

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901032

不同温度条件下高分子固化剂改良砂土的 强度特性*

潘成¹, 祁长青¹, 刘瑾¹, 汪勇², 孔繁轩¹, 石霄¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100; 2. 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江杭州 310000)

摘要:近年来城市热岛效应越加明显,温度变化对土体性质的影响程度备受关注。通过一系列无侧限抗压强度试验,对高分子固化剂改良砂土在不同温度条件下的抗压强度特性进行了研究,并结合微观扫描电镜对改良砂土的微观结构和改良机理进行了研究。结果表明:在相同温度条件下,高分子固化剂改良砂土的强度和弹性模量随高分子固化剂含量的增加而增大;随着温度的升高,高分子固化剂改良砂土的强度和弹性模量一直保持增强趋势,且当温度达到35℃后,加入3%和4%含量的高分子固化剂改良砂土的强度增幅变缓;高分子固化剂溶液均匀分散在砂土中,随着水分挥发,在砂粒之间形成了空间网状固化膜,使得分散的土体连接成为一体,从而提高砂土强度;且随着温度的增加,形成的固化膜强度增强,使得改良砂土强度进一步增加。高分子固化剂在高温条件下对砂土依然具有较好的加固效果,可为高温地区防风固沙加固提供新途径。

关键词: 高分子固化剂; 砂土; 温度变化; 无侧限抗压强度; 改良机理

中图分类号: P642.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0643-07

Influence of Temperature Change on Strength Characteristics of Polymer-reinforced Sand

PAN Cheng¹, QI Changqing¹, LIU Jin¹, WANG Yong², KONG Fanxuan¹, SHI Xiao¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310000, China)

Abstract: As global warming continues, extreme climate brings new challenges to the prevention and control of geological disasters. Moreover, the sand has no cohesive force and loose structure, leading to a series of engineering geological problems. In the present study, the unconfined compressive strength of polymer-reinforced sand under different temperature conditions was determined, and the microstructure of the reinforced sand was studied by scanning electron microscope (SEM). The results show that the strength and elastic modulus of reinforced sand increased with the content of polymer curing agent at the same temperature. With the increase of temperature, the strength and elastic modulus of reinforced sand remained an increasing trend, but gradually level off beyond 35 °C, especially for the sand reinforced by 3% and 4% contents of polymer curing agent. Polymer curing agent

* 收稿日期:2019-01-17;修回日期:2019-03-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41877212)、江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX18_0202,SJCX18_0203)、中央高校基本科研业务费项目(2018B775X14,2018B776X14)资助

作者简介:潘成(1995—),男,硕士研究生。主要从事环境地质工程方面的研究。E-mail: 1069691514@qq.com

通讯作者:刘瑾(1983—),女,教授,博士。主要从事环境地质工程方面的研究。E-mail: jinliu920@163.com

solutions evenly dispersed inside the soil matrix, and network membranes formed between sand particles as the moisture evaporated during the curing period, connecting the distant sand particles as a whole; thus, the mechanical behavior of reinforced sand can be greatly improved. In addition, with the increase of temperature, the strength of reinforced sand was further improved due to the enhancement of inter-particle binding via the contraction of membranes. Good reinforcement effect of polymer curing agent on the sand was observed even at high temperature. The results from this study can provide some beneficial knowledge for soil improvement by using polymers in the actual applications, it can offer a new way for wind-proof and sand-fixing reinforcement in high-temperature areas.

Keywords: polymer curing agent; sand; temperature variation; unconfined compressive strength; mechanism

