

文章编号: 1673-9469(2019)04-0084-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.014

植被根系固土抗剪强度试验研究

奚灵智¹, 王龙威¹, 王颖², 白玉霞²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 通过对培养的黑麦草加固黏土原状土样进行直剪试验, 研究了根系含量和含水率对加固土体抗剪性能的影响, 并结合研究结果对其作用机理进行分析。试验结果表明: 随根系含量增加, 加固土体的抗剪强度和黏聚力逐渐增强, 内摩擦角变化较小。这是因为根系的存在加强了土颗粒之间的摩擦, 同时在剪切过程中根系发生弹性形变, 其内部产生的拉应力通过摩擦力转化为阻碍土体位移的力, 增强土体强度。随着含水率的增加, 加固土体的抗剪强度和黏聚力均减小, 内摩擦角变化不大。这是由于一方面水的存在使根系的拉拔阻力和土颗粒之间的摩擦阻力减小, 另一方面含水率的增加导致基质吸力减小, 使土颗粒之间的液桥强度降低, 从而降低了土体的抗剪强度。

关键词: 植被根系; 黏土; 抗剪强度特性; 根系含量; 含水率

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Experimental Study on the Shear Strength of Soil Consolidation by Root of Vegetation

XI Lingzhi¹, WANG Longwei¹, WANG Ying², BAI Yuxia²

(1. China Electrical Construction Group East China Survey and Design Research Institute Limited, Hangzhou, Zhejiang 310000, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: In this paper, a series of direct shear tests were carried out on cultivated ryegrass-reinforced undisturbed clay, the effects of root content and water content on shear strength properties of reinforced clay were studied comparatively, and the mechanism was analyzed according to the research results. The test results show that with the increase of root content, the shear strength and cohesion of reinforced soil gradually increase, and the change of internal friction angle is slight. This is induced by the presence of roots which strengthen the friction between soil particles. Moreover, the root elastic deformation occurs in the process of shearing, and the internal tension stress of root is transformed into the force that resists the displacement of soil by friction. It is therefore the strength of soil is enhanced. With the increase of water content, the shear strength and cohesion of the reinforced soil decrease, and the internal friction angle changes little. This can be attributed to that, on the one hand, the presence of water reduces the pull-out resistance of roots and the friction resistance between soil particles, and on the other hand, the increase of water content leads to a decrease of matrix suction, which reduces the strength of liquid bridge between soil particles, thus reducing the shear strength of soil.

Key words: root of vegetation; clay; shear strength properties; root content; water content

随着国民经济的发展, 近年来工程建设范围逐渐增加, 基础设施的建设和自然资源的开发利用导致了各种人工边坡的数量也在不断上升, 产生了大

量裸露的边坡, 加剧了土壤侵蚀和土地荒漠化, 导致山体滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害的发生率, 同时也会导致局部小气候恶化和生物链破坏^[1]。如

收稿日期: 2019-09-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41472241)

作者简介: 奚灵智(1982-), 男, 浙江台州人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事交通与市政工程设计咨询及EPC总承包管理。

果边坡处理不当, 边坡变形甚至会毁坏已有的工程设施。如何在工程建设中保护环境, 实现人与自然的和谐相处早已成为人类社会所面临的重大问题, 同时边坡生态防护已成为亟待解决的岩土工程问题之一。传统边坡护理方法^[2-4]存在共性不足, 即随着边坡岩石逐渐风化, 混凝土逐渐老化, 支护结构的结构强度会降低, 同时对坡面的不稳定性及侵蚀度的控制能力也会降低, 防护效果会大大减弱^[5]。同时, 这种方法制造的“灰色边坡”, 不仅影响美观, 而且毁坏了当地的自然环境。自20世纪以来, 林学家在对林木根系研究的过程中发现, 含根土壤的抗剪强度远高于无根土壤, 甚至变形后的残余强度也比素土强度高, 这一发现证实了植物根系的固土功能, 为生态护坡提供了理论支持^[6-7]。随着人类环保意识的提高, 生态护坡目前已成为各界研究的热点课题。Abernethy等^[8]证明植物根系在土体表层50 cm内数量最多, 且根系密度会随垂直深度和与主干水平距离的增加而降低, 根系对土体的加固作用也随根系密度的降低而减弱; Wu^[9]研究了在较厚的土层中、植物根系不切穿剪切面的情况下, 植物根系对土体抗剪强度的影响; Ennos^[10]证明在临界长度范围内, 根系的锚固力随根系长度的增加成比例增加, 超过临界长度后, 根系长度的增加将不会使锚固力进一步提高。与传统工程护坡技术相比较而言, 植被护坡技术具有保护和美化环境、净化空气、吸收噪音、降低工程成本等诸多好处^[11]。因此, 加强植被护坡技术的理论研究, 对于促进边坡稳定和生态环境的建设, 以及推动基础研究和跨学科发展具有重要的价值和意义^[12]。本文通过在黏土中种植生长周期短、根系发青的黑麦草, 并将培养好的植物根系加入到黏土中进行直剪试验, 通过人为控制土体中的根系含量和含水率, 研究根系含量和含水率对加固土体抗剪性能的影响, 得到剪切应力-位移曲线、抗剪强度和强度参数, 并对无根素土和含根土体的强度性能进行对比分析, 其研究结果和相关讨论能够为植被生态护坡中的植被密度和洒水频率的选择提供一定的参考依据。

