

生态型稳定剂协同植物根系固土特性及机理研究

梅红,马柯,刘瑾,王禄艺,冯玉晗,齐梦瑶,胡梦园

(河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100)

摘要:为分析生态型稳定剂对植物根系固土特性的影响,对根系-生态型稳定剂-黏性土复合体进行直接剪切试验,研究了不同根系数量和不同生态型稳定剂含量条件下复合体的抗剪强度参数、剪切模量和总变形能量,结合试样产生的剪切位移,探究了边坡植被固土剪切特性及其加固机理。结果表明:植物根系的掺入增强了土体的抗剪强度;当生态型稳定剂质量分数大于1%时,其对复合体抵抗变形的影响较为明显;生态型稳定剂在土体中形成网状结构,促进土体内黏性土团聚体形成,增强了土体的黏聚力,与植物根系相互作用提高了土体抗剪强度特性。

关键词:植物根系;生态型稳定剂;固土特性;抗剪强度;剪切试验

中图分类号:TU411.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0052-07

Study on characteristics and mechanisms of soil reinforcement by plant roots and ecotypic stabilizer//MEI Hong, MA Ke, LIU Jin, WANG Luyi, FENG Yuhan, QI Mengyao, HU Mengyuan (*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: To analyze the effects of ecotypic stabilizer on soil reinforcement of plant roots, direct shear tests were conducted on the root-ecotypic stabilizer-clay complex, and the shear strength parameters, shear modulus and total deformation energy of the complex under different root numbers and different ecotypic stabilizer contents were studied. Combined with the shear displacement generated by the samples, the shear characteristics and reinforcement mechanism of vegetation soil reinforcement were explored. The results show that the shear strength is increased by plant roots. When the content of the ecotypic stabilizer is greater than 1%, its influence on the complex deformation resistance is more obvious. The ecotype stabilizer forms a network structure in soil, which can promote the formation of cohesive soil aggregation, enhance the cohesion, and interact with the plant roots to improve the shear strength of the soil.

Key words: plant roots; ecotypic stabilizer; soil reinforcement characteristics; shear strength; shear test

随着我国城市化进程的推进,对基础设施建设中形成的人工边坡的绿色生态要求越来越高。边坡生态防护技术涉及植物学、景观学、环境工程、地质工程等多种学科^[1]。客土喷播是通过喷播机按设计厚度将土体均匀喷射到预定区域建植草坪的高效复绿技术,由于常规客土喷播后坡面存在土体流失现象,所以常利用固化材料对土体进行加固处理^[2]。将人工护坡材料与植物护坡技术相结合,利用植物根系的加筋与锚固作用,在保证边坡稳定的同时,满足了生态建设需求^[3]。

作为一种新型的土体加固材料,高分子材料兼具改良土体与生态环保特性,近年来逐渐被应用于坡面防护、治理扬尘、防止水土流失、防风固沙等领域^[4-5]。国内外学者针对高分子聚合物增强土体力

学特性的机理与影响开展了大量的试验研究。Chenu等^[6]对多糖高聚体加固高岭土、蒙脱土进行强度试验,发现高分子聚合物在土颗粒表面形成薄膜,提高了土体强度。Nadler等^[7]发现聚丙烯酰胺与土体结合后,经过一定养护时间在土体颗粒之间干燥成膜,增强了土体的稳定性。石肖肖等^[8]提出,γ-聚谷氨酸可以促进土体团聚体的形成,使得改良土体具有极强的保水保肥能力。Liu等^[9-10]通过强度试验、水稳试验、抗冲刷试验等,发现高分子聚合物可以增强土体的力学与水理性质,其作用机理为高分子聚合物在土体内填充、包裹和桥接,促进土体内团聚体的形成,进而改良土体性质。

植被护坡技术在防护的长期性与经济性方面优于传统工程护坡技术。植被护坡中常用的植物有草

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(202110294055)
作者简介:梅红(1976—),女,高级实验师,硕士,主要从事精密工程测量、变形监测与安全监控研究。E-mail:meihong@hhu.edu.cn
通信作者:刘瑾(1983—),女,教授,博士,主要从事环境地质工程研究。E-mail:jinliu920@163.com

