

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0449-10

基于试验与模型的根系增强抗剪强度分析

朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 李云鹏, 刘 勇

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 在总结近代学者对植物根系固土作用机制研究的基础上, 采用大盒直剪试验与物理模型, 对重庆缙云山地区 6 种常见植物: 马尾松、香樟、广东山胡椒、四川大头茶、白毛新木姜子、四川山矾根系的增强抗剪强度进行对比。通过自制的大盒直剪仪对植物实际固土效果进行了测定, 该大直剪仪具有简单、经济、易行等特点。通过对多种植物根系进行抗拉试验和根土复合体受力分析, 确定了植物根系的抗拉强度与植物根面积比率。利用 Wu 模型对 6 种植物的根系固土效能进行模型计算。结果表明, 不同的植物根系类型对增强抗剪强度值的影响非常显著。在重庆缙云山地区的土壤质地情况下, Wu 的根土复合体模型高估了根系增强土壤的抗剪强度约为 90%。基于该结论, 为使 Wu 模型计算的根系固土强度值较为准确, 修订 Wu 模型中的 k 值为 0.63。

关 键 词: 根土复合体; 根面积比率; 抗剪切强度

中图分类号: TU 411.7

文献标识码: A

Analysis of root system enhancing shear strength based on experiment and model

ZHU Jin-qi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, ZHANG Hui-lan, LI Yun-peng, LIU Yong

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on present studies of the enhancement of root system on soil shear strength, this study investigated root reinforcement effect of six common plants, i.e. *Pinus massoniana* Lamb, *Cinnamomum camphora* (L.), *Lindera kwangtungensis* (Liou) Allen, *Gordonia acuminata* Presland *Neolitsea aurata* var. *glauca*, within acidic zheltzem area of Chongqing Jinyun mountain, by direct shear test and numerical modeling. This study was firstly implemented by a self-made large box direct shear apparatus, characterized by simple, economic, effective and reliable. Moreover, the root system reinforcement effect was quantified by the equipment. Besides, the root area ratio was calculated and root tensile strength was derived by laboratory test experiment. Further, the well-known Wu root-soil composite model was triggered with the same boundary condition as indoor experiment; and then the model calculations were compared with the experimental measurements. The results show that the above six types of plant roots notably enhance the soil shear strength, but with different levels. It is also demonstrated that Wu root-soil composite model overestimated soil shear strength by 90% compared with the large box shear test. In this manner, we revised the k value as 0.63 for soil textures in Jinyun mountain of Chongqing.

Key words: root-soil composite; root area ratio; shear strength

1 前 言

坡面侵蚀与浅层滑坡一直是威胁森林边坡稳定的主要因素, 特别在长江流域, 每年都有大量的土壤因此而流失。植物护坡技术在世界范围内得到广泛的使用和认可, 植物通过影响土壤水分下渗与根

系固定土壤的作用来提高土壤的稳定性, 其中植物根系在保持土壤的过程中有着十分重要的作用。

在 20 世纪 60 年代以前, 植物对于山地边坡的稳固作用一直被人们忽视, 最初是由美国、前苏联以及日本的科学家开始研究植物根系对边坡的加固作用^[1]。根系对边坡的稳定增强通常通过以下 2 种

收稿日期: 2013-07-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助“水土保持工程机制及效应研究”(No. TD2011-01); 国家自然科学基金“基于分形理论的三峡库区林地土壤结构特征与土壤侵蚀关系”(No. 30671661)。

第一作者简介: 朱锦奇, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事山地灾害防治等的研究工作。E-mail: zhu-jinqi@163.com

通讯作者: 王云琦, 女, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事水土保持工程方面的研究工作。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

途径进行: (1) 将根系看成类似于土钉的杆件直接加入土体中进行分析; (2) 将含根土层看成复合土体, 用一个相当的增强层 (具有根增强量 c_R 、根分布相同厚度) 来代替含根土层而进行分析^[2]。分布在土中的根系构成混杂的生物网络, 它们的几何、力学特征都随着时间和空间不断地发展进化, 要在野外对根系特征进行测量是困难的, 也为根对土增强作用的模拟增加了挑战性。随后已有许多学者对此进行了广泛研究, 而且随着近些年计算机技术的发展, 更多不同类型的固土模型也被许多的学者提出, 如 Pollen 等^[3]在 2005 年提出的纤维素模型, 但 Wu^[4]和 Waldron^[5]最初的根增强模型几十年来一直受到广泛应用。因此, Wu 模型并非最精确与可靠的评估模型, 其是适用范围最广的根系固土模型。该模型在计算过程中, 需要输入参数很少, 而且对不同植物根系中都能广泛适用, 因此, 现在仍有许多学者在使用 Wu 模型来计算植物根系固土效果^[6-8]。Mattia 等^[9]在对地中海的 3 个植物种和 De Baets 等^[6]在对地中海 25 种草本植物种的研究中分别利用 Wu 模型来评估不同植物种固土的效果。Loades 等^[10]为研究植物根系的密度对固土效果的影响中使用 Wu 模型计算了植物不同种植密度下对土壤抗剪切强度的增量。在 Wu 模型中, 假定当土受剪切时, 穿过剪切面的所有根在同一时刻全部达到抗拉强度, 即同时被拉断。从而导致许多学者认为, 他高估了植物根系增强土壤的抗剪强度值^[11-12], 通过理论研究, 提出了一个针对于 Wu 模型的修正系数, 这个系数值大约为 0.4^[13]。同时, 由于直剪盒的限制, 在以往对植物根系固土效果的研究多集中在根系较小的草本植物, 缺少对灌木甚至乔木根系固土效果的研究。

