

3D打印弯曲根系拉拔力学特性试验研究

丁瑜, 彭博识, 夏振尧, 刘振贤, 刘楚鑫

An experimental study on the pullout mechanical property of tortuous roots manufactured from 3D printing

DING Yu, PENG Boshi, XIA Zhenyao, LIU Zhenxian, and LIU Chuxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

退化高寒草原人工恢复植被根系及根-土复合体力学特性研究

A study of the mechanical properties of herbaceous roots and root-soil composite systems in the degraded alpine pasture artificially restored grassland

何伟鹏, 刘昌义, 周国英, 胡夏嵩, 付江涛, 卢海静, 闫聪, 杨馥铖, 李国荣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 207-218

根-土复合体的三轴试验及其强度分析

Triaxial test and strength analysis of root-soil composite

钟彩尹, 李鹏程, 马滔, 吴礼舟 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 97-104

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118

基于FLAC3D的危岩撑-锚联合支护分配比研究

A study of the distribution ratio for combined spore-anchor supporting of unstable rocks based on FLAC3D

陈涛 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 64-64

火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响

Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas

胡卸文, 侯羿腾, 王严, 杨瀛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 106-112

海水入侵模拟方法VFT3D及应用

Development and application of sea water intrusion models

王佳琪, 郭芷琳, 田勇, 范林峰, 曾文科, 王晓丽, 苏, MicheleLancia, 郑春苗 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 184-194



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212045

丁瑜, 彭博识, 夏振尧, 等. 3D 打印弯曲根系拉拔力学特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 82-90.
DING Yu, PENG Boshi, XIA Zhenyao, et al. An experimental study on the pullout mechanical property of tortuous roots manufactured from 3D printing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 82-90.

3D 打印弯曲根系拉拔力学特性试验研究

丁瑜^{1,2}, 彭博识^{1,2}, 夏振尧^{1,2}, 刘振贤^{1,2}, 刘楚鑫^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002)

摘要: 天然根系具有不同弯曲形态, 对根土相互作用特性影响极大。以往研究多将根系视为顺直, 未充分考虑弯曲根系拉拔受力变形特征、破坏模式。利用 3D 打印技术制作弯曲根系, 开展 3 种根径(2.0, 3.5, 5.0 mm)、5 种弯曲度(1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.20)的根系拉伸、拉拔试验, 探索弯曲根系的拉拔力学特性。结果表明: 根系拉伸特性受到弯曲结构和自身材料性质共同影响, 根系最大拉伸力、拉伸变形刚度随弯曲度增加而减小, 随直径增加而增大; 根系峰值拉拔力随弯曲度增加呈先增大后减小, 弯曲度 1.15 时最大, 峰值拉拔位移呈类似变化趋势; 弯曲根系齿肋挤压土体形成啮合作用, 有助于增强根土相互作用; 弯曲细根系的拉伸力和拉伸刚度低, 更容易与土体协同变形承担拉拔荷载。弯曲根系受力变形与直根系差异极大, 研究结果可为弯曲形态根系固土评价提供理论参考。

关键词: 3D 打印; 弯曲根系; 拉拔试验; 根土相互作用; 峰值拉拔力

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0082-09

An experimental study on the pullout mechanical property of tortuous roots manufactured from 3D printing

DING Yu^{1,2}, PENG Boshi^{1,2}, XIA Zhenyao^{1,2}, LIU Zhenxian^{1,2}, LIU Chuxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Natural roots systems exhibit various tortuous morphologies, which significantly impact the root-soil interaction characteristics. Previous studies often treated root systems as straight, neglecting the deformation characteristics and failure modes of tortuous root systems under tensile loads. In this study, tensile test and pullout test are conducted by using tortuous roots manufactured from 3D printing technology with three different root diameters (2.0, 3.5 and 5.0 mm) and five root tortuosity (1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.20), and the pullout behaviours of tortuous roots are explored. The results indicate that the tensile properties of root systems are influenced by both the tortuous structure and the material properties. The ultimate tensile force and tensile stiffness decreases with increasing tortuosity but increase with increasing diameter. The peak pull-out force of the root system initially increases and then decreases with tortuosity, reaching a maximum value when tortuosity is equal to 1.15. The peak pull-out displacement shows a similar trend. The tortuous root system forms an engaging effect with the soil by

收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-02-13

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U21A2031)

第一作者: 丁瑜(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害、生物岩土等方面的教学科研工作。E-mail: thirdding@163.com

compressing the soil ribs, enhancing the interaction between roots and soil. The tensile force and stiffness of the tortuous fine root system are low, making it more prone to coordinate deformation with the soil to bear tensile loads. The deformation under stress of tortuous root systems differs significantly from that of straight root systems. This study provides theoretical references for the evaluation of soil-reinforcement by root system.