引言

砂土具有结构松散、黏聚力小以及易被冲刷等不良工程特性,经常在工程建设中发生砂土液化、水土流失、边坡失稳等工程地质问题。高分子化学加固作为一种新型土体加固方法,与传统加固措施相比,因其具有加固效果好、环保等优点,被越来越多地应用于岩土工程领域。因此,采用化学加固方法对土体进行加固得到了许多学者的关注^[1-4]。王银梅等^[5-8]自主研发了SH型固砂剂,并研究了改良黄土的抗冻性能以及抗老化性能,为沙漠化治理与防治提供了新方法;蔡光华等^[9]利用活性氧化镁碳化方法对粉土进行加固,并对改良土体内部的微观结构进行了分析,结果表明改良的土体强度得到了显著的提高;刘瑾等^[10-11]研发了一种聚氨酯型高分子固化剂,将其用于土体改良中,研究成果表明加固后土体黏聚力大大加强,且渗透性能得到改善;汪勇等^[12]利用高分子固化剂对土质边坡进行加固,并对不同边坡坡比工况的稳定性进行了分析;S. Rezaeimalek等^[13]研究了养护方式和搅拌方法对MDI(Methylene Diphenyl Diisocyanate)加固砂土效果的影响。上述研究表明,通过化学加固方法对土体进行处理能够明显改善其不良性质。

然而,随着全球气候变暖,越来越多极端气候的出现,对地质灾害的发生产生了巨大影响^[14-15],使得土体加固领域面临新的挑战。环境温度作为影响岩土体力学特性的一个重要因素,得到了许多学者的广泛关注。王林峰等^[16]研究了温度变化对不稳定岩块稳定性的影响;刘晖等^[17]通过三轴压缩试验,研究了冻融循环条件下土体力学性质的变化。

周志伟等^[18]采用室内概化模型的试验方法,研究了干湿循环作用下坝坡红土体的一些物理力学参数;胡田飞等^[19]研究了冻融循环下冷却温度对粉质黏土力学性质的影响,表明冻胀和冻缩均随冷却温度的降低而增大。以上众多学者对天然土体在极端气候环境下的特性进行了大量研究,而对化学改良后土体受温度影响的特性却研究的较少。因此,本文通过无侧限抗压试验对不同温度下高分子固化剂改良的砂土进行强度测试,研究了在不同温度和不同高分子固化剂含量条件下改良土体的强度特性变化,研究成果可为极端气候下土体加固提供一定的参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文采用的高分子固化剂为水溶性聚氨酯型固砂剂,浅黄色,可以与水以任意比例互溶形成乳白色溶液。高分子固化剂与水反应生成的高分子固化剂溶液,随着水分的挥发,能够形成具有较好弹性和强度的胶状体,形成的胶状体不溶于水,不会对周围环境产生污染,为一种环境友好型土体加固材料,高分子固化剂具体的物理化学指标参数见表1。

表1 聚氨酯型固化剂指标参数
Table 1 Parameters of the polyurethane curing agent

状态	密度/ (g·cm ⁻³)	粘度/ (MPa·s)	固含量/ %	凝固时间/ s
液体	1.18	650~700	85	30~1 800

试验中采用的砂土取自江苏省南京市江宁区, 粒径分布曲线如图2所示。砂土的最大、最小干密度分别为 1.66 g/cm^3 和 1.35 g/cm^3 , 有效粒径 d_{10} 为 0.14 mm , 不均匀系数 C_u 为 2.57 , 曲率系数 C_c 为 1.05 , 属于级配不良砂。

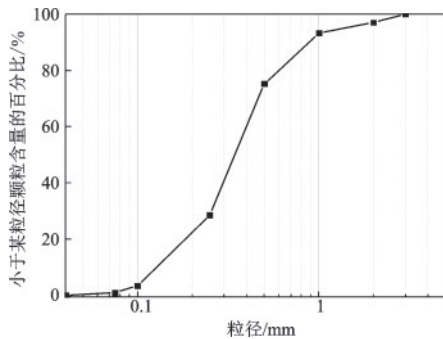


图2 砂土的粒径分布曲线

Fig.2 Grain size distribution curve of the sand used in the experiment

1.2 试验方法

无侧限抗压试验采用南京土壤仪器厂生产的YYW-2型应变控制式无侧限压力仪, 试验过程中控制应变速率为 2.4 mm/min 。

研究不同含量高分子固化剂改良砂土的强度受温度的影响, 试验中选用高分子固化剂的含量 (P_c) 为 1% 、 2% 、 3% 、 4% , 即为固化剂与砂土的质量百分比; 温度根据实际工程中可能遇到环境温度, 选取温度 (T) 为 5°C 、 20°C 、 35°C 和 50°C 。在试样制备时, 控制试样的初始含水率为 10% , 干密度为 1.50 g/cm^3 。

