复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

高聚物改良砂土强度特性和变形特征试验研究

白玉霞 刘瑾 宋泽卓 张晨阳 何承宗 邓永锋

Experimental study on strength and deformation characteristics of polymers treated sand

BAI Yuxia, LIU Jin, SONG Zezhuo, ZHANG Chenyang, HE Chengzong, DENG Yongfeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231129.003

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沥青四组分与不同加载模式下橡胶沥青零剪切黏度相关性

Correlation between asphalt four components and asphalt rubber zero shear viscosity under different loading modes

复合材料学报. 2018, 35(4): 999–1013 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170712.001

高分子固化剂-玄武岩纤维/砂土复合材料强度特性

Strength characteristics of polymer curing agent–basalt fiber/Sand composites

复合材料学报. 2019, 36(10): 2407–2417 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181108.007

丁羟包覆层老化宏微观特性相关性及贮存寿命预估

Correlation between macroscopic microscopic aging properties and lifetime prediction of hydroxyl–terminated polybutadiene inhibitor

复合材料学报. 2019, 36(5): 1327–1334 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180622.001

孔隙微观特征对碳纤维/环氧树脂复合材料横向拉伸强度的影响

Influence of void micro–characteristics on transverse tensile strength of unidirectional carbon fiber/epoxy resin composites

复合材料学报. 2018, 35(7): 1864–1868 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170825.001

连续纤维增强树脂复合材料纵向压缩强度预测模型的发展及其影响因素

Development of prediction model and influencing factors of longitudinal compressive strength for continuous fiber reinforced polymer composites

复合材料学报. 2020, 37(1): 1–15 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190917.004

胶层网格尺寸与性能参数相关性的反演研究

Inversion study on the correlation between the mesh size and the adhesive properties

复合材料学报. 2021, 38(11): 3950–3961 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210129.005

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 41 卷 第 8 期 8 月 2024 年
Vol. 41 No. 8 Aug 2024

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20231129.003

高聚物改良砂土强度特性和变形特征试验研究

分享本文

白玉霞[1,2,3]，刘瑾*[3]，宋泽卓[3]，张晨阳[3]，何承宗[3]，邓永锋[1]

（1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院，武汉 430068；2. 湖北工业大学 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室，武汉 430068；3. 河海大学 地球科学与工程学院，南京 211100）

摘 要：基于高聚物加固砂土展开抗剪和抗压试验，分析了高聚物掺量、养护时间和干密度对加固砂土强度和变形特征的影响，并阐明其相关性，最后结合 SEM 图像揭示了高聚物加固砂土的破坏机制。结果表明：(1) 3 个研究变量对加固砂土抗压和抗剪强度有显著促进作用，其中高聚物含量和养护时间对抗剪强度的影响主要体现在黏聚力上，并且强度与养护时间强正相关，与高聚物含量和干密度中等正相关，可用对数函数 (或线性函数) 表示其关系；(2) 3 个研究变量增加时，试样剪切特征由剪切硬化型转变为剪切软化型、破坏位移逐渐减小 (干密度减小时)，轴向应力-应变曲线表现明显的峰后缓和现象并产生明显的变化，破坏模式以鼓胀并伴有裂缝为主，形态由 E 型逐渐变为 G 型 (干密度减小时)；(3) 加固砂土变形特征与养护时间强正相关，与干密度中等负相关，而与高聚物含量相关性不显著，峰值应变与 3 个研究变量呈多项式 (或线性) 关系；(4) 对于高聚物加固砂土，最佳掺量为约 2%，养护 24 h 及以上时效果显著；(5) 高聚物通过吸附、粘结和填充作用在砂粒间形成有效稳定的三维网状膜结构，从而改良砂土微观结构，高聚物在荷载下的变化类型占比决定了加固砂土的变形能力和破坏模式，而这与高聚物掺量、养护时间和干密度密切相关。

关键词：高聚物；砂土；强度特性；变形特征；相关性分析；微观机制

中图分类号: TU443；TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)08-4272-15

Experimental study on strength and deformation characteristics of polymers treated sand

BAI Yuxia[1,2,3], LIU Jin*[3], SONG Zezhuo[3], ZHANG Chenyang[3], HE Chengzong[3], DENG Yongfeng[1]

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of River and Lake, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Polymer has broad application prospects in soil stabilization. However, there is currently little research on the strength and deformation characteristics of polymer treated soil, as well as the degree of influence of different influencing factors. In this work, a series of unconfined compression strength and shear strength tests were performed on a water-soluble polymer treated sand, and subsequently, the effects of polymer content, curing time and dry density on the strength and deformation characteristics of the treated sand were analyzed. Also, the degree of influence of the three research variables was elucidated using correlation analysis. And finally, the related mechanism of treated sand was revealed using SEM observations. The results show that: (1) The three studied

收稿日期：2023-11-06; **修回日期**：2023-12-07；**录用日期**：2023-12-23；**网络首发时间**：2023-12-29 18:45:42
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231129.003
基金项目：国家自然科学基金 (52208339; U22A20232); 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室开放研究基金 (HGKFZP007); 江苏省水利科技项目重大技术攻关资助项目 (2017010)
National Natural Science Foundation of China (52208339; U22A20232); Open Project Funding of Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei University of Technology (HGKFZP007); Water Conservancy Science and Technology Project of Jiangsu Province, China (2017010)
通信作者：刘瑾, 博士, 教授, 研究方向为环境地质工程 E-mail: jinliu920@163.com
引用格式：白玉霞, 刘瑾, 宋泽卓, 等. 高聚物改良砂土强度特性和变形特征试验研究 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4272-4286.
BAI Yuxia, LIU Jin, SONG Zezhuo, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of polymers treated sand[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4272-4286(in Chinese).

variables significantly enhance the unconfined compression strength and shear strength, and the influence of polymer content and curing time on shear strength was mainly reflected in the cohesion. The strength of polymer treated sand is significantly and positively correlated with curing time, and moderately and positively correlated with polymer content and dry density. In addition, these relationships can be represented by a logarithmic function or linear function. (2) As the polymer content, curing time and dry density increase, the shear characteristics of treated sand change from shear hardening type to shear softening type, and the shear failure displacement of treated sand decreases gradually (as dry densities decreases). Also, its axial stress-strain curve shows obvious post-peak easing phenomenon and then produces obvious changes, and the compression failure pattern is dominated by bulging and accompanied by cracks, what's more, this pattern gradually changes from E-type to G-type (as dry densities decreases). (3) The deformation capacity of treated sand is strongly and positively correlated with curing time, moderately and positively correlated with dry density, while the correlation with polymer content is not significant. Additionally, the peak strain has a polynomial (or linear) relationship with three studied variables. (4) For this polymer treated sand, the optimum mixing content is about 2%, and when the curing time reaches 24 h and above, it shows a better treatment effect. (5) The polymer forms an effective and stable three-dimensional membrane structure in the sand particles by adsorption, bonding and filling effects, and thus effectively improves the microstructure of sand. The proportion of changes in the types of polymers under load determines the strength, deformation capacity, and failure mode of treated sand, which is closely related to polymer content, curing time and dry density.

Keywords：polymer；sand；strength properties；deformation characteristics；correlation analysis；micro-mechanism

砂土由于具有渗透性强、结构松散、黏结性小等特点，使砂土河岸在河水冲刷、船行波冲击和降雨、地表径流侵蚀等作用下导致岸坡强度降低，发生岸坡掏蚀、坍塌等各类问题，对工程建设和人民生命财产安全造成严重影响。需要对岸坡进行加固以提高稳定性，目前常用措施可分为工程加固、物理加筋、化学固化等。工程加固有挡土墙、抗滑桩、混凝土板和生态砖等防护结构[1-4]，这些措施可以达到较好的防护效果，但同时这种结构抑制了植物生长，在耐久性、适应性和结构稳定性方面容易受到环境的影响，并且结构下覆土壤在大雨中容易被流水侵蚀[3, 5]。物理加筋是在土体中布设或添加土工布、废弃轮胎颗粒、各类纤维等合成材料，利用筋-土界面间的相互作用达到加筋效果，分散的加筋材料能够增强土体的强度和韧性[6-8]，但这种方法也没有从根本上改良土体，加固效果与化学固化相比较差。化学固化则通过在土体中加入改性材料(如水泥、石灰、高聚物等)，利用其与土颗粒间的反应改变土颗粒表面特性并建立连接，从而达到较好的加固效果[9-10]。该方法操作简单、固化效果好，并且能从根本上改善土体特性，得到了广泛关注。

目前，常用的土体固化材料有水泥、石灰、粉煤灰等，均取得了较好的效果。大量的研究和实践表明这些材料可以有效改善土体结构，提高土体的硬度、强度和水稳定性[11-13]。在南水北调中线工程和引江济淮工程中，利用水泥固化成为膨胀土渠道边坡表层防护的首选方案[14]。但进一步的研究实践发现，这类固化材料形成的致密结构和碱性环境会影响植被生长，并造成环境污染，同时固化后的土体脆性大，容易发生突然破坏。因此，许多学者采用一些新型环保材料(如高聚物、离子固化剂、微生物等)作为改良剂改良土体，均取得不错的效果[5, 9, 15-17]。其中，高聚物是一类含有重复单元的高分子化合物，常温下能与土颗粒或黏土矿物在其表面形成胶结，从而使土体结构稳定、强度增强、耐冲刷[18-20]。

在高聚物固化砂土效果方面，Rezaeimalek 等[15, 21]对一种液体聚合物加固砂土和黏土的研究表明，固化黏土和固化砂土均具有良好的强度、耐久性和减缓膨胀等特点。Liu 等[18, 22]的系列研究表明，高聚物加固砂土的强度特性、抗渗透特性、水稳定性和抗冲刷性能均随稳定剂掺量的增加显著提高。Rezaeimalek 等[15]、Golpazir 等[23]和 Buzzi 等[24]研究了高聚物掺量、试样密实度、养护时间和环境对高聚物加固砂土效果的影响，Gilazghi 等[25]进一步指出液体高聚物先与水拌合加固效果最优，养护 4 天后时间越长效果更好。在变形特征方面，Bai 等[26]和 Xiao 等[27]发现，聚氨酯固化土应力-应变曲线表现出明显的延性破坏，