本类,如黑麦草、狗牙根等,灌木类如紫穗槐、胡枝子等。植物根系可以与周围土体结合形成土-根复合体,增强土体的黏聚力^[11-12]。国外学者利用原位试验与室内试验,采用不同的假设方法建立了一系列植物根系加固土体的数学模型^[13-15]。Casagrande等^[16-17]通过对比素土试样与掺入根系试样的剪切强度,量化了植物根系对提高土体抗剪强度性能的贡献。曾红艳等^[18]利用自制大型直剪试验装置,对单根植物根系的土-根复合体进行直接剪切试验,发现植物根系可以提高土体的抗剪强度。Simon等^[19-20]研究了基质吸力对抗剪强度的影响,发现植物根系对于复合体的增强作用主要体现在增强土体的黏聚力方面。邢书昆等^[21]对退耕土体不同深度土层进行了根-土复合体原位剪切试验,获得了根系密度、土体团聚体稳定性和土体有机质含量与复合体之间的关系。吴忠等^[22]研究了植物与高分子固化剂复合改良砂土边坡的抗冲刷特性,发现复合加固使改良砂土具有良好的抗冲刷特性。

聚醋酸乙烯酯具有较强的黏结能力,可以增强黏性土的亲水性、改善黏性土的团聚体结构,是常用的生态型稳定剂。植物根系可以增强土体之间的摩擦力,提高土体黏聚力,增强土体强度特性。本文采用聚醋酸乙烯酯和植物根系开展边坡植被固土工程特性及生态型稳定剂增强土-根复合体抗剪强度特性试验研究,以期生态护坡工程提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用的黏性土取自江苏省南京市江宁区,基本物理参数为:比重 2.70,最大干密度 1.70 g/cm³,最优含水率 18.0%,塑限 21.1%,液限 38.4%,塑性指数 17.3。根据 GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》,此类黏性土为低液限黏土。黏性土的颗粒粒径分布以细粒(粒径小于 0.075 mm)为主,粗粒(粒径介于 0.075~60 mm 之间)含量少,其中细粒质量分数约为 78.84%。

根据土体性能选择聚醋酸乙烯酯型(PVAc)生态型稳定剂作为改良土-根复合体的高分子材料。聚醋酸乙烯酯是一种乳状液体,外观呈乳白色,是一种具有极性羧基和长链大分子的有机高分子材料,因其价格低廉、使用方便、无毒环保,被大量用于土体加固工程,其基本物理参数为:比重 1.05~1.07,黏度 400~3000 MPa·s,pH 值 6~7,固含量 41%~45%,凝胶率 1.48~1.53%。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)是被广泛应用于我国边坡植被防护的落叶灌木,是豆科紫穗槐属植物。

因其具有加固边坡、减少水土流失、成活率高、改良土壤肥力等优点,被广泛应用于生态护坡工程中。紫穗槐根系极为发达,具有明显主根,是典型的直根系植物。2~3年生紫穗槐极细根(根径小于 0.5 mm)虽在土壤中分布较多,但平均根长较短,与土体接触面较小;极粗根(根径大于 5 mm)分布范围小,对于土体的加固主要为锚固作用;其余侧根的根径为 0.5~5 mm,在土体中分布范围较广,且与土体的接触面积最大,在边坡加固中发挥主要作用。

1.2 试验方法

参考 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行试样制备,试样高度与直径分别为 20 mm 和 61.8 mm。根据击实试验结果,试样干密度为 1.70 g/cm³,含水率为 18%。植物根系长度根据试样高度设定为 20 mm,选取平均根径为 1 mm 的 3 年生紫穗槐根系,裁剪至 20 mm 备用。将取得的土样烘干、碾碎,并过 10 目网筛备用。试验设置根系数量 $n=0、4、6、9$,生态型稳定剂含量(质量分数) $P=0、0.5\%、1\%、2\%、3\%$,具体试验方案如表 1 所示,共开展 14 组试验,每组有 3 个平行样。

表 1 试验方案

试验编号	$P/\%$	n	试验编号	$P/\%$	n
1	0	0	8	0.5	9
2	2	0	9	1	9
3	0	4	10	2	9
4	2	4	11	3	9
5	0	6	12	0.5	0
6	2	6	13	1	0
7	0	9	14	3	0

制样过程中,按设计参数称取适量的蒸馏水和黏性土,将蒸馏水与黏性土充分搅拌,混合均匀备用,将模具内壁均匀涂抹凡士林,先将 1/2 混合均匀的黏性土倒入模具,在倒入的土体上放入定制根系定位薄片,根据薄片上的小孔分布在土体上标记植物根系的分布位置,取出薄片后将配置好的植物根系垂直插入土体。层面刮毛之后将剩余的黏性土倒入模具,利用千斤顶将试样压制到设计的高度,等待 3~5 min 后解除荷载,取出制备完成的试样,并在试样顶面与底面标记植物根系分布位置,以便剪切试验时辨认试样的装入方向。

