

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.093



土体含水率与根系埋深对银杏树苗 抗拉拔性能的影响

傅胤榕^a, 仇文岗^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:中国是受热带台风灾害影响最为严重的国家之一,由于强风暴雨作用引起的林木根系拔出及倾倒破坏致使交通中断、车辆受损、人员伤亡等次生灾害与日俱增。为进一步研究土体物理特性对林木抗拉拔性能的影响,采用自主设计的根系横向加载试验系统,通过对银杏树苗施加定速率横向加载的拉拔试验,模拟外力荷载下根系的倾倒过程。试验设置了 5 组梯度含水率和 4 种埋深工况分析土体含水率、根系埋深对拔出过程中抗拉拔力的影响。研究表明:在粉质砂土中,黏聚力根系位移-抗拉拔力曲线中抗拉拔力的变化可以概括为平缓上升、陡峭上升和缓慢上升达到峰值 3 个阶段;最大抗拉拔力随含水率提升呈现先升后降的总体趋势,与土体黏聚力变化的总体趋势相同,当含水率趋近饱和含水率时,最大抗拉拔力衰减显著;当含水率一定时,根系的抗拉拔力随着根系埋深的增加,在试验设置的埋深区间内呈线性趋势增长。

关键词:含水率;根系;抗拉拔力;埋深;模型试验

中图分类号: TU431 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)05-0042-07

Effects of soil moisture content and root depth on anti-overturning performance of *Ginkgo biloba* seedlings

Fu Yinrong^a, Zhang Wengang^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities on Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: China is one of the countries most seriously affected by the tropical typhoon disasters. Root pull-out and toppling damage caused by severe storms and rains occur frequently. Secondary disasters such as traffic disruption, vehicle damage and casualties are increasing. In order to investigate the effect of soil physical properties on the anti-overturning performance of trees, the pulling test of *Ginkgo biloba* seedlings under constant lateral loading rate was carried out through a self-designed lateral root loading test system to simulate the dumping process of roots under external load. Five sets of gradient water content and four buried depths were set to analyze the influence of soil moisture content and the root depth on the pull-out

收稿日期: 2019-02-19

基金项目: 重庆市留学回国人员创业创新支持计划(cx2017123); 重庆市博士后研究人员科研项目(Xm2017007)

作者简介: 傅胤榕(1993-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: fuyinrong@cqu.edu.cn.

仇文岗(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cheungwg@126.com.

Received: 2019-02-19

Foundation item: Venture & Innovation Support Program for Chongqing Overseas Returnees (No. cx2017123); Special Funding for Postdoctoral Research Projects in Chongqing (No. Xm2017007)

Author brief: Fu Yinrong (1993-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: fuyinrong@cqu.edu.cn. Zhang Wengang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cheungwg@126.com.

resistance during the pull-out process. The research indicates that in silty sand, the change of the anti-overturning force in the root displacement-drawing force curve can be summarized as three stages: gentle rise, steep rise and slowly rising to reach the peak. The anti-overturning force with the increase of moisture content showed the first rise. The overall trend of the post-fall is the same as the overall trend of the change of soil cohesion. When the moisture content approximates the saturated moisture content, the maximum anti-overturning force is significantly reduced. When the moisture content is constant, the maximum anti-overturning force of the root system increases linearly with the depth of the root system in the buried depth range set by the test.

Keywords: moisture content; root system; anti-overturning force; burial depth; model tests

随着城市化进程的不断推进和绿色生态文明的发展,城市绿化覆盖率不断提升,绿化树在城市建设中起到净化城区空气、降低环境噪音、美化城市道路等多种作用。近年来,东南沿海省份陆续遭受“莫兰蒂”、“莲花”等台风入境,遭受强风和暴雨,部分城市行道树倒伏率接近30%,个别林木树种倒伏率达到59%,总受损率达96%以上^[1]。由于林木倾倒导致城市交通道路阻断、车辆及公共基础设施受损,甚至造成严重的人员伤亡,因此,强风、暴雨引起的林木倾倒破坏现象不容忽视。