轴向破坏应变与抗压强度间存在较好的线性关系[28]。此外，纤维的掺入可以进一步提高高聚物固化土的延性[29-30]。在高聚物固化土耐久性方面，Bai 等[26]、Song 等[31]、Liang 等[32] 和王颖等[33] 研究了温度变化、化学成分和水对高聚物改良砂力学性能的影响，王琼亚等[17] 和 Liu 等[34] 进一步提出用改良砂土在水中的崩解程度和抗剪强度来定量评价其水稳定性能。Liu 等[5] 和 Chang 等[35] 通过室内植物生长试验发现高聚物的掺入在一定程度上可以促进植物生长。Chang 等[16, 36] 介绍了聚合物土壤处理 (BPST) 技术，并从加固效果、经济和生态效益等方面论证了其应用前景广阔。高聚物在土质边坡坡面防护[36]、高陡边坡生态修复[37]、路面处理[36] 等工程中取得了较好的应用成果。

综上所述，高聚物在岩土工程应用前景广阔，未来对其指导需求会越来越高。目前围绕高聚物加固土体取得了较多成果，但对高聚物改良砂土的变形特征研究较少，特别是破坏特征，而这对高聚物固化土在工程中的应用甚至失效后的修复工作有重要影响。因此，通过对一种广泛使用的水溶性生态酯类高聚物加固砂土开展抗剪和抗压试验，研究不同高聚物掺量、养护时间和干密度下改良砂土的应力-应变曲线、破坏位移、破坏形态和强度的变化规律，并对改良砂土强度和变形特征与 3 个研究变量的相关性进行分析，最后结合改良砂土微观结构特征揭示高聚物改良砂土的内在机制和 3 个研究变量的影响机制。

1 试验材料与方案

1.1 原材料

试验研究土样取自新孟河延伸拓浚工程常州段。取回的原状土首先进行风干、碾碎处理，并过 2 mm 筛，其次根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)[38] 测试土样的基本物理参数，结果见表 1。该砂土的粒径分布曲线如图 1 所示，粒径处于 0.075~2 mm，粒径在 0.1~0.5 mm 间的较集中，约占 80%，依据《土的工程分类标准》(GB /T 50145—2008)[39]，该砂土为级配不良砂。

表 1 砂土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of sand

Type	Specific gravity	Maximum dry density/(g·cm^{-3})	Minimum dry density/(g·cm^{-3})	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{50}/mm	d_{60}/mm	Nonuniform coefficient C_u	Curvature coefficient C_c	Classifications
Sand	2.65	1.69	1.33	0.12	0.23	0.31	0.36	3.00	1.23	Graded poor sand

Note: d_{10}, d_{30}, d_{50}, d_{60} refer to the grain size at which 10%, 30%, 50% and 60% of the total mass of the sample is contained, respectively, on the distribution curve.

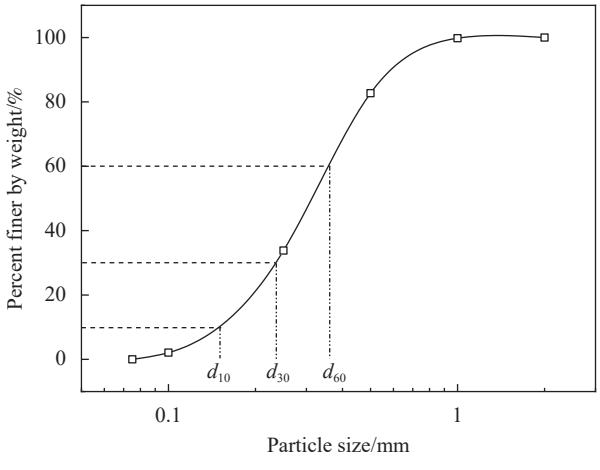


图 1 砂土粒径分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution of prepared sand

试验采用的砂土固化剂为一种水溶性生态酯类高聚物，是一种淡黄色透明乳液，其基本物理参数见表 2。该高聚物在水中能够迅速乳化，形成乳白色乳液，并且该高聚物能与水以任意比例互溶，对砂土颗粒有很强的黏附力。高聚物分子链上含有大量的异氰酸酯 (—NCO) 基团，能够与羟基快速反应，极大减少高聚物残留在土体和水中的机率；此外，高聚物与水反应的最终产物可自然降解成 N_2、CO_2 和 H_2O 等物质，对周边环境的影响较小，具有良好的环境效益[20]。高聚物在温度为−10~50℃，紫外线强度不超过 250 mW/m^2，没有化学介质影响的情况下耐久性约为 10 年[20, 40]。该高聚物在河岸生态治理、边坡生态防护等工程

表 2 高聚物基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of used polymer

Appearance	G_s	η/(MPa·s)	W_s/%	pH	C_w
Light yellow transparent emulsion	1.15	700-800	≥88	7	≥40

Note: G_s, η, W_s and C_w are the specific gravity, viscosity, solid content and water holding capacity of the used polymer, respectively.

中具有良好的应用前景。

1.2 试样制备

采用静压法制样，具体步骤如下：

(1) 首先按设定配比取适量的砂土、水和高聚物，根据预试验结果设计高聚物含量 (高聚物与砂土质量的百分比) 为 0.5%、1%、2%、3%、4%，试样干密度设计为 1.4、1.45、1.5、1.55 和 1.6 g/cm^3，含水率为 15%；其次，将备好的高聚物和水混合，搅拌至形成乳白色溶液；随后，将其与砂土混合，搅拌至均匀混合物 (图 2(a))。

(a) PU-sand mixture (b) Sample for shear strength test (c) Sample for UCS test

PU—Polyurethane; UCS—Unconfined compressive strength

图 2 高聚物改良砂土试样

Fig. 2 Sample of polymer treated sand

(2) 将高聚物与砂土混合物倒入试样标准模具，施加静力荷载压制成高 20 mm、直径 61.8 mm 圆饼状试样 (抗剪试验，图 2(b)) 和高 80 mm、直径 39.1 mm 的圆柱体试样 (抗压试验，图 2(c))。通常 0.5% 高聚物-砂土需静压 5 min，3%、4% 的需静压 1 min 左右，与高聚物溶液凝结时间相关 (1~25 min，随溶液浓度增加逐渐减小)[18, 29]。

(3) 静压数分钟后卸除荷载取出试样，获得制备好的改良砂土试样。随后，将其在标准恒温恒湿养护箱中 (温度约 25±2℃，湿度约 40%±5%) 养护 1 h、3 h、6 h、12 h、24 h、48 h、72 h 后进行试验。

1.3 试验方法

1.3.1 抗剪试验

采用 ZJ 型应变控制式直剪仪 (南京一应土工仪器配套有限公司) 进行抗剪试验。试验中，设定剪切速率为 1.2 mm/min，法向应力为 100、200、300 和 400 kPa，对试样施加剪切荷载直至破坏；试验结束后，记录试样剪切破坏形态和沿剪面产生的破坏位移。

1.3.2 抗压试验

采用 YYW-2 型应变控制式无侧限抗压仪 (南京一应土工仪器配套有限公司) 进行抗压试验。试验中，设置加载速率为 2.4 mm/min，记录试样在轴向荷载下的应力、应变变化；试验结束后，记录试样破坏形态。为减少误差，每组试验均设定 3 个平行试样。

1.3.3 SEM 试验

采用日立公司 SU3500 扫描电子显微镜进行试样微观结构研究。选取强度试验中的典型试样，切割成 2 mm×2 mm×1 mm 左右的立方块；然后对其进行烘箱干燥，去除水分；随后对其进行镀金处理以提高土样表面的导电性；最后利用扫描电子显微镜观察试样的微观特征。

1.3.4 相关性分析

利用 SPSS 27 软件对试验数据进行统计分析。3 个研究变量对改良砂土强度和变形的影响采用皮尔逊相关系数进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 高聚物含量的影响

2.1.1 高聚物固化砂土抗剪强度和剪切变形特征

不同高聚物含量下加固砂土的剪切应力-位移曲线见图 3。高聚物的掺入对砂土剪切应力-位移

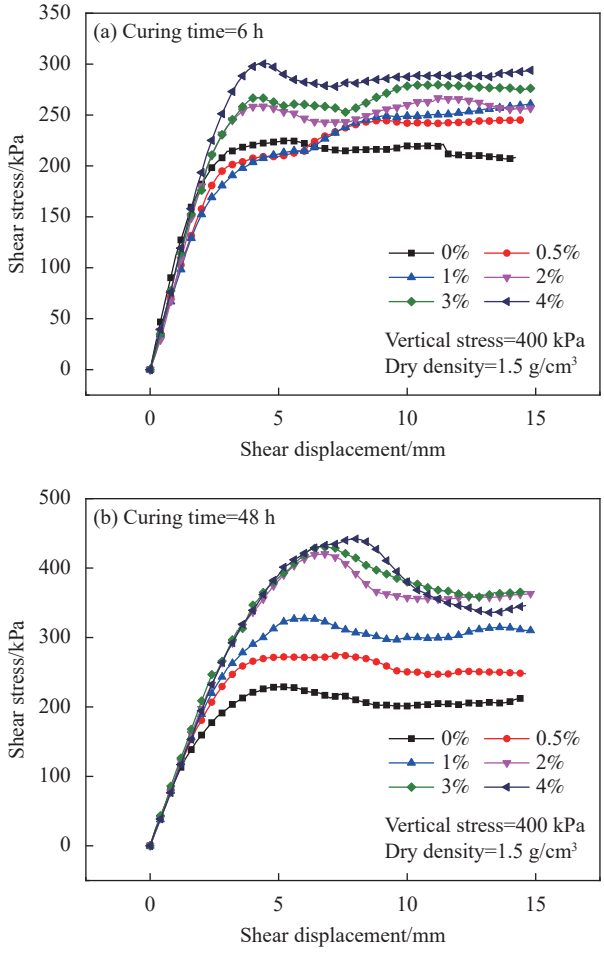


图 3 不同高聚物含量下加固砂土剪切应力-位移曲线

Fig. 3 Shear stress-displacement curves of polymer treated soil with different polymer contents