试验使用的仪器是南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪。试验设置的剪切速率为 1.2 mm/min。参考 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行试验。具体的试验过程:①将试样根据试验要求放入剪切盒内,根据制样时标记的植物根系分布位置,放入剪切盒。试样顶面和底面均垫有与试样相同含水率的滤纸;②对装好的试样施加

100、200、300 kPa 的法向压力;③启动推力座,向前推进至推力座、剪切盒和量力环充分接触,使量力环中的百分表有读数;④拔去固定销钉,将百分表调0,对试样进行直接剪切直至试样完全破坏。记录百分表读数与相应的手轮转数,绘制剪应力-剪切位移曲线。剪应力与剪应变计算公式分别为

$$\tau = \frac{4.726R}{A_0} \times 10 \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{61.8} \times 100 \tag{2}$$

式中: τ 为剪应力,kPa; R 为钢环读数, 10^{-2} mm; A_0 为试样初始面积, cm^2 ; γ 为剪切位移,mm; ε 为剪应变,%。剪切盒内径尺寸为 61.8 mm。

剪切模量是试样发生弹性形变时曲线的斜率,植物根系-黏性土复合体的变形总能量即试样抵抗变形的总能量,计算公式分别为

$$G = \frac{\tau_{50}}{\varepsilon_{50}} \tag{3}$$

$$J = \int_0^{\gamma} \tau(\gamma) d\gamma \tag{4}$$

式中: G 为剪切模量,kPa; τ_{50} 为试样达到 50% 峰值强度时的剪应力,kPa; ε_{50} 为试样达到 50% 峰值强度时的切向应变,%; J 为总变形能量, J/m^2 ; γ_f 为试样发生剪切破坏时的位移,mm。

2 试验结果与分析

2.1 植物根系数量对抗剪强度的影响

不同根系数量下试样剪应力-剪切位移曲线如图 1 所示。由图 1 可见,根系数量对试样的剪切特性有明显的影响。相同法向应力下,曲线形状基本

一致,当法向应力较小时,曲线具有明显的峰值,表现为应变软化型。当法向应力较大时,曲线不具有明显的峰值,表现为应变硬化型。

根系数量的增加使试样的抗剪强度明显提高。试样的抗剪强度与根系数量的关系如表 2 所示。当法向应力 σ 分别为 100、200、300 时,与不含植物根系的试样的抗剪强度相比,根系数量为 9 的试样的抗剪强度分别增加了 33%、27% 和 16%。根-土复合体的抗剪强度特性符合摩尔库仑定律,根据抗剪强度与法向应力的关系得出试样抗剪强度参数(即黏聚力 c 与内摩擦角 φ) 根系数量的关系(表 2)。随着根系数量的增加,复合体黏聚力呈上升趋势,植物根系数量的增加对试样的内摩擦角的影响不显著。

剪切模量总体随根系数量的增加呈上升趋势(表 2)。根系明显提高了土体抵抗形变的能力。试样在受到剪应力发生位移时,植物根系受到由剪切面上方和下方的错动而产生的拉力,在植物根系被拔出前期,植物根系表面与土体颗粒之间产生的摩擦力阻止根系拔出,抵抗了一部分剪应力,植物根系数量的增加,在一定程度上增加了植物根系与土体颗粒的接触面积,增强了土体与根系之间的摩擦力。随着法向应力的增加,试样的总变形能量均有明显的增加(表 2),这是由于在高法向应力的环境下,受到垂向力的试样会被压紧,增加了土颗粒之间发生位移变形的阻力,试样发生破坏时所需的总变形能量变大。如对于根系数量为 9 的试样,法向应力为 200 kPa 和 300 kPa 条件下的总变形能量比法向应力为 100 kPa 时分别增加了 301.16 J/m^2 和 642.30 J/m^2 ,根据线性

