

DOI: 10.11779/CJGE202011019

植物-生物聚合物联合法固土的试验研究

倪 静¹, 王子腾^{*1}, 耿雪玉²

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 植物固土法易于兼顾土壤圈及生态系统功能稳定, 但在植物生长初期(根系数量及长度不足)较难达到理想效果。因而提出植物-生物聚合物联合法, 生物聚合物黏性溶液既可改善植物生长初期土体的强度, 又可提供植物生长所需的碳、氮等元素。为此, 设计两阶段的燕麦- β 葡聚糖联合法固土试验, 分别讨论燕麦根系及 β 葡聚糖在植物生长初期及后期所起的固土作用, 并与燕麦根系、 β 葡聚糖分别加固的土及纯土进行比较。结果表明: 植物生长摄取水分及根系挤土引起土体裂缝, 使燕麦根系加固土的含水率低于纯土, 但联合法中添加的 β 葡聚糖可提高土壤的保水性, 另外, β 葡聚糖可提高土壤电导率(即肥力), 有利于植物的生长; 无论在植物生长初期还是后期, 联合法固土试样的抗剪强度均最高, 一方面 β 葡聚糖能在植物生长初期, 通过加强土颗粒间的黏结效应改善土体强度, 另一方面燕麦根系对植物生长后期的土体强度起了较大的改善作用(此时, 由于 β 葡聚糖分解被植物根系摄取及被土壤微生物吸收利用, 固土效果已减弱)。论文研究成果将有助于进一步推进绿色土壤加固技术、扩展植物护坡工程的适用性。

关键词: 植物; 生物聚合物; 土壤加固; 保水性; 电导率; 强度

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)11-2131-07

作者简介: 倪 静(1983—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学及软土地基加固的研究。E-mail: wendy_1943@usst.edu.cn。

Experimental study on combined plant-biopolymer method for soil stabilization

NI Jing¹, WANG Zi-teng¹, GENG Xue-yu²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: The ground improvement using plants is prone to take into account the stability of the soil and ecosystem functions, however, it is difficult to achieve an ideal effect at the initial stage of plant growth when both the number of roots and the length are not sufficient. Therefore, a combined plant-biopolymer reinforcing method is proposed. The viscous solution of biopolymers can improve the soil strength at the initial stage of plant growth, and meanwhile provide carbon, nitrogen and other nutrients needed for plant growth. To this end, a two-stage experiment is designed to investigate the effects of oat roots and β -glucan on strengthening soil at the early and late stages of plant growth. The soils improved by the oat roots or β -glucan only, and untreated soil samples are also prepared for comparison. The results show that the water content of oat root-treated soils is lower than that of untreated soils due to water absorption and soil cracks caused by root squeezing. The β -glucan can improve soil electrical conductivity (fertility) and reserve water by its biopolymer hydrogels, which is conducive to plant growth. Furthermore, at both stages of plant growth, the soil treated by the combined method has the highest shear strength. On the one hand, the β -glucan can improve the soil strength by improving the bond between the soil particles at the initial stage. On the other hand, the oat roots play an important role in improving the soil strength at the late stage, while the β -glucan is decomposed and taken up by plant roots and absorbed by soil microorganisms, providing limited strengthening effect. The above results will further promote the green soil reinforcement technology and expand the applicability of plant to slope protection.

Key words: plant; biopolymer; ground improvement; water retention; electrical conductivity; strength

0 引言

土壤是生态、水、气之间物质和能量交换的核心环境系统, 对人类生存及全球环境变化有着深远影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608323, 51978533, 51678319)

收稿日期: 2019-12-23

*通信作者(E-mail: 182601736@st.usst.edu.cn)

土壤提供适宜植物生长的营养成分及水分，是最为重要的生产力要素之一；另一方面，土壤亦可作为建筑物的基础和工程材料。因此，对其的改造和利用必须遵循维持土壤圈及生态系统功能稳定的原则。

近年来，土壤加固技术不断改进^[1-2]；随着深化生态文明改革，及推进绿色、循环、低碳的生产方式，土壤加固技术正面临着新一轮的机遇与挑战。植物根系作为土壤固有组成部分，在固土过程中，易于保持土壤环境的物质组成、结构、性质和功能，因而受到越来越多的关注^[3-4]。植物根系固土机理主要表现在两个方面：①力学加固，即深层垂直根系的锚固作用及浅层根系的加筋作用^[5-6]。②蒸散，即水分通过叶片蒸散诱导根系吸水，使土壤含水率下降、产生负孔压，该过程使颗粒间吸力上升、土体表观黏聚力增长^[3]。此外，植物根系的蒸散、力学加固效果受含根量、根系分布、围压、渗透、含水率及单根抗拉强度等因素影响^[4-8]。

