

中文核心期刊 CSG 中科双效期刊 中国 Caj-cd规范获奖期刊

CSCD核心期刊 中国科技核心期刊

根-土复合体的三轴试验及其强度分析

钟彩尹,李鹏程,马 滔,吴礼舟

Triaxial test and strength analysis of root-soil composite

ZHONG Caiyin, LI Pengcheng, MA Tao, and WU Lizhou

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205013

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

基于孔隙面积比的麦秸秆防腐分析及秸秆对粉土抗剪强度的影响

Wheat straw anticorrosion analysis based on pore area ratio and the effect of straw on the shear strength of silty soil 彭丽云, 李朝成, 刘铭杰, 崔长泽 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 171-180

基于高分子复合材料改良砂土三轴剪切试验研究

Triaxial shear test of sand improved by polymer composite 王龙威, 刘瑾, 奚灵智, 武立林, 郑川, 祁长青 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 149-157

循环荷载下水泥土桩复合体动力参数试验研究

An experimental study of dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft clay under dynamic loading 叶观宝, 秦粮凯, 张振, 郑文强, 陈勇 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 48-56

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength 钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205013

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.

根-土复合体的三轴试验及其强度分析

钟彩尹1,李鹏程1,马 滔1,吴礼舟2

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院,四川成都 610059;

2. 重庆交通大学山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 植被根系对土体的强度有显著影响。现有研究缺乏准确的模型描述根-土复合体破坏时应力状态。为量化植被根系 对土体强度的贡献,采用一系列固结不排水三轴试验研究了含根量对根-土复合体强度特征的影响,并基于能量耗散原理 建立了根-土复合体强度预测模型,最后对比分析了试验结果与模型预测值。结果表明:根系可显著提高根-土复合体强度, 当含根量为 0.486%, 根-土复合体的偏应力较素土增大了 1.70 倍, 抗剪强度较素土提高了 72.1%, 围压较小时根系对土体强 度的提高更为显著;根-土复合体内摩擦角随含根量的增加变化较小,而根-土复合体的黏聚力随含根量的增加而逐渐增大; 根-土复合体模型预测值与试验结果较为接近,表明该模型具有较高的准确率和可靠度。研究成果可为根-土复合体强度特 性理论研究提供参考,并为根-土复合体强度预测提供了可靠方法。 关键词: 根-土复合体; 含根量; 抗剪强度; 强度预测模型; CU 三轴试验

中图分类号: TU411.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2022)06-0097-08

Triaxial test and strength analysis of root-soil composite

ZHONG Caivin¹, LI Pengcheng¹, MA Tao¹, WU Lizhou²

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of Bridge and Tunnel Engineering in Mountainous Area, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The root system of vegetation has a significant effect on soil strength. The existing studies lack an analytical description of the stress state during root-soil complex failure. To quantify the contribution of vegetation roots to soil strength, a series of consolidated undrained triaxial tests are conducted to study the strength characteristics of the root-soil composite, and a root-soil composite strength prediction model is established based on the energy dissipation principle. Finally the experimental results and the prediction model are compared and analyzed. The results show that the root system can significantly improves the strength of root-soil composite, when the root concentration is 0.486%, the deviatoric stress of the root-soil composite increases by 1.70 times compared with the plain soil, and the shear strength increases by 72.1% compared with the plain soil, and the root system significantly improves the strength of the soil more when the confining pressure is lower. The internal friction angle of the root-soil complex varies less with the increasing root content, while the cohesion of the root-

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41790432)

收稿日期: 2022-05-06; 修订日期: 2022-07-11 投稿网址: www.swdzgcdz.com

第一作者:钟彩尹(1999-),女,硕士研究生,主要从事岩土工程方向的学习和研究工作。E-mail:zhongcaiyin@stu.cdut.edu.cn 通讯作者: 吴礼舟(1975-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事防灾减灾教学和研究工作。E-mail: lzwu@cqjtu.edu.en

soil complex gradually increases with the increasing root content. The predicted values of the root-soil complex model are close to the experimental results, indicating that the model is of high accuracy and reliability. The research results can provide a reference for theoretical studies on the strength characteristics of root-soil composites and provide a reliable method for predicting the strength of root-soil composites.

