

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022112324021977

文章编号:1674-599X(2024)01-0045-07

引用格式:赵正峰,王国栋,王笑风,等.掺加黏土的固废基泡沫轻质土强度和耐久性研究[J].交通科学与工程,2024,40(1):45-51,59.

Citation: ZHAO Zhengfeng, WANG Guodong, WANG Xiaofeng, et al. Preparation and properties of solid waste foam lightweight soil containing clay[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 45-51, 59.

掺加黏土的固废基泡沫轻质土强度和耐久性研究

赵正峰¹, 王国栋², 王笑风³, 苏利钢⁴, 杨博³, 刘建飞³, 赵亚婷³

(1. 洛阳市交通事业发展中心洛界高速公路管理处, 河南 洛阳 471000;

2. 河南路星工程管理有限公司, 河南 洛阳 471000;

3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000;

4. 洛阳市交通事业发展中心, 河南 洛阳 471000)

摘 要:为减小工程造价和环境污染等问题,采用电石渣、石膏和矿渣固废全部替代水泥制备了泡沫轻质土,研究黏土掺量对固废泡沫轻质土耐久性的影响。研究表明:当黏土掺量由0%提高到45%时,试样7 d的抗压强度由2.16 MPa降至0.58 MPa,28 d劈裂抗拉强度由0.73 MPa降至0.18 MPa;干湿循环10次后,当黏土掺量分别为0%、25%和35%时,试样抗压强度分别为2.06、1.28和0.62 MPa;当黏土掺量为45%时,冻融循环10次后的试样被完全破坏。养护前7 d,所有试样收缩应变增幅较大,应变范围为 $1.523 \times 10^{-6} \sim 1.932 \times 10^{-6}$ 。黏土掺量为25%~35%时,相较于黏土掺量为45%的泡沫轻质土收缩性的改善更明显。该研究建议泡沫轻质土作为路床填料时,黏土掺量小于25%,路堤填料黏土掺量小于35%。

关键词:泡沫轻质土;黏土;工业固废;力学性能;耐久性

中图分类号:TU501

文献标志码:A

Preparation and properties of solid waste foam lightweight soil containing clay

ZHAO Zhengfeng¹, WANG Guodong², WANG Xiaofeng³, SU Ligang⁴, YANG Bo³,
LIU Jianfei³, ZHAO Yating³

(1. Luojie Expressway Management Office of Luoyang Transportation Development Center, Luoyang 471000, China;

2. Henan Luxing Engineering Management Co., Ltd., Luoyang 471000, China;

3. Henan Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

4. Luoyang Transportation Development Center, Luoyang 471000, China)

Abstract: To reduce the project cost and alleviate the environmental pollution problems, the foam lightweight soil was prepared by replacing cement with calcium carbide slag, gypsum and slag solid waste in this study, and the influences of clay content on durability of solid waste foam lightweight soil were investigated. The results show that when the clay content increased from 0 to 45%, the compressive strength of samples at 7 d varied from 2.16 to 0.58 MPa, and the 28 d splitting tensile strength decreased from 0.73 MPa to 0.18 MPa. After 10 of wetting-drying cycles, When the clay content was 0%, 25% and 35%, the compressive strengths of the specimens were 2.06, 1.28 and 0.62 MPa respectively. At a clay content of 45%, the samples were completely destroyed after 10 freeze-thaw cycles. In addition, the shrinkage strain of all samples increased rapidly at 7 d before

收稿日期:2022-11-23

作者简介:赵正峰(1977—),男,洛阳市交通事业发展中心洛界高速公路管理处高级工程师。E-mail:1320222179@qq.com

curing The strain range was from $1\,523 \times 10^{-6}$ to $1\,932 \times 10^{-6}$. The improvement in shrinkage is more evident at a clay content of 25% ~ 35% than at a clay content of 45% of the foamed lightweight soil. It is recommended that the clay content of foamed lightweight soil used as a fill for a road bed should be less than 25% and that of a fill for an embankment should be less than 35%.