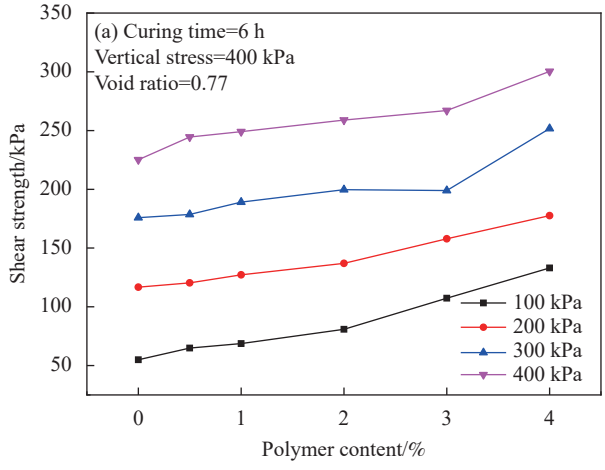
曲线的形态有显著影响，随着高聚物含量增加，曲线形态由剪切硬化型变为剪切软化型。这与加固材料在剪切过程中出现接触，形成作用链，表现出更大的抗力有关[41]。

由图 3 还可知，养护时间较长时，高聚物含量越大，曲线的峰值剪切位移也越大，表明高聚物含量对改良砂土的剪切变形能力有显著影响。当高聚物含量≥2% 时，峰值剪切位移的变化相对较小。

改良砂土抗剪强度 (对于剪切硬化型曲线，以剪切位移 4 mm 处对应的剪应力为抗剪强度) 与高聚物含量关系见图 4。高聚物的掺入和变化均对抗剪强度有显著的促进作用。养护时间较短或者高聚物含量达到 2% 以上时，改良砂土抗剪强度随高聚物掺量的变化较小。表明高聚物改良砂土达到一定养护时间后表现出较好的加固效果，并且高聚物掺量并不是越多越好，存在最优值，约为 2%。

根据库伦抗剪强度定律计算的不同高聚物含量下加固砂土抗剪强度指标 (黏聚力 c 和内摩擦角 φ) 如表 3 所示。砂土的黏聚力较小，不足数千帕，掺入 4% 高聚物后，其黏聚力可达 183.52 kPa；而内摩擦角未表现出明显的变化，在 29°~36°范围内波动，通常高聚物固化砂土内摩擦角最大提高约 10°[16, 18, 20, 42]，进一步表明高聚物对固化砂土的抗剪强度影响主要体现在黏聚力上。固化砂土黏聚力与高聚物含量呈较好的线性关系：y=18.64x-6.69 (拟合度 R^2=0.951，时间 T=6 h) 和 y=43.56x+17.35 (R^2=0.72，T=48 h)，表明固化砂土的黏聚力大小依赖于高聚物含量的多少。Cho 等[42] 指出固化砂土的黏聚力、内摩擦角与聚合物掺量的关系分别为：$y=90x^{0.724}$ (R^2=0.7) 和 Δy=4.2x(R^2=0.36)。高聚物固化土体效果与聚合物类型、土体类型、级配、密实度、养护时间等因素有关，其定量描述仍需深入研究。

此外，试验中发现高聚物对砂土剪切破坏形态有显著影响 (图 5)。对于砂土，试验中上下剪切盒之间接触紧密，砂粒沿剪切面产生位移，并且在卸除荷载后无法获得完整试样 (图 5(a))；而加固砂土试样上下剪切盒之间有明显缝隙，这可能是由于沿剪切面产生位移的除了砂土颗粒，还有高聚物粘结砂粒形成的团聚体，并且在卸除荷载后可获得完整的破坏试样 (图 5(b))。测量了各试样的剪切破坏位移，结果见图 6。剪切破坏位移与高聚物含量呈幂函数关系，随高聚物含量增



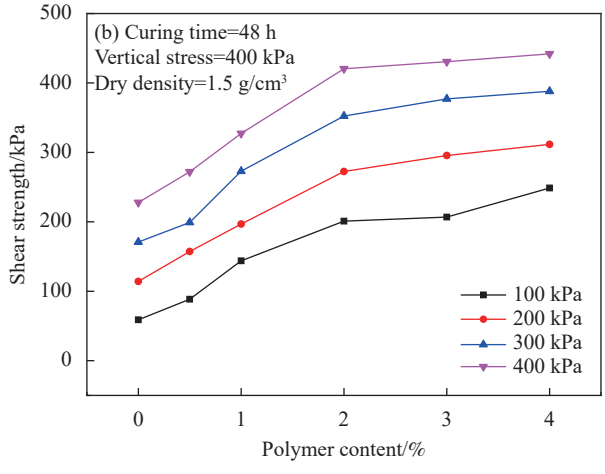


图 4　高聚物固化砂土抗剪强度与高聚物含量的关系

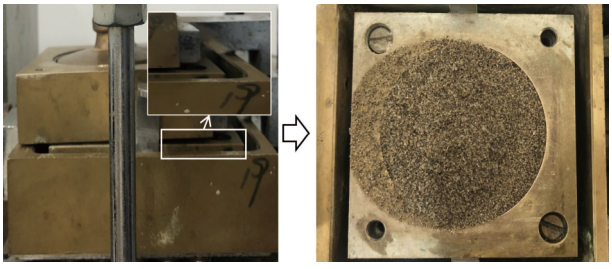
Fig. 4　Relationship between shear strength and polymer content of treated sand

表 3　不同高聚物含量下加固砂土抗剪强度参数

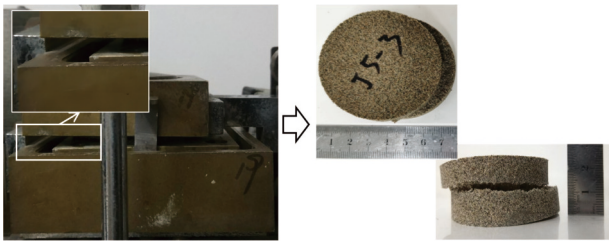
Table 3　Shear strength index of improved sandy soils with different polymer contents

T/h	ρ_d/(g·cm^{-3})	W_p/%											
		0		0.5		1		2		3		4	
		c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
6	1.5	0.79	29.67	2.79	30.85	7.79	31.09	19.91	30.83	52.69	27.49	71.65	29.95
48	1.5	2.03	29.41	31.17	30.63	78.53	32.08	127.03	36.43	139.25	36.98	183.52	33.27

Notes: T—Curing time; ρ_d—Dry density of sample; W_p—Polymer content; c—Choesion; φ—Internal friction angle.



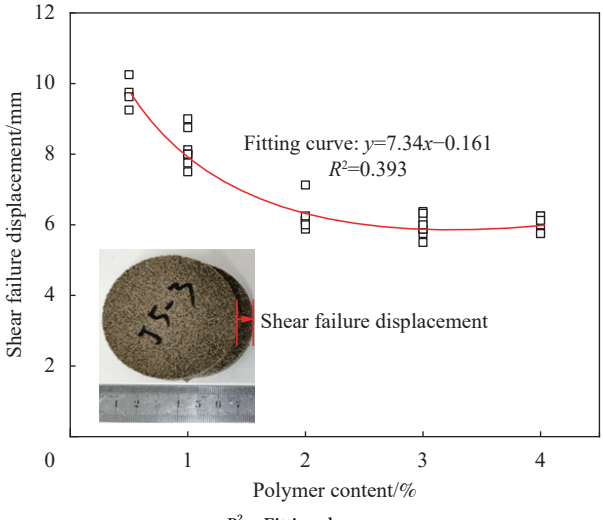
(a) Untreated sand



(b) Treated sand

图 5　高聚物加固砂土试样剪切破坏形态

Fig. 5　Shear failure pattern of untreated and polymer treated sand sample



R^2—Fitting degree

图 6　不同高聚物含量下加固砂土剪切破坏位移

Fig. 6　Shear failure displacement of treated sand with different polymer contents

加逐渐减小，并且减小速率逐渐降低，以 2% 掺量为拐点。

2.1.2　高聚物固化砂土抗压强度和压缩变形特征

不同高聚物含量下加固砂土轴向应力-应变曲线见图 7。各试样的轴向应力-应变曲线均呈现出先快速增加到峰值，然后缓慢降低直至稳定的变化趋势，出现明显的峰后缓和现象，和 Bai 等[26]和 Xiao 等[27]研究结果一致。与水泥、石灰等硬性加固材料相比，高聚物加固砂土表现出良好的韧性。这可能是由于高聚物在砂土颗粒间形成的连接及其良好的力学性能避免了试样的突然破坏，在一定程度上限制和阻止了裂缝的形成和发展[26, 31]。随着高聚物含量增加，试样初始轴向应力增长速率变大，表明试样有较好的硬度。此外，试样应力达到峰值时对应的应变整体上随高聚物掺量增加逐渐减小，与 Liu 等[18]和 Wang 等[28]报道一致。峰值应变与高聚物掺量的关系可以表示为：$y=-0.14x^2+0.45x+8.66$ ($R^2=0.41$，$T=6$ h) 和 $y=-0.32x^2+x+5.05$ ($R^2=0.72$，$T=48$ h)，表明高聚物含量对固化土变形能力有一定影响。

不同高聚物含量下加固砂土试样抗压强度见表 4。随着高聚物含量增加，固化砂土抗压强度显著提升，并且抗压强度的增幅与高聚物含量有关，以 2% 为临界值。这可能由于当添加的高聚物体积大于试样内部孔隙体积，会造成高聚物溢