Keywords: 3D printing; tortuous root; pullout test; root-soil interaction; peak pullout force

乔灌植物根系具有加固土体的作用,根系能显著提升根土复合体的剪切强度、变形性能^[1-3]。根系通过发挥拉拔性能,与土体共同承担外部荷载实现固土能力^[4-5],因此,准确分析根系拉拔特性,对评价根系固土能力至关重要。土体中根系拉拔特性发挥主要与根系形态和力学特征、根土界面黏结特征、土体性质有关^[6-10]。在拉拔试验与理论分析中,学者们通常将根系视为顺直,分析直径、长度、倾角等因素的影响^[7-9]。在实际土体中,根系并非顺直而是弯曲结构。弯曲根系齿肋有助于调动根侧土体变形^[10],且与顺直根系差异极大^[11-12]。目前,根系拉拔相关研究并未切实考虑根系弯曲形态的影响,鲜有对弯曲根系拉拔受力变形、破坏特征方面的报道。

受植物类型、生长环境等因素影响,自然根系的尺寸、形态特征各异,难以用于根系形态的对比和控制试验研究。为了解决试验根系收集困难的问题,利用模型根系代替真实根系得到了关注和应用。对于形态简单的顺直根系,利用纤维、木材、橡胶、麻绳等相似材料,通过手工或机械加工能获得模型根系^[12-14]。然而,要获得形态较复杂的根系,上述方式难以实现。3D打印技术能够精确、高效地制作出复杂结构的实体,近年来在根系固土领域日益受到青睐^[15-17]。

为了研究弯曲根系的拉拔力学特性,本研究借助3D打印技术,按不同直径分别制作不同弯曲度的仿生根系,通过根系拉伸、拉拔试验,从破坏模式、拉拔力-位移曲线演化特征、受力和变形特性方面探讨直径和弯曲度对根系拉拔力学性质的影响。

1 材料与方法

1.1 弯曲根系形态确定

天然乔灌木根系曲折多变,形态复杂。为了便于分析对比,对真实根系的弯曲形态进行了必要的简化处理(图1)。根系弯曲形态通过弯曲长度和弯曲高度控制,单根根系中,按相同波长和波高考虑,如图1(b)所示。对于简化的根系弯曲形态,采用弯曲度进行定量表征和描述。根据文献[9-10],根系弯曲度(z)可

定义为:

$$z = \frac{L}{S} \quad (1)$$

式中: L ——根系弯曲总长度/mm;

S ——首尾直线长度/mm。

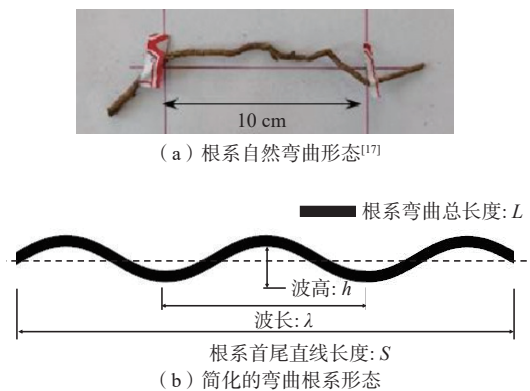


图1 弯曲根系的几何形态示意图

Fig. 1 Geometric diagram of tortuous roots

直根系的 z 值为1;根系的弯曲程度越高, z 值越大。

参考真实根系的统计数据^[12],选取2.0, 3.5, 5.0 mm 3种不同直径,分别设置5种不同弯曲度制作3D打印仿生根系(表1)。为保证根土接触面积一致,所有仿生根系的弯曲总长均控制为100 mm。暂不考虑波长的影响,波长设置为40 mm,按0, 5.2, 7.4, 9.1, 10.6 mm设置波高,分别模拟1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.20等5种弯曲度。

表1 弯曲根系的形态参数

Table 1 Morphological parameters of tortuous roots

试样	根系直径/mm	根系弯曲总长度/mm	根系弯曲度
S1			1.00
S2			1.05
S3	2.0, 3.5, 5.0	100	1.10
S4			1.15
S5			1.20

1.2 3D打印根系制作

通过对比,选择丙烯腈-丁二烯-苯乙烯三元共聚物(ABS)为3D打印材料,利用熔融沉积工艺(fused deposition modeling, FDM)^[18]制作仿生根系。具体而

言,通过加热挤压,在计算机控制下将 ABS 丝线原材料逐层堆积打印成型,实现目标模型制作。

经实测,不同直径(1.0~5.0 mm)的 ABS 直根系的拉伸力学指标如图 2 所示。由图 2 可知,因植物种类和根系形态差异,真实根系拉伸试验结果具有一定的离散性。ABS 根系弹性模量和抗拉强度与直径关系均在真实根系的变化范围内。仿生根系中 ABS 丝线呈定向排布,在结构上与真实根系结构相似,且其具有较为理想的拉伸力学性能,能较好地模拟多种实际的乔灌木根系。

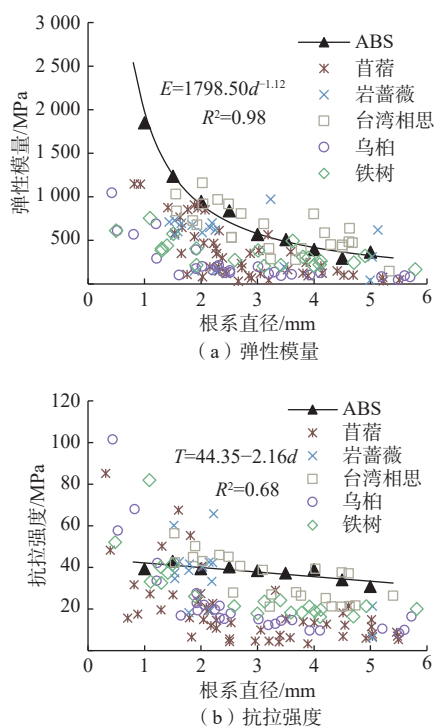


图 2 ABS 根系与真实根系^[19-22]的拉伸力学指标对比
Fig. 2 Comparison of tensile properties between real roots and ABS roots^[19-22]

