

基于足尺模型试验的泡沫轻质土加筋路堤变形研究

饶登宇¹, 王希希^{2*}, 周武召³, 郑国徽³, 褚耀光³, 方 程²

(1. 广州市高速公路有限公司, 广东 广州 510308; 2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074;
3. 重庆渝湘复线高速公路有限公司, 重庆 408515)

摘要: 泡沫轻质土及土工格栅在治理山区软土路基病害中均有重要作用, 得到了广泛的应用。单独应用泡沫轻质土存在很大的局限性, 将泡沫轻质土与土工格栅的优势结合起来, 对泡沫轻质土加筋路堤变形进行研究, 对公路工程有着重要的意义。通过开展足尺模型试验, 对泡沫轻质土路堤及泡沫轻质土加筋路堤变形进行研究, 结果表明: 使用泡沫轻质土加筋路堤比普通泡沫轻质土路堤可以减小沉降, 也更有效地减小路基土压力, 同时有助于基底土压力扩散, 解决基底应力分布不均匀问题。因此, 采用泡沫轻质土加筋路堤可以提高软土路基承载力, 增强路基的稳定性。

关键词: 泡沫轻质土; 加筋路堤; 土工格栅; 路堤沉降; 土压力; 足尺模型试验

中图分类号: U416 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0111-06

Study on the deformation of reinforced lightweight soil embankments based on full-scale model tests

RAO Dengyu¹, WANG Xixi^{2*}, ZHOU Wuzhao³, ZHENG Guohui³, CHU Yaoguang³, FANG Cheng²

(1. Guangzhou Expressway Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510308, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Chongqing Yuxiang Multi-line Expressway Co., Ltd., Chongqing 408515, China)

Abstract: Foam lightweight soil and geogrids play an important role in the treatment of soft soil subgrade diseases in mountainous areas. There are great limitations in the application of foamed lightweight soil alone. As a deepening and supplement to previous research, combining the advantages of foam lightweight soil and geogrids to study the deformation of reinforced foam lightweight soil embankments is of great significance for highway engineering. Full-scale model tests were conducted to study the deformation of foam lightweight soil embankments and reinforced foam lightweight soil embankments. The results show that using reinforced foam lightweight soil embankments can reduce settlement and more effectively decrease subgrade stress and earth pressure, while also helping to spread the base soil pressure and solve the problem of uneven distribution of base stress. Therefore, adopting reinforced foam lightweight soil embankments can improve the bearing capacity of soft soil subgrades and enhance the stability of the subgrade.

Key words: foamed lightweight soil; reinforced embankment; geogrid; embankment settlement; earth pressure; full-scale model test

0 引言

我国道路建设飞速发展, 山区、丘陵等基础建

设也在加速推进。在极端天气下, 路基滑坡、崩塌等现象频繁出现, 这使得道路建设中对路基的研究

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-05-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.014

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2022YFC3002603); 川渝重点研发计划(编号: CSTB2022TIAD-CUX0016); 新疆科技厅重点项目(编号: 2022B03033-2)

第一作者: 饶登宇, 男, 汉族, 1995年生, 工程师, 博士, 主要从事路桥工程研究工作, 广东省广州市增城区中新镇平中路9号福和电信大楼增天高速管理处(511375), raodengyu@qq.com。

通信作者: 王希希, 女, 汉族, 1998年生, 硕士研究生, 研究方向为路基、交通土建材料与灾害防治, 重庆市南岸区学府大道66号, 1490893697@qq.com。

引用格式: 饶登宇, 王希希, 周武召, 等. 基于足尺模型试验的泡沫轻质土加筋路堤变形研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 111-116.

RAO Dengyu, WANG Xixi, ZHOU Wuzhao, et al. Study on the deformation of reinforced lightweight soil embankments based on full-scale model tests[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 111-116.