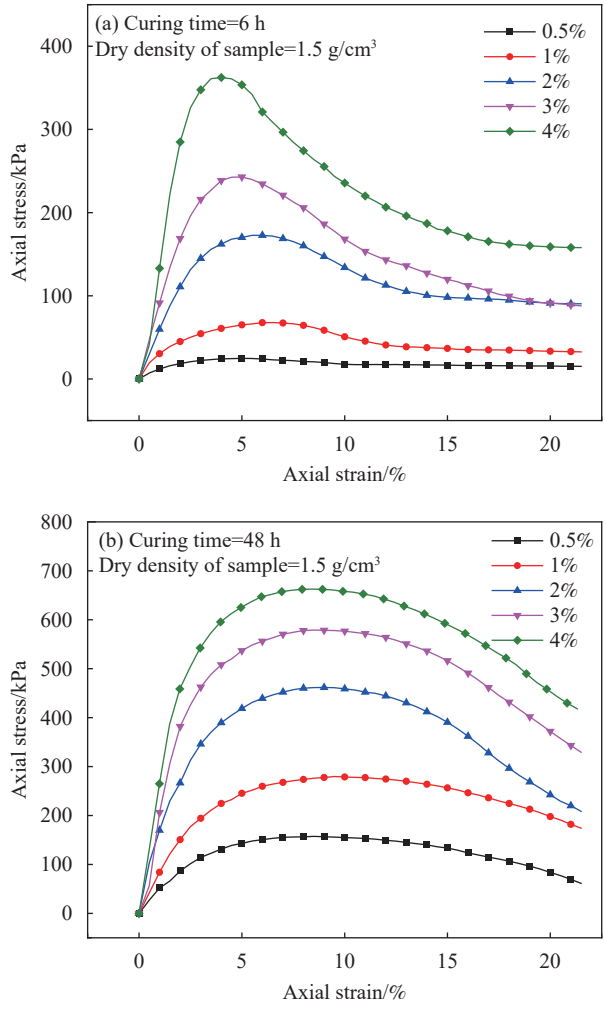


图 7　不同高聚物含量下加固砂土轴向应力-应变曲线

Fig. 7　Axial stress-strain curves of treated sand with different polymer contents

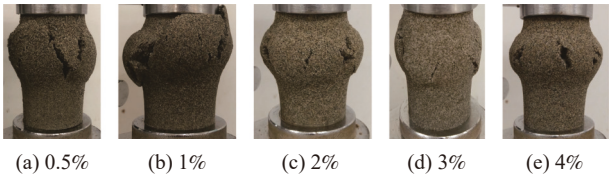
表 4　不同高聚物含量下加固砂土抗压强度 (kPa)

Table 4　Unconfined compressive strength of polymer treated sand with different polymer contents (kPa)

T/h	ρ_d/(g·cm^{-3})	W_p/%				
		0.5	1	2	3	4
6	1.5	24.40	67.03	172.31	242.90	360.98
48	1.5	159.21	301.86	458.40	581.37	662.58

出导致改善效果不明显[15]，高聚物含量达到 2% 以上时，抗压强度增幅变小。孙任运[43] 进一步指出，抗压强度与高聚物掺量呈对数关系，本文建立的抗压强度与高聚物掺量的关系式表达为 y=241.51ln$x$+312.66(R^2=0.994，T=6 h) 和y=153.92ln$x$+97.83 (R^2=0.920，T=48 h)。

为进一步了解高聚物加固砂土压缩破坏特征，记录了试样破坏形态 (图 8)。与水泥、石灰等硬性材料加固土的脆性破坏不同，高聚物加固砂土压缩破坏主要以鼓胀并伴有裂缝为主，这可能与其轴向应力-应变曲线出现的峰后缓和现象有关 (图 7)。高聚物含量 < 2% 时，试样呈现片状压花的破坏形式，形成的裂缝较明显，并且裂缝切割块体尺寸较大 (图 8(a)、8(b))；高聚物含量≥2% 时，砂土的改善效果显著，表面形成的裂缝及其切割块体尺寸较小 (图 8(c)~8(e))，表明改良砂土抵抗变形破坏能力增强。

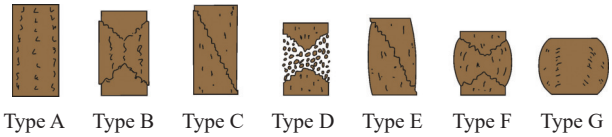


(a) 0.5%　(b) 1%　(c) 2%　(d) 3%　(e) 4%

图 8　不同高聚物含量下加固砂土试样养护 48 h 破坏形态

Fig. 8　Failure patterns of polymer treated sand with different polymer contents after curing 48 h

Hatibu 等[44] 将土体的破坏模式从脆性破坏到韧性破坏分为 7 种类型 (图 9)。若试样的最终状态有明显的脆性柱状体、脆性剥落及脆性断裂特征，则分别称为 A 型、B 型和 C 型，均为脆性破坏。若试样有明显的碎裂特征或者剪断特征，则处于脆性破坏到韧性破坏的过渡阶段，称为 D 型。试样的韧性破坏则指的是其有明显的韧性断裂或韧性流动现象，根据其破坏程度依次称为 E 型、F 型和 G 型。结合试验中观察到的试样破坏形态和图 9 可知，高聚物改良砂土的压缩破坏均属于韧性破坏。并且随着高聚物含量增加，其破坏模式从 E 型逐渐变为 G 型。



Type A　Type B　Type C　Type D　Type E　Type F　Type G

图 9　土体 7 种破坏模式示意图[44]

Fig. 9　Schematic diagram of seven damage modes of soil[44]

2.2　养护时间的影响

2.2.1　高聚物固化砂土抗剪强度和剪切变形特征

养护时间对固化砂土剪切应力-位移曲线的影响与高聚物含量的影响类似，养护时间<24 h 时，试样表现出应变硬化特征；养护时间≥24 h 时，表现出明显的应变软化特征。表明长养护时间和高聚物含量可以显著改善改良砂土微观结构。此外，养护时间越长，剪应力达到峰值的剪切位移也越大。

固化砂土抗剪强度及强度参数与养护时间的关系 (图 10 和表 5) 表明，加固砂土的抗剪强度和黏聚力随养护时间增加逐渐提高，而内摩擦角未表现出明显的变化规律，与高聚物含量的影响规律一致。黏聚力与养护时间呈较好的线性关系，可表示为：y=1.82x–3.93(R^2=0.987，W_p=1%) 和y=2.27x+29.6 (R^2=0.964，W_p=3%)。不同养护时间下加固砂土剪切破坏位移见图 11。剪切破坏位移随养护时间增加在 11~4 mm 范围内逐渐减小，并以养护 24 h 为拐点，剪切破坏位移与养护时间的关系可描述为：y=–0.0012x^2+0.039x+8.75 (R^2=0.309)。这与加固砂土剪切应力-位移曲线变化一致，表明固化砂土需养护至一定时间才能有效发挥较好的加固效果。根据不同养护时间下固化砂土的抗剪特征，建议养护至少 24 h 以上。

2.2.2　高聚物固化砂土抗压强度和压缩变形特征

不同养护时间下固化砂土轴向应力-应变曲线见图 12。养护时间越长，试样初始应力增长速率越快，曲线的峰值区域变得更宽广，表现出较好的韧性。试样达到峰值应力时的应变随养护时间增加呈现先减小再增加的变化趋势，例如，3% 高聚物加固砂土在不同养护时间下的峰值位移分别为 5%、4.5%、3.5%、5.5%、9%、8.5% 和 12%，峰

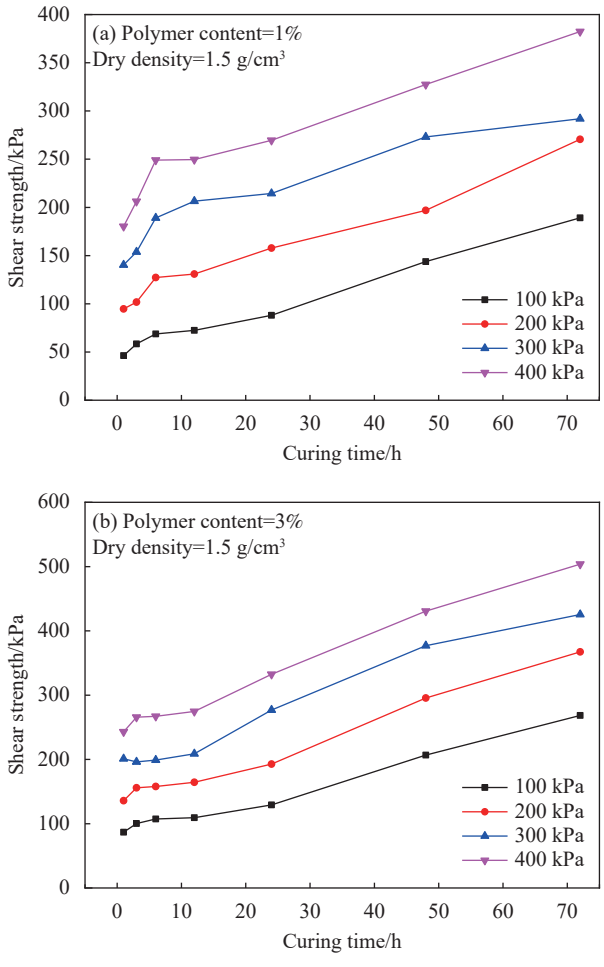


图 10　高聚物固化砂土抗剪强度与养护时间的关系

Fig. 10　Relationship between the shear strength of polymer treated sand and curing time

值应变与高聚物掺量的关系可以表示为：y=0.0021x^2–0.09x+8.56 (R^2=0.708，高聚物含量 W_p=1%) 和 y=–0.0001x^2+0.11x+4.37 (R^2=0.960，W_p=3%)。此外，各试样曲线的峰值 (抗压强度) 随养护时间增加逐渐变大，存在较好的线性关系：y=8.72x+177.54 (R^2=0.995，W_p=1%) 和 y=5.10x+34.49 (R^2=0.960，W_p=3%)。养护时间越长 (≥24 h)，抗压强度的变化越明显。

