

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.012

有机聚合物复合纤维改良砂土无侧限抗压强度研究

朱旭芬,黄庭伟,刘瑾,车文越,戴承江,宋泽卓,王梓

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:为研究有机聚合物复合纤维改良砂土的抗压特性、变形规律与改良机理,通过无侧限抗压强度试验和数值模拟分析了改良砂土抗压变形过程的力链变化与微裂纹发育规律,给出了改良砂土的破坏与改良机理。结果表明:有机聚合物复合纤维能够有效提升砂土的抗压强度,随着有机聚合物含量的增大,改良砂土的无侧限抗压强度逐渐提高;随着有机聚合物含量与应变增大,改良砂土的力链演化与微裂纹发育明显改变,力链由环状和柱状结构转变为拱状结构,微裂纹总数量及张拉微裂纹增多,破坏由单一路径向多路径转变。有机聚合物复合纤维黏结、包裹砂粒以及三者相互耦合胶结有效提升了砂土的抗压特性;当荷载过大时,有机聚合物膜发生破裂,纤维逐渐断裂与滑脱,改良砂土网状结构逐渐失稳,砂粒被迫发生位移与旋转,形成局部微裂纹,最终发育、延伸形成裂隙造成破坏。

关键词:改良砂土;有机聚合物复合纤维;无侧限抗压强度;土体加固

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)06-0090-09

Study on unconfined compressive strength of sand improved by organic polymer composite fiber

ZHU Xufen, HUANG Tingwei, LIU Jin, CHE Wenyue, DAI Chengjiang, SONG Zezhuo, WANG Zi
(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to study the compressive properties, deformation rules and improvement mechanism of sand improved by the organic polymer composite fiber, through the unconfined compressive strength test and the numerical simulation, the laws of force chain change and microcrack development in the compressive deformation process of improved sand were analyzed, from which the destruction and improvement mechanism of improved sand were summarized. The results show that the organic polymer composite fiber can effectively improve the compressive strength of sand. With the increase of organic polymer content, the unconfined compressive strength of improved sand increases. In addition, with the increase of organic polymer content and strain, the force chain evolution and microcrack development of the improved sand change obviously. The force chain changes from a ring-column structure to an arch structure, and the total number of microcracks and tensile microcracks also increases, indicating that failure changes from single path to multiple paths. The improvement mechanism shows that the organic polymer composite fiber can effectively improve the compressive properties of sand by binding and wrapping the sand grains. When the load is too large, the organic polymer film breaks, the fibers break and slip gradually, and the network structure becomes unstable gradually. In such a condition, the sand is forced to displace and rotate, forming local micro-cracks that eventually develop and extend to form cracks resulting in damages.

Key words: improved sand; organic polymer composite fiber; unconfined compressive strength; soil reinforcement

砂土结构松散,颗粒间的黏结作用较小,导致其力学强度低、工程性质差^[1]。在外动力作用下极易发生强度丧失,从而严重影响了各类工程建设的长期安全和稳定,影响人们的生产生活和工程建设活动,给人民生命财产和经济建设造成巨大威胁^[2-3]。因此,为了满足各类工程建设的要求,需要对砂土进行加固处理。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877212)

作者简介: 朱旭芬(1978—),女,讲师,博士,主要从事水文地质和基坑工程研究。E-mail:Zh_xf@hhu.edu.cn

通信作者: 刘瑾(1983—),女,教授,博士,主要从事土体改良研究。E-mail:jinliu920@163.com

引用本文: 朱旭芬,黄庭伟,刘瑾,等.有机聚合物复合纤维改良砂土无侧限抗压强度研究[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):90-98.

ZHU Xufen, HUANG Tingwei, LIU Jin, et al. Study on unconfined compressive strength of sand improved by organic polymer composite fiber[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 90-98.

目前针对砂土的工程特性改良主要采用物理和化学方法。物理方法主要有强夯法、碎石桩法、注浆法等地基处理方法,以及添加各种格栅、土工织物和单束状纤维丝的加筋法^[4-5]。纤维加筋法采用纤维材料与砂土混合,从而提高砂土颗粒之间作用力,进而达到增加砂土强度的效果^[6-8]。按照来源的不同,纤维可以分为天然纤维和人工合成纤维 2 种,使用较为广泛的纤维主要包括:聚丙烯纤维、树脂纤维、玄武岩纤维、剑麻纤维、玻璃纤维、棕榈纤维等^[9-11]。砂土经纤维材料加筋后抗剪强度提升较大^[11-15],但纤维长度对砂土的强度有较大影响^[16]。化学方法主要通过添加化学材料对砂土进行改良,增强砂土的工程特性,添加的化学材料包括传统添加的化学材料中的水泥、石灰和粉煤灰等无机材料,以及有机高分子聚合物等新型材料。水泥、石灰等因价格低廉被广泛应用于地基加固、公路基层中,但加固土体后易发生脆性破坏、开裂,固化土中植被难以生长^[17-19];有机高分子聚合物材料种类较多,包括树脂型、聚氨酯型、醋酸乙烯酯、聚丙烯酰胺、生物胶等^[20-21],具有反应简单、固化效果好、对生态环境无污染等特点^[22-23],该材料主要通过有机聚合物材料与土颗粒表面的化学作用、有机聚合物材料对土颗粒包裹、填充颗粒间的孔隙形成网状膜结构,从而提高土体的强度性能,在一定程度上能促进植被生长^[24],具有良好的加固效果。为了达到更好的加固效果,将有机高分子聚合物和纤维相结合对土体进行复合改良的方法作为一种新型改良方式,是砂土改良领域研究的热点^[25-26]。

目前对这种新型改良方式的变形破坏及改良机理方面的研究还比较少,为此本文选取有机聚合物复合纤维改良砂土研究不同复合条件下改良砂土的抗压特性,通过室内试验和数值试验相结合的方法,从多角度对复合改良的变形破坏及机理进行研究,以期能为复合材料加固砂土提供一定的理论支撑和实践指导。