Keywords: root-soil composite; root concentration; shear strength; strength prediction model; CU

植被不仅可以有效地保护土壤免受雨水的侵蚀, 且可显著地提高边坡土体的抗剪能力,植被护坡已成 为工程领域常用的护坡方式[1-2]。为量化植被根系对 土体强度及边坡稳定性的影响,众多学者对植物根系 与土体的相互作用机理进行了研究。Waldron^[3]和 Abe^[4] 等通过直剪试验对植物根系加筋土(根-土复合体)的 强度进行了研究,认为植物根系能加固土壤并提高土 体的抗剪强度。陈昌富等57对不同含根量的根-土复 合体进行了一系列的三轴试验,分析了其变形破坏模 式,结果表明根-土复合体强度较素土有显著的提高。 Su等问对比研究了大量的植被覆盖边坡与无植被覆 盖边坡,发现前者稳定性更高,证实了采用植被护坡 提高边坡稳定性是可行的。杨幼清等四通过一系列直 剪试验,探索海拔位置对根-土复合体抗剪强度的影 响。为预测根-土复合体的强度,已有众多学者从试验 测试和数值模拟两方面进行了大量的研究工作[8-9], 一系列含根土体的原位及室内直剪试验结果表明根 系能显著提高土体的抗剪强度[10]。根系受自然环境影 响较大,对量化根系形态、力学性质和建模提出了一 定的挑战。Meng 等^{III}通过三轴试验研究了根系形态 及根系分布特征对根系土抗剪强度的影响。Ng 等^[12] 通过建立三维数值模型探讨不同植物根系形态及种 植模式对含植被边坡稳定性的影响。结合混合材料 理论及根系分布函数建立数值模型,结果表明根系分 布形式对根-土复合体强度有显著影响[13-14]。

复合体中根-土界面性质是决定根系加固效果 的重要影响因素,研究根系与土体之间的相互作用对 根-土复合体力学性质至关重要^[15]。Athanasopoulos^[16]和 Liu^[17]等利用直剪试验研究根系/纤维沿剪切平面的拔 出破坏,得出根系与土体之间的相互作用关系。宋维峰等^[18] 通过根土界面直剪摩擦试验,研究根系与土体接触界 面的剪切特性。各种研究方法都表明,在复合体变形 过程中,通过根系的拉伸和根系与土体之间的摩擦及 相互作用有利于提高土体的强度。

目前对根-土复合体强度特性研究主要从试验及 数值模拟两个方面展开,研究结果均表明根系对提高 根-土复合体强度有显著贡献,根系形态、分布形式和 根系含量对复合体强度有较大影响。但现有研究缺 少准确的模型描述该复合体的应力-应变行为和破坏 强度,且对根-土复合体抗剪强度的研究大多是基于固 定剪切面的直剪试验,不能反映根-土复合体的实际破 坏状态^[19-20]。本文通过一系列三轴试验研究了根-土 复合体强度特性,基于能量耗散原理建立了根-土复合 体的破坏准则,并通过试验结果验证了模型预测的精 度,为根系固土强度预测及植被选择提供理论参考。 在生态护坡技术推广的背景下,对根系加固土体的定 量研究具有重要的现实意义。

1 理论模型

利用根系与土体的摩擦以及根系的拉伸变形可 在一定程度上提高土体的强度。本文考虑根系拉伸 变形及根系与土体相对滑移产生的能量耗散,基于能 量耗散原理建立根-土复合体的强度预测模型。

1.1 模型假设

将根系的体积密度ρ定义为:

$$\rho = \frac{V_{\rm r}}{V} \tag{1}$$

式中: Vr---根系体积/cm3;

V——根-土复合体总体积/cm³。

复合材料的力学性质与其质量密度的相关性较小,因此在制备根-土复合体试样时选取根系的体积密度表示根系含量更为合适^[21]。

将根系视为圆柱体,定义其长径比:

$$\eta = \frac{L}{2r} \tag{2}$$

式中:η——根系长径比;

