

杜文辉, 席小龙, 周小耿, 等. 拉拔-水平荷载作用下三维根系对土体变形规律的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 568-575.

DU Wenhui, XI Xiaolong, ZHOU Xiaogeng, et al. Influence of three-dimensional root system on soil deformation under pull-out and horizontal loads[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 568-575.

拉拔-水平荷载作用下三维根系 对土体变形规律的影响

杜文辉¹, 席小龙¹, 周小耿¹, 杨 军¹, 张连玉¹, 林 杭²

(1. 中交一航局西南工程有限公司, 广西 玉林 537006; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 植物根系在三维空间中的生长和交织能够显著增强土体的力学性能, 采用数值模拟方法, 分别从二维与三维计算差异角度出发, 构建复杂根系-土体复合体二维和三维分析模型, 研究逐级拉拔-水平耦合荷载作用下, 土体和根系位移的变化规律, 揭示复杂根系-土体复合体相互作用机制。发现: 复杂根系比单一根系能够更有效地限制土体变形。由于根-土界面面积增加, 三维复杂根系固土性能优于二维分布的根系。与二维根系的比较, 三维复杂根系下位移测线的急剧变化出现在更高的荷载值上, 三维根系与二维根系相比计算得到的拉拔-水平耦合荷载更大。三维根系的位移等值线随荷载增加而趋向于三角形, 这是因为三维根系结构提供了额外的土体锚固点, 从而改变了位移模式。

关键词: 生态护坡; 复杂根系; 数值模拟; 变形; 三维计算

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.091

中图分类号: TU457

文献标志码: 文献标识号: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0568-08

Influence of three-dimensional root system on soil deformation under pull-out and horizontal loads

DU Wenhui¹, XI Xiaolong¹, ZHOU Xiaogeng¹, YANG Jun¹, ZHANG Lianyu¹, LIN Hang²

(1. China Communications First Aviation Bureau Southwest Engineering Co., Ltd., Yulin 537006, Guangxi, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The growth and interweaving of plant roots in three-dimensional space can significantly enhance the mechanical properties of soil. A numerical simulation method is used to construct two-dimensional and three-dimensional analysis models of complex root-soil complex from the perspective of two-dimensional and three-dimensional calculation differences, respectively, to study the change law of soil and root displacement under stepwise pull-out and horizontal coupling loads. To reveal the interaction mechanism of complex root-soil complex. It is found that complex root system can limit soil deformation more effectively than single root system. Due to the increase of root-soil interface area, the soil consolidation performance of three-dimensional complex root system is better than that of two-dimensional simple distributed root system. Compared with 2D roots, the sharp change of displacement line under 3D complex roots appears at higher load values, and the calculated pull-horizontal coupling load of 3D roots is larger than that of 2D roots. The displacement contour of the three-dimensional root system tends to be triangular with the increase of load, because

收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 湖南省重点研发计划(2022SK2082); 国家自然科学基金(42277175)

作者简介: 杜文辉(1975—), 男, 高级工程师, 学士, 从事铁道工程施工与设计方面的科研与生产。E-mail: duwenhuicldt@126.com

通信作者: 林 杭(1980—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事岩土工程方面的科研与教学。E-mail: linhangabc@126.com

the three-dimensional root system provides additional anchorage points, which changes the displacement mode.

Keywords: ecological slope protection; complex root system; numerical simulation; metamorphosis; three-dimensional computation

0 引言

在全球变暖和自然灾害频发的背景下, 边坡稳定性成为了一个亟待解决的问题^[1-2]。传统的土木工程加固方法, 如使用混凝土、钢筋或岩石堆砌等, 虽然能够提供即时的物理支撑, 但往往破坏了原有生态系统, 导致生物多样性的减少^[3-4]。相比之下, 利用植物根系加固边坡的方法, 即生态护坡, 能够在保持边坡稳定性的同时, 促进植被生长和生态系统的恢复, 从而实现环境保护与生态恢复的双重目标^[5-6]。生态护坡通过利用自然植被等手段有效锚定土体, 不仅能显著增强边坡的稳定性, 防止水土流失, 还能恢复和增强生态系统的功能^[7-9]。目前已吸引了众多学者的关注, 并在边坡工程中已得到了广泛的应用。管世烽等^[10]指出单根-土体拉拔破坏模式可分为拔出破坏和拉断破坏。王成龙^[11]通过实验揭示了不同植物种类之间的单根极限抗剪-拉组合力学特性差异。何伟鹏等^[12]基于单根系拉拔试验, 得到了高寒草地植物不同禁牧年限下单根抗拉力变化规律。杨果林等^[13]建立了夹竹桃单根最大抗拉力和抗拉强度与根系直径的关联模型。WU 等^[14]提出了根系固土评估模型, 其参数简单且适用性强。SCHWARZ 等^[15]基于拉拔力-位移关系提出了一种纤维增强模型, 为根系固土效果评价奠定理论基础。王海涛等^[16]从根系分布剪切方向、锚固作用长度和有效根数量三个方面对经典根系固土模型进行了修正。以往一般采用二维模型简化分析根系对边坡稳定性的影响规律, 而较少采用三维计算模型进行研究。但植物根系在三维空间中的生长和交织能够显著增强土体的力学性能, 包括提高土体的抗剪强度和减少土体渗透性, 从而有效防止水土流失和边坡失稳。通过研究三维复杂根系加固边坡的机制, 可以更准确地评估和优化植物根系对边坡稳定性的贡献, 为边坡加固设计提供科学依据。鉴于此, 本文采用数值模拟方法构建复杂根系-土体复合体二维和三维计算模型, 研究拉拔-水平荷载作用下, 土体和根系位移的变化规律。

