

DOI: 10.11779/CJGE2020S1035

组合根系加固坡土的直剪试验及数值模拟

王一冰, 吴美苏, 周成*

(四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 随着生态护坡技术的不断发展, 植被根系固土护坡的作用越来越受到重视。护坡植物根系大多主根与侧根相辅相成, 因此针对单根的剪切试验往往不能正确反映真实环境中根系固土的作用机制。为揭示真实根系固土的力学机制, 量化根系倾角对坡土的强度影响, 开展了侧根倾角分别为 30° , 45° , 60° 的组合根系加固坡土的大型直剪试验及数值模拟。结果表明: 组合根系能明显提高土体抗剪强度, 试验用的根系增加的抗剪强度最大为 6.36 kPa ; 外部剪切荷载主要由前侧根承担, 组合根系对土体抗剪强度的贡献依次为前侧根、主根、后侧根; 随侧根倾角的增加, 前侧根受到的轴向拉力增加, 前侧根产生的拉伸变形增大, 前侧根附近塑性区分布范围增大, 表明前侧根能调动周围更大范围的土体抵抗剪切, 根系固土效果增强。

关键词: 根-土复合体; 组合根系; 根系倾角; 抗剪强度; 数值分析

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0177-06

作者简介: 王一冰(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: 951283894@qq.com。

Direct shear tests and numerical simulation on slope soils reinforced by composite roots

WANG Yi-bing, WU Mei-su, ZHOU Cheng

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the development of bioengineering stabilization techniques for slope protection, the role of root reinforcement in slope protection has been paid more and more attention to. The primary root and the lateral root are complementary to each other in most root systems. Therefore, the shear tests with single root often fail to reflect the mechanism of root-soil reinforcement in the real vegetated slopes. In order to reveal the reinforcement mechanism of composite roots and quantify the influences of root angle to the strength of slope soils, the large-scale direct shear tests and numerical simulations are carried out to study the effects of composite roots on the shear strength of soils, with lateral root angles of 30° , 45° and 60° . The results show that composite roots can obviously improve the shear strength of soils, and the maximum shear strength increased by the roots is 6.36 kPa . The external shear load is primarily carried by the lateral root opposite to the shear direction (i.e., the front lateral root), and the consequence of the contribution of composite roots to the shear strength of soil in values is as follows: the front lateral root, the primary root and the posterior lateral root. With the increase of lateral root angle, the axial force and the tensile deformation on the front lateral root increases, and the distribution of the plastic zone near the front lateral root increases, which shows that the front lateral root can mobilize more soils around it to resist shear force, and the soil reinforcement effects of composite roots are enhanced.

Key words: root-soil composite; composite root; root angle; shear strength; numerical analysis

0 引言

植被是天然的工程师, 植被护坡作为一种新型的护坡方法, 具有减少坡面侵蚀, 稳定浅层坡土, 美化生态环境等的优点, 在浅层边坡防护工程中得到广泛应用^[1]。因此, 对实际工程应用来讲, 量化植被根系对坡土的加固作用具有重要意义。

量化根系对坡土加固的研究包括理论模型预测和

试验手段分析。根系固土模型从最初极限力学平衡模型发展到后来的位移模型、纤维束模型和根系束模型, 模型预测的准确度得到提高, 但也增加了模型计算分

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167); 四川省重点研发项目(2020YFS0295)

收稿日期: 2020-06-03

*通信作者(E-mail: czhou@scu.edu.cn)

析的难度及复杂性。利用试验手段, 学者发现根系对坡土的力学加固表现为加筋作用、锚固作用及牵引作用^[2], 而加固作用的发挥受根系分布形态^[3]、根系数量^[4]、根系抗拉强度^[5]、根土界面摩擦力^[6]等多方面因素的影响。总的来讲, 针对根系固土机制的研究已取得较大进展, 但分析国内外文献, 发现目前有关根系在剪切面上的相对倾角对土体强度影响的研究还略显不足。

