

有压单向冻结橡胶加筋膨胀土的动力特性研究

程兆杰¹, 杨忠年¹, 王阳阳², 崔郁雪¹, 凌贤长^{1,3}, 孙振兴¹, 王荣昌¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021;

3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 废旧橡胶在岩土工程和环境地质工程中已得到广泛应用, 许多学者利用橡胶进行土体的改良。然而橡胶加筋膨胀土有着更加复杂的力学性质, 尤其是动力特性方面仍处于空白。因此本文利用自研温控动三轴设备, 探究了有压单向冻结条件下冻结温度及橡胶粒径对橡胶加筋膨胀土动力特性的影响。结果表明: (1) 有压冻结条件下, 随温度的降低动剪切模量呈先增加后减小的趋势, 当 $T = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 动剪切模量达到最大。(2) 相同掺量下随着橡胶粒径增加, 橡胶加筋膨胀土最大动剪切模量出现的负温也随之提高。粒径为 0.25 mm 时最大动剪切模量出现在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而粒径为 0.43 mm 时出现在 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。(3) 橡胶粒径从 2 mm 降至 0.18 mm, 橡胶加筋膨胀土应力应变曲线的线弹性阶段范围略有增加, 线弹性范围增加了 0.283%。

关键词: 膨胀土; 橡胶加筋; 有压单向冻结; 橡胶粒径; 骨干曲线; 动剪切模量

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)06-0819-10

Study on dynamic characteristics of unidirectional frozen rubber-reinforced expansive soil under confining pressure

CHENG Zhaojie¹, YANG Zhongnian¹, WANG Yangyang², CUI Yuxue¹,
LING Xianzhang^{1,3}, SUN Zhenxing¹, WANG Rongchang¹

(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. Shandong Provincial No. 4 Institute of Geological and Mineral Survey, Shandong Weifang 261021, China;

3. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Waste rubber has been widely used in geotechnical engineering and environmental geological engineering, and many scholars have used waste rubber for soil improvement. However, rubber-reinforced expansive soils have more complex mechanical properties, especially in terms of its dynamic characteristics, which remain unexplored. In this paper, the effects of freezing temperature and rubber particle size on the dynamic properties of rubber-reinforced expansive soil under confining pressure are investigated by using self-developed temperature-controlled dynamic triaxial equipment. The results show that: (1) Under confining pressure, the dynamic shear modulus tends to increase and then decrease with decreasing temperature. When $T = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$, the dynamic shear modulus reaches the maximum. (2) With the increase of rubber particle size under the same mixture, the negative temperature for the maximum dynamic shear modulus of rubber-reinforced expansive soil also increases. When the particle size is 0.25 mm, the maximum dynamic shear modulus appears at $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, and when the particle size is 0.43 mm, it appears at $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. (3) When the rubber particle size decreases from 2 mm to 0.18 mm, and the range of linear elastic phase of rubber reinforced expanded soil stress-strain curve increases slightly, and the range of linear elasticity increases by 0.283%.

Key words: expansive soil; rubber-reinforced; unidirectional freezing under pressure; rubber particle size; backbone curves; dynamic shear modulus

收稿日期: 2022-09-08

修回日期: 2024-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(4217071578); 国家重大仪器开发项目(41627801)

第一作者: 程兆杰(1998—), 男, 硕士生, 主要从事特殊土力学方面研究。E-mail: 1441419738@qq.com

通信作者: 杨忠年(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事特殊土力学方面研究。E-mail: yzhnqd@qut.edu.cn

随着交通运输业和工业的高速发展,对车辆轮胎的需求日益增加。据统计,仅2015年中国生产的废旧轮胎已达到了3.3亿条,且每年仍以6%~8%的速度增长^[1],然而废旧轮胎的回收利用率不足50%。全世界每年产生1400~1700万t废旧轮胎,占世界固体废弃物生产总量的2%^[2-3]。废旧轮胎作为一种固体废弃物,在业内被称为黑色污染,目前对废旧轮胎的处理方法主要为:填埋^[4]、生产再生胶^[5]、热裂解及作为工业燃料等。废旧轮胎填埋处理不仅占用大量地下空间,而且存在较大的火灾隐患^[6-7]。因此,亟需寻找新兴的处理方式以便回收利用废旧橡胶,如何经济环保地处理废旧橡胶面临巨大的挑战。

膨胀土是一种吸水膨胀,失水收缩的特殊土壤^[8-9],具有超固结性、裂隙性的特点^[10-11],常被用作挡土墙,路基填料和边坡工程。由于显著的膨胀特性,水分含量波动时常常表现出明显的体积变化,同时伴随着裂隙发育和强度折减的特性,极大的威胁着上部结构的安全性和耐久性。据统计,美国2014年因膨胀土造成的损失就达150亿美元,是洪水、地震、龙卷风和飓风等灾害造成损失总和的两倍多^[12]。为了避免膨胀土在工程中的危害,学者们提出了许多改性或改良膨胀土的方法。例如利用水泥、石灰、橡胶等对膨胀土进行物理改良^[13-14],或者利用化学材料对膨胀土进行化学改性^[15-16]。橡胶具有重量低、弹性大、成本低且有良好的保温、减振性等优良的特点,经过机械破碎得到的橡胶颗粒或碎屑可以作为一种良好的廉价土工材料应用在土木工程中^[17-18]。例如:路堤回填^[19]、土壤改良^[20]、渗滤液填充^[21]等。Saberain^[22]通过研究不同橡胶掺量的橡胶加筋黏土的力学性质发现,橡胶加筋泥炭土的韧性得到提高, c 、 φ 值也随橡胶掺量的增加而显著提高。近年来,橡胶加筋土的研究有着较为成功的应用,这也说明了橡胶作为岩土工程材料可靠性。