不同养护时间下加固砂土试样的压缩破坏形态见图 13。随着养护时间增加，试样裂缝及其切割形成的块体大小整体上逐渐变大。养护时间<24 h 时，试样表层在破坏位置被压褶，与试样内部近乎脱离；而随着养护时间增加 (≥24 h)，破坏表层的厚度逐渐增加，裂缝切割形成的块体也由层状过渡为块状。相应地，其破坏模式主要为 F 和 G 型。

2.3　试样干密度的影响

2.3.1　高聚物固化砂土抗剪强度和剪切变形特征

对于砂土和高聚物加固砂土，干密度增加均会导致试样变形由应变硬化型 (减缩型) 向应变软化型 (剪胀型) 转变。对于高聚物含量较高的试样，干密度增加会加强试样应变软化的特性。并且干密度增加时，试样的峰值剪切位移也逐渐减小，且高聚物含量越高，这种现象越明显。

不同干密度下固化砂土的抗剪强度及强度参数见图 14 和表 6。干密度越大，改良砂土抗剪强度越高，黏聚力和内摩擦角越大。干密度从 1.4 增加到 1.6 时，砂土的黏聚力和内摩擦角分别提高 0.96 kPa 和 5.17°，加固砂土的黏聚力和内摩擦角分别提高 69.96 kPa 和 10.37°。此外，黏聚力、内摩擦角与干密度均呈较好的线性关系：y_c=197.06x–216.01 (R^2=0.965，W_p=1%) 和 y_c=327.14x–358.59 (R^2=0.933，W_p=3%)；y_φ=40.86x–29.56 (R^2=0.964，W_p=1%) 和 y_φ=50.58x–40.51 (R^2=0.911，W_p=3%)。

由不同干密度下固化砂土的剪切破坏位移 (图 15) 可知，剪切破坏位移随干密度增加逐渐增加，并且增加速率大体一致。各试样的剪切破坏位移在 3~9.5 mm 之间随干密度增大均匀增大，其关系式可以表达为：y=20.42x–23.89，R^2=0.684。

2.3.2　高聚物固化砂土抗压强度和压缩变形特征

不同干密度下加固砂土轴向应力-应变曲线见图 16。随着干密度增加，试样的初始轴向应力增长速率变大，峰值区域变窄，峰值应变减小，曲线呈现出向左、向上的变化趋势，表明试样的硬度和强度增加，韧性减小。其中，峰值应变与干密度呈较好的线性关系：y=–31.06x+56.96(R^2=0.950，

表 5　不同养护时间下高聚物加固砂土抗剪强度参数

Table 5　Shear strength parameters of polymer treated sand cured at different time

W_p/%	ρ_d/(g·cm^{-3})	T/h													
		1		3		6		12		24		48		72	
		c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
1	1.5	3.43	24.12	6.15	26.36	7.79	31.09	13.09	31.26	32.20	31.01	78.53	32.08	133.27	31.00
3	1.5	33.18	28.10	45.19	28.24	52.69	27.49	54.27	28.37	59.47	34.74	139.25	36.98	200.19	37.39

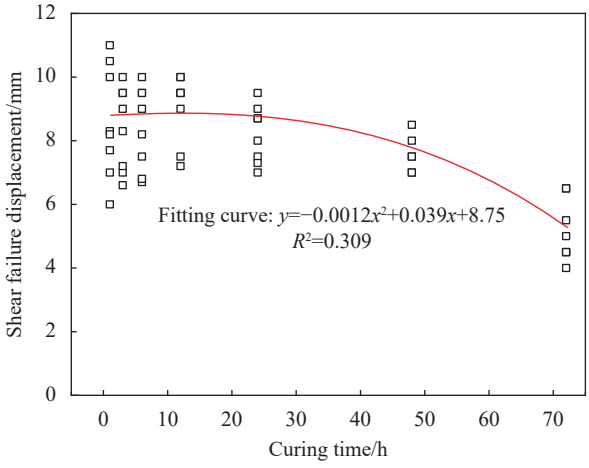


图 11　不同养护时间下高聚物固化砂土剪切破坏位移

Fig. 11　Shear damage displacement of polymer treated sand at different curing time

W_p=1%) 和 y=−33.75x+60.09 (R^2=0.996，W_p=3%)。此外，不同干密度下各试样轴向应力-应变曲线最终的轴向应力基本一致，高聚物含量越高，这种现象越明显。这是由于高聚物对试样内部孔隙的填充作用及轴向荷载的压缩作用，导致试样最终密实状态趋于一致，因而试验终止时的轴向应力会趋于同一水平[18, 26]。

1% 和 3% 高聚物加固砂土在不同干密度下的抗压强度分别为 155.38、201.23、301.85、326.23、396.52 kPa 和 429.88、482.42、588.81、644.06 和 721.38 kPa，抗压强度随干密度增加大体上线性增加，可以表示为：y=1489.3x−1660.6 (R^2=0.990，W_p=1%) 和 y=1214.6x−1545.6 (R^2=0.974，W_p=3%)。

不同干密度下加固砂土试样破坏形态见图 17。对于干密度较小的改良试样，如 1.4 和 1.45 (图 17(a) 和图 17(b))，试样主要以鼓胀破坏为主，裂缝尺寸相对较小。随着干密度增加，试样鼓胀现象更明显，鼓出部分被裂缝切割，并且切割形成的块体较破碎。

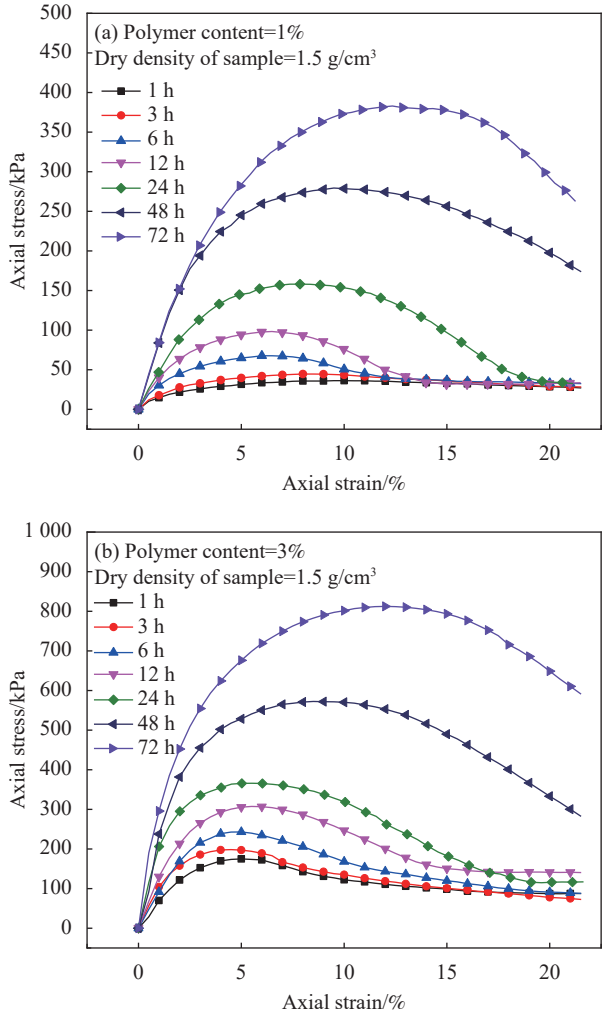
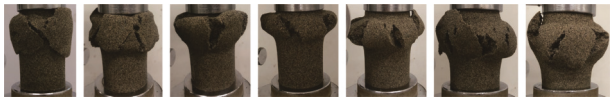


图 12　不同养护时间下高聚物固化砂土轴向应力-应变曲线

Fig. 12　Axial stress-strain curves of polymer treated sand under different curing time



(a) 1 h　(b) 3 h　(c) 6 h　(d) 12 h　(e) 24 h　(f) 48 h　(g) 72 h

图 13　不同养护时间下 3% 高聚物固化砂土试样破坏形态

Fig. 13　Compressive failure patterns of 3% polymer treated sand under different curing time

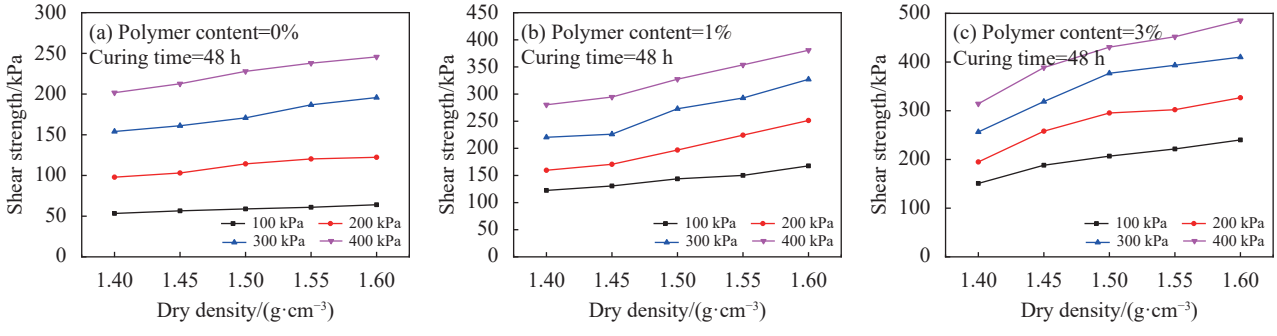


图 14　不同干密度下高聚物固化砂土抗剪强度

Fig. 14　Shear strength of polymer treated sand under different dry densities

表 6 不同干密度下高聚物加固砂土抗剪强度参数

Table 6 Shear strength parameters of polymer treated sand under different dry densities

T/h	W_p/%	ρ_d/(g·cm^{-3})									
		1.4		1.45		1.5		1.55		1.6	
		c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
48	1	62.10	28.12	68.73	28.69	78.53	32.08	85.58	34.20	102.94	35.58
48	3	90.96	28.93	122.90	33.51	139.25	36.98	146.55	38.06	160.92	39.30