1 数值计算模型与计算方案

采用 FLAC^{3D} 构建根-土复合体力学模型, 可直观地观察植物根系与土体之间的相互作用^[17-18]。植

物根系通常由主根、侧根和细根组成, 形成了一个密集的根系网络, 结构复杂。考虑到建模复杂性, 本文数值模拟中仅考虑主根系和侧根与土体的相互作用, 因此细根并未在模型中体现。在边坡加固和生态护坡工程中, 主根和侧根对土体的锚固作用更为显著, 而细根的影响相对较小。因此, 从工程应用角度出发, 忽略细根的影响可以简化模型, 同时保留主要力学特征。类似研究中, WU 等^[14]和 SCHWARZ 等^[15]也采用了类似的简化方法, 仅考虑主根和侧根的力学贡献, 结果表明这种简化能够较好地反映根系对土体的加固作用。此外, 包含细根的完整根系模型将显著增加建模和计算的复杂性, 而主根和侧根的模型能够在保证计算精度的同时, 提高计算效率。本文植物根系模型主要借助 Rhino 或 Griddle 等建模软件来完成, 然后导入 FLAC^{3D} 建立根-土复合体模型。

分别从二维与三维计算差异角度出发, 构建复杂根系-土体复合体二维和三维分析模型, 具体如下: (1) 随机生成 9 条根系轮廓, 并控制根系末端到模型顶部距离在 20 cm 以内, 依此构建二维根系模型并划分网格, 得到二维根系-土体数值模型如图 1 所示。(2) 设定主根茎长 20 cm, 直径为 2 cm, 副根茎长 10 cm, 直径为 1 cm, 共生成四条副根茎, 得到三维复杂根系-土体数值模型如图 2 所示。

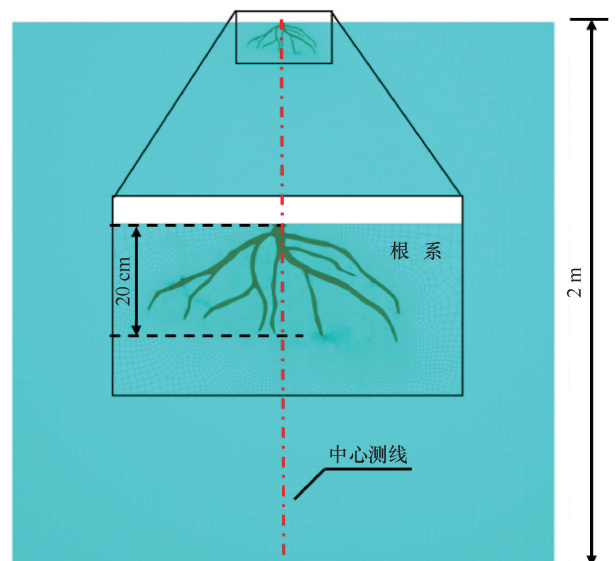


图 1 二维根系-土体数值模型

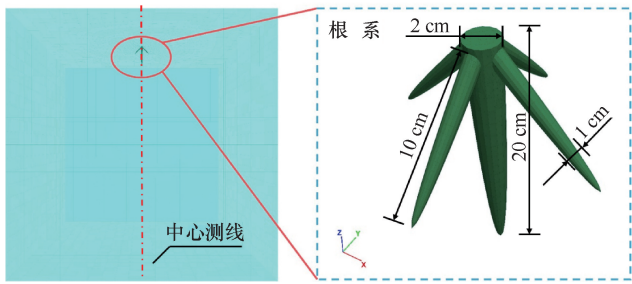


图2 三维复杂根系-土体数值模型

在计算时, 植物根系采用 Elastic 弹性本构模型, 土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性强度准则^[19-20]。具体材料参数如下。

(1)土体。弹性模量 5 MPa, 泊松比 0.35, 黏聚力 0.2 kPa, 内摩擦角 24°, 容重 17.8 kN/m³。这些参数是基于已有实验数据和文献^[19-20]确定的, 适用于本研究中所涉及的土体类型。