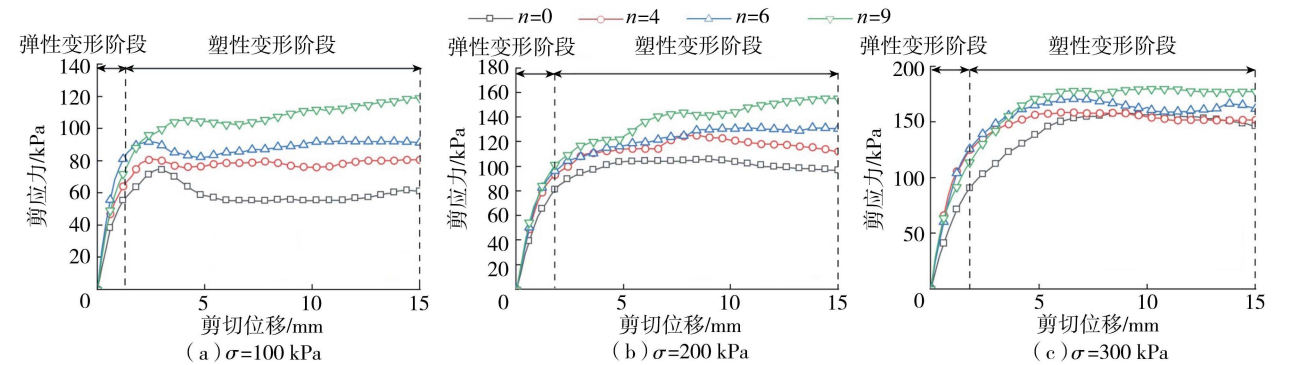


图 1 不同根系数量下试样剪应力-剪切位移曲线

表 2 不同根系数量条件下试样的抗剪强度参数

<i>n</i>	抗剪强度/kPa			黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	剪切模量/kPa			总变形能量/(J/m ²)		
	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa			$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa	$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa	$\sigma=300$ kPa
0	74.73	104.56	150.42	34.22	20.73	39.11	37.05	36.48	146.15	500.46	622.18
4	81.27	114.47	158.79	40.65	21.19	57.73	46.99	64.39	155.06	567.23	766.22
6	91.93	120.20	169.88	49.39	21.29	64.59	49.80	55.83	186.37	581.87	792.15
9	105.35	136.59	177.51	67.65	19.84	50.49	52.79	74.70	319.11	620.27	961.41

拟合得出增长率约为 $3.21 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$ ($R^2=0.99$), 随着法向应力的增大,总变形能量的增长率为 $2.38 \sim 3.73 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$ 。

2.2 生态型稳定剂含量对抗剪强度的影响

不同生态型稳定剂含量下复合体剪应力-剪切位移曲线如图 2 所示。在相同法向应力条件下,不同的生态型稳定剂含量的变化对于剪应力-剪切位移曲线的形态影响不显著,随着生态型稳定剂含量的增加,试样剪应力-剪切位移曲线呈现逐渐向上移动的趋势。不同生态型稳定剂含量条件下,掺入植物根系对于曲线形态影响显著,提高了曲线的峰值强度与峰后强度,植物根系联合生态型稳定剂固土具有明显的效果。

复合体的抗剪强度与生态型稳定剂含量的关系如表 3 所示。在不同法向应力下,土体的抗剪强度随着生态型稳定剂含量的增大均呈现上升趋势,如在法向应力为 100 kPa 、根系数量为 0 时,与生态型

稳定剂含量为 0 相比,生态型稳定剂含量为 0.5% 、 1% 、 2% 和 3% 的生态型稳定剂改良黏性土的抗剪强度分别提高了 5.35 、 9.88 、 13.10 、 21.76 kPa ,即提高了约 7% 、 13% 、 18% 、 29% 。

不同生态型稳定剂含量下复合体的黏聚力和内摩擦角如表 3 所示。随着生态型稳定剂含量的提高,不同根系数量试样的黏聚力均有不同程度的提升。对比根系数量为 0 和 9 的试样的黏聚力,两者差值约为 26.35 kPa ($\pm 8.35 \text{ kPa}$),并且随着生态型稳定剂含量的增加,差值逐渐减小。在根系数量为 0 时,随着生态型稳定剂含量的变化,试样的内摩擦角没有明显的变化(约为 20°),在根系数量为 9 时,随着生态型稳定剂含量的增加,试样的内摩擦角略有增大。生态型稳定剂在试样各组分之间产生的黏结力提高了试样的黏聚力,但对内摩擦角的影响不明显。