对于利用植物根系进行的岸坡防护及整治工程，需要注意的是，根系至少要生长到剪切破坏面以下才能发挥较好的固土效果^[3]，在此之前，土壤处于较弱的加固状态。适宜的土壤环境会促进植物生长，使固土效果尽早发挥，反之则不然。鉴于此，笔者使用植物-生物聚合物联合法对土壤进行加固，生物聚合物既可在植物生长初期起到固土作用^[9]，又可为植物提供必需的营养成分，并将植物生长所需水分保存在土壤中^[10]。

生物聚合物主要包括多糖、多肽及多核苷酸^[11]。虾壳废料和过期牛奶^[12-13]就可用来提取相应的生物聚合物：壳聚糖和酪蛋白。生物聚合物来源多样化、可再生、可降解，是一种具有较大潜力的绿色环保型土壤固化剂。其固土机理是将较小土颗粒凝聚成大颗粒及加强不同颗粒间的黏结^[14]，从而提高土体的强度。大量力学试验（单轴压缩、三轴压缩、直剪、劈裂、三点弯曲及加州承载比等）^[9, 12-16]表明，尽管生物聚合物的固土效果受养护时间、生物聚合物种类、含水率、拌合方法、加固土种类、浓度等多种因素影响，但总得来说，添加较少量的生物聚合物（土颗粒质量的 0.5%~1.5%）即可获得较好的固土效果。除此之外，生物聚合物富含碳元素及氮元素，可作为土壤养分，促进植物的萌发与生长^[10]；生物聚合物具有亲水的性质，其水溶液具有一定的黏性^[16]，可使水分聚集在植物根系周边、供其摄取。

综上所述，植物-生物聚合物联合法既可改善植物生长初期较难达到理想固土效果的状况，又可促进植物生长、达到更佳的后期固土效果。鉴于目前对于该课题的研究非常有限，本文开展植物-生物聚合物联合

法固土的两阶段（即植物生长初期及后期）试验研究，分别讨论植物根系及生物聚合物在两个阶段所起的加固土壤作用，研究成果将进一步推进绿色土壤加固技术、扩展植物护坡工程的适用性。

1 试验材料及试样制备

1.1 材料

(1) 土体

试验采用上海④₁ 层灰色淤泥质黏土，经英国产 Mastersizer 3000 粒度分析仪（可处理 10 nm~3.5 mm 范围内的颗粒）测试，该土壤的砂粒含量为 33.41%，粉粒含量为 54.86%，黏粒含量为 11.73%，颗粒级配曲线见图 1。其它天然上海黏土的基本物理力学参数包括：最大干密度 $\rho_{d,max}=1.59 \text{ g/cm}^3$ ，最优含水率 $w_{op}=23.1\%$ ，相对密度 $G_s=2.73$ ，液限 $w_L=37.9\%$ ，塑限 $w_p=22\%$ ，竖直向渗透系数 $k_v=5.58 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ，水平向渗透系数 $k_h=7.47 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。

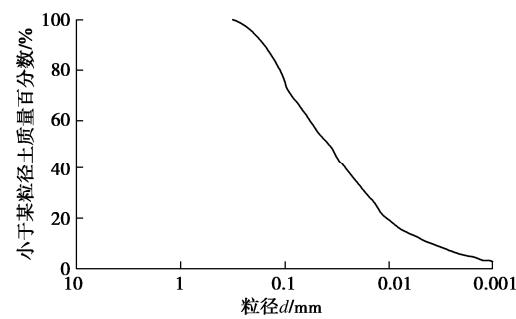


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve

(2) 植物

燕麦具有萌发速度快（一般为 30 h）、根系发达直立、抗逆性强等优势，其根系具有多数植物生长初期典型的根系结构^[3]。燕麦可采用喷播法种植，施工方便，在中国大部分地区均有播种^[17]。综合考虑生长速率、经济效益和代表性等因素，本试验选用燕麦作为固土植物。播种前进行了燕麦种子筛选，挑出其它种子，比如大麦、青稞、草籽、荞麦等；同时将不够饱满的小粒和秕粒去除。

