

文章编号: 1674-599X(2021)02-0055-06

改良废旧轮胎混合材料动力特性试验研究

余伟^{1,2}, 尹平保^{1,2}, 杨朝晖^{1,2}, 罗佩婷^{1,2}

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为深入研究冻融循环条件下废旧轮胎颗粒材料的改良方法及动力特性, 通过室内试验, 确定了废旧轮胎颗粒材料的改良配比。利用改良后的废旧轮胎混合材料制备了若干试样进行动三轴试验, 获得了不同温度、冻融循环次数和循环加载次数下试样的动应力-动应变关系曲线。试验结果表明: 在动应变5%以内, 混合材料试样的动应力-动应变关系曲线无明显峰值点, 具有显著的应变硬化化特征; 在-15~20℃范围内, 试样的破坏强度随温度降低而增加, 随冻融循环次数和循环加载次数增加而降低, 而且两者对常温试样破坏强度影响较小, 对冻结试样影响较大。

关键词: 废旧轮胎; 动三轴试验; 动应力-动应变曲线; 冻融循环

中图分类号: TU411.8 **文献标志码:** A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.009

Experimental study on dynamic characteristics of improved waste tire materials

YU Wei^{1,2}, YIN Ping-bao^{1,2}, YANG Zhao-hui^{1,2}, LUO Pei-ting^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. National-Local Joint Laboratory of Engineering Technology for Long-term Performance enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to investigate the improvement methods and dynamic characteristics of waste tire granular materials under the freeze-thaw cycle condition. The experiment was carried out to improve the ratio of waste tire granular materials. The samples of improved waste tire mixed materials were prepared. The dynamic triaxial test was then performed to analyze the dynamic stress-dynamic strain characteristics influenced by temperature, freeze-thaw cycle and cycle loading. The results show that, within 5% of the dynamic strain, the dynamic stress-dynamic strain relationship curve of the mixed material sample is characterized by strain hardening without obvious peak point. In the range of -15~20℃, the strength of sample increases with the decrease of temperature, and decreases with the increase of freeze-thaw cycles and cycle loading times. The freeze-thaw cycles and cycle loading times have little influence on the strength of normal temperature samples, but have significant influence on frozen samples.

Key words: waste tires; dynamic triaxial test; dynamic stress- dynamic strain curve; freeze-thaw cycle

对于季节性冻土地区的桥梁工程, 桩周近地表 其是冬季, 桩周部分土体冻结, 使得桥梁桩基侧向
土体的力学性能受温度及冻融循环的影响较大, 尤 位移性能大大降低。地震等水平动载作用下, 极易

收稿日期: 2020-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878069, 52078055); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50647); 长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方工程实验室开放基金资助项目(18KE01); 湖南省教育厅科学研究项目(20A001)

作者简介: 余伟(1995-), 长沙理工大学硕士生。

导致桩基发生开裂、折断等脆性破坏^[1-2]。为提高寒区桥梁桩基的抗冻及抗震性能,可利用防水、抗冻材料将桩周冻深范围内的近地表土体进行置换。因此,寻找或研发一种具有防水抗冻性能的土工材料尤其重要。全球废旧轮胎日益增多,给环境保护带来了巨大压力^[3-4]。为促进废旧轮胎资源化利用,国内外许多学者提出将废旧轮胎进行回收加工后,可制成具有轻质、高阻尼及弹性变形好的橡胶颗粒,并将其改良应用于公路路基、边坡、挡土墙、垃圾填埋场回填等工程^[5-6]。Brara^[7]等人研究发现小应变动剪切模量随橡胶体积含量的增加而减小,而小应变阻尼比随橡胶体积含量增加而呈线性增长。李丽华^[8]等人通过动三轴试验,研究了橡胶含量对橡胶砂混合物的动强度和动弹性模量的影响,其结果表明:混合物的动强度略低于纯净砂土的,动弹性模量随着橡胶含量的增加而减小。刘方成^[9]等人应用循环单剪试验,研究了大应变下干燥橡胶砂的动剪切模量及阻尼比的变化规律,结果表明:相对于纯砂,橡胶砂的动剪切模量与阻尼比均随动应变幅值增大而减小。吴孟桃^[10]等人利用大型循环单剪试验,研究了橡胶砂动剪切模量和阻尼比随含水率的变化规律,表明:橡胶砂动剪切模量随含水率的增大而增大,阻尼比随含水率的增大而减小。孔德森^[11]等人利用动三轴研究了废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土(简称为RST轻质土)动变形特征,表明:动弹性模量随围压和水泥的掺量增大而增大,并发现橡胶颗粒掺量增多时,动弹性-动应变($E_d-\epsilon_d$)曲线趋于平缓。卢震^[12]等人利用动三轴等试验,验

