

降雨条件下植物根系影响边坡稳定的实验研究*

乔继延 鲁晓兵 王淑云 张旭辉

(中国科学院力学研究所, 北京 100190, 中国)

摘要 越来越多的研究表明,在降雨条件下植物根系分布是影响边坡稳定的重要因素。为研究不同类型根系对边坡稳定的影响,开展了室内模拟降雨实验,分析不同类型植物根系影响边坡稳定的模式,探讨根系特征尺寸和分布的影响机理。实验结果表明:坡体上不连续分布的尺寸较小的孔洞,在土体变形过程中很容易自动封闭、堵塞,不易形成新的局部破坏;粗根系木本植物对于坡体稳定性具有不利的影响,在植物根部与土体接触的位置最容易产生局部破坏;草本植物根系对土体有显著的固化作用,并且其固化作用有一定的影响范围;植物根系对边坡的影响,存在几何尺度和空间分布的效应,当根系分布于潜在滑面的起始点附近时,对阻止边坡失稳具有最明显的效果。研究成果为降雨条件下植物根系的影响机理提供参考。

关键词 植物根系; 降雨; 固化; 潜在滑面

中图分类号:U213.1⁺58 文献标识码:A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0398

EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF PLANT ROOTS ON SLOPE STABILITY UNDER RAINFALL CONDITIONS

QIAO Jiyuan LU Xiaobing WANG Shuyun ZHANG Xuhui

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract The distribution of plant roots is an important factor affecting slope stability under rainfall conditions by more and more studies. In order to study the influence of different types of roots on slope stability indoor simulated rainfall experiments were accomplished, to analyze the influence modes of different types of plant roots and explore the influence mechanism of root characteristic size and distribution. Results show that in the process of soil deformation the small discontinuous pores in the slope is easy to close and block automatically and not easy to form new local failure. Furthermore, woody plants with coarse roots have adverse effects on slope stability and the local failure is likely to occur at the location of plant roots contacting with soil, but roots of herbaceous plants have a significant strengthening effect on soil and its effects are confined to a certain range. It reveals that there is geometric scale and spatial distribution features for the effects of plant roots on slope, while the root system has the most significant effect on preventing slope instability when it is distributed near the initial point of potential sliding surface. The research results provide a reference for the influence mechanism of plant roots under rainfall conditions.

Key words Plant roots; Rainfall; Strengthening; Potential sliding surface

* 收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-08-19.

基金项目: 国际(地区)合作与交流重点项目(资助号: 41761144077).

This research is supported by the International (Regional) Cooperation Key Projects(Grant No. 41761144077).

第一(通讯)作者简介: 乔继延(1969-),男,博士,助理研究员,主要从事工程地质力学方面的科研工作.

0 引言

目前,植物根系与土体边坡的相互作用,越来越受到广泛关注,国内外学者开展了多方面的研究。在降雨条件下,植物可以对边坡土壤提供水力和根系力学作用,已经被证明是一种有效的防治浅层滑坡和地表侵蚀的方法(Gariano et al., 2016; Gonzalez-ollauri et al., 2017)。在模拟实验方面,陈潮等(2017)研究了植物根系生长形态对边坡浅层稳定性的影响;陈伟(2013)通过黄土边坡室内人工降雨模型实验,分析了黄土边坡在降雨条件下失稳滑动的过程;武彩萍(2013)通过黄土边坡室内模型实验,开展了人工降雨条件下黄土滑坡及坡面形态变化的研究;胡明鉴等(2003)进行了人工降雨作用的滑坡和泥石流现场实验,模拟了暴雨条件下引起的坡面冲刷和垮塌现象和由此引发的边坡失稳;潘俊义等(2018)针对开展了不同降雨强度的野外人工模拟降雨实验,分析了不同降雨强度条件下降雨入渗过程和边坡应力变化特征等等。

