

文章编号: 1673-9469 (2019) 04-0072-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.012

温度对水溶性有机材料改良砂土的力学特性试验研究

王龙威¹, 石霄², 江灿琿², 陈景², 李柳扬^{2*}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 聚氨酯型固化剂与水反应生成的固化膜能有效提高砂土的强度, 为了研究温度对固化剂改良砂土效果的影响, 开展了无侧限抗压试验, 分析了不同温度条件下砂土强度随密度和固化剂含量的变化规律, 并就温度的影响机理进行了深入分析。试验结果表明: 温度对固化剂的改良效果具有明显的影响, 温度不变的情况下, 无侧限抗压强度特性随密度和固化剂含量的增加而增大。在温度较高时 ($\geq 35^{\circ}\text{C}$), 固化膜失水收缩, 弹性增大、强度提高, 能较大程度地提高砂土强度; 在温度较低时 ($\leq -10^{\circ}\text{C}$), 固化膜被冻结而强度提高, 进而提高砂土强度; 两种极端温度条件下, 固化剂改良效果都有提高, 但高温条件效果更明显。

关键词: 聚氨酯型固化剂; 砂土; 温度; 强度特性

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Experimental Study on Mechanical Properties of Sand Soil Modified by Water-soluble Organic Material at Temperature

WANG Longwei¹, SHI Xiao², JIANG Canhui², CHEN Jing², LI Liuyang²

(1. China Electrical Construction Group East China Survey and Design Research Institute Limited, Hangzhou, 310000; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The elastic membrane generated from the reaction between polyurethane stabilizer and water can effectively improve the strength of sand. In order to study the effect of temperature on the improvement of polyurethane stabilizer, unconfined compression test was carried out. The variation of sand strength with different density and polyurethane stabilizer content at different temperatures was analyzed and the influence mechanism of temperature is analyzed in depth. The test results show that temperature has obvious influence on the improvement of polyurethane stabilizer and the unconfined compressive strength increases with the increase of density and polyurethane stabilizer content at constant temperature. When the temperature is higher ($\geq 35^{\circ}\text{C}$), soil moisture decreases and the cured film shrinks causing the increase of its elasticity and strength, which can greatly improve the strength of sand. When the temperature is lower ($\leq -10^{\circ}\text{C}$), the cured film is frozen and the strength increases, which can further improve the strength of the sand; Under two extreme temperature conditions, the effect of polyurethane stabilizer is improved, but the effect is more obvious at high temperature.

Key words: polyurethane curing agent; sand; temperature; strength characteristic

砂土在我国广泛分布, 特别是在河、湖等水冲刷沉积地区^[1-3]。砂土由于具有结构松散、颗粒间粘聚力微弱、在饱水状态下易震动液化等特点, 往往

对各类大小型工程产生不良影响, 如砂土地基渗漏、地基土液化失效、砂质边坡失稳等。因此, 需根据工程需要对土体进行相应处理, 提高土体的物理力

收稿日期: 2019-10-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41877212)

作者简介: 王龙威 (1990-), 男, 河南商丘人, 在读博士, 工程师, 主要从事交通与市政工程设计与管理。* 通讯作者: 李柳扬 (1990-), 男, 河南杞县人, 博士研究生, 主要从事工程地质方面的研究。

