研究对象,讨论基于岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性系数计算方法,为植被恢复工程的稳定性分析评估提供依据。

1 稳定性系数基本公式

对于任意客土土块,下滑力(T_a)相当于自重力沿坡面的分量,数学表达式为:

$$T_s = W \sin \theta = V_y \sin \theta = L d \gamma \sin \theta \quad (1)$$

式中: γ, L, d, θ ——土块容重、长度、厚度和坡度。

抗滑力(T_r)相当于客土与岩石间的摩擦阻力与自身剪应力的总和,数学表达式为:

$$T_r = W \cos \theta \tan \varphi + cL = L d \gamma \cos \theta \tan \varphi + cL \quad (2)$$

式中: c ——客土黏聚力; φ ——内摩擦角。

假设客土潜在的滑动是沿岩石表层的平面滑动,无根客土稳定性计算公式为:

$$F_s = \frac{T_r}{T_s} = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} + \frac{c}{\gamma d \sin \theta} \quad (3)$$

若客土中增加植物根系的存在,相当于在无根客土的抗剪强度上增加了一个凝聚力项,若不考虑孔隙水作用,参照库仑定理可建立表达式:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi + \Delta c \quad (4)$$

式中, Δc 即根系对客土附加的一种黏聚力,相当于根系的抗剪强度 τ_R 。由此,可建立有根客土稳定性计算公式为:

$$F = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} + \frac{c + \tau_R}{\gamma d \sin \theta} = F_s + \frac{\tau_R}{\gamma d \sin \theta} \quad (5)$$

由此可以看出, F_s, γ, d, θ 均可通过取样和直剪获取数值,接下来就详细讨论 τ_R 的求解。

2 根系抗剪强度的推导

大多数研究在对根系受力分析时是按根径大小、入土深度或草本、木本类型进行外观区分,而在植被恢复工程看,受金属网或土工网的影响,客土发生剪切破坏时改变了植物根系的抗剪应力,因此应依据根系的受力类型重新对所有根系进行判定。

2.1 根系受力类型的判定

在根系受力时,若根土静摩擦力 $>$ 抗拉力,根系被拉断,其对土体的抗滑作用主要表现在根系沿滑面的抗拉强度分量,通常为草本植物根系和细小的木质根系。相反,如果根土静摩擦力 $<$ 抗拉力,土体滑动时根系没有被拉断,其对土体的抗滑作用主要表现在静摩擦力,通常为较粗的木质根系。因此,讨论摩擦型根系和抗剪型根系是以根系在剪切破坏时的抗拉强度和静摩擦力的大小为标准。

对于任意植物单根在客土中有效长度为 l ,从土表往下依次分为 n 段,每段对应的长度分别为 l_1, l_2, \dots, l_n ,半径分别为 r_1, r_2, \dots, r_n ,取任意第 i 段,则体积计算式为: $V_i = \pi r_i^2 l_i$ 。若第 i 段与土表的竖直距离为 h_i, Ψ_i 为根系与水平方向夹角,则第 i 段承受的客土重为 $\gamma l_i h_i \cos \Psi_i$ 。

假设单株植物根系单根地上部分的植株重量为 m_a (可通过刈割获取数据),根系重量为 m_b (可通过挖掘根系称量获取数据),则从土表第1段至第 i 段的区段总重为:

$$m_{1-i} = \frac{\pi r_1^2 l_1 + \pi r_2^2 l_2 + \dots + \pi r_i^2 l_i}{\pi r_1^2 l_1 + \pi r_2^2 l_2 + \dots + \pi r_i^2 l_i + \dots + \pi r_n^2 l_n} m_b = \frac{m_b \sum_{i=1}^i r_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2 l_i} \quad (6)$$

对于第 i 段根系而言,其承受到植物附加的总重为:

$$m_i = m_a + \gamma l_i h_i \cos \Psi_i + \frac{m_b \sum_{i=1}^i r_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2 l_i} \quad (7)$$

因此,假定根系与客土之间的静摩擦系数为 μ ,对于第 i 段根系所能随的最大静摩擦力为:

$$f_i = \mu m_i g = \mu g \left[m_a + \gamma l_i h_i \cos \Psi_i + \frac{m_b \sum_{i=1}^i r_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2 l_i} \right] \quad (8)$$