试样的剪切模量如表 3 所示。在根系数量为 0 的情况下,剪切模量随着法向应力的增大总体呈上

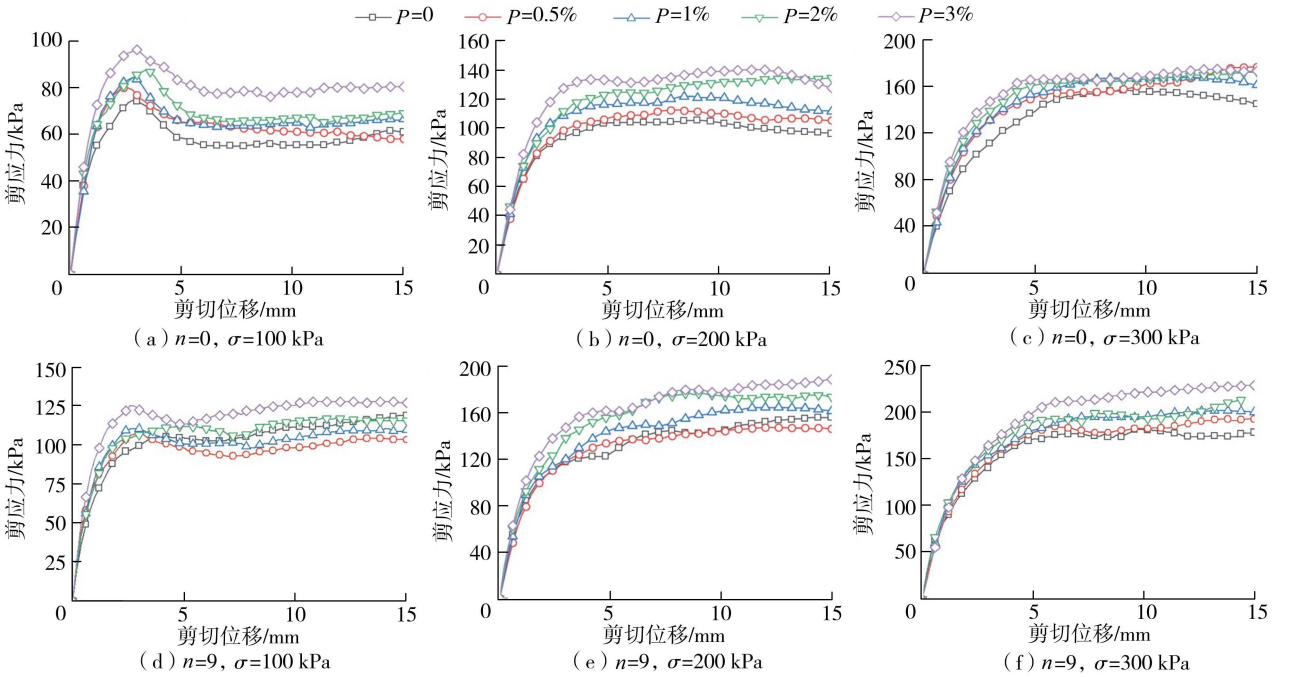


图 2 不同生态型稳定剂含量下复合体剪应力-位移曲线

表 3 不同生态型稳定剂含量条件下复合体的抗剪强度参数

n	生态型 稳定剂 含量/%	抗剪强度/kPa			黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	剪切模量/kPa			总变形能量/(J/m ²)		
		σ = 100 kPa	σ = 200 kPa	σ = 300 kPa			σ = 100 kPa	σ = 200 kPa	σ = 300 kPa	σ = 100 kPa	σ = 200 kPa	σ = 300 kPa
0	0	74.73	104.56	150.42	34.22	20.73	39.11	37.05	36.48	145.85	499.74	622.18
	0.5	80.08	109.34	155.85	39.32	20.75	35.26	33.91	48.51	147.72	516.11	699.34
	1	84.61	118.02	160.68	45.03	20.82	32.80	36.38	39.48	165.66	567.92	707.12
	2	87.83	125.14	164.44	49.20	20.96	44.81	44.97	49.95	219.72	567.92	750.13
	3	96.49	134.16	167.64	61.62	19.58	44.45	40.86	51.51	229.94	648.61	781.10
9	0	105.34	136.59	177.51	67.65	19.84	50.49	52.79	65.86	319.11	620.27	784.59
	0.5	108.45	146.54	186.73	68.95	21.38	68.88	44.61	65.25	342.87	630.74	809.81
	1	110.73	148.13	189.79	70.48	21.57	64.45	49.38	53.51	355.62	668.97	1027.60
	2	112.10	161.77	194.66	73.62	22.43	65.18	69.81	78.12	349.22	733.37	1067.17
	3	125.70	163.59	212.59	80.41	23.48	77.77	56.47	58.14	403.94	777.76	1106.06