由于橡胶加筋有效改善了膨胀土的力学特性,降低了膨胀土的膨胀特性^[12],越来越多的学者对橡胶加筋膨胀土进行了试验研究,Akbarimehr^[23]的研究结果表明,颗粒状、碎屑状、纤维状三种不同形式的橡胶能有效提高拌合料的抗剪强度,并建议将废旧橡胶应用于填充材料等各种岩土工程应用中。Abbaspour^[7]发现橡胶纤维可以增强膨胀土的抗剪强度和抗压强度,且不同橡胶纤维掺量对膨胀土力学性能的影响不同,并给出了最佳橡胶纤维掺量。Dunham^[24]研究了固结不排

水压缩试验中橡胶粒径对橡胶加筋膨胀土刚度的影响,结果表明橡胶加筋膨胀土的刚度明显增大。路钊驰等^[25]研究结果表明橡胶加筋膨胀土的阻尼比得到提高。Narani^[12]对橡胶加筋膨胀土的研究发现,橡胶可以增强膨胀土的岩土工程特性。以上研究成果表明橡胶的掺入能有效的改变膨胀土的力学性能,但目前大多橡胶加筋膨胀土的试验仅在常温条件下进行,冻结条件下的研究相对较少。关辉等^[26]对兰州黄土在不同冻结温度下的单向冻结特性进行了试验研究,发现有压条件下土的变形以压缩变形为主。当橡胶加筋膨胀土用作冻土区地基处理时,列车动荷载是影响其力学性能的主要因素,且自然环境下,地基土发生有压单向冻结,因此橡胶加筋膨胀土在有压单向冻结条件下的动力特性研究是很有必要的。

本文采用自研温控动三轴设备开展了有压冻结条件下橡胶加筋膨胀土的动力特性研究。研究了有压冻结时,橡胶粒径、冻结温度对橡胶加筋膨胀土骨干曲线和动剪切模量的影响,并分析单向冻结时动荷载作用下试样体积的变化规律。本文研究内容将为橡胶加筋膨胀土在冻土区地基处理、路基填料中的应用提供依据。

1 试验材料及试验方案

1.1 试验材料

本试验所用土样为重塑膨胀土,土样为黄褐色,取自于河南省郑州市。根据《土工试验方法标准》对其基本物理性质进行试验,结果如表1所示。

表1 膨胀土基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of expansive soils

天然含水率/%	最大干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	自由膨胀率/%	最优含水率/%	饱和含水率/%
5.7	2.1	70	18.0	34.8

本试验所用的橡胶来自于四川德阳,考虑不同橡胶粒径对膨胀土动力特性的影响,选取 $d=2.00$ 、 0.43 、 0.25 和 0.18 mm的橡胶粒径。Akbarimehr等^[27]通过对橡胶加筋黏土的研究发现,橡胶的最佳掺量为10%,因此本试验中橡胶掺量取10%。

1.2 试样制备

制样时,先将橡胶与膨胀土充分均匀混合,然后按照18%的含水率将一定量的蒸馏水加入混合物,加水后用保鲜膜封好并静置一昼夜,使水分均匀分布。本试验中,橡胶掺量(RC)定义为橡

胶与膨胀土橡胶混合物的总质量之比, 由式(1)表示:

$$RC=\frac{m_R}{m_R+m_S+m_W}\times100\%$$
 (1)

式中: m_S 为土样质量; m_R 为橡胶质量; m_W 为混合物中水的质量. 采取分层击实的制样方法, 制样前在击实筒内壁均匀涂抹凡士林, 分 5 层击实, 对两层交界处进行刨毛处理, 击实完成后用刮土刀将超出击实筒的试样刮平, 最终制得直径为 150 mm, 高度为 300 mm 的试样. 部分橡胶加筋膨胀土的试样如图 1 所示. 其中, 图 1 中的 1、2、3、4 为温度传感器安放位置, 试验结束后测量四个位置处的周长, 计算体积变化率.

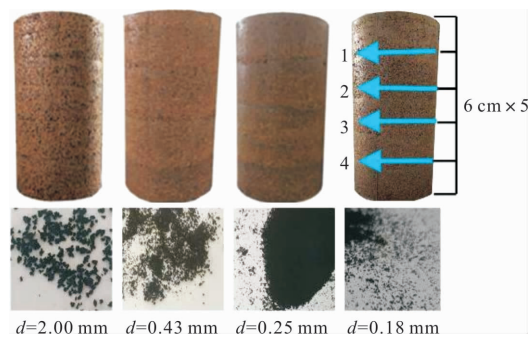


图 1 橡胶加筋膨胀土试样及橡胶粉末
Fig. 1 Rubber-reinforced expansive soil sample and rubber powder

1.3 试验方案及仪器

本试验在 0.2 MPa 的围压条件下, 采用单向降温方法对试样进行冻结, 当 1 位置处, 见图 1 的温度达到设定温度时开始进行试验, 表 2 给出了每种土样的试验条件, 试样初始含水率为 18%, 冻结

温度分别为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加载频率为 1 Hz. 试验所用仪器为自研温控动三轴仪, 可分别控制试样顶端和底端温度, 还可进行不同位置处的温度测量. 该仪器由控温箱、加载装置、计算机控制系统和数据采集系统组成, 设备示意图见图 2.

有压冻结过程持续 12 h, 在围压的作用下, 土样完成固结, 因此本试验采用不固结不排水 (UU) 方式. 为了得到应变幅值较大范围内的动剪切模量, 多级循环加载试验采用 20 个不同的循环应力幅值, 每个等幅值采用 20 个正弦加载周期^[28-29]. 通过自动数据采集系统记录试件的轴向循环应力和位移, 图 3 展示了多级循环加载的应用.