在机理研究方面,国内外学者对不同类型植物的单根抗拉特性、根系对土壤抗剪强度的增加、根系固土的力学机制、根系护坡固土模型及机理做了许多研究工作(周云艳等, 2012; 陆桂红等, 2014; 李宁等, 2015; 钟荣华等, 2015)。付江涛等(2020)为合理定量评价草本植物根径、抗拉力和抗拉强度等指标分布特征,选取生长于青海河南县地区的5种草本植物为研究对象,通过室内单根拉伸试验对草本单根抗拉力、根径和抗拉强度进行了测定; Mickovski et al. (2011)利用有限元软件,对根土复合试样的剪切实验进行了二维和三维数值模拟; Aravena et al. (2011)运用X射线成像技术与数值模拟方法,研究了含根系土体在受压时的水力学特性,用X射线显示土颗粒间接触点的演变及其对部分饱和条件下集料之间水流的影响; Sonnenberg et al. (2011)做了含根系土的离心机实验模拟,通过实验揭示了根的轴向应变与弯曲应变调动机理、根对边坡破坏机理的影响; Osman et al. (2006)以植被覆盖度、坡度为影响因素研究5种植被根系密度与土体含水率之间的关系,研究表明土体的抗剪强度随着含水率增大而增大,边坡稳定系数随着土体含水率增大而减小; Cazzuffi et al. (2005)利用数学拟合得到植被根系与根直径之间的函数关系,表明须根的抗拉强度大于粗根抗拉强度; Kamchoom et al.

(2016)通过离心实验开发并验证了一种新的人造根,从而开展含根边坡稳定性研究等等。

广泛的研究工作表明,对降雨条件下根系-土壤相互作用的了解正在不断积累和深入。本文设计室内模拟实验,考察降雨条件下不同类型植物根系对边坡土体的影响,在分析实验现象的基础上,阐述根系-土壤相互作用的基本机理,以期有助于丰富对这方面问题的认识。

1 室内边坡降雨模拟实验

1.1 实验装置

实验在长度200 cm、宽度40 cm、高度50 cm的透明玻璃箱中进行,坡体包含倾斜部分和平直部分,倾斜面的角度由自然堆积形成。在铺土过程中,在土体中的不同位置,分别埋入水平和垂直方向的标记线,记录初始位置,实验后测量标记线的位置变化。为模拟降雨,采用手动气压式园艺喷水壶作为淋水装置,出水量为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。喷出的水呈现比较均匀的水雾状,分别向坡顶平面和倾斜坡面上淋水。计算单位面积上的降水量,属于特大暴雨的强度。在实验进行时,用高清摄像头分别从箱子侧面和上方拍摄实验过程。实验前后,分别测量坡体的轮廓线、土体的密度和含水量。实验装置示意如图1所示。

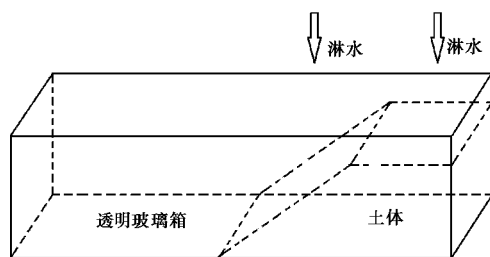


图1 室内降雨模拟实验示意图

Fig. 1 Schematic map of indoor rainfall simulation experiment

1.2 试样制备

实验用的试样,取自北京市门头沟山区的松散堆积土体,初始相对密度为1.4,含水量为13%,其中细颗粒含量较多。实验时以自然坡角堆积土体,坡比为1:1.10,坡体由坡顶平面和斜坡面两部分构成。每次实验后,通过自然干燥的方法,使得试样恢复到初试的含水量。该种土体的特点是,在含水量较低时呈现结块、松散的状态,孔隙率较大;含水量较高时密度增大,在含水量为21%~27%时,相对密

度为 2.0~2.2。

2 实验方案

为考察降雨条件下,不同根系分布对边坡的影响,设计 6 个类型的实验:(1)在倾斜坡面上布置垂直贯穿圆孔(直径 1 cm),用以模拟边坡中原有植物根系被移除的情况,观察降雨后圆孔周围是否出现一定形式的破坏;(2)在坡顶平面、坡顶平面与斜坡面拐角处、以及倾斜坡面上,分别以垂直方式插入单根树枝,用以模拟枯树、死树的情况,观察降雨后树枝根部周围土体的变化;(3)在坡顶平面和倾斜坡面上,分别布置根径较细的木本树枝,考察木本根系及其特征几何尺寸的影响;(4)在倾斜坡面上,布置根径较粗的木本树枝;(5)在倾斜坡面上的中部,布置原状带草本根系的土体;(6)在倾斜坡面与坡顶平面的结合部(此处为容易发生破坏的危险区域),布置原状带草本根系的土体。各类型实验方案如实物图 2 所示。