升趋势,说明较高的法向应力使得试样弹性形变阶段抗剪强度上升较快;在根系数量为9的情况下,其剪切模量均大于无根的试样的剪切模量,根系明显提高了土体的抗变形能力。

根据剪应力-剪切位移曲线形态得到复合体的总变形能量(表3),与不同根系数量条件下复合体的总变形能量相比,生态型稳定剂含量对复合体的总变形能量影响较小,植物根系的掺入令复合体的总变形能量有明显提高。在法向应力 300 kPa 条件下,当生态型稳定剂大于 1% 时,复合体的总变形能量明显增大,高根系数量与高生态型稳定剂含量条件下,复合体的总变形能量达到最大。

3 讨论

3.1 不同条件下复合体破坏形式

剪切破坏位移是试样达到抗剪强度时对应的位移。当生态型稳定剂含量为 0 时,对于不同根系数量条件下试样的剪切破坏位移进行统计分析,如图3所示。由图可知,试样的剪切破坏位移随着根系数量的增加而减小,减小了试样在发生破坏时的剪切位移,说明根系数量的增加对根-土复合体的抵抗变形破坏特性具有正向影响。当根系数量由 0 增加至 9 时,剪切破坏位移由 12 mm 降低至 7 mm。

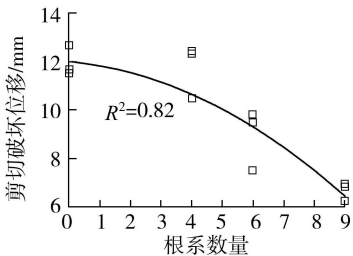


图3 剪切破坏位移与根系数量的关系

在生态型稳定剂含量高的试样中,可以观察到黏性土团聚体。生态型稳定剂在土体中形成网状结构,对试样各组分具有联结作用,在土体中形成一定的团聚体,在受到剪切的同时,这些团聚体发生位

移,导致剪切面较为粗糙。对于不同生态型稳定剂含量条件下,试样的剪切破坏位移进行统计分析,生态型稳定剂改良黏性土和生态型稳定剂改良根-土复合体的剪切破坏位移曲线如图4所示。改良黏性土的变化趋势线在生态型稳定剂含量 $P < 1\%$ 时变化趋势不明显,在 $P > 1\%$ 时下降趋势明显。改良根-土复合体的剪切破坏位移变化趋势线形态则是在 $P > 2\%$ 时趋于平缓。由生态型稳定剂改良黏性土的剪切破坏位移可以看出, $P < 1\%$ 时,剪切破坏位移没有明显变化,当 $P > 1\%$ 时,随着生态型稳定剂含量的增大,改良黏性土的剪切破坏位移由 12 mm 逐渐降低至 7 mm。改良根-土复合体剪切破坏位移随着生态型稳定剂含量的增加逐渐减小,并在 $P = 2\%$ 、 3% 时趋于稳定,为 7 mm。不同根系条件下,试样剪切破坏位移趋势线形态的不同,证明生态型稳定剂对于黏性土抗剪强度性能具有一定的增强作用,在 $P > 1\%$ 时,增强效果显著。在改良复合体中,根系对于复合体抗剪强度性能的影响大于生态型稳定剂的影响。

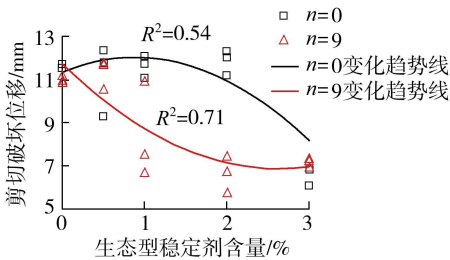


图4 剪切破坏位移与生态型稳定剂含量的关系

3.2 改良机理

聚醋酸乙烯酯溶液加固黏性主要是通过聚醋酸乙烯酯与土体颗粒之间发生的一系列阴阳离子交换。当聚醋酸乙烯酯作用于黏性土壤时,土体颗粒与聚醋酸乙烯酯之间形成氢键,增强聚醋酸乙烯酯与土体之间的黏结,如图5(a)所示。土壤中的碱性金属离子与分子链上的极性羧基发生置换反应,如图5(b)所示。土体颗粒之间的电势减小,促进土体