还需进一步加强。土工合成材料因其具有高抗拉强度,在土体的变形影响下,筋材会产生拉应力,这样就能让路基的应力扩散,从而实现对接基的侧向变形进行约束,减少路基的沉降差异,从而提高路基整体稳定性^[1-4],在我国越来越多的工程中采用土工合成材料的方法来加固路基。杨涵翔^[5]通过实验和数值模拟研究了高边坡加筋土路堤的稳定性,研究表明,将土工格栅铺设在适当位置可以加固陡高路堤,减少竖向和水平变形。周健等^[6]、杨庆等^[7]通过室内模型试验对加筋土地基的加筋长度、布筋方式及地基破坏模式进行了研究,得到的结论是加筋效果随加筋长度的增加而越发明显。孙玲^[8]对高速公路加筋路堤的非对称试验段进行了现场调查,发现使用土工格栅可以有效减少路基的侧向形变,同时,缩小格栅的竖向间隔也有助于减少路基的水平位移。

泡沫轻质土因其质量轻、强度和容重可调等优点,目前已被广泛应用于软基处理、公路改扩建、路基坍塌后的应急抢险等^[9-14]。但单独应用泡沫轻质土仍然存在很大的局限性,当前较多使用添加纤维类材料增强泡沫轻质土结构的稳定性^[15-19],将其与土工膜、土工格栅、土工格室等土工合成材料进行联合加固的较少。基于以上土工合成材料的研究及思考,本文采用土工格栅加固的方法,建立泡沫轻质土加筋路堤的足尺试验模型并对其进行跟踪监测及分析,对其变形和工作特性进行研究。

1 泡沫轻质土加筋路堤试验模型设计

1.1 模型概况

足尺模型试验在室内实验室进行。泡沫轻质土足尺试验的模型总长是10 m,包括5 m加筋段和5 m未加筋段,宽为4.5 m,高为3.6 m。路堤浇筑完成后,在其顶部铺筑0.6 m厚沥青路面层。试验场地和模型平面如图1所示。

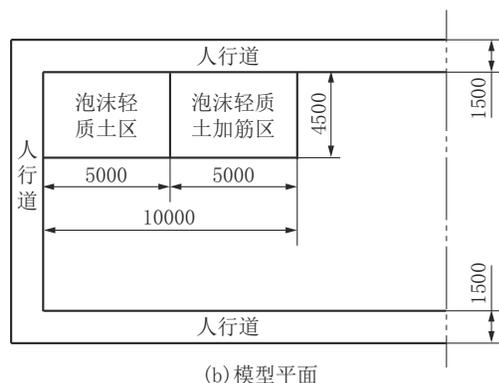
1.2 泡沫轻质土配合比设计

1.2.1 设计要求

泡沫轻质土由胶凝材料、水、发泡剂和掺合料等组成,根据不同组分的不同配比来调整其性能。泡沫轻质土实际应用到公路路堤的施工浇筑中,基本的物理力学性能要符合《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)^[20]的规定,规范值及用于本试验的泡沫轻质土材料的主要技术指标如表1所示。



(a) 试验场地



(b) 模型平面

图1 试验场地及模型平面

Fig.1 Experimental site and model plan

表1 基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indexes

项目	湿重度/ (kN·m ⁻³)	流动度/ mm	28 d无侧限抗 压强度/MPa	泡沫密度/ (kg·m ⁻³)
规范值	5.0~11.0	170~190	≥0.5	
试验值	5.5~6.5	170~190	≥1.0	40~60

1.2.2 原料选取

为确保施工质量,此次试验中浇筑选用发泡剂、水泥、水为原料,且不加掺和料。发泡剂选用HTW-1型复合发泡剂,在试验时稀释50倍,其性能指标如表2所示。水泥作为胶凝材料选用普通硅酸盐水泥,强度等级要求不低于32.5,实验使用的水泥主要性能指标如表3所示。水选用试验场地自来水,本次试验根据《现浇泡沫轻质土路基设计施工技术规程》(TJG F10-01—2011)^[21]的规定,计算泡沫轻质土的设计配合比。在此次试验中,使用的固体材料是纯水泥,即不添加掺合料。通过计算并结合水泥密度和泡沫密度,选择本次试验施工浇筑配合比如表4所示,其中水固比为1:0.65。

1.3 土工格栅加筋方案选定

在本试验中,选用的双向塑料土工格栅网孔尺

表 2 发泡剂性能指标

Table 2 Performance indicators of foaming agents

品种	发泡倍率	标准泡沫密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	标准沉降率/%	标准泡沫泌水率/%
复合型	928	50	≤ 3	14.5