(2)根系。弹性模量 150 MPa, 泊松比 0.5, 容重 15 kN/m³。这些参数是根据植物根系的力学特性确定的, 参考了相关文献^[5-7]中对植物根系力学性能的研究结果。

边界条件为法向位移约束, 顶部为自由表面。不考虑根系成长过程, 直接赋予根系参数, 在重力作用下达到平衡后将位移场清零, 生成初始应力场。最后在根系顶部逐级施加荷载, 直至根系-土体复合体模型发生破坏。

2 计算结果分析

2.1 二维根系-土体复合体变形分析

单根与复杂根系在水平-拉拔耦合荷载作用下的根系和土体位移特征曲线, 如图 3 所示。随着荷载的增加, 无论是单根还是复杂根系条件下, 根系和土体的位移都呈现增大的趋势。具体来说, 根系的位移增长方式类似于指数函数, 而土体位移则呈现出线性增长。当根系结构变得更为复杂时, 在相同级别的荷载作用下, 根系与土体的位移反而更小。这意味着复杂根系能够抵抗更大的水平-拉拔耦合荷载, 直至破坏。此外, 复杂根系条件下达到破坏状态所对应的峰值荷载也更高, 破坏模式展现出更高的“延性”, 即破坏前材料能承受更大的变形。因此, 复杂根系相比于单一根系具有更好的锚固和支护能力。在受到水平和拉拔复合荷载时, 复杂根系可提供更强的稳定性和支撑效果, 这是由于根系间相互交织形成的网络结构, 使得力的传递更加均匀, 提高了整体的力学性能。

不同拉拔-水平耦合荷载作用下复杂根系-土体

复合体中心位移如图 4 所示。当荷载在 5~40 kPa 之间时^[见图 4(a)], 复合体显示明显的竖向位移, 但结构仍然相对稳定, 没有出现不连续的位移。这意味着在这个荷载范围内, 复合体可以承受外力而不发生

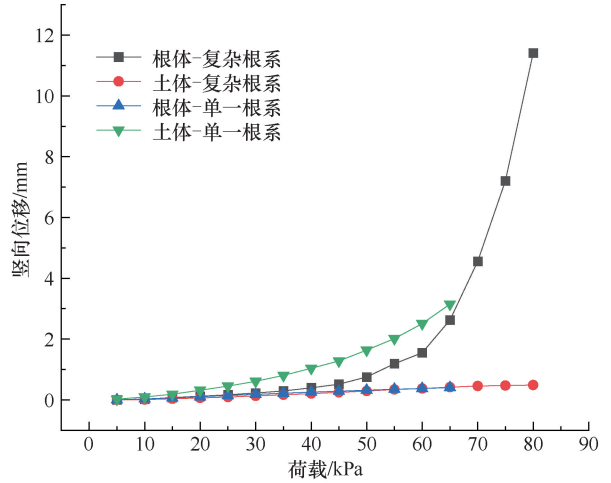
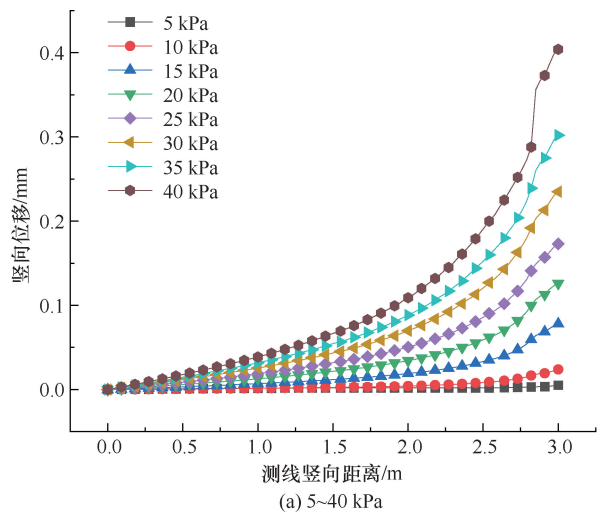
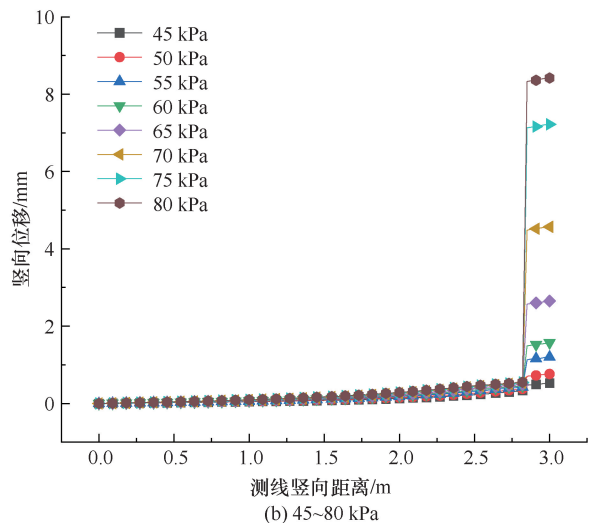