1 验材料与试验方案

1.1 黏土

试验用黏土取自江苏省南京市江宁区某工地, 为典型的长江中下游地区第四纪晚更新世沉积的下

蜀土, 黄褐色。土样天然风干后, 碾碎备用。通过一系列室内试验测得黏土的基本物理参数(表1)。

表1 试验用黏土的物理参数
Tab.1 Physical parameters of clay for test

比重	含水率 $\omega/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 I_p
2.71	18.68	36.7	22	14.7

1.2 植被

黑麦草生长速度快, 根系形态为密集纤细的须根系, 加筋效果好, 在不同根径和不同土层中均能表现出良好的抗拉拔能力, 因此选择黑麦草作为本文的研究对象。

1.3 试验方法与方案

将准备好的土样均匀地铺置在A、B两个规格均为71 cm×45 cm×18 cm的培养容器中, 土的厚度为10 cm, 向土壤表面均匀地播撒适量的黑麦草草籽, 并将土体表面进行整平。然后在每个培养容器中均匀地喷洒500 mL水使土壤表面湿润, 有利于草籽发芽。在之后的养护中, 给予草籽适当的水分、光照, 并定期施加营养液, 待黑麦草生长成熟后, 即可取样进行直剪试验以研究其抗剪强度特性。

本文研究了根系含量和土体含水率对植被根系加固黏土抗剪强度特性的影响。在A培养容器中设置变根系含量, 通过控制播撒草籽的重量差异实现。将A容器中的土壤平均分成三块A₁、A₂、A₃, 每块以隔板分开, 分别播撒草籽的重量为10、14和18 g, 经后续试验测算, 三块不同土壤每平方厘米的平均植株数量分别为5、9和16株。在试验前两天, 分别向三部分土体喷洒400 mL水, 使其充分浸润。在B容器中设置变土体含水率, 分别向容器中三块土壤均匀播撒14 g草籽, 在试验前两天, 向三部分土体B₁、B₂、B₃中加入0、400、800 mL水并使其充分浸润, 以此实现土体含水率的差异。

本文在对各试样培养20 d后, 在土体表面取规格为6.18 cm×2 cm(直径×高度)圆饼试样进行直剪试验, 设置法向应力分别为 $\sigma_1=50$ kPa、 $\sigma_2=100$ kPa、 $\sigma_3=150$ kPa、 $\sigma_4=200$ kPa, 剪切速率为2.5 mm/min。同时测量不同条件下土体的含水率和密度。

2 试验结果与分析

本文通过对不同根系含量、不同含水率的原状

土样进行直剪试验，绘制了剪切应力 - 位移曲线。并依据库伦定律得到不同条件下的抗剪强度参数，分析了根系含量、土体含水率对植物根系加固土体抗剪强度特性的影响。各组试样的密度、含水率以及抗剪强度特性总结如表 2 所示。

2.1 剪切应力 - 位移曲线特性

不同根系含量土样的剪切应力 - 位移曲线如图 1 所示。由图可知，在含有植物根系的土样中，剪应力随剪切位移的增加而增大，两者呈正相关。随着试样中根系含量的增加，在相同法向应力条件下，抗剪强度有所增强。如当法向应力 $\sigma=200$ kPa 时，随根系含量的增加，抗剪强度由 80.70 kPa 增加到