学性能,以防止工程事故的发生。对土体进行压密处理和掺加无机类或高分子材料是目前常用的改善土体性质的方法。压密处理是通过增大土颗粒之间的接触程度以增加其相互作用,提高土体性质,朱俊高^[4]等通过对砂土试样进行三轴剪切试验发现密度对破坏时的轴向应变有明显影响;黄文雄^[5]通过修正 Gudehus-Bauer 模型研究了不同密实度和应力条件下粗粒土的力学响应;徐日庆等^[6]对不同密实度砂土进行三轴剪切试验,结果表明初始相对密实度对砂土的强度特征有着显著影响。无机加固材料(包括水泥、石灰、粉煤灰等)是通过水化或者与土颗粒表面物质反应生成具有粘结作用的胶凝性物质,固化土体,进而改善土体的强度和膨胀性等工程性质^[7-9]。董金梅等^[10]研究了聚丙烯酰胺和硅酸钠改性粉土力学特性,并分析了改机理;谌文武等^[11]研究了高分子材料 SH(改性聚乙烯醇)对土体的抗崩解能力、抗冻融循环能力等的改善作用;刘瑾等^[12]研究了聚氨酯型固化剂对砂性土强度特性的改良。高分子加固材料是通过碳链上的活性基团吸附土颗粒并借助架桥作用聚合土粒或者通过改变土体双电层结构以改变土体的性质。

温度的改变对土体的性质特别是黏粒含量较多的土体有着较大的影响,温度通过影响土体中的液相成分而改变土体性质^[13]。目前,学者们对冻结土体的物理力学性质进行了深入的研究^[14-16]。对于非冻结土体的温度效应的研究主要集中在粘性土的物理力学性质和水理性质^[17-18]。由于砂土表面几乎不存在结合水,温度对非冻结砂土强度性质的影响不明显。近些年来,各种高分子加固剂应用于砂土的加固,加之高分子材料较强的抱水性,加固后的砂体具有显著的温度效应,为此,开展加固后砂土的温度效应的研究具有重要意义。本文研究了聚氨酯型固化剂加固砂土后其强度随温度变化的规律,选定固化剂含量分别为 1%、2%、3%、4%,并考虑实际工程中可能面临的不同温度条件,从而选取温度在 -20℃ ~ 50℃ 之间,探究了温度对砂土加固效果的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料与仪器

本次试验所用材料为砂土和聚氨酯型固化剂。砂土取自江苏省南京地区,其基本物理性质如表 1

所示。试验所用的聚氨酯型固化剂为一种高分子合成材料,其能与水以任何比例相溶且能与水发生反应。聚氨酯型固化剂为浅黄色透明粘稠状液体,与水反应生成乳白色溶液,后逐渐凝固形成乳白色弹性体,如图 1。聚氨酯型固化剂含有大量带有 -NCO 官能团的预聚体,与水反应后能不断扩链形成大分子量的聚氨酯,其基本物理性质如表 2 所示。

试验温控仪为上海蓝豹试验设备有限公司生产的高低温试验箱,该试验箱容积为 0.12 m³,温度设置范围为 -20℃ ~ 120℃。

表 1 砂土的物理性质

Tab.1 Physical properties of sand

比重	最大干密度 (g·cm ⁻³)	最小高密度 (g·cm ⁻³)	曲率 系数	不均匀 系数
2.65	1.66	1.34	1.13	2.77

表 2 聚氨酯型固化剂的物理性质

Tab.2 Physical properties of polyurethane curing agent

pH	粘度 (MPa·s)	比重	固化剂含量 /%	凝固时间 /s
6 ~ 7	650 ~ 700	1.18	85	30 ~ 1 800

1.2 试验方案与方法

本文通过测量不同温度下高分子固化剂加固砂土的无侧限单轴抗压强度来探究温度对聚氨酯型固化剂加固砂土强度的影响,本次试验设置的变量有温度、砂土密度、固化剂含量。其中,温度取值分别为 -20℃、-10℃、5℃、20℃、35℃、50℃;砂土的干密度设置为 1.40、1.45、1.50、1.55、1.60 g/cm³;固化剂含量(与干砂土质量的百分比)分别设置为 1%、2%、3%、4%。

试样制备是先将固化剂稀释溶液与适量的砂土混合,搅拌均匀后,将混合物倒入模具中施加静态压力压实到指定高度,静置 3 ~ 5 min 后脱除模具,得到标准抗压试样。试样的养护是先在室温环境中(湿度 40%,温度 25℃)养护 48 h 后,放置在设置好的温度下养护 24 h 后进行试验。最后对不同温度的试样做无侧限单轴抗压强度试验,试验采用的仪器为 TCK-1 型三轴试验测量控制仪,仪器加荷速率设置为 2.4 mm/min,当应变达到 25 % 时结束试验。每个配比的试样制作三个平行样,取其平均值进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线结果分析

