

陈雅妮,杨伟军,杨建宇.复合墙体填充芯层用气泡混合土碳化性能试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(4):46-52.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.006

CHEN Y N, YANG W J, YANG J Y. Experimental Study on Carbonization Performance of Foamed Mixture Lightweight Soil for Filling Core Layer of Composite Wall[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(4): 46-52. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.006

复合墙体填充芯层用气泡混合土碳化性能试验

陈雅妮,杨伟军*,杨建宇

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了研究用于轻钢龙骨复合墙体填充芯层气泡混合轻质土的碳化性能,在快速碳化试验的基础上,制备不同成分比例的气泡混合轻质土,研究其碳化系数及碳化深度随时间变化的规律,探讨原料土、粉煤灰及气泡含量对轻质土碳化性能的影响,并根据自然条件下与快速碳化试验碳化速率系数的关系,通过碳化试验数据推算出自然条件下轻质土的碳化深度,预测轻质土及复合墙体的碳化寿命.结果表明:原料土掺量、粉煤灰与原料土掺量比及气泡掺量均对轻质土的碳化性能存在不同程度的影响,原料土掺量及气泡掺量越大,轻质土的碳化系数越小,碳化速率越快;加入适量粉煤灰可以提高轻质土的抗碳化性能并延缓完全碳化时间;通过优化设计配比及提高养护环境等方式,轻质土及其复合墙体的服役寿命可满足设计要求.

关键词: 气泡混合轻质土;轻钢龙骨复合墙体;碳化系数;碳化深度;碳化寿命

中图分类号: TU525 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2024)04-0046-07

Experimental Study on Carbonization Performance of Foamed Mixture Lightweight Soil for Filling Core Layer of Composite Wall

CHEN Yani, YANG Weijun, YANG Jianyu

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the carbonization performance of foamed mixture lightweight soil used in the filling core layer of light steel keel composite wall, based on rapid carbonization test, foamed mixture lightweight soil with different composition ratios is prepared in this paper. By studying the variation law of its carbonization coefficient and carbonization depth along with time, it discusses the influence of raw material soil, fly ash and foam content on the carbonization performance of foamed mixture lightweight soil. According to the relationship between the carbonization rate coefficient under natural conditions and rapid carbonization test conditions, it figures out the carbonization depth of foamed mixture lightweight soil under natural conditions through carbonization test data, and predicts the carbonization life of foamed mixture lightweight soil and its composite wall. Results show that the mixing amount of raw soil, the mixing amount ratio of fly ash to raw soil and the foam content all have different degrees of influence on the carbonization performance of foamed mixture lightweight soil. The higher the mixing amounts of raw soil and foam, the lower the carbonization coefficient of foamed mixture lightweight soil, and the faster the carbonization rate. Adding a proper amount of fly ash can improve the carbonization resistance of foamed mixture lightweight soil and delay the complete carbonization time. In addition,

收稿日期:2022-02-19

* 通信作者, E-mail: 3166568361@qq.com

the service life of foamed mixture lightweight soil and its composite wall can meet the design requirements by optimizing the design ratio and improving the maintenance environment.

Keywords: foamed mixture lightweight soil; light steel keel composite wall; carbonization coefficient; carbonization depth; carbonization life

复合墙体因其抗震性能好、自重较轻、保温隔热性能佳和施工便捷等优点日渐成为建筑行业的宠儿,其中,轻钢龙骨复合墙体的应用最为广泛^[1-4].气泡混合轻质土是采用原料土(取自工程废弃土或砂质土)、固化剂、水与气泡按比例混合搅拌而成^[5-9],作为近年来新兴的一种轻质材料,因其轻质性、强度和容重可调节性、高流动性、施工便捷、良好的隔热隔音效果及抗冻融性能等优点备受关注.