学者们对林木倒伏和根土相互作用方面进行了大量研究,取得了一系列成果。在根系研究方面,向师庆等^[2]根据对北京地区主要林木根系的挖掘研究,将林木根系归纳为垂直根型、斜生根型、水平根型等主要根型;Yang等^[3]建立了根系锚固强度模型,模拟了根系连续锚固破坏过程,提出根组分对树木锚地的等级影响如下:主根>迎风浅根>垂直浅根>迎风垂根>其他影响较小的组分,揭示了根系个体破坏与树木总体倾倒破坏之间的根本联系;王可钧等^[4]重点分析了林木根系的抗拉性能和生长方向与土质坡体稳定性的关系,针对根系固坡的力学特性进行了简析。不少学者对现场试验获得的相关数据进行分析,Coutts^[5]使用绞车试验对云杉进行了现场拉拔试验,测量包括抗拉拔力、倾斜角、土壤和根系位移等方面,表明根的数量和尺寸分布的重要性;刘秀萍^[6]采用野外试验与室内试验相结合的方式,构建了刺槐、油松树种根系形态分布模型,通过对根系与黄土接触面单元摩阻特性的试验研究,揭示了影响根土接触面摩阻特性的因素。在单根参数方面,郑力文等^[7]通过对油松单根施加拔出荷载进行拉拔实验,分析土壤含水率、干密度、加载速率等因素对拔出过程中根-土界面摩擦性能的影响;夏

振尧等^[8]、管世烽等^[9]通过干密度改变和多梯度含水率室内试验,测定了麦冬和多花木蓝根系根土界面的抗拉拔力特性,为根土界面摩擦特性的进一步研究提供依据;吕春娟等^[10]选取了5种常见乔木根系进行室内单根拉伸试验,发现了乔木根系极限抗拉力和直径之间存在的关系,揭示了植被根系的固土力学机制;刘小光等^[11]通过直接拉拔试验研究了加载速率、根系埋深和不同树种对根系与土体摩擦特性的影响,揭示了根系拉拔破坏过程中位移-抗拉拔力关系曲线的阶段性变化。此外,通过有限元软件对根系形态的模拟,Rahardjo等^[12]探究了土体抗剪强度参数和根系几何形状与林木倾倒最大风力的关系,研究了粗粒土改良对树木稳定性的影响;Fourcaud等^[13]采用了有限元法对饱和软黏土和土壤中的根系拔出进行二维模拟,模拟了树根破坏时板滑移面形状和旋转轴位置,估算了覆土过程中土体和根系的应力分布,确定了不同生根方式下不同根系在树根锚固中发挥的作用。学者们针对根系形态理论和小部分根段的抗拉、摩擦特性两个方面开展了大量研究,然而,林木倾倒与根系整体的关联性大,局部根段研究无法较好地反映其根系对林木抗拉拔性能的作用,目前,针对全根段抗拉拔性能的研究较少,需进一步探索研究。

为更好地分析林木受横向拉拔作用下的倾倒破坏过程,研究不同因素的改变对根系抗拉拔性能的影响作用,从而为强风暴雨作用下林木倾倒防治提供一定的理论依据。本文着眼于强风、暴雨作用后土壤在降雨作用下含水率升高、林木受横向风力作用的情况,通过室内模拟绞车试验,分析了在外力荷载下林木根系倾倒的破坏过程,通过改变含水率以及根系埋深,探究不同含水率及根系埋深对林木倾倒破坏的影响。