证了橡胶混合土具有较好的隔震减震性能。冯明林^[13]等人研究了橡胶粉的种类和掺量对橡胶沥青性能的影响。这些成果都是针对常温条件下废旧轮胎颗粒材料的动力特性进行的研究工作,对低温条件下橡胶颗粒材料特性方面的研究鲜见。因此,作者拟通过添加砂和胶结料等方式,改良废旧轮胎颗粒材料,并进行不同温度和冻融循环次数的动三轴试验,研究其动应力-应变关系曲线,分析各因素对改良废旧轮胎颗粒混合材料动力特性的影响。

1 试验方法

1.1 试验材料

本试验材料由橡胶颗粒、试验砂和胶结料组成。其中,橡胶颗粒为废旧轮胎经机械打碎而成,其粒径范围为1.00~5.00 mm,平均粒径为2.81 mm,不均匀系数为2.68,曲率系数为1.35,堆积密度为0.68 g/cm³。试验砂为级配不良的砾砂,平均粒径为2.79 mm,不均匀系数为1.40,曲率系数为0.89,堆积密度为1.87 g/cm³,表观密度为2.68 g/cm³。试验所用胶结料为单组份聚氨酯胶水,由氨基酯基和异氰酸酯基聚酯组成。该材料具有耐受冲击震动和弯曲疲劳,施工方便,耐受低温,固化后黏结强度高以及弹性好等特点,现已广泛用于橡胶、陶瓷、塑料黏接、塑胶跑道铺设及修复等工程领域。橡胶颗粒和试验砂如图1所示,对应的级配曲线如图2所示。



图1 试验材料

Fig. 1 Tested materials

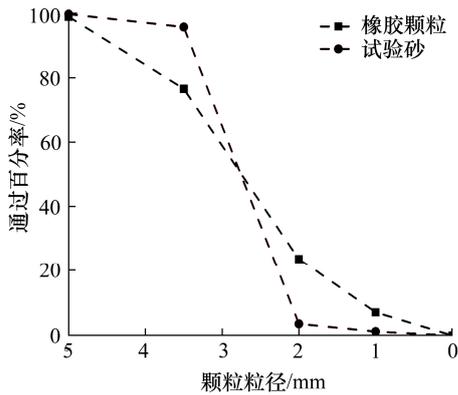


图 2 试验材料级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of tested materials

1.2 试样制备及冻融循环

依据《公路土工试验规程(JTG E40—2007)》^[14]中重塑土样标准制备方法, 批量制备试样。制样时, 采用三瓣试模人工击实成型, 该试模直径为 101 mm, 高度为 200 mm。为保证试样具有一定的抗浮性和防水等特性, 不断进行优化。采用密度控制法, 批量制备试样。具体制样过程为: 首先, 将橡胶颗粒与试验砂按照质量比为 3:2 的比例均匀拌和; 其次, 将拌和后的混合物与聚氨酯胶结料按照质量比为 5:1(胶结料过量会造成试样底部胶结料析出)的比例进行拌合后备用; 最后, 称取约 1 900 g 混合料(控制试样密度约为 1.30 g/cm³), 置于三瓣试模中, 分三层, 每层击实 15 次, 待试样凝固成型, 脱模。成型后的试样如图 3 所示。