(3) 生物聚合物

β 葡聚糖具有多种自然形态，如植物中的纤维素、谷类中的麸皮和细菌的细胞壁等。 β -1, 3/1, 6 葡聚糖聚合物（以下简称 β 葡聚糖）是由糖苷键链接 D-葡萄糖单体的生物聚合物。典型 β 葡聚糖聚合物的分子量为 250~3000 kDa，呈静电中性。 β 葡聚糖具有亲水性，遇水可溶解形成黏液从而填充土壤孔隙、黏结土颗粒，具有提高土壤抵抗侵蚀的能力^[10]；失水后收缩，形成强度较大的硬质凝胶，即便在浓度相对较

低的情况下, 也可取得较好的提高土体强度的效果^[16]。

1.2 试样制备

试验考虑了 4 种工况, 分别采用燕麦根系、 β 葡聚糖及燕麦- β 葡聚糖联合法加固上海淤泥质黏土, 并与纯土试样进行比较。对于含 β 葡聚糖的固土方案, β 葡聚糖的添加量取 0.5% 的土颗粒质量。《公路路基设计规范》^[18]规定, 高速公路、一、二级公路地基土压实度不应小于 90%; 三、四级不应小于 85%。考虑到坡土的压实度须同时满足边坡稳定性及根系生长空间的要求^[17], 控制试样的压实度为 80%。参考《土工试验方法标准》^[19], 采用压样法制样, 具体方法如下。

将土样烘干后在橡皮板上用木碾碾散, 并通过 2 mm 筛子筛分。将 0.5% 土颗粒质量的 β 葡聚糖与干土均匀混合, 并加入适量的水进行充分拌合(即干法拌合)^[14]。将一部分均质的拌合物(约为总质量的 11/12)放入培养盒(长×宽×高=205 mm×150 mm×80 mm), 裁剪并上覆滤纸, 使用木板压样后小心取出木板和滤纸。将 200 粒燕麦种子均匀播种在土体表面, 并将剩余的拌合物以同样方法放入培养盒, 盖住燕麦种子。

培养期间, 室内恒温 27°C, 相对湿度 80%。培养周期为 14 d, 前 7 d 为植物生长初期阶段, 后 7 d 为植物生长后期阶段。每个阶段的前 3 d(第 1 天—第 3 天及第 8 天—第 10 天), 各浇一次水, 每次浇水 70 mL。植物生长初期前 3 d 浇水是为了保证燕麦种子在萌发破土期拥有充足的水分^[3]; 后期浇水则考虑了降雨对联合法固土的影响, 试验结果可与初期进行对比。培养期间, 由总浇水容积(mL)换算得到的日均浇水量(mm)与种植燕麦较多的 4 个省份(内蒙古、河北、甘肃、山西)的 2018 年日均降雨量平均值^[20]保持一致。除水以外, 培养期间不添加其他营养物质。

2 试验方案

2.1 电导率、含水率测量

电导率是表征土壤水溶性盐的指标, 与土壤所含离子数量有关。大多数离子是植物生长所需营养元素, 因而电导率可作为评估土壤肥力水平的综合性指标^[21]。试验采用精讯畅通土壤湿度传感器(误差±1%), 每隔 24 h 测量记录培养盒中土样的电导率。同时, 该传感器也可测量土样的体积含水率(单位体积土中水的体积百分含量 V_w/V)。由于该传感器采用了 FDR 测量方式, 即利用频域反射电磁脉冲技术来测量土壤湿度, 相对于电容式测量, 拥有较高的精度和稳定性。

2.2 直剪试验

在播种后的第 7 天及第 14 天, 用环刀(直径×高

=61.8 mm×20 mm) 取样, 具体过程如图 2 所示: 用剪刀剪去上部幼苗, 如图 2(a); 选出芽相对均匀的位置(图 2(b) 中 A, B, C, D), 顶入内壁涂有凡士林的环刀; 用剪刀和削土刀取出待修剪试样, 完成时如图 2(c); 用剪刀修剪环刀上部土, 完成时如图 2(d); 小心翻转环刀, 用剪刀修剪环刀下部根土, 如图 2(e); 用削土刀削平, 完成时如图 2(f) 所示。需要注意的是, 所有取样要深入土体表面 1 cm 以下, 如图 2(c), 这样做的目的是保证环刀内不存在未发芽的种子和幼苗。另外, 在修剪伸出环刀部分的根系时, 使根系伸出环刀 0.5 cm, 以保证根系的锚固作用得到发挥^[22]。