1 模型试验

1.1 试验装置

开展横向拉拔荷载室内试验的装置是自主设计的根系横向加载试验系统,该装置由拉拔力试验机、滑轮传动轴、模型箱和含水率监测装置4部分组成。拉拔力试验机的主要技术规格为:1)横梁移动速度 $v=1\sim 10\text{ mm/s}$;2)荷重精度 $\leq 0.5\%$,荷载上限 100 kN ;3)最大行程 $1\ 000\text{ mm}$ 。滑轮传动轴为介于拉拔力试验机与模型箱之间的T字型钢架,钢架上带有可固定滑轮,拉拔力试验机通过向上移动吊臂带动钢索,经滑轮传动轴改变力的方向后对树木施加横向拉拔力。吊臂上搭载压力传感器,并通过TM2101pro测控系统软件记录拉拔距离。模型箱尺寸长 \times 宽 \times 高为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,侧面轴线上,距离底面 $100、200、300\text{ mm}$ 处分别打平行双排孔,用于两针型含水率传感器探头插入测量,含水率数据记录处理采用配套的CYY-3055型8通道数据采集仪。模型箱-钢制底板-试验机铆钉固定形成整体刚度。装置整体形态如图1所示。

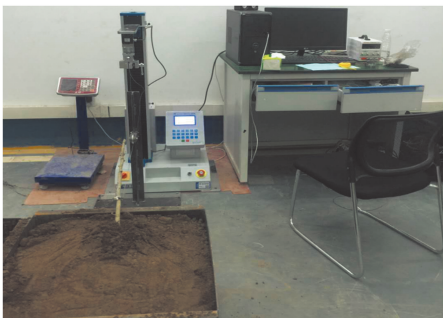
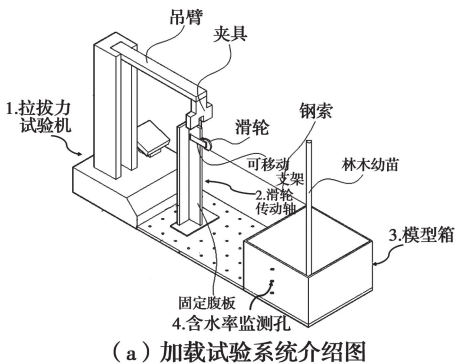


图1 拉拔荷载试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulling test machine

1.2 试样材料与方案

试样材料:模型试验树木根系选用银杏树苗,为深根性树种,主根明显并起主导作用,侧根较少且处

从属地位。选取几何形态相近的树苗,去除其细小分支,保留垂直主根备用。选取土壤为重庆地区粉质砂土,原状土通过现场取土实验计算得出原土样含水率为 13.3% ,干密度为 1.65 g/cm^3 ,在模型试验中重塑土样制备也以此为基准。筛前工样如图2所示。受模型箱大小限制,选取的银杏根系根茎在 $28\sim 32\text{ mm}$ 之间,根条形态如图3所示。



图2 四分法取筛前土样

Fig. 2 Take soil in quarters



图3 银杏根系图

Fig. 3 Ginkgo biloba roots

拉拔试验方案:根据模型试验需求,称取适量土壤,依据对应试验组的含水率需求进行土样配制。用环刀取部分配制好的重塑土样,开展直接剪切试验。随后,将测定后符合试验要求的土壤采用称重分层装填、分层击实的形式,使用夯锤将试验土体每 10 cm 装填击实1次,共计4层。装填至一定高度土层时,于模型箱中央埋入树苗,后继续装填。装填完成后,将含水率传感器探头插入模型箱侧面钻孔中,进行含水率校对及变化监测,采用伸缩钢圈将钢索与树根主干连接固定。装填完成后,试样静置 2 h 以确保传感器读数精确,待各监测点含水率读数与试验所需含水率数值相差 $<0.5\%$ 时,认定该土样含水率符合试验条件,随后启动试验机施加外力荷载,以恒定速率 8 mm/s 进行拉拔试验,直至采集系统记录到外力荷载达到峰值后停止拉拔试验,输出根系拉拔破坏全过程位移-抗拉拔力($S-F$)曲线。通过控制变量法改变含水率或根系埋深,进行多组拉拔