假定第 i 段根系的抗拉强度 T_i 。

当 $f_i \geq T_i$, 第 i 段根系在浅层土体破坏时会发生断根, 为抗剪型根系;

当 $f_i < T_i$, 第 i 段根系在浅层土体破坏时不发生断根, 为摩擦型根系。

从公式(8)中可以看出影响根系最大静摩擦力的影响因素非常复杂, 包括 $\mu, m_a, \gamma, h_i, \Psi_i, r_i$, 一方面验证了与根系属于草本植物或木本植物没有直接关系, 另一个方面也说明了同一根系的不同区段也应不同区分。再者, 根系产生的抗剪强度可再细分抗剪型根系抗剪应力 τ_{Rg} 和摩擦型根系抗剪应力 τ_{Rf} 二者之和。

2.2 抗剪型根系抗剪强度

由于抗剪型植物根系的根径小, 无木质成分或分节结构, 受力相对均一, 在岩石边坡植被恢复工程的客土发生剪切破坏时只能以断根形式激发出抗拉强度。假定抗拉力 T 与根径比值为 k , 则有 $T = kr^2$, 可得出抗剪型植物根系抗剪强度的数学表达式为:

$$\begin{aligned} \tau_{Rg} &= \frac{T}{a} \cos(\Psi - \theta) + \frac{T}{a} \sin(\Psi - \theta) \tan \varphi \\ &= \frac{kr^2}{a} \cos(\Psi - \theta) + \frac{kr^2}{a} \sin(\Psi - \theta) \tan \varphi \end{aligned} \quad (9)$$

假定在单位面积 A 内共有 n 个抗剪型根系, 根径分别为 r_1, r_2, \dots, r_n , 每个根系与水平方向的夹角为剪切变形角分别为 $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$, 则所有抗剪型植物根系抗剪强度数学表达式为:

$$\begin{aligned} \tau_{Rg} &= \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cos(\Psi_i - \theta)}{A} + \frac{\sum_{i=1}^n T_i \sin(\Psi_i - \theta)}{A} \tan \varphi \\ &= \frac{k \sum_{i=1}^n r_i^2 \cos(\Psi_i - \theta)}{A} + \frac{k \sum_{i=1}^n r_i^2 \sin(\Psi_i - \theta)}{A} \tan \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 摩擦型根系抗剪强度

根据公式(8)中关于最大静摩擦力的计算公式, 假定静摩擦系数 μ , 客土容重 γ , 内摩擦角 φ , 则单位面积 A 内由摩擦型根系产生的最大静摩擦力数学表述式为:

$$\begin{aligned} f &= \sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n \mu g \left[m_a + \gamma l_i h_i \cos \Psi_i + \frac{m_b \sum_{i=1}^i r_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2 l_i} \right] \\ &= \mu g \left[m_a + \gamma \cos \Psi \sum_{i=1}^n l_i h_i + m_b \frac{\sum_{i=1}^i \sum_{i=1}^i r_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n r_i^2 l_i} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

转换成摩擦型根系的抗剪强度的数学表达式为:

$$\begin{aligned} \tau_{Rf} &= \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{A} \cos(\Psi - \theta) + \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{A} \sin(\Psi - \theta) \tan \varphi \\ &= \frac{\mu g (\cos(\Psi - \theta) + \sin(\Psi - \theta) \tan \varphi)}{A} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left[m_a + \gamma \cos \Psi \sum_{i=1}^n l_i h_i + m_b \frac{\sum_{i=1}^i \sum_{i=1}^i r_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n r_i^2 l_i} \right]$$

从公式(12)中可以看出, 静摩擦力系数是一个最关键的参数, 与根系、土壤的粗糙程度以及根土结合紧密度有关, 可通过实验确定其取值范围, 在模拟计算时可直接取均值。

若单位作用面积内有 m 个摩擦型根系, 每个摩擦型单根对应的抗剪强度为 $\tau_{Rf1}, \tau_{Rf2}, \dots, \tau_{Rfm}$, 则摩擦型木本植物根系对土体的抗剪强度总增量为: $\tau_{Rf} = \sum_{i=1}^m \tau_{Rfi}$ 。