Key words: foam lightweight soil; clay; industrial solid waste; durability properties

泡沫轻质土因可解决拓宽路基时减小地基附加应力以及沉降、裂缝等病害^[1-3],故在道路工程中被广泛利用。但现有泡沫轻质土中水泥掺量较高,而且水泥生产不仅消耗资源,还排放大量温室气体,造成环境污染^[4-5]。传统泡沫轻质土的弊端也日益凸显,亟须一种既经济环保且高强度的新型泡沫轻质土。

SUKSIRIPATTANAPONG等^[6]通过碱激发污泥和粉煤灰制备了泡沫轻质土,发现:当碱激发材料的用量达到混合材料的液限时,轻质土的力学性能最优。NERAMITKORBURI等^[7]研究了粉煤灰轻质土的水稳定性,发现:粉煤灰掺量大于40%时,其水稳性明显提高,并且黏土的胀缩是干湿循环强度降低的主要原因。陈金威等^[8]用工业固废替代水泥进行试验发现:矿渣和粉煤灰可提高泡沫轻质土的力学性能,但过多掺入也会降低其抗剪强度,并且掺加矿渣和粉煤灰的试样性能优于掺加矿渣和偏高岭土试样。NAMBIAR等^[9]研究了粉煤灰替代水泥的泡沫轻质土的物理力学性能,建立了试样孔隙和抗压强度的关系模型,得到了密度和强度间的关系曲线。乔欢欢等^[10]研究了掺加硅灰的泡沫轻质土,研究结果表明:硅灰的掺入明显提高了材料的

强度,但因吸水率过高,导致抗冻性能下降。HILAL等^[11]采用硅灰和粉煤灰替代水泥的泡沫轻质土,发现其流动性和强度均优于传统泡沫轻质土。陈婷婷^[12]研究了纤维体积用量和宏观尺度对泡沫轻质土力学性能的影响,研究结果表明纤维掺量为0.4%、长度为6 mm时,力学性能最佳。这些研究主要集中在掺入粉煤灰和矿渣等固废泡沫轻质土的力学性能,但对以电石渣和脱硫石膏等固废为原料,在干湿与冻融循环下泡沫轻质土的耐久性的研究相对较少。因此,作者拟以电石渣、脱硫石膏和矿渣作为矿物掺合料,并以复合河南广泛分布的粉质黏土来制备泡沫轻质土,研究其力学性能的变化规律,以期对类似固废材料在泡沫轻质土中的应用提供借鉴和指导。

1 试验原材料及方案设计

1.1 工业固废材料

选用来自河南舞钢加工厂生产的高炉粒化矿渣、电石渣和脱硫石膏,将其作为胶凝材料,其化学成分见表1。固废材料的物理性能参数见表2。

表1 工业固废化学组成

Table 1 Chemical composition of industrial solid waste

化学组成	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(SO ₃)	w(MgO)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)	w(MnO)	其他
矿渣/ %	39.46	31.17	15.01	0.28	2.59	8.91	0.28	0.46	0.39	1.45
电石渣/ %	70.86	6.02	3.24	0.39	0.75	0.36	0.10	0.42	—	17.86
脱硫石膏/ %	90.23	1.19	0.26	0.51	0.87	0.21	0.36	—	—	6.37

表2 固废材料的物性参数

Table 2 Physical parameters of solid waste materials

固废种类	相对密度	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	中位径(<i>d</i> ₅₀)/μm
电石渣	2.353	199.3	33.4
脱硫石膏	2.364	195.6	38.9
矿渣	2.914	419.6	8.9

1.2 黏土

试验中,低液限粉质黏土选自河南省上罗高速公路沿线,其物理性质见表3。另外,通过破碎、粉磨等工艺筛选出颗粒粒径均小于0.075 mm的细粒土作为试验用土。

表3 试验用土物理性质

Table 3 Physical properties of testing soil

项目	液限 ω_L / %	塑限 ω_P / %	塑性指数 I_p	土粒比重
低液限黏土	30	19	11	2.73

1.3 发泡剂

发泡剂采用来自河南华泰材料公司生产的复

合发泡剂,发泡率为30倍,消泡率为7%。

1.4 配合比设计

试验设计目标密度为 800 kg/m^3 ,流动度为 $180 \pm 20 \text{ mm}$,配合比见表4。其中,以矿渣:电石渣:石膏的比例为7:1:2作为复合固废胶凝材料,以干土质量/(干土+复合固废胶凝材料总质量)为0%、25%、35%、45%共4组配比。