图3 单根与复杂根系下的根系和土体位移特征曲线



(a) 5~40 kPa



(b) 45~80 kPa

图4 复杂根系下的根系-土体复合体中心位移

显著的破坏。荷载达到 40 kPa 时, 复合体内部开始出现不连续的位移, 这表明复合体结构的破坏即将发生, 这是复合体结构稳定性的临界点。当荷载从 45 kPa 增加到 80 kPa [见图 4(b)] 时, 复合体的不连续位移变得更加严重, 这表明结构破坏加剧。这意味着在高荷载条件下, 复合体的稳定性迅速下降, 位移的突变可能预示着结构的完全失效。单一根系在较低的荷载 (20 kPa) 下就开始表现出类似位移突变的现象, 而复杂根系的临界值远高于此。这证明了复杂根系结构能更有效地增强土体的稳定性, 提供更强的支撑力和锚固效果, 尤其是在浅层土体中。因此, 复杂根系-土体复合体比单一根系具有更高的抗拉拔和水平荷载能力, 这主要是因为复杂根系能够更均匀地分布荷载, 并通过其网络结构提高土壤的内聚力和抗剪强度。这种增强效果在保护边坡结构免受侵蚀和滑坡方面尤为重要。

不同水平-拉拔荷载作用下, 复杂根系的根系-土体复合体位移云图如图 5 所示。随着荷载的增加, 位移增加的速率逐渐减缓, 这意味着复合体对荷载的响应呈现出非线性特征。当水平-拉拔荷载从 5 kPa 增加至 75 kPa 时, 根系-土体复合体的最大位移量也随之增加。从位移云图可见, 在较低的荷载 (例如 5 kPa) 下, 位移主要集中在根壁的上部和水平荷载反向的一侧土体 (即根系的左侧)。随着荷载的增加, 位移增量扩展到了根壁的下部两侧, 这表明整个根系区域的参与度提高。低荷载时, 如 5 kPa 时, 位移等值线没有特定形状, 这是由于此时荷载对于位移云图的影响小于根系的不规则形态的影响, 体现了根系与周围土体的复杂交互作用。高荷载时, 位移等值线呈现倾斜的椭圆形, 并最终演变为梯形, 这是因为根系对土体的加固作用随荷载增加而逐渐减弱或失效。对于根系加固效果, 根系在一定程度的荷载范围内能有效加固土壤, 但当接近破坏荷载时, 加固效果受限于根系两侧的一定范围, 根系下部的约束作用减少。

2.2 三维复杂根系-土体复合体变形分析

三维复杂根系下根系和土体荷载位移特征曲线如图 6 所示。位移随荷载增加而增大, 直至达到破坏点, 这一过程表现出渐近性破坏的特征。当将三维复杂根系与二维根系的情况进行对比时, 三维根系在破坏时所承受的峰值荷载显著提高, 约为十数倍。增加的抗拔力主要归因于三维根系拥有更大的总表面积, 这为土壤提供了更强的锚固效果。更大的表面积意味

着更多的接触点, 这些接触点有助于分散和抵抗施加的力, 从而提高了整体的稳定性。天然三维根系的这种结构特性使得它们在抵抗土壤侵蚀、保持土壤结构完整性方面表现更佳。复杂的三维根系结构, 包括多根较粗的根茎, 增加了根系与土壤之间的摩擦力和黏结力, 对于抵抗水平拉拔力尤为重要, 如边坡保护和防止滑坡等方面。

不同拉拔-水平耦合荷载作用下三维复杂根系-土体复合体中心位移测线如图 7 所示。(1) 荷载区间在 20~120 kPa 时, 在该较低的荷载范围内, 复合体表现出弹性阶段的特征。根系与土体之间的相互作用导致的中心位移是小幅度的, 并且随着荷载的增加而线性增长。这意味着复合体能够有效地抵抗外加荷载, 而不会发生永久形变。根系的锚固作用和土体的支撑作用共同维持着复合体的稳定状态。(2) 荷载区间在 220~620 kPa 时, 随着荷载的提升至中等强度, 复合体的响应转变为非线性, 位移的增加速率明显加快。这一阶段, 根系与土体之间的摩擦力达到了其承受能力的极限, 开始出现滑动现象, 可导致局部破坏。这表明复合体进入了塑性变形阶段, 其中一些区域可能已经开始失效, 但整体结构仍然能够承载额外的荷载。(3) 荷载区间在 720~1 120 kPa 时, 在更高的荷载条件下, 复合体的位移测线斜率进一步陡增, 显示出对荷载变化更为敏感的反应。这意味着复合体中的塑性变形区域可能扩大, 某些部分可能已经失效, 而其他部分继续承担荷载, 直至整个复合体达到最终的失效点。这一阶段的高敏感度和高位移变化指示了复合体接近或已到达其承载能力的极限。对比三维根系与二维根系情况, 三维复杂根系模型在相似的荷载作用下表现出更高级别的稳定性。这是因为三维根系具有更复杂的结构, 包括更多的根分支和更大的锚固面积, 这些特点有助于更有效地分散荷载并提高复合体的整体抗拉拔和抗水平荷载的能力。因此, 三维根系能够承受更大的拉拔-水平耦合荷载, 从而推迟复合体进入非线性和塑性变形阶段的时间点, 增加了其整体的稳定性和安全性。