L──根系长度/m; r──根系半径/m。

将根系和土体视为理想塑性材料,分别用 Tresca 和 Mohr-Coulomb 失效准则对其进行描述,忽略围压 对根系拉伸强度的影响。进一步假设只有当根系被 拉伸时对复合体的强度提高有贡献,忽略根系在压缩 状态时对复合体强度的影响。

(9)

1.2 根系土破坏准则

1.2.1 复合材料中的能量耗散率

在复合材料变形过程中,单个根系的破坏可能是 由根系的滑移或拉伸断裂引起的。然而发生拉伸断 裂时,根系材料的拉伸强度不能在整个根系长度中发 挥作用,在根系两端也会发生滑移。当根系中发生拉 伸断裂时,在根系两端发生滑移的距离s表示为:

$$s = \frac{r}{2} \frac{\sigma_0}{\sigma_n \tan \varphi_w} \tag{3}$$

式中:σ₀——根系的屈服应力/kPa;

σ_n——根系表面的法向应力/kPa;

 φ_w —根系与土体界面的摩擦角/(°)。

当根系的长度 L<2s 时,根系为滑移失效。根据 Bordoloi 等^[22]的研究,在根-土复合体变形破坏过程 中,根系主要为滑移破坏,因此可得到与根系屈服应 力无关的破坏准则表达式。

土体在塑性变形过程中符合莫尔-库仑准则和关 联流动规律,其能量耗散率为零,只有根系会影响根-土复合体试样塑性变形过程中的能量耗散^[23]。因此 根-土复合体单位体积的能量耗散率定义为:

$$D_{\rm r} = \frac{1}{3} \rho \eta M p \tan \varphi_{\rm w} \cdot \varepsilon_1 + c \cos \varphi \left[1 + \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (4)$$

$$M = \left(\frac{1}{2} + \frac{\varphi}{\pi} + \frac{1}{\pi}\cos\varphi\right)\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - \frac{1}{2} - \frac{\varphi}{\pi} + \frac{1}{\pi}\cos\varphi \quad (5)$$

式中: Dr 一根-土复合体单位体积的能量耗散率;

c 土体黏聚力/kP;
 φ 土体内摩擦角/(°);
 ε₁ 最大主应变率;
 p 平均应力/kPa。

1.2.2 根系土的破坏准则

基于能量耗散原理建立根-土复合体的破坏准则。根-土复合体在变形过程中的能量平衡可定义为:

$$D_{\rm r} = \frac{\rho\sigma_0}{3} M \left(1 - \frac{1}{4\eta} \frac{\sigma_0}{p \tan\varphi_{\rm w}} \right) \varepsilon_1 + c \cos\varphi \left[1 + \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$
(6)

引入一个应力不变量 *R*, 定义为莫尔圆的半径, 则 根系土的破坏准则可表示为:

$$R = p\left(\sin\varphi + \frac{1}{3}N\rho\eta\tan\varphi_{\rm w}\right) + c\cos\varphi \tag{7}$$

其中,

$$N = \frac{1}{\pi}\cos\varphi + \left(\frac{1}{2} + \frac{\varphi}{\pi}\right)\sin\varphi \tag{8}$$

当不考虑根系的作用时,式(7)即为黏性土的莫 尔-库仑准则: $R = p\sin\varphi + c\cos\varphi$

提出的破坏准则式(7)需要5个参数:根系体积密 度ρ、根系长径比η、根系与土体界面摩擦角φ_w、土体 内摩擦角φ和土体黏聚力c,该准则适用于根系含量 低于10%的根-土复合体,以避免根系之间的相互作 用。当土体的内摩擦角和黏聚力恒定时,由式(7)可 知根-土复合体的破坏准则为一个线性函数。通过该 模型可研究根系种类、根系的分布密度、根长以及根 系与土体的相互作用对根-土复合体的强度特性的 影响。

2 材料及试验过程

2.1 试验材料

试验所用土料为取自都江堰市龙池镇的粉质黏 土,天然含水率为21.4%。制样之前将土料在100 ℃ 的烘箱中烘干,然后粉碎过2mm筛。根据室内土工 试验测得的土料物理力学性质见表1。