表4 泡沫轻质土配合比

Table 4 Mix ratio of foam lightweight soil

编号	土质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	矿渣质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	电石渣质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石膏质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	土/(土+复合固废材 料)的质量比/ %	水质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泡沫掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
S0	0	373	53	107	0	266	561
S25	133	280	40	80	25	260	561
S35	187	243	35	70	35	258	561
S45	240	205	29	58	45	256	561

1.5 试验方案

1) 制备过程中,使用水泥搅拌机将矿渣、电石渣、石膏和细粒土低速搅拌3 min;再将发泡剂与水以1:49比例混合加入发泡压力为0.4 MPa的发泡机中,压缩出的泡沫加入浆体中,并低速搅拌3 min,测试湿密度和流动度;然后达到目标设定值后,将泡沫轻质土倒入模具(100 mm×100 mm×100 mm)中成型,并以保鲜膜封存,24 h脱模后套带在标准养护室养护,直至设计龄期进行测试。

2) 力学性能测试。采用100 mm×100 mm×100 mm泡沫轻质土立方体,参照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020),使用万能试验机分别对养护3、7和28 d的泡沫轻质土立方体以 $2.0 \pm 0.5 \text{ kN/s}$ 加载速率进行无侧限抗压强度测试;劈裂抗拉强度测试以 $0.20 \pm 0.05 \text{ kN/s}$ 加载速率,对养护28 d的试件进行测试。取三块平行试样强度的平均值作为力学性能测试结果。

3) 耐久性方面。参照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020),分别对泡沫轻质土进行干湿、冻融试验和干缩试验。干湿试验以养护28 d试样先在60 °C内烘箱放置48 h,再在20 °C水中浸泡24 h,以此作为一次循环,测试2、4、6、8和10次循环前、后试样质量损失率及其无侧限抗压强度。冻融试验把养护28 d试样先放置在-15 °C低温箱中8 h,

再放入20 °C恒温恒湿箱中6 h,以此作为一次循环;测试2、4、6、8和10次循环前、后试样质量损失率及其无侧限抗压强度。干湿试验是先把脱模后的试样在20 °C水中浸水72 h,然后在两端埋入应变片,测定不同龄期下的应变。同样地,测试结果是三块平行试样的平均值。

2 力学性能

2.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度作为公路路基设计过程中的重要关键技术指标,直接决定了材料能否填筑。不同养护龄期下固废泡沫轻质土的无侧限抗压强度如图1所示。从图1可以看出,固废泡沫轻质土的无侧限抗压强度随养护龄期的延长而增大,随黏土掺量的增加而降低。整体来看,从养护3~7 d的泡沫轻质土抗压强度增长幅度明显低于养护7~28 d试样,这是因为固废胶凝材料早期水化活性较低。即使有电石渣和石膏的掺入,因为它们在水化早期对矿渣的激发效果微弱,随着养护龄期的延长,电石渣中的 OH^- 逐渐溶出,加快了矿渣玻璃相的溶解,加快了C-H和C-S-H凝胶的生成。同时,石膏提供的 SO_4^{2-} 促进了钙矾石的形成,宏观上试样表现出抗压强度的增长^[13]。另外,随黏土掺量的增加,

泡沫轻质土的抗压强度降幅增加。这主要是黏土中富含 SiO_2 等活性矿物组分,适当掺入能促进其与固废发生的火山灰反应,促进凝胶产物的生成^[14]。然而,当黏土掺量增大时,因黏土本身胶凝活性远低于固废,故抗压强度随黏土掺量的增大而减小。