不同水平-拉拔荷载作用下, 三维根系的根土复合体位移如图 8 所示。当三维复杂根系受到水平-拉拔荷载时, 主要的位移增量发生在与水平荷载方向相反的一侧土体上, 也就是根系的左侧。这是由于根系在水平荷载作用下对土体的锚固作用, 导致与荷载方向相反的一侧土体位移更为显著。这表明根系能够抵抗拉拔和水平荷载, 并且在受力方向的对面产生显著

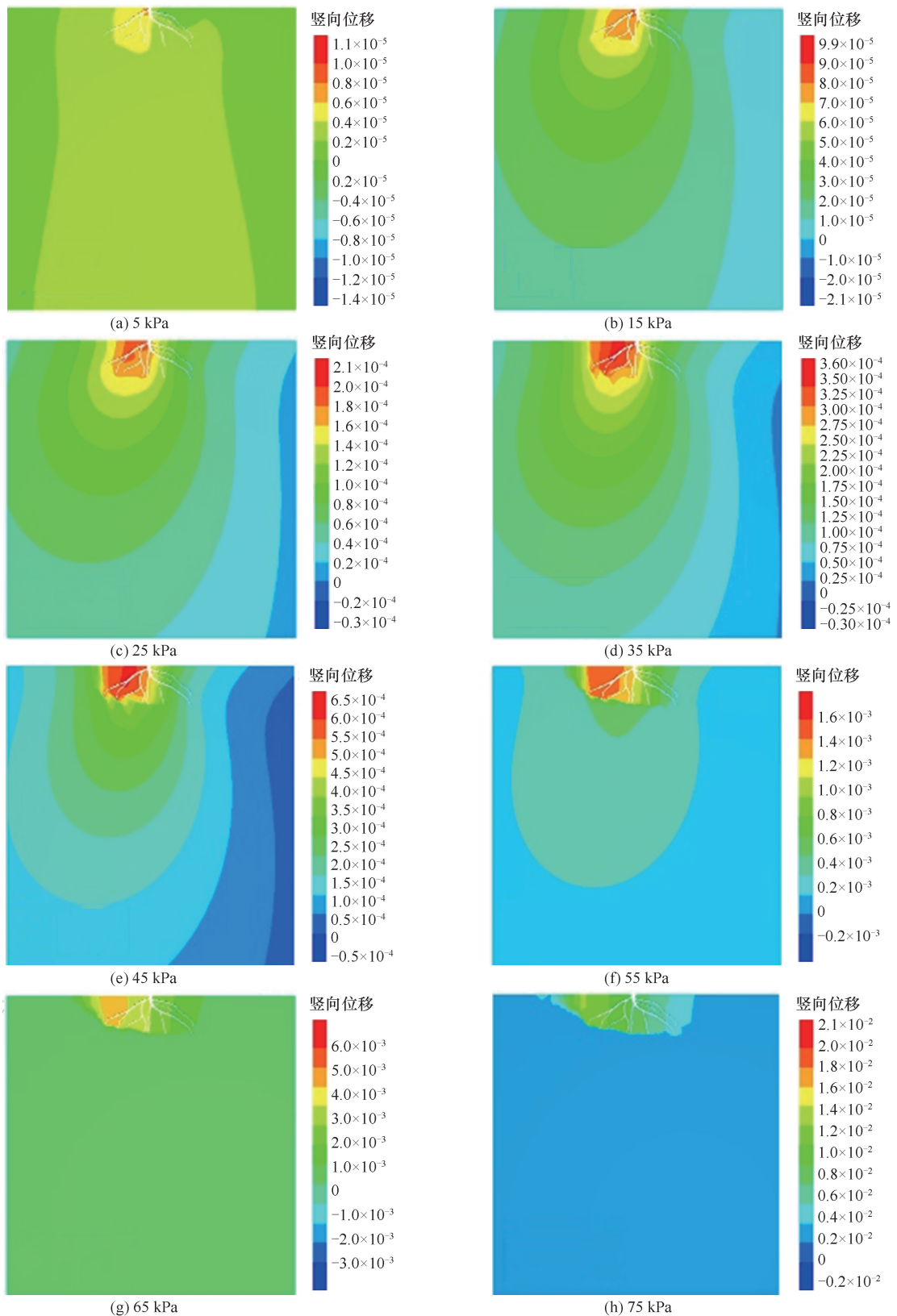


图5 复杂根系下的根土位移演化云图(单位: m)