1 无侧限抗压强度试验

1.1 试验材料

试验使用的砂土取自南京市江宁区,其粒径分布曲线如图 1 所示,比重为 2.66,最大干密度为 1.7 g/cm³,最小干密度为 1.32 g/cm³,*d*₁₀ 为 0.12 mm,*d*₃₀ 为 0.22 mm,*d*₆₀ 为 0.36 mm,不均匀系数 *C*_u 为 3.00,曲率系数 *C*_c 为 1.12。试验选取的有机聚合物(NCO)为一类含重复氨基甲酸酯结构单元(—R—NH—CO—O—R')的有机高分子材料(图 2(a)),为浅黄色澄清透明液体,能以任意比例与水发生化学反应,形成白色均匀黏稠乳液,其物理参数如下:pH 值为 7,比重为 1.15,固体质量分数大于等于 88%,黏度为 700 ~ 800 MPa·s,凝结时间为 60 ~ 1 600 s。试验选取的纤维为聚丙烯纤维(图 2(b)),是一种人造白色束状单丝纤维,无色、无味、无毒,密度为 0.91 g/cm³,直径为 0.04 mm,平均长度为 18 mm,抗拉强度大于等于 350 MPa,弹性模量大于等于 3 500 MPa,断裂伸长率为 40%,熔点为 165℃,燃点为 590℃。

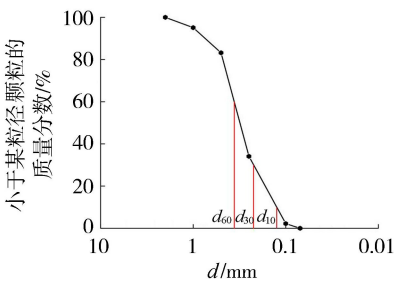
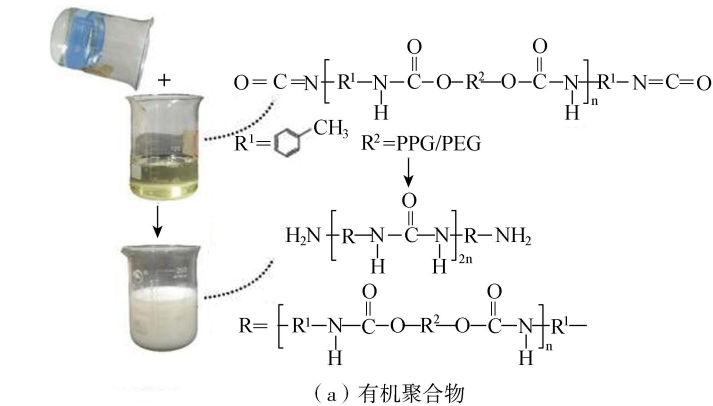


图 1 砂土的粒径分布曲线
Fig. 1 Particle size distribution curve of sand



(b) 聚丙烯纤维

图 2 试验材料
Fig. 2 Test material

1.2 试验方案

为充分探究有机聚合物与纤维复合对砂土力学特性的影响,试验试样制备为直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱体。根据预试验相关结果,设置有机聚合物含量(质量分数)为 1%、2%、3%、4%,纤维含量(质量分

数)为0.2%、0.4%,每组试样设置3个平行样,取平均值进行后续分析。将纤维以规定的含量掺入砂土中,并使纤维均匀分布在砂土中,控制初始含水率为10%,将一定质量的水与有机聚合物搅拌形成均匀的白色黏稠乳液后,将其加入砂土-纤维混合物中,充分搅拌直至混合均匀。制备好的有机聚合物-纤维-砂土混合物放入模具中,施加静态压力将试样压至设计高度(80 mm),制成干密度为 1.50 g/cm^3 的试样。

制备好的试样置于室温条件下养护48 h,利用YYW-2型应变控制式无侧限抗压仪确定有机聚合物复合纤维试样的抗压强度,根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》设定设备加载速率为 2.4 mm/min ,轴向应变达到20%停止加载。

1.3 试验结果

有机聚合物含量对砂土的应力-应变曲线有显著影响。由图3可知,砂土加载过程大致分为4个阶段:压密阶段(阶段Ⅰ)、弹性变形阶段(阶段Ⅱ)、塑性变形阶段(阶段Ⅲ)、峰后变形阶段(阶段Ⅳ)。有机聚合物含量变化后,砂土曲线逐渐上移,主要在阶段Ⅰ、阶段Ⅱ与阶段Ⅳ处曲线形态出现变化,而阶段Ⅲ的曲线形态则无较大变化。

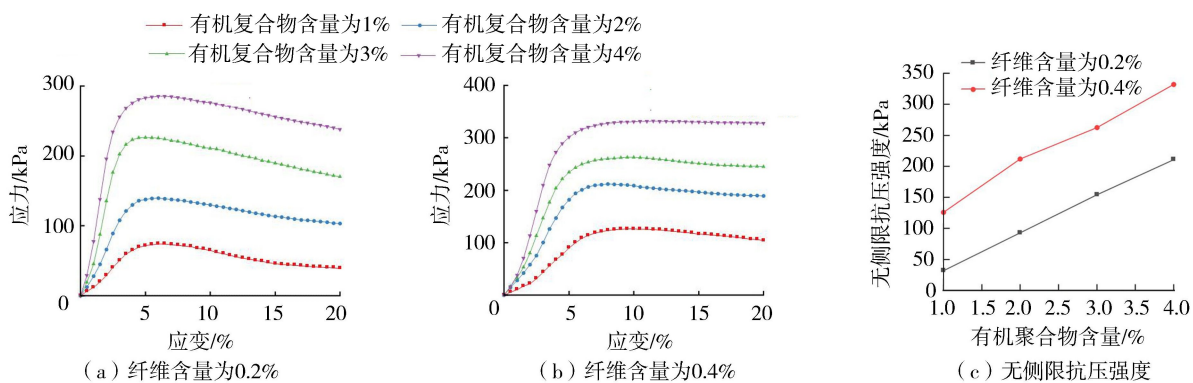


图3 不同有机聚合物含量下应力-应变曲线与无侧限抗压强度

Fig.3 Stress-strain curve and unconfined compressive strength under different organic polymer content