根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)要求,高速公路路床填筑泡沫轻质土的抗压强度需 ≥ 1 MPa,用于路堤填筑泡沫轻质土的抗压强度需 ≥ 0.6 MPa,如图1所示。从图1还可以看出,当黏土掺量为0%时,泡沫轻质土的7、28 d抗压强度分别为2.16、2.90 MPa;黏土掺量为35%时,7、28 d抗压强度分别为1.15、1.59 MPa,均高于路床设计要求。当黏土掺量增加到45%时,7 d抗压强度为0.58 MPa,低于路堤填筑要求;28 d抗压强度为1.02 MPa,满足路床填筑要求。综合考虑,建议固废泡沫轻质土中黏土掺量不超过35%。

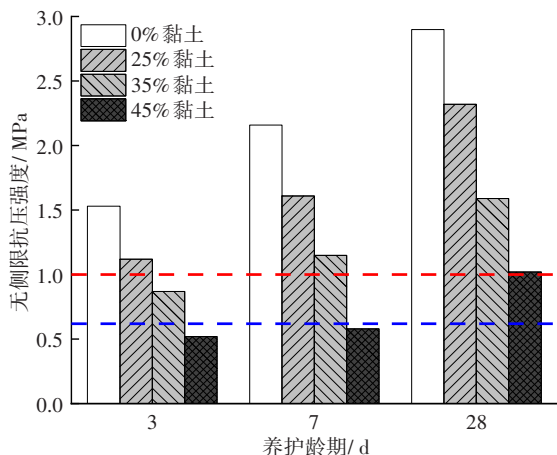


图1 不同养护龄期下不同黏土掺量的泡沫轻质土的无侧限抗压强度

Fig. 1 Unconfined compressive strength of foam lightweight soil with different clay contents at different curing ages

2.2 劈裂抗拉强度

劈裂抗拉强度可反映材料内部的弯拉破坏程度。养护28 d的泡沫轻质土的劈裂抗拉强度如图2所示。从图2可以看出,随着黏土掺量的增加,泡沫轻质土的劈裂抗拉强度逐渐降低。当黏土掺量从0%增加到45%时,劈裂抗拉强度由0.73 MPa骤减至0.18 MPa。黏土掺量从0%增加到10%时,劈裂抗拉强度下降26.0%;而黏土掺量从25%增加到35%和35%增加到45%时,分别下降27.8%和53.8%。这表明黏土掺量在10%~35%范围内时,劈裂抗拉强度受黏土掺量的影响较小;当继续增大

黏土的掺量,黏土阻碍了泡沫轻质土之间的水化反应,宏观上表现出抗拉强度的大幅降低。另外,对28 d试样抗压和抗拉强度也进行了拟合,如图3所示。从图3可以看出,两者之间存在较强的相关性,抗压强度变化趋势与抗拉强度变化趋势相一致。在本研究中,推荐28 d抗拉强度与抗压强度关系为:

$$y = 0.34014 + 3.51599x, R^2 = 0.9884 \quad (1)$$

式中: y 和 x 分别为养护28 d时试样的抗压强度和抗拉强度,MPa。

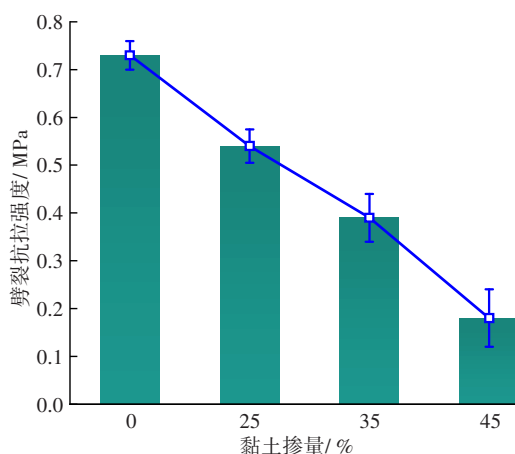


图2 养护28 d时泡沫轻质土的劈裂抗拉强度

Fig. 2 Splitting tensile strength of light foam soil at 28 d

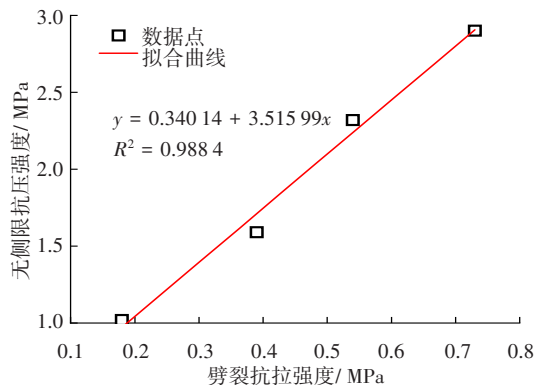


图3 劈裂抗拉强度与无侧限抗压强度关系

Fig. 3 Relationship between splitting tensile strength and unconfined compressive strength

3 耐久性

3.1 干湿循环

图4~5分别为养护28 d的泡沫轻质土在多次

干湿循环后的无侧限抗压强度和干质量损失率。从图4可以看出,随干湿循环次数增加,泡沫轻质土的无侧限抗压强度逐渐降低。在干湿循环初期,抗压强度有小幅下降,之后大幅下降(尤其第4次干湿循环后)。泡沫轻质土在干湿循环6、8和10次后,抗压强度分别较上次循环降低5.36%~34.88%、9.31%~57.14%和8.03%~41.89%。另外,在干湿循环10次后,45%黏土掺量的泡沫轻质土抗压强度极低,约0.12 MPa,早已不能满足路基填筑要求。而黏土掺量为0%、15%和35%的试样抗压强度结果分别为2.06、1.28和0.62 MPa,仍满足路堤填筑要求。

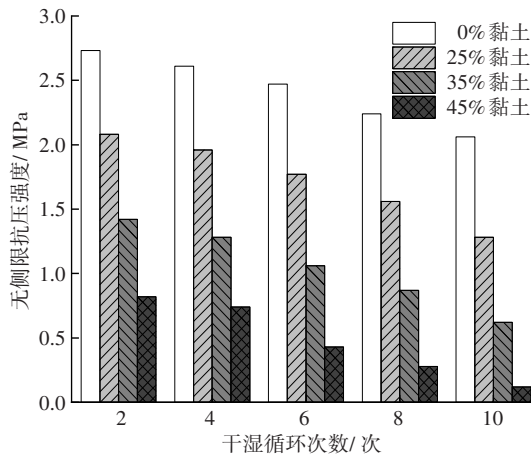


图4 不同干湿循环次数下无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strength under wetting-drying cycles

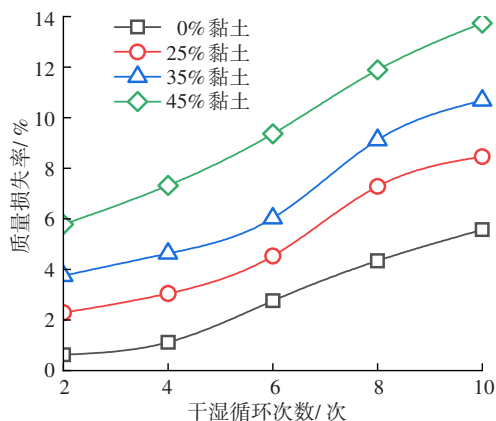


图5 不同干湿循环次数下干质量损失率

Fig. 5 Dry mass loss rate under different wetting-drying cycles

从图5可以看出,在4~8次干湿循环中,质量损失率增幅最大;随着干湿循环次数增加,试样质量损失率增幅相对变缓;这与无侧限抗压强度变

化的趋势相一致。同样,黏土掺量为0%的试样在不同干湿循环次数下质量损失率最小,黏土掺量为45%的试样质量损失率最大。当黏土掺量从35%增加到45%时,不同干湿循环次数下试样损失质量严重,这表明:黏土掺量存在一个合理的最佳范围,黏土掺量超过35%会大幅削弱体系的水化能力。基于干湿循环试验结果,推荐路床和路堤填筑时固废泡沫轻质土中黏土掺量不超过35%。

