

Numerical Investigation of Slope Stability Reinforced by Vegetation

Zhongyu LU

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: In view of the current slope reinforcement measures mainly from the destruction of the natural environment of physical reinforcement, while ignoring the effect of vegetation on the slope of the reinforcement. Based on this, this paper establishes weight table of root additional cohesion system based on current theories to analysis different types of vegetation (grass, shrubs, young forest, mature forest)'s additional cohesion with different depth of soil, and numerical method is adopted to analysis the reinforcement effect of different types of vegetation and different slope geometry parameters. The results show the reinforcement effect of mature forest is best, second is young forest, third and fourth are shrubs and grass; with the increase of slope angle and slope length, the reinforcement effect of four types of vegetation are both showing a decrease trend.

Keyword: Vegetation root, Reinforcement soil, Reinforcement effect, Slope geometry

植被根系加固边坡的机理数值模拟研究

卢忠玉

重庆交通大学, 土木工程学院, 重庆, 400074

摘要: 针对目前边坡加固边坡的手段主要来自破坏自然环境的物理加固, 而忽略了植被对边坡的加固作用。为此, 本文基于现有的研究结论, 建立植被根系附加力学权重表, 分析不同类型植被(草地、灌木、成长树木、成熟树木)不同深度的附加土体粘聚力, 并采用数值手段对不同植被的加固效果、边坡尺寸参数对加固效果的影响进行分析和探讨。研究结果表明: 成熟树木的加固效果最优、成长树木和灌木次之、草地的加固效果最弱; 随着边坡角度和边坡基本尺寸的增大, 四种植被的加固效果均呈现逐渐降低的趋势。

关键词: 植被根系; 固坡; 加固效果; 边坡尺寸

1 引言

目前边坡植被的主要功能认为是防风固沙、防止水土流失和美化自然环境等, 而在植被根系加固边坡方面的认识则很少^[1-3]。近 30 年植被固坡的概念才被提出并有越来越多的学者投入到植被固坡的研究中去, 如 Riestenberg, M.M, Waldron, L.J, 李绍才等^[4-6]对植被加固边坡的机理, 如基质作用、植被功能等方面进行分析和探讨; Operstein, V 等通过室内试验明确植被根系对坡体具有明显的加固作用^[7]; 赵志明, 刘川顺等通过数值模拟手段对植被固坡进行了分析研究^[8-9]; 蒋德松、杨玉田、Gaillard, J.-C 等^[10-12]依托于工程实践对植被固坡进行实践分析, 并得出植被对坡体的稳定性具有较为明显的影响等。以上这些研究对植被固坡的研究起到一定的揭示作用, 但是若要深入的洞悉植被固坡的内在机理和相关因素对其的影响, 仍

需要大量的相关研究。

本文为了可以对植被固坡的更多相关因素进行研究分析, 首先分析植被的加固机理, 根据国内外的相关研究成果, 建立不同植被(草地、灌木、成长树木、成熟树木)根系附加粘聚力权重表, 分析不同植被的加固效果, 然后建立不同边坡尺寸下不同植被对边坡的加固模型, 分析在不同边坡尺寸(边坡坡度、边坡大小, 见图 1)下不同植被的加固效果。希望可以以为植被固坡方面的研究提供部分借鉴和参考。

2 植被加固机理及附加力学分析

根据 Wu 等^[13]人研究结论: 植被根系深入坡体(见图 2), 可以明显提高土体的粘聚力, 而增加坡体的坡体的抗剪能力, 提出植被根系附加土体粘聚力 CR 的力学公式:

$$C_R = t_R (\cos \theta \tan \phi' + \sin \theta) \quad (1)$$

式中： t_R 为单位面积土体的根系平均抗拉强度， θ 为根须剪切转向角， ϕ' 为土体的内摩擦角。

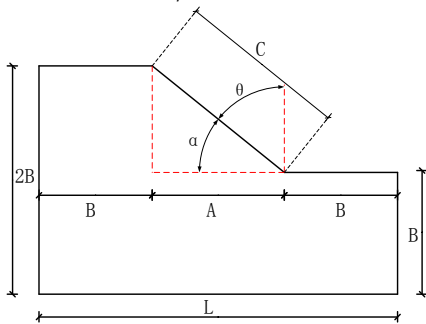


图 1. 边坡模型和边坡尺寸参数

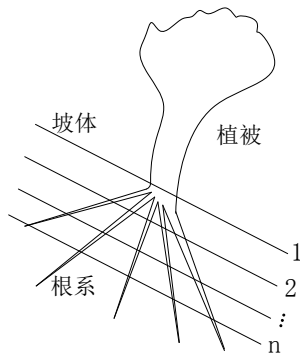
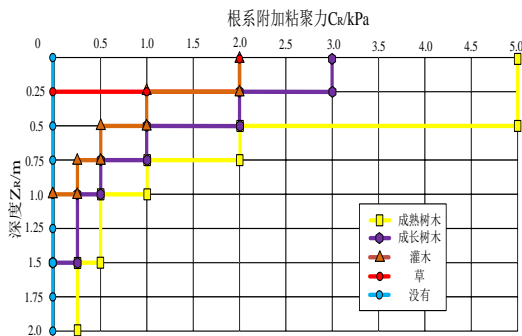