表 1 土料物理力学性质 Table 1 Physical properties of soil

液限/%	塑限/%	干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%
33.50	17.40	1.63	16.22

试验所用根系为西南地区常见的多年生木本植物小叶女贞(*Ligustrum quihoui*,图1)。小叶女贞根系发达,根系直径范围为0.2~6mm。选取直径为1.5mm的小叶女贞根系,制成长度为60mm的根段,洗净后用于制样。



图 1 小叶女贞根系 Fig. 1 Ligustrum quihoui root system

2.2 试验方法

试验采用英国 GDS 应力路径三轴仪,如图 2 所示,依据《公路土工试验规程》(JTGE 40-2007)^[24]进行固结不排水常规三轴试验,试样尺寸为:50 mm×

100 mm(直径×高度)。将根系及土料制成含水率为 16.22%、不同含根量(0.162%、0.324%、0.468%)的根-土复合体试样,分别在 200,600,1000 kPa 围压下进行 试验。试验剪切速率为 0.1 mm/min,轴向应变达到 20%时,停止加载。本文聚焦于研究根系含量对根-土 复合体力学性质的影响,根系分布采用竖直分布的方 式,不同含根量根-土复合体根系分布方式如图 3 所 示。复合体试样采用分层压实法进行制备。将拌和 至选定含水率的土料分 3 层进行压实。



图 2 GDS 应力路径三轴仪 Fig. 2 GDS stress path triaxial tester



Fig. 3 Diagrams sowing root distribution

第1层称取78.9g土料放入模具中压实,将表面 刮毛后,第2层称取236.7g土料放入模具中压实,最 后竖直插入准备好的根系,将表面刮毛后将剩余的土 料倒入模具压实,制作成不同含根量的根-土复合体。

3 结果与分析

3.1 三轴试验结果

素土及不同含根量的根-土复合体在不同围压下 的三轴试验结果如图 4、图 5 所示。由图 4 可以看出, 素土及不同含根量的根-土复合体曲线形状相似且都 表现出应变硬化的现象。随着围压逐渐增大,相同应变 对应的偏应力逐渐增大。素土(*p*=0)、围压为 1 000 kPa 时,轴向应变为 15% 对应的偏应力较围压为 200 kPa 时 增 加 了 2.85 倍; *p*=0.162%、围 压 为 1 000 kPa 时, 根-土复合体轴向应变为 15% 对应的偏应力较围压为 200 kPa 时增加了 2.61 倍; *p*=0.324%、围压为 1 000 kPa 时,根-土复合体轴向应变为15%对应的偏应力较围 压为200 kPa时增加了2.12倍。由图5可以看出,轴 向应变相同时,根-土复合体对应的偏应力较素土有 显著提高。围压为200 kPa、p=0.486%时的根-土复合 体偏应力较素土增大了1.70倍,围压为600 kPa、p= 0.486%时根-土复合体的偏应力较素土增大了1.40 倍,围压为1000 kPa、p=0.486%时根-土复合体的偏应 力较素土增大了1.26倍。以上分析表明,当围压较小 时根系对根系土的偏应力影响较大,随着围压的增 大根系对偏应力的影响逐渐减小。不同围压、不同含 根量的根-土复合体的偏应力见表2。当轴向应变较 小时,素土与根-土复合体偏应力较为接近,随着轴向 应变逐渐增大,素土与根-土复合体偏应力差异逐渐 增大。

3.2 根-土复合体抗剪强度

图 6 展示了素土及不同含根量的根-土复合体的



图 4 不同含根量时偏应力与轴向应变的关系 Fig. 4 Relationships between the deviatoric stress and axial strain with different root concentrations



图 5 不同围压下偏应力与轴向应变的关系



表 2 不同围压下不同含根量时的偏应力

 Table 2
 Deviatoric stress of different root concentrations under different confining pressures

围压/ kPa	偏应力/ kPa				
	素土	<i>ρ</i> =0.162%	<i>ρ</i> =0.324%	<i>ρ</i> =0.486%	
200	202.10	240.70	293.70	343.75	
600	386.45	428.39	496.91	541.91	
1 000	577.02	627.91	685.91	729.91	