不同温度条件下试样的无侧限抗压强度轴向应力-应变曲线如图2所示,分析图2应力应变曲线可知,5℃和20℃的应力-应变曲线大体相同,在此温度范围内试样的强度特征变化不明显。当温度为-20℃、-10℃时,应力-应变曲线具有明显峰值,试样呈现应变软化现象,当应变达到5%~10%之间时,试样达到幅值强度。当温度为35℃和50℃时,在应变低于20%时,应力随应变的增加持续增长,试样达到峰值强度。温度条件的改变对试样在轴向应力下的应力-应变特征有着明显的影响,即温度条件的改变对固化剂改良砂土效果有一定影响。

2.2 抗压强度特性结果分析

经聚氨酯型固化剂改性后的砂土具有明显的强度增强趋势,砂土试样密度和所加固化剂的含量是影响改性砂土强度的两个重要因素,温度条件在较高温和较低温两个相对极端的条件下对固化剂改良砂土效果有较大程度的影响。不同温度条件下各密度试样无侧限抗压强度的变化规律如图3所示。在同一温度条件下,试样的无侧限抗压强度随着密度的增加而增大,密度是影响试样强度的一个因素,密度越大砂土颗粒之间的相互作用越凸显。在一定的温度范围内,随着温度的变化,试样的无侧限抗压强度在较高温度和较低温度都有明显的增强趋势,无侧限抗压强度在20℃至30℃和5℃至-10℃都有明显的增强,而后向两极端温度条件下增强趋势减缓。无侧限抗压强度在温度为5℃至20℃之间变化