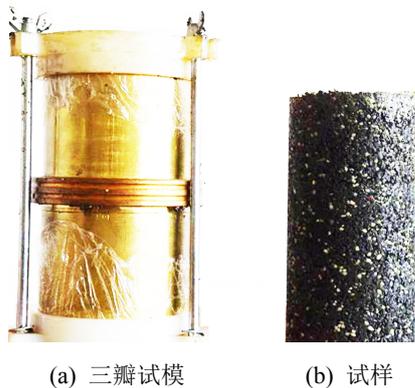


图 3 试样制备

Fig. 3 Preparation of samples

混合材料渗透试验结果显示该材料渗透系数小于 0.03 cm/d, 具有良好的防水性能。因此, 在冻融循环过程中, 可不进行饱水。试样冻融循环过程为: ①制备好的试样由 20 °C 冻结到 -20 °C(温度传

感器模块测定试样中心达 -20 °C 约需 3.5 h); ②试样在 -20 °C 的环境中, 保持 5 h, 取出试样, 置于 20 °C 环境中, 自然解冻 8.5 h, 即为完成一次冻融循环。如此反复, 直至将试样完成规定的冻融循环次数。

1.3 试验设备

本试验采用的仪器为英国 GDS 液压静动三轴仪。三轴仪主要技术参数为: 围压范围 0~70.0 MPa, 温度范围为 -30.0~50.0 °C, 最大轴向位移为 50 mm, 并配有自动数控与数据采集系统。

1.4 试验方案

本试验目的在于测试不同温度和冻融循环次数下试样的动应力-动应变关系曲线。试验共设计了 4 种不同的试验温度, 分别为 $T=20\text{ °C}$ 、 -5 °C 、 -10 °C 及 -15 °C , 并将试样进行了 0、25、50 次冻融循环, 围压为 25 kPa。动力变形时, 加载频率为 1 Hz, 采用应变控制分级加载方式, 分 5 级加载。其中, 加载应变幅值分别为 1%、2%、3%、4%、5%, 每级循环加载次数达到 100 次时, 终止该级试验。试验加载期间, 仪器自动采集动态围压、油温、轴向动应力与动应变、径向应力与应变等数据。

2 动应力-动应变曲线分析

2.1 温度 T 的影响

为分析温度 T 对试样动应力 σ_d 与动应变 ϵ_d 关系的影响, 选取温度 $T=20.0\text{ °C}$ 、 -5.0 °C 、 -10.0 °C 及 -15.0 °C , 冻融循环次数 $N=25$ 次, 循环加载次数为 100 次的试样进行分析, 其 $\sigma_d-\epsilon_d$ 关系曲线如图 4 所示。

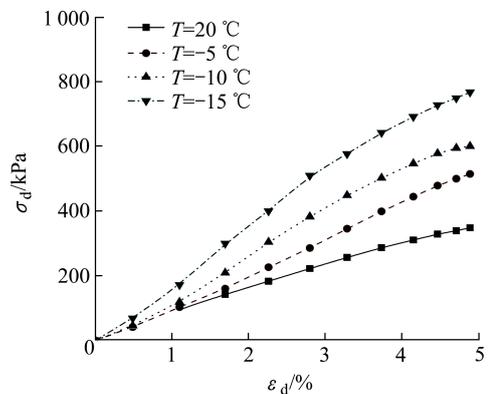


图 4 温度对 $\sigma_d-\epsilon_d$ 曲线的影响

Fig. 4 Influences of temperature on the $\sigma_d-\epsilon_d$ curve

从图4中可以看出,废旧轮胎混合材料试样的动应力-动应变曲线无明显峰值点,均表现为应变强硬化的特征。对于应变强硬化的动应力-动应变曲线,依据《地基动力特性测试规范(GB/T 50269—2015)》^[15]建议,取土样弹性应变与塑性应变之和等于5%时的应力值作为破坏强度。因此,本试验结合实际工程,将混合材料试样轴向动应变 $\varepsilon_d=5\%$ 时对应的动应力值作为其破坏强度 σ_{df} ,即:

$$\sigma_{df} = (\sigma_d)_{\varepsilon_d=5\%} \quad (1)$$

式中: σ_{df} 为混合材料试样的破坏强度; σ_d 为试样的轴向动应力; ε_d 为轴向动应变。

从图4中还可以看出, $\varepsilon_d=5\%$ 时,混合材料试样的破坏强度 σ_{df} 随温度降低而增大。试样温度 $T=20.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-5.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10.0\text{ }^\circ\text{C}$ 及 $-15.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对应的破坏强度 σ_{df} 分别为364.5 kPa、550.0 kPa、720.5 kPa、882.0 kPa。分别与前者的破坏强度进行对比,对应增幅分别为:50.9%、31.0%、22.4%。表明:其他条件不变时,混合材料试样从常温状态降温至冻结状态后,其破坏强度逐渐增大;而对于冻结试样,随着温度降低,其破坏强度增幅逐渐减小。

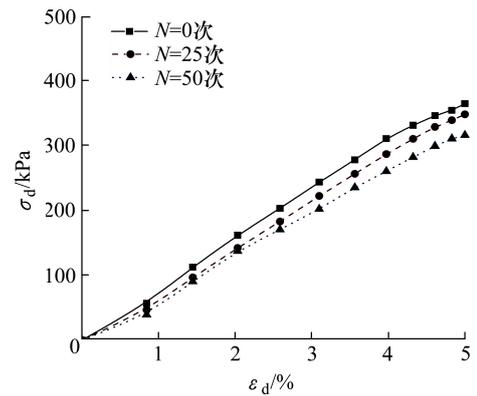
2.2 冻融循环次数 N 的影响

现有研究表明,冻融循环对季节性冻土强度的影响不容忽视^[16-17]。为分析冻融循环对试样 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 关系的影响,选取温度 T 为 $20.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-5.0\text{ }^\circ\text{C}$,冻融循环次数 $N=0$ 、25、50次,循环加载次数为100次的试样进行分析,其 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 关系曲线如图5所示。

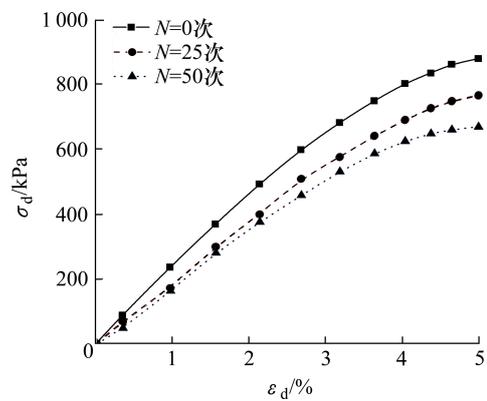
从图5中可以看出,在相同的试验温度 T 下,冻融循环对混合材料试样的破坏强度影响十分明显,均随冻融循环次数 N 增加而降低。从图5(a)中可以看出,分别经历0、25、50次冻融循环之后的常温试样($T=20\text{ }^\circ\text{C}$),其对应的破坏强度分别为364.5 kPa、348.0 kPa和315.8 kPa。与 $N=0$ 次相比, N 为25次和50次试样的破坏强度降低幅度分别为4.5%和13.3%。而对于试验温度 $T=-15.0\text{ }^\circ\text{C}$ 的冻结试样,经历50次冻融循环之后,破坏强度降低幅度为25.2%。表明:冻融循环对常温试样的破坏强度影响较小,而对冻结试样的强度影响较大。这是因为冻融循环在一定程度上降低了试样橡胶颗粒、砂与胶结材料的黏结力,从而影响材料的强度特性。

2.3 循环加载次数的影响

为分析循环加载次数对试样 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 关系的影响,



(a) $T=20\text{ }^\circ\text{C}$



(b) $T=-15.0\text{ }^\circ\text{C}$

图5 冻融循环次数对 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 曲线的影响

Fig. 5 Influences of freeze-thaw cycle times on the $\sigma_d-\varepsilon_d$ curve

选取冻融循环次数 $N=50$ 次,温度 T 为 $20.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-15.0\text{ }^\circ\text{C}$ 的试样进行分析,其 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 曲线如图6所示。