1.3 试样制备

首先, 将取回的砂土烘干、过筛备用, 在试验过程中, 称取一定质量的砂土, 并将不同含量的高分子固化剂与一定质量的水混合制成均匀的高分子固化剂溶液, 接着将制好的溶液倒入砂土中, 充分搅拌, 使得高分子固化剂溶液均匀地分散在砂土中, 最后将砂土倒入无侧限抗压强度的试样模具内, 采用静压力法压制直径为 3.91 cm , 高度为 8.00 cm 的试样。试样在室温下养护 48 小时后, 将试样再放入不同温度的恒温箱中 24 小时。为保证试验的准确性, 每组试验制备 3 个平行样, 取其平均值作为最终的抗压强度值。

2 试验结果与分析

通过对不同温度养护后的试样进行无侧限抗压试验, 得到的试验结果见表2。根据规范^[20]要求, 其中有峰值的试样取峰值强度作为其抗压强度值, 无峰值强度的试样取应变为 15% 对应的强度为抗压强度值。从表2可以看出, 改良砂土的抗压强度值随着高分子固化剂含量和温度的升高而增强。图3为不同高分子固化剂改良砂土的抗压强度与温度之间的关系。可以看出, 高分子固化剂含量和温度均对改良后砂土的强度特性有着显著的影响, 且加入较大含量的高分子固化剂砂土的抗压强度受温度的影响更加明显。当砂土中加入的高分子固化剂含量较小时 ($P_c=1\%$, 2%), 改良后砂土的抗压强度与温度之间几乎保持线性增强趋势, 砂土强度与温度之间保持的线性关系分别为 $\sigma_c=9.0T+52.4$ 和 $\sigma_c=14.2T+90$ 。而当砂土中加入的高分子固化剂含量较大时 ($P_c=3\%$, 4%), 改良砂土的抗压强度随着环境温度的升高得到显著的增强, 砂土强度与温度之间保持的关系分别为 $\sigma_c=-0.03T^3+2.21T^2+4.59T+382.62$ 和 $\sigma_c=-0.03T^3+2.08T^2+9.08T+554.01$, 且在温度为 $5\sim 35^\circ\text{C}$ 时, 抗压强度增加更为明显, 加入的高分子固化剂含量为 3% 和 4% 后砂土的抗压强度分别增加了 337% 和 269% 。当温度达到 35°C 后, 加入 3% 和 4% 高分子固化剂砂土的抗压强度随温度增加的幅度开始减小, 表明环境温度对改良砂土的抗压强度的影响开始减小。

图4为不同高分子固化剂含量改良后砂土在不同养护温度下的应力—应变曲线。可以看出, 随着高分子固化剂含量与温度的增加, 改良后砂土的抗压强度均有明显的增强趋势。当高分子固化剂含量一定时, 养护温度越高, 改良后砂土达到峰值时对应的应变越大; 当养护温度一定时, 随着高分子固化剂含量的增加, 砂土达到峰值应力后应力的衰减幅度逐渐减小。当加入的高分子固化剂含量较小 ($P_c=1\%$, $P_c=2\%$) 时, 峰值后应力的衰减速率也随着温度的增加而加快。当高分子固化剂大于 3% 且养护温度大于 20°C 时, 改良后砂土的应力随着应变的增加一直保持趋势, 表现出明显的应变硬化现象, 表明此状态下改良后的砂土具有较高韧性。

图5是不同高分子固化剂含量下改良砂土在不

表2 不同高分子固化剂改良砂土在不同温度下的抗压强度

Table 2 Unconfined compressive strength of reinforced sand with different polymer contents and temperatures