表 2 温控动三轴试验方案

Tab. 2 Temperature-controlled dynamic triaxial test scheme					
编号	粒径/mm	掺量/%	温度/ $^{\circ}\text{C}$	频率/Hz	含水率/%
ESR-1	2.00		-4		
ESR-2	2.00		-8		
ESR-3	0.43		-4		
ESR-4	0.43		-8		
ESR-5	0.43		-12		
ESR-6	0.43	10	-16	1	20
ESR-7	0.25		-4		
ESR-8	0.25		-8		
ESR-9	0.25		-12		
ESR-10	0.25		-16		
ESR-11	0.18		-4		
ESR-12	0.18		-8		



图 2 温控动三轴仪器示意图
Fig. 2 Schematic diagram of temperature-controlled dynamic triaxial instrument

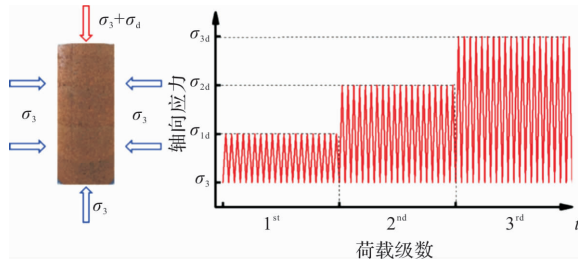


图3 轴向多级荷载加载方式

Fig. 3 Axial multi-stage load loading method

2 动剪切模量及阻尼比的确定

通过温控动三轴试验,得到了轴向循环应力 σ_d 并且根据采集到的数据计算得到轴向循环应变 ϵ_d ,通过式(2)、(3)计算得到循环剪应力 τ_d 和循环剪应变 γ_d ^[30].

$$\tau_d = \sigma_d / 2 \quad (2)$$

$$\gamma_d = \epsilon_d (1 + \mu) \quad (3)$$

式中: σ_d 为轴向循环应力, ϵ_d 为轴向循环应变, μ 为土样泊松比。

土样在经历一次应力循环后的应力-应变关系曲线即为滞回曲线,图4给出了膨胀土的循环剪应力和循环剪应变的滞回曲线。

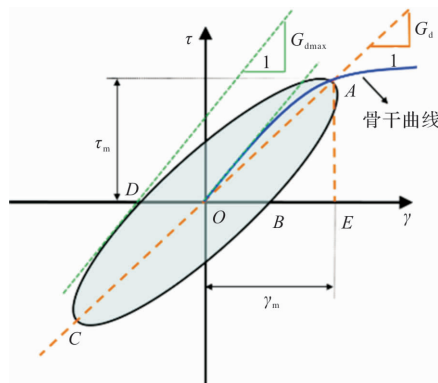


图4 膨胀土应力-应变滞回曲线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stress-strain hysteresis curve for expansive soils

动剪切模量和阻尼比可由式(4)、(5)计算:

$$G_d = \frac{\tau_m}{\gamma_m} \quad (4)$$

$$D = \frac{S_{ABCD}}{4\pi S_{\triangle OAE}} \quad (5)$$

式中: τ_d 、 γ_d 分别为循环剪应力幅值和循环剪应变幅值, S_{ABCD} 为滞回曲线面积, $S_{\triangle OAE}$ 为三角形OAE的面积。

3 试验结果及分析

3.1 橡胶粒径对骨干曲线的影响

滞回曲线的顶点连线定义为骨干曲线,Har-

din采用双曲线模型来描述骨干曲线,该模型将土视为黏弹性介质,表达式见式(6):

$$\tau_d = \frac{\tau_d}{a + b\gamma_d} \quad (6)$$

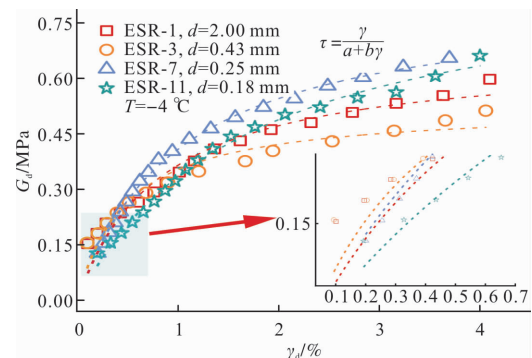
$$G_d = \frac{1}{a + b\gamma_d} \quad (7)$$

式中: a 和 b 为材料常数($a, b > 0$).当循环动剪应变幅值 γ_d 趋向于0时,最大动剪切模量由式(8)表示:

$$G_{dmax} = \frac{1}{a} \quad (8)$$

图5给出了 $T = -4^\circ\text{C}$ 时不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土的骨干曲线.如图5所示,循环剪应变的范围为0.1%~5%,剪应力随着剪应变的增加而增加.当剪应变小于1%时,剪应力的增长较为迅速,剪应变超过1%后,剪应力的增加速率变缓.这是因为橡胶颗粒与土颗粒接触,土-橡胶颗粒的摩擦力大于土粒之间的摩擦力^[25],发生小应变变形时,橡胶颗粒与土颗粒被挤压,颗粒间摩擦力与接触力变大,当应变较大时,颗粒之间开始产生滑移,使得剪应力的增加变缓。

当应变较小时,橡胶加筋膨胀土的应力应变近似线性关系,该范围称为弹性范围.图5中,橡胶加筋膨胀土的弹性范围随着橡胶粒径的减小而增加,ESR-1、ESR-3、ESR-7、ESR-11的弹性范围分别是0.26%、0.39%、0.423%、0.543%.当应变较大时,应力应变曲线展示为非线性关系.这是因为橡胶掺入土中并与土粒接触,加载过程中橡胶粒会承担部分力,由于橡胶具有轻质、高弹性,减震性^[31]的特点,使得橡胶加筋膨胀土的弹性范围增加,在相同的橡胶掺量下,粒径越小,橡胶颗粒的数量就越多,在土样中的分布密度越大,因此橡胶粒径越小,弹性范围越大。

图5 -4°C 时不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土骨干曲线Fig. 5 Backbone curve of rubber-reinforced expansive soils with different rubber particle sizes at -4°C

