

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.

YAO Yun-shi, 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

盐渍土对泡沫轻质土强度及耐久性的影响

姚运仕,王 嘉

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为了扩展泡沫轻质土材料在山西地区碱化软土路基上的应用,以泡沫轻质土为基础材料,研究砂粉、盐渍土、粉煤灰等掺和料对其抗压强度的影响,并对不同容重的泡沫轻质土试样进行了耐久性分析。结果表明:几种掺和料在单独添加时,泡沫轻质土的抗压强度均出现明显的下降趋势;将粉煤灰与盐渍土进行复配加入泡沫轻质土时,盐渍土会对粉煤灰产生一定的碱激活效应,盐渍土与粉煤灰的质量比为 10% 时,泡沫轻质土的 56 d 抗压强度最高,在容重为 700 kg/m³ 时,抗压强度达到 0.72 MPa;通过复配作用,掺和料在轻质土中的掺入比例可显著提高;当泡沫轻质土容重为 800 kg/m³,且复配掺和料质量占胶凝材料质量比为 40% 时,轻质土基体具有较好的使用稳定性;泡沫轻质土材料可提高掺和料以及施工区域盐渍土使用比例的同时,还可优化材料性能且应用效果良好。该研究为盐渍土/粉煤灰在泡沫轻质土中的应用提供了一定的理论依据。

关键词:道路工程;泡沫轻质土;软土路基;盐渍土;耐久性

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2021)03-0033-09

Effects of strength and durability of salted soil to foam lightweight soil

YAO Yun-shi, WANG Jia

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to expand the application of foamed lightweight soil materials on the alkalinized soft soil roadbed in Shanxi, the foamed lightweight soil as the basic material was used, and the effects of sand powder, saline soil, and fly ash on the compressive strength of foam lightweight were discussed. The durability of foam light soil samples with different bulk density was also analyzed. The results show that the compressive strength of the foamed light soil has a significant downward trend when the admixtures are added separately, after compound the fly ash and saline soil, then add to the foamed light soil, the saline soil will produce a certain alkali activation effect on fly ash. When the mass ratio of saline soil to fly ash is 10%, the 56 d compressive strength of foam light soil exhibit the highest value. The compressive strength is 0.72 MPa at a bulk density of 700 kg/m³. The mixing ratio of the admixture in the lightweight soil can be significantly increased owing to the compounding action. The lightweight soil matrix has better stability when

收稿日期:2020-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51508030)

作者简介:姚运仕(1979-),男,山东费县人,教授,工学博士,E-mail:yaoyys@chd.edu.cn.

the mass of cementitious materials reached 40% with the bulk density of 800 kg/m^3 , the foamed lightweight soil material can increase the proportion of admixtures and saline soil used in the construction area and optimize the performance and application of foamed lightweight soil, which also provide a certain theoretical basis for the application of saline soil/fly ash in foam light soil. 3 tabs, 10 figs, 32 refs.

Key words: road engineering; foamed lightweight soil; soft soil roadbed; saline soil; durability

0 引言

软土路基公路在使用过程中,常因交通载荷作用而出现沉降、裂缝等病害,通常采用的方法为更换压实度较好的填土、碾压片石以及水泥石拌桩^[1-2]。然而,相对较高的造价以及较低的施工质量使此类技术逐渐失去使用优势。泡沫轻质土是一种现浇型路基填充材料,它是由气泡群落、水泥、水以及外加掺和料,按照特定的比例配制而成的^[3-4],待硬化之后形成多孔的混凝土材料,其组分具有轻质高强,施工性良好等优点。泡沫轻质土在固化后,具有良好的自立性,可充分实现垂直浇筑,在此特性下,路堤结构便可采用垂直形式。此外,采用泡沫轻质土施工的道路侧面不需要放坡处理,可在道路改、扩建过程中节省大量的土地资源,特别是在限制性较大的施工区域优势较为明显,在桥台台背等已有较多应用^[5-7]。

作为一种新型路基工程材料,泡沫轻质土材料与传统多孔水泥基材料的主要区别在于其配比中含有大量的土质填料。由于材料的多孔特性,其力学性能主要由孔壁结构决定,等量的土质填料存在则会降低材料的力学性能^[8-9]。因此,如何提高轻质土材料孔壁结构强度同时保持较高的孔隙率,实现轻质高强的效果,是泡沫轻质土材料的主要研究目标,针对此方面,国内外学者进行了大量的研究。根据目前使用的种类,可将填料土大致分为两大类:惰性土和活性土^[10-13]。在惰性土中,黏土是较早使用的,李胜男等利用黏土取代石英砂,结合水泥和发泡剂制备出了黏土质泡沫混凝土,结果表明单独添加黏土对材料基体的强度并无贡献,而掺入一定量的硅微粉后,可较大幅度提高材料的力学性能和保温性能^[14]。Du等也分别从流值、强度等方面分析了黏土的添加对泡沫轻质土性能的影响,结果表明黏土掺量的增加对轻质土的强度影响较大^[15-16]。陈金威等在泡沫轻质土中加入了高岭土,研究指出与黏土类似,高岭土的掺入会引起轻质土材料的黏聚力降低,进而导致抗剪强度的下降^[17]。张莎莎等以