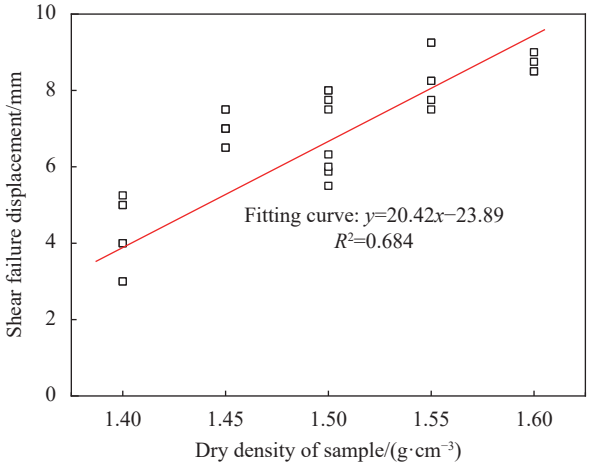


图 15 不同干密度下高聚物固化砂土剪切破坏位移

Fig. 15 Shear damage displacement of treated sand under different dry densities

结合图 9 可知，随着干密度增加，试样破坏模式由 G 型转变为 F 型、E 型，表明试样密实状态变化对土体在轴向荷载下的破坏模式具有明显的趋于脆性破坏的影响。

2.4 相关性分析

根据上述试验结果，对高聚物含量、养护时间和干密度与加固砂土强度、变形的相关性分析结果见表 7。为提高分析结果可靠性，强度和变形分别选用 3 个平行试样的抗压强度和轴向应力-应变曲线峰值应变进行分析。

固化砂土强度与养护时间、高聚物含量和干密度显著相关，且均为正相关，与高聚物含量的关系可以用对数函数描述，而与养护时间和干密度呈线性关系。强度和养护时间为强正相关，与高聚物含量为中等正相关，与干密度相关性较弱。

固化砂土变形与养护时间和干密度均显著相关，与养护时间强正相关，与干密度中等负相关，与高聚物含量相关性不显著。峰值应变与高聚物含量、养护时间均呈多项式关系，而与试样干密度为线性关系。

3 高聚物加固砂土微观机制

3.1 SEM 图像分析

素砂土和改良砂土的微观结构特征见图 18 和

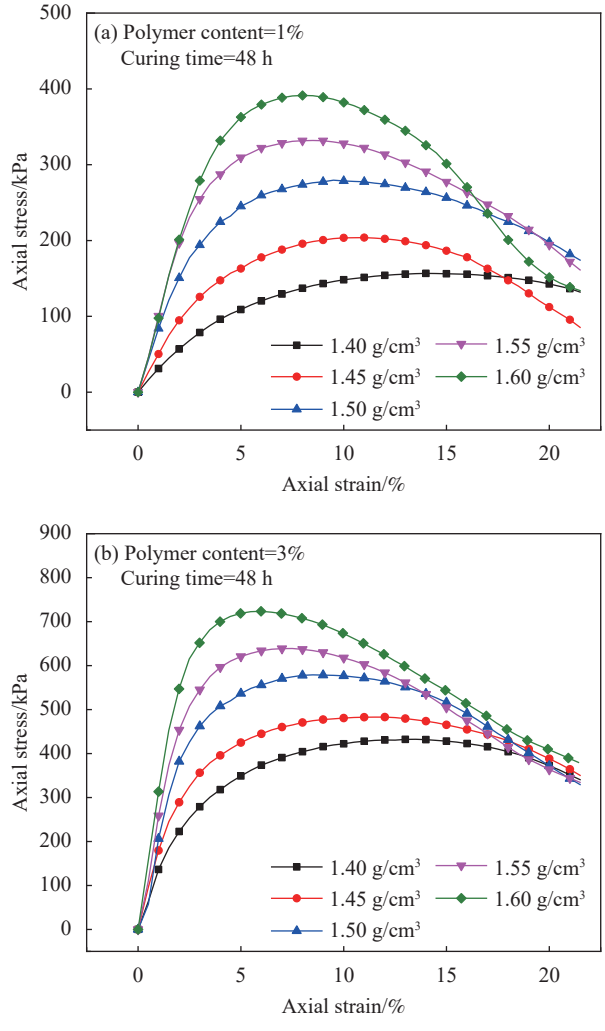
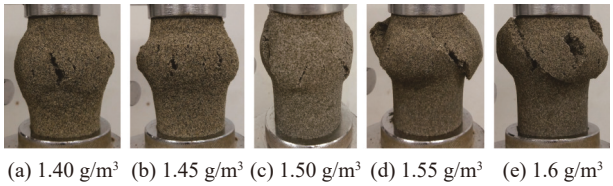


图 16 不同干密度下高聚物加固砂土轴向应力-应变曲线

Fig. 16 Axial stress-strain curves of polymer treated sand under different dry densities



(a) 1.40 g/m³ (b) 1.45 g/m³ (c) 1.50 g/m³ (d) 1.55 g/m³ (e) 1.6 g/m³

图 17 不同干密度下 3% 高聚物加固砂土破坏形态

Fig. 17 Compressive failure patterns of 3% polymer treated sand under different dry densities

图 19。砂土结构松散，颗粒间仅有很小的部分接触，并且孔隙数量较多 (图 18)。对于加固砂土，

表 7　不同因素与高聚物固化砂土强度和变形的相关系数

Table 7　Correlation coefficients of different factors with the strength and deformation capacities of treated sand

Item	W_p/%	T/h	ρ_d/(g·cm^{-3})
Strength	0.514**	0.698**	0.245*
Deformation capacity	−0.009	0.730**	−0.456**

Notes: * indicates P<0.05, and ** indicates P<0.01; 0.2-0.4, 0.4-0.6, 0.6-0.8, 0.8-1 indicate weak correlation, moderate correlation, strong correlation and very strong correlation, respectively.

高聚物的掺入将砂土紧密的连结在一起，形成相对致密的结构 (图 19)。当高聚物溶液与砂土混合时，由于高分子链上含有的氨基酸甲酯、脲基、羟基等一些极性基团，通过物理-化学作用粘结于砂粒表面[26, 45]。随后，高聚物通过弹性拉伸、舒张包裹砂粒，在相邻的砂粒间建立桥接，将砂粒连接在一起 (图 19(b))。同时，高聚物的出现也在一定程度上填充孔隙。Liu 等[18, 26]将聚合物对砂土微观结构的改善归结为吸附、连结和填充效应。通过这些作用，高聚物在松散的砂粒间形成有效稳定的三维网状膜结构，从而改善砂粒间的粘结作用。

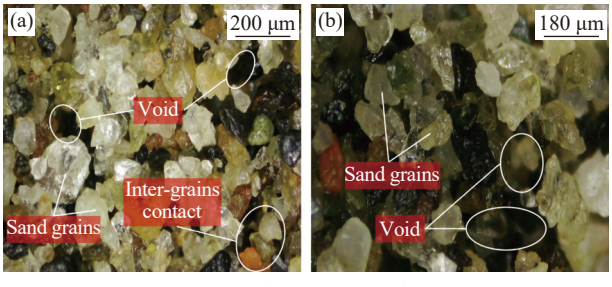


图 18　素砂土的微观图像

Fig. 18　Microstructure images of untreated sand

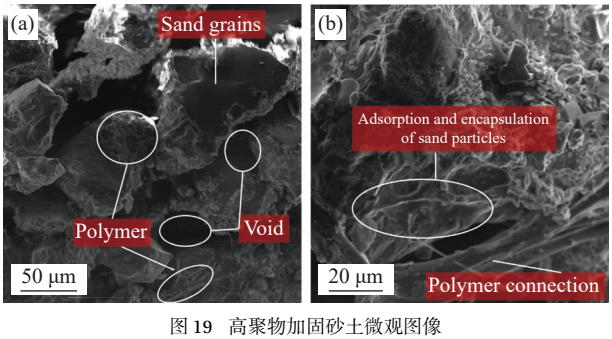


图 19　高聚物加固砂土微观图像

Fig. 19　Microstructure images of polymer treated sand

高聚物在砂粒间形成的这种膜结构与高聚物含量、养护时间和土样密实度有关。首先，高聚物含量增加，表明单位体积高聚物分子链上的极性基团总数量变多，使高聚物在砂粒表面的吸附数量增加，同时这也提高了高聚物在砂粒间的桥接强度[26, 34]。其次，Zang 等[45]指出养护是化学材料加固土体的重要阶段，在养护期间，化学添加剂通过失水收缩来提升自身的强度和弹性，主要体现在其含水率降低和聚合物状态的变化上[26]，Muguda 等[46]发现聚合物在养护阶段由凝胶态逐渐转变为玻璃态。可以看出，高聚物含量和养护时间增加均有利于提高膜结构的稳定性，从而提高砂土的强度和变形能力。试验中记录的试样含水率变化见图 20，养护期间水分蒸发不仅会提高聚合物的强度，同时也会增加土颗粒间的摩擦强度，特别是时间较长时，固化砂土强度提升显著 (图 10~图 13 和表 5)。

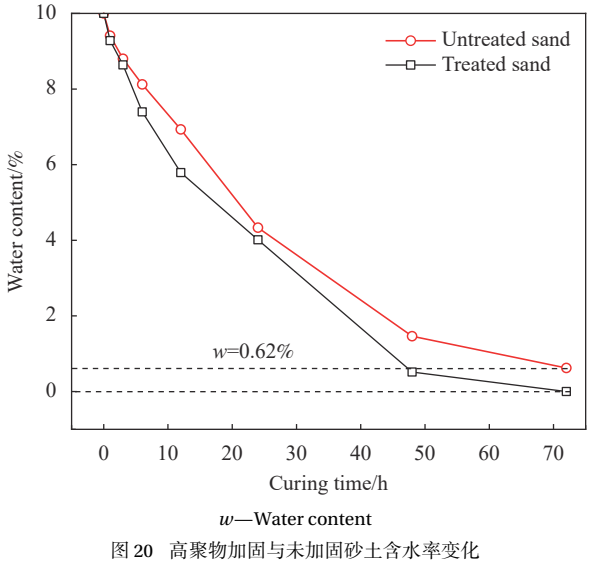


图 20　高聚物加固与未加固砂土含水率变化

Fig. 20　Water change of polymer treated and untreated sand

试样密实度对膜结构的影响在于[20](图 21)：密实度较小时，土样结构松散，土颗粒间孔隙大，有利于高聚物对土颗粒的包裹，但相应地高分子聚合物在土粒间的连结强度相对较弱；当土样密实度较大时，土颗粒间的接触也会变得紧密，一方面会增加土粒间的摩擦强度，但同时也会影响高聚物对土颗粒的包裹，从而导致高聚物主要堆积在孔隙中。因此，对于高聚物在土中的分布情况存在一个最优密实度，即此时高聚物可以很好地包裹土颗粒，同时在土颗粒间的连结强度也较强，也就是说在土粒间能建立一个稳定的三维网络状结构。