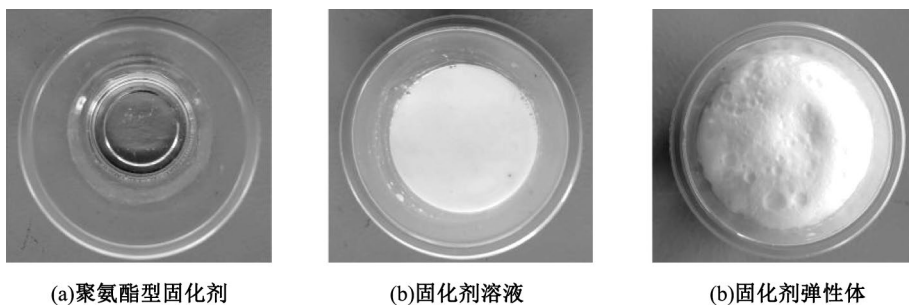


图1 聚氨酯型固化剂

Fig.1 Polyurethane curing agent

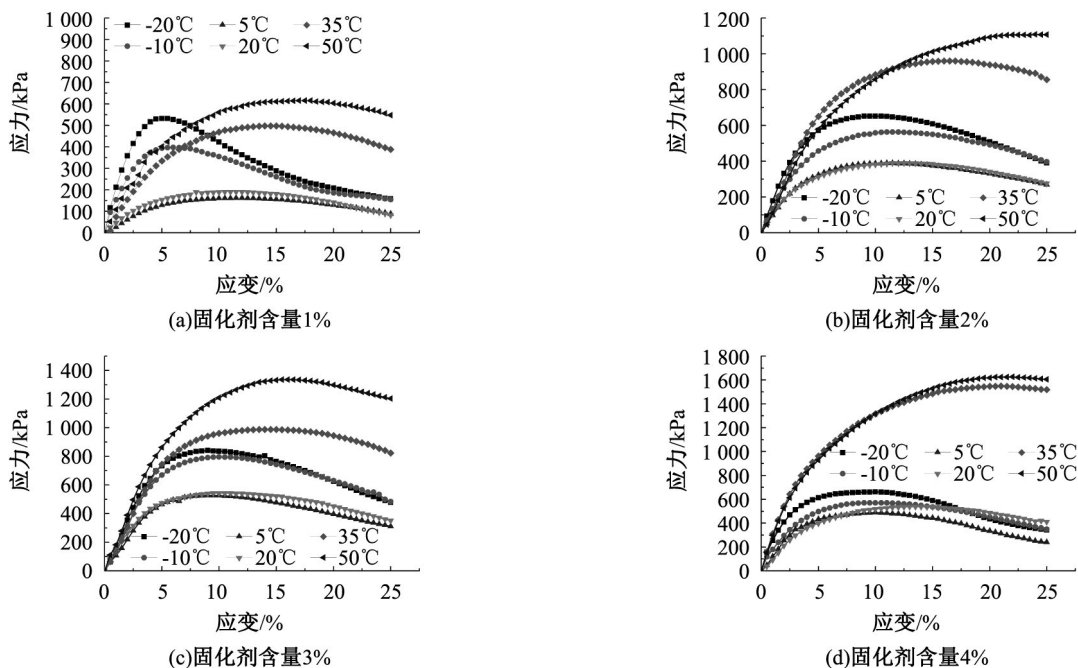


图2 变温度条件下试样应力应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of specimen at variable temperature

不明显, 在各个密度下均微小增加。

试样中聚氨酯型固化剂的添加量对改性砂土的强度性质具有大的影响, 不同温度条件下各固含量试样无侧限抗压强度的变化规律如图4所示。在同一温度条件下, 改性砂土的强度随着固化剂含量的升高而增加, 当温度低于0℃时, 随固化剂含量的增加, 改性砂土的强度增加的幅度较小, 当温度高于20℃时, 强度随着固化剂含量的增加有着较大的增幅。分别对不同温度条件下相同固含量试样进行

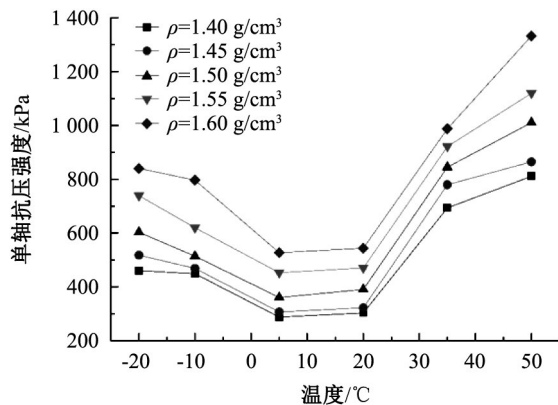


图3 变温度条件下各密度试样单轴抗压强度

Fig.3 Uniaxial compressive strength of each density sample at variable temperature

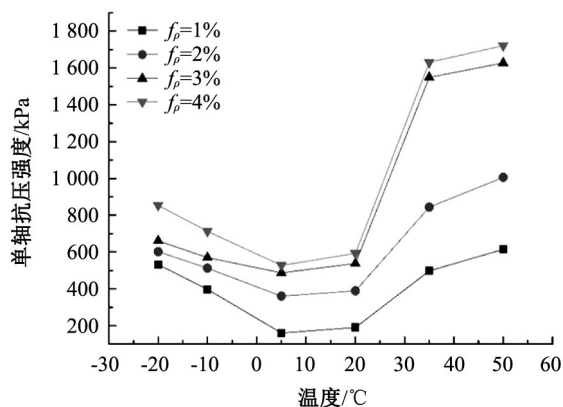


图4 变温度条件下不同固含量试样单轴抗压强度

Fig.4 Uniaxial compressive strength of samples with different solid content at variable temperature