工程废弃淤泥为原料土制备了淤泥再生混合轻质土材料,并从黏聚力降低和内摩擦角减小的角度分析了淤泥加入后轻质土材料强度降低的原因^[18]。

活性土掺和料的特点在于掺和料本身含有部分的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 组分,能够与水泥浆料中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作用而实现二次水化,新生成的二次水化硅酸钙具有一定的胶结作用^[19-21]。欧孝夺等利用废弃的铝土尾矿泥制备了泡沫轻质土,并对4种设计密度下的抗压强度等性能进行了分析,结果表明,铝土尾矿泥不仅可作为骨料,也可充当胶凝材料取代部分水泥^[4]。乔欢欢等采用硅灰取代部分砂和水泥,分析了泡沫轻质土抗压强度等性能,结果表明,掺入硅灰对泡沫轻质土的早期和后期强度均有一定的促进作用^[22]。陈钊等针对粉煤灰掺量对泡沫轻质土的工作及力学性能进行了分析,研究表明粉煤灰的掺量(质量分数,下同)逐渐增加时,轻质土的综合质量下降,但其综合性能可满足设计要求,最佳掺量为30%^[23]。综上所述可以看出,泡沫轻质土掺和料的选取主要根据材料本质活性和填充作用优选,但根据具体的使用效果,无论惰性或活性土质材料,均会引起泡沫轻质土性能的下降。根据施工条件下的经济性和使用性能的平衡,粉煤灰材料具有较大的优势和应用潜力,可作为掺和料的主材料加入泡沫轻质土中。因此,提升或优化粉煤灰的作用,并提升其掺量,可进一步优化泡沫轻质土材料的应用效果。

盐渍土是盐土和碱土的总称,主要指可溶性盐超过常规土质的土壤,其主要盐、碱离子含量因地域不同而各有差异,因而属于不稳定工程材料,若要进行路基填筑,则需要经过特殊处理方可投入使用,目前针对盐渍土的研究主要为其加固方面。杨晓松等将粉煤灰加入含水盐渍土中,对其强度和变形特性进行了研究,结果表明,一定量粉煤灰会促使盐渍土中离子的消耗,最终生成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^[24]。程卓等同样将粉煤灰与盐渍土混合,对其抗冻融性进行了分析,结果表明,粉煤灰的掺入会改变体系的内摩擦角,提高了其耐冻融循环次数^[25]。李洪波等针对水泥与盐渍土的固化作用进行了研究,测试结果表

明,固化前后盐渍土的内摩擦角、黏聚力均有不同程度提高^[26]。李敏等研究了粉煤灰与盐渍土混合后土质表面结构的变化,结果表明,通过粉煤灰与盐渍土之间的离子作用,会使二者之间胶结成为一个整体^[27]。通过粉煤灰、水泥对盐渍土的固化研究可以看出,粉煤灰与盐渍土、水泥与盐渍土之间均发生一定的离子化作用使其结合力增加,而此种结合反应也为少量盐渍土对粉煤灰、水泥的改性提供一定的理论基础和可行性。

本文以山西省黎霍(黎城—霍州)高速的碱化软土路基工程为依托,该区域为碱性沙土。根据之前路基工程经验,本区域的道路均在路/桥相接处采用水泥管桩,不仅成本较大,并且在使用一定周期后,均出现了较明显的桥头跳车现象,为交通安全带来一定的风险。本文针对依托工程基本条件进行材料设计,拟采用泡沫轻质土为路基填筑材料,利用当地盐渍土作为一种掺和料,进行强度稳定性以及耐久性研究;在性能提升的前提下提高粉煤灰等掺和料

表1 硅酸盐水泥参数

Tab.1 Parameters of Portland cement

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	细度/%	安定性/ mm	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
					初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
参数值	3 000	320	4	2	180	240	4.6	7.8	24.5	46.2

粉煤灰取自山西襄垣华荣电厂粉煤灰(二级灰),细度小于7%,密度 2.25 g/cm^3 ,烧失量为3.8%,满足《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)技术要求。

盐渍土取自依托工程当地,Na⁺离子含量大于3%,依据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007),该土属粉质沙土,详细参数见表2。

表2 盐渍土基本性质

Tab.2 Basic characteristics of saline soil

含盐类型	含盐量/%	初始含水量/%	不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%				
			[$-\infty$, 0.005]	(0.005, 0.01]	(0.01, 0.05]	(0.05, 0.075]	(0.075, $+\infty$)
NaCl	2.11	2.6	45.4	13.7	36.0	2.7	2.2

砂粉取当地风积砂,非亲水性,砂粒表面对水几乎没有物理吸附作用,最大吸水率不足1%,细度模数1.32,含泥量0.5%。

拌和用水采用当地自来水,满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),Ⅰ类水质。

1.2 试样制备

试验原材料配比如表3所示。采用河南华泰生产的HT-60型发泡机,发泡剂加入稳泡剂体系之后,注入发泡机内,得到均匀泡沫体。之后,将预制

的使用比例,进一步降低工程成本,为扩大轻质土材料在盐渍化地区的应用提供一定理论和应用基础。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