3.2 冻结温度对骨干曲线的影响

冻土是一种多成分、分散相颗粒体系,冻结

橡胶加筋膨胀土内的颗粒成分更为复杂, 由未冻水、冰晶、橡胶、土四者构成胶结物. 受冰胶结作用的制约, 其表现出的力学行为比其他松散介质更为复杂. 图 6 显示了 $T=-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土的骨干曲线. $T=-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 橡胶加筋膨胀土的循环剪应变范围为 $0.1\%\sim 0.8\%$. 相较 $T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同样的循环荷载下, 循环剪应变范围减小了 84% . 这是因为位置 1 处温度达到 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 位置 3、4 的温度仅为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 土样中未冻水含量较多, 土质较为松软. 随着位置 1 处温度降低至 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 位置 3、4 达到 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 土样内部未冻水含量减少, 此时试样的硬度增大, 轴向变形减小. 各位置点温度情况如表 3 所示. 试验过程中不同橡胶粒径的土样在试验时温度差值保持在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内. 不同温度下橡胶加筋膨胀土的骨干曲线如图 7 所示. 结果表明, 相同的循环剪应变幅值下, 剪应力幅值随温度降低而显著增加. 当剪应变为 0.6% 时, $T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的剪应力为 0.32 MPa , 而 $T=-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的剪应力为 0.87 MPa , 增加了 0.55 MPa , 约 172% . 这与 Ling^[32] 的研究结论相同, 随着温度降低, 冻结密砂的骨干曲线向上偏移.

表 3 土样不同位置处的温度情况
Tab. 3 Temperature at different locations of soil samples

冻结温度 / $^{\circ}\text{C}$	位置 1 / $^{\circ}\text{C}$	位置 2 / $^{\circ}\text{C}$	位置 3 / $^{\circ}\text{C}$	位置 4 / $^{\circ}\text{C}$
-4	-4.04	-1.82	-1.4	-0.72
-8	-8.42	-7.32	-6.68	-5.76
-12	-12.04	-11.28	-11.12	-10.68
-16	-16	-15.72	-14.48	-14.28

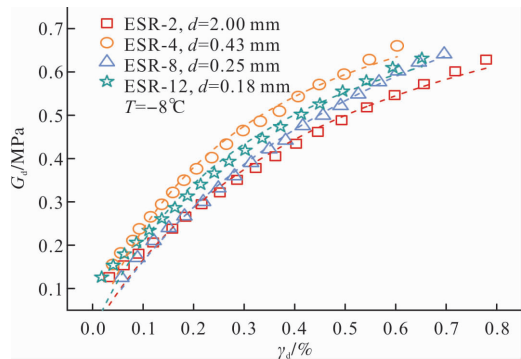


图 6 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土骨干曲线
Fig. 6 Backbone curve of rubber-reinforced expansive soils with different rubber particle sizes at $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$

研究表明, 冻土的力学性质对温度变化非常敏感, 这主要与土壤中的自由水含量有关. 随温度的降低, 越来越多的自由水冻结成冰晶, 土壤内未冻水含量减少^[33]. 冰晶、橡胶颗粒、土粒三者之间相互接触作用增强, 使得土骨架的刚度增

强. 水结冰的过程中体积增加 9% , 意味着土中孔隙体积增加 9% . 同时, 围压的作用使得颗粒间相互靠近, 镶嵌程度增高, 土样出现压密现象, 孔隙中的冰晶、土粒与橡胶的胶结物受挤压而出现褶皱, 土壤的胶结作用增强^[34], 颗粒间的咬合力随之增加, 从而限制了裂隙的增长. 因此, 随着温度降低, 骨干曲线向上偏移, 即产生相同的剪切应变需要更大的剪切应力. 利用 Hardin 模型拟合循环剪应力和循环剪应变之间的关系, 不同橡胶粒径和冻结温度下的动力参数以及 R^2 见表 4.

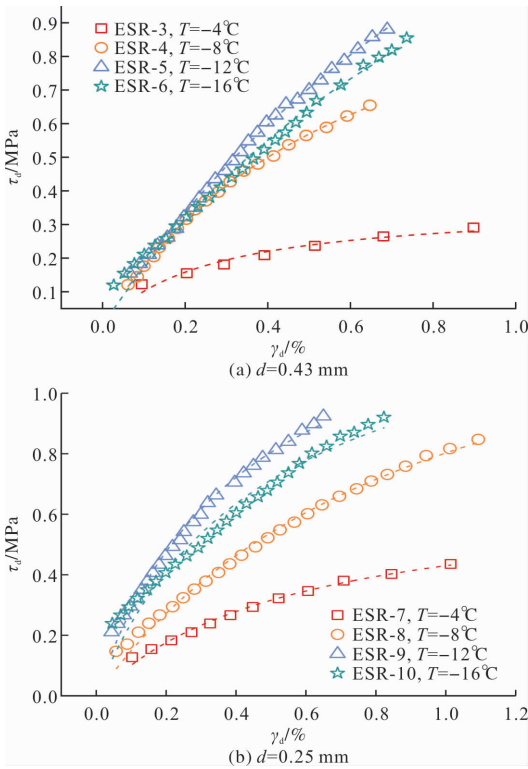


图 7 不同冻结温度下橡胶加筋膨胀土的骨干曲线
Fig. 7 Backbone curve of rubber-reinforced expansive soils at different freezing temperatures

表 4 橡胶加筋膨胀土的动力参数
Tab. 4 Dynamic parameters of rubber-reinforced expansive soils

试样	a	b	R^2
ESR-1	0.011 4	0.485 0	0.946
ESR-2	0.005 0	0.897 3	0.980
ESR-3	0.007 7	2.776 3	0.945
ESR-4	0.005 7	0.796 2	0.999
ESR-5	0.004 6	0.345 6	0.998
ESR-6	0.005 0	0.458 8	0.985
ESR-7	0.007 6	1.483 2	0.991
ESR-8	0.005 4	0.638 1	0.992
ESR-9	0.003 4	0.810 1	0.990
ESR-10	0.003 9	0.784 4	0.960
ESR-11	0.008 0	0.997 0	0.991
ESR-12	0.004 6	1.162 5	0.969