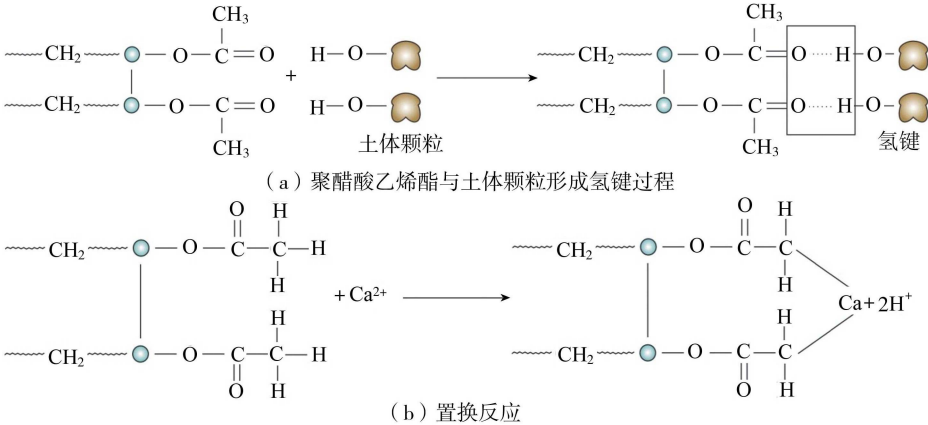


图5 生态型稳定剂作用机理

团聚体的形成。

改良黏性土受剪过程中试样形态的变化如图6所示。在土体受到剪应力前期,由于植物根系暂时没有发生位移,试样抗剪强度主要是由黏性土自身的强度与生态型稳定剂的强度组成;当剪切位移逐渐增大,试样中的根系受到扰动发生位移,此时植物根系开始为试样提供抗剪强度,土体的抗剪强度主要由黏性土自身、生态型稳定剂和植物根系共同提供;当剪应力达到黏性土与生态型稳定剂共同的强度时,其共同产生的黏结力失效,这时改良黏性土的抗剪强度主要由植物根系提供;植物根系提供的抗剪强度随着剪切位移的不断增大而失效,植物根系发生失效的主要状态有弯折、断裂和拔出3种形态。

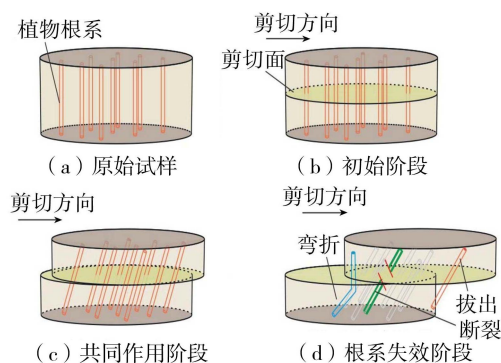


图6 改良复合体受剪过程变化示意图

4 结 论

a. 植物根系对土体的剪应力-剪切位移曲线、抗剪强度参数、剪切模量、总变形能量具有正向的影响。根系数量的增加能够有效提高黏性土的抗剪强度。根据试验结果,植物根系数量为9、生态型稳定剂含量为3%时,复合体的剪切特性改良效果最好,但与生态型稳定剂含量为2%的试样相比,含量为3%的试样的抗剪强度增长较小,所以考虑工程实际应用与经济效益,推荐最佳组合为根系数量为9,生态型稳定剂含量为2%。

b. 相较于生态型稳定剂含量,植物根系对改良复合体的总变形能量的影响更为显著。不同生态型稳定剂含量条件下,无根系掺入的生态型稳定剂加固黏性土的剪切模量变化不明显;而有植物根系掺入的土体,随着生态型稳定剂含量的增大,剪切模量有一定程度的增大。相较于素土试样,生态型稳定剂含量为3%的改良复合体剪切模量提高22%左右。在高法向应力条件下,其剪切模量变化特征不明显。

c. 在试样受到剪应力的过程中,相较于生态型稳定剂,植物根系对复合体抗剪强度性能的影响更大。当生态型稳定剂含量大于1%时,试样的剪切

破坏位移明显减小;当根系数量为9、生态型稳定剂含量大于1%时,试样的剪切破坏位移变化趋于平缓;当生态型稳定剂含量为2%时,根系数量由0增加至9,试样的剪切破坏位移由12 mm降低至7 mm。

d. 在试样受到剪应力的过程中,试样发生破坏的阶段可分为初始阶段、共同作用阶段与根系失效阶段。根系加固阶段根系的加筋效果相较于改良土体的黏结力更为显著,植物根系作为一种弹性材料,自身的生物性能为土体提供抗剪强度,在这个阶段植物根系的状态主要表现为弯折、断裂与拔出3种现象,直至根系发生失效,根系失效阶段植物根系加筋效果依然存在。