表 3 试验使用的水泥性能指标

Table 3 Performance indicators of cement used in the experiment

项目	强度等级	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	凝结时间/ min	抗压强度/ MPa
试验值	42.5R	30~31	220~300	30

表 4 施工浇筑配合比

Table 4 Construction pouring mix ratio

材料	水泥/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	气泡群/ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$)
用量	360	234	650

寸为 36 mm×36 mm,力学性质技术指标如表 5 所示。在铺设土工格栅时,在竖直方向上土工格栅层间距应不小于单层土体的最小压实厚度。在一定情况下,筋材加筋的间距越小,土工格栅对土的束缚作用更强,也意味着土工格栅能更有效地控制土体的变形和位移,相应的加筋效果越好,这种束缚作用有助于增加路堤的稳定性并提高整体稳定性^[22]。

表 5 土工格栅技术指标

Table 5 Geograge technical indicators

项目	纵横向	纵横向 2%	纵横向 5%	横向屈 服伸长 率/%	纵向屈 服伸长 率/%
	抗拉度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	拉伸率抗拉 伸强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	拉伸率抗 拉强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		
指标	50	17.5	35	14	16

当对泡沫轻质土加筋路堤进行研究时,需要对土壤类型和特性、工程要求、地基条件和现有加筋方式进行综合考虑,在本足尺模型试验中,选择了如图 2 所示的等间距土工格栅的直立式路堤结构形式。

1.4 试验方法

足尺模型研究利用监测网络对加筋的泡沫轻质土混凝土路堤的构建及工作性能进行分析。通过安装土压力计及顶部安装水准仪监测路堤填筑时的应力、沉降变化,探讨路堤变形的规律。监测设备安装位置参见图 2。

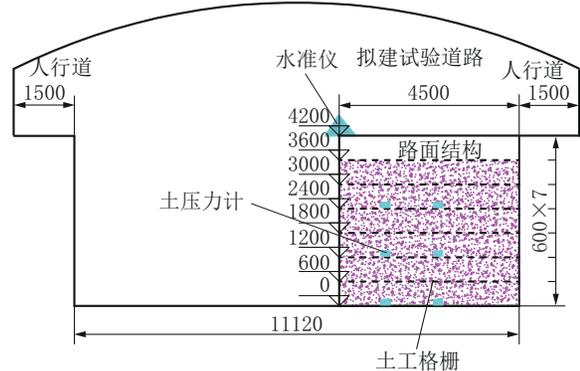


图 2 泡沫轻质土加筋路堤室内模型及监测设备位置

Fig.2 Indoor model of foamed light soil reinforced embankment and the location of the monitoring equipments

2 试验过程

泡沫轻质土加筋路堤的足尺模型试验,包括泡沫轻质土加筋路堤的浇筑、土工格栅铺设和监测设备的安装等,具体步骤如图 3 所示。

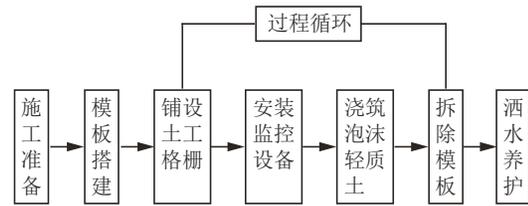


图 3 试验过程

Fig.3 Experimental process

首先根据是否加筋对试验场地进行划分和确定每次浇筑的泡沫轻质土高度,并进行模板的搭建。试验采取分层浇筑的方法,总共浇筑 12 层,单层浇筑厚度 0.3 m。由于轻质土在初凝前对侧面的支撑要求较高,所以在浇筑时速度不能过快。每层间隔时间 > 12 h,凝固坚硬后再进入下一层浇筑。浇筑过程如图 4 所示。

每层浇筑结束完成洒水养护,然后安装土工格栅和监测装置。由于轻质土有良好的自密实性,在施工工程中不需要进行振捣及压实。在加筋区,使用尺寸为 4 m×5 m 的双向塑料土工格栅进行铺设,格栅层之间的间距保持为 0.6 m,共铺设 5 层。土工格栅加筋区的应力主要集中在路堤的轴线方向,应将其铺展平整,并使用插钉进行张紧和固定,以保证其稳固和可靠。图 5 为土工格栅铺设示意图。