主要原材料包括发泡剂复合组分、水泥基粉料、掺和料以及拌和用水。发泡剂主要由发泡剂和稳泡剂组成,发泡剂采用复合植物发泡剂(河南华泰新材料股份有限公司,HTW-1),稳泡剂采用浓度为0.7 g/L的十二醇(国药集团化学试剂有限公司,分析纯,CAS:112-53-8)和浓度为1.5 g/L的羟乙基纤维素(国药集团化学试剂有限公司,分析纯,CAS:9004-62-0)组成的复合稳泡体系。发泡剂采用当地自来水作为稀释剂,稀释比例为1:30。水泥基粉料主要由水泥(大同冀东水泥盾石工程有限责任公司,P·O 42.5普通硅酸盐水泥)、减水剂(重庆凝达科技有限公司,ND204)、膨胀剂(山西晟友建材有限公司,SY-g)。所用水泥参数如表1所示。

好的泡沫与水泥浆料进行均匀搅拌混合,浇筑到对应的模具中,用刮刀将试块表面清理,并覆盖双层保鲜膜,标记后进行养护,养护温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度95%。

表3 原材料配比

Tab.3 Mixture ratios of raw materials

参数	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	掺和料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水胶比/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泡沫体积 比/%
参数值	400	80~160	0.5~0.65	20%

1.3 检测方法

流动度的室内试验步骤如下:将内径及净高80 mm的空心圆筒竖放在硬质塑料板上,混合好的轻质土泡沫浆料倒入空心圆筒中,刀口轻敲使材料充满圆筒,并将表面刮平;之后将圆筒垂直迅速提起,使浆料自然塌落并静置2 min,如图1所示。采用钢尺测量塌落浆料的最大水平直径,此时测量数值为泡沫轻质土的流动度,测完流动度后的试样倒入 $40(\text{长}) \times 40(\text{宽}) \times 160(\text{高}) \text{ mm}$ 试模中制样,如图2所示。

湿容重测试首先将量杯放置于电子秤上测得量杯质量。将制备的气泡轻质土料浆倒入量杯中,轻敲量杯,使混合浆料充满圆筒,并采用刮刀刮除多余



图1 流动度检测

Fig.1 Test of fluidity



图2 条形试样制备

Fig.2 Preparation of strip specimens

料。将装满试样的量杯进行称量,测得总质量,并按照式(1)进行计算,取3次测量结果的平均值作为泡沫轻质土的湿容重

$$\gamma = \frac{M - m_0}{V_0} \quad (1)$$

式中: γ 为湿容重(kN/m^3); M 为量杯加试样的总质量; m_0 为量杯质量; V_0 为量杯体积。

含水率测试参照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2008),吸水率参照《泡沫混凝土》(JC/T 266—2011)进行测试。具体步骤为:首先称取试样质量之后放入鼓风干燥箱内,70℃烘干24 h,之后升温至100℃烘干至恒重。冷却至室温后,放置于水温为20℃的恒温水箱中,水面需高出试样50 mm,静置24 h;完成后取出试样,擦去表面水分,并称量。含水率按下式进行计算

$$W = \frac{M_1 - M_0}{M_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_0 为试样烘干后的质量; M_1 为试样浸水后的质量; W 为试样含水率。

干缩性能测试按照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2008)进行,试样选取尺寸为

40(长)×40(宽)×160(高) mm,每组包括3个试样,在规定条件下进行养护,在试件两端埋入应变片,测定不同养生时间下的应变变量。

水稳性能测试主要通过干、湿2种状态循环对泡沫轻质土的耐水性进行评价。具体步骤如下:首先将干湿循环试样分组,按照每组3块试样来分,共分3组;将试样放入20℃±5℃的恒温水箱中,保证水面高于试样高度,持续时间为30 min;之后将试样放进干燥箱内,在70℃±5℃下烘干12 h,最后再次放入水中进行循环试验,水稳系数计算如下所示

$$A = \frac{P_1}{P_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A 为水稳系数; P_1 为水循环后抗压强度(MPa); P_0 为试水循环前抗压强度(MPa)。

冻融循环测试按照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2008)进行测试。分别取试样10组,每组3个试样,试样长、宽、高均为100 mm,冻融循环测试按照5次为1个循环,每个循环之后进行测试,共计50个冻融循环。在冻融循环的同时,分别于烘干前后测得样品抗压强度变化以及质量损失率,抗压强度计算参照式(3);质量损失率的计算如下

$$\alpha = \frac{K_1 - K_0}{K_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: α 为质量损失率; K_1 为冻融循环后的试样质量; K_0 为冻融循环前试样的质量。

1.4 依托工程设计方案

工程路基属于软土路基,针对填挖交界处进行挖台阶处理,台阶高度1 m,宽度1.5 m;对于填方路基,轻质土路基采用台阶形浇注,台阶高度1 m,宽度1.5 m。路基修筑在沟道里,长期使用过程中路基容易受水的浸泡,因此气泡混合轻质土采用防水土工布全包方式进行防渗设计,土工布搭接宽度不小于30 cm,并做密封处理,预装排水沟和路基顶面排水设施。