随着有机聚合物含量增加,改良砂土的应力-应变曲线形态发生改变,无侧限抗压强度增大。当纤维含量较少(0.2%)时,改良砂土应力-应变曲线呈应变软化型,随着有机聚合物含量增大砂土加载初期的应力增长逐渐加快,峰值应力逐渐增加。较少纤维(0.2%)时有机聚合物含量1%、2%、3%、4%的峰值应力分别为31.80、92.88、154.22、210.85 kPa,相较于有机聚合物含量1%的试样,2%、3%、4%试样的峰值应力分别提升了1.92倍、3.85倍、5.63倍。说明当有机聚合物含量提高时,在砂粒孔隙处的有机聚合物发生了凝聚,增加了其与砂土颗粒间黏结作用,提升了试样强度。当纤维含量较大(0.4%)时,随着有机聚合物含量增大,改良砂土的应力-应变曲线从应变软化型转变为应变硬化型,弹性阶段曲线斜率逐渐增大,峰值应力逐渐增大。较多纤维(0.4%)时有机聚合物含量1%、2%、3%、4%的峰值应力分别为126.03、211.66、262.66、331.89 kPa,相较于有机聚合物含量1%的试样,2%、3%、4%试样的峰值应力分别提升了0.67倍、1.08倍、1.63倍。有机聚合物含量较高(3%、4%)时,峰后应力-应变曲线变化更为缓和,展现出明显的延性破坏形式。说明有机聚合物能够填充粒间孔隙,与纤维一同包裹缠绕砂土颗粒,形成具有弹性的三维网状结构,该结构在外界荷载作用下限制了颗粒的运动并随着试样的压缩逐步发挥其弹性性能,使试样弹性阶段的应力增长逐渐加快,峰后产生延性破坏形式,有效提高了土体稳定性。

2 数值模拟

采用离散元软件建立有机聚合物-纤维改良砂土的数值模型,模型中将砂粒与纤维简化为大小不一的球颗粒,基于砂土的粒径分布曲线(图1),采用distribute随机生成相应级配区间的颗粒,然后采用一定预应力进行预压处理,预压完成后,对颗粒的不同接触类型附加上相应的胶结模型。考虑颗粒间以及接触的各向应力和力矩的传递,引入不同胶结接触模型(图2)来模拟各种颗粒间的弹性物理力学行为。图4(a)为布置的离散元模型,采用了平行黏结模型和线性接触模型2种接触模型模拟颗粒间不同的接触情况。如图4(b)所示,颗粒与颗粒之间、颗粒与纤维之间所采用的接触模型都是平行黏结模型;颗粒与加载板之间、纤维颗粒之

间的模型一致,采用线性接触模型,该模型的摩擦角设置为 0° 。数值模型初始参数包括砂颗粒参数和线性模型与平行黏结模型参数。砂颗粒参数最小粒径取 0.02 mm ,最大最小粒径比取 30 ,初始颗粒密度取 1500 kg/m^3 ,初始孔隙率取 0.1% ,阻尼系数取 0.7 。线性模型参数中线性有效模量取 60 MPa ,线性刚度比取 1.5 。平行黏结模型参数平行黏结有效模量取 $65\sim 100\text{ kPa}$,平行黏结刚度比取 1.5 ,黏结激活间隙取 $0.5\times 10^{-4}\text{ m}$,黏聚力取 $20\sim 80\text{ kPa}$,内摩擦角取 $16^{\circ}\sim 26^{\circ}$ 。对比无侧限抗压强度试验结果调整参数,最终确定不同有机聚合物含量的模型参数。

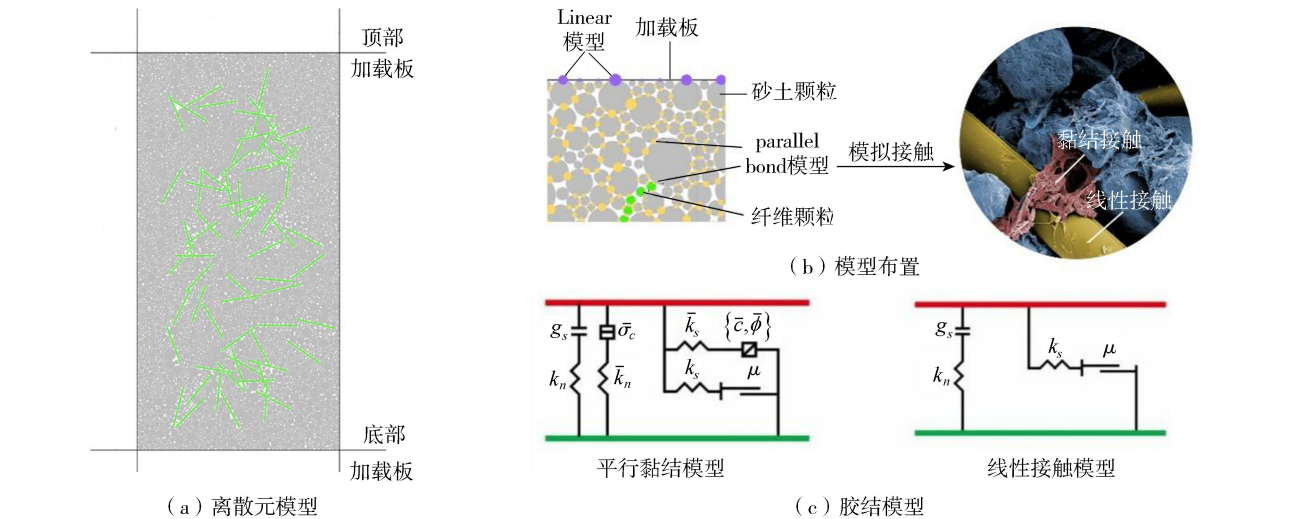


图 4 数值模型和颗粒胶结模型

Fig. 4 Numerical model and particle cementation model

2.1 模型验证

由图 5 可知,随着有机聚合物含量增大,试样的无侧限抗压强度不断增大,数值模拟结果与室内试验具有较好的相似性,验证了数值模型的可靠性。

由图 6 可知,数值模型中发展的裂隙与室内试样的形态和分布相近。有机聚合物含量较低的改良砂土发生断裂破坏,上部土体沿裂隙从试样本体上剥离。随着有机聚合物含量的提高,改良砂土发生整体的鼓胀破坏,纵切面上的宏观裂纹由单径向多径发展,表面裂隙逐渐减少,与室内试验结果相符,说明所取数值模型参数适用于改良砂土强度特性与破坏模式的进一步分析。