3.2 冻融循环

区别于干湿循环,冻融循环下泡沫轻质土内部易发生水分冻胀,极易引起材料内部的破坏。图6~7分别为泡沫轻质土在冻融循环后的无侧限抗压强度和干质量损失率变化。从图6可以看出,冻融循环后泡沫轻质土的抗压强度均不断降低,且下降幅度逐渐增大;黏土掺量分别为25%、35%和45%的试样在经过6次循环后,抗压强度分别降低51.3%、52.2%和67.7%,经过冻融循环10次后,抗压强度分别降低80.6%、86.2%和100%。从图7可以看出,冻融质量损失率与抗压强度变化结果一致;与干湿破坏不同,冻融破坏下,当黏土掺量高于25%时,试样质量损失幅度逐渐增大。在经过冻融循环6次后,所有试样的质量损失率接近甚至超过5%。黏土掺量为45%的试样在经过冻融循环10次后被完全破坏,这与冻融循环破坏了轻质土的孔壁有关,冻胀过程使其内部封闭孔隙与外部开发孔隙连通,拓展了水分渗透路径,周而复始后裂缝逐渐发展为破裂面并最终导致破坏^[15]。

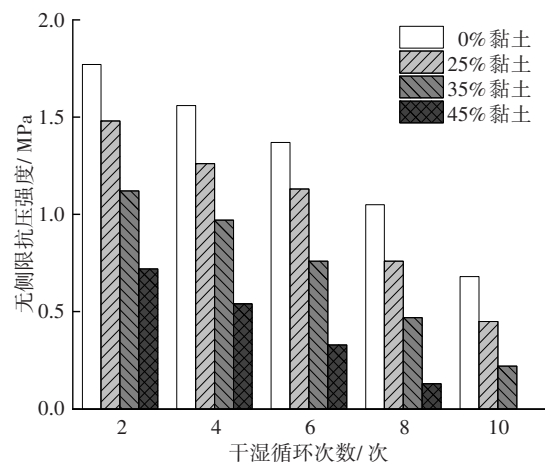


图6 不同冻融循环次数下无侧限抗压强度

Fig. 6 Unconfined compressive strength under different freezing-thawing cycles

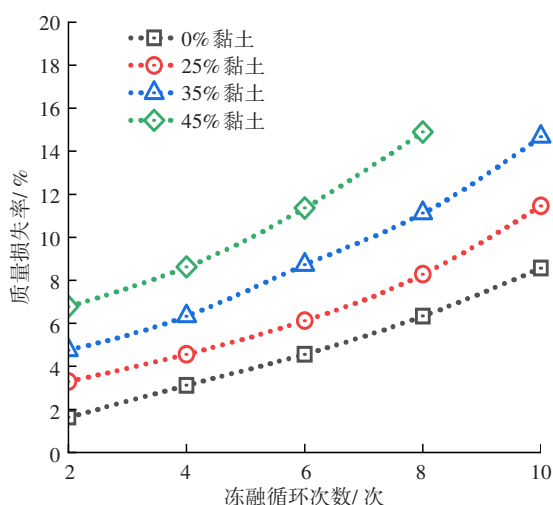


图7 不同冻融循环次数下干质量损失率

Fig. 7 Dry mass loss rate under different freezing-thawing cycles

3.3 干缩性能

干缩性能与泡沫轻质土中胶凝材料的水化过程密切相关,收缩率过大会引起路基收缩变形而导致开裂等质量问题。图8为掺入了黏土的固废泡沫轻质土收缩应变随时间的变化关系。

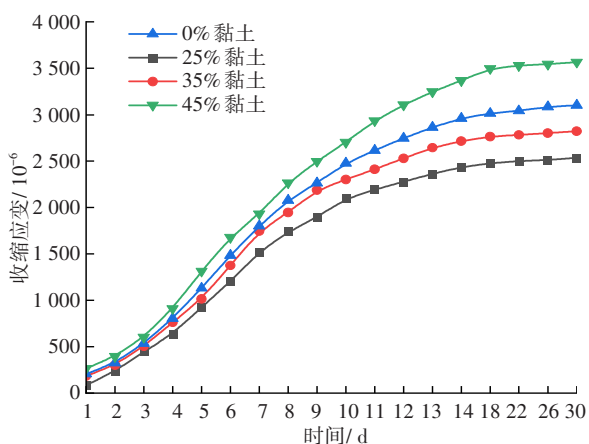


图8 收缩应变随时间的变化关系

Fig. 8 Variation of shrinkage strain with time

从图8可以看出,试样干缩应变随时间变化呈现出先快速增长,再缓慢的趋势。在7 d前,黏土掺量分别为0%、25%、35%和45%的试样收缩应变分别为 180.2×10^{-6} 、 152.3×10^{-6} 、 174.7×10^{-6} 和 193.2×10^{-6} ,此阶段水化反应剧烈且放热多,加之初期发泡剂中的水和拌和水较多,导致自由水蒸发较快而引起收缩加剧;泡沫轻质土养护14 d