破坏试验。模型试验工况中根系埋深选取为 15、20、25、30 cm,含水率控制区间为 7%~22%。为减小试验离散型偏差对试验结果影响,每组工况重复进行多次试验。试验结束后土体破坏面具体形态如图 4 所示。



图 4 根系横向拉拔土体破坏面形态

Fig. 4 Failure surface morphology of soil mass

2 结果与分析

2.1 含水率对土体抗剪强度的影响

土样的直剪实验根据《土工试验规程》^[14]开展,分别取含水率 ω 为 7.0%、10.0%、13.0%、16.0%、19.0%和 22.0%,共计 6 组土样,每组土样 4 个,根据环刀容积及所需的干密度,制备土样所需的湿土

量按式(1)计算。

$$m_0 = (1 + 0.01\omega_0)\rho_d V \quad (1)$$

式中: m_0 为湿土质量; ω_0 为湿土含水率; ρ_d 为试样的干密度; V 为试样体积(环刀容积)。

对同一含水率下的 4 组土样分别施加 100、200、300、400 kPa 法向应力进行快剪试验,剪切速率控制在 0.8 mm/min。根据量力环系数的转换关系,得到不同垂直压力作用下的抗剪强度,以垂直压力为横坐标,剪切强度为纵坐标,绘制剪切强度与垂直压力的关系曲线,将图上各点采取线性拟合,直线的倾角即为土的内摩擦角 φ ,截距为土的黏聚力 c ,从而得到不同含水率下土样的 c 、 φ 值,土样的抗剪强度按式(2)计算。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: τ_f 为土体的抗剪强度; c 为土体的黏聚力; σ 为法向应力; φ 为土体的内摩擦角。

根据试验得到不同含水率下土体受各级垂直压力作用下的法向应力及推算出的土体强度指标,见表 1。其中, x 为法向应力, y 为剪应力。

表 1 不同含水率下土体剪切强度指标

Table 1 Shear strength at different moisture content

组别	含水率/%	法向应力 σ /kPa				强度指标			
		100	200	300	400	拟合方程	R^2	c /kPa	φ (°)
1	7.0	62.6	135.7	192.2	238.7	$y=0.584x+11.10$	0.989 6	11.10	30.31
2	10.0	84.1	134.9	201.4	267.8	$y=0.617x+17.61$	0.996 2	17.61	31.70
3	13.0	95.8	174.8	225.6	300.6	$y=0.647x+38.41$	0.994 8	38.41	32.93
4	16.0	84.0	141.2	204.9	281.9	$y=0.615x+28.18$	0.995 4	28.18	31.57
5	19.0	70.4	128.1	195.6	245.4	$y=0.593x+11.73$	0.997 0	11.73	30.65
6	22.0	56.4	112.6	170.6	220.1	$y=0.549x+2.74$	0.998 9	2.74	28.76

由图 5~图 6 可知,黏聚力随含水率的变化曲线分为两部分:当含水率 $\omega < 13\%$ 时,土体黏聚力随着含水率的增大显著增加;当含水率 $\omega > 13\%$ 时,随着含水率的进一步增大,黏聚力降低。在 $\omega = 22\%$ 时,黏聚力急剧减小,接近于 0,这表明该含水率已接近土体的饱和含水率。含水率对内摩擦角变化的影响要小于黏聚力,内摩擦角随含水率增大变化不明显,在 $28.8^\circ \sim 32.9^\circ$ 间变化。土体的抗剪强度与黏聚力的变化规律类似,也随着含水率的增加先增大,随后逐渐减小。林鸿州等^[15]、黄琨等^[16]研究的非饱和土抗剪强度规律也得到了类似结论。

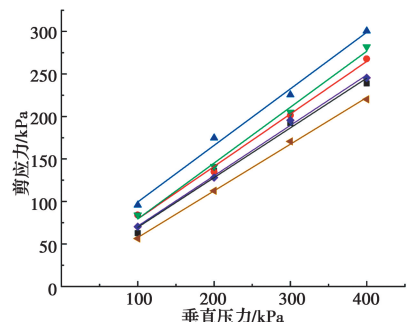


图 5 不同含水率下与土体抗剪强度与法向应力关系曲线

Fig. 5 Relationship between shear strength and normal stress of soil in different moisture contents