本文将分别从试验与模型两个方面, 来评估长江流域常见的 6 个树种固土效果进行研究。针对 Wu 模型中植物根系面积比率参数, 考虑植物根系分布角度对植物根系固土效果的影响, 对土壤中存在的根系结构和受力进行分析, 在 Mattia 等^[9]在 2005 年提出的一种计算植物根系面积比率方法的基础上, 提出一种更加合理的计算根系面积比率的方式, 优化 Wu 模型的计算结果。设计大盒直剪试验来对 6 种植物根系固土理论, 特别是幼年期的乔木根系固土效果进行研究, 并利用试验结果来验证 Wu 模型的计算结果的准确性, 推动量化植物根系固土效果的研究, 同时为边坡稳定的定量计算提供基础。通过对不同植物根系固土效果的对比, 为边坡防护的植物种选择提供参考依据。

2 材料与方法

2.1 研究地概况

研究区布设在重庆市缙云山国家级自然保护区内。缙云山位于重庆市北碚区、沙坪坝区、璧山县境内, 重庆市区西北, 距市中心约 60 km。土地总面积为 76 km², 地理坐标为东经 106° 17' ~ 106° 24', 北纬 29° 41' ~ 29° 52', 亚热带季风湿润性气候特征, 年平均气温为 13.6℃, 最热月 (八月) 平均气温为 24.3℃, 最冷月 (一月) 平均气温为 3.1℃。土壤属于三迭纪须家河组 (T₃X_i) 厚层石英砂岩风化发育的酸性黄壤。缙云山岩层为砂、泥页岩相间组合, 上层为厚砂岩, 下层为泥页岩, 泥页岩积水。

2.2 样品采集

2.2.1 土壤样品采集

本次直剪试验土壤取自海拔 846 m 的缙云山地区样地内, 取土深度为 200~300 mm, 去除土壤中的其他生物以及杂质后, 再使用重塑土进行试验^[14]。为保证重塑土土壤属性与原状土接近, 对原状土的密度, 含水率, 紧实度等进行测定。经过测试, 原状土含水率平均约为 20%, 在 200~300 mm 土层的土壤紧实度约为 70 kPa。对土壤进行烘干后, 计算后喷洒一定量的水, 静置一昼夜, 控制土壤的含水率在 20.8%。对土壤进行人工压实, 使用土壤紧实度仪控制土壤紧实度。野外取得的土样主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 土样主要物理力学性质指标
Table 1 Physical properties of soil

土壤密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	紧实度 /kPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 /(°)
1.65	20.8	71	18.4	20.7

根据林地内测定的含水率, 通过 TDR 对直剪盒内含水率进行控制, 因为土壤取回后水分有一部分损失, 对直剪盒内土壤喷洒定量蒸馏水, 静置 1 d 后, 控制测定直剪盒内土壤的含水率在 20.8%。使用土壤紧实度仪控制直剪盒内土壤紧实度为 71 kPa。在每次大根直剪的试验前, 土壤的含水率与紧实度都经过反复测定, 以保证每次直剪试验的土壤质地都与表 1 的结果保持一致。

2.2.2 植物根系样品

本次试验中选择的树种为我国长江流域分布极广的常见 6 个树种。分别为马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb), 香樟 (*Cinnamomum camphora*

(*L.* Presl), 广东山胡椒 (*Lindera kwangtungensis* (Liou) Allen), 四川大头茶 (*Gordonia acuminata*), 白毛新木姜子 (*Neolits eaaurata* var. *Glauca*), 四川山矾 (*Symplocos lanrina* (Retz) Wall), 其中前3者为高大乔木, 后3者为小乔木, 皆为缙云山常见优势树种。马尾松和四川大头茶是直根型树种, 主根粗长, 侧须根细少, 而香樟和白毛新木姜子的幼树根系分布较浅, 水平根和垂直根数量都很少, 广东山胡椒和四川山矾根系分布最广, 水平根和垂直根数量较多。

为了最大限度地减小植物之间由于生长所造成的相互影响, 在选择样本时尽量选择周围 300 mm 范围内无其他植物生长的树木, 并选择生长状况良好的样本。在造林过程中, 选择种植的多数为幼树, 并且, 由于试验所用根系样本需要完整地放入直剪盒, 为了减小所选取树种间的生长差异, 故选取地上直径为 20 mm 左右的幼树, 用于评估在造林初期不同树种固土效果的差异性。同时, 为防止在采集样本时对根系的损害, 采取人工挖掘的方式最大限度地保证根系的整体结构, 开挖深度为 600 mm。待割除茎基部以上部分并用刷子将附着于根系上的块土刷去, 装于塑料袋中带回实验室进行后续试验。

2.3 自制直剪模型

目前地质力学模型试验主要分为两类, 一类是离心模型试验, 但试验费用一般都较高, 而且离心试验的离心力并不适合作为根土复合体的荷载^[15-16]; 另一类是普通的地质力学模型试验。在借鉴 Thompson 等^[17]思路的基础上, 笔者设计了如图 1 所示的直剪模型设备。该试验具有简单、经济、易行等特点, 而且还能获得比较好的试验结果。在 Wu^[4]和 Waldron^[5]的研究中也证实, 在讨论根系固土效果的试验中, 较大型的直剪模型能比较好地反应真实的根系增强土壤的情况。

2.3.1 大型剪切盒剪切系统

剪切系统主要由上下直剪盒、上盒盖、挡板、导轨组成, 总高度为 200 mm, 其中上盒为 100 mm, 下盒为 100 mm, 盒体材料为 5 mm 厚度的 PVC 板, 盒体内部抛光打磨。下直剪盒通过螺栓与钢底板固定在地面上, 整个直剪试验中, 下直剪盒固定不动 (见图 1)。

上、下直剪盒之间在滑动方向的盒壁上安放有钢珠, 下盒壁滑动方向有凹槽, 使其可以放入钢珠。下盒壁外侧安装有挡板, 使上盒在剪切过程中不会发生侧滑, 导致其从钢珠上滑出。反复测试上盒可