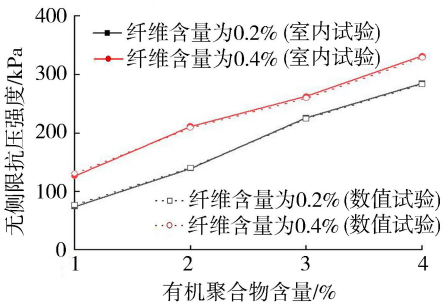


图 5 数值模拟和室内试验结果对比
Fig. 5 Comparison between numerical simulation results and laboratory test results

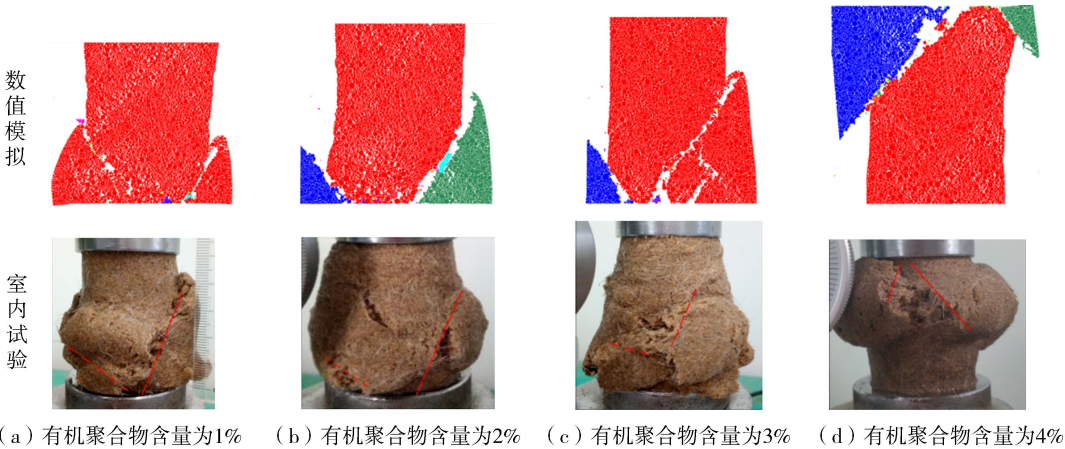


图 6 数值模拟与室内试验裂隙对比

Fig. 6 Comparison of fractures in numerical simulation and indoor test

2.2 模拟结果

由数值模型模拟的变形破坏过程可见,随着有机聚合物含量提高,颗粒间的胶结作用对试样的受力结构和破坏模式有显著影响。由图7可知(图7(a)中线的粗细代表颗粒间接触力的大小),试样力链结构可分为柱状结构、环状结构、拱状结构与树状结构,随着加载进行,模型力链由环状和柱状结构转变为拱状结构,最终沿应力路径形成树状结构。未加载时,试样通过有机聚合物的黏结作用在自重作用下维持稳定。加载后,颗粒相互挤压改变了颗粒应力分布模式,环状结构逐渐转变为水平方向的柱状结构,抵抗试样变形和荷载。加载持续进行,砂粒发生位移和旋转,柱状结构力链局部偏转,形成拱状结构有效抵抗变形。随着砂粒运动试样侧向鼓胀,形成较大空隙,拱状力链难以维持,发生破坏。拱状结构破坏后,周边的力链发生重构,组成树状结构力链。随着有机聚合物含量增大,力链分布逐渐均匀,力链强度逐渐增强,使得试样破坏区域逐渐变小。试样性质改变的本质是颗粒间内部结构发生改变,有机聚合物增强了砂粒间的作用,颗粒间作用力增大,能够有效抵抗砂粒位移,增强试样抗变形能力。