3.2　高聚物加固砂土破坏机制分析

砂土剪切破坏的本质是剪切面上的土颗粒在荷载作用下克服滑动摩擦和咬合作用达到新的平

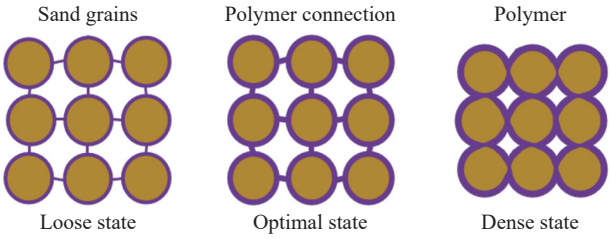


图 21　试样密实度对高聚物分布特征影响示意图[20]

Fig. 21　Schematic diagram of the effect of specimen compactness on the distribution characteristics of polymers[20]

衡状态的过程，受砂土密度、级配、土粒形状、矿物成分等影响。对于加固砂土，高聚物也会产生影响，特别是高聚物桥接的变化。施加荷载过程中，高聚物会承受压缩、拉伸和剪切等应力，其中拉伸和剪切对聚合物具有破坏作用，如桥接断裂或者聚合物从砂粒表面脱离。Song 等[31] 和 Zang 等[47] 将聚合物-砂粒界面在拉应力下的变化总结为 4 类：I 型，聚合物和砂粒一起移动；II 型，聚合物被拉伸但是没有失效；III 型，砂粒随聚合物一起移动直到脱离砂粒；IV 型，聚合物被拉断；其中 III 型和 IV 型会对高聚物膜结构产生破坏。通常，这 4 种变化是共存的，其比例关系决定了加固砂土的变形能力和破坏模式[47]。从加固砂土压缩破坏过程 (图 22) 可以看出：施加荷载初始阶段 (OA 段)，试样被压密，土颗粒被压缩、发生翻转或移动，此时膜结构变化以 I 型、II 型为主，轴向应力快速增加；随着荷载施加，高聚物承受的应力随之增加，超过其极限时失效，即 III 型、IV 型变化占比增加，有的甚至连通形成微裂隙，但此时仍以 I 型、II 型变化为主，试样发生轻微鼓胀，轴向应力增长速率减小 (AB 段)；随着 III 型、IV 型占比增加，试样鼓胀明显，微裂隙数量增加，并贯通形成裂缝，试样破坏 (C 点)；此后，III 型、IV 型变化占主导，试样内部裂缝持续发展，轴向应力减小，进入持续破坏阶段 (CD 和 DE 段)；当试样内部结构变化达到稳定时，轴向应力趋于稳定，进入收敛阶段 (EF 段)。由此可见，膜结构的稳定性与变化对加固砂土的强度和变形特征有显著影响。限于篇幅限制，仅分析加固砂土剪切破坏过程。

加固砂土承受剪切荷载时，高聚物在砂粒间形成的膜结构会对剪切面上土颗粒的位置变化产生显著影响，而膜结构效应的发挥与养护时间、高聚物含量和土样密实度有关。养护时间较短或

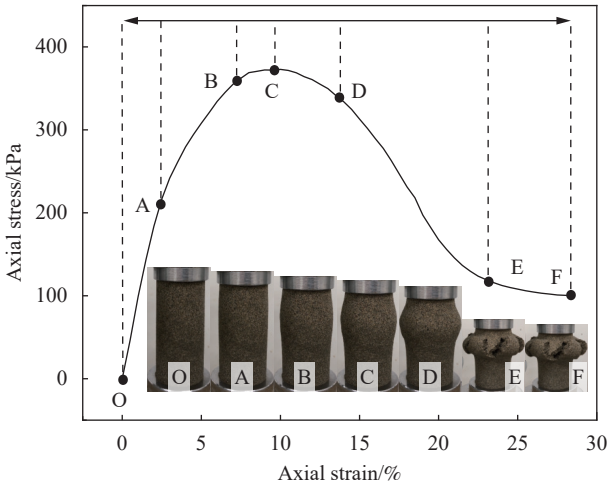


图 22　高聚物加固砂土试样压缩破坏过程

Fig. 22　Failure process of polymer treated sand under compressive load

者高聚物含量较低时，高聚物在砂土中形成的膜结构强度较低、分布密度较小，在荷载作用下容易发生 III 型和 IV 型变化，因而剪切面上的砂粒较易发生重新排列，孔隙减小，较快达到新的平衡状态 (图 23(a))。此时，加固砂土表现出明显的应变硬化特征，抗剪强度和峰值剪切位移也较小，而剪切破坏位移较大。随着养护时间变长或聚合物含量增加，聚合物桥接和填充作用显著提升，膜结构能很好地限制剪切面上的砂粒发生位置变化，聚合物变化以 I 型、II 型为主，因而试样剪切应力快速增加；当聚合物承受的应力超过其极限时失效，III 型和 IV 型变化占主导，土颗粒发生位置变化，重新排列，达到新的平衡状态。对于密实土样，也会发生孔隙体积增加 (图 23(b))。这也是试验中观察到固化砂土上下剪切盒之间存在明显缝隙的主要原因。相应地，加固砂土表现出明显的应变软化特征，抗剪强度和峰值剪切位移较大，而剪切破坏位移较小。

高聚物加固效应的发挥与养护时间的长短密切相关，并且高聚物含量的影响在其自身强度性能建立以后才变得明显。因而，养护时间与加固砂土效果的相关性大于高聚物含量。试验中发现，在养护阶段，试样水分丢失从外部开始，逐渐向内进行 (图 24)，因此会造成外部的固化层和内部的未固化部分沿径向的不均匀分布，使两者之间在强度、变形能力等方面存在较大差异。当两者的交界面处于剪切破坏位移范围内时，会对试样的强度、变形产生影响；当其超过剪切破坏范围时，试样的剪切变形则主要受固化层水分丢失与

高聚物含量的影响。这也是为什么加固砂土试样必须养护一段时间后，才具有较好加固效果的原因。

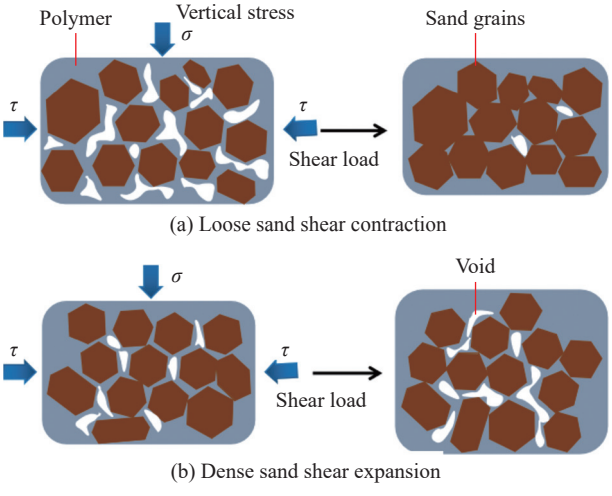


图 23　高聚物加固砂土剪切变形示意图

Fig. 23　Schematic diagram of shear deformation of polymer treated sand

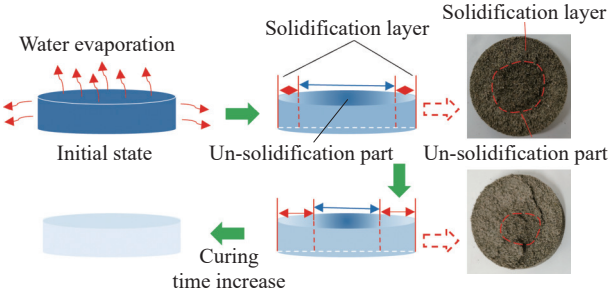


图 24　养护时间对高聚物加固砂土水分分布影响示意图

Fig. 24　Schematic diagram of the effect of curing time on moisture distribution of polymer treated sand

聚合物含量较低的加固砂土，土样密度效应显著，随干密度增加，加固砂土剪切过程表现出明显的由应变硬化向应变软化转变的特征。而聚合物掺量较高的试样，其良好的填充效应在一定程度上减小了孔隙，并且干密度增加，砂粒紧密接触也弱化了聚合物的桥接作用，因而高含量高聚物加固砂土的应变软化特征随干密度增加更加明显。

4　结 论

通过对高聚物加固砂土进行抗剪和抗压试验，研究了 3 个研究变量下加固砂土的应力-应变曲线、强度、破坏位移、破坏形态的变化规律，并利用相关性分析研究了 3 个变量与加固砂土强度和变形的相关性，最后结合加固砂土 SEM 图像揭示了高聚物加固砂土的微观机制及其变形破坏机制，取得的主要结论如下：

(1) 随着高聚物掺量增加，加固砂土的剪切应力-应变曲线由剪切硬化型转变为剪切软化型，轴向应力-应变曲线出现明显的峰后缓和现象，表现出较好的韧性；抗剪强度和抗压强度显著增加，抗压强度与高聚物含量呈对数关系，且抗剪强度的提升主要体现在黏聚力上；剪切破坏位移逐渐减小并趋于稳定，压缩破坏以鼓胀伴有裂缝为主，形态由 E 型变为 G 型。综合高聚物含量的影响和成本问题，推荐最佳掺量约为 2%；