从图6中可以看出,不同温度下的 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 关系曲线呈现相似的变化趋势,其破坏强度随着循环加载次数增加而降低,最终趋于稳定。从图6(a)中可以看出,对于常温试样($T=20\text{ }^\circ\text{C}$),其破坏强度随着循环加载次数的增大逐渐降低,循环加载次数为1、20、40、100次时,其破坏强度分别为344.6 kPa、318.4 kPa、333.2 kPa、315.8 kPa,与加载1次相比,其破坏强度分别衰减了3.4%、7.6%和8.4%。而对于冻结试样($T=-15\text{ }^\circ\text{C}$),其破坏强度发生较大幅度的衰减,并表现出两阶段的变化特征:①初始阶段,主要表现为破坏强度迅速衰减;②稳定阶段,主要表现为破坏强度衰减速率变缓,并逐渐趋于稳定。当循环加载次数为1次时,其破坏强度为856.6 kPa;当循环加载至20次时,其破坏强度衰减至708.4 kPa,衰减幅值为17.3%;当循环加载至40、60、80、100次时,后者相较于前者的衰减幅值分别为

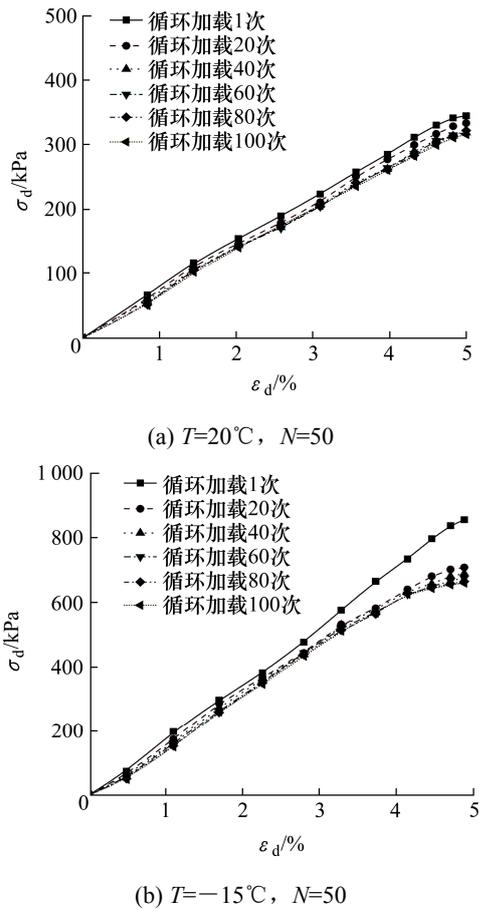


图 6 循环加载次数对 $\sigma_d-\epsilon_d$ 曲线的影响

Fig. 6 Influences of cycle loading times on the $\sigma_d-\epsilon_d$ curve

2.7%、2.1%、1.6%、0.7%。试验循环加载 100 次后, 其破坏强度累计衰减幅值为 23.0%。表明: 循环加载次数对常温试样影响较小, 而对冻结试样的影响较大。这是因为试样在加载之前, 颗粒间已经形成相对稳定的骨架结构与黏结作用。低次数循环荷载作用下, 试样从稳定状态骤然达到最大轴向应变, 使得试样骨架结构及胶结面发生破坏。低次数循环加载对冻结试样的破坏强度影响更大, 当循环加载次数大于 20 次后, 试样内部结构趋于稳定。

3 结论

通过对一定级配的废旧轮胎颗粒材料进行改良, 确定了混合材料的配比及制样方法, 并进行了不同温度和冻融循环次数的动三轴试验, 获得了相应的动应力-动应变关系曲线, 得到结论:

1) 动应变 5%内, 混合材料试样的动应力-动应变曲线无明显峰值点, 表现出显著的应变硬化型特征, 试样破坏强度随温度降低而增加。试样从

20 °C 转至-5 °C 后, 其破坏强度增幅较大。冻结试样的破坏强度随着温度降低, 其增幅逐渐减小。表明: 改良废旧轮胎混合材料强度适中, 结构稳定。

2) 相同试验温度下, 试样的破坏强度随冻融循环次数增加而降低。相对来说, 冻融循环对冻结试样破坏强度的影响更为显著。表明: 废旧轮胎可用于置换季节性冻土区桩周的部分土体, 亦可在公路路基、边坡及挡土墙等工程中应用。