2 结果分析

2.1 掺和料对泡沫轻质土抗压强度的影响

2.1.1 掺和料种类

本文首先针对几种不同的掺和料对试样强度影响进行对比。按照设计容重700 kg/m^3 为标准制备样品。几种试样土质吸水量不同,因此针对不同掺和料按照相同的流动度标准进行,粉煤灰、盐渍土、砂粉的掺量分别为胶凝材料总质量的0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%。标准养护之后,其7、28、56 d抗压强度如图3所示。

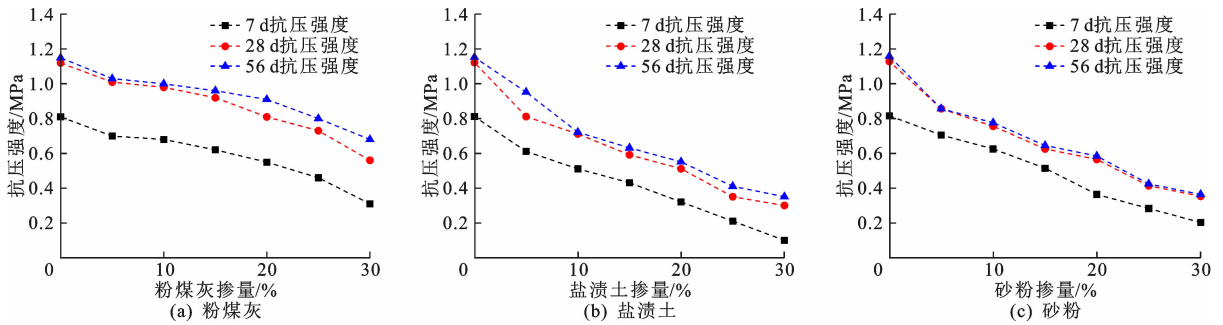


图3 泡沫轻质土掺入不同掺和料试样的抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of foamed lightweight soil mixed with different admixture samples

由图3可以看出,在单独添加几种掺和料后,试样在不同龄期的抗压强度均呈下降趋势,原因在于几种掺和料均作为填料而未参与胶凝作用。试样的7 d抗压强度均出现了明显的下降,说明其在水泥胶凝初期,并未起到明显的作用,而初期强度主要来自于水泥的水化作用^[12]。由几组试样28 d抗压强度可以看出,不同种类掺和料试样的整体强度随着水化过程的持续进行而增加,其中添加粉煤灰试样的强度最高,但当掺和料掺量增加时,其整体强度呈现下降趋势。当龄期继续增加至56 d时,添加粉煤灰的试样强度仍出现了一定的增加,而盐渍土试样的增加较小,表明盐渍土和粉煤灰的添加会对水泥的水化过程有一定的促进作用^[28],而添加砂粉的试样56 d抗压强度基本与28 d趋势一致,说明此阶段砂粉并未对水化过程产生影响。

根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中规定,气泡混合轻质土容重应在 $500\sim 1\ 100\text{ kg/m}^3$ 之间,抗压强度 $P\geq 0.6\text{ MPa}$ 。结合图3可知,在容重 700 kg/m^3 条件下,粉煤灰掺量30%时,抗压强度略低于 0.6 MPa ,单独掺入盐渍土或砂粉超过15%后,试样抗压强度均低于 0.6 MPa 。考虑到盐渍土对胶凝材料的作用,本文设计将粉煤灰与盐渍土进行复配试验。由图3(a)可知,30%粉煤灰作为掺和料的试样,其28 d抗压强度可达到 0.64 MPa ,而在相近的力学条件下,较多的粉煤灰掺量,有利于降低材料施工成本。因此,本文复配掺和料质量占胶凝材料质量的30%,仍按照容重 700 kg/m^3 标准进行,其28、56 d抗压强度变化如图4所示。

由图4可以看出:随着复配掺和料中土灰比(盐渍土占粉煤灰的质量比,下同)的增加,试样的28 d抗压强度呈现波动式变化,当盐渍土掺量较小时,试样强度显著提高,在掺量20%时达到最高值;当盐渍土继续增加时,其强度逐渐降低。而不同土灰比试样56 d抗压强度的变化趋势与28 d相近,但极值

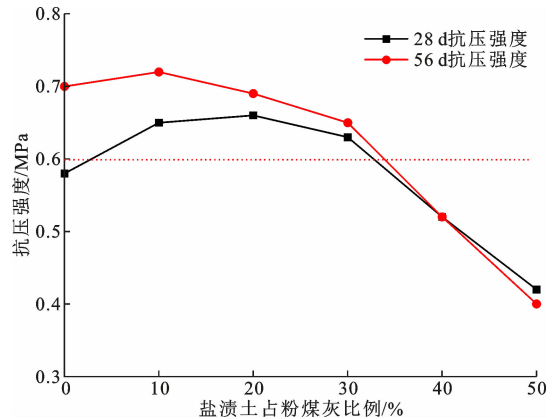


图4 不同盐渍土占粉煤灰比例试样的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of samples with different salinized soil/fly ash ratios

为盐渍土掺量10%的试样。此结果说明,少量盐渍土的添加会对粉煤灰起到一定的激活作用,但掺量过大会影响轻质土的强度。当土灰比达到30%时,虽然其抗压强度并非最高,但盐渍土、粉煤灰2种材料利用率提升,这对工程经济性及环境效益均有积极意义,因此,本文后续将以此土灰比进行研究,以获得最优的掺和料掺量。