目前,轻钢龙骨复合墙体内部的填充材料以泡沫混凝土为主,气泡混合轻质土作为泡沫混凝土的延伸,根据其材料特性可将其与轻钢龙骨复合墙体相结合.对于气泡混合轻质土这类多孔水泥基材料,碳化往往会对其强度产生不利影响^[10-11],当气泡混合轻质土作为芯层填充于复合墙体内部时,为避免因碳化导致轻质土的结构劣化,影响复合墙体的耐久性和缩短墙体服役年限,产生较大的经济损失,因此,有必要针对气泡混合轻质土的碳化性能进行研究.

国内外很多学者对气泡混合轻质土进行了研究,DOVEN 等^[12]通过分析高掺量粉煤灰型气泡混合轻质土的基本物理和力学性能,认为轻质土可用于各种回填或结构填充;JONES 等^[13]研究发现在轻质土组料中添加粉煤灰可以改善水化热带来的问题,同时对轻质土应用于结构工程的可行性进行了分析;王宗建等^[14]研究发现轻质土的抗压强度随聚丙烯纤维含量的增加而提高;朱伟等^[15]认为水泥与 EPS 颗粒的添加量是影响轻质土抗压强度的关键因素;董素芬等^[16]指出 EPS 颗粒的掺入可以提升轻质土的抗碳化能力;王伟等^[17]发现在不同的碳化时间下,轻质土的能量耗散率随水泥掺量的增加而降低.综上所述,对轻质土的研究主要围绕其物理和力学性能,而对碳化性能的研究较少.因此,本文制备不同成分比例的气泡混合轻质土,对其碳化系数及碳化深度随时间变化的规律进行研究,并探讨原料土、粉煤灰及气泡含量对轻质土碳化性能的影响,研究成果将为气泡混合轻质土应用于轻钢龙骨复合墙体提供有价值的参考.

1 试验概况

1.1 试验材料与配合比

原料土取自长沙市天心区某施工现场.原料土的基本物理性质以及颗粒级配曲线如表 1 和图 1 所示.

表 1 原料土的基本物理性质

土样类别	密度/(g/cm ³)	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	液限指数/%	塑限指数/%
黏土质砂	1.5	20.5	33.1	16.6	0.24	16.5

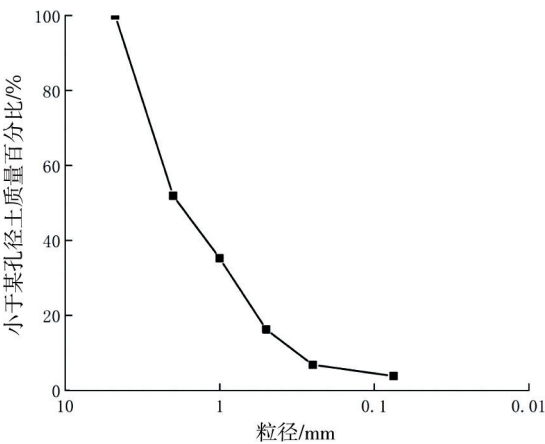


图 1 原料土颗粒级配曲线

试验其他材料采用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥, I 级优质粉煤灰, Legao™ 2258 型水泥发泡剂以及自来水.依据原料土与水泥掺量比、原料土与粉煤灰掺量比及气泡掺量配制气泡混合轻质土,配合比试验工

况如表 2~表 4 所示.

表 2 原料土与水泥掺量比的气泡混合轻质土配合比

工况	水泥/(kg/m ³)	原料土/(kg/m ³)	水胶比	气泡/(L/m ³)
A-1	400	0	0.55	650
A-2	360	80	0.55	650
A-3	320	160	0.55	650
A-4	280	240	0.55	650

表 3 原料土与粉煤灰掺量比的气泡混合轻质土配合比

工况	水泥/(kg/m ³)	原料土/(kg/m ³)	粉煤灰/(kg/m ³)	水胶比	气泡/(L/m ³)
B-1	290	300	0	0.55	600
B-2	290	250	50	0.55	600
B-3	290	200	100	0.55	600
B-4	290	150	150	0.55	600