注: E 为弹性模量; T 为抗拉强度; d 为直径。

1.3 根系拉伸、拉拔试验

根据表 1 所示的弯曲形态参数,利用犀牛建模软件建立根系三维几何模型;选取 ABS 作为打印材料,委托厂商打印得到仿生根系(图 3),随后进行室内拉伸、拉拔试验。

根系拉伸试验采用 HP-1000 艾德堡数显拉力计(精度 0.1 N),以速率 10.0 mm/min 拉伸根系,至根系被拉断。记录试验过程中的拉力和位移数据,利用 Excel 软件进行试验数据整理、分析和图表绘制。

根系拉拔试验的试验土料为本地紫色土,土样经开挖、风干、筛分后,取粒径小于 2 mm 的土制作重塑

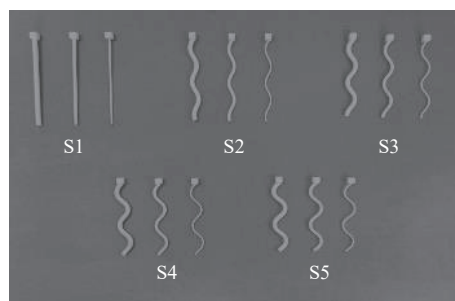


图 3 3D 打印根系实物图

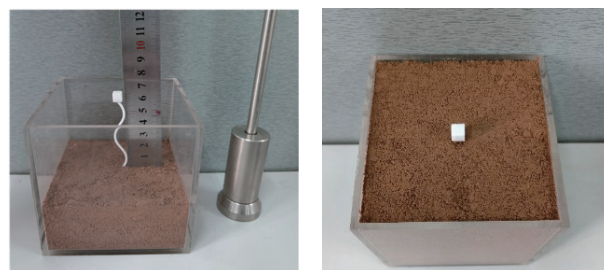
Fig. 3 Picture of 3D printing roots

土样。土样的颗粒级配如表 2 所示,参考天然土体性质^[23],试样干密度按 1.45 g/cm³、含水率按 15.0% 控制。采用分层压实法进行制样(图 4),为减小制样对弯曲根系的影响,采取了以下措施:10 cm 厚试样分为 5 层(每层 2 cm)压实;制样时采用夹具固定根系;压实时,用轻型手动击实锤绕根系沿同一方向压实至目标高度。下层土体压实后表面刮毛,再填置上层土体。

表 2 土体的物理特性指标

Table 2 Physical characteristics of soil

干密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	粒径分布/%				
		<0.075 mm	0.075 ~ <0.25 mm	0.25 ~ <0.5 mm	0.5 ~ <1 mm	1 ~ 2 mm
1.45	15.0	3.53	39.61	22.94	18.02	15.90



(a) 分层填土

(b) 根土复合体试样

图 4 根土复合体制样

Fig. 4 Root-soil sample preparation

根土复合体试样制成后,采用艾德堡 HP-100 数显拉力计(精度 0.01 N)开展拉拔试验,拉拔速率同样设置为 10 mm/min,数据处理方式与拉伸试验一致。

2 试验结果

2.1 根系拉伸力学特性

直根系的拉伸曲线具有明显峰值,拉伸力达到峰值前,曲线近线性上升,为弹性变形特征;拉伸力超过峰值后曲线转为下降趋势,根系发生屈服直至被拉断,如图 5 所示。弯曲根系拉伸曲线呈阶段性变化,与直根系明显不同。拉伸位移小于 5 mm 时,拉伸力

与拉伸位移近似为线性变化, 初期呈弹性变形。随拉伸位移继续增大, 曲线呈“凹型”上升, 即拉伸曲线斜率随位移增加而增大; 根系拉断前屈服位移较小, 具

有脆性破坏特征。此外, 根系拉断位移随弯曲度增加而增大, 随直径增加而减小, 细根系趋向于拉伸至近顺直后断裂, 而粗根系在拉直前已发生断裂。

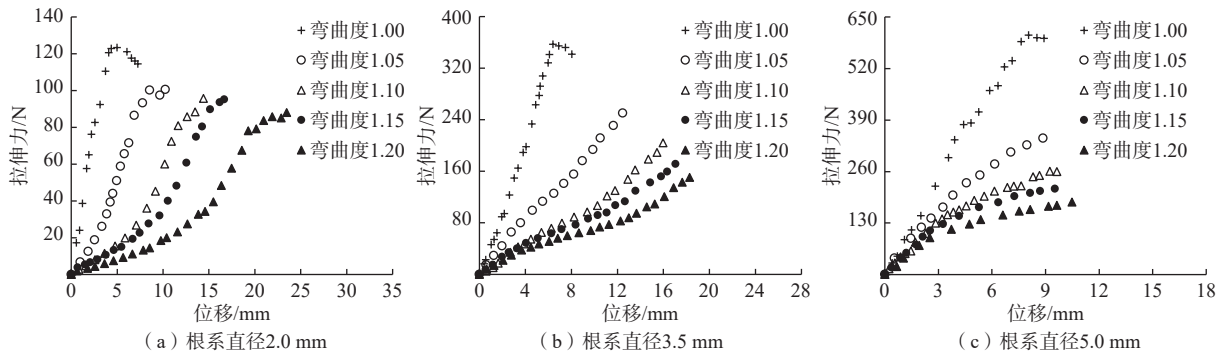


图 5 弯曲根系的拉伸力-位移曲线

Fig. 5 Tensile force-displacement curves of tortuous roots

由图 6 可知, 根系最大拉伸力和拉伸变形刚度随弯曲度增加不断减小。当根系直径为 2.0, 3.5, 5.0 mm 时, 相比直根系, 弯曲根系最大拉伸力下降 12.23% ~ 23.14%、29.95% ~ 57.82%、43.01% ~ 69.78%, 拉伸变形刚度(拉伸力与位移近线性变化曲线斜率)下降 76.87% ~