3.3 橡胶粒径对动剪切模量的影响

图8显示了不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土的动剪切模量。如图8所示,随着循环剪应变的增加,动剪切模量减小。 $T = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,1%剪应变以内,动剪切模量随应变增加而急剧下降,应变从0.1%增加到1%的过程,动剪切模量降低了约40 MPa。应变大于1%时,动剪切模量随应变增加缓慢下降。剪应变从1%增加到5%的过程中,动剪切模量降低约15 MPa。如图8(b)中所示, $T = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在0.2%的剪应变范围以内,动剪切模量急剧下降约120 MPa,剪应变从0.2%增加到0.8%的过程中,动剪切模量降低约80 MPa。这是因为橡胶具有较低的弹性模量,因此试样压缩性较高,当剪应变增大时橡胶颗粒被挤压,与土粒的接触更充分^[35]。因此,动剪切模量下降速率变缓。

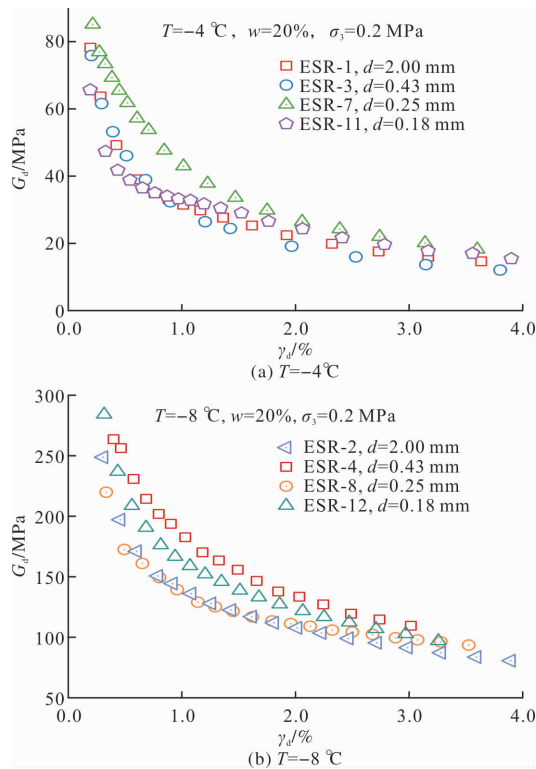


图8 不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土的动剪切模量

Fig. 8 Dynamic shear modulus of rubber-reinforced expansive soils at different rubber particle sizes

在循环剪应变相同的情况下, $T = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,ESR-7的动剪切模量最大, $T = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $d = 0.43\text{ mm}$ 的橡胶加筋膨胀土的动剪切模量最大。两个温度下, $d = 2\text{ mm}$ 橡胶改性膨胀土的动剪切模量最小。橡胶粒径对动剪切模量的影响可能跟土壤与橡胶颗粒的接触和作用形式有关。较大的橡胶粒径在土体变形时承担着更多的压力,橡胶会发生较大的变形^[36],故大粒径的橡胶颗粒与膨胀土混合后

的试样动剪切模量较低。橡胶粒径直接影响着膨胀土的动力特性,这主要是受橡胶、土粒、冰晶三者的接触方式的影响,因此橡胶粒径不同时,橡胶加筋膨胀土所表现出来的动力特性不同。

图9为不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土的体积变形率。由图9可知,体积变形均为收缩变形,随粒径的增加,体缩率与粒径呈非线性关系。温度相同时, $d = 0.43\text{ mm}$ 的体缩率最小, $T = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $T = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,体缩率分别为14.96%和17.00%。

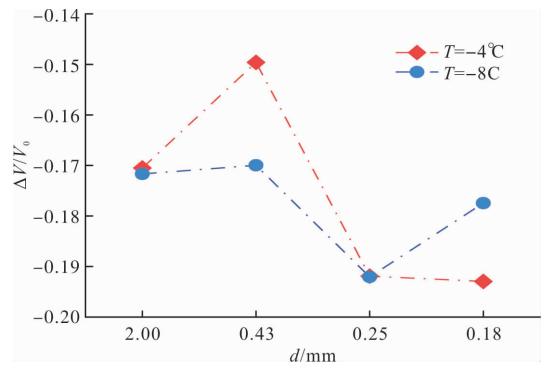


图9 不同橡胶粒径下试样体积变形率

Fig. 9 Volume deformation rate of samples at different rubber particle sizes

不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量如图10所示。 $d = 0.43\text{ mm}$ 、 0.25 mm 、 0.18 mm 橡胶的改性效果接近,最大动剪切模量相差在10%以内。 $d = 2\text{ mm}$ 的橡胶颗粒较大,与 $d = 0.43\text{ mm}$ 的橡胶加筋膨胀土相比,最大动剪切模量相差33.5%。当温度改变时, $d = 2\text{ mm}$ 的橡胶加筋膨胀土最大动剪切模量变化值大于其余三个粒径,增加了129.4%。说明粒径较大的橡胶掺入后,橡胶加筋膨胀土的力学性能对温度变化更加敏感。

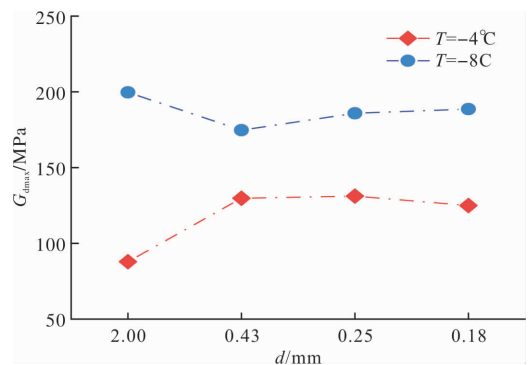


图10 不同橡胶粒径下橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量

Fig. 10 Maximum dynamic shear modulus of rubber-reinforced expansive soils at different rubber particle sizes

3.4 冻结温度对动剪切模量的影响

不同冻结温度下的动剪切模量如图11所示。

当剪应变小于0.2%时,动剪切模量急剧下降,随温度的降低,动剪切模量逐渐降低。当剪应变大于0.2%时,动剪切模量的下降的速率减缓。相同的循环剪应变条件下,动剪切模量随温度降低呈先增加后减小的趋势。冻结温度对动剪切模量的影响主要与土内未冻结水含量有关,大量研究表明^[37-39],随温度降低,土壤中的孔隙水不断冻结,未冻水含量减少,土壤中含冰量增加,冰胶结的土粒数量增多,冰胶结作用增强^[40]。因此,随着温度的降低,动剪切模量逐渐增加。