试验编号	固化剂含量/%	温度/°C	抗压强度/kPa	弹性模量/MPa
1	1	5	104.29	2.57
2		20	207.11	5.22
3		35	398.25	5.56
4		50	491.07	6.18
5	2	5	183.77	4.62
6		20	362.55	7.08
7		35	541.32	7.69
8		50	834.65	10.93
9	3	5	456.67	9.07
10		20	823.28	11.68
11		35	1 929.84	17.13
12		50	1 995.53	20.01
13	4	5	647.50	12.33
14		20	1 316.76	13.64
15		35	2 075.68	18.60
16		50	2 389.70	20.99

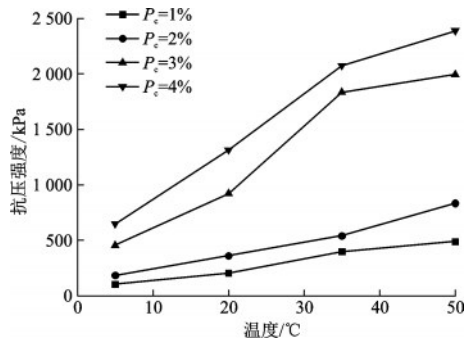


图3 不同高分子固化剂改良砂土的抗压强度与温度之间的关系

Fig.3 Relationship between unconfined compressive strength of sand reinforced by different polymer contents with temperatures

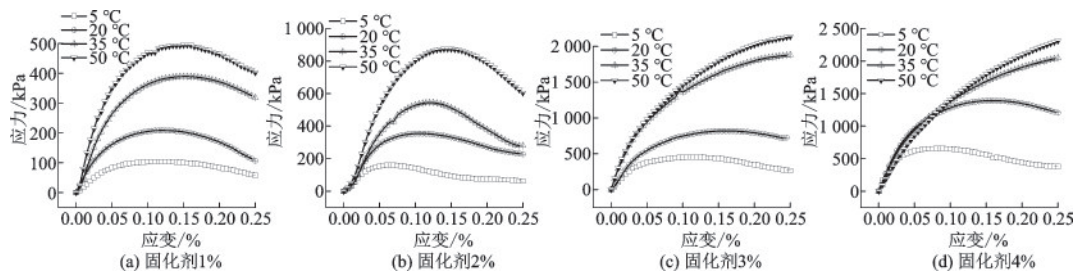


图4 不同温度和固化剂含量改良砂土的应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of sand reinforced at different polymer contents and cured at different temperatures

同养护温度下的弹性模量。从图5中可知,随着高分子固化剂含量与温度的增加,改良后砂土的弹性模量逐渐增强。对于在35 °C条件下养护的试样,当固化剂含量从1%增加到4%,其弹性模量依次为5.56、7.69、17.13、18.60 MPa。当固化剂含量较小($P_c=1\%$, $P_c=2\%$)时,温度对弹性模量的影响较小;对于1%固化剂改良砂土,当养护温度从5 °C增加到50 °C时,弹性模量依次为2.57、5.22、5.56、6.18 MPa,增长了3.61 MPa。而随着固化剂含量增加($P_c=3\%$, $P_c=4\%$),温度对弹性模量的影响较大;对于3%固化剂改良砂土,当温度从5 °C增加到50 °C时,弹性模量依次为9.07、11.68、17.13、20.01 MPa,增长了10.94 MPa。

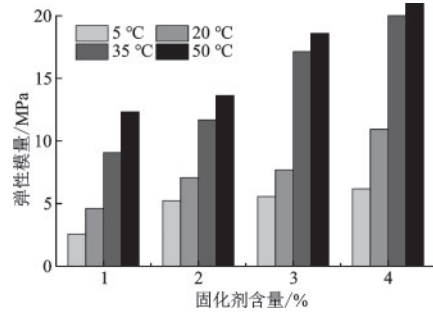


图5 不同温度和不同高分子固化剂含量下改良砂土的弹性模量

Fig.5 Elastic moduli of sand reinforced at different polymer contents and cured at different temperatures

3 机理分析

高分子固化剂为一种水溶性聚氨酯型固化剂,高分子中具有大量的亲水基团,因而可以与水以任意比例互溶,同时形成的高分子固化剂溶液还具有良好的成膜性能。将高分子固化剂与一定量的水混合后,制成一种流性土体加固材料,将这种加固材料加入到砂土中,流性材料迅速渗入到砂土颗粒当中,且随着对砂土进行搅拌,高分子固化剂能够均匀的分布在砂土颗粒之间,砂粒受高分子固化剂