94.86%、56.49% ~ 80.81%、32.84% ~ 53.04%。直径越大, 最大拉伸力的下降幅度增加, 而拉伸变形刚度的下降幅度减小。弯曲度相同时, 直径越大, 最大拉伸力和拉伸变形刚度越大, 粗根系抗拉能力更强。

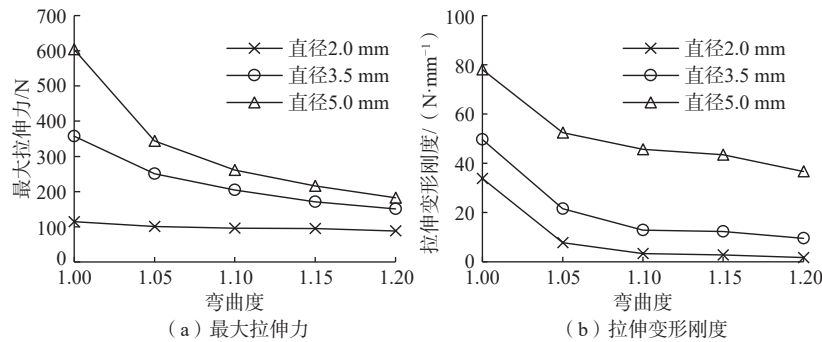


图 6 最大拉伸力和拉伸变形刚度曲线

Fig. 6 The curves of ultimate tensile force and tensile stiffness of tortuous roots

2.2 根土拉脱破坏模式

仿生根系全部发生拉脱破坏, 破坏模式可归结为 3 种类型(图 7)。

(1)破坏模式 I: 界面脱黏滑移。由于界面的摩擦阻力较低, 根系沿界面脱黏、滑移, 直根系时($z=1.00$)拉拔破坏均为该模式, 土体破坏范围仅限于界面。

(2)破坏模式 II: 根土肋间剪断。弯曲根系形成的肋齿增强根土相互作用, 肋间土体拉拔作用下被剪断后发生破坏, 土体破坏范围小于或接近根系肋齿边界, 拔出后的根系肋间携带土体。直径 2.0 mm 的细根系, 在 4 种弯曲形态下均发生此类破坏; 直径 3.5 mm

的根系, 弯曲度小于 1.10 时也表现此类破坏。

(3)破坏模式 III: 土体拉裂破坏。随着根径和弯曲度继续增大, 伴随根系拔出, 弯曲根系周围土体被拉裂。在此模式下, 土体破坏范围明显大于弯曲根系轮廓范围, 且多见环状及放射状裂缝。直径 3.5 mm 的根系, 弯曲度超过 1.10 后以根土拉裂破坏为主, 直径 5.0 mm 弯曲根系均表现此类破坏。