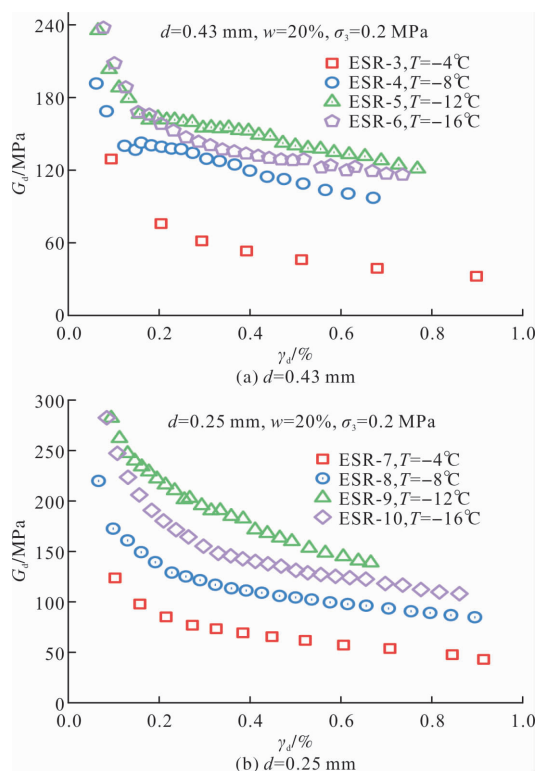


图11 不同冻结温度下橡胶加筋膨胀土的动剪切模量
Fig. 11 Dynamic shear modulus of rubber-reinforced expansive soils at different freezing temperatures

图12显示了不同冻结温度下橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量。最大动剪切模量随着冻结温度的降低呈先增加后减小的趋势。冻结温度从 -4°C 降到 -12°C 时,橡胶粒径为0.43 mm的橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量从128.98 MPa增加到217.56 MPa,橡胶粒径为0.25 mm的橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量从131.48 MPa增加到292.53 MPa,分别增加了68%、122%。温度从 -12°C ~ -16°C 的过程,橡胶粒径为0.43 mm和0.25 mm的橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量分别降低了5%和11%。

由表4可知,单向冻结下,当位置1处温度为 -4°C 时,位置4处仅 -1°C 左右。此时试样处于

快速冻结阶段,孔隙冰的形成主要来源于土中自由水以及毛细水,土粒和橡胶颗粒周围未冻水膜较厚,孔隙冰对土颗粒胶结作用较弱。温度从 -4°C 降到 -12°C 时,土样整体温度较为均匀,进入稳定冻结阶段。在围压的作用下,土粒表面结合水进行冻结,土粒、橡胶粒、冰晶三者之间的接触更加充分,试样此阶段试样内部凝聚力显著提高^[40],从而最大动剪切模量显著提高。当温度继续降低时,未冻水膜不断变薄,最大动剪切模量出现下降的现象。在 -12°C 和 -16°C 之间存在一个温度点,在此温度时,土粒、橡胶粒、冰晶、未冻水膜四者之间的接触最充分,摩擦力和咬合力最大,冰胶结作用最强。当超过此温度后,胶结作用减弱,最大动剪切模量降低。

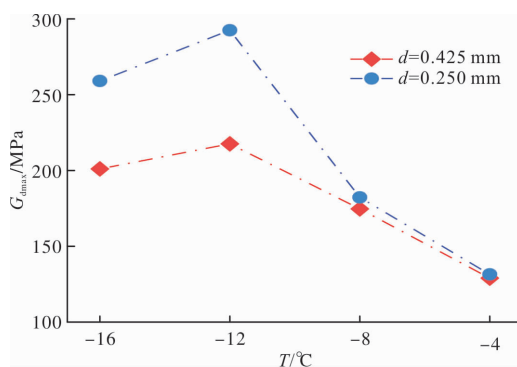


图12 不同冻结温度下橡胶加筋膨胀土最大动剪切模量
Fig. 12 Maximum dynamic shear modulus of rubber-reinforced expansive soils at different freezing temperatures

试验结束后部分试样状态如图13所示,越靠近试样顶端,土样收缩变形越小。这是因为单向冻结过程中,试样内部水分由温度较高的下端向温度较低的上端迁移,未冻区含水量减小,冻结区的水分增加^[41]。

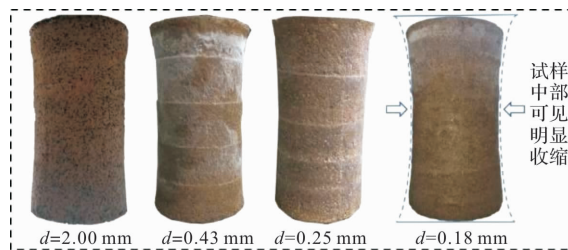


图13 试验结束后试样状态

Fig. 13 Samples status at the end of the test

图14显示了不同冻结温度下的体积变形率(膨胀为正,收缩为负)。如图14所示,在有压冻结条件下,试样的体积变形率均为负值,说明试样发生体积收缩,且温度越低,试样体积收缩率越高。这是因为有压单向冻结下,土样含冰量增加引起