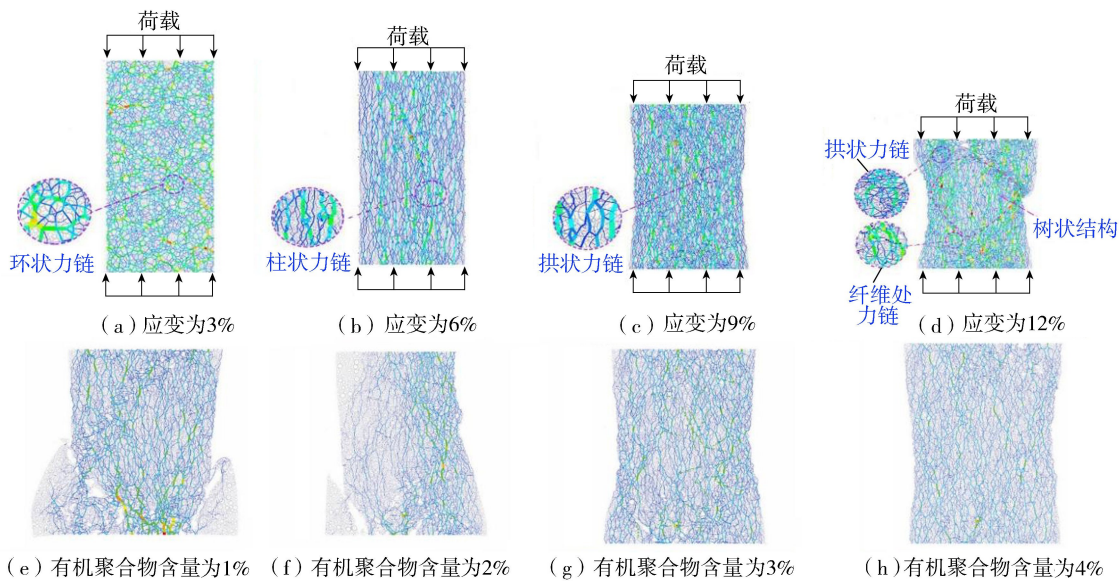


图7 试样力链结构演化

Fig.7 Evolution diagram of force chain structure of samples

为清晰地展现有机聚合物对试样抗压强度的作用规律,揭示颗粒体系的结构特征和力学特性,对同一应变(12%)模拟试样的接触力链数量及最大力链强度进行汇总并绘制其变化图如图8所示。由图8可见,当纤维含量较小(0.2%)时,随着有机聚合物含量增大接触力链数量先缓慢减少后迅速增多,最大力链强度先迅速增大后缓慢减小。当纤维含量较高(0.4%)时,随着有机聚合物含量增加接触力链数量与最大力链强度均逐渐增大,二者结合分析可知试样整体抗压强度逐渐增大。说明同一应变下随着有机聚合物含量增大,试样颗粒间黏结力逐渐增大,力链强度有效提升,最大力链强度逐渐增大,当有机聚合物含量增加至4%时,试样颗粒间黏结力大幅度提升,整体力链破坏少,力链数量迅速增多,力链最大强度略微降低。高纤维含量

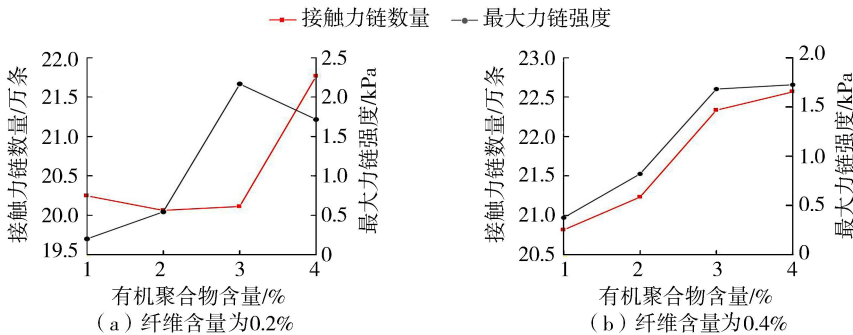


图8 不同有机聚合物含量下试样的接触力链参数变化

Fig.8 Evolution of contact force chain parameters of samples under different organic polymer contents

试样力链数量与最大力链强度均增大,说明较多纤维的加入增加了颗粒体系中的接触点,有机聚合物含量的增加增大了颗粒间黏结力,力链数量与强度均有明显提升。

为深入研究试样的破坏模式,对室内试验与数值模拟破坏阶段的结果进行分析,得出不同有机聚合物含量下试样的破坏模式及其裂隙的演化过程,如图 9 和图 10 所示。试样破坏裂隙两侧力链受压形成强接触力链,虚线区域力链相对受压区域力链弱,导致虚线区域颗粒间未黏结紧密,形成松散的颗粒体。随着荷载应力不断增加,强接触力链区域颗粒被迫发生位移和旋转,虚线区域的颗粒出现应力集中,柱状结构力链发生偏转,形成拱状结构,有效抵抗试样变形,荷载超出力链强度极限时,拱状结构力链发生断裂和重构,形成局部微裂纹,微裂纹不断扩展、延伸、发展并相互贯通,最终导致了裂隙的形成。当有机聚合物含量为 1% 时,试样发生鼓胀破坏,上下两部分块体间明显错动,形成与水平夹角 30°、60° 的较大裂隙,力链结构演变为具有较多分支的形态,裂隙路径与分布较单一。随着有机聚合物含量增加,试样鼓胀程度下降,表面大裂隙分散减小为微小裂隙分布,裂隙由单路径向多路径发育,力链区域性逐渐明显。说明有机聚合物对砂粒间的胶结作用有显著影响,随着有机聚合物含量增加,砂粒间的胶结作用逐渐增强,试样的微观结构具有了更强的抵抗力,受力后局部不稳定的拱状力链结构得到改善,导致试样破坏由单一路径向多路径发生转变。