表 4 气泡掺量的气泡混合轻质土配合比

工况	水泥/(kg/m ³)	原料土/(kg/m ³)	粉煤灰/(kg/m ³)	水胶比	气泡/(L/m ³)
C-1	300	250	50	0.55	550
C-2	300	250	50	0.55	650
C-3	300	250	50	0.55	750

1.2 试验过程

试验在长沙理工大学公路工程试验中心开展.根据表 2~表 4 配合比选定相关原材料后,用搅拌机干拌至混合均匀,加入配合比所需水量继续搅拌 2 min.用发泡机生成气泡群加入浆体内,为避免消泡效应,此时搅拌时间控制在 3 min 以内.用立方体模具制成 100 mm×100 mm×100 mm 气泡混合轻质土立方体试块,再用保鲜膜覆盖并置于自然环境下养护 2~3 d 后脱模.将脱模后的试件密封并做好标记放入标养室养护,至规定龄期后取出开展后续试验.图 2 为养护完成的气泡混合轻质土试件.



图 2 养护完成的气泡混合轻质土试件

目前,有关气泡混合轻质土的标准及规范较少,碳化试验参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[18]和《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T 2357—2016)^[19].将养护龄期为 28 d 的一组试件取出后测定其碳化前的抗压强度 f_{cc} ,其余试件放入碳化箱进行碳化, CO_2 浓度(质量分数,下文同)保持在 $(20\pm3)\%$.4 d 后,每天取出一块劈开,用 1%酚酞溶液测定碳化深度(从试件表面至变色边界,每边测量 3 处距离,以其算术平均值作为碳化深度),直至试件中心不是红色,则认定试件已完全碳化,测定一组完全碳化试件的抗压强度 f_c .碳化系数按式(1)计算.

$$K_c = \frac{f_c}{f_{cc}}. \tag{1}$$

式中: K_c 为碳化系数,精确至 0.01.

气泡混合轻质土抗压强度试验依据《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJ/T 177—2012)^[20]进行.试验采用 WDW-100C 型微机控制电子万能试验机,以 2 kN/s 的速度连续均匀地施加荷载,直至试件破坏,计算得到抗压强度.

2 试验结果与分析

2.1 原料土掺量对气泡混合轻质土碳化性能的影响

针对气泡混合轻质土的原料土掺量对碳化性能的影响进行试验,获得不同原料土掺量的气泡混合轻质土的碳化系数如表 5 所示,其碳化深度如图 3 所示.

表 5 不同原料土掺量的气泡混合轻质土的碳化系数

工况	原料土掺量/%	未碳化抗压强度 f_{cc} /MPa	完全碳化抗压强度 f_c /MPa	碳化系数 K_c
A-1	0	1.65	1.95	1.18
A-2	18	1.54	1.46	0.95
A-3	33	1.09	0.96	0.88
A-4	46	0.66	0.57	0.86

由表 5 可知:随着原料土掺量的增加,气泡混合轻质土的碳化系数呈递减趋势,说明原料土掺量对气泡混合轻质土的碳化性能的影响明显.碳化会降低气泡混合轻质土的抗压强度,这说明原料土的加入导致混合轻质土内部的密实度降低.

未掺入原料土的轻质土,其碳化系数为 1.18>1,表明试件在碳化后的抗压强度有小幅提升.这主要是由于随着碳化过程的进行,水化产物氢氧化钙将转变为不溶于水的碳酸钙,使得轻质土的孔隙率变小而密实度增加,试件的抗压强度增大,其化学反应为 $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}=\text{H}_2\text{CO}_3$, $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{H}_2\text{CO}_3=\text{CaCO}_3\downarrow+2\text{H}_2\text{O}$ ^[21].

在轻质土中加入原料土后,碳化系数均小于 1,说明碳化会降低轻质土的抗压强度,原因是碳化会消耗部分氢氧化钙,让凝胶材料形成的密实结构变得疏松,整体致密性变差,抗压强度减小.