参考文献:

- [1] 高旭敏,林鲁生,谢孙园,等.生态边坡:理论与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] 吴亚伦.浅谈边坡治理技术应用[J].新疆有色金属,2022,45(1):34-36. (WU Yalun. A brief discussion on the application of slope treatment technology[J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2022, 45(1): 34-36. (in Chinese))
- [3] 刘泽,陈丽,何矾,等.边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析[J].水利水电科技进展,2020,40(4):65-70. (LIU Ze, CHEN Li, HE Fan, et al. Stability analysis of flexible protection structure for slope reinforced anchor 3D-geomat[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 65-70. (in Chinese))
- [4] 赵晓婉,许益东,戴迪,等.高分子吸水树脂加固水泥固化土的路用性能试验研究[J].工业建筑,2021,51(11):154-158. (ZHAO Xiaowan, XU Yidong, DAI Di, et al. Experimental study on pavement performances of cement-stabilized soil reinforced with super absorbent polymers[J]. Industrial Construction, 2021, 51(11): 154-158. (in Chinese))
- [5] 陈志昊,刘瑾,钱卫,等.高分子固化剂/纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J].工程地质学报,2019,27(2):350-359. (CHEN Zhihao, LIU Jin, QIAN Wei, et al. Experimental study on tensile strength of polymer curing agent/fiber modified sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 350-359. (in Chinese))
- [6] CHENU C, GUÉRIF J. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(4): 1076-1080.
- [7] NADLER A, MALIK M, LETEY J. Desorption of polyacrylamide and polysaccharide polymers from soil materials[J]. Soil Technology, 1992, 5(1): 91-95.
- [8] 石肖肖,史文娟,庞琳娜,等.γ-聚谷氨酸对土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):190-

197. (SHI Xiaoxiao, SHI Wenjuan, PANG Lingna, et al. Effects of γ -polyglutamic acid on soil water and nitrogen transport characteristics [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):190-197. (in Chinese))
- [9] LIU Jin, QI Xiaohui, ZHANG Da, et al. Study on the permeability characteristics of polyurethane soil stabilizer reinforced sand[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017:5240186.
- [10] MA Ke, LIU Jin, JIANG Canhui, et al. Compressive and tensile strength of polymer-based fiber composite sand [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2): 528-545.
- [11] WALDRON 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.
- [12] 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.
- [13] POLLEN N, SIMON A, COLLISON A. Advances in assessing the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability[M]//BENNETT S J, SIMON A. Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology. Washington: American Geophysical Union, 2004:125-139.
- [14] EKANAYAKE J C, PHILLIPS C J, MARDEN M. A comparison of methods for stability analysis of vegetated slopes [M]//BARKER G H, WATSON A J, SOMBATPANIT S, et al. Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization. Enfield: Science Publishers, Inc., 2004:171-181.
- [15] 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, 2011, 116(F2): F02007.
- [16] CASAGRANDE A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge: The Innovation and Development Committee of ISSMGE, 1936:60-64.
- [17] CASAGRANDE A, SPALLONE M. Investigating the determinants of pretrial settlement rates; contingent versus non-contingent lawyers' fees [J]. European Journal of Law and Economics, 2007, 24(1):1-13.
- [18] 曾红艳, 吴美苏, 周成, 等. 根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊2): 151-156. (ZENG Hongyan, WU Meisu, ZHOU Cheng, et al. Experimental study on reinforcement mechanism of vegetated slopes with root system and vertical geotextile belts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup2): 151-156. (in Chinese))
- [19] SIMON A, CURINI A, DARBY S E, et al. Bank and near-bank processes in an incised channel [J]. Geomorphology, 2000, 35(3/4): 193-217.
- [20] VEYRON G, GHESTEM M, STOKES A, et al. Quantification of mechanical and hydric components of soil reinforcement by plant roots [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11):1839-1849.
- [21] 邢书昆, 张光辉, 朱平宗. 黄土丘陵沟壑区退耕年限对根-土复合体抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4):41-48. (XING Shukun, ZHANG Guanghui, ZHU Pingzong. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4):41-48. (in Chinese))
- [22] 吴忠, 刘瑾, 何勇, 等. 高分子固化剂-植被复合改良砂土抗冲刷特性[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 28-33. (WU Zhong, LIU Jin, HE Yong, et al. Erosion resistance characteristics of surface sand soil improved by polymer curing agent and vegetation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5):28-33. (in Chinese))

(收稿日期:2022-07-28 编辑:俞云利)