2.1.2 复配掺和料比例

《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)规定,气泡混合轻质土的容重应在 $500\sim 1\ 100\text{ kg/m}^3$ 之间,而不同的掺和料种类与设计容重以及强度之间存在一定的影响关系,图5为不同复配掺和料掺量的轻质土试样在不同容重下的抗压强度。由图5可以看出,试样的28 d抗压强度都随着复配掺和料掺量的增大而减小,不同容重时其变化趋势一致。以抗压强度 0.6 MPa 为基本要求,当复配掺和料掺量为30%以下时, 700 kg/m^3 容重试样已可满足要求;当复配掺和料掺量增加到40%时,试样的容重需大于 800 kg/m^3 ;当掺和料掺量增加到50%时,仅有 900 kg/m^3 容重的试样可满足要求。而在同等容重条件下,相对较高的复配掺和料掺量更利于工程的

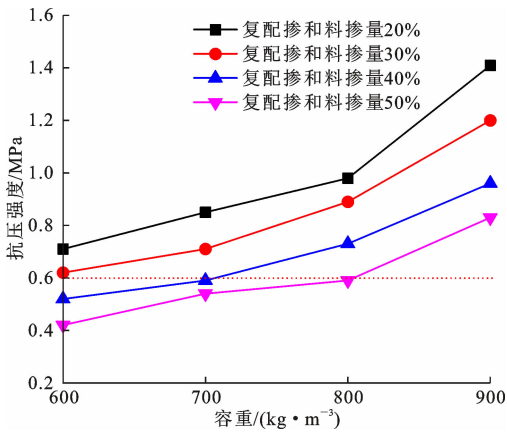


图5 不同复配掺和料掺量试样的抗压强度(28 d)随容重的变化
Fig. 5 Variations of compressive strength (28 d) of samples with different contents of admixture with bulk densities

实际应用。

2.2 泡沫轻质土的耐久性

为综合评价泡沫轻质土材料的应用效果,需针对700、800、900 kg/m³容重的试样进行耐久性评价。为确定最优的掺和料掺量以及试样的容重等级,试样的耐久性测试按照700 kg/m³(复配掺和料掺量30%),800 kg/m³(复配掺和料掺量40%),900 kg/m³(复配掺和料掺量50%)进行。

2.2.1 水稳性

根据当地的区域环境,外来水的影响仍是路基损坏的重要原因,因此,需考虑长效稳定性,首先针对泡沫轻质土结构的水稳性能进行测试。

图6为3种容重试样在不同龄期下的水稳系数变化。由图6可以看出,容重为900 kg/m³时,试样的水稳系数与800 kg/m³试样相近。而最小容重试样的水稳系数最小。泡沫轻质土的水稳系数为强度的浸水稳值,因而其强度的来源是水稳系数的主要影响参数。对于泡沫轻质土材料,孔壁结构的稳定性和致密性是保证基体强度的主要因素^[29-30]。而当容重增加时,气孔率相对较低,整体的水泥基框架密度则较高,因而在泡水过程中,产生的软化现象相对较少。随着龄期的不断增加,试样的水稳系数也在逐渐增加,说明水化过程的不断进行,也会引起材料体系的致密度逐渐增加,并且龄期越长,泡水前后试样的抗压强度差异越小,水稳系数越高。而在900 kg/m³容重试样中,过多的粉煤灰加入亦会导致部分结构缺陷,因而与800 kg/m³试样相比,未能体现出更高的水稳性。

2.2.2 干缩性能

泡沫轻质土在成型时由大量的泡沫浆体构成,

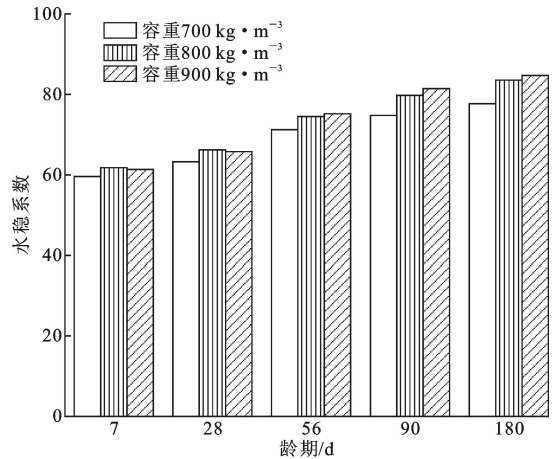


图6 不同龄期泡沫轻质土的水稳系数
Fig. 6 Water stability coefficients of foamed lightweight soil at different ages

而泡沫浆体主要成份为水,当水泥材料固化以后,未参与水化的部分将会蒸发掉,随着自由水的蒸发,轻质土基体会出现一定的收缩现象,而此种现象与传统的水泥收缩一致,表现出随着加水量的增大,收缩现象更为明显。而对于作为路基填充的泡沫轻质土材料,当收缩率超过标准范围时,会出现明显的收缩变形以及路基裂缝,影响工程质量。