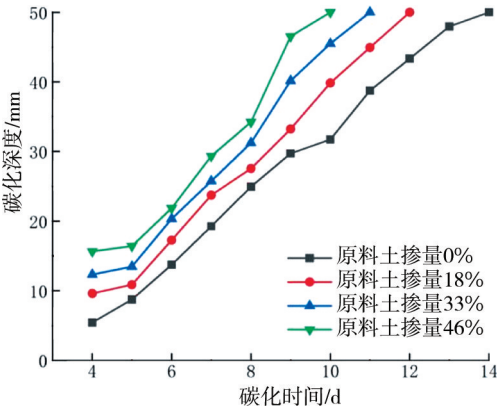


图 3 不同原料土掺量的气泡混合轻质土的碳化深度

由图 3 可知:随着原料土掺量的增加,轻质土的完全碳化时间缩短.当原料土掺量为 46%时,气泡混合轻质土的完全碳化时间比不掺入原料土时缩短 4 d,这可能是由于气泡混合轻质土的碳化速率受轻质土密实度的影响,而原料土掺量增加,试件密实度下降.试验结果建议气泡混合轻质土中的原料土掺量不宜过大,应控制在 35%以下.图 4 为气泡混合轻质土碳化深度随时间的变化.

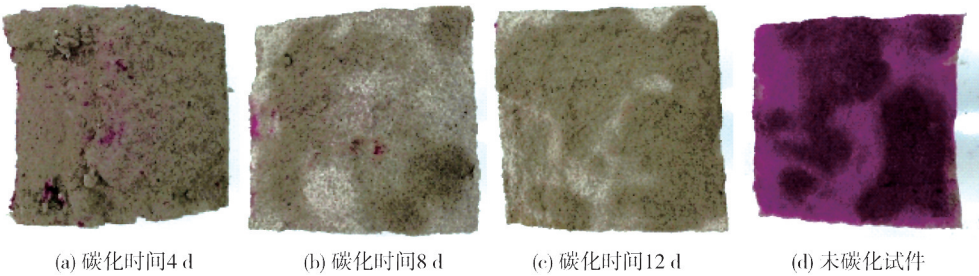


图 4 气泡混合轻质土碳化深度随时间的变化

2.2 粉煤灰与原料土掺量比对气泡混合轻质土碳化性能的影响

针对气泡混合轻质土粉煤灰与原料土掺量比对碳化性能的影响进行试验,得到不同粉煤灰与原料土掺量比的气泡混合轻质土的碳化系数如表 6 所示,其碳化深度如图 5 所示.

表 6 不同粉煤灰与原料土掺量比的气泡混合轻质土的碳化系数

工况	粉煤灰与原料土掺量比	未碳化抗压强度 f_{cc} /MPa	完全碳化抗压强度 f_c /MPa	碳化系数 K_c
B-1	0	0.74	0.65	0.88
B-2	1 : 5	1.33	1.22	0.92
B-3	1 : 2	1.76	1.74	0.99
B-4	1 : 1	2.38	2.27	0.95

由表 6 可知:对比未碳化试件,无论粉煤灰与原料土掺量的比例如何变化,碳化后试件的抗压强度均降低.随着粉煤灰与原料土掺量比的增加,碳化系数大致呈上升趋势,其主要原因是粉煤灰的加入优化了凝胶材料体系的颗粒群级配,实现凝胶数量的增多和胶浆结构的增密,改善了轻质土的孔结构状态,且由于粉煤灰掺量的增加,可进行碳化反应的氢氧化钙增加,从而生成更多碳酸钙填充于水化物孔隙之间,轻质土强度的损失更少.