连接成为一体。经过48小时的室内养护后,高分子固化剂溶液中多余水分蒸发,在砂土颗粒之间形成具有网状结构的高分子固化剂膜,图6(a)和(b)分别为加入1%和4%含量高分子固化剂改良后砂土的扫描电镜图。从图6中看出,随着高分子固化剂含量的增加,高分子固化剂溶液在砂土之间形成的高分子固化膜越厚,砂粒之间被联结的也更加牢固。图7为35℃时,加入不同高分子固化剂含量试样的破坏形态。从图7中可以观察到,当高分子固化剂含量较小时,试样受压破坏后,在试样的表面产生大量的裂纹,试样表现出明显的脆性破坏;而当高分子固化剂含量较多时,由于土体内部形成的高弹韧性的固化膜越多,使得土体在达到峰值强度后,试样表面并没有明显的破坏形态,表现出较高的韧性。

改良后的砂土试样在养护48小时后,其状态基本达到稳定,将养护好的试样放置不同温度的环境

下,试样的强度表现出对温度的敏感性,这是因为形成的高分子固化膜的性质受温度影响明显。当温度较低时,高分子固化膜会表现出一定的热胀冷缩现象,导致原来与砂粒相连接的固化膜由于体积收缩,与砂粒之间的连接就会松弛甚至脱离,从而导致在较低温度下改良后砂土的强度较低。除此之外,在较低温度环境下,试样内部的水分挥发有限,而当环境温度较高时,试样内部的水分可得到进一步的挥发,高分子固化膜中的水分也随之减少,从而使得高分子固化膜的强度得到增强,最终导致改良砂土试样的强度随着温度的升高而增强。当砂土中加入的高分子固化剂含量较小(1%)时,砂粒之间的固化膜较少,随着温度增加,砂土中的固化膜变得较脆,从而温度越高试样的破坏模式愈加明显,如图8所示。从试样结果中也可以看出,当温度较高且加入的高分子固化剂含量小于3%时,改良砂土表现出的是一种脆性破坏模式,这也说明了温度越高,固化膜内的水分挥发越多,从而使得改良砂土的强度增强。而当砂土中加入的高分子固化剂含量较多时,这种现象并不明显,这是因为高分子固化剂含量越多,砂土中形成的固化膜越厚,而固化膜自身属于高弹韧性材料,这种材料随着温度的升高强度与韧性均有明显提高,最终使得改良后的砂土表现出应变硬化。

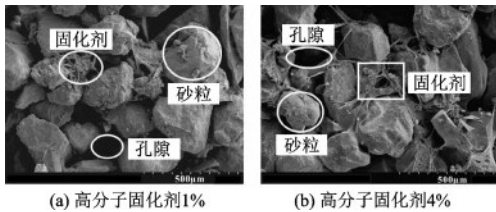


图6 高分子固化剂改良砂土的扫描电镜图

Fig.6 SEM images of polymer-reinforced sand

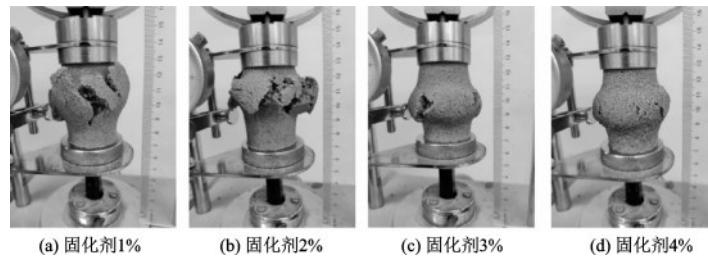


图7 35℃环境下加入不同高分子固化剂含量试样的破坏形态

Fig.7 Failure patterns of sample reinforced at different contents of polymer curing agent at the temperature of 35℃