89.62 kPa。这是由于根系的存在为土体提供了一定的剪切阻力。根系含量的增加导致试样单位体积根系密度的增加，根系在剪切面上的分布更为密集。当土体受到剪切破坏后，土体中的植物根系发挥作用，根系具有线弹性，在剪切的过程中受剪会发生拉伸，这种拉伸在一定范围内属弹性变形，根系内部产生的拉应力通过土体与根系间的界面摩擦转换为土体的剪切阻力。因此，含根土样的抗剪强度是由土颗粒间的摩擦力、毛细力及根系强度共同提供。由于根系所提供的抗剪强度，含根土样的剪切应力 - 位移曲线与素土相比表现出更为明显的应变硬化现象，如图 1 所示。

此外，当剪切位移较小 (<1 mm)，根系的存在

表 2 各组试样的基本参数和直剪试验结果

Tab.2 Basic parameters and direct shear test results of each group of specimens

编号	平均密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	平均含水率 $\omega/\%$	抗剪强度 τ/kPa				抗剪强度参数	
			50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
素土	1.75	17.96	38.47	45.04	66.01	77.56	22.21	15.00
A ₁	1.76	15.54	41.79	49.30	63.10	80.70	26.09	14.63
A ₂	1.68	15.20	49.15	63.22	70.51	85.73	37.90	13.17
A ₃	1.72	16.36	57.10	65.83	78.65	89.62	45.21	12.45
B ₁	1.76	10.44	49.34	60.72	71.02	85.24	37.08	13.27
B ₂	1.88	15.68	42.33	54.97	70.63	78.48	30.58	13.93
B ₃	1.86	18.34	38.48	52.80	66.54	77.00	26.38	14.49

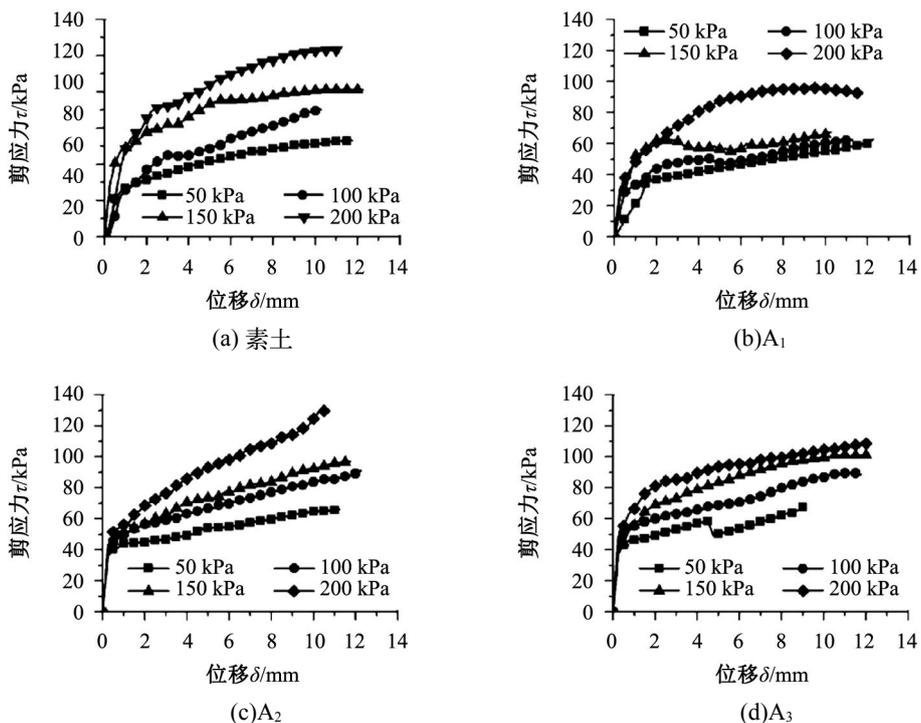


图 1 不同根系含量土样剪切应力 - 位移曲线

Fig.1 Shear stress-displacement curves of samples with different root content

并没有明显改变土样的剪切应力 - 位移曲线形态，说明此时根系尚未发挥其加筋作用。受限于根系较小的弹性刚度，根系随土体发生同步的变形，而较小的相对位移难以调动根系与土体间的摩擦阻力。植物根系对加强土体抗剪强度起到积极的作用，含根土的屈服强度和极限强度随着根系含量的增加而提高。因此，根系密度越大、根系含量越高，加固效果越好。