由图 5 可知:随着粉煤灰掺量的增加,试件的完全碳化时间呈递增趋势.未加入粉煤灰试件的碳化时间为 10 d,而粉煤灰与原料土同比例掺量的试件的碳化时间为 14 d.分析其原因是粉煤灰的颗粒粒径较水泥细小得多,可均匀填充至水泥颗粒之间的空隙中,使水泥颗粒处于相对分散的状态,避免其聚集黏连,加速水泥的水化反应效率,提高了轻质土的密实度,有效地阻止二氧化碳气体在轻质土内部的扩散,延缓完全碳化的时间.建议工程采用气泡混合轻质土时,可加入粉煤灰以提高轻质土的抗碳化性能.

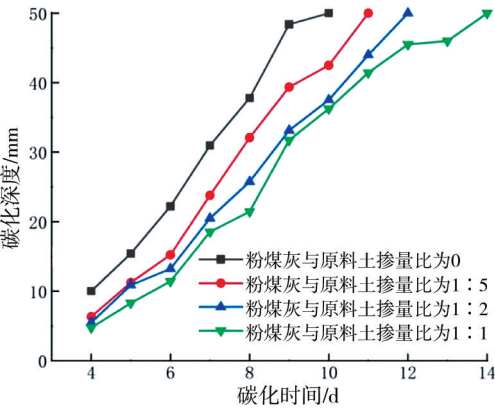


图 5 不同粉煤灰与原料土掺量比气泡混合轻质土的碳化深度

2.3 气泡掺量对气泡混合轻质土碳化性能的影响

针对气泡掺量对气泡混合轻质土碳化性能的影响进行试验,获得气泡混合轻质土的碳化系数如表 7 所示,其碳化深度如图 6 所示.

表 7 不同气泡掺量的气泡混合轻质土的碳化系数

工况	气泡掺量/(L/m ³)	未碳化抗压强度 f_{cc} /MPa	完全碳化抗压强度 f_c /MPa	碳化系数 K_c
C-1	550	1.47	1.34	0.91
C-2	650	0.89	0.78	0.88
C-3	750	0.51	0.41	0.80

由表 7 可知:气泡掺量从 550 L/m³ 增加至 750 L/m³ 时,碳化系数从 0.91 下降至 0.80,下降了 12%.说明随着气泡掺量的增加,完全碳化后试件强度的损失越大,而碳化系数越小.主要原因是在碳化阶段,部分水化产物转变成碳酸钙,其因凝胶材料形成的密实骨架变得松散,且碳酸钙挤压破坏掺入的气泡会形成连通孔隙,导致抗压强度降低.因此,工程应用中应严格控制气泡掺量,不可为追求轻质性而加入过多气泡

群,避免碳化作用影响气泡混合轻质土的耐久性。

由图6可知:随着气泡混合轻质土中气泡掺量的增加,试件碳化的时间缩短.其主要原因为碳化时间取决于试件内部的密实性,气泡掺量过多导致试件内部的孔隙率大,轻质土的致密性差,CO₂更容易在轻质土的内部扩散,从而缩短完全碳化时间。

2.4 气泡混合轻质土碳化寿命预测

碳化会降低结构的耐久性和使用寿命^[22],因此,研究气泡轻质土的碳化性能是为预测现有结构物在自然环境中的碳化寿命与碳化深度,或判断结构物是否需要修补以满足设计的服役寿命。

二氧化碳在气泡混合轻质土中是以扩散的方式渗透入内部,因此,二氧化碳在轻质土内部扩散的快慢直接影响轻质土的碳化速率^[23-24]。根据菲克第一定律可以推导出气泡轻质土的碳化速率系数

$$K = \sqrt{\frac{2D'C_0}{m_0}} \quad (2)$$

式中: D' 为碳化气泡轻质土中二氧化碳的有效扩散系数,mm²/a; C_0 为大气中的二氧化碳浓度; m_0 为单位体积气泡轻质土吸附二氧化碳的质量。

观察碳化速率系数 K 可知,同一配比气泡混合轻质土的 D' 与 m_0 相同,若已知实际环境下的二氧化碳浓度,可得到气泡轻质土在快速碳化试验与自然环境中的碳化关系:

$$\frac{K_{\text{自然}}}{K_{\text{快速}}} = \sqrt{\frac{C_{\text{自然}}}{C_{\text{快速}}}} \quad (3)$$