至此已将根系抗剪强度公式推导完成, 下面就公式参数的确定方法进行详细探讨。

3 公式参数的确定方法

3.1 研究区概况

为了确定稳定性系数公式中的相关参数, 选取以下岩石边坡植被恢复工程(客土喷播)进行测定: 京沪高速公路蒙阴段 K108+100(S_1), 济莱高速公路 K18+300(S_2), K56+500(S_3), K71+050(S_4), K26+800(S_5), K26+850(S_6), K26+860(S_7)。

3.2 采集频次及指标

自 2008 年至 2012 年每年 9 月进行 1 次植被样方调查和原土直剪实验, 历时 5 a 共 5 次。数据采集指标包括: 地上植被生物量、植株数量; 单位面积内各种植物根系的数目、生物量、深度、密度; 根系类型、长度、重量、根表面积、根径; 根系抗拉强度和根土复合体抗剪强度。

3.3 步骤及方法

① 在调查区域内随机选定中心点, 划定 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的小样方面积, 记录样方中的植物种类、数目和平均株高; ② 剪(砍)掉小样方内的所有地上植物, 按不同植物种类称重, 并按草灌分类带回; ③ 将小样方内覆盖的所有枯枝落叶和其它杂物分别称重; ④ 以小样方的四边为边线, 沿垂直于坡面方向将小样方内的所有根土挖出(直到原岩基面或挂网位置为止), 立即称重; ⑤ 测量挖取土的厚度, 精确到毫米(mm); ⑥ 分类记数挖断根的数目, 分为剖面断根和

底面断根,灌木根和草本根。其中灌木根径需用游标卡尺进行测量;⑦用 ZJ-II 型等应变直剪仪测试抗剪强度;⑧将挖出的根土轻微抖动,将散土回填挖坑,将剩余的根土立即称重后,封装带回;⑨将带回的植物枝叶按草灌两类测量其总长度,然后依次自然风干和烘干称重;⑩将带回的根系用水浸泡洗净后分级剪断(分级标准是按主根、一级侧根、细根 3 个级别),并测量各级根的平均根径、总长度,然后风干和烘干称重。

4 稳定性系数的计算与验证

4.1 参数确定

计算岩石边坡客土喷播工程的客土稳定性系数前,结合实际采集的数据,先确定公式(5)、(10)和(12)中的所有参数,结果详见表 1。

以 2008 年 9 月 3 日对 S₁ 的样方调查为例,平均容重 1.4 g/cm³,平均厚度 8.4 cm,平均坡度 57°,样方调查结果见表 2—4。

表 1 稳定性系数公式的参数确定

| 参数 | 参数释义 | 确定方法 | 均值 |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| k | 抗拉力与根径比/(N·mm ⁻²) | 使用刻度弹簧拉力测定根系拉断时抗力 | 1.769 |
| μ | 静摩擦系数 | 正压力与使用刻度弹簧拉力测定试样根系未拉断时的最大拉力之比 | 0.363 |
| φ | 内摩擦角/(°) | 根据直剪实验和库仑定理计算求解 | 21.80 |
| γ | 容重/(g·cm ⁻³) | 环刀法 | 现场测量 |
| r | 根径/mm | 游标卡尺 | 现场测量 |
| θ, Ψ | 坡度或倾斜角度/(°) | 量角器、水平仪 | 现场测量 |
| l, d, h | 长度/cm | 游标卡尺 | 现场测量 |
| m | 重量/g | 电子天秤 | 现场测量 |