分析, 可以发现其变化趋势与上述不同温度下同密度试样的变化趋势相同, 其无侧限抗压强度在极端温度条件下均有较大的增幅, 且在较高温时增幅较大, 可见温度对聚氨酯型固化剂改善砂土性质的效果具有较大的影响。

2.3 温度对破坏模式的影响分析

不同温度条件下试样的破坏状态如图5所示, 所示试样的密度为1.5 g/cm³, 加入的聚氨酯固化剂含量为2%。由图可知温度为-20℃和-10℃时试样的破坏情况较明显, 分析其原因为当温度低于0℃时, 固化剂所形成的弹性膜中由于含有一定量的水分, 固化膜被冻结, 其弹性降低, 在外力作用下塑性变形向脆性破坏过渡, 对试样颗粒的侧向变形的限制能力减弱。当温度为35℃和50℃时, 试样的破坏状态不太明显, 特别是50℃所对应的试样, 具有明显的鼓胀变形, 其原因为固化膜在35℃和50℃时失水收缩, 弹性增强, 固化膜能发生较大变形而不致断裂, 对砂土颗粒的侧向变形具有较强的限制作用。可见固化剂加固砂土颗粒的破坏状况受极端温度条件影响程度较大。

3 加固机理分析

由试验结果可知温度条件的改变, 对聚氨酯型固化剂改良砂土特性效果有着较大的影响, 特别是极端温度条件下温度条件向极端温度改变时能增强固化剂对砂土强度性质改善的效果。图6为试样的电子显微镜扫描图, 由图可以看出将固化剂溶液与砂土混合后, 能在砂土颗粒表面形成一层具有较大弹性的膜状结构, 固化膜粘结在砂土颗粒表面, 包裹缠绕砂土颗粒, 且固化膜具有较强的延展性, 将一定区域内分散的砂颗粒连接成一个整体, 固化膜也提高了砂土颗粒之间的相互作用, 使砂颗粒之间