抗剪强度指标变化,可知素土的黏聚力为44.28 kPa, 内摩擦角为10.94°。从图6可看出,根系显著提高了 根-土复合体的黏聚力,且根-土复合体的黏聚力随 ρ的增大逐渐增大,而内摩擦角变化较小,与素土较为 接近。这是由于根系与土体的相互作用及根系的抗 拉强度都会增加根-土复合体的黏聚力,这与陈昌富等^[5]的研究结论相同。在相同的应力条件下,根系土的抗 剪强度较素土有明显提高,表明根系的存在一定程度 上提高了土体的抗剪强度。围压为200 kPa时, ρ =0.162% 的根-土复合体的抗剪强度较素土增加了19.5%, ρ = 0.324%的根-土复合体的抗剪强度较素土增加了47.7%, ρ =0.486%的根-土复合体的抗剪强度较素土增加了 72.1%。围压为600 kPa时, ρ =0.162%的根-土复合体 的抗剪强度较素土增加了11.8%, ρ =0.324%的根-土复 合体抗剪强度较素土增加了28.2%, ρ =0.486%的根-土 复合体抗剪强度较素土增加了39.8%。围压为1000 kPa 时, ρ =0.162%的根-土复合体的抗剪强度较素土增加 了 9.3%, ρ=0.324% 的根-土复合体抗剪强度较素土增 加了 20.1%, ρ=0.486% 的根-土复合体抗剪强度较素土 增加了 27.5%。当围压较小时,根系对根-土复合体抗 剪强度的增强作用更显著。根系的存在一定程度上 限制了土体的变形,随着ρ的增大,根系对根-土复合 体抗剪强度的提高更为显著。根系的加入抑制了土体的剪切变形,且在低围压条件下加固效果更为明显。根系土在剪切过程中,部分剪应力通过根系与土的相互作用传递到根系,使根系被拉伸,进而有利于提高土体的抗剪强度。





3.3 试验结果与模型预测结果比较

依据室内试验确定了模型中各参数。根据三轴 试验确定了用于预测模型中的土体的内摩擦角 φ 及 黏聚力c。通过根土界面直剪摩擦试验确定根系与土 体界面摩擦角 φ_w ,该角度受根系表面的法向应力影 响,本文所用根土界面摩擦角采用宋维峰等^[18]的试验 结果,取 $\varphi_w=23^\circ$ 。

试验表明,复合体中的根系没有发生断裂,根-土 复合体破坏时,根系主要为滑移破坏。这与 Bordoloi 等^[23]的研究结论相符。采用式(7)对不同含根量的 根-土复合体破坏应力进行了预测。其中破坏时主应 力与*R*、*p*的关系可表示为:

$$\sigma_1 = p + R \tag{10}$$

$$\sigma_3 = p - R \tag{11}$$

式中: σ₁、 σ₃ — 最大、最小主应力/kPa。

素土及不同含根量根-土复合体的试验及模型预测结果如图7所示(其中纵坐标q为广义剪应力)。在理论模型中,假设根系为无弯曲完全竖直的掺入物,理论与试验的差距来源可能是理论模型忽略了根系在变形过程中的局部损伤以及根系受自然环境影响在实际中并不是完全竖直的,而这可能会增强根系与土体的相互作用。

从图 7 中可看出试验结果与预测结果是大致相符 的,说明通过基于能量耗散原理建立根-土复合体的破 坏准则的预测是有效的。当含根量较低时,模型的预 测结果较为理想。随含根量的增大,模型预测的结果 较试验结果偏大。根据 Michalowski等^[23]的分析可 知,将与莫尔-库仑准则相关的流动规则应用于根系土 强度的预测可能会高估根-土复合体的强度。



图 7 不同含根量根土复合体模型预测结果与试验结果对比 Fig. 7 Comparison between model and test results of the root-soil composite with different ρ