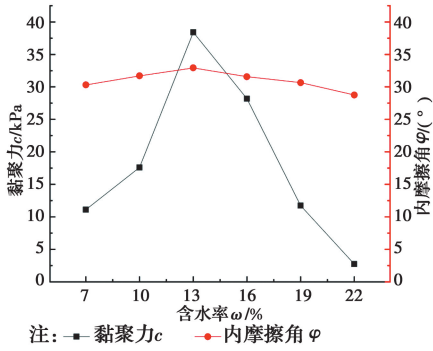


图6 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随土壤含水率变化关系曲线
Fig. 6 Relationship between cohesion c and internal friction angle φ as a function of soil moisture content

2.2 根系埋深对根系抗拉拔力的影响

分析 $S-F$ 曲线可以得知(图7),在控制拔出速率恒定的情况下,改变根系埋深进行银杏根系模拟绞车试验得到的 $S-F$ 曲线存在着明显的阶段特性。由图7可以看出,以30 cm埋深为例,在达到最大抗拉拔力对应的峰值位移前,抗拉拔力曲线呈现平缓上升(AB 段左侧)、陡峭上升(AB 段与 CD 段之间)和缓慢上升达到峰值(CD 段右侧)3个阶段。分析这3个阶段可得出:在平缓上升阶段,可以观测到该阶段土体表面并未发生明显破坏,但树干部分发生弯曲,抗拉拔力主要由树干受横向位移而产生弹性形变的抵抗力提供;随着横向荷载进一步增大,根系达到最大静摩擦力后,开始与土体之间发生错动,土体下方根系朝模拟迎风侧剪出,土体上部枝干挤压模拟背风侧土壤,因此,抗拉拔力激增,形成了陡峭上升阶段;继续施加横向位移,大多数根系周围土体已发生错动,达到抗拉拔力峰值,随后土体剪破导致林木彻底破坏失稳,发生倾倒破坏。

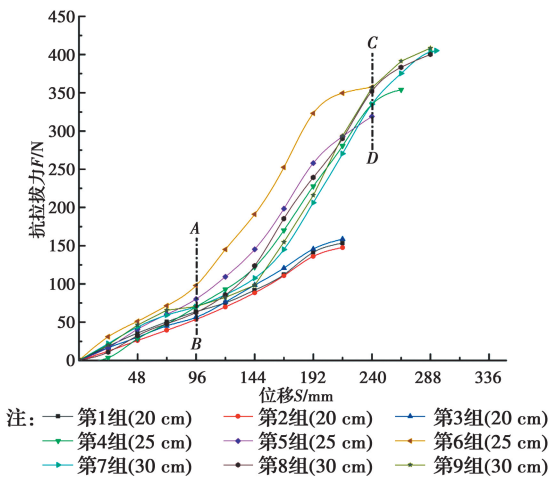


图7 不同埋深下根系破坏 $S-F$ 曲线
Fig. 7 Root failure $S-F$ curve under different buried depths

控制土壤含水率为13%,改变根系埋深进行多组试验得出的数据如图8所示,可以分析得出:在根系埋深15~30 cm的区间内,随着埋深的增加,林木根系的抗拉拔力有显著提升,呈现较明显的线性相关关系,回归方程为

$$F = 25.06x - 325.85 (R^2 = 0.9644) \quad (3)$$

式中: F 为最大抗拉拔力; x 为根系埋深; R^2 为确定性系数。

从图8也可以看出,达到最大抗拉拔力时,加载的横向位移也随着根系的埋深而随之增大,在15~30 cm埋深区间内成线性增大趋势。通过分析可以得知,在同等条件下,加深根系埋深使得抵抗根系变形作用的土体增加,根土接触面积的增大也能够有效提升林木的抗拉拔力,即能承受更强的风荷载作用而不发生倾倒破坏。