式中: $K_{\text{自然}}$, $K_{\text{快速}}$ 为自然环境和快速碳化试验中的碳化速率系数; $C_{\text{自然}}$, $C_{\text{快速}}$ 为自然环境和快速碳化试验中的二氧化碳浓度。

根据式(3),可由快速碳化试验中得到的碳化结果推算出自然条件下气泡混合轻质土的碳化深度,并以此为根据预测轻质土的碳化寿命.表8为不同配比的气泡混合轻质土在自然条件下的碳化寿命预测。

表8 自然条件下气泡混合轻质土碳化寿命预测

工况	快速碳化试验条件下的碳化深度/mm	T_{25}/a	T_{30}/a	T_{35}/a
A-1(原料土掺量为0%)	5.5	150	217	295
A-2(原料土掺量为18%)	9.6	49	71	97
A-3(原料土掺量为33%)	12.3	30	43	59
A-4(原料土掺量为46%)	15.7	18	26	36
B-1(粉煤灰与原料土掺量比为0)	10.0	45	65	89
B-2(粉煤灰与原料土掺量比为1:5)	6.3	115	165	225
B-3(粉煤灰与原料土掺量比为1:2)	5.5	150	217	295
B-4(粉煤灰与原料土掺量比为1:1)	4.8	198	285	388
C-1(气泡掺量为550 L/m ³)	6.5	108	155	211
C-2(气泡掺量为650 L/m ³)	8.5	63	91	123
C-3(气泡掺量为750 L/m ³)	13.3	25	37	50

注:(1) T_{25} , T_{30} , T_{35} 分别为自然条件下碳化深度达到25,30,35 mm所需要的时间;(2)自然条件下二氧化碳浓度取0.03%,快速碳化试验二氧化碳浓度取20%;(3)碳化寿命预测仅考虑碳化作用的影响,不考虑其他耐久性病害的影响。

由表8可知:原料土掺量为46%和气泡掺量为750 L/m³的气泡混合轻质土的 T_{25} , T_{30} , T_{35} 均不超过50 a,而且实际环境下气泡混合轻质土的养护条件更差,轻质土的碳化速率将更快,考虑其他耐久性危害的影响,其使用寿命将大幅缩短.因此,为使轻质土及其复合墙体的服役寿命满足设计使用年限,需严格控制原料土和气泡的掺入量,优化设计配比以提高其服役寿命.除此之外,还可以在复合墙体外表面涂装气

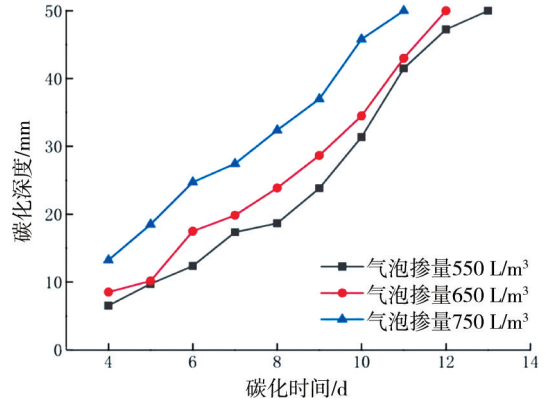


图6 不同气泡掺量的气泡混合轻质土的碳化深度

密性高的饰面材料以防止二氧化碳气体扩散入墙体内部,从而抑制轻质土的碳化。

3 结论

1)原料土掺量增加,气泡混合轻质土的碳化系数呈下降趋势,且碳化时间随原料土掺量的增加而缩短.建议实际工程中,原料土掺量控制在35%以下。

2)无论粉煤灰与原料土掺量的比例如何变化,试件的碳化系数均小于1,且随着粉煤灰掺量的增加,气泡轻质土的碳化系数以及碳化时间呈递增趋势.建议在实际工程中,可适当加入粉煤灰以提高轻质土的耐久性。