整体来看, 同一直径下, 随弯曲度增加, 土体的破坏范围增大, 根土相互作用增强。

2.3 根系拉拔曲线特征

仿生根系拉脱曲线呈现明显的线性上升、非线性

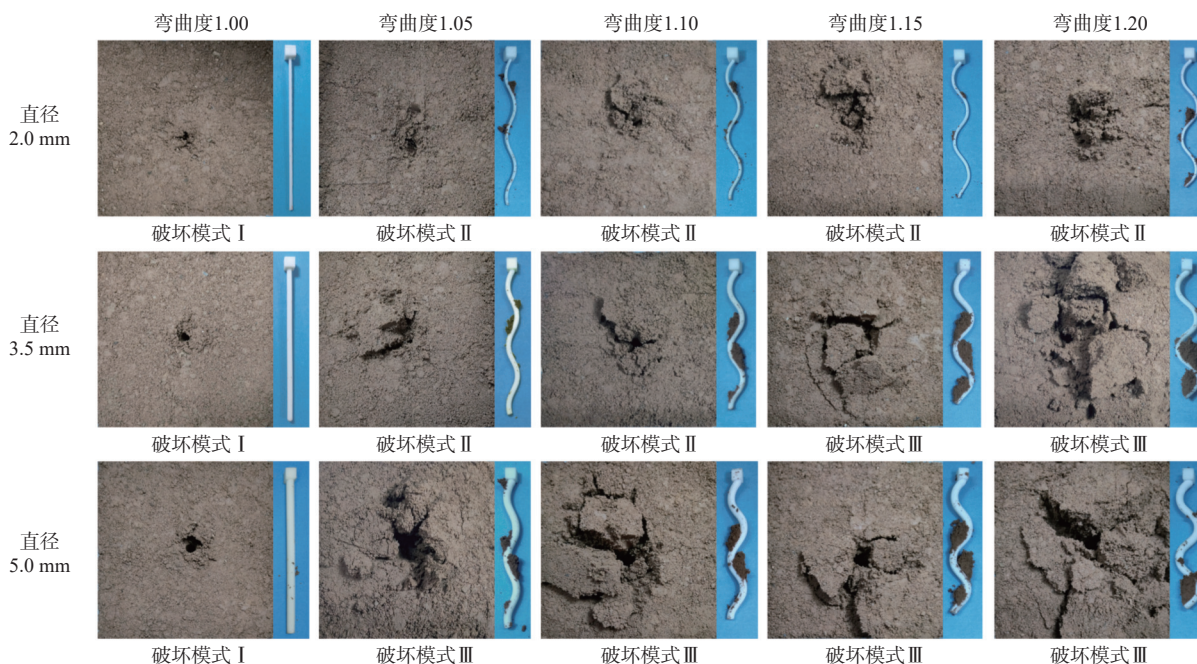


图 7 根系拉脱破坏模式

Fig. 7 Failure modes of root pullout

上升、快速下降以及平缓下降 4 个阶段(图 8), 与真实乔灌根系拉拔曲线相近^[24-25], 表明仿生根系较好模拟

了真实根系拉拔性能。

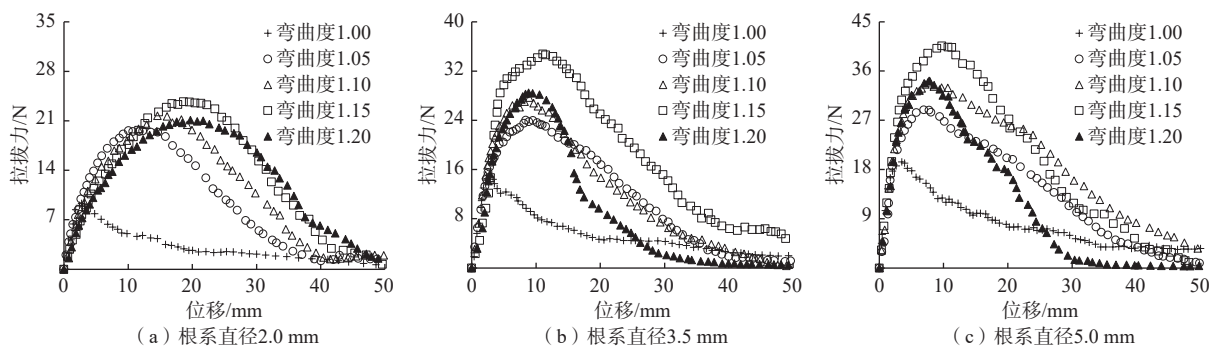


图 8 弯曲根系的拉拔力-位移曲线

Fig. 8 Force-displacement curves of tortuous root pullout

直根系与弯曲根系的拉拔曲线形式有明显差异。对于直根系而言, 拉拔力达到峰值前, 拉拔曲线总体表现为线性上升, 而非线性上升阶段较短; 拉拔位移在 3 mm 左右, 拉拔力达到峰值; 随后拉拔力随位移增加呈不断下降趋势, 拉拔力下降速率低于弯曲根系。弯曲根系拉拔曲线在线性上升后, 经历明显的非线性上升阶段; 拉拔力达到峰值前后, 曲线较为平缓, 峰值拉拔力和位移明显高于直根系。拉拔力达到峰值后, 拉拔破坏加剧发展, 根系拉拔力不断降低。在平缓下降阶段, 不同弯曲度根系拉拔曲线逐渐趋于重合, 弯曲度影响呈不断减弱趋势。相同弯曲度时, 根

系直径会影响峰值拉拔力和峰值拉拔位移。随直径增大, 峰值拉拔力增大而峰值位移减小, 拉拔力-位移曲线斜率变大。

拉拔作用下, 根土复合体在达到峰值拉拔力前, 经历了线性和非线性过程。根据试验结果, 采用如图 9(a) 所示的割线斜率计算得到变形刚度 k_1 、 k_2 , 依次得出不同弯曲度根系拉拔变形刚度, 见图 9(b)(c)。不难发现, 相同根径时, 拉拔线性阶段的变形刚度 k_1 随弯曲度增加而减小。相比直根系, 直径 2.0, 3.5, 5.0 mm 弯曲根系的 k_1 值分别减少 25.28% ~ 54.44%、3.55% ~ 22.70%、13.56% ~ 18.70%。可见, 根径越小, 弯曲度对

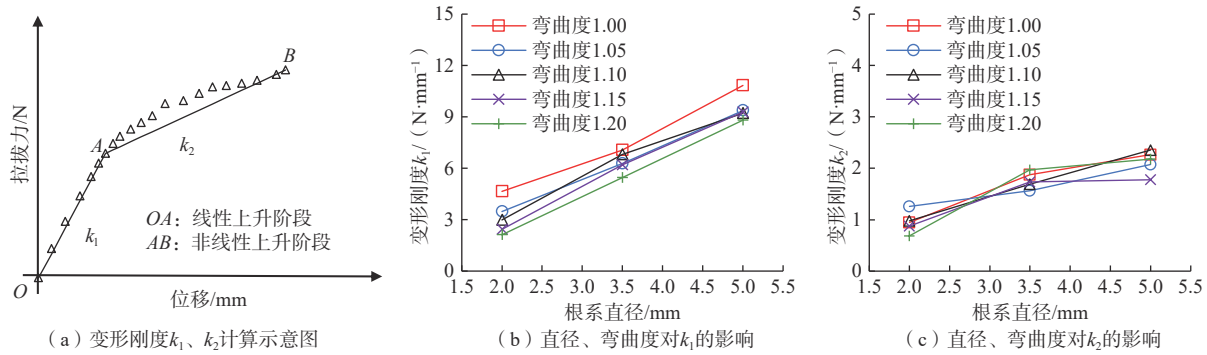


图 9 弯曲根系拉拔变形刚度

Fig. 9 Deformation stiffness of tortuous root pullout

k_1 影响越明显。相同弯曲度时, k_1 随根系直径增加而增大, 粗根系有利于拉拔力调动。非线性阶段的变形刚度 k_2 远小于 k_1 , 说明拉拔力达到比例极限后, 根土界面破坏会导致拉拔位移加速发展。 k_2 随根系直径、弯曲度的变化趋势与 k_1 一致, 但变化幅度较微弱。