的土体位移。在低荷载(小于 120 kPa)条件下, 位移等值线没有明显的特定形状, 这意味着在这个阶段根系和土体的相互作用还未形成稳定模式。随着荷载的

增加, 位移等值线逐渐呈现出三角形的形态, 这反映了根系结构如何影响土体的位移响应。根据位移云图的演化, 可以推断出复杂根系对土体具有加固作用,

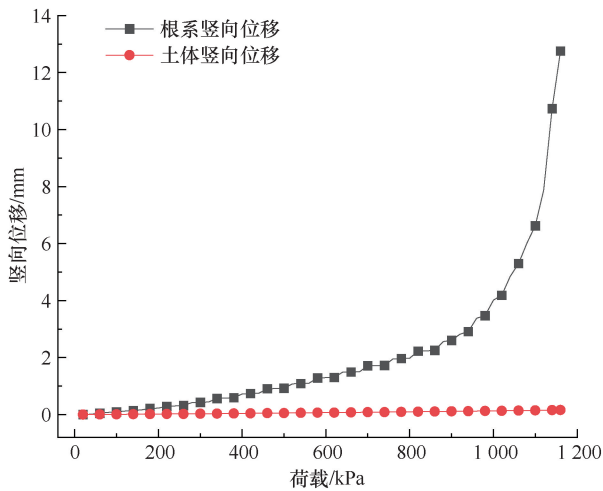
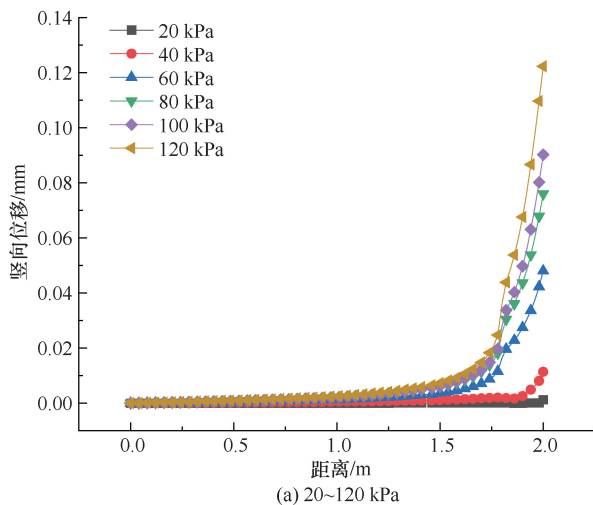


图6 三维复杂根系和土体位移特征曲线

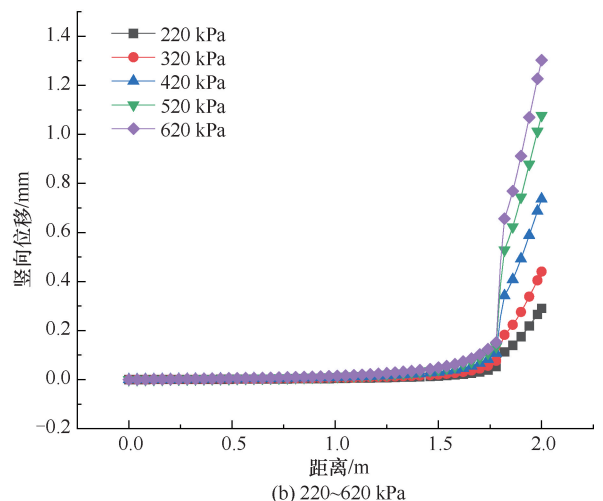
这种作用在一定荷载范围内有效。达到破坏荷载时,与荷载方向相反的一侧土体被有效地限制,而同向侧的土体则表现出较小的约束效应。比较二维与三维根系,三维根系的反应与二维根系有所不同,三维根系