图 2 各类型实验方案的实物图

Fig. 2 Pictures of various types of experiment

3 实验结果和分析

所有各类型实验都有一些共同的特点: I. 在坡顶平面出现多条大致横向的台阶或者裂缝,宽度为 0.2~0.8 cm 不等; II. 在斜坡面和坡顶面拐角处的稍后方附近,也出现塌陷的台阶或者裂缝,如图 3 所示; III. 测量实验前后土体的轮廓,说明土体变形

由滑动前移和沉陷两部分组成,并且沉陷变形占据主要部分,如图 4 所示; IV. 实验后的土体密度明显大于实验前。



图 3 出现的裂缝和台阶

Fig. 3 The cracks and steps produced by rainfall

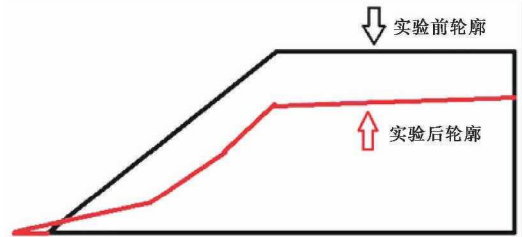


图 4 降雨前后坡体的轮廓对比

Fig. 4 Slope body contour before and after rainfall

除了以上这些共同的特点,各类型实验方案都有不同的现象,叙述和分析如下。

实验方案(1):在斜坡面上分布的孤立孔洞,由于土体在渗流力作用下发生变形,逐渐堵塞了孔洞,孔洞闭合,周围未出现明显的局部破坏。

实验方案(2):在垂直插入树枝的孔洞周边,出现多条裂缝,长度为 3~12 cm,宽度为 0.2~0.6 cm,如图 5 所示。由于树枝本身的约束作用,在树枝根部周围,发生了类似圆柱绕流的水流运动,使得土体在渗流力的作用下产生不均匀的变形,从而出现局部的破坏现象。在本实验条件下。

实验方案(3):在垂直埋入较细根系的木本树枝根部周边,也出现多条裂缝,但是长度和宽度有所增加,长度为 5~13 cm,宽度为 0.4~0.6 cm,如图 6 所示。相比于实验方案(2),由于树枝本身具有不规则的几何形状,因此在树枝根部的周边产生的流动更为复杂,出现的裂缝形状也更加不规则,裂缝数量和尺寸都有所增加。

实验方案(4):在垂直埋入较粗根系的木本树枝根部周边,虽然未出现明显的裂缝,但是斜坡体向前滑动和塌陷明显增大,并且相比于淋水前,树枝整体向前下方向倾斜,如图 7 所示。分析其原因,在较粗根系的土体周围,局部的变形和破坏效应更为



图 5 单根树枝根部的裂缝

Fig. 5 Cracks at the base of a single branch



图 6 较细根系的木本树枝根部的局部破坏

Fig. 6 Local fracture of the woody branches with finer roots



图 7 较粗根系的木本树枝的移动

Fig. 7 Displacement of woody branches with thicker roots

明显,即使在短时间内产生裂缝,也会在土体变形的作用下被几乎同时湮没。因此,实验后虽然未出现可见的裂缝,但是土体的滑移明显增大,说明出现的破坏已经不限于局部,或者说这种破坏已经平均化到较大范围的土体中。

实验方案(5):带原状草本根系的土体布置于斜坡中部,很明显地,带根系的这部分土体本身几乎未发生任何变化;而在带根系土体的前下方部分,土体发生滑移,直至带根系土体本身的轮廓显现出

来;在两簇带根系土体的中间位置,裸露的这部分土体也未发生滑移。

对比实验方案(2)~(4),很清楚地表明草本根系对土体的固化作用。从机理上来说,草本根系比木本根系的平均直径小很多,而且草本根系的分布密度也较大。因此土体在根系表面的附着力更强,单位体积的土体所受到的约束力也较大。这必然使得根系和土体组成的混合体,宏观强度明显大于土体本身的强度。