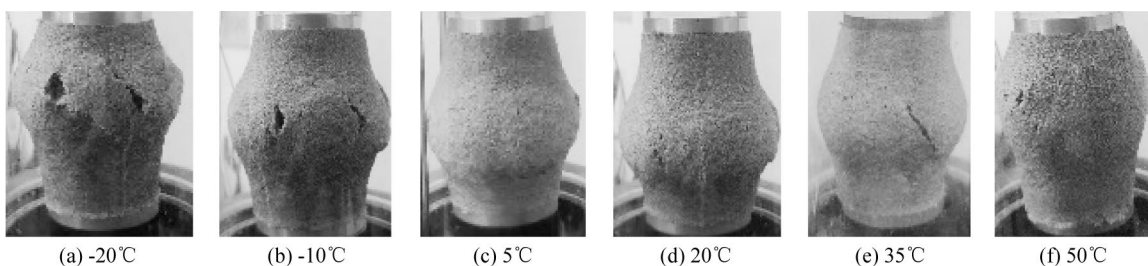


图5 不同温度条件下试样破坏模式

Fig.5 Failure mode of specimen at different temperatures

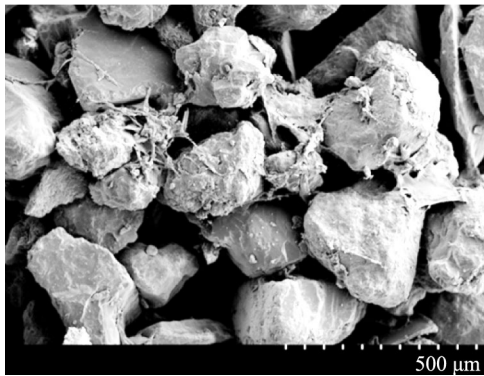


图6 固化剂加固砂土扫描电镜

Fig.6 SEM of sand reinforced by solidifying agent

的摩擦力在抵抗外力作用时起到重要的作用。整个试样中的固化膜结构彼此交联形成空间网络结构,提高了试样的粘聚力和整体性。

试样密度的改变对固化膜的填充程度和砂颗粒之间的接触面积都有着较大的影响,当密度增大时,添加等量固化剂能在不同密度砂颗粒间形成不同厚度的固化膜,密度越大的试样中固化膜的充填程度越好,对砂颗粒的包裹效果越好,试样的强度自然越高。且密度增大,相邻砂颗粒之间的接触程度提高,在固化膜的限制作用下,使之发生相对位移需克服更大的摩擦力。固化剂含量的改变直接影响固化剂溶液的浓度,进而对溶液凝固后形成的固化膜的密度有着较大的影响。固化剂含量越高,固化膜的密度越大,其韧性越强,能产生较大变形而不破坏,抗拉强度也就越高,即破坏固化膜所需的力越大。另一方面,固化剂含量越高,溶液中具有粘结作用的成分也越多,对砂颗粒的粘结作用及固化膜之间的连接作用也越强。

当温度条件改变时,包裹砂土的固化膜的状态会发生相应改变,温度条件向极端温度改变时能增强固化剂对砂土强度性质改善的效果。在实验过程中发现,-20℃和-10℃对应的固化剂弹性体被冻结,弹性减小,刚度增大,有较弱的冻胀效应。35℃和50℃对应的固化剂弹性体因失水体积收缩,颜色轻微变黄,孔隙率降低,发生相同的变形需施加更大的力。蔡国庆等^[18]通过对前人研究成果分析得出温度升高会引起粘性土中吸附水膨胀的结论,有别于温度通过影响粘性土结合水膜厚度影响其性质,对于聚氨酯型固化剂改良后的砂土,温度主要通过改变固化膜的性质而影响改良土体的性质,即固化膜在各温度条件下的状态明显影响对砂土的加固效果。

当温度低于0℃时,砂土颗粒由冻结的固化膜包裹充填,具有好的强度特性。当温度高于室温条件时,固化膜收缩、韧性增强,具有更强的包裹和抗拉作用,试样具有更大的强度和更明显的弹性形变。

4 结论

1) 在同一温度下,改良砂土的无侧限抗压强度随固化剂掺量的增加而增大,相比于5℃和20℃的温度条件,较高温度和较低温度都对固化剂的改良效果有增强作用。

2) 在同一温度下,改良砂土的无侧限抗压强度随密度的增加而增大,同一密度下,在研究范围内试样强度随温度变化趋势是先减小后增加。

3) 聚氨酯型高分子聚合物可以有效改善砂土结构松散、黏结力小等问题,增加土颗粒黏结强度,使改良砂土具有较完整结构。在温度低于0℃时,固化膜会被冻结,其强度会有一定程度的提高,从而改善被加固土体性质。在温度较高时,固化膜会失水收缩,其弹性增大,对土体的侧向变形限制能力提高,能较大程度提高土体无侧限抗压强度。

参考文献:

- [1] 孙永鑫,朱斌,陈仁朋,等.无粘性土中桩基水平非线性地基反力系数研究[J].海洋工程,2014,32(2):38-45.
- [2] 胡冰,万智.潮湿地区粉砂土路堤填筑技术研究[J].公路工程,2009,34(3):127-131.
- [3] 石桂梅,李天鸿.粉质砂土填土路堤压实标准的研究[J].科技创新导报,2007(23):77-78.
- [4] 朱俊高,史江伟,罗学浩,等.密度对砂土应力应变强度特性影响试验研究[J].岩土工程学报,2015,38(2):336-341.
- [5] HUANG W X. Quantitative Constitutive Simulation of Coarse-Grained Soil Considering the Effect of Compactness and Stress Level [J]. Journal of geotechnical engineering, 2011, 32 (5): 798-804.
- [6] 徐日庆,王兴陈,朱剑锋,等.初始相对密度对砂土强度特性影响的试验[J].江苏大学学报:自然科学版,2012,33(3):345-349.
- [7] 陈涛,顾强康,郭院成.石灰、水泥、粉煤灰改良膨胀土对比试验[J].公路,2008(6):164-167.
- [8] PHAN T A, PHAM N A. Improvement in Engineering Properties of Soft-Soil Using Cement and Lime