时,收缩应变较7 d分别增加了64.37%、55.47%、59.95%和74.33%;泡沫轻质土养护30 d时,收缩应变较14 d分别增加了47.27%、39.40%、41.05%和59.09%,此时浆体水化反应逐渐趋于完全,且自由水基本蒸发完全,所以收缩变形明显减小。另外,黏土掺量分别为25%和35%的试样干缩应变低于黏土掺量为0%的试样的,而黏土掺量为45%的试样的干缩应高于黏土掺量为0%的试样的,这可以归因于黏土水化活性低于固废,其因水化发生的收缩量小于固废水化的收缩量,且适量的黏土还会与固废协同水化,并改善试样的密实性,但是黏土掺量过多会因其吸水量大,大量水分蒸发导致基体收缩加剧^[16]。

4 结论

1) 固废泡沫轻质土力学性能随黏土掺量的增加而降低。当黏土掺量由0%增加至45%时,28 d抗压强度与劈裂强度变化范围分别为2.90~1.02 MPa和0.73~0.18 MPa,两者之间具有良好的线性关系。建议泡沫轻质土作为路床填料时黏土掺量应小于25%,路堤填料黏土掺量应小于35%。

2) 干湿循环次数增加,泡沫轻质土抗压强度逐渐降低,质量损失率呈先增加后趋于稳定的趋势。不同于干湿循环,冻融循环对泡沫轻质土损伤破坏更为严重,受水分冻胀后引起内部破坏的,冻融次数增加后,试样抗压强度和质量损失率增加幅度明显增大。

3) 泡沫轻质土干缩应变随时间的增加呈现出先急剧增长再缓慢增长的趋势。黏土掺量为45%的试样干缩性最差,黏土掺量为25%~35%的试样干缩性优于0%黏土掺量试样的,表明:适量黏土掺量能改善泡沫轻质土的收缩性,一定程度上提高了路基的抗开裂性能。

参考文献(References):

- [1] 周云东,王勇,黎冰,等. 气泡混合轻质土试样制备研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4413-4420, 4428. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0810.
ZHOU Yundong, WANG Yong, LI Bing, et al. Study of the preparation of air-foamtreated lightweight soil samples [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4413-