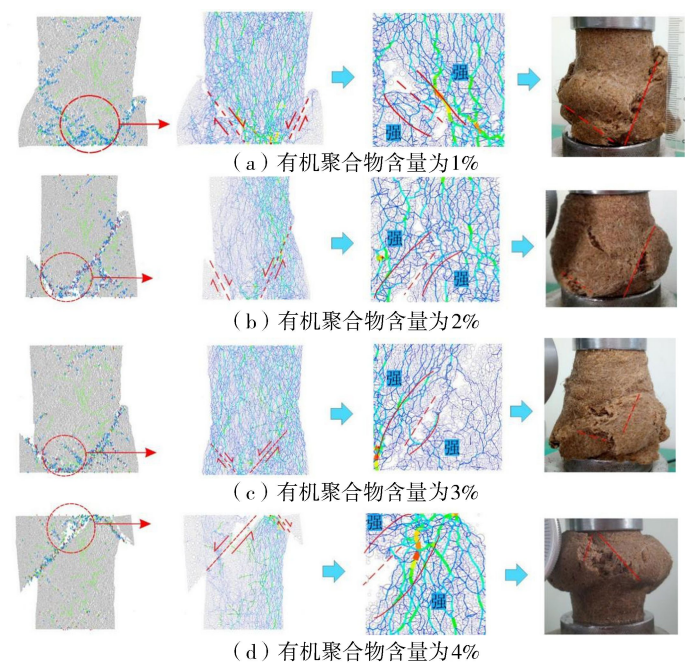


图 9 试样破坏模式
Fig.9 Failure mode of samples

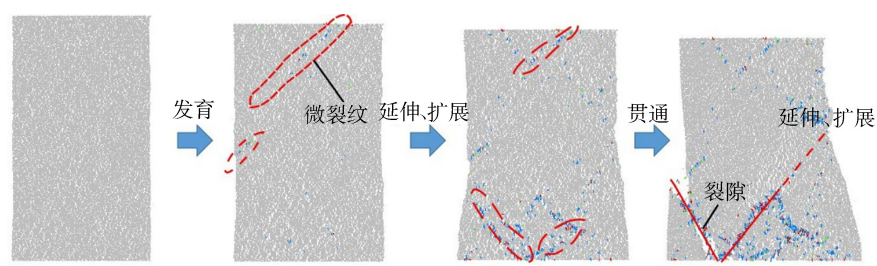


图 10 裂隙发育过程
Fig.10 Fracture development process

由图 11 可知,数值模型模拟的微裂纹扩展分不同阶段,裂隙是由砂粒间微裂纹逐渐扩展、延伸发育形成。试样微裂纹发育曲线总体呈“S”形,可分为 4 个阶段:压密和弹性阶段(阶段 I)、缓慢发展阶段(阶段 II)、快速发展阶段(阶段 III)和稳定阶段(阶段 IV)。在压密和弹性阶段,改良砂土内部无微裂纹产生,说明该阶段试样具有较好的整体性。随着加载持续进行,微裂纹在试样内部逐渐扩展发育,增长速度逐渐增大,剪切微裂纹要先于张拉微裂纹产生。随着应变增大,试样进入快速发展阶段,微裂纹数量迅速增加。当试样

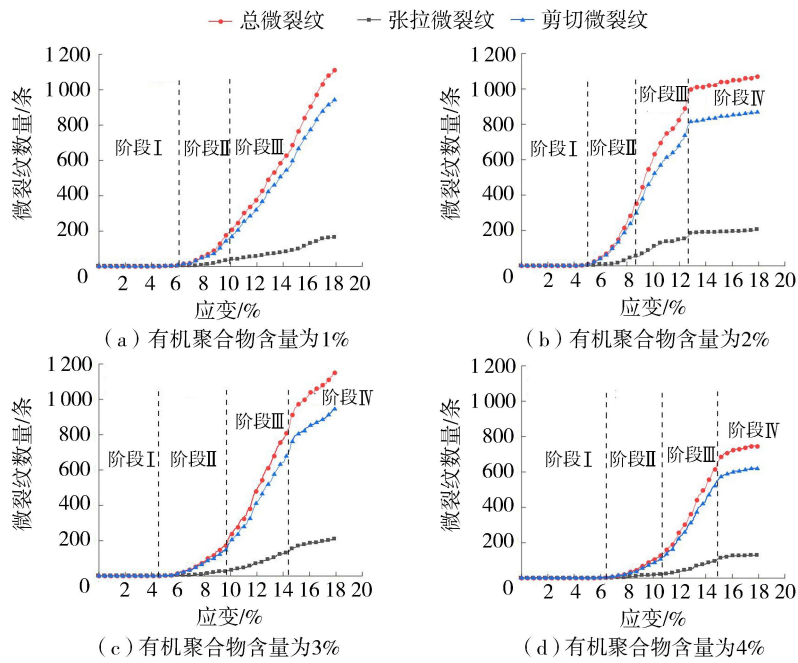


图 11 试样微裂纹数量

Fig. 11 Number of cracks in samples

应力达到峰值,试样内部结构完全破坏,微裂纹的发育明显变缓并趋于稳定,各处微裂纹延伸贯穿试样形成裂隙,试样处于稳定阶段。不同有机聚合物含量下,剪切微裂纹数量始终占主要部分,说明试样破坏主要是由颗粒间出现剪切微裂纹,剪切微裂纹扩展发育造成的。当有机聚合物含量较低(1%、2%)时,剪切微裂纹数量的增长速率远大于张拉微裂纹。当聚合物含量较高(3%、4%)时,微裂纹的增长速率得到显著削弱,总微裂纹和剪切微裂纹的数量也均减少,聚合物含量 3% 的微裂纹数量略有增加。可能原因是有机聚合物含量的增大加强了颗粒间的胶结能力,使得外部荷载引起了更大区域的颗粒受力,导致大范围的颗粒发生位移,位移后颗粒间产生较大拉力,最终破坏时微裂纹数量增多。

3 讨 论

由图 12 可知,有机聚合物复合纤维改良砂土的根本原因是改变了砂土颗粒间的微观结构,天然砂土结构松散,颗粒间无黏聚力,纤维掺入砂土中,在砂土颗粒之间随机排列形成三维网,起到了加筋作用,有机聚合物掺入砂土,填充了砂土颗粒间的孔隙,包裹和填充作用黏合纤维与砂土颗粒,有效提升砂土的整体性。有机聚合物在砂土颗粒之外也会覆盖包裹在纤维表面,有机聚合物同内部纤维贯穿连通构成网状结构,并将纤维锚固在砂土颗粒间,三者相互耦合胶结,形成一种有效的互锁结构,使得试样的整体性和力学性能得到有效提升。