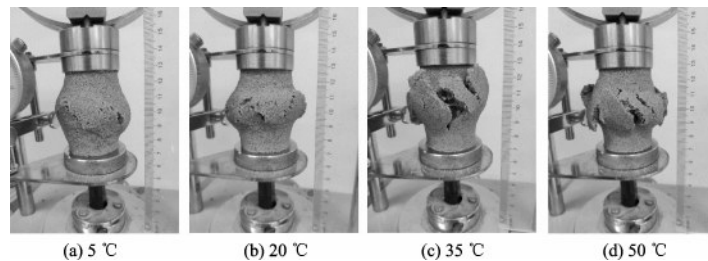


图8 高分子固化剂含量为1%时不同温度下试样的破坏形态

Fig.8 Failure patterns of samples at different temperatures when the content of polymer curing agent is 1%

4 结 论

(1)改良砂土的强度与弹性模量随着高分子固化剂含量的增多而增强,且当高分子固化剂含量达到3%后,强度增幅开始减缓。

(2)加入不同高分子固化剂含量砂土的强度与弹性模量随着温度增加而加强,且高分子固化剂含量为1%和2%时,改良砂土的强度与温度保持线性关系,而含量为3%和4%时,与温度保持三次多项式关系。

(3)根据试验成果可知,可将高分子固化剂应用于较高温地区地区的砂土加固,对沙漠地区的防风固沙环境治理提供新途径。

(4)高分子固化剂加入到砂土中,在砂粒之间形成具有一定强度和韧性的固化膜,使得松散的砂粒连接成一个整体,提高砂土强度,且形成的高分子固化膜受温度影响较大,温度越高固化膜强度韧性越强,从而改良砂土的强度越强。

参考文献:

- [1] Naeini S A, Naderinia B, Izadi E. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(6):943-949.
- [2] Santoni R L, Tingle J S, Nieves M. Accelerated strength improvement of silty sand with nontraditional additives [M]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005.
- [3] Levy G J, Miller W P. Polyacrylamide adsorption and aggregate stability [J]. Soil and Tillage Research, 1999, 51(1/2):121-128.
- [4] Ben H M, Keren R. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(2):565-570.
- [5] 王银梅,韩文峰,谌文武.新型高分子材料固砂抗冻性能试验研究[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(4):145-148.
Wang Y M, Han W F, Chen W W. Experimental study on the freezing-thawing resistance of sand fixation with a new polymer material[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 145-148. (in Chinese)
- [6] 王银梅,韩文峰,谌文武,等.新型高分子固化材料耐老化性能的试验研究[J].工程地质学报,2004,12(3):

318-322.

Wang Y M, Han W F, Chen W W, et al. Experimental study on resistances to aging of a new polymer solidified material [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3):318-322. (in Chinese)

- [7] 王银梅,孙冠平,谌文武,等. SH固沙剂固化沙体的强度特征[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2883-2887.

Wang Y M, Sun G P, Chen W W, et al. Strength characteristics of sand fixated by SH [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Sup2): 2883-2887. (in Chinese)

- [8] 王银梅,杨重存,谌文武,等.新型高分子材料SH加固黄土强度及机理探讨[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14):2554-2559.

Wang Y M, Yang Ch C, Chen W W, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14):2554-2559. (in Chinese)

- [9] 蔡光华,刘松玉,曹菁菁.活性氧化镁碳化加固粉土微观机理研究[J].土木工程学报,2017,50(5):109-117,132.

Cai G H, Liu S Y, Cao J J. Research on micro-mechanism of carbonated reactive Mg O-stabilized silt [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (5): 109-117, 132. (in Chinese)

- [10] 刘瑾,施斌,顾凯,等.聚氨酯型固砂剂改性土室内试验研究[J].防灾减灾工程学报,2013,33(1):29-34.

Liu J, Shi B, Gu K, et al. Laboratory study on soil modified by polyurethane sand-fixing agents [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1): 29-34. (in Chinese)

- [11] 刘瑾,亓孝辉,张达,等.聚氨酯型固化剂改良表层砂土抗渗透特性试验[J].地球科学与环境学报,2017,39(1):126-134.