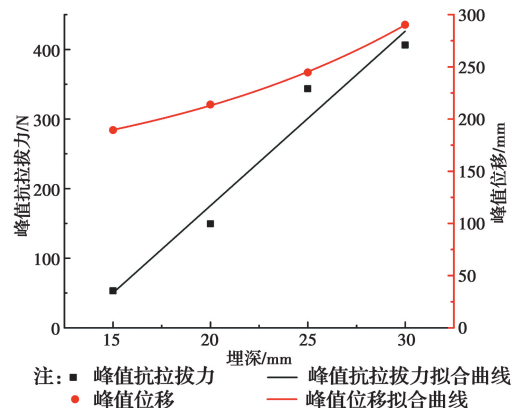


图8 各级埋深下峰值抗拉拔力、峰值位移的关系曲线
Fig. 8 Relationship between peak anti-overturning force and peak displacement at all depths

2.3 土壤含水率对根系抗拉拔性能的影响

采用控制变量法研究含水率对根系抗拉拔性能的作用效果,使用20、25 cm埋深工况开展相同埋深下含水率变化的拉拔试验,重点研究含水率变化对根系最大抗拉拔力的影响。试验过程中,采集到不同含水率下根系最大抗拉拔力绘制折线图。由图9可知,不同根系埋深试验所得抗拉拔力都有明显、相似的变化趋势,最大抗拉拔力随着含水率由低到高呈现先升后降的总体趋势,最大抗拉拔力出现在含水率13%~16%附近,在两组不同埋深下,当含水率 $\omega > 15\%$ 后出现明显拐点。实测22%含水率根系的抗拉拔力衰减最为显著,为峰值抗拉拔力的71%(25 cm埋深)和75%(20 cm埋深)。

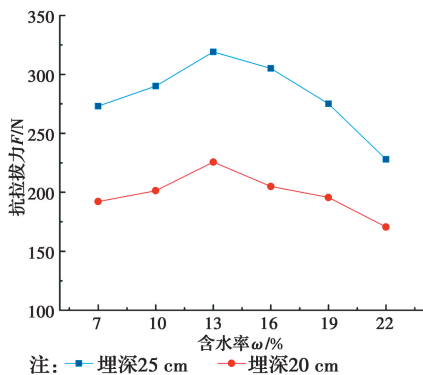


图9 固定埋深下含水率与最大抗拉拔力的关系曲线

Fig. 9 Relationship between water content and maximum drawing force at fixed depth

3 结论

通过不同含水率及根系埋深的模拟拉拔试验,基于粉质砂土随含水率变化的抗剪强度变化情况,探究了在不同含水率变化情况下不同工况根系拔出破坏过程及 $S-F$ 曲线,可以得到以下结论:

1) 根系破坏过程 $S-F$ 曲线中,抗拉拔力的变化可以概括为平缓上升、陡峭上升和缓慢上升达到峰值 3 个阶段。对应模型试验中,树干弹性变形、根土土体开始剪切错动和大部分土体剪破达到抗拉拔力峰值 3 个阶段。到达抗拉拔力峰值后,土体剪破导致林木倾倒破坏。

2) 当含水率一定时,根系的最大抗拉拔力随着根系埋深的增加显著上升,在试验设置的埋深区间内呈线性趋势增长,相关系数达 0.96 以上。表明增加根系埋深能够显著提高林木的抗拉拔性能。

3) 控制根系埋深相同时,最大抗拉拔力随着含水率由低到高呈现先升后降的总体趋势,最大抗拉拔力出现在含水率 13%~16% 附近,在 22% 含水率根系的抗拉拔力衰减最为显著,为峰值抗拉拔力的 71% (25 cm 埋深) 和 75% (20 cm 埋深)。