以在钢珠上自由滑动, 自由滑动时摩擦力为 4.6 N。

在上盒侧面安置有螺栓为避免模型填筑过程中上剪切盒发生滑动, 可通过螺栓将上剪切盒临时性固定于下剪切盒上。在试验过程中, 上盒盖仅仅用于压实土壤到自然状态下的紧实度即可, 剪切过程中, 并无上盒盖, 保证其剪切时的状况与自然状况一致。

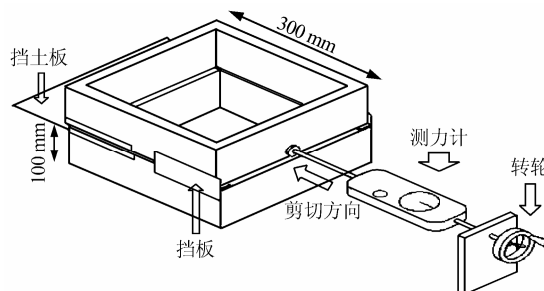


图1 大型直剪盒示意图

Fig.1 Schematic diagram of large direct shear box

2.3.2 加载测试系统

上盒水平运动推力直接来自测力计, 在试验进行时尽量使水平推力计的推力作用线接近剪切缝的中心线。也就是说, 在推力计测试端安装刚度很大的钢头, 让其直接作用于上盒的底部, 并且在上盒底部安置钢条, 使其作用的推力尽可能全部作用与剪切缝的中心线。推力计安装在带有转轮的水平支架上, 转轮转动一圈, 测力计推动的位移为 1 mm。

2.4 根系分布特征

各株植物根系径级分布特征如图 2 所示。在挖掘根系过程中, 带土挖出整棵植物根系, 使用小刷子刷去根系上的土壤, 尽量保持完整根系结构。植物根系放入直剪盒内后, 根系发生的剪切面为距离根系顶部往下的 10 cm 处, 根系以 2 mm 分径级。在剪切面上的根系, 计算每 30° 内根系与剪切面的法线所成的角度数量, 由各个角度上根系的数量计算根系的面积比率。

每株的植物都具有不同数量、不同角度的根系。对根系在土壤中发生剪切的力学分析, 笔者提出, 使用一个加权的方式来计算不同角度上根系的根系面积比率的方式来反应不同角度根系对土壤加固所提供的不同效果^[11]。

图 2 显示了根系分布的径级范围与对应径级上根系的数量, 对于本次试验的 6 个树种根系, 径级在 0~2 mm 范围中的根系占总根系中的 80% 左右, 其中有大约 60% 根系的角度的都在 30° 以内。

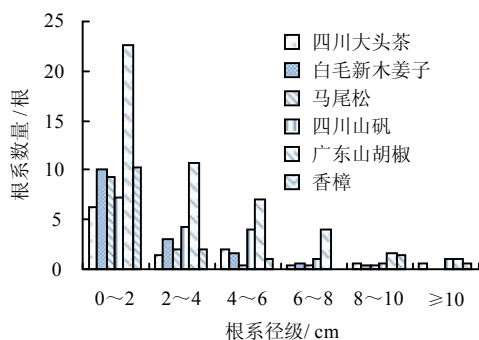


图2 根系径级分布
Fig.2 Root distributions

2.5 根土复合体抗剪强度方法比选

为了量化根系对土壤加固的效果,通常情况下使用的方法为直剪试验法和物理学模型法。

2.5.1 直剪试验法

直剪试验是测试根土复合体与无根土的抗剪强度值,并将其对比。但这种方法的缺陷是直接评定出根系对土壤黏聚力的增强效果,而把根系对一块土壤的加固效果隔离开来研究是非常困难的,而且在试验过程中,无法保证试验中根土复合体是与未扰动根土复合体一样的构造。为了解决这些问题, Wu 等^[4-5]增加了试验来说明,该试验的准确性在很大程度上取决于直剪盒尺寸的大小,直剪盒的尺寸越大,越能反映出真实的情况;同时也为根系固土模型的研究提供了基础。

2.5.2 物理学模型法

物理学模型法根据物理学的公式,利用根系与土壤特性之间的关系来计算根系对土壤的加固效果。该方法因为是根据物理学方面的公式,通常计算的是静态的根系对土壤加固的效果模型。通常用到的简单公式为库仑公式^[17],即:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为土壤的抗剪强度 (kPa); c 为黏聚力 (kPa); σ_n 为法向应力 (kPa); φ 为内摩擦角 (°)。

为了扩展式 (1) 中根系的加强效果, Waldron 把所有在土壤中的根系看成在剪切面上垂直放置,把根系当成对土壤的一种额外的加强结构,因此根系的拉力在根土复合体中体现为抗剪力,改进后的公式为

$$\tau = c + c_R + \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

式中: c_R 为根系增加的抗剪强度值 (kPa)^[17]。

在简单的根系模型中,根系拉力的大小为剪切力的正切值与法向应力的合力。所以总根系增强值 (c_R) 可以表示为

$$c_R = T(A_R/A)k \quad (3)$$

其中, $k = (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi)$ 。

式中: T 为根系的抗拉强度 (kPa), 下文将对 T 值进行讨论; θ 为土壤发生破坏时根系与法线的夹角 (°); A_R 为根系在剪切面上的横切面总面积; A 为根系所占土壤剪切面的面积 (m²); A_R/A 为根面积比率。