Liu J, Qi X H, Zhang D, et al. Experiment on penetration resistance of surface sandy soil stabilized by polyurethane soil stabilizers [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(1): 126-134. (in Chinese)

- [12] 汪勇,刘瑾,张达,等.高分子固化剂加固土质边坡的稳定性分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2016,33(4):14-16,38.

Wang Y, Liu J, Zhang D, et al. Stability analysis of soil slope reinforced by polymer curing agent [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016, 33(4):14-16,38. (in Chinese)

- [13] 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.
- [14] 高杨,李滨,冯振,等.全球气候变化与地质灾害响应分析[J].地质力学学报,2017,23(1):65-74.
Gao Y, Li B, Feng Zh, et al. Global climate change and geological disaster response analysis [J]. Journal of Geomechanics, 2017,23(1):65-74. (in Chinese)
- [15] 刘晖,刘建坤,郜博文,等.冻融循环对含砂粉土力学性质的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):135-142.
Liu H, Liu J K, Tai B W, et al. Mechanical properties changes of sandy silt due to freeze-thaw cycles [J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3):135-142. (in Chinese)
- [16] 王林峰,唐红梅,陈洪凯,等.温度-应力联合作用下的不稳定岩块稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):871-877.
Wang L F, Tang H M, Chen H K, et al. Stability analysis of unstable rock mass under combined action of temperature and stress [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017,37(6):871-877. (in Chinese)
- [17] 张建云.气候变化与水利工程安全[J].岩土工程学报,2009,31(3):326-330.
Zhang J Y. Climate change and water conservancy engineering safety [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3):326-330.(in Chinese)
- [18] 周志伟,黄英,程富阳,等.干湿循环下云南红土型坝坡模型试验研究[J].勘察科学技术,2017(5):1-7.
Zhou Zh W, Huang Y, Cheng F Y, et al. Experimental study on model of yunnan laterite dam slope under drying-wetting circle [J]. Site Investigation Science and Technology,2017(5):1-7. (in Chinese)
- [19] 胡田飞,刘建坤,房建宏,等.冻融循环下冷却温度对粉质黏土力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1757-1766.
Hu T F, Liu J K, Fang J H, et al. Experimental study on the effect of cooling temperature on the mechanical properties of silty clay under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(7):1757-1766.(in Chinese)
- [20] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

(本文责编:赵霞)



(上接第 602 页)

- [17] 马立新.基于提升小波变换的风电功率预测模型[J].电力科学与工程,2018,34(2):20-25.
Ma L X. Prediction model of wind power based on lifting wavelet transform [J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(2):20-25. (in Chinese)
- [18] 克拉夫.结构动力学[M].彭津,译.北京:高等教育出版社,2006:339-345.
Krogh R. Structural dynamics[M].Peng J. Beijing: Advanced Education Press, 2006:339-345. (in Chinese)
- [19] 任鹏,周智,武文华,等.基于应变响应统计特征的海洋立管损伤诊断方法[J].振动与冲击,2017,36(1):23-30.
Ren P, Zhou Zh, Wu W H, et al. Damage diagnosis strategy for offshore risers based on statistical features of strain responses[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1):23-30. (in Chinese)
- [20] 周宇,狄生奎,王立宪,等.基于柔度指标的系杆拱桥损伤识别与寿命预测[J].防灾减灾工程学报,2018,38(6):1033-1043.
Zhou Y, Di Sh K, Wang L X, et al. Damage detection and life prediction of tied arch bridge based on flexibility-curvature-difference-rate[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6):1033-1043. (in Chinese)
- [21] Andreaus U, Casini P. Identification of multiple open and fatigue cracks in beam-like structures using wavelets on deflection signals[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2016, 28(1):361-378.
- [22] Overbey L A, Todd M D. Effects of noise on transfer entropy estimation for damage detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(7):2178-2191.
- [23] 王晓春,刘习军,张素侠.基于提升小波变换和互相关函数的梁式桥损伤检测[J].实验力学,2017,32(4):487-494.
Wang X Ch, Liu X J, Zhang S X. Beam bridge damage detection based on lifting wavelet transform and cross correlation function [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4):487-494. (in Chinese)