图 2 环刀取样图

Fig. 2 Taking samples by ring knife

将试样进行抽气饱和, 完成后分别在 100, 200, 300 kPa 下进行固结快剪试验(剪切速率 0.8 mm/min), 试验方案见表 1。

表 1 试验方案

Table 1 Experimental program

变量	方案
试样类型	纯土、燕麦根系加固土、 β 葡聚糖加固土 燕麦- β 葡聚糖联合法加固土
电导率	植物生长期, 每隔 24 h 测量记录
含水率	植物生长期, 每隔 24 h 测量记录
直剪试验	生长初期(第 7 天)及后期(第 14 天)进行

试验结束后, 小心取出环刀内的根系, 清水冲洗并擦干称重, 计算质量含根率(根系质量与干土质量之比)。获得培养7 d的燕麦根系和燕麦- β 葡聚糖联合法固土试样, 含根率分别为0.08%和0.11%; 培养14 d的燕麦根系和燕麦- β 葡聚糖联合法固土试样, 含根率分别为0.12%和0.16%。

3 试验结果与分析

3.1 含水率与电导率变化曲线

图3为4种工况下的体积含水率变化曲线, 其中, 纯土的体积含水率变化由蒸发作用引起, 可用于其他3种工况的对照。在植物生长初期, 土壤的体积含水率从高到低依次为: 燕麦- β 葡聚糖联合法加固土、燕麦根系加固土、 β 葡聚糖加固土及纯土。 β 葡聚糖具有保水性, 因而 β 葡聚糖加固土的水分蒸发少于纯土, 体积含水率大于纯土; 燕麦发挥储水及蒸腾作用, 具有降低土体含水率的可能性, 但在植物生长初期, 根系较少、较短, 储水及蒸腾作用不明显, 而另一方面燕麦根系的生长填充了土体孔隙, 阻止了水分的流失, 因此含根系的土体体积含水率较高。在植物生长后期, 体积含水率从高到低依次为: β 葡聚糖加固土、纯土、燕麦- β 葡聚糖联合法加固土及燕麦根系加固土, 这与植物生长初期的体积含水率趋势不同。在这个阶段, β 葡聚糖依然发挥保水性, 因而 β 葡聚糖加固土的体积含水率大于纯土; 而此时的燕麦根系已遍布盒中, 具有较强的储水及蒸腾作用, 图4显示土体轻微膨胀产生裂缝(裂缝宽度在0.5~1.5 mm), 使水分流失, 因此, 含燕麦根系土体的体积含水率比纯土低。

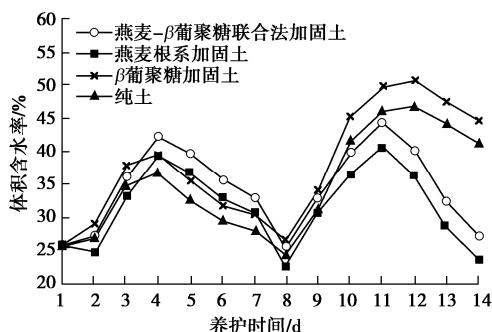


图3 14 d 土体体积含水率变化图

Fig. 3 Change of water content during 14-day curing period

图5为4种工况下的电导率变化曲线。在整个培养过程中, 只添加 β 葡聚糖土壤的电导率最大。以往的研究表明, 土壤中有机质和亲水性水凝胶的微观结构具有极高的比表面和电荷^[10], 因而添加 β 葡聚糖的土体有更强的截留离子能力(试验用自来水含有氯、钙、镁、钾、硫酸根等离子)。另一方面, 当 β 葡聚