表 2 S₁ 样方 2008 年 9 月 3 日调查结果

| 种类 | 数量株 | 植株重/g | 摩擦型根系 | | | 抗剪型根系 | | |
|------|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | | | 根长/cm | 根径/mm | 根重/g | 根长/cm | 根径/mm | 根重/g |
| 紫花苜蓿 | 3 | 372 | 42.4 | 2.2 | 308 | 102.1 | 0.26 | 44 |
| 高羊茅 | 4 | 230 | — | — | — | 152.1 | 0.16 | 73 |
| 草木樨 | 1 | 848 | 28.5 | 1.7 | 239 | 117.0 | 0.29 | 50 |
| 沙打旺 | 2 | 500 | 36.1 | 2.0 | 208 | 110.7 | 0.28 | 54 |
| 刺槐 | 1 | 323 | 87.6 | 4.1 | 97 | 59.2 | 0.28 | 42 |
| 紫穗槐 | 1 | 305 | 105.5 | 3.6 | 92 | 53.9 | 0.24 | 46 |
| 马棘 | 3 | 708 | 192.3 | 2.7 | 85 | 132.6 | 0.22 | 53 |
| 胡枝子 | 1 | 276 | 87.0 | 2.9 | 92 | 47.2 | 0.29 | 39 |

注:样方面积为 1 m²。

4.2 稳定性系数的计算

采取同样的方法,在 2009 年 6 月对样方 S₂, S₃, S₄ 进行的现场根系调查和测量,最终计算出的客土稳定性系数结果详见表 3。

表 3 S₂, S₃, S₄ 样地参数及稳定性系数计算结果

| 样地及参数 | 坡度/(°) | 容重/(g·cm ⁻³) | 厚度/cm | 稳定性系数计算结果 | | | |
|----------------|--------|--------------------------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | | | | 无根土 | 有根土 | 变化值 | |
| S ₂ | 植被覆盖区 | 65 | 1.5 | 8 | 0.648 | 1.255 | 0.607 |
| | 土体滑塌区 | 68 | 1.6 | 6 | 0.701 | 0.997 | 0.296 |
| S ₃ | 植被覆盖区 | 53 | 1.4 | 8 | 0.914 | 1.519 | 0.605 |
| | 土体滑塌区 | 58 | 1.4 | 10 | 0.748 | 1.104 | 0.356 |
| S ₄ | 植被覆盖区 | 35 | 1.3 | 8 | 1.310 | 2.025 | 0.715 |
| | 土体滑塌区 | 47 | 1.4 | 9 | 0.959 | 1.425 | 0.466 |

表 3 中稳定性系数计算结果中,除 S₄ 的植被覆盖区因为坡度为 35°,使得无根土稳定性最好,而 S₃

的土体滑塌区坡度最大,所承受的土体厚度有限,从而使植被根系作用不明显,稳定性系数也最小。对于 S₄ 土体滑塌区而言,由于坡度也较为陡,喷播厚度较大,使得坡表土体自重下滑分量加大,当水分含量增加时则发生了局部下滑。从以上计算结果可以看出,边坡植被恢复后对坡面土体的稳定性提升非常明显,同时可以发现客土厚度是一个非常关键的工程参数,过薄过厚均会影响客土的稳定程度,实际施工中应结合工程实际情况进行客土厚度设计,重视坡面排水的处理。

4.3 稳定性系数的验证

为验证岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性系数的准确性和有效性,将原位直剪的实测值和稳定性公式的计算值进行对比。仍选取 S₂, S₃, S₄ 这 3 个测点,同时增加 S₅, S₆, S₇ 3 个测点,每个测点严格控

制在距离路基表面 2 m 位置处,测试时段控制在 2008—2012 年的 9 月,此时植物生长最为迅速,根系发达,尤其以活体根的大量存在使得坡面土体抗剪强度大幅增加,稳定性系数变化值明显(表 4)。表 4 的计算结果表明,稳定性系数的数值大小均表现为直剪实测值略大于模拟计算值,其偏差值(ΔF)分布大小与坡度值大小呈显著负相关关系,设坡度为 θ ,则:

$\Delta F = l \tan^{-1} \theta$,在拟合计算后 k 取值范围为 0.34 ~ 0.50。同时,除植被恢复第 2 年和第 3 年间的稳定性系数值趋于稳定外,其余年份随着测定时间的推迟而逐年得到提高,在第 4 年和第 5 年达到峰值并稳定,说明岩石边坡植被恢复工程的客土稳定性观测必须延续至 3 a 以上。偏差值的出现可认为是没有考虑孔隙水压力作用,并不影响计算值的正确性。