不同含水率土样的剪切应力 - 位移曲线图如图2所示。从图中可以看出，土体的抗剪强度随含水率的增加而减小。将含水率不同的三组土样进行对比分析，发现含水率较低的图2(a)土样，在相同的剪切位移情况下能提供更大的剪应力，而含水率较高的图2(b)和(c)土样在剪切位移相同时的剪应力相近。显然，含水率的增加会导致根系和土体之间的界面剪切强度降低。根系在土体中的拔出阻力取决于当沿界面发生剪切时土颗粒重新排列和旋转的难易程度。而水的界面润滑作用减弱了土颗粒对根系的黏结力和互锁力，导致根系的拔出阻力降低，

无法最大限度地发挥其拉筋效果。

在图2(a)、(b)中，土样的剪切应力 - 位移曲线的残余强度有重合的趋势，这种现象形成的原因，一方面在于对原状土进行试验分析时不可避免会对其进行不同程度的扰动，这种扰动会在不同程度上对土体的物理性质和强度特性产生影响；另一方面，由于植物生长的不确定性和随机性，即使除了含水率外其他试验条件均相同，根系结构及不同根系结构对土体结构产生的影响也会对试验结果产生影响。

2.2 抗剪强度特性

为更好地进行比较，分别绘出不同根系含量和不同含水率六组试样的抗剪强度与法向应力的关系曲线，如图3所示。 R^2 表示 τ - σ 散点图的线性趋势线的可靠性，该值越接近1，可靠性越大。由图可以看出，当根系含量或含水率一定时，抗剪强度与剪切面上的法向应力呈正比，抗剪强度随法向应力的增加基本上呈线性增长。无论变量是根系含量还是含水率，土样的抗剪强度线都几乎彼此平行，截