2.4 峰值拉拔力和位移特征

根据拉拔试验结果, 3 种根径下, 直根系的峰值拉拔力在 9.32 ~ 19.44 N 之间, 弯曲根系的峰值拉拔力可

达 19.58 ~ 40.62 N, 弯曲根系峰值拉拔力均高于直根系 (图 10)。各根径下, 峰值拉拔力随弯曲度增大均呈先增后减的规律, 弯曲度 1.15 时最大。试验结果表明, 根系直径和总长相同时, 弯曲根系比直根系具有更高的峰值拉拔力, 固土能力更强; 弯曲度达到某一临界值, 如本文中的 1.15 时, 根系固土能力最强。在弯曲度和根系总长相同时, 根径越大, 峰值拉拔力越高。

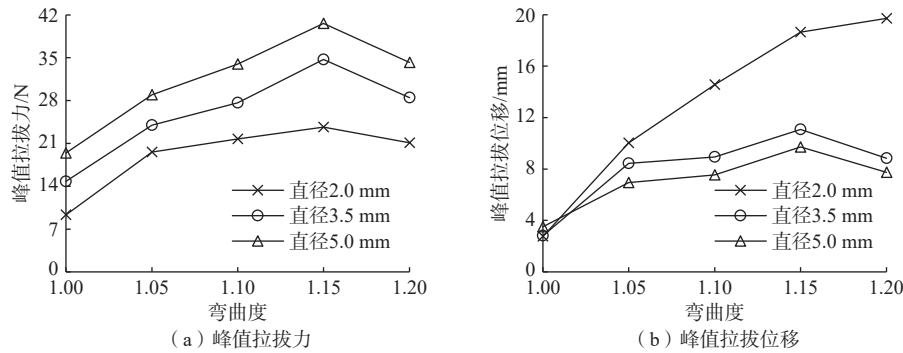


图 10 峰值拉拔力和位移

Fig. 10 Peak pullout force and displacement

峰值拉拔力对应的拉拔位移随弯曲度增加呈先增大后减小, 变化趋势与峰值拉拔力基本一致。本文中, 仿生直根系峰值拉拔位移在 2 ~ 4 mm 之间, 弯曲根系的峰值拉拔位移介于 6 ~ 20 mm 范围。研究表明, 真实根系的峰值拉拔位移集中在 5 ~ 20 mm 之间^[24-25], 仿生弯曲根系与之较接近。真实乔灌植物根系通常具有一定的弯曲度, 因此, 拉拔试验和理论分析时, 将根系简化为顺直并不合理, 应切实考虑根系弯曲的影响。

通过计算, 2.0, 3.5, 5.0 mm 直径下, 弯曲根系峰值拉拔力分别为相应直根系的 2.10 ~ 2.54 倍, 1.62 ~ 2.35 倍和 1.49 ~ 2.09 倍, 而峰值拉拔位移, 分别为直根系

的 3.64 ~ 7.14 倍, 3.00 ~ 3.94 倍和 1.98 ~ 2.77 倍。不难发现, 根径越大, 弯曲度对根系的拉拔峰值影响越弱。

3 讨论

3.1 弯曲根系拉伸力学机制

弯曲根系拉伸力学特性与直根系明显不同, 除受根系自身材料性质影响外, 弯曲根系受力拉伸变形受弯曲结构影响极大。

弯曲根系拉伸曲线整体呈“S”型, 拉伸初期曲线斜率较低, 此时材料性能未得到充分发挥, 根系主要发生结构变形。随着根系被逐渐拉直, 材料性能调动, 结构变形影响减弱, 拉伸曲线斜率明显增大, 与直根系

的曲线斜率逐渐接近,直至根系弯折处因应力集中发生脆性拉断。弯曲度越大,结构变形和应力集中的影响效应越强,拉伸变形刚度和最大拉伸力均随弯曲度增加而不断减小。弯曲度相同时,随着直径增加,结构变形被抑制,但应力集中效应则愈发明显,因此直径越大,拉伸变形刚度降幅减小,最大拉伸力降幅增大。

3D 打印弯曲根系的拉伸曲线形式以及关键力学指标随弯曲度的变化趋势与真实根系相符^[26],表明弯曲根系与真实根系有较好的拉伸力学相似性,代替真实根系开展试验研究合理可行。

3.2 弯曲根系拉拔力学机制

拉拔试验中未发现根系拉断。根系是否发生拉断,取决于根系拉拔应力与拉伸强度大小^[9]。仿生根系与乔灌木根系相近,其拉伸强度高于根系实际受到的拉拔应力,故无根系拉断发生。

拉拔作用下根土作用机制可概括为:随着根系拉伸,根系与土体界面黏结和摩擦逐渐调动和转化的过程^[27-28]。在传统根系固土理论,根系多被视为顺直结构,当根系与土体发生相对位移后,界面黏结随之启动,随着界面发生破坏,根系与土体发生滑动摩擦直至被拔出。本文研究中弯曲根系与顺直根系存在明显不同的结构、拉伸性能,根土作用机制和拉拔变形破坏特征与顺直根系存在显著差异。