图7、图8为不同密度等级轻质土试样在0~400 h的失水率和收缩率。由图7可知,3个容重的试样失水率与容重基本保持一致。失水率的大小主要在于水化过程,在270 h前,试样失水率显著增加,说明水泥在初期快速水化,3组试样的失水率均在较短时间内达到相对平衡的状态,在270 h后,试样整体失水率明显减小。其中,容重较大试样的失水率相对较高,根据实际发泡剂掺量对比可知,大容重试样的发泡比例相对较低,发泡液中的水与未水化的自由水会加剧水分的流失。但900 kg/m³容重试样在70 h左右的失水率已接近最终平衡,而700 kg/m³试样耗时相对更长,此原因在于多孔结构中,高容重试样的孔壁结构更紧密,水化速率更快。

由图8可知,试样干缩率与失水率的变化趋势基本一致,充分水化后,基体的收缩率明显下降。而3个容重试样的失水率和干缩应变亦基本保持一致,这也反映了泡沫轻质土材料的结构特性,其多孔的特征会在一定程度上抵消形变,而表现出相对于致密混凝土的结构稳定特性^[31]。

2.2.3 冻融循环

图9、图10分别为不同容重试样经过多次冻融循环后的抗压强度和质量损失率变化。由图9、图10可以看出,试样在冻融循环25次以内,二者基本

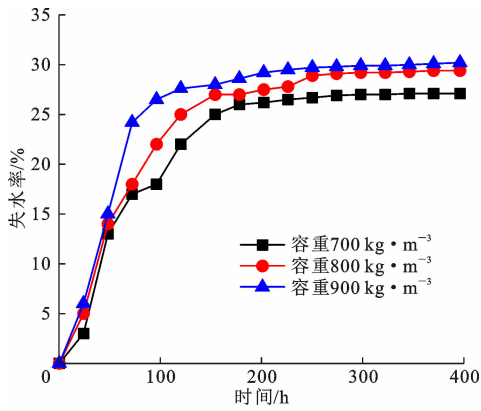


图7 累计失水率随时间的变化

Fig. 7 Variations of cumulative water loss rates with time

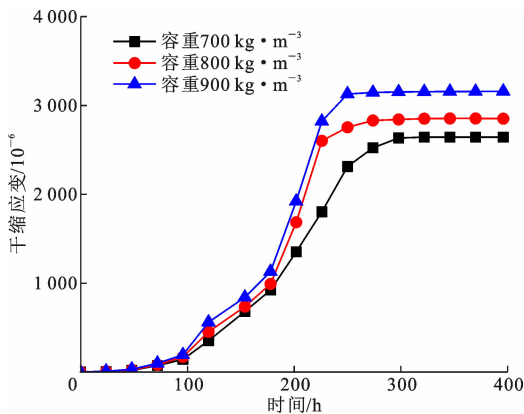


图8 干缩应变随时间的变化

Fig. 8 Variations of shrinkage strains with time

表现出同样的趋势,在冻融循环初期有小幅的强度下降,之后保持相对稳定。此原因主要在于首个循环时,部分的水分侵入到泡沫轻质土的外层,在低温条件下出现小幅的水分冻胀,而引起局部结构的破坏^[31-32]。在随后的循环中,水分的侵入与轻质土本身达到一定平衡,因而会随着循环次数的增加,其强度缓慢下降。当冻融循环次数大于25次后,700 kg/m³ 试样抗压强度出现较明显的下降,对应的质量损失率也显著增加。说明在此循环次数下,试样的水侵入现象增加,冻胀加剧。当冻融循环次数继续增加至35次后,900 kg/m³ 容重试样抗压强度以及质量损失率出现明显的变化,表明试样冻融破坏。而800 kg/m³ 容重试样的抗压强度和质量损失率仍分别保持缓慢的下降和上升趋势,说明此容重及掺和料掺量下,轻质土基体稳定性最优。

与同类研究相比,本文试样体现出相对较高的抗冻融次数^[2,23]。其原因在于大掺量复配掺和料的添加、粉煤灰混合料的添加均降低了水泥的用量,因而水泥在水化中的收缩现象会在一定程度上受到抵

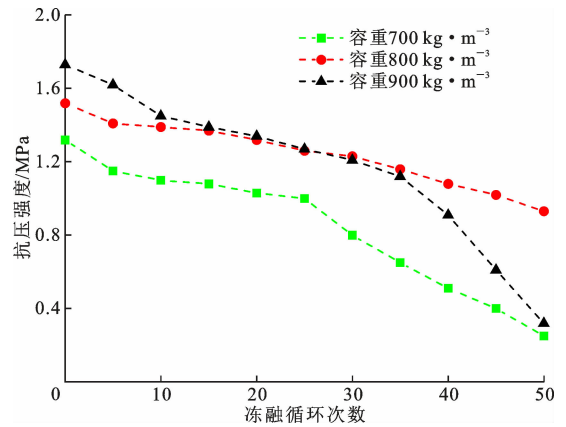


图9 冻融循环次数与试样抗压强度的关系

Fig. 9 Relationships between freeze-thaw cycles and compressive strength of samples