Fan 等^[7]通过在根系不同位置粘贴应变片的方式进行含根系土的现场直剪试验, 揭示了根系倾角对根系受力变形模式的影响; 王涵等^[8]进行不同根系倾角的单根的根-土复合体室内剪切试验, 发现根系与剪切面的夹角呈钝角时能明显提高土体的抗剪强度。而根系实际生长过程中, 往往以主侧根辅生的形式分布于土体中, 仅仅研究单根根系倾角对土体加固作用还远远不够, 有必要深入研究组合根系条件下根系倾角对土体加固作用的影响机理。

为揭示组合根系工况下不同侧根倾角对坡土抗剪强度的影响, 量化组合根系的固土作用, 进一步为植被护坡的实际工程应用提供数据支撑, 本文开展了侧根倾角分别为 30°, 45°, 60° 工况下组合根系固土的大型直剪试验和数值模拟。

1 组合根系固土直剪试验

1.1 试验用土及根系制备

试验土料为含砾低液限黏土基本物理特性指标见表 1。土体的填筑干密度为 1.48 g/cm³, 含水率为 12%。试验所用根系为无损伤且生长平直的活性革命草根系。组合根系包含一主根与两侧根, 根径 7~9 mm, 主根长 40 cm, 侧根长 20 cm, 侧根在主根深度以下 15 cm 处形成分叉节点。采用尼龙扎带绑扎固定侧根和主根的交叉处并固定设置好侧根倾角, 保证侧根分叉节点处主根和侧根的协调变形。定义侧根倾角 α 为侧根与主根(垂直向)的夹角, 其中前侧根为靠近剪切方向的侧根, 后侧根为远离剪切方向的侧根。共制备三组侧根倾角分别为 30°, 45°, 60° 的试验用组合根系复合土。

表 1 试验土料基本物理特性指标

Table 1 Basic physical properties of test soils

颗粒相对密度 G_s	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	干密度 ρ_{dmax} /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 w_{op} /%	饱和度 k_{sat} /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
2.66	33.7	20.0	1.75	17.0	8.15×10^{-5}

1.2 试验仪器

试验仪器主要包括自制加工的大剪切盒(尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm)、两个大量程百分表(1~

50 mm)、施加剪力的千斤顶(最大量程 1 t, 最大位移 442 mm)、测力计系统(最大量程 500 kg, 精度 0.1 kg)。

1.3 试验方案

根据《土工试验规程》规定: 剪切盒底边应在剪切面以上, 并留一定间隙^[9]。试验前在剪切盒两侧安装固定两条平行轨道, 并保证轨道高于剪切面 5 mm 左右。试样填筑前在剪切盒内壁和轨道上涂抹凡士林, 以减小摩擦。采用分层静压、层面凿毛的方式进行填筑, 试样制备完成后用塑料薄膜遮盖并静置 12 h。

试验在模型箱中进行, 模型箱尺寸为 775 mm×530 mm×300 mm, 组合根系及剪切盒在模型箱中的布置如图 1 所示^[10]。为避免剪切过程中剪切盒上翘, 测力计应尽量靠近剪切面中心线, 以减小剪力产生的弯矩作用。同时在加载过程中固定千斤顶位置, 以保证加载方向始终平行于剪切面。控制剪切加载速率约为 2~3 mm/min。剪切位移达 5 cm 或剪力出现峰值停止试验。为保证剪力和剪切位移的一一对应, 整个试验数据全程自动记录, 每隔 10 s 读取测力计和百分表读数。