Gray^[18]的试验表明,根系对土壤的加固几乎不影响土壤的内摩擦角。Wu 等^[4]的试验表明,在式 (3) 中的 θ 和 φ 基本不会发生明显的变化 (值的范围分别是 40°~90° 和 25°~40°), 在 Wu 的研究中, k 值的大小在 1.1~1.3 之间, 本文采用均值 1.2, 因此, 可将式 (3) 简化为

$$c_R = T(A_R/A) \times 1.2 \quad (4)$$

下面对未知的 T 值进行讨论。

Hayashi^[19]研究了根系的抗拉强度 (k_b) 与根系直径 (d) 之间的关系得出的公式为

$$T_b = k_b d^{2.03} \quad (5)$$

式中: k_b 为计算系数, 通过马尾松抗拉试验测得。Tsukamoto^[20]研究了根系的拔出强度 (k_q) 与根系直径 (d) 之间的关系得出的公式为

$$T_c = k_q d^{1.45} \quad (6)$$

式中: k_q 为计算系数, 通过马尾松的直接拔出试验测得。

在直剪试验的过程中发现, 在剪切面上根系大多数是被拉断的, 同时, 近代更多的研究是使用抗拉强度作为计算根系固土效果的指标值。在本次研究中, 公式 3 中的 T 值将选择公式 (5) 来进行计算。

2.6 模型参数测定

2.6.1 根系抗拉强度

k_b 值和根系面积比率 (A_R/A) 是该物理模型中的两个主要参数。其中, k_b 值是用马尾松抗拉强度试验来测定出。在野外土层深度为 30 cm 处, 挖取生长良好的植物根系, 其根系径级范围为 0~10 mm。植物根系放入浓度为 15% 的酒精溶液以确保活性。使用万能试验仪测定不同植物根系的抗拉强度, 拉伸速率设置为 10 mm/min。将得到的最大拉力值带入式 (7) 即可得到植物根系的抗拉强度:

$$T_R = \frac{4F_{\max}}{\pi d^2} \quad (7)$$

式中: T_R 为根系抗拉强度 (MPa); $F_{\max}$ 为最大拉

力 (N); $\bar{d}$ 为根系的平均直径 (mm)。

2.6.2 根面积比率的计算

通常根系面积比率 A_r / A 的计算, 都是用根系表面积 A_r 与土壤的面积 A 的比值来计算的, 计算公式为

$$RAR = \sum_{i=1}^n \frac{\pi n_i d_i^2}{4} \quad (8)$$

式中: RAR 为植物根系面积比率; n 为该根系直径内的根系数量。

在式 (8) 的计算中, 把不同根系角度的根系都算为相同的根系面积比, Fan 等^[11]的研究中发现, 与土壤平面存在角度的根系比垂直于土壤的根系所提高的抗剪强度更高。根据式 (6), 根系面积比率与 c_r 值之间呈线性关系。在本次试验中, 根据树根角度不同的分级, 把斜根系比垂直根系增加的抗剪强度值加权到根系面积比率上, 得到本次试验的 3 株植物的根系面积比率值。根系角度小于 30° 的加权值为 1; 根系在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的, 加权值为 1.5; 大于 60° 的加权值为 1.3。

3 结果分析

3.1 植物根系抗拉强度

通过对植物根系结构的调查发现, 在 6 种植物中, $0 \sim 4$ mm 径级的植物根系占植物全部根系的 74.44%, 而 $0 \sim 6$ mm 径级的植物根系更是占到全部根系的 87.78%。故选择 $0 \sim 6$ mm 径级的植物根系进行抗拉强度试验, 并根据植物根系径级的分布, 计算植物根系平均的抗拉强度值。 $0 \sim 2$ mm 根系分配权重为 0.5, $2 \sim 4$ mm 径级分配权重 0.3, $4 \sim 6$ mm 径级分配权重为 0.2, 计算的根系平均抗拉强度如表 2 所示。结果表明, 6 种植物根系抗拉强度范围为 61.57~72.61 MPa, 其中根系抗拉强度最大的植物种为四川山矾。

表 2 植物根系平均抗拉强度
Table 2 Mean tensile strengths of plant roots

植物名	拉丁名	测试 根系 数量	平均 抗拉强度 / MPa
马尾松	<i>Pinus massoniana</i> Lamb	78	65.45
四川大头茶	<i>Gordonia acuminata</i>	45	65.13
白毛新木姜子	<i>Neolitsea aurata</i> var. <i>glauca</i>	50	62.92
四川山矾	<i>Symplocos lanrina</i> (Retz) Wall	44	72.61
广东山胡椒	<i>Lindera kwangtungensis</i> (Liou) Allen	76	64.05
香樟	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl	51	61.57

3.2 根土复合体抗剪强度

为分析根系对土壤增强的抗剪强度值, 增加了

无根系存在的素土试验。试验测得素土的抗剪强度为 173.6 kPa。用含根土最大的抗剪强度值减去素土的抗剪强度值, 即为根系增加的土壤抗剪强度。根据大盒直剪试验位移与根土复合体抗剪强度关系曲线图, 绘制抗剪强度的趋势线, 得出最大抗剪强度值。在所有植物中, 第 2 株马尾松根系根土复合体有最大的抗剪强度, 其值为 10.67 kPa。图 3 为本试验中 6 种 18 株植物根系与土壤整体抗剪强度与位移的关系曲线。在刚刚开始发生剪切破坏时, 根土复合体的抗剪强度急剧增加, 随后到达最大值。根土复合体抗剪强度趋于稳定, 在被完全破坏后, 其抗剪强度值将会逐渐下降。

对根土复合体进行剪切破坏时, 不同的植物根系达到最大抗剪强度的位移量是不同的, 曲线与 X 轴正方向所成的面积为破坏根土复合体所需要消耗的能量。以马尾松为例, 3 株马尾松植物根系增强的抗剪强度值与抗剪强度的曲线都不相同, 对比图中的曲线可以得出, 3 株马尾松植物根土复合体最后抗剪强度达到最大值时, 剪切位移值不同, 编号为 2 的马尾松根土复合体在位移量为 14 mm 左右时就已经达到抗剪强度的极值, 而其他两株植物在位移量为 18 mm 左右时才达到。