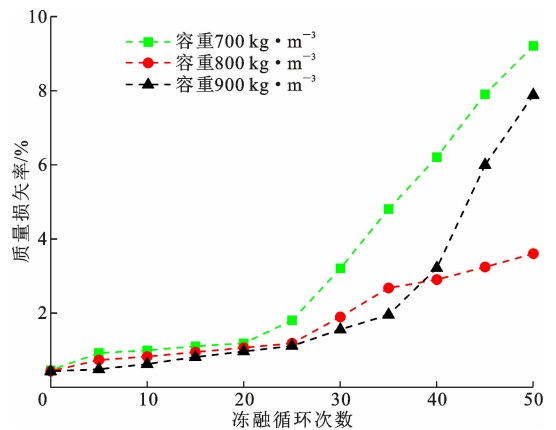


图10 冻融循环次数与试样质量损失率的关系

Fig. 10 Relationships between freeze-thaw cycles and mass loss rate of samples

消作用;掺入一定比例盐渍土可发挥一定的活性作用,会使泡沫轻质土在水化后期致密度得到一定程度提高。

3 结 语

(1)对粉煤灰、盐渍土、砂粉3种矿物掺和料以及粉煤灰/盐渍土进行复配,确定了盐渍土/粉煤灰的最佳比例为30%。

(2)分别针对既定配比后的轻质土进行了耐久性测试,包括水稳性、干缩性和冻融循环。结果表明,当泡沫轻质土的容重为800 kg/m³,盐渍土/粉煤灰复配总质量占胶凝材料质量40%时,泡沫轻质土具有相对较优的耐久性能。

(3)经过材料设计和依托工程施工,形成了对于特定地域的软土路基的材料应用方法,但在实际应用中仍存在部分问题。如在成型过程中,材料整体强度上升相对较慢,且在成型初期易受外界扰动,因

此在具体的应用中,应重点针对泡沫轻质土的早期强度进行调控,以提高施工性能。

参考文献:

References:

- [1] 刘军勇,张留俊.黄土地区公路路基勘察设计与分析[J].公路,2014,59(7):40-45.
LIU Jun-yong, ZHANG Liu-jun. Issues and analysis of road subgrade during design and survey phases in loess area[J]. Highway, 2014, 59(7): 40-45.
- [2] 张峰瑞,姜谔男,江宗斌,等.低温冻土地区的软土路基蠕变沉降数值分析[J].公路工程,2020,45(4):79-84.
ZHANG Feng-rui, JIANG An-nan, JIANG Zong-bin, et al. Numerical analysis of creep settlement of soft soil subgrade in cryogenic frozen soil zone[J]. Highway Engineering, 2020, 45(4): 79-84.
- [3] 裘友强.软土地基上泡沫轻质土路基工程特性研究[D].西安:长安大学,2018.
QIU You-qiang. Study on engineering properties of foamed lightweight soil subgrade in the soft soil foundation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [4] 欧孝夺,彭远胜,莫鹏,等.掺铝土尾矿泡沫轻质土的物理力学及水力特性研究[J].材料导报,2020,34(增1):241-245.
OU Xiao-duo, PENG Yuan-sheng, MO Peng, et al. Study on the physical mechanical and hydraulic properties of foamed mixture lightweight soil mixed with bauxite tailings[J]. Materials Reports, 2020, 34(S1): 241-245.
- [5] 罗吉庆.轻质土在高速公路建设中的探索与应用[J].路基工程,2020(1):114-117.
LUO Ji-qing. Exploration and application of light soil in highway construction[J]. Subgrade Engineering, 2020(1): 114-117.
- [6] 孙赛伟,刘勇,陈伟,等.偏高岭土对路基填料泡沫轻质土性能的影响研究[J].混凝土,2020(1):95-99.
SUN Sai-wei, LIU Yong, CHEN Wei, et al. Effects of metakaolin on properties of foamed cement banking for subgrade filler[J]. Concrete, 2020(1): 95-99.
- [7] 李东民,毕伟涛,李春轩,等.气泡混合轻质土在陕北淤地坝地基台背回填中的应用研究[J].路基工程,2019(4):64-68.
LI Dong-min, BI Wei-tao, LI Chun-xuan, et al. Study on application of foamed cement for back filling behind abutment at warp land dam foundation in Northern Shaanxi [J]. Subgrade Engineering, 2019(4): 64-68.
- [8] LI T, HUANG F, LI L, et al. Preparation and properties of sulphoaluminate cement-based foamed concrete with high performance[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120945.
- [9] 李章珍,唐浩,高凤春,等.轻质土的原材料及强度特性试验研究[J].混凝土与水泥制品,2016(9):65-67.
LI Zhang-zhen, TANG Hao, GAO Feng-chun, et al. Experimental research on raw materials and strength characteristic of lightweight soil[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(9): 65-67.
- [10] NAMBIAR E K K, RAMAMURTHY K. Influence of filler type on the properties of foam concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(5): 475-480.
- [11] SUN C, ZHU Y, GUO J, et al. Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 833-839.
- [12] 黄学明,赵鲲鹏,王海波,等.路用泡沫轻质土力学性能及浇筑技术研究[J].林业工程学报,2019,4(6):143-150.
HUANG Xue-ming, ZHAO Kun-peng, WANG Hai-bo, et al. Investigation on mechanical properties and pouring technology of foamed lightweight soils[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(6): 143-150.
- [13] 贾晓钊,雷国元,宋均平,等.利用轻质红黏土陶粒制备陶粒泡沫混凝土的研究[J].金属矿山,2018(7):192-196.
JIA Xiao-zhao, LEI Guo-yuan, SONG Jun-ping, et al. Research on preparation of ceramsite foamed concrete using lightweight red clay ceramsite[J]. Metal Mine, 2018(7): 192-196.
- [14] 李胜男,胡华洁,张扬清,等.黏土质泡沫混凝土试验研究[J].混凝土与水泥制品,2012(12):1-5.
LI Sheng-nan, HU Hua-jie, ZHANG Yang-qing, et al. Experimental research on soiled-based foamed concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2012(12): 1-5.
- [15] DU Y J, YU B W, LIU K, et al. Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(2): 1-10.
- [16] ANEK N, SUKSUN H, SHEN S L, et al. Strength and compressibility of light weight cellular cemented clay-fly ash material[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(2): 471-483.
- [17] 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.
CHEN Jin-wei, LIU Yong, SHI Su-yi, et al. Strength