糖和燕麦根系同时存在, 由于燕麦生长摄取养分, 电导率会低于不含燕麦的纯土。燕麦根系加固土, 由于只存在燕麦生长摄取养分的作用, 电导率最低。



图4 燕麦根系加固土裂缝图

Fig. 4 Cracks in oat root-reinforced soil

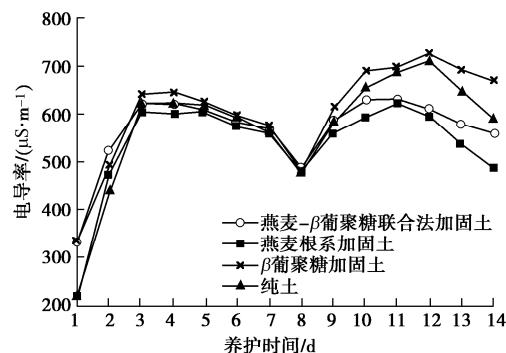


图5 14 d 土体电导率变化图

Fig. 5 Change of electrical conductivity during 14-day curing period

3.2 直剪试验

(1) 剪应力与剪切位移关系曲线

图6~8分别给出了固结压力为100, 200, 300 kPa时4种工况下土体剪应力与剪切位移的关系曲线。可以看出, 植物生长初期与后期曲线具有类似的趋势, 即不含有根系的试样剪切位移增长至3~5 mm时, 剪应力达到稳定读数。当试样中含有根系时, 剪应力并未在《土工试验方法标准》^[19]建议的4 mm剪切位移时达到稳定或显著退后; 当按规范规定继续剪切至6 mm剪切位移时, 剪应力仍未达到稳定或显著退后; 因而本试验最终将试样剪切至9 mm剪切位移, 剪应力最大值基本出现在剪切位移最大处(9 mm)。Gonzalez-Ollauri等^[5]也曾得出过类似的试验结果, 即根系未完全破坏, 未体现其全部的抗拉拔强度, 导致试样的剪应力与剪切位移关系曲线光滑而无明显的峰值或稳定值。所有试样均未发现明显的应力软化趋势, 这可能是因为固结快剪试验中试样的高含水率和植物根系均可能减弱应力软化趋势^[22]。

含根系试样的剪应力-剪切位移曲线初期上升较慢, 与不含根系试样有较大差异, 文献[4, 5]也提及此结果。王元战等^[4]发现, 当试样含根率较低时

(0.22%), 初始剪切刚度会小于纯土; 当含根率较高时 (0.67%), 则未出现该现象。Gonzalez-Ollauri 等^[5]发现试样在饱和状态下, 会出现含根系试样初始剪切刚度小于纯土的现象, 在非饱和状态下则不然。因而, 本文的试验结果可能归因于含根量均小于 0.16%, 且试样是在饱和状态下进行的剪切试验。

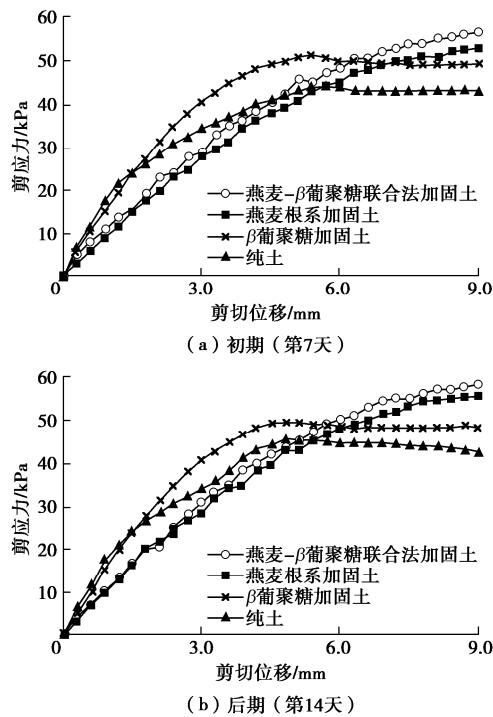


图 6 100 kPa 下土体剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between shear stress and displacement at 100 kPa

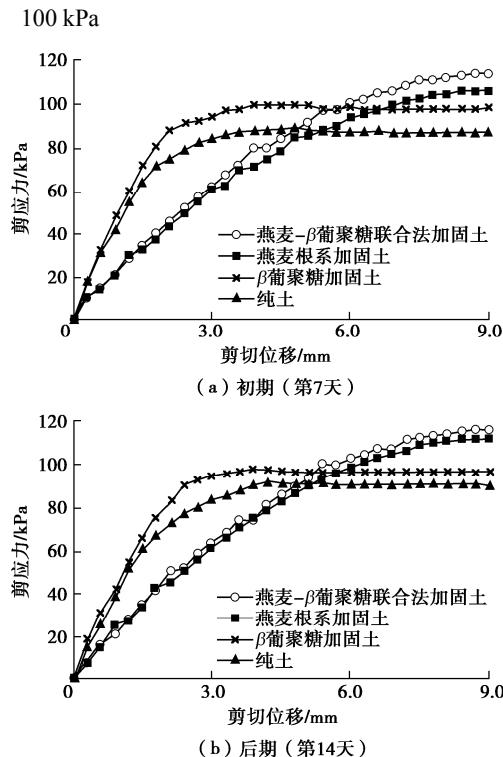


图 7 200 kPa 下土体剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 7 Relationship between shear stress and displacement at 200 kPa