对于弯曲根系,根系与土体不仅存在黏结、摩擦作用,而且弯曲起伏的根系齿肋与土体之间还存在强烈的啮合作用。根土啮合作用明显强于界面黏结和摩擦作用,当根土发生相对位移后,界面黏结会迅速破坏,而啮合作用仍能够持续发挥作用,显著增强根系抗拉拔能力。根土啮合作用强弱与根径大小、根系形态、根系变形、土体强度等因素有关。当根系直径、土体类型一定时,根系弯曲形态是影响啮合作用强弱的关键因素。随着弯曲度增加,根系齿肋间握裹土体增加,啮合作用增强,峰值拉拔力随弯曲度增加而呈上升趋势。本文中,根系弯曲总长不变,根系埋深会随弯曲度增加而减小,因此弯曲度超过 1.15 后,峰值拉拔力反而下降。

将直径 2.0 mm,弯曲度 1.20 的 3D 打印根系紧贴亚克力试样盒壁面进行拉拔,通过观测拉拔过程根土作用(图 11),弯曲根系与土体的相互作用机制可概括为:(1)随着根系变形,界面黏结和摩擦沿根系逐渐调动并达到最大,拉拔曲线呈近线性上升,此阶段根土相对位移较小,根土协同变形;(2)根土发生相对位移使得黏结力逐渐消失,根系齿肋挤压土体形成啮合效应,拉拔力得到继续增强,拉拔曲线呈非线性上升,界面局部破坏导致根土变形协同下降;(3)随着拉拔位移增加,界面位移增大,同时受挤压的土体逐渐挤

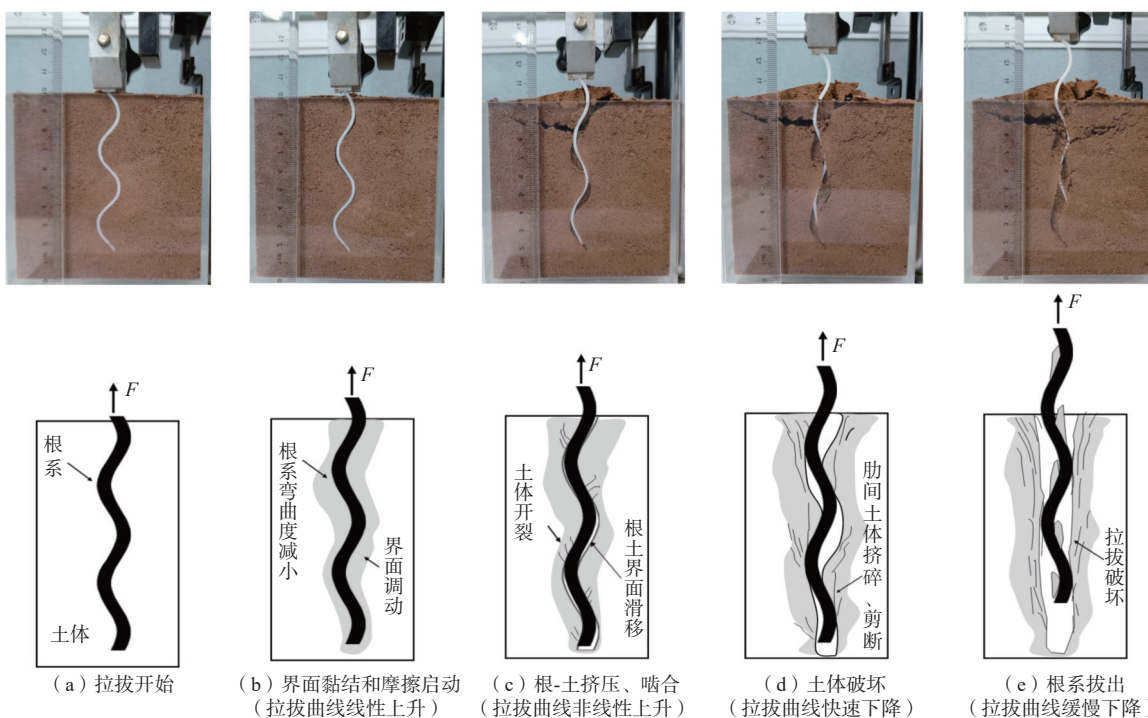


图 11 弯曲根系拉拔与土体作用机制

Fig. 11 Mechanical interactions of tortuous root pullout

碎并发生剪切破坏, 拉拔曲线达到峰值并快速下降; (4)受挤压土体破坏, 形成贯通的破坏面, 拉拔进入滑动摩擦, 根土发生分离, 拉拔位移以根土相对滑移为主, 随着根系逐渐拔出, 拉拔曲线缓慢下降。

在上述过程中, 随着根径增大, 根系与土体的接触面积增大, 界面的黏结、摩擦阻力显著提升, 使得根系的拉拔力和变形刚度增大, 与真实根系的作用规律一致^[27-29]。

4 结论

(1)弯曲根系拉伸变形特征明显不同于直根系, 弯曲形态使得根系易于发生拉伸形变, 弯曲根系的最大拉伸力和变形刚度均随弯曲度增加而减小, 但弯折处应力集中会导致根系脆性拉断。

(2)拉拔作用下, 直根系均沿界面脱黏滑移拔出, 弯曲根系明显具有根土肋间剪断、土体拉裂破坏特征。根径越大, 弯曲度越大, 拉拔破坏范围越大。

(3)弯曲根系通过挤压肋间土体形成啮合效应, 有助于提升峰值拉拔力和拉拔位移。其增强效应与弯曲形态相关, 还与根径大小、根系变形特征、土体强度有关。

参考文献 (References) :