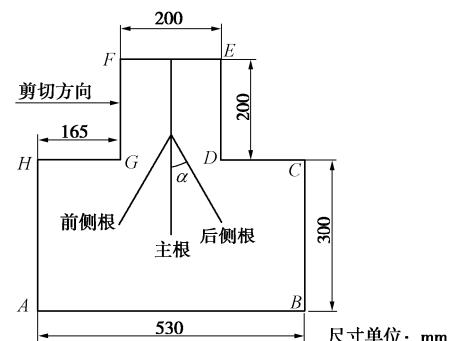


图 1 组合根系固土的直剪试验示意图

Fig. 1 Schematic of direct shear tests with composite root-soil reinforcement

1.4 试验结果及分析

在大型直剪试验中, 应考虑面积修正, 并扣除系统摩擦, 剪应力表达式为

$$\tau = \frac{F - f}{S} \quad , \quad (1)$$

式中, S 为剪切面有效面积 (m^2), $S = B \times (L - x)$, B 为剪切面宽度 (m), L 为剪切面长度 (m), x 为剪切位移 (m), F 为千斤顶推力 (kN), f 为空剪切盒的滑动摩擦力 (kN)。

在试验之前测定空剪切盒在轨道上匀速运动的滑动摩擦大小为 15 N。素土试验结果表明, 剪切曲线呈软化型, 在剪切位移为 1.5 mm 即达到峰值强度为 7.84 kPa, 素土的抗剪强度指标 c 为 6.94 kPa, φ 为 27.8°。

(1) 组合根系变形分析

剪切完成后, 各工况下的组合根系如图 2 所示。由于侧根倾角 30° 和 45° 工况下根系未全部断裂, 无法获取准确的剪切面形态, 故只展示了剪切完成后剪切面以上的根系的形态。

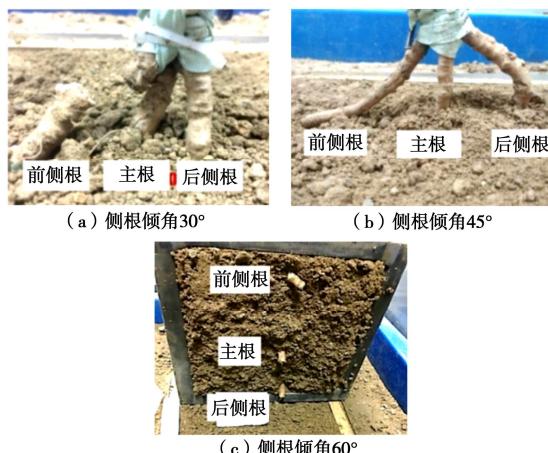


图 2 剪切完成后不同侧根倾角组合根系的形态

Fig. 2 Diagram of composite roots with different angles of lateral root after shearing tests

在剪切过程中, 植物根系通过沿根土表面的界面摩擦和根系本身的受拉性能, 从而提高了土体的抗剪强度。从力学角度分析, 随着侧根倾角的增加, 水平剪力在侧根轴向的分力增加, 侧根沿轴向的拉伸变形增加。侧根倾角 30° 工况下, 剪切完成时前侧根被拉断, 主根和后侧根未发生断裂; 侧根倾角 45° 工况下, 剪切完成时前侧根被拉断, 主根未发生断裂, 后侧根一组被折断, 一组未发生断裂; 侧根倾角 60° 工况下, 剪切完成时前侧根和主根被拉断, 后侧根被折断。剪切完成后各侧根倾角的组合根系的变形数据详见表 2。

表 2 剪切完成后不同侧根倾角组合根系的变形数据

Table 2 Deformation data of composite roots with different angles of lateral roots after shearing tests

侧根倾角 / (°)	前侧根断裂时位移/mm	主根断裂时剪切位移/mm	前侧根拉伸应变率/%	主根拉伸应变率/%	后侧根拉伸应变率/%
30	27.2	—	1.70	1.25	0.43
45	27.0	—	1.74	0.50	0.00
60	12.0	34.8	2.28	1.01	0.46