的位移等值线随荷载增加而趋向于三角形,这是因为三维根系结构提供了额外的土体锚固点,从而改变了位移模式。

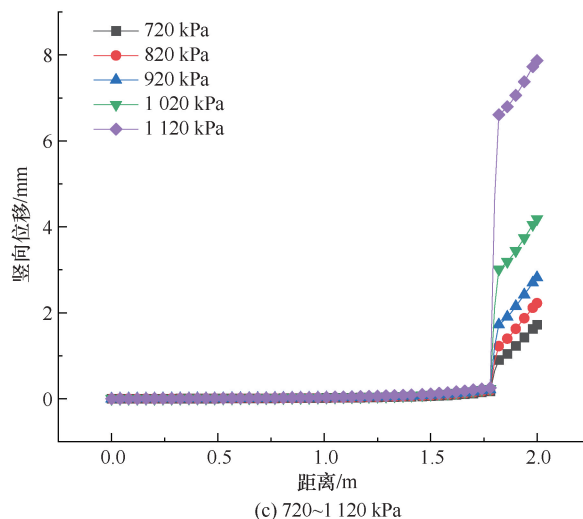
三维根系在破坏时所承受的峰值荷载显著高于二维根系,这表明三维根系能够更有效地分散和抵抗外力,从而提高复合体的整体稳定性。在相同荷载条件下,三维根系的位移测线变化更加平缓,且位移等值线呈现出更规则的三角形分布。这表明三维根系通过其复杂的结构为土体提供了更多的锚固点,使得荷载能够更均匀地分布,减少了局部应力集中。三维根系在高荷载条件下表现出更高的延性,即在达到破坏荷载之前能够承受更大的变形。这使得三维根系在实际应用中能够更好地适应复杂的受力环境,减少边坡失稳的风险。三维根系通过增加根系与土体的接触面积和摩擦力,显著提高了土体的内聚力和抗剪强度。这种加固效果在低荷载条件下尤为明显,能够有效限制土体的初始位移。



(a) 20~120 kPa



(b) 220~620 kPa



(c) 720~1120 kPa

图7 三维复杂根系-土体复合体中心位移

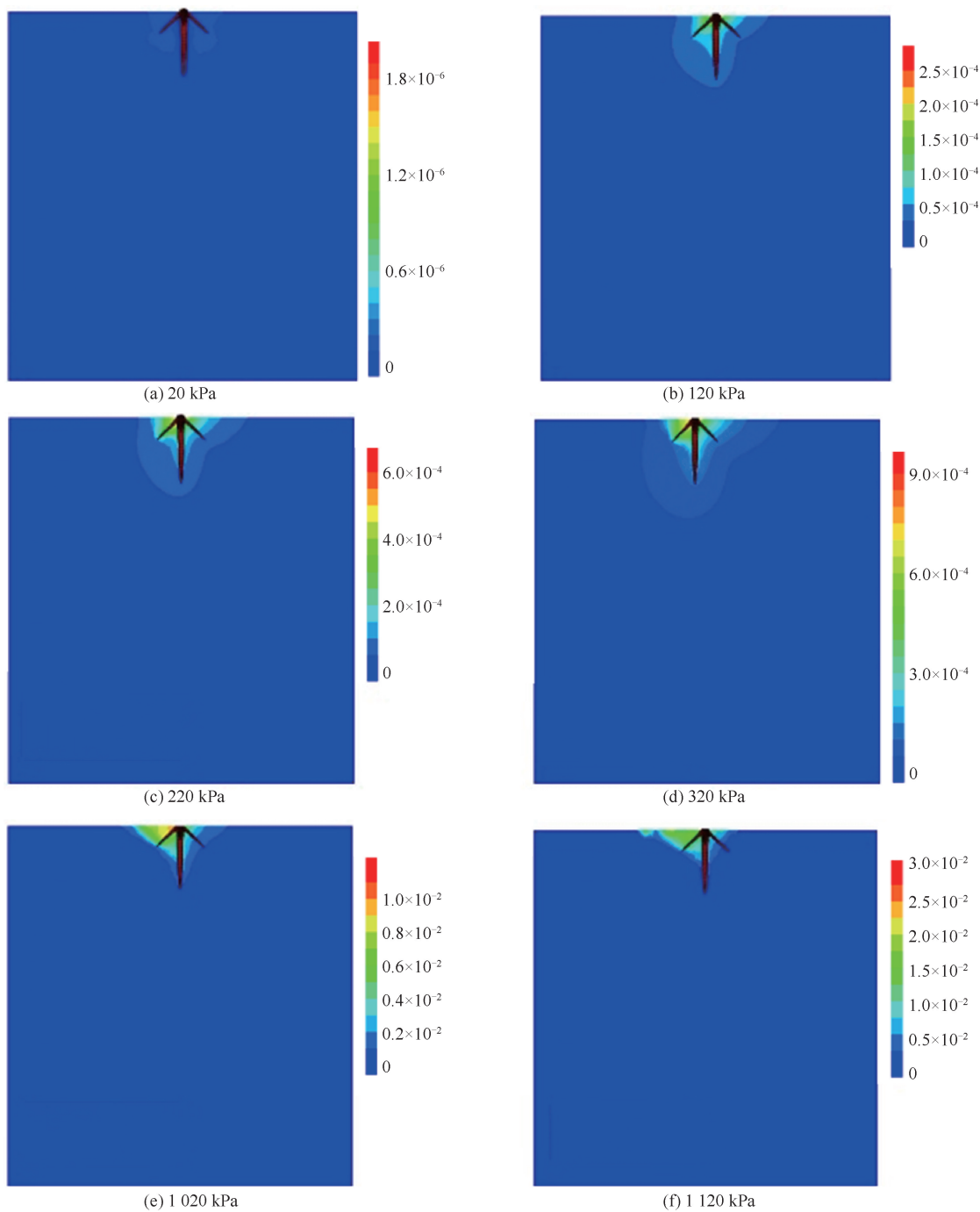


图8 三维复杂根系下根系-土体位移演化云图(单位: m)