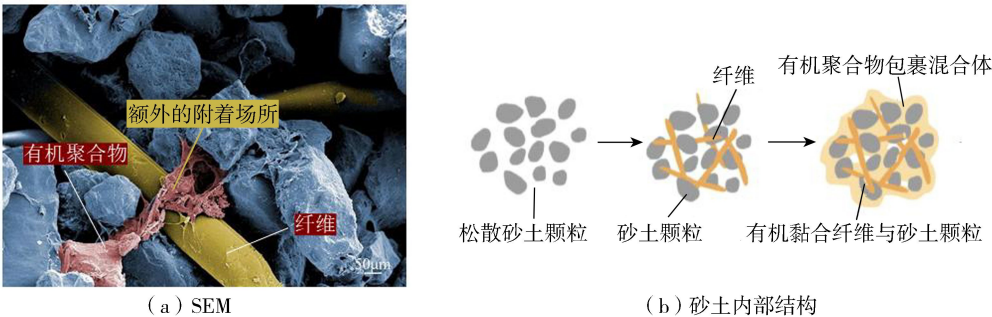


图 12 改良砂土内部结构示意图

Fig. 12 Internal structure diagram of improved sand

结合无侧限抗压强度试验结果,微观扫描电镜试验下的微观结构特征以及数值模型模拟结果,分析试样

的破坏过程及机理。改良砂土的破坏过程分为 4 个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段以及峰后变形阶段(图 13)。压密阶段在外部荷载作用下砂粒相互挤压,其接触力链分布较为均匀,试样内部未发育微裂纹。弹性变形阶段试样内纤维的加筋作用分担了部分试样受到的应力,纤维未出现破坏,而有机聚合物膜承担了主要的应力,并未出现较大破坏。试样的接触力链主要为平行于垂直方向的柱状结构,整体方向与最大主应力方向一致,微裂纹逐渐开始产生并增加,增速较为缓慢。塑性变形阶段试样内颗粒间有机聚合物膜遭到破坏,加筋处砂土颗粒与纤维发生错动,限制颗粒进一步位移,试样的接触力链随之变为拱状结构,提升了试样抗变形能力。峰后变形阶段试样则发生明显破坏,有机聚合物膜大范围破裂,破裂后试样内部纤维发挥作用,受力后通过筋-土界面、周围未破坏有机聚合物膜和接触纤维的砂粒团聚体进行分散,增大试样内部的受力面积,减轻破坏处的应力集中程度,增强了峰后抗变形能力。说明试样破坏的根本原因是砂土内部结构遭到了外部荷载的破坏,有机聚合物膜大范围破裂,纤维不断滑脱和断裂,有机聚合物-纤维-砂粒团聚体难以保持稳定,砂粒被迫发生错动产生位移与旋转,形成局部微裂纹,微裂纹不断扩展、延伸及发育,最终试样发生破坏。

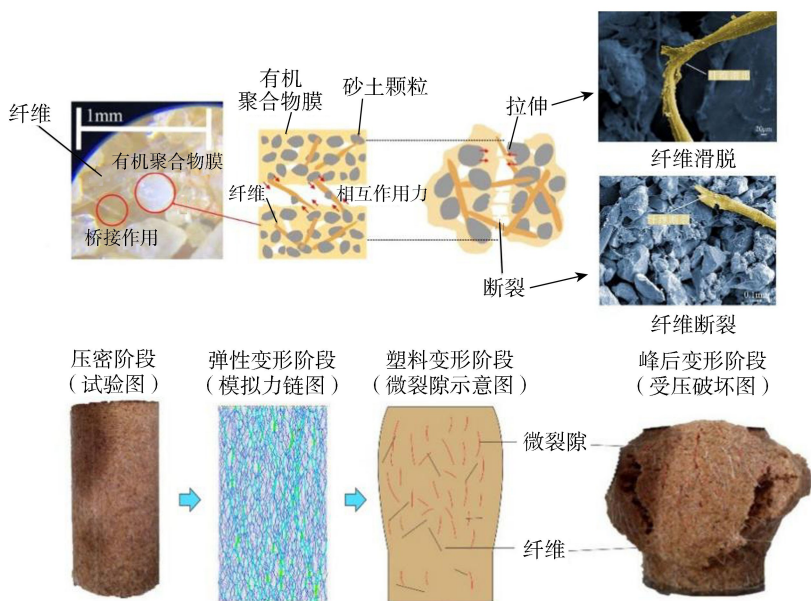


图 13 试样的破坏过程及机理

Fig. 13 Failure process and mechanism of samples

4 结 论

- a. 有机聚合物含量的增大对改良砂土的无侧限抗压强度特性会产生积极的影响。随着有机聚合物含量的增大,改良砂土应力-应变曲线弹性阶段斜率明显增大,峰值应力大幅增大,峰后曲线变化更为缓和。
- b. 数值模型模拟表明有机聚合物含量对改良砂土的力链结构演化与破坏模式有明显影响。力链结构随着有机聚合物含量与应变改变发生变化,由环状和柱状结构转变为拱状结构,周围力链组合形成树状结构。接触力链的数目和最大力链强度明显增大,微裂纹总数量及张拉微裂纹数目增多,剪切微裂纹数目减少,破坏由单一路径向多路径转变。
- c. 有机聚合物复合纤维改变了砂土颗粒间的微观结构。有机聚合物复合纤维对砂土颗粒进行黏结、包裹,有机聚合物-纤维-砂粒三者相互耦合胶结,形成一种有效的互锁网状结构,极大程度约束砂粒的位移与变形。荷载超出抗压极限后,有机聚合物膜发生破裂,有机聚合物-纤维网状结构逐渐失稳,砂粒被迫发生位移与旋转,形成微裂纹,最终形成裂隙发生破坏。

参考文献:

[1] 陈胜,周旭辉,吴勇信. 上覆黏土层条件下考虑空间变异的砂土地基地震液化可靠度研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):121-126. (CHEN Sheng,ZHOU Xuhui,WU Yongxin. Study on reliability of seismic liquefaction under the