- 4420, 4428. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0810.
- [2] 徐伟. 浅析旧路拓宽存在的问题及处理措施[J]. 城市道桥与防洪, 2017(12): 34-36, 59, 8. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2017.12.010.
- XU Wei. Elementary analysis on existing problems and treatment measures in widening of old road [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(12): 34-36, 59, 8. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2017.12.010.
- [3] 陈朋, 惠冰, 孟凌霄, 等. 粉煤灰基气泡轻质土配合比和抗压强度研究[J]. 公路与汽运, 2022(5): 47-49, 61. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.05.012.
- CHEN Peng, HUI Bing, MENG Lingxiao, et al. Study on mix proportion and compressive strength of flyash-based bubble lightweight soil [J]. Highways & Automotive Applications, 2022 (5): 47-49, 61. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.05.012.
- [4] 何峰, 刘峥延, 邢有凯, 等. 中国水泥行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 400-409. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.014.
- HE Feng, LIU Zhengyan, XING Youkai, et al. Co-control effect evaluation of the energy saving and emission reduction measures in Chinese cement industry [J]. Climate Change Research, 2021, 17(4): 400-409. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.014.
- [5] 郭洁, 彭晖. 矿渣-偏高岭土聚物抗压强度影响因素研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3): 33-39. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.007.
- GUO Jie, PENG Hui. Study on the influence factors of compressive strength of slag-metakaolin-based geopolymer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3): 33-39. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.007.
- [6] SUKSIRIPATTANAPONG C, HORPIBULSUK S, BOONGRASAN S, et al. Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge - fly ash lightweight cellular geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 807-816. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.091.
- [7] NERAMITKORBURI A, HORPIBULSUK S, SHEN S L, et al. Engineering properties of lightweight cellular cemented clay - fly ash material [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(2): 471-483. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.02.020.
- [8] 陈金威, 刘勇, 石苏意, 等. 不同掺料泡沫轻质土的强度特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(4): 15-22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.04.003.
- CHEN Jinwei, LIU Yong, SHI Suyi, et al. Strength characteristics of foam lightweight soil with different admixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(4): 15-22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.04.003.
- [9] KUNHANANDAN NAMBIAR E K, RAMAMURTHY K. Influence of filler type on the properties of foam concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28 (5): 475-480. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001.
- [10] 乔欢欢, 卢忠远, 严云, 等. 掺合料粉体种类对泡沫混凝土性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2008, 14(6): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2008.06.010.
- QIAO Huanhuan, LU Zhongyuan, YAN Yun, et al. Influence of filler type on properties of foamed concrete [J]. China Powder Science and Technology, 2008, 14(6): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2008.06.010.
- [11] HILAL A A, THOM N H, DAWSON A R. The use of additives to enhance properties of pre-formed foamed concrete [J]. International Journal of Engineering and Technology, 2015, 7(4): 286-293. DOI: 10.7763/ijet.2015.v7.806.
- [12] 陈婷婷. 纤维增强泡沫轻质混凝土基床表层结构的力学性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- CHEN Tingting. Material properties analysis of the surface layer of subgrade filled with fiber reinforced foamed light wight concrete [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [13] 高英力, 孟浩, 冷政, 等. 电石渣-脱硫石膏复合激发充填材料性能及微观结构[J]. 土木与环境工程学报(中英文): 2023, 45(3): 99-106.
- GAO Yingli, MENG Hao, LENG Zheng, et al. Properties and microstructure of calcium carbide slag-desulfurized gypsum composite activated filling materials [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese & English): 2023, 45(3): 99-106.
- [14] ARGIN G, UZAL B. Enhancement of pozzolanic activity of calcined clays by limestone powder addition [J]. Construction and Building Materials, 2021, 284:

- steel box girder cable-stayed bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2019 (4): 101-103, 107. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.04.024.
- [20] 曹旭, 陈香杰. 横隔梁对多箱室宽箱梁抗扭影响研究 [J]. 公路, 2017, 62(1): 96-100.
CAO Xu, CHEN Xiangjie. Study on the influence of transverse diaphragm beam on torsion resistance of multi-box wide box girder [J]. Highway, 2017, 62(1): 96-100.
- [21] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xinmin. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [22] 胡玉茹, 刘亮, 张元海. 斜腹板箱形截面的扭转几何特性 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(7): 2558-2563.
HU Yuru, LIU Liang, ZHANG Yuanhai. Torsional geometrical properties of box section with inclined webs [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7): 2558-2563.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:陈璐)

(上接第51页)

122789. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122789.
- [15] 姚运仕, 王嘉. 盐渍土对泡沫轻质土强度及耐久性的影响 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 33-41. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.03.004.
YAO Yunshi, WANG Jia. Effects of strength and durability of salted soil to foam lightweight soil [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(3): 33-41. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.03.004.
- [16] KANG S H, KWON Y H, MOON J. Influence of calcination temperature of impure kaolinitic clay on hydration and strength development of ultra-high-performance cementitious composite [J]. Construction and Building Materials, 2022, 326: 126920. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126920.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:郭一鹏)