图 2. 植被根系对坡体的加固作用

但是随着植被根系深入土体的程度，其附加的粘聚力大小也产生不同差异，根据 Wu 等^[13-14]人的研究结论，建立不同植被根系附加粘聚力权重表（见表 1）。

表 1. 不同植被根系附加粘聚力权重表



3 计算模型

边坡的基本模型见图 1，其中 α 为边坡的坡度，A 为边坡的坡度水平长度，B 为边坡的基本长度。为了

可以对边坡的尺寸效应对土拱效应的影响进行分析，边坡的坡度 α 和边坡额基本尺寸 B 作为基本变量，其中边坡坡度 $\alpha=10^\circ、15^\circ、20^\circ、25^\circ、30^\circ$ ，边坡基本尺寸 $B=5m、10m、15m、20m、25m$ 。边坡的基本力学参数（没有植被加固）见表 2。

表 2. 边坡的基本力学参数

| 密度(kg/m-3) | 弹性模量 (MPa) | 泊松比 | 内摩擦角 (°) | 粘聚力 (kPa) |
|------------|------------|------|----------|-----------|
| 1600 | 20 | 0.25 | 20 | 2 |

根据建立的不同植被根系附加粘聚力权重表（见表 1），不同植被根系固坡的影响就转化为不同层次坡体粘聚力的增加值。为了更好的分析植被附加粘聚力的影响和符合它在不同深度处的附加粘聚力值建立如图 3 所示的边坡模型，整个边坡模型被分成 7 个分层（0-0.25m，0.25-0.5m，0.5-0.75m，0.75-1.0m，1.0-1.5m，1.5-2.0m，2.0m-无根须区域）然后每个分层根据不同附加粘聚力进行相关参数的赋值。草地和灌木由于其自重对边坡稳定影响较小，本文故忽略其重量，但成长树木和成熟树木自重较大不可忽略，根据 Nutalaya, P., Medicus, G.等^[15-16]人的研究结论：成长树木和成熟树木的附加应力取 600Pa。

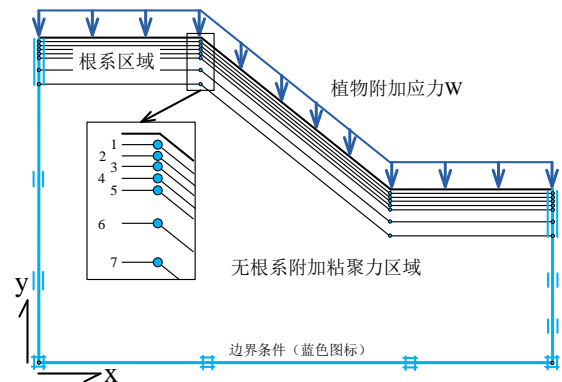


图 3. 边坡分层模型

本文采用 FLAC 软件对其进行分析研究，采用 mohr-coulomb 强度准则，为了可以对不同植被对边坡的加固效果进行较为明显的分析，本文采用强度折减法求取每种情况下的安全系数，通过对安全系数的分析来评判不同植被在不同边坡尺寸条件下的加固效果。