3 结论

(1)相较于单一根系,二维根系在同级荷载作用下的根系和土体位移更小,复杂根系-土体复合体破坏需要的峰值荷载更大,具备更加可靠的锚固、支护性能。

(2)二维根系的固土效果仅在一定范围内有效。荷载较小时复杂根系-土体复合体的位移主要发生在根系左侧,位移等值线无特定形状。荷载增大后,根

壁下部两侧也产生位移,等值线开始呈倾斜的椭圆形,最后演化为梯形。

(3)与二维根系的比较,三维复杂根系下位移测线的急剧变化出现在更高的荷载值上,三维根系与二维根系相比计算得到的拉拔-水平耦合荷载更大。

(4)当三维复杂根系受到水平-拉拔荷载时,主要的位移增量发生在与水平荷载方向相反的一侧土体上。在低荷载条件下,位移等值线没有明显的特定形状,随着荷载的增加,位移等值线逐渐呈现出三角形

的形态。

参考文献:

- [1] 陈伯洲, 胡建华, 吴威, 等. 白龙江流域不同植被类型修复模式下土壤理化性质与边坡稳定性[J]. 山地学报. 2024, 42(2): 260-277.
- [2] 胡惠华, 鲁光银, 陈怡帆, 等. 前缘锁固型峡谷边坡失稳源辨识与演化过程模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版). 2023, 54(11): 4461-4471.
- [3] GAO Y, LI J D, YANG T H, et al. Formation of pit lake and slope stability following mine closure; a case study of Fushun West Open-pit Mine[J]. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2024, 15(1): 1-21.
- [4] GAO Y, LI J D, YANG T H, et al. Swash-flow induced forces on human body standing on a smooth and impermeable slope: A numerical study with experimental validations[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2024, 18(1): 1-16.
- [5] 张志刚, 王立峰, 寿凌超, 等. 生态护坡植物配置研究现状及趋势分析[J]. 环境科学与管理. 2023, 48(11): 137-142.
- [6] 杜技能, 王中珏, 段继琪, 等. 生态护坡理论及技术研究现状综述[J]. 水利与建筑工程学报. 2023, 21(6): 211-220.
- [7] 陈飞, 谢蕴忠, 王俊峰, 等. 基于数值模拟方法的根系护坡研究进展[J]. 科学技术与工程. 2023, 23(16): 6728-6738.
- [8] CHENG X Y, YANG R M, HAN Y. Construction method for ecological protection of stone side slopes using composite vegetation concrete[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12-18.
- [9] SUN Y, GU X W, XU X C. Experimental study on hydraulic erosion characteristics of ecological slope of tailings reservoir under rainfall[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(7): 2426-2436.
- [10] 管世烽, 夏振尧, 张伦, 等. 水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究[J]. 长江科学院院报. 2016, 33(6): 24-28.
- [11] 王成龙. 四种植物根系剪拉组合力损伤自修复后固土特性[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学. 2021.
- [12] 何伟鹏, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 黄河源区不同禁牧年限对垂穗披碱草单根及其根-土复合体力学强度特征的影响[J]. 草业学报. 2023, 32(5): 106-117.
- [13] 杨果林, 李亚龙, 林宇亮, 等. 夹竹桃根系拉拔力学试验及计算模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版). 2023, 54(6): 2085-2099.
- [14] WU T H, MCKINNELL W P, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [15] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(2): 121-128.
- [16] 王海涛, 张宇, 刘琳琳, 等. 草本植物根系对土体加筋作用研究[J]. 长江科学院院报. 2024, 41(1): 1-9.
- [17] SRIKRISHNAN S, PORATHUR J L, AGARWAL H. Impact of earthquake on mining slopes-a numerical approach[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(12): 5193-5208.
- [18] SINGH T N, GULATI A, DONTA L, et al. Evaluating cut slope failure by numerical analysis: A case study[J]. *Natural Hazards*, 2008, 47(2): 263-279.
- [19] ZHANG M S, LIU H, YANG Y, et al. Modified rock stress factor for the Mathews stability graph method and its application[J]. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2024, 15(1): 1-13.
- [20] CHENG L, XU H, LI S N, et al. Characterization of crack evolution and hardening-softening in rock elastoplastic constitutive models[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 176: 106711.

(责任编辑 王海锋)