黏聚力增加,体缩率增大,这与围压的作用引起的体缩率具有相似性^[42]。随着体积收缩率的增大,土样密实程度增加,动剪切模量相应增大,图14中,温度从 $-12 \sim -16\text{ }^{\circ}\text{C}$,橡胶粒径为 0.25 mm 的橡胶加筋膨胀土的体积收缩率较大,由 19.4% 增加到 21.6% ,增加了 2.2% ,而橡胶粒径为 0.43 mm 的橡胶加筋膨胀土体积收缩率由 16.5% 增加到 17.3% ,增加了 0.8% 。相应的,在此温度阶段,橡胶粒径为 0.25 mm 的橡胶加筋膨胀土最大动剪切模量下降的也较多,说明体积收缩率的变化在一定程度上反映了最大动剪切模量的变化。体积收缩时,土样密实程度增加,颗粒间接触更加充分,当温度从 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时孔隙冰体积增大,在围压的作用下,体积继续收缩,颗粒间可能发生错位滑动,导致胶结作用减弱,从而最大动剪切模量降低。

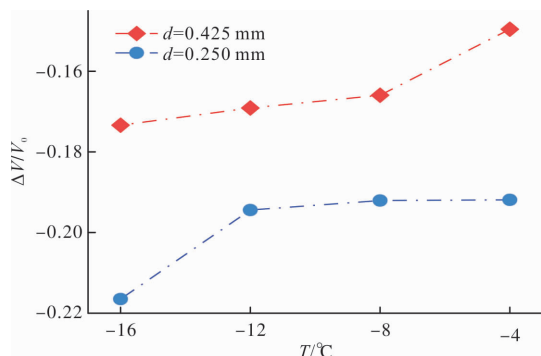


图14 不同冻结温度下的试样体积变形率

Fig. 14 Volume deformation rate of samples at different freezing temperatures

4 结论

本文对不同橡胶粒径改性的橡胶加筋膨胀土进行了有压冻结状态下的动三轴试验,得到了不同冻结温度下的骨干曲线、动剪切模量,研究了有压冻结条件下,橡胶粒径和冻结温度对橡胶加筋膨胀土动力特性的影响,其结论如下:

(1)有压冻结条件下,随着温度的降低,动剪切模量先增大后减小,在 $T=-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时动剪切模量最大;

(2)随着橡胶粒径的减小,动剪切模量并不呈现单调变化。 $d=2\text{ mm}$ 的橡胶改性效果较为显著,其余三个粒径的橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量接近,相差在 10% 以内;

(3)在初始冻结阶段($T=-4\text{ }^{\circ}\text{C}$),试样循环剪应变范围达到 4% , $d=0.25\text{ mm}$ 时,橡胶改性效果最好。进入稳定冻结阶段($T \leq -8\text{ }^{\circ}\text{C}$),试

样循环剪应变范围为 0.8% , $d=2\text{ mm}$ 时,橡胶改性效果最好;

(4)有压冻结条件下,试样的变形为收缩变形,在相同的围压下,体积收缩率随温度降低而增加。

参考文献 References

- [1] 晁夫奎. 我国废旧轮胎资源化技术应用现状及研究方向[C]//中国环境科学学会2021年科学技术年会,北京:中国环境科学出版社,2021.
CHAO Fukui. Application status and research direction of waste tire recycling technology in China[C]// Meeting of the Chinese Society for Environmental Sciences, Beijing: China Environment Publishing Group, 2021.
- [2] MUCSI G, SZENCZI A, NAGY S. 2-Fiber reinforced geopolymers from synergetic utilization of fly ash and waste tire[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178: 429-440.
- [3] BADAGÜL K, KALKAN E M, DENİZ V. End of life tyre management: Turkey case[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, 19(1): 577-584.
- [4] RUWONA W, DANHA G, MUZENDA E. A Review on material and energy recovery from waste tyres[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 35: 216-222.
- [5] YANG N Z, ZHANG Q, SHI W, et al. Advances in properties of rubber reinforced soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 6629757.
- [6] THOMAS S B, GUPTA C R. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 86-92.
- [7] ABBASPOUR M, AFLAKI E, NEJAD M F. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 1059-1071.
- [8] XU F Y, ZHANG R H. Design of soilbag-protected slopes in expansive soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 1036-1045.
- [9] 时伟, 张亮, 杨忠年, 等. 冻融循环条件下膨胀土力学特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 480-485.
SHI Wei, ZHANG Liang, YANG Zhongnian, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil of artificial preparation under freeze-thaw cycle conditions[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 480-485.
- [10] 崔郁雪, 杨忠年, 时伟, 等. 冻融循环下非饱和膨胀土一维土柱模型试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 393-403.