4 结果分析

4.1 不同植被对边坡安全性的影响

为了可以对植被对边坡的加固效果有非常直观的认识,如图 4 所示为不同植被在不同边坡尺寸 B 和坡度 α 下的平均安全系数增长率。

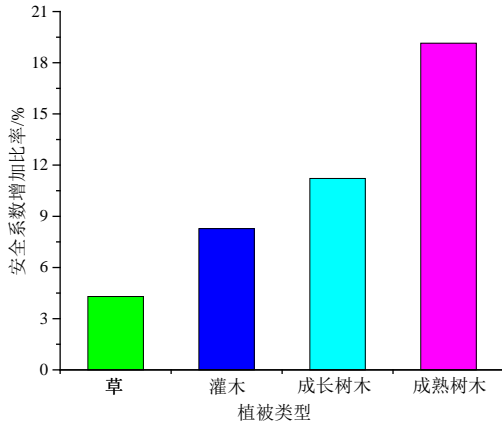
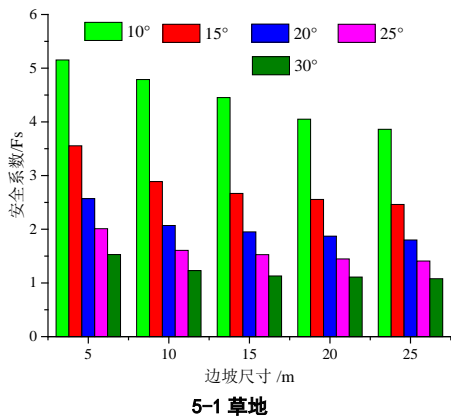


图 4. 不同植被的边坡安全系数增长率

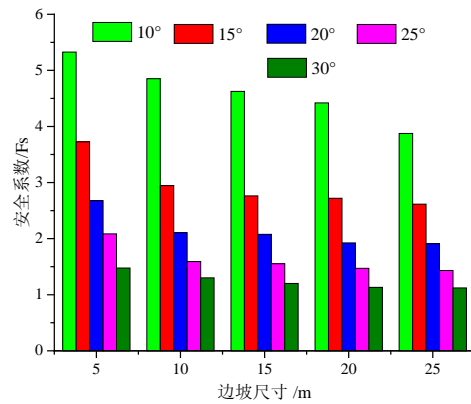
从图 4 可知,不同类型的植被的边坡安全系数的增长率有明显的差异,其中成熟树木的对边坡的安全系数的增长率最大达到 19.2%,成长树木次之达到 11.3%,灌木为 8.1%,而草对边坡安全系数的增长率最小为 4.3%。这些数据表明成熟的树木由于其根系较为发达,可以很大程度提高坡体的稳定性,具有较优的固坡性能,而成长树木的根系发育程度不如成熟树木,故其固坡性能不如成熟树木,灌木和草地更是如此。

4.2 边坡尺寸对植被固坡的影响

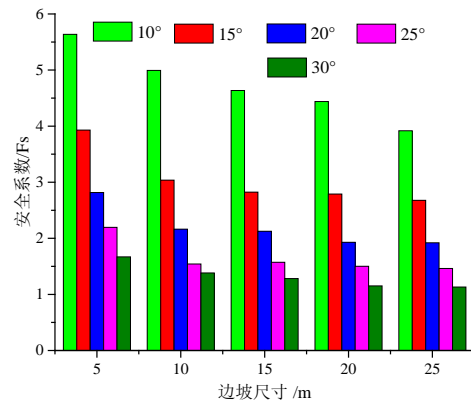
根据前面对边坡的尺寸的论述,如图 5 所示为在不同边坡尺寸条件下不同植被加固边坡后的安全系数分布图



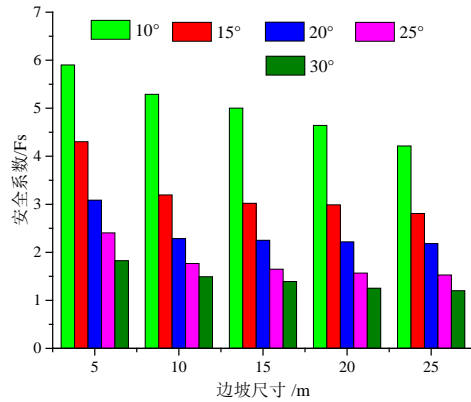
5-1 草地



5-2 灌木



5-3 成长树木



5-4 成熟树木

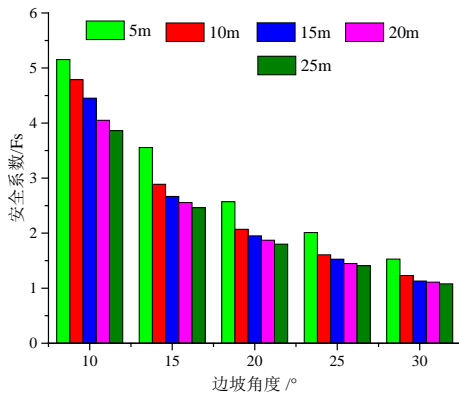
图 5. 不同边坡尺寸下边坡安全系数分布图

从图 5-1 至 5-4 可知,四种类型植被(草、灌木、成长树木、成熟树木)随着边坡尺寸与其安全系数成负相关,即随着边坡尺寸的增大四种植被加固下的边坡的安全系数均呈现降低的趋势。坡度为 10° 时,随着边坡尺寸的增大,四种植被加固下的边坡安全系数大致线性降低;坡度为 15° 、 20° 、 25° 、 30° 时,随着边坡尺寸的增大,四种植被加固下的安