3.3 试验与物理模型的根系抗剪强度对比

在计算不同植物根系面积比率和植物根系的单根抗拉强度基础上, 利用式 (4) 计算植物根系的抗剪强度增强值。由图 5 可知, Wu^[4]与 Waldron^[5]的模型计算出的根系的增强土壤抗剪强度的值比实际测量出根系增强土壤的抗剪的值要大 82.00%~98.39%。其中马尾松植物根系提高土壤抗剪强度的效果最为显著。其中模型与实际增强值的对比也可以发现, 香樟的模型计算值与实际抗剪强度增强值最为接近。Pollen^[21]在 2007 年的研究中对于林木根系给出修正系数应该定义为 0.56, 而 Waldron 等^[22]、Operstein 等^[23]、Pollen 等^[3]与 Docker 等^[11]认为对于草本或较小的林木, 该修正值应该更小一些。在大盒直剪试验对根土复合体抗剪强度实测的基础上, 对 Wu 模型中的 k 值进行修正。计算后得出 k 值取 0.63 时, 模型模拟值与实际测得的根系增强抗剪强度相符。

4 讨论

4.1 模型中根系强度值的确定

在分析根系在土壤中的力学作用方式时, 本文使用了根系的抗拉强度 k_b 作为根系固定土壤拉力的值。Kondo 等^[24]在计算根系护坡稳定的试验中选

择根系的拔出强度作为 k_q 值的计算。笔者试验对比的对象为直剪试验的抗剪强度值, 因此, 对于发生拉断的面可以认定为根系所在土壤发生剪切破坏的平面, 并且在直剪试验的过程中, 观察发生破坏以后的土壤根系的断裂发生所在的位置, 基本位于土壤发生剪切破坏的同一平面。在边坡稳定的计算中, 由于根系的断裂面的未知性, 因此, 本文使用的计算根系的强度为根系的抗拉强度值 k_b 。在与 T_b 值相关的计算中, 根系面积比率的计算方式忽视一部分向上生长的根系, 因其在直剪过程中的作用是几乎不存在的, 故对于这类根系, 并没有把它计入根系的面积值中。根据植物根系径级分布来计算植物根系抗拉强度, 使平均根系抗拉强度更加准确; 根据根系角度来计算根面积比率, 并综合这两方面的加

权计算, 可以把根系结构难以用数字描述的问题, 带入 Wu 模型进行了计算, 有利于量化植物根系固土效果。

4.2 不同植物根系对土壤抗剪强度的影响

不同植物类型的根土复合体抗剪强度差异十分大, 根据式 (3)、(5), 影响植物根系固土效果的主要指标为植物根系抗拉强度与根面积比率。在本次试验的 6 种植物种, 四川山矾植物根系有最大的抗拉强度, 广东山胡椒的植物根系面积比率最大, 但固土效果最好的却为马尾松。植物根系固土效果同时受两方面的影响都较大。根据 Hayashi^[19]和 Tsukamoto^[20]对日本柳杉的试验研究中得到的土壤的抗拉强度值, 计算得出的日本柳杉根系对土壤抗剪强度增加值比马尾松根系对土壤抗剪强度的增加