为了避免监测设备受到周围环境温度和湿度



图4 泡沫轻质土加筋路堤浇筑过程

Fig.4 Construction process of foam light soil reinforced embankment



图6 监测设备安装过程

Fig.6 Monitoring equipment installation process



图5 土工格栅铺设示意

Fig.5 Geogrid laying schematic diagram

区的表面中心线上测点进行数据整理,对比观察堤顶累计沉降量的变化情况如图7所示。

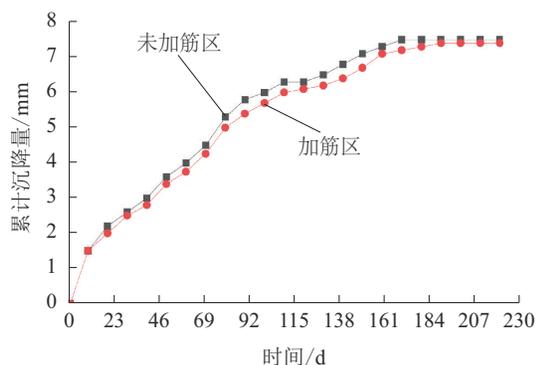


图7 加筋区和未加筋区累计沉降变化

Fig.7 Cumulative settlement changes in reinforced area and unreinforced area

的影响,将线缆进行防水处理后再将监测设备固定到基坑的内壁上,安装完毕及时进行工作性能的调试。在加筋区中部 1.2、2.4 m 和未加筋区中部的的位置安放了如图6所示的土压力计等设备。

3 试验结果分析

3.1 泡沫轻质土加筋路堤沉降变形分析

路堤沉降变形一般包含了地基沉降变形和填筑体沉降变形。因为本次试验在室内进行,场地地基结构比较紧密,同时地基土体性能良好,所以可忽略原有地基的沉降,着重对泡沫轻质土压缩性能造成的沉降量进行研究。通过对加筋区与未加筋

由图7可以看出,泡沫轻质土路堤加筋区和未加筋区累计沉降变化的曲线趋势基本相同,随着监测时间的推移沉降量都逐渐增加。在监测的中期,路堤的沉降速率逐渐变缓;在监测的后期,路堤累计沉降的变化速率逐渐降低最终达到稳定状态。总的来说,泡沫轻质土路堤无论加筋与不加筋,总沉降量都较小,在监测时间即工后 220 d 的总沉降量只有 8 mm,这说明泡沫轻质土自立性能良好且压缩性较小。

在普通填料路堤铺设土工格栅,可以提高其承载力,减小差异沉降,从而提高路基的稳定性。然而对泡沫轻质土,由于其压缩性较小和整体性较强

的特点,在使用土工格栅的情况下,监测时间内的加筋区轻质土的沉降总量始终小于未加筋区的沉降总量,说明使用土工格栅对泡沫轻质土路堤降低沉降量及不均匀沉降的方面有一定效果。

3.2 泡沫轻质土加筋路堤土压力分析

根据图8所示,在泡沫轻质土初期浇筑施工时,从整体来看,在路堤底部和高度为1.2 m处的土压力表现出阶梯式增长,其中路堤中心的土压力值最大,加筋区的土压力值最小。在浇筑施工期间,各个监测点的压力值都快速上升,主要是泡沫轻质土早期的含水率高、湿重度大,施工时测点位所受上覆荷载持续增加。当完成浇筑后,各个测点最大土压力值为16.6 kPa。在浇筑施工阶段,测点的压力值出现回落的现象,主要是因为泡沫轻质土出现了初期凝固、硬化使得容重减小。随着路堤固结硬化的过程,路堤自重降低,从而使得各测点处的土压力降低,最终从湿容重转变为干容重,使得土压力值趋于平稳。