当然,随着淋水时间的持续延长,即使带根系的这部分土体,也会从根系周边开始,土水混合体脱落,并且脱落区域逐渐向根系中心扩展,根系本身被逐渐地剥离和显现,如图 8 所示。



图 8 带草本根系土体周围的变化

Fig. 8 Changes around the soil with herbaceous roots

实验方案(6):经过多次实验的观察和判断,斜坡体滑移和塌陷的起点,位于斜坡面和坡顶平面相交处的附近区域,也可以说潜在滑面的起始点(或者危险点)位于这个区域。因此,在这个区域布置草本根系的土体,考察根系对边坡的固化作用。实验结果表明,不同于实验(1)~(5)的是,无论斜坡面和坡顶平面上,都未出现裂缝或者台阶,如图 9 所示。也就是说,由于根系的固化作用,使得边坡始终保持整体性,虽然淋水使得坡体密实和下沉,但是变形是整体性、而不是局部性的;产生这种效应的关键在于,根系分布于潜在滑面的起始点处,根系对危险点局部区域的加固,产生了对整体边坡加固的效果。

4 结 论

根据本文进行的室内模拟降雨实验,总结不同类型植物根系对边坡稳定性的影响,可以得出一些



图9 根系布置于潜在危险点附近

Fig. 9 Roots arranged near the potential danger point

基本结论:

(1) 坡体上无植物根系的孔洞,在孔洞尺寸较小、土中细颗粒含量较多的条件下,在土体变形过程中很容易自动封闭、堵塞,不易形成新的裂缝、管涌等局部破坏现象。

(2) 粗根系木本植物对于坡体稳定性具有不利的影 响,在植物根部与土体接触的位置,容易在降雨条件下产生裂缝等局部破坏;草本植物根系对土体有显著的固化作用,并且其固化作用有一定的影响范围。

(3) 植物根系对边坡的影响,存在几何尺度和空间分布的效应。可以推论得出,如果植物的根系直径较粗、空间分布密度较小,则对边坡稳定具有不利的影 响;如果植物的根系直径较细、空间分布密度较大,则对边坡起到固化作用。

(4) 植物根系对边坡起到的固化作用,与根系的分布位置关系密切。当根系分布于潜在滑面的起始点附近时,最有利于保持边坡稳定;也可以推论地认为,根系贯穿坡体潜在的滑动面,对边坡稳定也是有利的;而如果存在根系,但是未分布于潜在滑面附近,则起不到有利的作用。在一定意义上,本文的实验结论能够合理地解释,为什么一些植被发育的地区仍然产生山体滑坡。

参 考 文 献

Aravena J E, Berli M, Ghezzehei T A, et al. 2011. Effects of root-induced compaction on rhizosphere hydraulic properties—X-ray microtomography imaging and numerical simulations[J]. *Environmental Science & Technology*, 45(2): 425–431.

Cazzuffi D, Crippa E. 2005. Contribution of vegetation to slope stability: An overview of experimental studies carried out on different types of plants[C]. *Geo-frontiers Congress*.

Chen C, Zhang J Y, Zhao X L, et al. 2017. Numerical study of effect of

roots morphology on shallow stability of slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34(4): 126–130.

Chen W. 2013. The Laboratory model test study and numerical simulation analysis of loess slope[D]. Yangling: Northwest A&F University.

Fu J T, Li X K, Liu C Y, et al. 2020. Statistic of mechanical characteristics of five herb roots standing in Henan region of Qinghai province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(6): 1147–1159.

Gariano S L, Guzzettif. 2016. Landslides in a Changing Climate[J]. *Earth-Science Reviews*, 100(162): 227–252.

Gonzalez-ollauria, Mickovski S B. 2017. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes[J]. *Geoderma*, 100(285): 141–150.

Hu M J, Wang N. 2003. Testing study on the correlation among landslide, debris flow and rainfall in Jiangjia valley[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(5): 824–828.

Kamchoom V, Leung A K, Ng C W. 2016. A new artificial root system to simulate the effects of transpiration-induced suction and root reinforcement[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(4): 236–240.