表 4 不同样方稳定性系数计算值与实测值的比较

| 测定时间 | S ₂ 稳定性系数 | | S ₃ 稳定性系数 | | S ₄ 稳定性系数 | | S ₅ 稳定性系数 | | S ₆ 稳定性系数 | | S ₇ 稳定性系数 | |
|----------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 |
| 20080911 | 1.03 | 1.09 | 1.16 | 1.24 | 1.70 | 1.82 | 1.10 | 1.21 | 1.07 | 1.25 | 1.06 | 1.19 |
| 20090923 | 1.08 | 1.13 | 1.31 | 1.41 | 1.85 | 2.01 | 1.36 | 1.44 | 1.42 | 1.54 | 1.38 | 1.51 |
| 20100912 | 1.07 | 1.12 | 1.28 | 1.40 | 1.84 | 2.05 | 1.34 | 1.44 | 1.41 | 1.48 | 1.38 | 1.47 |
| 20110914 | 1.10 | 1.16 | 1.33 | 1.45 | 1.95 | 2.18 | 1.42 | 1.48 | 1.43 | 1.51 | 1.40 | 1.50 |
| 20120920 | 1.11 | 1.17 | 1.38 | 1.51 | 1.91 | 2.11 | 1.40 | 1.50 | 1.45 | 1.53 | 1.39 | 1.49 |

5 结论

(1) 为解决植被工程中客土稳定性系数计算问题,从根系力学入手,分类并模拟计算抗剪型和摩擦型根系产生的力学作用大小,并推导由此产生的根系抗剪强度计算公式及稳定性系数计算公式,结合植被样方调查和根土复合体直剪实验对公式中所有参数进行确定和验证。

(2) 将不同立地条件下岩石边坡植被恢复工程的客土稳定性系数计算值与实测值进行对比发现计算值略小于实测值,偏差率较小,且在 3~5 a 的时间段内客土稳定性系数与植被恢复期成明显的正相关关系,可将稳定性系数计算作为岩石边坡植被恢复工程的参数设计和稳定性评价方法。

(3) 本文只讨论了土壤与植物根系的力学作用,尤其是将铁丝网的附加作用全部赋予给了抗剪型根系的贡献值,但未能模拟计算孔隙水压力的影响程度,因此在今后的公式推导及验证中应充分考虑并加入这类影响因子。

[参 考 文 献]

- [1] 沈毅,晏晓林,梁爱学,等. 厚层基材喷播边坡防护技术研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(2): 151-154.
- [2] 许文年,叶建军,周明涛,等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10): 50-52.
- [3] 张俊云,周德培. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 刘甲荣,舒安平,郭建民. 半干旱区高速公路生态护坡技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [5] 杨俊杰,王亮,郑建国,等. 生态边坡客土稳定性研究

[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(02): 414-422.

- [6] 肖蓉,高照良,宋晓强,等. 高速公路边坡植被特征分析及护坡模式优化研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 90-94.
- [7] 程洪,张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- [8] 邓卫东,周群华,严秋荣. 植物根系固坡作用的试验与计算[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 7-12.
- [9] 嵇晓雷,杨平. 应用分形维数研究狗牙根根系边坡固坡效应[J]. 林业科技开发, 2016, 1(4): 129-133.
- [10] 卜宗举. 植被根系浅层加筋作用对边坡稳定性的影响[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(3): 55-60.
- [11] 郑力文,刘小光,余新晓,等. 油松根系直径对根—土界面摩擦性能的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 90-94.
- [12] 嵇晓雷,杨平. 基于根系形态的根系固坡作用数值分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, 37(2): 113-117.
- [13] 万娟,肖衡林,何俊. 多花木兰根系抗拉特性及边坡稳定性分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(8): 109-113.
- [14] 杨永红,王成华,刘淑珍,等. 不同植被类型根系提高浅层滑坡土体抗剪强度的试验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 233-235.
- [15] 冯国建,朱维伟. 草本植物根系对边坡浅层稳定性影响研究[J]. 草原与草坪, 2015, 35(4): 23-26.
- [16] 陈怿旸,孙树林,王恩喜,等. 草及灌木根系对不同土质边坡稳定性影响分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(3): 48-51.
- [17] 肖宏彬,贺茜,李珍玉,等. 根系对边坡土体抗崩解能力影响的试验研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(5): 35-38.