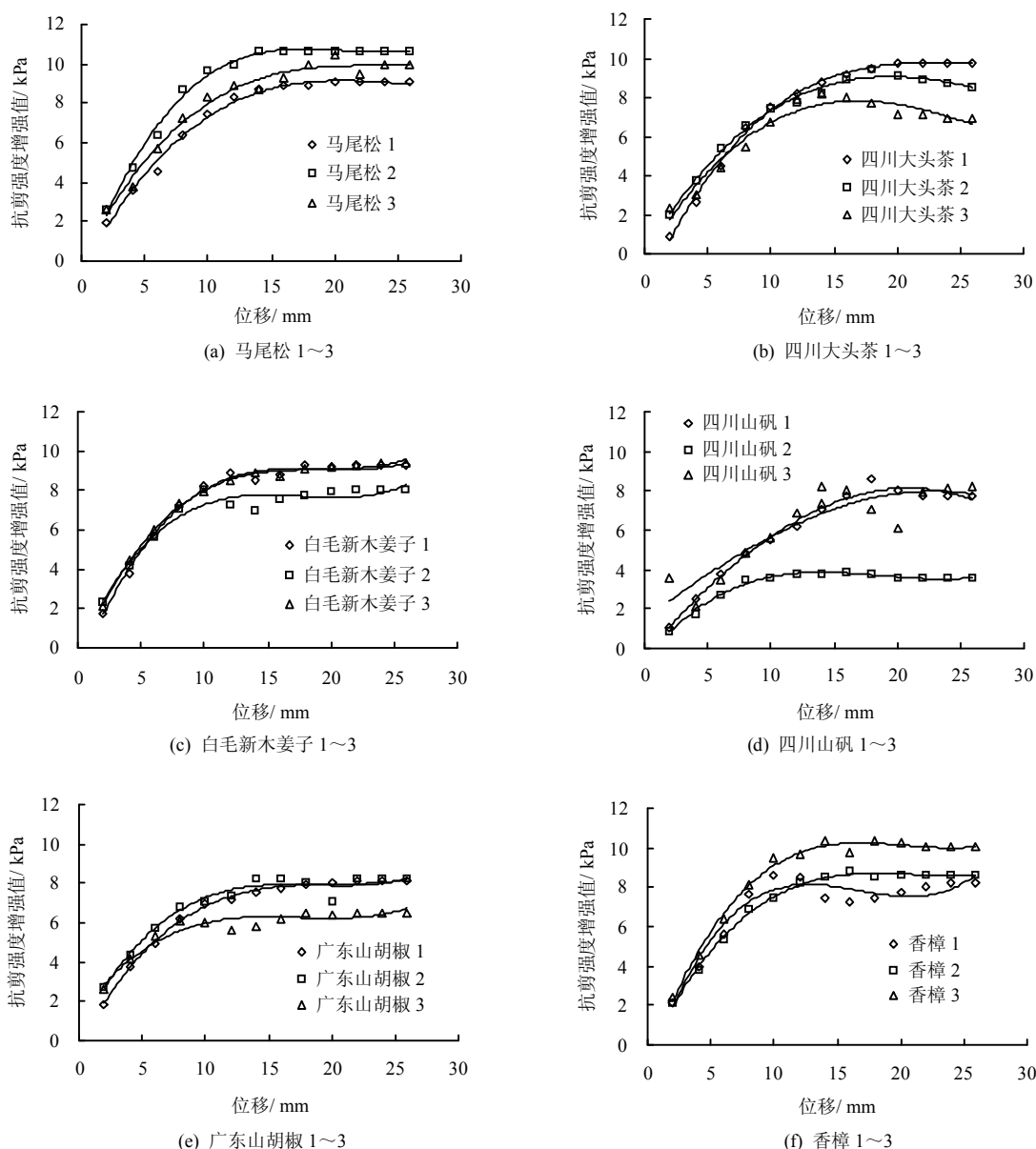


图3 抗剪强度增强值与位移关系曲线

Fig.3 Relationships between shear strength and displacement

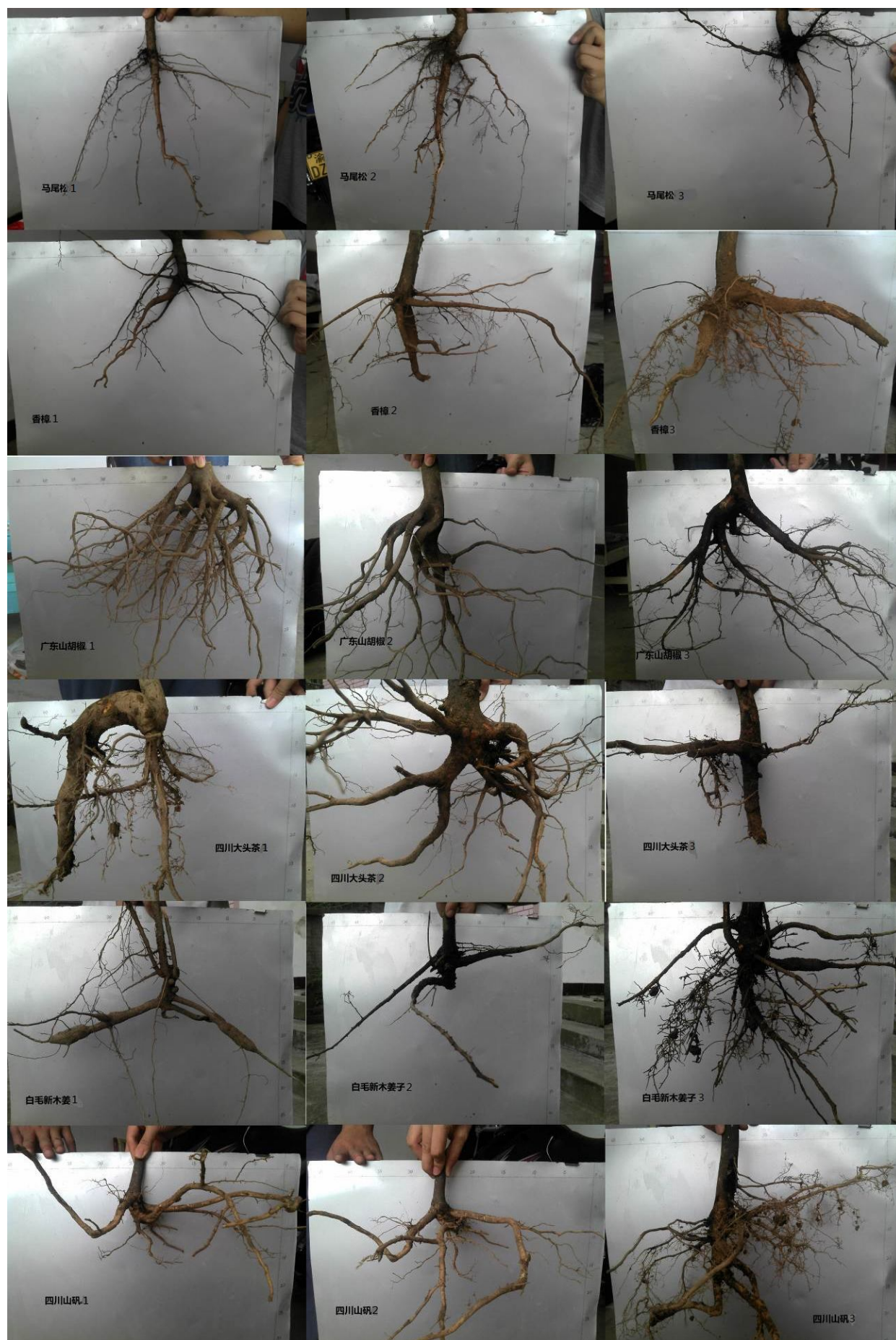


图4 植物根系结构
Fig.4 Plant root systems

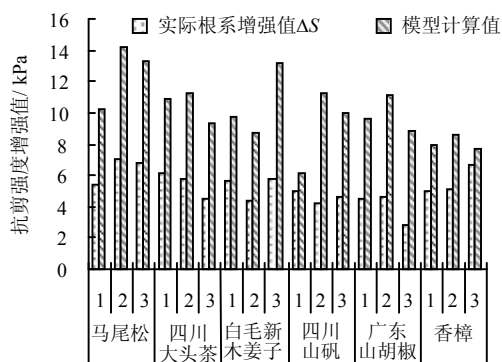


图5 Wu与Waldron模型计算与实测根系增强抗剪强度

Fig.5 Calculation results of Wu and Waldron models and the actual enhanced shear strength values