Lei M Y, Cui Y F, Ni J J, et al. 2021. Actuality and case study on mechanism of post-fire debris flow initiated by shallow landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 29(3): 786–797.

Li J Y, Yu D M, Zhang X Y, et al. 2020. The effect of soil moisture content on the shear strength of rooted soil in loess regions of Xining Basin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020–09–08, <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-006>.

Li N, Chen L H, Yang Y J. 2015. Factors influencing root tensile properties of pinus tabuliformis and larix principis-rupprechtii[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 37(12): 77–84.

Liu C Y, Hu X S, Zhao Y J, et al. 2017. Strength characteristics of single root tensile test of the herbs and shrubs in cold and arid environment[J]. *Journal of Engineering Geology*, 25(1): 1–10.

Liu Y B, Hu X S, Yu D M, et al. 2020. Distribution characteristics of combined herb and shrub roots in loess area of Xining Basin and their effect on enhancing soil shear strength[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(3): 471–481.

Lu G H, Ou G Q, Y S, et al. 2014. Root tensile test of typical grass in debris flow triggering area[J]. *Mountain Research*, 32(6): 725–731.

Mickovski S B, Stokes A, van Beek L P H, et al. 2011. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis[J]. *Ecological Engineering*, 37(10): 1523–1532.

Osman N, Barakbah S S. 2006. Parameters to predict slope stability—Soil water and root profiles[J]. *Ecological Engineering*, 28(1): 90–95.

Pan J Y, Hou D Y, Li R J, et al. 2018. Rainfall infiltration test and analysis of loess slope under different rainfall intensities[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(5): 1170–1177.

Sonnenberg R, Bransby M F, Bengough A G, et al. 2011. Centrifuge modelling of soil slopes containing model plant roots[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(1): 1–17.

Wu C P. 2013. Indoor model test research on loess slope under artificial rainfall conditions[D]. Yangling: Northwest A&F University.

- Zhong R H, Bao Y H, He X B, et al. 2015. Root tensile properties and root cohesion of four herbaceous plant species in the riparian zone of Three Gorges reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 29(4): 188-194.
- Zhou Y Y, Chen J P, Wang X M. 2012. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 21(6): 1171-1177.
- 陈潮, 张俊云, 赵晓黎, 等. 2017. 植物根系生长形态对边坡浅层稳定性影响数值研究[J]. 长江科学院院报, 34(4): 126-130.
- 陈伟. 2013. 黄土边坡的室内模型实验及数值模拟分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- 付江涛, 李晓康, 刘昌义, 等. 2020. 基于统计理论的青海河南县地区5种草本植物根系力学特性研究[J]. 工程地质学报, 28(5): 1147-1159.
- 胡明鉴, 汪稔. 2003. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 22(5): 824-828.
- 雷鸣宇, 崔一飞, 倪钧钧, 等. 2021. 浅层滑坡型火后泥石流启动机理研究进展与案例分析[J]. 工程地质学报, 29(3): 786-797.
- 李姜瑶, 余东梅, 张西营. 2020. 西宁盆地黄土区边坡土体含水量对植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020-09-08, <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-006>.
- 李宁, 陈丽华, 杨苑君. 2015. 油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J]. 北京林业大学学报, 37(12): 77-84.
- 刘昌义, 胡夏嵩, 赵玉娇, 等. 2017. 寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J]. 工程地质学报, 25(1): 1-10.
- 刘亚斌, 胡夏嵩, 余东梅, 等. 2020. 西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度特征[J]. 工程地质学报, 28(3): 471-481.
- 陆桂红, 欧国强, 杨顺, 等. 2014. 泥石流源区典型草本植物根系抗拉试验[J]. 山地学报, 32(6): 725-731.
- 潘俊义, 侯大勇, 李荣建, 等. 2018. 不同雨强下黄土边坡降雨入渗测试与分析[J]. 工程地质学报, 26(5): 1170-1177.
- 武彩萍. 2013. 人工降雨条件下黄土边坡的室内模型实验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 2015. 三峡水库消落带4种草本根系抗拉特性及根系黏聚力[J]. 水土保持学报, 29(4): 188-194.
- 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 2012. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 21(6): 1171-1177.