在浇筑阶段,可以观察到加筋区基底的土压力值与未加筋区的差别不大,而土压差值随浇筑高度的增大也在逐渐增大,最后加筋区的土压比未加筋区小2 kPa。这表明土工格栅的设置对土压力的传递与扩散是有利的,并有助于实现土压力的均匀分布。另外,基底加筋区土压力扩散效果比1.2 m高度处加筋区的土压力传递与扩散效果强,是由于浇筑的厚度和加筋层的数量等因素的影响所致。这也说明格栅的受力情况和铺设的层数对于加筋效果也有着很大的影响。

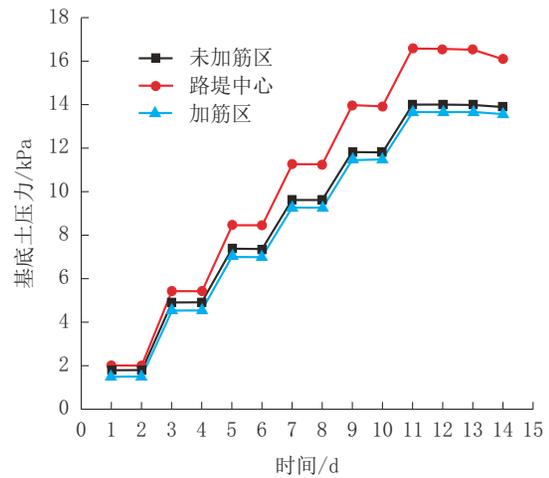
4 结论

本文根据室内建立的泡沫轻质土加筋路堤足尺模型进行观测,对比分析了泡沫轻质土路堤加筋区和未加筋区的土压力、沉降差异。得到以下主要结论:

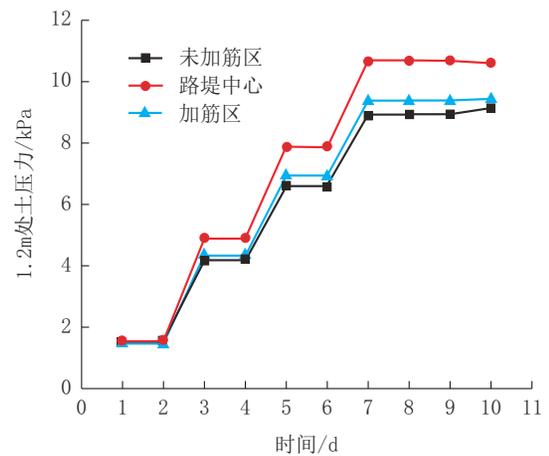
(1)在使用土工格栅的情况下,监测时间内的加筋区轻质土的沉降总量始终小于未加筋区的沉降总量,说明使用土工格栅对泡沫轻质土路堤降低沉降量及不均匀沉降的方面有一定效果。

(2)在泡沫轻质土中使用土工格栅对其土压力的扩散是有利的,同时浇筑的厚度和加筋层的数量等因素也对加筋效果有重要影响。

(3)经过对泡沫轻质土路堤变形研究可以发现,在泡沫轻质土路堤中使用土工格栅可以减少沉



(a) 基底应力变化



(b) 1.2m处应力变化

图8 不同位置应力变化曲线

Fig.8 Stress change curves at different positions

降、扩散土压力、提高泡沫轻质土路堤承载力、增强稳定性。

参考文献 (References):

- [1] 孙润生. 土工格栅在拓宽公路中加固效果及其应用技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
SUN Runsheng. Study on reinforcement effect and application technology of the geogrid in the highway widening [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [2] 罗烈日. 超高填方加筋路堤工作性状及稳定性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
LUO Lier. Study on the working behavior and stability of ultra-high geosynthetic-reinforced embankment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [3] Li B. Study on settlement deformation characteristics of reinforced soil subgrade [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.
- [4] 孙彦峰, 骆瑞萍, 陈保国. 桩承式加筋路堤时效性数值模拟研究