- characteristics of foam lightweight soil with different admixture[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2016, 13(4): 15-22.
- [18] 张莎莎,王旭超,杨晓华,等. 含盐施工用水对路基填料工程特性的累加效应[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 71-81.
ZHANG Sha-sha, WANG Xu-chao, YANG Xiao-hua, et al. Cumulative effect of saline construction water on engineering properties of subgrade filling material[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 71-81.
- [19] WANG X Y, HAN P J, DONG X Q, et al. Influences of high-sulphur fly ash on the properties of lightweight cement-treated materials subjected to sulphate corrosion[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(15): 5217.
- [20] SHE W, DU Y, ZHAO G, et al. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 153-166.
- [21] ALMALKAWI A T, HONG W, HAMADNA S, et al. Behavior of a lightweight frame made with aerated slurry-infiltrated chicken mesh under cyclic lateral loading[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 679-686.
- [22] 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.
QIAO Huan-huan, LU Zhong-yuan, YAN Yun, et al. Influence of filler type on properties of foamed concrete[J]. China Powder Science and Technology, 2008, 14(6): 38-41.
- [23] 陈钊,刘勇,刘晖,等. 高性能粉煤灰泡沫轻质土性能试验及应用分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(4): 103-106, 117.
CHEN Fan, LIU Yong, LIU Hui, et al. Performance test and application analysis of high performance fly ash foamed lightweight soil[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2020, 34(4): 103-106, 117.
- [24] 杨晓松,刘井强,党进谦. 粉煤灰改良氯盐渍土工程特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(11): 82-86, 92.
YANG Xiao-song, LIU Jing-qiang, DANG Jin-qian. Experimental research on the engineering property of chlorine saline soil improved by fly ash[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(11): 82-86, 92.
- [25] 程卓,杨政,李雨桐. 冻融条件下应用粉煤灰改良盐渍土性能研究综述[J]. 山西建筑, 2020, 46(20): 107-111.
CHENG Zhuo, YANG Zheng, LI Yu-tong. The research progress on the properties of salinized soil under the freezing-thawing cycle and the improvement of mechanical properties of salinized soil with fly ash is summarized[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(20): 107-111.
- [26] 李宏波,田军仓,何芳,等. 水泥粉煤灰固化超盐渍土的力学性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(4): 809-816.
LI Hong-bo, TIAN Jun-cang, HE Fang, et al. Mechanical property tests of solidified hypersaline soil with cement and fly ash[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(4): 809-816.
- [27] 李敏,董一凡,上官中华,等. 石灰、粉煤灰改性对盐渍土吸附石油污染物行为的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(2): 53-59.
LI Min, DONG Yi-fan, SHANGGUAN Zhong-hua, et al. Influence of property-modified lime and fly ash on oil absorption behaviors of saline soil[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(2): 53-59.
- [28] 侯景鹏,陈群,史巍,等. 钢渣和粉煤灰对重混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(11): 92-95.
HOU Jing-peng, CHEN Qun, SHI Wei, et al. Effect of steel slag and fly ash on the performance of heavy concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(11): 92-95.
- [29] 李思远. 盐渍土环境下混凝土耐久性研究:以内蒙古河套地区为例[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2018.
LI Si-yuan. Research of concrete durability in saline soil environment: Hetao area in Inner Mongolia[J]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018.
- [30] 张旭,王武祥,杨鼎宜,等. 超轻泡沫混凝土孔结构调控措施研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2255-2259, 2267.
ZHANG Xu, WANG Wu-xiang, YANG Ding-yi, et al. Study on control measures of pore structure of ultra light foam concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2255-2259, 2267.
- [31] 叶武平,曹力强,梁瑞华,等. 复合掺合料对泡沫混凝土防水抗渗性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(4): 161-164.
YE Wu-ping, CAO Li-qiang, LIANG Rui-hua, et al. Influence of compound mineral admixtures on water-proof and impermeability of foam concrete[J]. New Building Materials, 2020, 47(4): 161-164.
- [32] 王亚威. 泡沫轻质混凝土渗透性试验研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(1): 17-21.
WANG Ya-wei. Experimental research on permeability of foamed lightweight concrete[J]. New Building Materials, 2018, 45(1): 17-21.