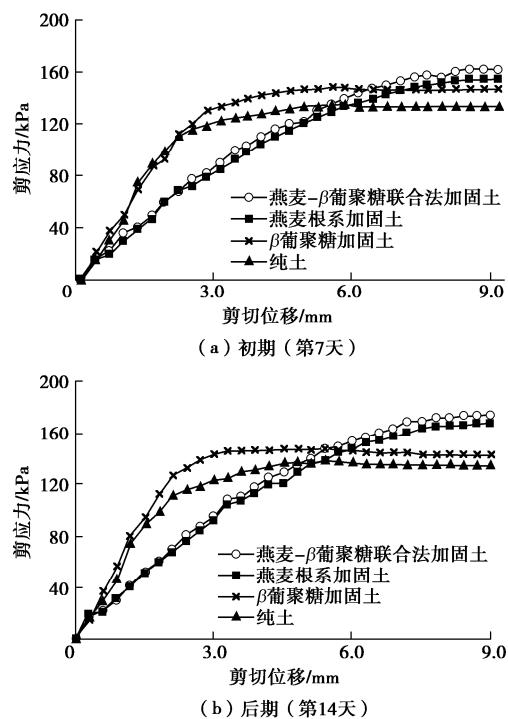


图 8 300 kPa 下土体剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 8 Relationship between shear stress and displacement at 300 kPa

(2) 抗剪强度

图 9 (a), (b) 分别为植物生长初期及后期, 4 种工况下的抗剪强度曲线, 其中不含燕麦根系土 (包括 β 葡聚糖加固土及纯土) 抗剪强度取自剪应力与剪切位移关系曲线上剪应力稳定值, 含燕麦根系土 (包括联合法加固土及燕麦根系加固土) 抗剪强度取自 9 mm 剪切位移对应的剪应力值。可知, 无论在初期还是后期, 燕麦- β 葡聚糖联合法固土试样的强度均最高。

植物生长初期与后期的土体抗剪强度之间存在差异, 体现了联合法中 β 葡聚糖与燕麦根系的作用随植物生长而改变: ① β 葡聚糖分解被根系摄取、被土壤微生物吸收利用, 及考虑降雨引起 β 葡聚糖稀释, 导致后期试样中 β 葡聚糖的浓度减小, 因此 β 葡聚糖直接提高抗剪强度的效应弱于初期。②后期的燕麦根系长度及数量均大于初期, 因此在直剪试样中更有效地提高抗剪强度。由此看出, 从植物生长初期到后期, β 葡聚糖对抗剪强度的直接改善作用逐渐减弱, 燕麦根系则逐渐加强。因此, 后期强度与初期相比, 增长与否, 取决于 β 葡聚糖与燕麦根系作用改变量的合效应。3 种固土方式的两阶段抗剪强度分析如下: ① β 葡聚糖固土试样的后期强度小幅降低, 原因是 β 葡聚糖浓度减小, 黏结效应减弱。②燕麦根系固土试样的后期强度小幅提高, 原因是根系生长导致根系 - 土之间的相互作用增强。③联合法固土试样的后期强度也有小幅提高, 说明燕麦根系生长导致的强度增量大于因