4 结论

(1)含根量对根系土的抗剪强度有显著影响,当 围压为 200 kPa 时,随着含根量的增加,根-土复合体 偏应力增加了 19.2%,抗剪强度增加了 72.1%,当围压 为 600 kPa 时,根-土复合体抗剪强度增加了 39.8%,当 围压为1 000 kPa 时,根-土复合体抗剪强度增加了 27.5%。 (2)含根量相同时, 围压为 200 kPa 根-土复合体抗 剪强度较素土增加了 47.4%, 围压为 1 000 kPa 根-土复 合体抗剪强度较素土增加了 20.1%, 处于低围压状态 时, 根系对土体剪切变形的抑制作用效果更明显, 根 系对土体抗剪强度提高贡献更显著。

(3)根系对土体黏聚力有显著影响,随着含根量的 增加,黏聚力逐渐增大,而根系对土体内摩擦角影响 较小,根系土的内摩擦角与素土较为接近。

参考文献(References):

- [1] 徐华,袁海莉,王歆宇,等.根系形态和层次结构对根 土复合体力学特性影响研究[J].岩土工程学报, 2022,44(5):926-935. [XU Hua,YUAN Haili,WANG Xinyu, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 926 - 935. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵亮. 根土复合体抗剪强度试验研究[D]. 长沙: 中南 林业科技大学, 2014. [ZHAO Liang. Experimental study on shear strength of root-soil composite[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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.
- [4] ABE K, ZIEMER R R. Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21(7): 1012 – 1019.
- [5] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041 2045.
 [CHEN Changfu, LIU Huaixing, LI Yaping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J].
 Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041 2045. (in Chinese with English abstract)]
- [6] SU L J, HU B L, XIE Q J, 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.
- [7] 杨幼清,胡夏嵩,李希来,等.高寒矿区草本植物根系 增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J].水文地 质工程地质,2018,45(6):105-113. [YANG Youqing, HU Xiasong, LI Xilai, et al. An experimental study of the soil shear strength reinforcement of a mine dump slope by herbaceous root systems in alpine regions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018,45(6):105-113. (in Chinese with English abstract)]

- [8] 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.
- [9] 何伟鹏,刘昌义,周国英,等.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[J].水文地质 工程地质, 2022, 49(2): 207 - 218. [HE Weipeng, LIU Changyi, ZHOU Guoying, et al. A study of the mechanical properties of herbaceous roots and rootsoil composite systems in the degraded alpine pasture artificially restored grassland[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 207 - 218. (in Chinese with English abstract)]
- [10] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3): 335 - 353.
- [11] MENG S Y, ZHAO G Q, YANG Y Y. Impact of plant root morphology on rooted-soil shear resistance using triaxial testing[J]. Advances in Civil Engineering, 2020. http:// dx. doi.org/10.1155/2020/8825828.
- [12] NG C W W, ZHANG Q, NI J J, et al. A new threedimensional theoretical model for analysing the stability of vegetated slopes with different root architectures and planting patterns[J]. Computers and Geotechnics, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103912.
- [13] MICHALOWSKI R L, CERMÁK J. Strength anisotropy of fiber-reinforced sand[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(4): 279 – 299.
- [14] DIAMBRA A, IBRAIM E, WOOD D M, et al. Fibre reinforced sands: experiments and modelling[J].
 Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(3): 238 250.
- [15] TOMOBE H, FUJISAWA K, MURAKAMI A. A Mohr-Coulomb-Vilar model for constitutive relationship in rootsoil interface under changing suction[J]. Soils and Foundations, 2021, 61(3): 815 – 835.
- [16] ATHANASOPOULOS G A. Results of direct shear tests on geotextile reinforced cohesive soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(11): 619 – 644.
- [17] LIU C N, ZORNBERG J G, CHEN T C, et al. Behavior of geogrid-sand interface in direct shear mode[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1863 – 1871.
- [18] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.根系与土体接触面相互作用特性试验[J].中国水土保持科学,2006,4(2):62-65. [SONG Weifeng, CHEN Lihua, LIU Xiuping. Experiment on characteristic of interface between root system and soil[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 62 65. (in Chinese with

English abstract)]