分析表 2 数据发现, 随着侧根倾角的增加, 根断裂时对应的剪切位移越小。对比可知, 前侧根拉伸应变率最大, 表明前侧根较主根和后侧根承受更大的拉力, 在抵抗土体剪切破坏过程中发挥的作用较大, 因此也更容易发生断裂。进一步分析不同侧根倾角下的前侧根拉伸应变率发现, 随着侧根倾角的增加, 前侧

根产生的拉伸变形量也随之增大, 表明根系固土效果越好。

(2) 剪切曲线分析

选取各工况中剪切速率控制较为接近的试验组结果进行对比分析, 不同侧根倾角剪切曲线试验结果如图 3 所示。

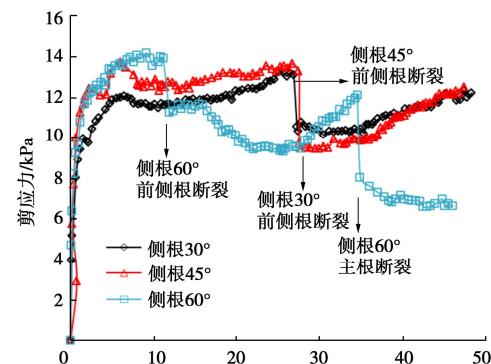


图 3 不同侧根倾角组合根系的剪切曲线

Fig. 3 Shear stress vs. shear displacement curves of composite roots with different angles of lateral roots

剪切曲线结果表明, 30° 和 45° 侧根剪切曲线只有一个剪应力突变点, 对应前侧根的断裂; 而 60° 侧根剪切曲线出现两个剪应力突变点, 对应前侧根和主根的断裂。虽然 60° 侧根试验中后侧根也发生断裂, 但在剪切曲线上没有明显的剪应力突变点与之对应, 说明后侧根对土体强度的贡献较小, 提供的抗剪强度值低。综合而言, 组合根系固土作用下, 剪切初期剪力主要由前侧根承担, 当前侧根断裂后, 主根固土作用逐步凸显, 根-土复合体抗剪强度又逐步提高, 剪切曲线呈现出上升趋势。

将不同侧根倾角工况下的组合根系提高的抗剪强度值总结如表 3 所示, 其中素土的峰值抗剪强度为 7.8 kPa。对比各倾角下根-土复合体的抗剪强度值可发现, 组合根系工况下的抗剪强度高于无根系(素土)工况, 且随着侧根倾角的增加, 根-土复合体抗剪强度逐步增大, 但增加的幅度较小。侧根一方面增加了作用于剪切面的根土面积比, 分担了主根承担的剪力; 另一方面侧根的斜向牵引作用和主根的锚固作用协同抵抗剪切, 二者共同提高了根-土复合体的抗剪强度。

表 3 不同侧根倾角的根土复合体的抗剪强度

Table 3 Shear strength of root-soil composites with different angles of lateral roots

侧根倾角 / (°)	峰值抗剪强度 / kPa	提高的峰值强度 / kPa	峰值强度增幅 / %
30	13.3	5.4	69.1
45	13.7	5.9	75.3
60	14.2	6.4	81.1

2 组合根系固土的直剪试验数值模拟

为与直剪试验结果进行对比分析, 利用 PLAXIS 数值软件进行相同工况下的数值计算。

2.1 模型建立及边界条件

有限元计算建模的尺寸和根系布置与直剪试验方案一致, 组合根系计算模型如图 4 所示。计算模型边界条件与试验部分一致, 模型底部为垂直和水平双向约束, 地基两侧为水平位移约束, 受剪土体与剪切方向平行的两侧 (58 和 49) 施加 5 cm 的水平位移边界, 其余为自由边界条件。只考虑试样在自重应力作用下的剪切, 不考虑法向应力的影响^[10]。采用设置薄层土体单元的方法模拟剪切面, 设置薄层单元厚度为 5 mm。