(2) 随着养护时间增加，加固砂土的剪切应力-应变曲线由应变硬化型转变为应变软化型，轴向应力-应变曲线峰值区域变宽广；抗剪强度和抗压强度显著提高，与养护时间呈线性关系。当养护时间≥24 h 时，加固砂土的剪切破坏位移明显减小，并且压缩破坏形态发生显著改变，主要以 F 型、G 型为主。综合考虑养护时间的影响，高聚物加固砂土至少养护 24 h 以上取得较好效果；

(3) 随着干密度增加，加固砂土的剪切特征由减缩型向剪胀型转变，轴向应力-应变曲线峰值区域变窄，向左向上移动；抗剪强度和抗压强度均显著线性增加，且黏聚力和内摩擦角也均显著线性提高；剪切破坏位移线性增加，压缩破坏形态由 G 型转变为 F 型、E 型，具有明显的趋于脆性破坏的趋势；

(4) 高聚物通过吸附、粘结和填充作用在砂粒间形成有效稳定的三维网状膜结构，将松散的砂粒粘结在一起，从而达到较好的加固效果。这种膜结构的稳定和变化与高聚物含量、养护时间和土样密实度有关，其中高聚物掺量和养护时间增加均提高膜结构的稳定，土样密实度变化会改变高聚物在砂粒间的分布特征；高聚物 4 种变化的比例关系决定了加固砂土的变形能力和破坏模式；

(5) 加固砂土强度与养护时间和高聚物含量、干密度显著相关，相关性：养护时间>高聚物含量>干密度，与高聚物含量的关系可以用对数函数描述，而与养护时间和干密度呈线性关系；加固砂土变形特征与养护时间强正相关，与干密度中等负相关，而与高聚物含量相关性不显著，与高聚物含量、养护时间均呈多项式关系，而与试样干密度为线性关系。

参考文献：

[1]　LI H, CHEN H, LI X, et al. Design and construction applica-

tion of concrete canvas for slope protection[J]. Powder Technology, 2019, 344: 937-946.

[2] 吕阳, 雷长顺, 陈效星. 墙顶集中荷载对挡土墙结构的影响分析 [J]. 铁道工程学报, 2021, 38(4): 28-32.
LYU Yang, LEI Changshun, CHEN Xiaoxing. Analysis of the influence of concentrated load on the retaining wall[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(4): 28-32(in Chinese).

[3] SU H, WU D, LU Y, et al. Experimental and numerical study on stability performance of new ecological slope protection using bolt-hinge anchored block[J]. Ecological Engineering, 2021, 172: 106409.

[4] 宁帅, 庄妍, 崔晓艳, 等. 各向异性和非均质性的抗滑桩边坡稳定性分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(4): 529-535.
NING Shuai, ZHUANG Yan, CUI Xiaoyan, et al. Stability analysis of slope reinforced with piles in anisotropy and heterogeneity soils[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(4): 529-535(in Chinese).

[5] LIU J, CHEN Z H, KANUNGO D P, et al. Topsoil reinforcement of sandy slope for preventing erosion using water-based polyurethane soil stabilizer[J]. Engineering Geology, 2019, 252: 125-135.

[6] HAMIDI A, HOORESFAND M. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 36: 1-9.

[7] 李建, 唐朝生, 王德银, 等. 基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究 [J]. 岩土工程学报, 2014(9): 1696-1704.
LI Jian, TANG Chaosheng, WANG Deyin, et al. Single fiber pullout tests on interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(9): 1696-1704(in Chinese).

[8] 唐朝生, 施斌, 高玮, 等. 含砂量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(z1): 2968-2973.
TANG Chaosheng, SHI Bin, GAO Wei, et al. Study on effects of sand content on strength of polypropylene fiber reinforced clay soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(z1): 2968-2973(in Chinese).

[9] 钟玉健, 张晓超, 袁锐, 等. 非钙基土壤固化剂加固机制及其应用性能研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(14): 150-158.
ZHONG Yujian, ZHANG Xiaochao, YUAN Rui, et al. Research progress in the stabilization mechanism of non-calcium-based soil stabilizer and its application performance[J]. Materials Reports, 2022, 36(14): 150-158(in Chinese).

[10] ABDULLAH H H, SHAHIN M A, WALSKE M L, et al. Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(9): 1356-1368.

[11] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 193-198.
WANG Tianliang, LIU Jiankun, TIAN Yahu. Static properties of cemen and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198(in Chinese).

[12] JUMASSULTAN A, SAGIDULLINA N, KIM J, et al. Performance of cement-stabilized sand subjected to freeze-thaw cycles[J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 25(1): 41-48.

[13] WU Z, DENG Y, LIU S, et al. Strength and microstructure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin[J]. Applied Clay Science, 2016, 127: 44-51.

[14] 明经平, 施赛杰, 吴建涛, 等. 引江济淮河道膨胀土边坡换填层余料工程特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 147-151.
MING Jingping, SHI Saijie, WU Jiantao, et al. Engineering characteristics of surplus materials of replacement layer of expansive soil slope of water diversion from Yangtze River to Huaihe River[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 147-151(in Chinese).

[15] REZAEIMALEK S, HUANG J, BIN-SHAFIQUE S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization[J]. Construction & Building Materials, 2017, 146: 210-220.

[16] CHANG I, LEE M, TRAN A T P, et al. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 24: 100385.

[17] 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): 88-95.
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): 88-95(in Chinese).

[18] LIU J, BAI Y, SONG Z, et al. Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers[J]. Polymers, 2018, 10(3): 287.

[19] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1761-1765.
WANG Yinmei, HAN Wenfeng, CHEN Wenwu. Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1761-1765(in Chinese).

[20] 刘瑾, 白玉霞, 宋泽卓, 等. OPS 型固化剂改良砂土工程特性试验研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2019, 49(3): 495-501.
LIU Jin, BAI Yuxia, SONG Zezhuo, et al. Experimental study on engineering properties of sandy reinforced by OPS type stabilizer[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(3): 495-501(in Chinese).

[21] REZAEIMALEK S, NASOURI A, HUANG J, et al. Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 35(239): 41-51.

[22] LIU J, SONG Z, BAI Y, et al. Laboratory tests on effectiveness of environment-friendly organic polymer on physical properties of sand[J]. International Journal of Polymer

Science, 2018, 2018: 5865247.

[23] GOLPAZIR I, GHALANDARZADEH A, JAFARI M K, et al. Dynamic properties of polyurethane foam-sand mixtures using cyclic triaxial tests[J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 104-115

[24] BUZZI S, FITYUS S, SLOAN S W. Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(6): 623-634.

[25] GILAZGHI S T, HUANG J, REZAEIMALEK S, et al. Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization[J]. Engineering Geology, 2016, 211: 171-178.

[26] BAI Y, LIU J, CUI Y, et al. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290: 123237.

[27] XIAO Y, STUEDLEIN A W, CHEN Q S, et al. Stress-strain-strength response and ductility of gravels improved by polyurethane foam adhesive[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 144(2): 04017108.

[28] WANG Y, LIU J, SHAO Y, et al. Water-induced changes in strength characteristics of polyurethane polymer and polypropylene fiber reinforced sand[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(6): 1829-1842.

[29] LIU J, BAI Y X, SONG Z Z, et al. Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119164.

[30] BAI Y X, LIU J, SONG Z Z, et al. Unconfined compressive properties of composite sand stabilized with organic polymers and natural fibers[J]. Polymers, 2019, 11(10): 1576.

[31] SONG Z, LIU J, BAI Y, et al. Investigation of temperature effect on strength properties of polyurethane-treated sand[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(3): 04020482.

[32] LIANG Z, WU Z, NOORI M, et al. Effect of simulated corrosion environment on mechanical performances of sand fixation by hydrophilic polyurethane[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2017, 26(10): 5797-5805.

[33] 王颖, 刘瑾, 马晓凡, 等. 基于核磁共振的聚氨酯固化砂土浸水作用分析 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 188-195.
WANG Ying, LIU Jin, MA Xiaofan, et al. Immersion effect of polyurethane-reinforced sand based on NMR[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 188-195(in Chinese).

[34] LIU J, BAI Y, LI D, et al. An experimental study on the shear behaviors of polymer-sand composite materials after immersion[J]. Polymers, 2018, 10(8): 924.

[35] CHANG I, PRASIDHI A K, IM J, et al. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes[J]. Geoderma, 2015, 253-354: 39-47.

[36] 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: 251.

[37] SONG Z Z, LIU J, YU Y X, et al. Characterization of artificially reconstructed clayey soil treated by polyol prepolymer for rock-slope topsoil erosion control[J]. Engineering Geology, 2021, 287: 106114.

[38] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019 (in Chinese).

[39] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50145—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008(in Chinese).

[40] LIU J, QI X H, ZHANG D, et al. Study on the permeability characteristics of polyurethane soil stabilizer reinforced sand[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 5240186.

[41] 王腾, 张嘎. 块体加固土体大型直剪试验 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(11): 1209-1212.
WANG Teng, ZHANG Ga. Large-scale direct shear tests on block-reinforced soils[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(11): 1209-1212(in Chinese).

[42] CHO S G, CHANG I, LEE M, et al. Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118415.

[43] 孙任运. 生物高分子聚合物加固砂土室内试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
SUN Renyun. Laboratory experimental study on sands reinforced by biopolymers[D]. Nanjing: Southeast University, 2022(in Chinese).

[44] HATIBU N, HETTIARATCHI D. The transition from ductile flow to brittle failure in unsaturated soils[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 54(4): 319-328.

[45] ZANG Y X, GONG W, XIE H, et al. Chemical sand stabilization: A review of material, mechanism, and problems[J]. Environmental Technology Reviews, 2015, 4(1): 119-132.

[46] MUGUDA S, BOOTH S J, HUGHES P N, et al. Mechanical properties of biopolymer-stabilised soil-based construction materials[J]. Geotechnique Letters, 2017, 7(4): 309-314.

[47] ZANG Y, GONG W, LIU B, et al. Effects of different segments in polyurethane on the performance of sand stabilization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(16): 47267.