3) 混合材料试样的破坏强度先随循环加载次数增加而降低, 然后趋于稳定。循环加载次数对常温试样的影响较小, 对冻结试样的影响较大。

参考文献(References):

- [1] Zhu Y L, Carbee D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Cold Regions Science and Technology, 1984, 9(1): 3-15.
- [2] Fei W P, Yang Z J. Modeling unconfined compression behavior of frozen Fairbanks silt considering effects of temperature, strain rate and dry density[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 158: 252-263.
- [3] Humphrey D N. Investigation of exothermic reaction in tire shred fill located on SR 100 in Ilwaco, Washington [R]. Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 1996.
- [4] Gacke S, Lee M, Boyd N. Field performance and mitigation of shredded tire embankment[J]. Transportation Research Record, 1997, 1577(1): 81-89.
- [5] Reddy S B, Krishna A M. Recycled tire chips mixed with sand as lightweight backfill material in retaining wall applications: an experimental investigation[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2015, 1(4): 1-11.
- [6] Tsang H H. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(2): 283-303.
- [7] Brara A, Brara A, Daouadji A, et al. Dynamic properties of dense sand-rubber mixtures with small particles size ratio[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017, 21(9): 1065-1079.
- [8] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎颗粒混合土动力特性参数影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 359-364, 422. (LI Li-hua, XIAO Heng-lin, TANG Hui-ming, et al. Dynamic properties variation of tire shred-soil mixtures

- [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 359–364, 422. (in Chinese))
- [9] 刘方成, 杨峻, 王海东. 大应变下干燥橡胶砂动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 4265–4278. (LIU Fang-cheng, YANG Jun, WANG Hai-dong. Experimental study on dynamic characteristics of dry rubber-sand mixture at large strains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 4265–4278. (in Chinese))
- [10] 吴孟桃, 刘方成, 陈巨龙, 等. 含水率对大应变下橡胶砂动剪模量和阻尼比的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 803–814, 847. (WU Meng-tao, LIU Fang-cheng, CHEN Ju-long, et al. Influence of water content on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixture under large strains[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 803–814, 847. (in Chinese))
- [11] 孔德森, 陈文杰, 贾腾, 等. 动荷载作用下RST轻质土变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 874–878. (KONG De-sen, CHEN Wen-jie, JIA Teng, et al. Deformation characteristics of RST lightweight soils under dynamic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 874–878. (in Chinese))
- [12] 卢震, 陈开圣. 橡胶黏土混合土动剪切模量及阻尼比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 250–257. (LU Zhen, CHEN Kai-sheng. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-clay mixture[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 250–257. (in Chinese))
- [13] 冯明林, 冯正翔, 郑伟, 等. 橡胶沥青性能试验及影响因素分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 33–37, 55. (FENG Ming-lin, FENG Zheng-xiang, ZHENG Wei, et al. Rubber asphalt performance test and analysis of influencing factors[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 33–37, 55. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国交通部. JTG E40—2007, 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50269—2015, 地基动力特性测试规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50269—2015, Code for measurement methods of dynamic properties of subsoil[S]. Beijing: China Planning Press, 2016. (in Chinese))
- [16] 刘寒冰, 张互助, 王静. 冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 158–164. (LIU Han-bing, ZHANG Hu-zhu, WANG Jing. Effect of freeze-thaw and water content on mechanical properties of compacted clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 158–164. (in Chinese))
- [17] 胡田飞, 刘建坤, 王青志, 等. 冻融循环下粉质黏土不排水剪切性状的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1481–1490. (HU Tian-fei, LIU Jian-kun, WANG Qing-zhi, et al. Experimental study on undrained strength characteristics of silty clay after freeze-thaw cycling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(6): 1481–1490. (in Chinese))