- [1] 钟彩尹, 李鹏程, 马滔, 等. 根-土复合体的三轴试验及其强度分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 97 - 104. [ZHONG Caiyin, LI Pengcheng, MA Tao, et al. Triaxial test and strength analysis of root-soil composite[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 97 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [2] VERGANI C, GIADROSSICH F, BUCKLEY P, et al. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 167: 88 - 102.
- [3] 胡卸文, 侯羿腾, 王严, 等. 火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 106 - 112. [HU Xiewen, HOU Yiteng, WANG Yan, et al. Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 106 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [4] GIADROSSICH F, SCHWARZ M, COHEN D, et al. Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1): 391 - 406.
- [5] 胡夏嵩, 陈桂琛, 周国英, 等. 青藏铁路沱沱河段路基边坡植物护坡根系力学强度试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 107 - 113. [HU Xiasong, CHEN Guichen, ZHOU Guoying, et al. A study of the mechanic strength of vegetation roots for roadbed slope protection in the Tuotuohe River region along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 107 - 113. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王桂尧, 胡圣辉, 张永杰, 等. 小乔木根系根土间作用力的室外拉拔试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 64 - 69. [WANG Guiyao, HU Shenghui, ZHANG Yongjie, et al. An outdoor drawing test study of the root soil interaction force for a small tree root system[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 64 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根-土界面微观结构特征及摩擦特性试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1270 - 1280. [LIU Yabin, HU Xiasong, YU Dongmei, et al. Microstructural features and friction characteristics of the interface of shrub roots and soil in loess area of Xining Basin[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1270 - 1280. (in Chinese with English abstract)]
- [8] JI Xiaodong, CONG Xu, DAI Xianqing, et al. Studying the mechanical properties of the soil-root interface using the pullout test method[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(4): 882 - 893.
- [9] 肖海, 张千恒, 夏振尧, 等. 拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 91 - 97. [XIAO Hai, ZHANG Qianheng, XIA Zhenyao, et al. Mechanical properties of roots of *Vetiveria zizanioides* as protection slope plants under tensile and pullout conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(11): 91 - 97. (in Chinese with English abstract)]
- [10] DUPUY L, FOURCAUD T, STOKES A. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(3): 319 - 327.
- [11] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115(F4): F04035.
- [12] 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(F2): F02007.
- [13] MICKOVSKI S B, BENGOUGH A G, BRANSBY M F, et al. Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(6): 1471 – 1481.
- [14] 吴鹏, 谢朋成, 宋文龙, 等. 基于根系形态的植物根系力学与固土护坡作用机理 [J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(5): 139 – 142. [WU Peng, XIE Pengcheng, SONG Wenlong, et al. Morphology-based plant root mechanics and function mechanism for slope stabilization[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(5): 139 – 142. (in Chinese with English abstract)]
- [15] LIANG T, KNAPPETT J A, DUCKETT N. Modelling the seismic performance of rooted slopes from individual root-soil interaction to global slope behaviour[J]. *Géotechnique*, 2015, 65(12): 995 – 1009.
- [16] 姜尧, 及金楠, 刘迅, 等. 基于仿生材料的根系固土力学机制 [J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(2): 58 – 64. [JIANG Yao, JI Jinnan, LIU Xun, et al. Root reinforcement mechanism based on bionic materials[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(2): 58 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 潘露. 护坡灌木根系形态对根系力学特性影响研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021. [PAN Lu. Study on the influence of root morphology of slope protection shrub on root mechanical characteristics[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王智, 于宁, 黎静. 熔融沉积纤维增强复合材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2021, 35(15): 15197 – 15204. [WANG Zhi, YU Ning, LI Jing. Research progress in fused deposition modeling of fiber-reinforced composites[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(15): 15197 – 15204. (in Chinese with English abstract)]
- [19] FAN Chiacheng. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils[J]. *Plant and Soil*, 2012, 355: 103 – 119.
- [20] OPERSTEIN V, FRYDMAN S. The influence of vegetation on soil strength[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2000, 4(2): 81 – 89.
- [21] FAN Chiacheng, TSAI Minghung. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 1 – 15.
- [22] FAN Chiacheng, CHEN Yuwen. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(6): 813 – 826.
- [23] 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. [GUAN Shifeng, XIA Zhenyao, ZHANG Lun, et al. Pull-out test of indigofera amblyantha craib root under horizontal load[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(6): 24 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 韩朝, 冀晓东, 刘小光, 等. 北方 5 种常见乔木根-土摩擦锚固性能研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(9): 80 – 91. [HAN Chao, JI Xiaodong, LIU Xiaoguang, et al. Tribological properties between roots and soil of five common tree species in North China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(9): 80 – 91. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 那顺. 北沙柳等 4 种植物根-土界面拉拔摩擦阻特性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [NA Shun. The study on the friction drag characteristics of root-soil interface of four plants including *Salix psammophila*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [26] COMMANDEUR P R, PYLES M R. Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas-fir roots[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(1): 48 – 52.
- [27] 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. [ZHENG Liwen, LIU Xiaoguang, YU Xinxiao, et al. Effects of root diameter of *Pinus tabulaeformis* on friction characteristics for root-soil interface[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36(3): 90 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [28] SU Lijun, HU Bingli, XIE Qijun, et al. Experimental and theoretical study of mechanical properties of root-soil interface for slope protection[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11): 2784 – 2795.
- [29] 李国荣, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 寒旱环境黄土区灌木根系护坡力学效应研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(1): 94 – 97. [LI Guorong, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. A study of the mechanical effects of shrub roots for slope protection in frigid and arid-semiarid loess area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(1): 94 – 97. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真