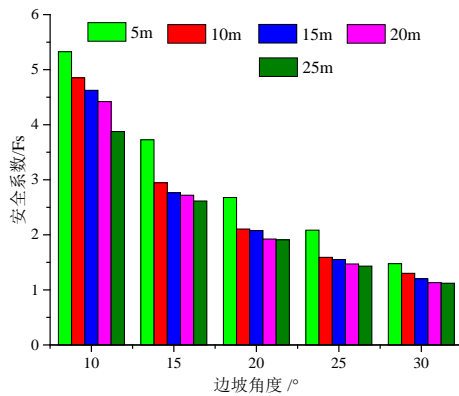
全系数则呈现先快速降低（5-10m），后缓慢降低（10-25m）。在同一边坡尺寸下，随着坡度的增大安全系数逐渐降低，其中小坡度比大坡度对安全系数的影响更为明显。

4.3 边坡角度对植被固坡的影响

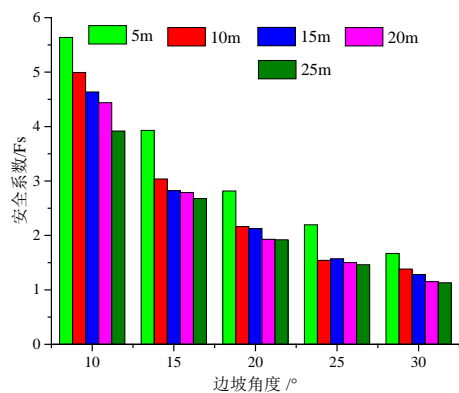
选取边坡坡度为 $\alpha=10^\circ$ 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 几种情况下不同植被加固边坡效果进行分析，如图 6 所示为不同边坡坡度条件下四种不同植被加固边坡安全系数分布图。



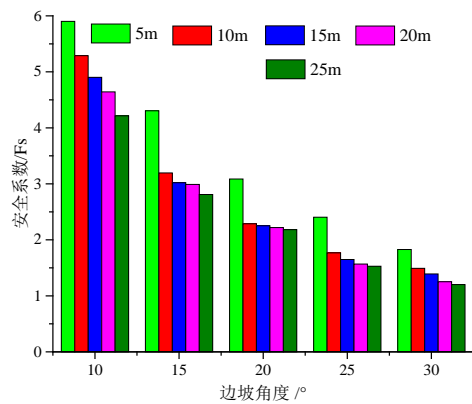
6-1 草地



6-2 灌木



6-3 成长树木



6-4 成熟树木

图 6. 不同坡度下边坡安全系数分布图

从图 6 可知，随着边坡坡度的增大，四种不同类型的植被（草，灌木，成长树木，成熟树木）加固边坡的安全系数均呈现负相关。在同一坡脚条件下，随着边坡尺寸的增大，其安全系数也呈现降低的趋势。

结合图 5-图 6 可知，随着坡度和尺寸的增大植被固坡的效果均在降低，但是坡度对安全系数的边坡降低的斜率比尺寸的影响斜率要大，这说明边坡的坡度对植被的加固效应影响更为明显，为此建议在进进行植被固坡时，尽可能的减少边坡的坡度。

4.4 植被固坡量化权重表

根据在不同边坡尺寸和不同边坡坡度条件下，四种类型植被（草，灌木，成长树木，成熟树木）加固边坡与不进行植被防护时边坡稳定性增幅，建立不同类型植被在不同边坡尺寸和边坡坡度条件下加固增幅效果权重表，见表 3。

从表 3 可以看出，随着坡度的增大和边坡尺寸的增大，四种植被类型的安全系数增长率逐渐增大，这是由于当坡度和尺寸较小时，不进行植被防护时的安全系数已经很大，进行植被防护的增长量相对初始安全系数较小。同时，在同一坡度和尺寸条件下，草地、灌木、成长树木、成熟的安全系数增长率也呈现增大的趋势，原因见前述分析。

5 结论

(1) 根据不同类型植被根系的特点和目前的相关研究成果，建立四种不同类型植被（草，灌木，成长树木，成熟树木）的根系附加粘聚力权重表，得出不同深度处不同植被的对土体的附加粘聚力数值。