- CUI Yuxue, YANG Zhongnian, SHI Wei, et al. Experimental study on one dimensional soil column model of unsaturated expansive soil under freeze-thaw cycles [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 393-403.
- [11] 张莹莹, 杨忠年, 时伟, 等. 冻融循环作用下膨胀土边坡稳定性模型试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(2): 257-266.
- ZHANG Yingying, YANG Zhongnian, SHI Wei, et al. Model test study on the stability of expansive soil slope under freeze-thaw cycle [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(2): 257-266.
- [12] NARANI S S, ABBASPOUR M, HOSSEINI S, et al. Sustainable reuse of waste tire textile fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119151.
- [13] 袁超, 周峙, 张家铭, 等. 环氧树脂-玻璃纤维对水泥改性膨胀土的加固机理试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(8): 709-716, 724.
- YUAN Chao, ZHOU Zhi, ZHANG Jiaming, et al. Experimental study on strengthening mechanism of adding epoxy resin and glass fiber to cement modified expansive soil [J]. Journal of Wuhan University (Engineering), 2021, 54(8): 709-716, 724.
- [14] 费少刚, 王保田, 单熠博, 等. 硅灰、水泥复合改良膨胀土试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 190-193.
- FEI Shaogang, WANG Baotian, SHAN Yibo, et al. Experimental study on composite improvement of expansive soil with silica fume and cement [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(9): 190-193.
- [15] 余梦, 张家铭, 周杨, 等. MICP 技术改性膨胀土试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 103-108, 122.
- YU Meng, ZHANG Jiaming, ZHOU Yang, et al. Experimental study on modifying expansive soil by MICP technology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(5): 103-108, 122.
- [16] 韦晨. NaCl 溶液对改性陕南膨胀土强度变形特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- WEI Chen. Research on the strength and deformation characteristics of modified expansive soil in Southern Shaanxi by NaCl solution [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.
- [17] SABERIAN M, LI J, NGUYEN B, et al. Permanent deformation behaviour of pavement base and subbase containing recycle concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber [J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 51-58.
- [18] CHEGENIZADEH A, KERAMATIKERMAN M, SANTA G Dalla, et al. Influence of recycled tyre amendment on the mechanical behaviour of soil-bentonite cut-off walls [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 507-515.
- [19] DJADOUNI H, TROUZINE H, CORREIA A Gomes, et al. 2D numerical analysis of a cantilever retaining wall backfilled with sand-tire chips mixtures [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 25(6): 1119-1135.
- [20] LIU L, CAI G, LIU S. Compression properties and micro-mechanisms of rubber sand particle mixtures considering grain breakage [J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 1061-1072.
- [21] TASALLOTI A, CHIARO G, MURALI A, et al. Recycling of end-of-life tires (ELTs) for sustainable geotechnical applications: A New Zealand perspective [J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 7824.
- [22] SABERIAN KHOTBEHSARA M Mehrinejad, JAH-ANDARI S, et al. Experimental and phenomenological study of the effects of adding shredded tire chips on geotechnical properties of peat [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 12(4): 347-356.
- [23] AKBARIMEHR D, ESLAMI A, AFLAKI E. Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271: 122632.
- [24] DUNHAM-FRIEL J, CARRARO H J A. Effects of compaction effort, inclusion stiffness, and rubber size on the shear strength and stiffness of expansive soil-rubber (ESR) mixtures [C] // Proceedings of the Geotecnology Congress. Atlanta: ASCE, 2014.
- [25] 路钊驰, 杨忠年, 刘继明, 等. 冻结橡胶加筋膨胀土 (ESR) 的动力特性研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1312-1319.
- LU Zhaochi, YANG Zhongnian, LIU Jiming, et al. Low-temperature dynamic triaxial testing of frozen expansive soil-rubber (ESR) mixtures [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1312-1319.
- [26] 关辉, 王大雁, 顾同欣, 等. 高压条件下土的冻融试验装置研制及应用 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1496-1501.
- GUAN Hui, WANG Dayan, GU Tongxin, et al. Development and application of a new soil freezing-thawing test apparatus for high loading conditions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1496-1501.

- 1496-1501.
- [27] AKBARIMEHR D, FAKHARIAN K. Dynamic shear modulus and damping ratio of clay mixed with waste rubber using cyclic triaxial apparatus[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 140: 106435.
- [28] YANG N Z, LU C Z, SHI W, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the dynamic parameters of modified Na^+ -bentonite by different cations[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(8): 313.
- [29] CUI H G, CHENG Z, ZHANG L D, et al. Effect of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of undisturbed silty clay[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(9): 3831-3846.
- [30] LI Y Y, LI P, ZHU S. The study on dynamic shear modulus and damping ratio of marine soils based on dynamic triaxial test [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022, 40(4): 473-486.
- [31] 周恩全, 宗之鑫, 王琼, 等. 橡胶-粉土轻质混合土中管道动力响应特性[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1388-1395.
- ZHOU Enquan, ZONG Zhixin, WANG Qiong, et al. Dynamic characteristics of pipe buried in rubber-silt lightweight mixtures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1388-1395.
- [32] LING Z X, ZHANG F, LI L Q, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of frozen compacted sand subjected to freeze-thaw cycle under multi-stage cyclic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 76: 111-121.
- [33] LAI J Z, D ZHAO X, TANG R, et al. Electrical conductivity-based estimation of unfrozen water content in saturated saline frozen sand[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 8881304.
- [34] WU Zhijian, DAN Zhang, TAO Zhao, et al. An experimental research on damping ratio and dynamic shear modulus ratio of frozen silty clay of the Qinghai-Tibet engineering corridor[J]. *Transportation Geotechnics*, 2019, 21: 100269.
- [35] 李博, 黄茂松. 掺有橡胶粉末砂土液化特性的动三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(5): 1343-1349.
- LI Bo, HUANG Maosong. Dynamic triaxial tests on liquefaction characteristics of rubber-sand mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1343-1349.
- [36] 徐小东, 鲁洋, 毛航宇, 等. 废旧轮胎颗粒-砂混合物的水平循环剪切特性试验研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(4): 62-66.
- XU Xiaodong, LU Yang, MAO Hangyu, et al. Experimental research on horizontal cyclic shear behavior of scrap tire particles-sand mixtures [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering)*, 2015, 36(4): 62-66.
- [37] MA B, TENG D J, LI C H, et al. A new strength criterion for frozen soil considering pore ice content [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(7): 04022107.
- [38] WANG H, WU K WANG Y, M, et al. Influence of fines content and degree of saturation on the freezing deformation characteristics of unsaturated soils [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 201: 103610.
- [39] PARK S, HWANG C, CHOI H, et al. Experimental study for application of the punch shear test to estimate adfreezing strength of frozen soil-structure interface[J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2022, 29(3): 281-290.
- [40] 晏长根, 王婷, 贾海梁, 等. 冻融过程中未冻水含量对非饱和粉土抗剪强度的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(6): 1252-1260.
- YAN Changgen, WANG Ting, JIA Hailiang, et al. Influence of the unfrozen water content on the shear strength of unsaturated silt during freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(6): 1252-1260.
- [41] 雷华阳, 张文振, 冯双喜, 等. 水汽补给下砂土水分迁移规律及冻胀特性研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(1): 1-14.
- LEI Huayang, ZHANG Wenzhen, FENG Shuangxi, et al. On water migration and frost heaving characteristics of sand under water vapor recharge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 1-14.
- [42] 刘振亚, 刘建坤, 李旭, 等. 毛细黏聚与冰胶结作用对非饱和粉质黏土冻结强度及变形特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1551-1559.
- LIU Zhenya, LIU Jiankun, LI Xu, et al. Effect of capillary cohesion and ice cementation on strength and deformation of unsaturated frozen silty clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1551-1559.

(编辑 吴海西)