3)随着气泡掺量的增加,气泡轻质土的碳化系数呈递减趋势,其完全碳化所需时间越短。

4)可通过优化设计配比和提高养护环境等方式,使气泡混合轻质土及其复合墙体的服役寿命满足设计要求。

参考文献:

- [1] 潘金龙,钱臻旭,张莉亚,等.轻钢龙骨混凝土组合外挂墙板抗震性能试验研究[J].建筑结构,2021,51(12):49-55.
- [2] 李方贤,肖民,韩宇康,等.轻钢龙骨-泡沫混凝土复合墙板传热性能分析[J].武汉理工大学学报,2020,42(7):1-7.
- [3] 李方贤,李建新,肖民,等.轻钢龙骨-泡沫混凝土复合墙板的抗冲击性能[J].硅酸盐通报,2022,41(1):68-75.
- [4] 郭江然.浅论泡沫混凝土轻钢龙骨复合墙体的发展应用[J].砖瓦,2016(8):50-52.
- [5] 陈忠平,王树林.气泡混合轻质土及其应用综述[J].中外公路,2003,23(5):117-120.
- [6] 王春艳,侯天顺.气泡混合轻质量土及其在工程中的运用[J].公路,2007,52(4):38-41.
- [7] 刘鑫,孙东宁,许欣,等.气泡混合轻质填料路基的填筑质量测试与评估方法[J].西南交通大学学报,2021,56(3):526-533.
- [8] 王参庆,毕伟涛,马瑞杰,等.气泡混合轻质土路基在陕北淤地坝地基中的应用研究[J].公路,2016,61(8):12-17.
- [9] 高英力,肖敏强,关宏信.气泡混合轻质土及其在公路工程中的应用研究进展[J].硅酸盐通报,2016,35(8):2432-2438.
- [10] MATSUSHITA F, AONO Y, SHIBATA S. Carbonation degree of autoclaved aerated concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(11): 1741-1745.
- [11] 王甲春,钱澄,郑永尊.碳化对蒸压加气混凝土砌块变形和力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2011(11):48-50.
- [12] DOVEN A G, PEKRIÖGLU A. Material properties of high volume fly ash cement paste structural fill[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(6): 686-693.
- [13] JONES M R, MCCARTHY A. Heat of hydration in foamed concrete: effect of mix constituents and plastic density[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(6): 1032-1041.
- [14] 王宗建,孙志城,卢凉,等.聚丙烯纤维气泡混合轻质土抗压力学性能研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(4):1021-1029.
- [15] 朱伟,姬凤玲,李明东,等.轻质土密度、强度与材料组成的关系研究[J].岩土力学,2007,28(7):1411-1414.
- [16] 董素芬,黄智德.再生 EPS 颗粒对砖粉泡沫混凝土性能影响的研究[J].混凝土与水泥制品,2014(9):11-14.
- [17] 王伟,周航,李健,等.碳化过程对水泥土力学特性影响的研究与评价[J].铁道科学与工程学报,2021,18(12):3239-3246.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部.泡沫混凝土制品性能试验方法:JC/T 2357—2016[S].北京:中国建材工业出版社,2016.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.气泡混合轻质土填筑工程技术规程:CJJ/T 177—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [21] MA Y F, ZHANG J R, WANG L, et al. Probabilistic prediction with Bayesian updating for strength degradation of RC bridge beams[J]. Structural Safety, 2013, 44: 102-109.
- [22] CHEN G F, LYU Y D, ZHANG Y Z, et al. Carbonation depth predictions in concrete structures under changing climate condition in China[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 119: 104990.
- [23] LIU P, YU Z W, CHEN Y. Carbonation depth model and carbonated acceleration rate of concrete under different environment[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103736.
- [24] 张旭辉,刘博文,杨玲,等.不同温度和强度影响下混凝土碳化性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(24):110-115.