值小60%，可以看出，植物根系类型的种类对植物固土效果有着至关重要的影响。植物类型的不同，不仅导致了植物根系本身抗拉强度不同，同时也导致了植物根系结构（主要是根面积比率）的不同。在选择边坡防护植物种的过程中，在对边坡进行稳定性分析以后，然后通过测定植物根系抗拉强度值与根面积比率来选择适合的边坡防护的植物种。

4.3 Wu模型分析

在对比公式计算的土壤抗剪强度的增加值 c_R 值与大直剪盒的抗剪强度值的基础上，可以分析Wu模型对抗剪强度值估计值的准确程度。Wu和Waldron模型假定当土受剪切时，穿过剪切面的所有根在同一时刻全部达到抗拉强度，即同时被拉断。然而Pollen等^[3]在对河岸含根土的室内和野外的强度测试中发现，在所有的根在理论上达到抗拉强度之前河岸可能就已破坏。本试验中，通过观察直剪试验后根系的情况发现，确实有些根系在直剪试验的过程中被拉断，所以在测力计的值达到最大稳定值时，根系提高的抗剪强度值其实只是其中一部分完好的根系所提供的对土壤的增强值。Reinstenberg^[25]、Docker等^[11]在根的拉拔试验、含根土的直接剪切测试中也证实了根系的逐渐破坏现象。由此，Wu和Waldron模型假设所有的根同时破坏，使计算的根系增强值 c_R 偏高。而在本试验Wu和Waldron模型将由根增加的抗剪能力值 c_R 直接加到土的抗剪强度 τ 上，便高估了根的增强效果。通过Wu和Waldron模型计算的黏聚力值与直剪试验得出的根系增强的抗剪强度值相比要大得多。对于边坡稳定性的计算中，高估了根系的作用，会使得边坡发生危险的概率增高。在分析边坡稳定的极限平衡方法、数值分析方法和最新的粒子群优化法中^[26-28]，根系与土壤形成的根土复合体的抗剪强度

是一个重要的分析稳定系数的因子，因此，根系增加的土壤强度是分析边坡稳定的重要因素^[29]。

美国农业部农业研究服务署(USDA-ARS)国家沉降实验室的Pollen等^[3]用纤维模拟根，测试了一纤维束所承受的最大荷载值，结果得到的值比所有单根强度之和（按照Wu和Waldron模型所有根同时断的假定）要小得多。于是Pollen等^[3]对Wu和Waldron增强模型进行了改进，建立了一种动态纤维束模型(the fiber bundle model)来考虑剪切过程中根系逐渐断裂的行为。并且Schwarz等^[14]在对根束原位测试中发现，将实测的结果与Wu和Waldron模型计算的结果相比，Wu和Waldron模型高估根系的抗力达到60%~100%。而在本次试验中，计算的抗剪强度增加值达到了14.3 kPa，而实际的增加值仅为4.2~6.7 kPa，Wu和Waldron的模型高估根系的抵抗力在90%左右。试验中对香樟的模型计算与实际测定结果较为接近，最接近的仅仅高估植物根系抗剪强度增强值16.1%。香樟植物根系有较多与土壤水平面角度较小的根系，经过加权计算，这部分植物根系所能提供的固土效果被更加精确地估计了。

缙云山地区含水率为20.8%，20~30 mm，紧实度为71 kPa的土壤中的根系，模型估算值比实际根系增强抗剪程度值高了约90%。在实测结果与模型对比结果的基础上，将 k 值修订为0.63时，模型模拟值与实测值的差距很小。因此，对于中国长江三峡库区内，使用该 k 值可以较好地估计马尾松根系加固土壤的效果。

4.4 直剪试验

直剪试验是一种简单、有效以及较为精确地测定土壤抗剪强度的方法，本次试验将设计的直剪盒，通过增加导轨和在直剪盒内部进行抛光等工作，以减小因试验过程中所产生的误差。但直剪设备还存在很多的不足有待进一步解决。包括以下两点：

(1)加载方式为手动加载，预定荷载控制不易稳定。在转轮部分设计成螺纹控制。转动转轮一圈，直剪盒中的上盒被推动仅仅1 mm，每转动2圈计数一次，通过这样的设计，尽可能地保证了推力的稳定施加。(2)因水平推力作用线稍高于剪切缝中心线，这样在剪切过程中水平推力会产生一个逆时针方向的力矩作用，使上剪切盒产生相应方向的转动效应。在实际操作中，水平推力的作用点应尽可能地接近剪切缝的中心，同时通过导轨对上直剪盒的控制，使上直剪盒不至于转动。而对于评估根系固土的效果，包括评估大型乔木，或者多颗植物根系的共同固土

效果, 往往需要更加大型的直剪设备测定。

5 结 论

(1) Wu 与 Waldron 的模型高估了根系固定土壤的效果, 而且使用 c_r 直接与土壤本身抗剪强度 τ 值相加, 来量化根土复合体的抗剪强度并不十分合适。

(2) 在重庆地区的特定的土壤质地的情况下, Wu 与 Wadron 的模型高估了根系对土壤抗剪强度的增强值在 90% 左右。

(3) 不同植物对土壤抗剪强度的增强量差别很大, 同时不同植物的模型估计值与实测值的差别也存在不同。本次研究中, 通过实测值与模型值的关系得出, 在重庆缙云山地区马尾松林内较为适合的模型修订的 k 值为 0.63。

(4) 对根系固定土壤做出定量计算的研究是一个非常复杂的工作, 需要做大量不同植物根系和不同土壤质地的试验, 以此结果去量化植物根系故土效果, 完善根系固定土壤的强度模型。从根系结构与分布情况分析不同根系对土壤固定的效果, 也是今后要研究的重要方向。