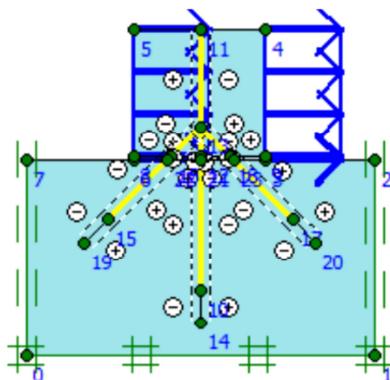


图 4 直剪试验计算模型示意图

Fig. 4 Schematic of simulation model in direct shear tests

2.2 计算模型参数选取及网格划分

土体采用莫尔-库仑本构模型, 考虑到试验过程中剪切速率较快, 选择材料类型为不排水; 考虑根系抗拉不抗压的性质, 采用格栅单元模拟根系, 设置根系为弹性本构模型, 根系弹性模量的取值参考 Beek 等^[11]的取值; 薄层单元的土体抗剪强度参数设置为周围土体强度参数的 0.8 倍; 在根系周围设置界面单元以模拟根土界面摩檫作用, 由于试验中根土界面接触良好, 设置界面单元土体强度参数取值与周围土体一样。直剪试验数值模拟的具体参数取值见表 4。为合理判断剪切面土体破坏类型, 允许剪切面土体发生拉伸破坏即用“拉伸截断”确定土体参数, 并设置抗拉强度为 0.5 kPa (较小值)。采用施加剪切位移边界条件的方式模拟剪切, 当达到设定的剪切位移 (5 cm) 或土体发生破坏时则计算结束。

2.3 计算结果及分析

(1) 变形后的塑性区分布分析

不同侧根倾角组合根系模型变形后的塑性区分布如图 5 所示, 其中红色点表示土体发生屈服。

表 4 直剪试验数值计算参数

Table 4 Numerical model parameters in direct shear tests

类型	$\gamma_{\text{天然}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_{\text{饱和}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	E / kPa	μ
土体 (裸土)	16.6	20	6.94	27.8	8000	0.25
根系	—	—	—	—	50000	—
薄层单元	16.6	20	5.55	22.2	8000	0.25

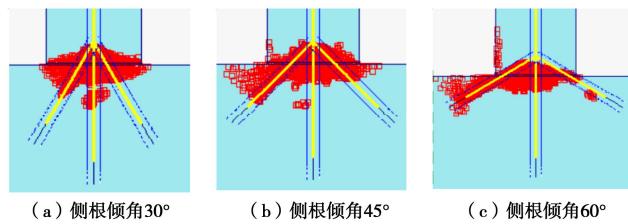


图 5 不同侧根倾角组合根系模型的塑性区分布

Fig. 5 Plastic zone distribution of composite root-soil reinforcement models with different angles of lateral roots

观察图 5 可以发现, 侧根倾角 30° 工况下, 塑性区分布范围较 45° 侧根和 60° 侧根小, 塑性区分布于根系靠近剪切面的长度范围内; 侧根倾角 45° 工况下, 塑性区分布开始向前侧根 3/4 长度范围内发展; 侧根倾角 60° 工况下, 前侧根全长范围内均分布有塑性区, 后侧根附近的塑性区分布则有减少。以上结果表明, 塑性区分布受侧根倾角的影响, 随着侧根倾角的增加, 前侧根附近塑性区增多。从根系固土机制的角度分析, 意味着随侧根倾角的增加, 前侧根能调动周围更大范围的土体抵抗剪切, 根系发挥的固土作用增强。从根系受力变形的角度分析, 根系通过根-土界面摩擦力, 将土体所受剪力转化为作用于根系上的拉力, 因此前侧根附近塑性区的增多代表前侧根所受拉力的增加, 这与直剪试验中随侧根倾角增加前侧根拉伸应变率增大的结果相吻合。