- [19] MUIR WOOD D, DIAMBRA A, IBRAIM E. Fibres and soils: a route towards modelling of root-soil systems[J].
 Soils and Foundations, 2016, 56(5): 765 - 778.
- [20] 王磊,朱斌,李俊超,等.一种纤维加筋土的两相本构 模型[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1326 - 1333.
 [WANG Lei, ZHU Bin, LI Junchao, et al. Two-phase constitutive model for fiber-reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1326 -1333. (in Chinese with English abstract)]
- [21] MICHALOWSKI R L, ČERMÁK J. Triaxial compression of sand reinforced with fibers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(2): 125 – 136.
- [22] BORDOLOI S, NG C W W. The effects of vegetation traits and their stability functions in bio-engineered slopes: a perspective review[J]. Engineering Geology, 2020. http:// dx. doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105742.
- [23] MICHALOWSKI R L, ZHAO Aigen. Failure of fiberreinforced granular soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(3): 226 - 234.
- [24] 中华人民共和国交通部.公路土工试验规程: JTGE 40-2007[S].北京:人民交通出版社, 2007. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTGE 40-2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)]

附: 根-土复合体破坏准则表达式的推导

基于能量平衡原理,根-土复合体破坏时土壤和根 系的能量耗散率等于作用于复合体表面的宏观应力 功率:

$$\sigma_{ij}\varepsilon_{ij} = \frac{1}{V} \int D(\varepsilon_{ij}) \mathrm{d}V \tag{1}$$

式中: σ_{i_i} , ε_{i_j} ——宏观应力和应变;

$$D(\varepsilon_{ij})$$
—能量耗散率。

根据与莫尔-库仑定律相关的流动规律可知:

$$\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = -\sin\varphi \tag{2}$$

式中:ε1、ε3---轴向和径向应变;

式(2)也可写为:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = -\tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \tag{3}$$

根-土复合体单位体积的能量耗散率定义为:

$$D_{\rm r} = \frac{1}{3}\rho\eta \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{\varphi}{\pi} + \frac{1}{\pi}\cos\varphi \right) \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - \frac{1}{2} - \frac{\varphi}{\pi} + \frac{1}{\pi}\cos\varphi \right]$$

 $\cdot p \tan\varphi_{\rm w} \cdot \varepsilon_1 + c\cos\varphi \left[1 + \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \right]$ (4)

式中:
$$D_r$$
 — 根-土复合体单位体积的能量耗散率;
 ρ, η — 根系体积密度和长径比;
 φ_w — 根系与土体的界面摩擦角;
 c — 土体黏聚力。
其中,
 $M = \left(\frac{1}{2} + \frac{\varphi}{\pi} + \frac{1}{\pi}\cos\varphi\right) \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - \frac{1}{2} - \frac{\varphi}{\pi} + \frac{1}{\pi}\cos\varphi$
(5)

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tag{6}$$

式中:
$$p$$
—平均应力;
 σ_1, σ_3 —轴向和径向应力。
则式(4)可表达为:
 $D_r = \frac{1}{3} \rho \eta M p \tan \varphi_w \cdot \varepsilon_1 + c \cos \varphi \left[1 + \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)\right]$ (7)

 $\varepsilon_1 \sigma_1 + \varepsilon_3 \sigma_3 = D_r$

$$= \frac{1}{3}\rho\eta M p \tan \varphi_{w} \cdot \varepsilon_{1} + c \cos \varphi \left[1 + \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$
(8)

将式(3)代人式(8)可得:

$$\sigma_{1} - \tan^{2}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sigma_{3} = \frac{1}{3}\rho\eta Mp \tan\varphi_{w} + c\cos\varphi \left[1 + \tan^{2}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)\right]$$
(9)

引入一个应力不变量 R, 定义为莫尔圆的半径:

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \tag{10}$$

联立式(6)和(10)可得:

$$\begin{cases} \sigma_1 = R + p \\ \sigma_3 = p - R \end{cases}$$
(11)

将式(11)代入式(9)整理得到根-土复合体破坏准则表达式:

$$R = p\left(\sin\varphi + \frac{1}{3}N\rho\eta\tan\varphi_{w}\right) + c\cos\varphi \qquad (12)$$

$$N = \frac{1}{\pi}\cos\varphi + \left(\frac{1}{2} + \frac{\varphi}{\pi}\right)\sin\varphi \tag{13}$$

编辑:张明霞