参 考 文 献

- [1] GREEWAY D R. Vegetation and slope stability. Slope stability: Geotechnical engineering and geomorphology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1987.
- [2] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 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, 2012, 21(6): 1171-1177.
ZHOU Yun-yan, CHEN Jian-ping, WANG Xiao-mei. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. **Ecology and Environmental Sciences**, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [3] POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. **Water Resources Research**, 2005, 41(7): 125-139.
- [4] WU T H. Investigation of landslides on prince of Wales Island, Alaska[M]. Ohio: Ohio State University, 1976.
- [5] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1977, 41(5): 843-849.
- [6] BISCHETTI G B, CHIARADIA E A, SIMONATO T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy)[J]. **Plant and Soil**, 2005, 278(1-2): 11-22.
- [7] TOSI M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy)[J]. **Geomorphology**, 2007, 87(4): 268-283.
- [8] DE BAETS S, POSEN J, REUBENS B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. **Plant and Soil**, 2008, 305(1-2): 207-226.
- [9] MATTIA C, BISCHETTI G B, Gentile F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. **Plant and Soil**, 2005, 278(1-2): 23-32.
- [10] LOADES K W, BENGOUGH A G, BRANSBY M F, et al. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils[J]. **Ecological Engineering**, 2010, 36(3): 276-284.
- [11] DOCKER B B, HUBBLE T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J]. **Geomorphology**, 2008, 100(3): 401-418.
- [12] FAN C C, SU C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. **Ecological Engineering**, 2008, 33(2): 157-166.
- [13] PRETI F. Stabilità dei versanti vegetati[J]. **G. Sauli, P. Cornellini & F. Preti (a cura di)**, 2006, 3: 137-168.
- [14] 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 (2003-2012)**, 2011, 116(F2).
- [15] 陈丛新. 边坡稳定离心模型试验中离心力分布不均匀的影响[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 39-45.
CHEN Cong-xin. The influence of nonuniform distribution of centrifugal force in the centrifugal model test of slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(4): 39-45.
- [16] 王丽萍, 张嘎, 张建民, 等. 抗滑桩加固黏性土坡变形规律的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1075-1081.
WANG Li-ping, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. et al. dynamic centrifuge modeling test of cohesive soil slopes reinforced with soil nailing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1075-1081.
- [17] THOMPSON M J, WHITE D J. Design of slope reinforcement with small-diameter piles[C]//ASCE. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [18] GRAY D H. Biotechnical and soil bioengineering slope

- stabilization: A practical guide for erosion control[M]. [S. l.]: Wiley, 1996.
- [19] HAYASHI S. The study of the vegetation plant stability on the slope considering of the characteristics of wind resistance[R]. [S. l.]: [s. n.], 1998: 9—21.
- [20] TSUKAMOTO Y, KUSAKABE O. Vegetative influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan[C]//Proc. Symp. Effects Forest Land Use on Erosion and Slope Stability. Honolulu: Environment and Policy Institute, 1984.
- [21] POLLEN N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of stream banks: Accounting for soil shear strength and moisture[J]. **Catena**, 2007, 69(3): 197—205.
- [22] WALDON L J, DAKESSIAN S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. **Soil Science**, 1981, 132(6): 427—435.
- [23] FRYDMAN S, OPERSTEIN V. Numerical simulation of direct shear of root reinforced soil[J]. **Proceedings of the ICE-Ground Improvement**, 2001, 5(1): 41—48.
- [24] KANJI K, TOSHIRO N, SETSUO H, et al. Analytical study on the role of tree roots system in slope stability[J]. **Landslides-Journal of the Japan Landslide Society**, 2004, 255—263.
- [25] RIESTENERG M M. Anchoring of thin colluvium by roots of sugar maple and white ash on hill slopes in Cincinnati[M]. US: US Government Printing Office, 1994.
- [26] WANG C, CUI Z, CHEN Q. Short-term load forecasting based on fuzzy neural network[C]//Intelligent Information Technology Application, Workshop on. IEEE. [S. l.]: [s. n.], 2007: 335—338.
- [27] SHI Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and resources[C]//Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation. [S. l.]: [s. n.], 2001, 1: 81—86.
- [28] PARSOPOULS K E, VRAHATIS M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. **Natural Computing**, 2002, 1(2-3): 235—306.
- [29] DAS B M. Principles of foundation engineering[M]. [S. l.]: Cengage Brain, 2010.

上接第 434 页

- [4] 徐素国, 郜保平, 梁卫国, 等. 钙芒硝盐岩力学特性的研究[J]. **地下空间与工程学报**, 2005, 1(7): 1125—1128.
XU Su-guo, XI Bao-ping, LIANG Wei-guo, et al. Study of mechanical properties of glauberite salt rock[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(7): 1125—1128.
- [5] 梁卫国, 赵阳升. 盐岩力学特性的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(3): 391—394.
LIANG Wei-guo, ZHAO Yang-sheng. Testing study of mechanical properties of thenardite salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 391—394.
- [6] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240℃内盐岩物理力学特性的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(14): 2365—2369.
LIANG Wei-guo, ZHAO Yang-sheng, XU Su-guo. Testing study of physico-mechanical properties of heated salt rock under 240 °C[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(14): 2365—2369.
- [7] 杨春和, 李银平, 陈锋. 层状岩盐力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 岩盐短期强度和变形特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(增刊 1): 3104—3109.
LIU Jiang, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experiment study on short-term strength and deformation properties of rock salts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.1): 3104—3109.
- [9] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响 [J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(12): 2507—2513.
JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2507—2513.
- [10] DÜSTERLOH U. Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlraumbauten im salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen[M]. [S. l.]: Papierflieger Verlag in Clausthal-Zellerfeld, 2010.
- [11] HOU Z. Mechanical behaviour of rock salt masses under high stress to strength ratios (damaging) and under very low stress to strength ratios with high confining pressure (healing)[J]. **Technology Roadmap for Rock Mechanics**, 2003, 533—538.
- [12] HOU Z. Mechanical and hydraulic behaviour of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities[J]. **Mining Sciences**, 2003, 40: 725—738.
- [13] 马洪岭. 超深地层盐岩地下储气库可行性报告[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.