(2) 根系轴力分布分析

在 PLAXIS 中, 定义轴力以拉为正, 各侧根倾角工况下组合根系轴力分布如图 6 所示。结果表明, 组合根系工况下, 外部剪力主要由前侧根承担, 主根承受较小的荷载, 后侧根几乎不受力的作用。前侧根承担了主要外部荷载, 约束了主根的位移, 与直剪试验中前侧根发生断裂, 主根和后侧根不易断裂的现象一致。

根据根系轴力分布可以发现, 侧根越倾斜, 侧根锚固作用越弱, 牵引作用越强, 且随着侧根倾角的增加, 前侧根受到的最大轴力增加。数值模拟结果显示, 在 30°, 45°, 60° 侧根工况中, 前侧根受到的最大轴力分别为 810.7, 912.8, 1030.0 N/m。但随着侧根

倾角的增加, 主根和后侧根受到的轴力变化不大。与前侧根相比, 主根受到的最大轴力和轴力分布范围均较小, 后侧根几乎无轴力分布。组合根系工况下, 侧根的牵引作用和主根的锚固作用协同抵抗剪切, 共同提高了根-土复合体抗剪强度。因此在植被护坡中, 选择主侧根系发达的乔木有利于提高植被固土的有效性。

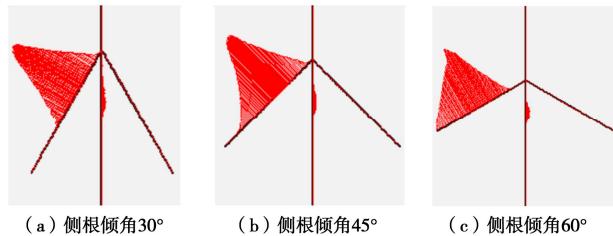


图 6 不同侧根倾角组合根系的轴力分布

Fig. 6 Axial force distribution of composite root with different angles of lateral root

(3) 剪切曲线分析

将组合根系工况下各侧根倾角的根-土复合体剪切曲线计算结果与试验结果整理如图 7 所示。因采用土工格栅结构单元模拟根系, 不能模拟根系突然发生脆性断裂情况, 故剪切曲线对比只考虑根系断裂前的部分。结果表明, 30° 和 45° 侧根工况下根系断裂前计算剪切曲线与试验结果吻合度较好; 60° 侧根剪切曲线初始段与试验值吻合较好, 但随着剪切位移的增加, 试验值高于计算值。分析原因在于, 土体受到剪切时, 实际上根系除了承受拉力外, 本身也承受一定的剪力, 随着侧根固土能力的发挥该作用更加明显, 因此试验值高于计算值。

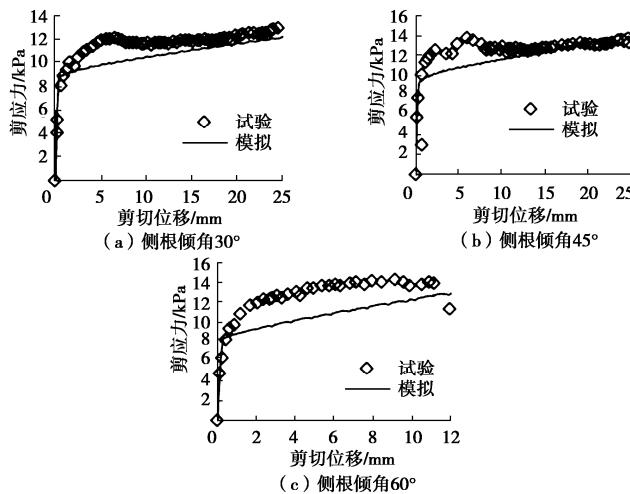


图 7 剪切曲线试验结果与模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of shear stress vs. shear displacement curves between test and simulated results

将不同侧根倾角的根-土复合体抗剪强度计算值

与试验值整理如表 5 所示。30° 和 45° 侧根工况下抗剪强度计算结果与试验结果较为吻合, 误差均小于 20%; 60° 侧根工况下抗剪强度计算误差达到 40.7%。分析其原因在于, 60° 侧根试验过程中前侧根和主根均发生断裂, 而计算中没有考虑根系断裂的影响, 根系能一直提供强度, 导致抗剪强度的误差较大; 而 30° 和 45° 侧根工况下试验中只有前侧根发生断裂, 主根未断裂, 计算结果与试验曲线误差相对较小。