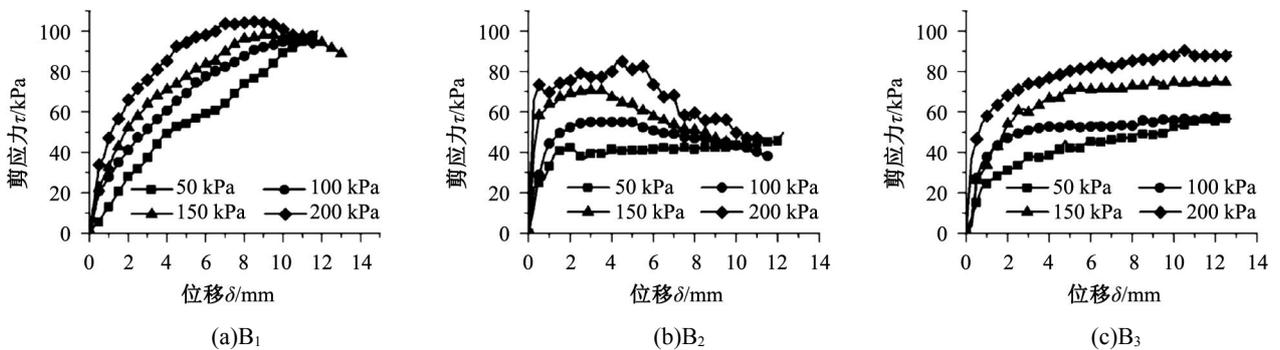


图2 不同含水率土样剪切应力 - 位移曲线

Fig.2 Shear stress-displacement curves of samples with different water content

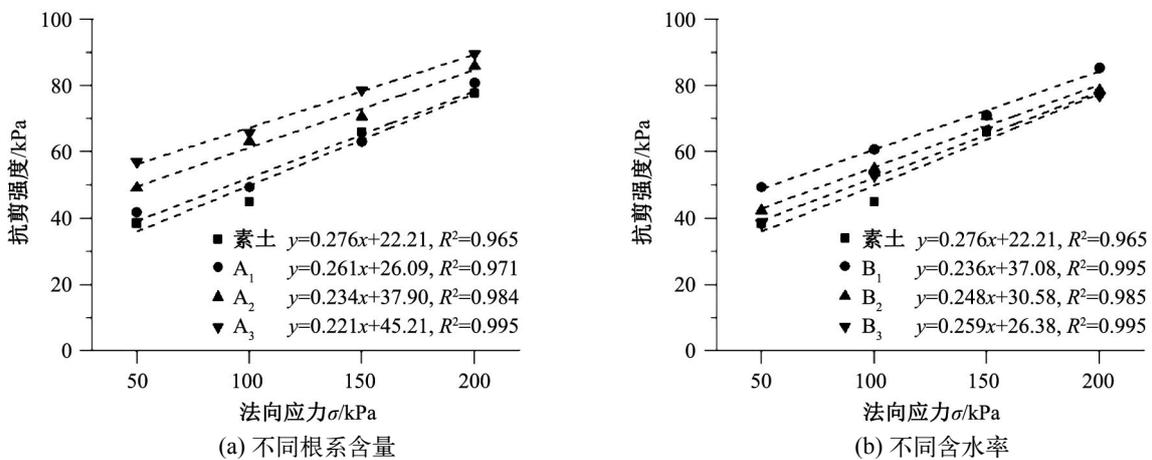


图3 不同组试样抗剪强度与法向应力的关系

Fig.3 The relationship between shear strength and normal stress of different groups of specimens

距存在差异,表明这六组土体的内摩擦角相近,而黏聚力存在差值。这也表明土体中的根系是通过增大土颗粒间黏聚力的方式,实现对土体抗剪强度的提高,根系含量越高,根系密度越大,黏聚力值越高,从而土体抗剪强度越大;土体中含水率的变化会对土颗粒之间的黏聚力的大小产生影响,从而影响土体抗剪强度,含水率越高的黏土,其抗剪强度越低。而根系密度的变化及含水率的增减都不会对土体的内摩擦角产生明显的影响。

值得注意的是,即使是含水率高于素土的含根土样,其抗剪强度也高于无根土体,证明植被根系对土体抗剪强度的影响程度大于含水率对土体抗剪强度的影响。在高含水率情况下,根系对土体抗剪强度的贡献将更为突出。因此,在边坡遭遇强降水时,植物根系能够作为一种有效防止浅层滑坡破坏的生物工程方法。

2.3 抗剪强度参数

不同根系含量的土体的黏聚力和内摩擦角如图4所示。由图可知,黏聚力随根系含量的增加而呈不断增大的趋势,从22.21 kPa逐渐增加到45.21 kPa,增长了近51%。这表明植物根系的存在能够为土体提供一个附加黏聚力。黏聚力随根系变化的原因在于根系的存在改变了土颗粒间的接触条件。在有大量倾斜和垂直根系的环境中,很可能有大量的土体被包裹在根系中难以移动。高根系含量导致土体与根系间有更多的接触面产生,进而产生更强的根-土界面间的相互作用力。当根系含量较少时这一增幅并不明显,这应与剪切面上的根面积较小有关,因而主要受剪的仍为试验土体。同时,

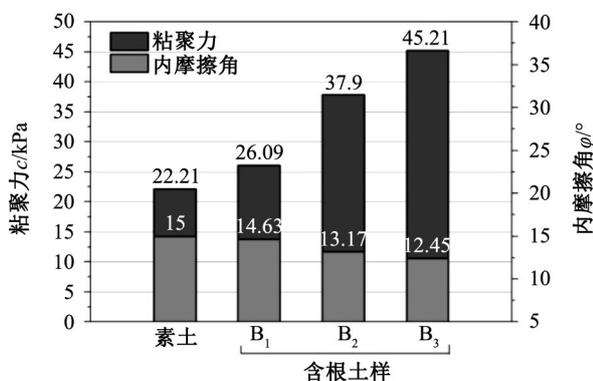


图4 不同根系含量下土样的黏聚力和内摩擦角
Fig.4 Cohesion and internal friction angle of samples with different root content

考虑到含根试样的含水率较素土低,试验所测得黏聚力应较实际值略高。

根系含量对内摩擦角的影响不明显,其变化在2°~3°之间。土体的内摩擦角主要受其矿物成分、粒径分布、颗粒形状和排列、以及颗粒柔软程度等的影响,而根系的存在并不改变上述土体固有特性。内摩擦角随根系含量的增加而呈轻微的减小趋势,可考虑为根系的生长抑制了浅层土体的封闭和板结。