β 葡聚糖浓度减小导致的强度减小量。

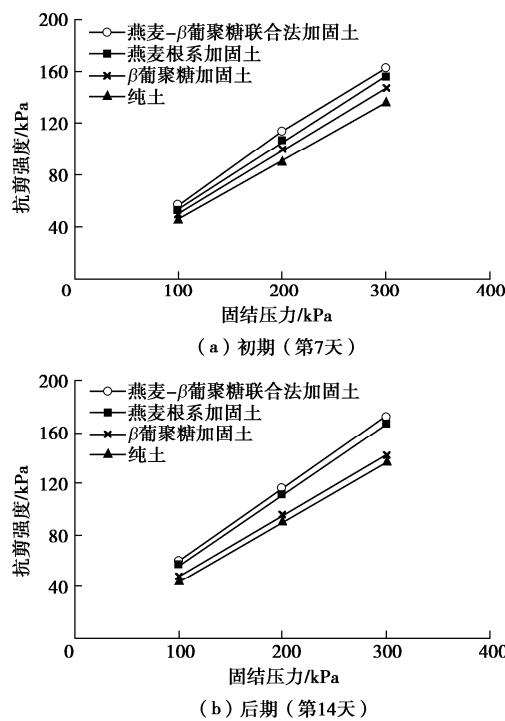


图 9 4 种工况土体抗剪强度包线对比

Fig. 9 Comparison of shear strengths for four treatment conditions

另外,随着燕麦生长,有无 β 葡聚糖试样的抗剪强度差异在减小,而有无燕麦根系试样的强度差异在增长。如图 9 (a) 所示,300 kPa 固结压力时,联合法加固试样的初期强度比燕麦根系加固试样大 4.94%, β 葡聚糖加固试样比纯土大 9.90%;而在后期,如图 9 (b) 所示,这两个数值分别下降为 3.62% 和 6.28%。另一方面,300 kPa 固结压力时,联合法加固试样的初期强度比 β 葡聚糖加固试样大 9.64%,燕麦根系加固试样比纯土大 14.83%;而在后期,这两个数值分别增长为 18.27% 和 21.31%。这进一步说明 β 葡聚糖因浓度减小,对强度的直接改善作用逐渐减弱;燕麦根系生长,对强度的改善作用逐渐增强。

4 种工况下的土体抗剪强度指标,如表 2 所示。联合法加固试样的粘聚力及内摩擦角在两个阶段都是最大的。含 β 葡聚糖试样在植物生长后期的粘聚力有不同程度的减小,而含燕麦根系试样在植物生长后期的内摩擦角有不同程度的增大。

表 2 4 种工况土体抗剪强度指标

Table 2 Parameters of shear strength for four treatment conditions

类型	初期		后期	
	c/kPa	$\phi/(^\circ)$	c/kPa	$\phi/(^\circ)$
纯土	0	24.5	0	24.7
β 葡聚糖加固土	2.676	25.8	0.045	25.5
燕麦根系加固土	2.908	26.9	3.069	28.3
燕麦- β 葡聚糖联合法加固土	5.023	27.8	3.313	29.2

需要说明的是,由于试样在剪切过程中处于湿润

状态, β 葡聚糖在两个阶段直接改善抗剪强度的效果远远小于干燥状态^[9],导致每个阶段有无 β 葡聚糖试样的强度差异都不大。在实际工况中,由土体含水率下降将进一步体现出燕麦- β 葡聚糖联合法的优势。

4 结 论

本文设计了植物-生物聚合物联合法加固试验,分别讨论植物根系及生物聚合物在植物生长初期及后期所起的加固土壤作用,得到以下 4 点结论。

(1) 燕麦生长过程中,根系摄取水分,且挤土引起土体裂缝、增强渗流通道,导致土壤含水率降低;添加 β 葡聚糖可增强土壤的保水性,促进植物生长。

(2) 燕麦根系摄取土壤养分,导致土壤电导率下降;添加 β 葡聚糖可提高土壤电导率(肥力),有利于植物的生长。

(3) 无论在燕麦生长初期还是后期,燕麦- β 葡聚糖联合法加固试样的抗剪强度均最高:在燕麦生长初期, β 葡聚糖在土颗粒间的黏结效应主要起改善试样抗剪强度的作用;在燕麦生长后期,燕麦根系发挥的抗拉拔性能对改善土体抗剪强度起主要作用。

(4) 燕麦- β 葡聚糖联合法加固试样在燕麦生长后期的抗剪强度大于生长初期,说明随着燕麦生长,根系发挥的加固作用越发明显,且能够弥补随着 β 葡聚糖浓度下降引起的抗剪强度下降。

本文结果表明,燕麦- β 葡聚糖联合法能够弥补燕麦在生长初期因根系数量、长度不足无法起到较好加固效果的缺陷,燕麦根系及 β 葡聚糖协同工作,起到加固土壤的最佳效果。鉴于植物和生物聚合物的选择面很广,针对其它植物和生物聚合物可开展更深入的探讨。本文研究成果将为进一步推进绿色土壤加固技术、扩展植物护坡工程的适用性提供一定的参考。