表 5 不同侧根倾角的根-土复合体抗剪强度对比

Table 5 Comparison of shear strength of root-soil composites with different angles of lateral roots

侧根倾角/(°)	根-土复合体的抗剪强度		
	试验结果/kPa	计算结果/kPa	误差/%
30	13.3	14.2	7.0
45	13.7	16.1	17.3
60	14.2	20.0	40.7

3 结 论

(1) 组合根系能明显提高土体抗剪强度, 对土体抗剪强度的贡献依次为前侧根、主根、后侧根。根-土复合体的抗剪强度随侧根倾角的增大而增大, 具体表现为 $\Delta\tau_{\alpha=30^\circ} < \Delta\tau_{\alpha=45^\circ} < \Delta\tau_{\alpha=60^\circ}$ 。试验结果表明, 根系增加的抗剪强度最大为 6.4 kPa。

(2) 剪切过程中, 随侧根倾角的增加, 前侧根产生的拉伸变形量增大, 前侧根轴力分布范围和最大轴力增大, 前侧根附近塑性区分布增多, 表明前侧根能调动周围更大范围的土体抵抗剪切。

(3) 剪切完成时, 各倾角前侧根均为拉断破坏。侧根断裂时剪切位移随侧根倾角的增加而减小, 表明较大倾角的侧根能明显限制土体的剪切位移。

(4) 根-土复合体抗剪强度计算值与试验值有一定误差, 主要原因在于根系模型的选用不能模拟实际根系受力情况。建议在以后的尝试中选用 2 次差值梁单元进行模拟, 提高抗剪强度计算精度。

参考文献:

- [1] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1 - 47. (WU Hong-wei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1 - 47. (in Chinese))
- [2] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (ZHOU De-pei, ZHANG Jun-yun. The Engineering Technique for Slope Protection by

- Vegetation[M]. Beijing: China Communication Press, 2003. (in Chinese))
- [3] FAN Chia-Cheng, TSAI Ming-Hung. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, **156**: 1 – 15.
- [4] MICKOVSKI S B, STOKES A, Van BEEK R, et al. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(10): 1523 – 1532.
- [5] CAPILLERI P P, CUOMO M, MOTTA E, et al. Experimental investigation of root tensile strength for slope stabilization[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2019, **49**(6): 687 – 697.
- [6] NIU J T, LIU Z Y, JIN C, et al. Physical and Numerical Simulation of Materials Processing[M]. Switzerland: Trans Tech Publications Inc, 2008: 1210 – 1216.
- [7] FAN C C, TSAI M H. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **156**: 1 – 15.
- [8] 王 涵, 周 成, 刘 伟, 等. 植物根系倾角对土体抗剪强度影响试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2017(增刊 1): 81 – 88. (WANG Han, ZHOU Cheng, LIU Wei, et al. Shear test for root reinforced soil samples considering the inclination of roots[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017(S1): 81 – 88. (in Chinese))
- [9] 土工试验规程: SL237—1999 [S]. 1999. (Specification of soil test: SL237—1999[S]. 1999. (in Chinese))
- [10] 吴美苏. 根系固土剪切特性的试验与数值模拟[D]. 成都: 四川大学, 2019. (WU Mei-su. Experiment and Numerical Simulation of Shear Characteristics of Root Reinforcement on Soil[D]. Chengdu: Sichuan University, 2019. (in Chinese))
- [11] BEEK L P H V, WINT J, CAMMERAAT L H, et al. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned mediterranean slopes[J]. *Plant and Soil*, 2005, **278**(1/2): 55 – 74.

(编校: 孙振远)