试验只研究了土壤含水率、根系埋深变化对于银杏根系抗拉拔性能的影响,其内部机理还需进一步的控制试验,从而对含水率变化引起的土壤基质吸力变化、根-土摩擦界面改变等因素进行研究。此外,试验通过对横向拉拔具有明显垂直主根、斜生根系较少的银杏树种得出上述结果,还未涉及水平根系与其他侧向大分支树种的试验。今后可以进行具有比对性的试验或数值研究。

参考文献:

- [1] 秦一芳,林双毅,高雅玲,等. 台风对城市道路行道树的影响和对策——以福建省厦门市“莫兰蒂”台风为例[J]. 中国农学通报, 2017, 33(34): 135-140.
QIN Y F, LIN S Y, GAO Y L, et al. Influence of typhoon on urban street trees and counter-measures: A case of typhoon ‘Meranti’ in Xiamen, Fujian [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(34): 135-140. (in Chinese)
- [2] 向师庆,赵相华. 北京主要造林树种的根系研究[J]. 北京林业学院学报, 1981(3): 9-27.
XIANG S Q, ZHAO X H. Untersuchung über die wurzelsysteme der hauptanbauholzarten in Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry College, 1981(3): 9-27. (in Chinese)
- [3] YANG M, DEFOSSEZ P, DANJON F, et al. Tree stability to wind: Modelling tree anchorage and analysing key contributing factors [J]. Congrès Français de Mécanique, 2015(8):22.
- [4] 王可钧,李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687-691.
WANG K J, LI C F. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687-691. (in Chinese)
- [5] COUTTS M P. Root architecture and tree stability [J]. Plant and Soil, 1983, 71(1/2/3): 171-188.
- [6] 刘秀萍. 林木根系固土有限元数值模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
LIU X P. Finite element method numerical simulation of forest roots reinforcement [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese)
- [7] 郑力文,刘小光,涂志华,等. 土壤含水率与干密度对油松根-土界面摩擦性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 36-41.
ZHENG L W, LIU X G, TU Z H, et al. Effects of moisture content and dry density of soil on the friction characteristics between Pinus tabulaeformis root and soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(6): 36-41. (in Chinese)
- [8] 夏振尧,管世烽,牛鹏辉,等. 麦冬和多花木蓝根系抗拉拔特性试验研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 110-113.

- XIA Z Y, GUAN S F, NIU P H, et al. Experimental study on pull-out resistive properties of ophiopogon japonicus and indigofera amblyantha roots [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 110-113. (in Chinese)
- [9] 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 S F, XIA Z Y, ZHANG L, 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)
- [10] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(Sup1): 329-335.
- LYU C J, CHEN L H, ZHOU S, et al. Root mechanical characteristics of different tree species [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(Sup1): 329-335. (in Chinese)
- [11] 刘小光, 赵红华, 冀晓东, 等. 油松和落叶松根与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(6): 550-556.
- LIU X G, ZHAO H H, JI X D, et al. Friction characteristics of root-soil interface of pinus tabulaeformis and larix gmelinii [J]. Tribology, 2012, 32(6): 550-556. (in Chinese)
- [12] RAHARDJO H, HARNAS F R, LEONG E C, et al. Tree stability in an improved soil to withstand wind loading [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2009, 8(4): 237-247.
- [13] FOURCAUD T, JI J N, ZHANG Z Q, et al. Understanding the impact of root morphology on overturning mechanisms: a modelling approach [J]. Annals of Botany, 2007, 101(8): 1267-1280.
- [14] 土工试验规程: SL 237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Code of geotechnical testin: SL 237-1999 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese)
- [15] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响 [J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1931-1936.
- LIN H Z, LI G X, YU Y Z, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1931-1936. (in Chinese)
- [16] 黄琨, 万军伟, 陈刚, 等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2600-2604.
- HUANG K, WAN J W, CHEN G, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2600-2604. (in Chinese)

(编辑 胡玥)