不同含水率土体的黏聚力和内摩擦角如图5所示。由图可知,对于含根土,黏聚力随含水率的增加而减小,从37.08 kPa减小到26.38 kPa。但与素土的黏聚力相比(22.21 kPa),根系提供的附加黏聚力抵消了含水率增加所带来的不利影响。含根土的黏聚力总体上与天然土的黏聚力和根系附加黏聚力两个方面有关。前者主要受土壤颗粒接触点的结合性质和接触数量的控制;后者主要受界面剪切强度的制约。两者都取决于土壤含水率。含水率增加所引起的基质吸力的减小是一重要因素。在低含水率时,基质吸力相对较高,且在土颗粒间形成的液桥较强。这导致土颗粒间的黏聚力相对较高,有利于土体的抗剪强度。而随着含水率的增加,液桥断裂消失,其产生的结合力消散。而含水率对内摩擦角的影响同样不明显,在1°~2°之间。

3 结论

1) 根系含量与土体的抗剪强度特性呈正相关,根系含量越大,对土体的加固效果越好。随着根系含量的增加,加固土体的抗剪强度和黏聚力逐渐增强,内摩擦角变化较小。这是因为根系的存在加强

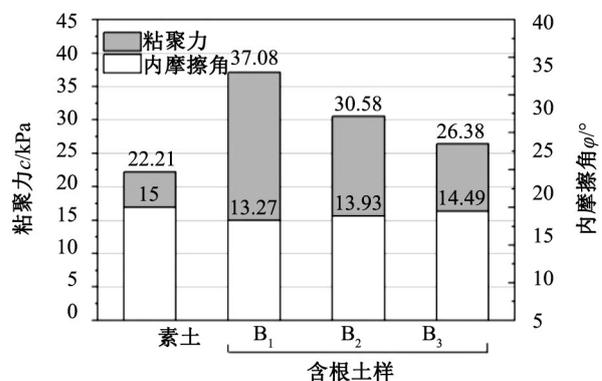


图5 不同含水率下土样的黏聚力和内摩擦角
Fig.5 Cohesion and internal friction angle of samples with different water content

了土颗粒之间的摩擦, 阻碍土颗粒发生相对位移, 同时, 在剪切过程中根系发生弹性形变, 其内部产生的拉应力通过摩擦力转化为阻碍土体位移的力, 增强土体强度。

2) 土体的含水率会影响土体的抗剪强度特性, 含水率越高, 土体的抗剪强度特性越低。随着含水率的增加, 加固土体的抗剪强度和黏聚力均减小, 内摩擦角变化不大。这是由于一方面水的存在增强了土颗粒之间及土颗粒与植物根系之间的润滑, 减弱了摩擦作用, 使根系的拉拔阻力和土颗粒之间的摩擦阻力减小, 另一方面含水率的增加导致基质吸力减小, 使土颗粒之间的液桥强度降低, 从而降低了土体的抗剪强度。

3) 当根系含量或含水率一定时, 随法向应力的增大土体的抗剪强度呈线性增强, 库伦强度线彼此平行, 截距差别较大, 表明根系加强土体的抗剪强度主要是通过增强土体的黏聚力实现的, 对土体的内摩擦角几乎不产生影响。

参考文献:

- [1] 张兴玲. 植物根系固土护坡力学机理研究现状与进展 [J]. 人民黄河, 2009, 31(6): 88-92.
- [2] 冯俊林. 我国公路滑坡与高边坡病害防治现状 [J]. 山西交通科技, 2009(4): 20-22.
- [3] 王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1): 1-9.
- [4] 齐甦, 彭少民. 国内外滑坡防治与研究现状综述 [J]. 地质勘探安全, 2000(3): 16-19.
- [5] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术 [M]. 北京: 北京人民交通出版社, 2003.
- [6] 宋维峰, 王希群. 林木根系研究综述 [J]. 西南林学院学报, 2007, 27(5): 8-13.
- [7] 胥晓刚. 高速公路路域生态恢复研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2004.
- [8] ABERNETHY B, RUTHERFURD I D. The Distribution and Strength of Riparian Tree Roots in Relation to Riverbank Reinforcement [J]. Hydrological Processes, 2001, 15: 63-79.
- [9] WU T H, WATSON A. In Situ Shear Tests of Soil Blocks with Roots [J]. Canadian Geotechnical, 1998, 35(4): 579-590.
- [10] ENNOS R. The Anchorage of Leek Seedlings: The Effect of Root Length and Soil Strength [J]. Annals of Botany, 1990, 65: 409-416.
- [11] 段晓明. 植被护坡研究与应用现状 [J]. 农业工程科学, 2007, 23(3): 474-477.
- [12] 陈终达. 香根草根土复合体强度特性试验研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.

(责任编辑 王利君)