- condition of overlying clay layer considering the spatial variability of sandy soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 121-126. (in Chinese))
- [2] JIN L, QIAO F, YONG W, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of organic polymer reinforced sand[J]. International Journal of Polymer Science, 2018, 2018: 3503415.
- [3] 冯巧, 刘瑾, 卢毅, 等. 一种复合加固剂改良砂土的强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 903-911. (FENG Qiao, LIU Jin, LU Yi, et al. Experimental study on strength of sand reinforced with composite reinforcement agent[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 903-911. (in Chinese))
- [4] 宋杨. 纤维加筋微生物固化砂土力学特性试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [5] 周林禄, 苏雷, 凌贤长, 等. 纤维加筋砂土抗液化试验与数值模拟[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1567-1576. (ZHOU Linlu, SU Lei, LING Xianzhang, et al. Experimental and numerical modeling on liquefaction resistance of fiber reinforced sand[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1567-1576. (in Chinese))
- [6] HU C, WENG X, LIU C, et al. Performance of polypropylene fiber-reinforced solidified soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 8859358.
- [7] TONG F, MA Q, XING W. Improvement of clayey soils by combined bamboo strip and flax fiber reinforcement[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 7274161.
- [8] 唐皓, 李华华, 刘驰洋, 等. 棕榈加筋黄土剪切强度特性及细观结构[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7832-7837. (TANG Hao, LI Huahua, LIU Chiyang, et al. Shear strength characteristics and meso-mechanism of palm-reinforced loess[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7832-7837. (in Chinese))
- [9] 安宁, 晏长根, 王亚冲, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土抗侵蚀性能试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 501-510. (AN Ning, YAN Zhanggen, WANG Yachong, et al. Experimental study on anti-erosion performance of polypropylene fiber-reinforced loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 501-510. (in Chinese))
- [10] 卢浩, 晏长根, 贾卓龙, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 82-92. (LU Hao, YAN Zhanggen, JIA Zhuolong, et al. Shear strength and disintegration properties of polypropylene fiber-reinforced loess[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 82-92. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] SILVEIRA M V, CASAGRANDE M D T. Effects of degradation of vegetal fibers on the mechanical behavior of reinforced sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(12): 3875-3887.
- [13] ESKISAR T, ALTUN S, KARAKAN E. Pore pressure development in sand specimens reinforced with polypropylene fibers[J]. Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment And constructions, 2019, 4(9): 2266-2274.
- [14] 郝建斌, 魏兴梅, 姚婕, 等. 麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 764-768. (HAO Jianbin, WEI Xingmei, YAO Jie, et al. Strength characteristics and mesostructure of wheat straw reinforces soil[J]. Journal of Tongji University (Natural science), 2019, 47(6): 764-768. (in Chinese))
- [15] 李赛, 雷学文, 刘磊, 等. 玉米须加筋微生物固化淤泥的抗剪强度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13837-13844. (LI Sai, LEI Xuewen, LIU Lei, et al. Experimental study on shear strength of silt solidified by microorganism with cornsilk fiber reinforcement[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(32): 13837-13844. (in Chinese))
- [16] 王成, 刘春辉, 刘翔宁, 等. 剑麻纤维长度对海砂力学性能的影响[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2022, 35(4): 482-486. (WANG Cheng, LIU Chunhui, LIU Xiangyu, et al. Effect of sisal fiber length on mechanical properties of sea sand[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2022, 35(4): 482-486. (in Chinese))
- [17] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006(2): 141-146. (FAN Henghui, GAO Jianen, WU Pute. Research status and prospect of soil curing agent[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2006(2): 141-146. (in Chinese))
- [18] 周海龙, 申向东. 土壤固化剂的应用研究现状与展望[J]. 材料导报, 2014, 28(9): 134-138. (ZHOU Hailong, SHEN Xiangdong. Research status and prospect of soil curing agent application[J]. Materials Review, 2014, 28(9): 134-138. (in Chinese))
- [19] 李丽华, 岳雨薇, 肖衡林, 等. 稻壳灰-水泥固化镉污染土性能及影响机制[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 252-261. (LI Lihua, YUE Yuwei, XIAO Henglin, et al. Performance and influence mechanism of Cd-contaminated soil solidified by rice husk ash-cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 252-261. (in Chinese))

Engineering,2013,31(3): 1-8. (in Chinese))

[37] HERSBACH H,DE-ROSNAY P,BELL B,et al. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. Technical Report, ERA Report Series 27[R]. Shinfield Park: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2018.

[38] 崔晶,张丰启,李宏江. 山东半岛东部沿海海浪预报方法初步探讨[J]. 海洋预报,2009,26(4): 101-105. (CUI Jing, ZHANG Fengqi,LI Hongjiang. A preliminary discussion on the wave forecasting method in the east coast of Shandong Peninsula [J]. Marine Forecasts,2009,26(4): 101-105. (in Chinese))

[39] 魏诗晏,杨伟,赵亮. 荣成外海海流特征及影响因素[J]. 海洋科学,2022,46(4): 55-66. (WEI Shiyan,YANG Wei,ZHAO Liang. Characteristics and influencing factors of the currents in the Rongcheng offshore region[J]. Marine Sciences,2022,46(4): 55-66. (in Chinese))

[40] 刘凡,陆小敏,徐丹,等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):387-393. (LIU Fan,LU Xiaomin,XU Dan,et al. Research progress of ocean waves forecasting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):387-393. (in Chinese))

[41] 郑金海,鲍仕昱,张蔚,等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4): 1-6. (ZHENG Jinhai,BAO Shiyu,ZHANG Wei,et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):1-6. (in Chinese))

[42] 殷妍,邓夕贵,王慧,等. 中国东部大陆架海域波能流特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):96-103. (YIN Yan,DENG Xigui,WANG Hui,et al. Characteristic study of wave energy flux in the continental shelf of eastern China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):96-103. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-12 编辑:彭桃英)

(上接第 106 页)

[20] 倪静,王子腾,耿雪玉. 植物-生物聚合物联合法固土的试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(11):2131-2137. (NI Jing, WANG Ziteng,GENG Xueyu. Experimental study on combined plant-biopolymer method for soil stabilization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(11):2131-2137. (in Chinese))

[21] 刘瑾,张达,汪勇,等. 高分子稳定剂生态护坡机理及其应用[J]. 地球科学与环境学,2016,38(3):420-426. (LIU Jin, ZHANG Da,WANG Yong,et al. Reinforcement mechanism of soil slope surface-with polymer soil stabilizer and its application [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2016,38(3):420-426. (in Chinese))

[22] 喻永祥,郝社锋,蒋波,等. 基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究[J]. 水文地质工程地质,2021,48(2):174-181. (YU Yongxiang,HAO Shefeng,JIANG Bo,et al. An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials [J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2021, 48(2): 174-181. (in Chinese))

[23] 王琼亚,刘瑾,李鼎,等. 高分子稳定剂改良河道岸坡表层砂土水稳定性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020,40(4): 566-573. (WANG Qiongya,LIU Jin,LI Ding,et al. Experimental study on water stability of polymer stabilized sand on river bank slope surface[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2020,40(4):566-573. (in Chinese))

[24] WANG Y,YANG K,TANG Z. In situ effect of combined utilization of fly ash and polyacrylamide on sand stabilization in North China[J]. Catena,2018,172: 170-178.

[25] 彭劼,商志阳,曹天赐,等. 高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(1):99-104. (PENG Jie, SHANG Zhiyang, CAO Tianci, et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):99-104. (in Chinese))

[26] 梅红,赵洪岩,李明阳,等. 剑麻纤维复合基材土岩界面剪切性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5): 79-86. (MEI Hong, ZHAO Hongyan, LI Mingyang, et al. Experimental study on shear properties of soil-rock interface of sisal fiber composite material[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):79-86. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-26 编辑:刘晓艳)