参 考 文 献:

- [1] 赵森,曾芳金,王军,等.絮凝-真空预压加固吹填淤泥试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(6): 1291 - 1296. (ZHAO Sen, ZENG Fang-jin, WANG Jun, et al. Experimental study of flocculation combined with vacuum preloading to reinforce silt foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1291 - 1296. (in Chinese))
- [2] 倪静,朱颖,陈有亮,等.循环荷载作用下竖向排水板加固软黏土的孔隙水压力累积特性研究[J].岩土力学,2016,37(2): 383 - 389, 398. (NI Jing, ZHU Ying, CHEN You-liang, et al. Cumulative pore water pressure behaviour of soft clays installed with prefabricated vertical drains under

- cyclic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(2): 383 - 389, 398. (in Chinese)
- [3] ŚWITALA B M, ASKARINEJAD A, WU W, et al. Experimental validation of a coupled hydro-mechanical model for vegetated soil[J]. Géotechnique, 2018, **68**(5): 375 - 385.
- [4] 王元战, 刘旭菲, 张智凯, 等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1405 - 1410. (WANG Yuan-zhan, LIU Xu-fei, ZHANG Zhi-kai, et al. Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1405 - 1410. (in Chinese))
- [5] GONZALEZ-OLLAURI A, MICKOVSKI S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes[J]. Geoderma, 2017, **285**: 141 - 150.
- [6] EAB K H, LIKITLERSUANG S, TAKAHASHI A. Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation[J]. Soils and Foundations, 2015, **55**(5): 1270 - 1281.
- [7] MICKOVSKI S B, VAN-BEEK L P H. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate[J]. Plant and Soil, 2009, **324**(1/2): 43 - 56.
- [8] 王元战, 刘旭菲, 张智凯. 草根加筋土渗透性和强度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, **37**(1): 140 - 147. (WANG Yuan-zhan, LIU Xu-fei, ZHANG Zhi-kai. Experimental research on permeability and strength of grassroots-reinforced soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigationg Engineering, 2017, **37**(1): 140 - 147. (in Chinese))
- [9] CHEN C H, WU L, PERDJON M, et al. The drying effect on xanthan gum biopolymer treated sandy soil shear strength[J]. Construction and Building Materials, 2019, **197**: 271 - 279.
- [10] CHANG I, PRASIDHI A K, IM J, et al. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes[J]. Geoderma, 2015: 39 - 47.
- [11] CHANG I, IM J, CHO G-C. Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering[J]. Sustainability, 2016, **8**(3): 251. <https://doi.org/10.3390/su8030251>.
- [12] FATEHI H, ABTAHI S M, HASHEMOLHOSSEINI H, et al. A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening[J]. Construction and Building Materials, 2018, **167**: 813 - 821.
- [13] HATAF N, GHADIR P, RANJBAR N. Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **170**: 1493 - 1500.
- [14] CHANG I, CHO G C. Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(2): 361 - 375.
- [15] KHATAMI H R, O'KELLY B C. Improving mechanical properties of sand using biopolymers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(8): 1402 - 1406.
- [16] CHANG I, CHO G C. Strengthening of Korean residual soil with β -1, 3/1, 6-glucan biopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2012, **30**: 30 - 35.
- [17] 杨 才. 有机燕麦生产[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010. (YANG Cai. Organic Oat Production[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2010. (in Chinese))
- [18] 公路路基设计规范: JTGD30—2015[S]. 2015. (Specifications for Design of Highway Subgrades: JTGD30—2015 [S]. 2015. (in Chinese))
- [19] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019 [S]. 2019. (in Chinese))
- [20] 周星妍, 曾红玲, 王遵娅, 等. 2018年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 45(4): 543 - 552. (ZHOU Xing-yan, ZENG Hong-ling, WANG Zun-ya, et al. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2018[J]. Meteorological Monthly, 45(4): 543 - 552. (in Chinese))
- [21] MÖLLER A, MÜLLER H W, ABDULLAH A, et al. Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta[J]. Geoderma, 2005, **124**(1/2): 63 - 71.
- [22] 周 成, 路永珍, 黄月华. 香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 30 - 35. (ZHOU Cheng, LU Yong-zhen, HUANG Yue-hua. Oedometer expansion and direct shear tests on vetiver root-reinforced expansive soil with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 30 - 35. (in Chinese))