(2) 通过在不同类型植被的加固效果的分析, 得出: 成熟树木的加固效果最优, 成长树木次之, 灌木和草地相对较弱。

(3) 随着边坡尺寸和边坡坡度的增大, 四种类型植被加固边坡的稳定小效果在逐渐降低, 坡度的影响幅度比尺寸的大。

(4) 通过建立植被固坡增幅权重表得到: 随着边坡尺寸和边坡坡度的增大, 四种类型植被固坡的安全系数增长率在增大。

表 3. 植被固坡增幅效果权重表

| 尺寸/m 坡度/° | 10 | | 15 | | 20 | | 25 | | 30 | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 2.0% | 5.3% | 2.7% | 7.6% | 3.9% | 9.9% | 3.8% | 7.7% | 4.4% | 8.3% |
| | 11.5% | 16.7% | 13.5% | 24.3% | 13.5% | 24.3% | 13.4% | 24.2% | 13.1% | 21.2% |
| 10 | 1.7% | 3.1% | 1.3% | 3.3% | 1.5% | 3.2% | 5.1% | 6.6% | 6.7% | 9.4% |
| | 6.2% | 12.1% | 6.5% | 14.1% | 6.1% | 16.1% | 7.8% | 17.6% | 14.3% | 23.4% |
| 15 | 5.1% | 14.3% | 4.1% | 7.9% | 3.1% | 9.6% | 5.5% | 7.2% | 2.3% | 8.9% |
| | 14.8% | 19.8% | 10.3% | 17.9% | 12.2% | 18.8% | 8.6% | 13.9% | 16.2% | 19.7% |
| 20 | 5.4% | 12.2% | 3.7% | 10.4% | 6.3% | 9.2% | 6.1% | 7.6% | 5.3% | 10.5% |
| | 12.9% | 17.8% | 13.3% | 21.4% | 9.6% | 26.1% | 9.8% | 16.7% | 14.5% | 18.7% |
| 25 | 3.4% | 3.8% | 4.1% | 8.9% | 5.7% | 11.4% | 6.4% | 8.6% | 7.9% | 12.2% |
| | 4.9% | 12.8% | 12.1% | 18.3% | 12.1% | 27.3% | 10.2% | 15.3% | 13.2% | 20.2% |

注:

| | |
|---------------|---------------|
| 草地边坡安全系数增长率 | 灌木边坡安全系数增长率 |
| 成长树木边坡安全系数增长率 | 成熟树木边坡安全系数增长率 |

参考文献

[1] 代宏文, 周连碧. 尾矿库边坡植被生态稳定技术研究[J]. 矿冶, 2002, 11(B07):257-260.

[2] 于桂芬, 吴祥云, 杨亚平, 等. 潞安矿区煤矸石山水土流失特征及植被恢复关键技术[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2):244-246.

[3] 宋法龙. 以基材—植被系统为基础的生态护坡技术研究[D]. 安徽农业大学, 2009.

[4] Riestenberg M M, Sovonickdunford S. The Role of Woody Vegetation on Stabilizing Slopes in the Cincinnati Area[J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94(4):506-518.

[5] Waldron L J, Dakessian S. Soil Reinforcement by Roots: Calculation of Increased Soil Shear Resistance From Root Properties[J]. Soil Science, 1981, 132(6):427-435.

[6] 李绍才, 孙海龙. 中国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J]. 资源科学, 2004, 26(z1):61-66.

[7] Frydman S, Operstein V. The Influence Of Vegetation On Soil Strength[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement, 2000, 4(2):81-89.

[8] 赵志明, 吴光, 王喜华. 工程边坡绿色防护机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2):299-305.

[9] 刘川顺, 郑勇, 关洪林, 等. 灌木对黄土边坡的加固效应[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43(1):55-58.

[10] 蒋德松, 陈昌富, 赵明华, 等. 岩质边坡植被抗冲刷现场试验研究[J]. 公路工程, 2004, 29(1):55-58.

[11] 杨玉金, 田耀武, 郑根宝, 等. 濮鹤高速公路边坡植被生态防护效果分析[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1):28-32.

[12] Gaillard J C, Liamzon C C, Villanueva J D. 'Natural' disaster? A retrospect into the causes of the late-2004 typhoon disaster in Eastern Luzon, Philippines[J]. Environmental Hazards, 2007, 7(4):257-270.

[13] Tien H. Wu, William P. McKinnell III, Douglas N. Swanston. Strength of Tree Roots on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1):19-33.

[14] Wu T H, Mcomber R M, Erb R T, et al. Study of Soil-Root Interaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(12):1351-1375.

[15] Nilaweera N S, Nutalaya P. Role of tree roots in slope stabilisation[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 1999, 57(4):337-342.

[16] Medicus, G., 2009. Massenbewegungen and Vegetationsbedeckung. University of Innsbruck, Innsbruck, pp. 110 (Diploma-Thesis, unpublished).