- Additives: A case Study of Southern Vietnam [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 143(1): 1315-1755.
- [9] CHEN F. Strength and Deformation Characteristics of Basalt Fiber Cement-Soil at Early age [J]. Shenzhen Daxue Xuebao (Ligong Ban), 2017, 34(6): 611.
- [10] 董金梅, 朱华, 边疆, 等. 高分子材料改性粉土力学特性试验研究及机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4326-4333.
- [11] 谌文武, 张起勇, 刘宏伟, 等. 高分子材料 SH 渗透加固遗址土的效果研究[J]. 工程地质学报, 2017(5): 1307-1313.
- [12] 刘瑾, 冯巧, 孙少锐, 等. 聚氨酯型固化剂加固砂性土抗压试验及破坏模式[J]. 地球科学与环境学报, 2017(5): 124-130.
- [13] WEI Y, YANG G S, YE W J. Impact of Freezing Temperature on Mechanical Properties of Loess under Cyclic Freezing and Thawing [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(8): 61-66.
- [14] 赖远明, 张耀, 张淑娟, 等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3665-3670.
- [15] 牛江宇, 靳鹏伟, 李栋伟, 等. 冻结盐渍砂土单轴强度特性研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 428-433.
- [16] 罗飞, 何俊霖, 朱占元, 等. 考虑颗粒破碎的冻结砂土非线性本构模型研究[J]. 地质力学学报, 2018, 24(6): 139-146.
- [17] 邵玉娴, 施斌, 刘春, 等. 黏性土水理性质温度效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1576-1582.
- [18] 蔡国庆, 赵成刚. 非饱和土渗流和变形强度特性的温度效应[J]. 力学进展, 2010, 40(2): 147-156.
- (责任编辑 李新)

(上接第12页)

参考文献:

- [1] 管枫年, 薛广瑞, 王殿印. 水工挡土墙设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 杨锐锐. 有限土体土压力理论及其在工程中的应用研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- [3] 徐利敏, 孙若飞, 孙勇. 地震条件下挡土墙被动土压力及其分布的微分薄层计算方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2014(6): 32-37.
- [4] 李永刚, 侯俊清. 悬臂式挡土墙主动土压力分析[J]. 中国农村水利水电, 2001(12): 134-135.
- [5] 张勇, 李永刚, 杜琼. 悬臂式挡土墙主动土压力研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(6): 131-134.
- [6] ASADOLLAH R K, NAVID G, FARAJOLLAH A. 采用上限分析方法对悬臂式挡土墙进行伪静力分析[J]. 中南大学学报, 2019, 26(1): 241-255.
- [7] 王景环, 卢义玉, 郭建强, 等. 二级新型悬臂式挡土墙主动土压力计算方法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(a01): 82-87.
- [8] 阮晓波, 於汝良, 孙树林, 等. 基于拟动力方法的地震条件下挡土墙主动土压力研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 25-30.
- [9] 阮晓波, 孙树林, 刘文亮. 锚固岩石边坡地震稳定性拟动力分析[C]// 第13届全国岩石动力学学术会议. 重庆: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013: 293-300.
- [10] SANTHOSHKUMAR G, GHOSH P. Seismic Passive Earth Pressure on an Inclined Cantilever Retaining Wall Using Method of Stress Characteristics – A New Approach[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, 107: 77-82.
- [11] GHOSH P. Seismic Passive Earth Pressure Behind Non-vertical Retaining Wall Using Pseudo-dynamic Analysis[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(6): 693-703.
- [12] GHOSH P, KOLATHAYAR S. Seismic Passive Earth Pressure Behind Non Vertical Wall with Composite Failure Mechanism: Pseudo-Dynamic Approach[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(3): 363-373.
- (责任编辑 李新)