- [J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(5):56-58,65.
SUN Yanfeng, LUO Ruiping, CHEN Baoguo. Numerical simulation on time-dependent behavior of geo-synthetics pile-supported reinforced embankment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(5):56-58,65.
- [5] 杨涵翔.加筋陡坡高路堤沉降变形与稳定性研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
YANG Hanxiang. Research on settlement and deformation and stability of reinforced high steep embankment [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019
- [6] 周健,孔祥利,王孝存.加筋地基承载力特性及破坏模式的试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(9):1265-1269.
ZHOU Jian, KONG Xiangli, WANG Xiaocun. Bearing capacity behaviours and failure models of reinforced ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(9):1265-1269.
- [7] 杨庆,张克,栾茂田,等.土工格栅加筋砂土地基性能模型试验研究[J].大连理工大学学报,2006,46(3):390-394.
YANG Qing, ZHANG Ke, LUAN Maotian, et al. Study of model test on performance of soil foundation reinforced by geogrids [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(3):390-394.
- [8] 孙玲.黄土地区非对称加筋路堤作用机理及变形特性研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
SUN Ling. Study on mechanism and deformation behavior of asymmetric reinforced-embankment in loess area [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [9] KimTae-Hyung, KimTae-Hoon, KangGi-Chun. Performance evaluation of road embankment constructed using lightweight soils on an unimproved soft soil layer [J]. Engineering Geology, 2013, 160.
- [10] 于君彦.滨莱高速公路改扩建泡沫轻质土路基研究[D].济南:山东大学,2018.
YU Junyan. Research on foamed light weight soil subgrade of Binlai Expressway reconstruction and expansion project [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [11] 杨琪.气泡轻质土在山区公路拓宽应用中的力学特性研究 [D].绵阳:西南科技大学,2017.
YANG Qi. Experimental study on the mechanical characteristics of lightweight soil in highway widening application in mountainous area [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [12] 杨琪,张友谊,刘华强,等.一种气泡轻质土路基受载-破坏模型试验[J].岩土力学,2018,39(9):3121-3129.
YANG Qi, ZHANG Youyi, LIU Huaqiang, et al. Model test on load-failure of a foamed lightweight soil subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(9):3121-3129.
- [13] 吴初平.泡沫轻质土在高速公路改扩建工程中的应用[J].湖南交通科技,2018,44(4):4-7.
WU Chuping. Application of foam light soil in reconstruction and expansion of expressway [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2018,44(4):4-7.
- [14] 王鹏程.泡沫轻质土在道路扩建工程中的应用[J].工程建设与设计,2022(16):188-190.
WANG Pengcheng. Application of foam light soil in road expansion project [J]. Engineering Construction and Design, 2022 (16):188-190.
- [15] 李天,王智,周涛涛.泡沫混凝土的研究应用现状[J].混凝土,2019(1):26-29.
LI Tian, WANG Zhi, ZHOU Taotao. Research and application of foam concrete [J]. Concrete, 2019(1):26-29.
- [16] Li Z, Yuan H, Gao F. A feasibility study of low cement content foamed concrete using high volume of waste lime mud and fly ash for road embankment [J]. Materials, 2022,15(1):86.
- [17] 徐志辉,韦江雄,李方贤,等.利用陶瓷废料制备加气混凝土的研究[J].新型建筑材料,2013(1):48-51.
XU Zhihui, WEI Jiangxiang, LI Fangxian, et al. Utilizing ceramic waste for autoclaved aerated concrete [J]. New Building Materials, 2013(1):48-51.
- [18] Jose S K, Soman M, Evangeline Y S. Quarry fines: an ideal material for the manufacture of foamed concrete [J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2021,22(2):241-247.
- [19] 蒋俊,李军,牛云辉,等.矿物掺合料对超轻泡沫混凝土气孔结构及性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2019(6):59-63.
JIANG Jun, LI Jun, NIU Yunhui, et al. Effects of Mineral Admixture on Air-void Structure and Performance of Ultra-lightweight Foamed Concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(6):59-63.
- [20] JTG/T 3610—2019,公路路基施工技术规范[S].
JTG/T 3610—2019, Technical specifications for construction of highway subgrades [S].
- [21] TJG F10-01—2011,现浇泡沫轻质土路基设计施工技术规范[S].
TJG F10-01—2011, Technical specifications for design and construction of cast-in-situ foamed lightweight soil subgrade [S].
- [22] JTG/T D32—2012,公路土工合成材料应用技术规范[S].
JTG/T D32—2012, Technical specification for application of geosynthetic in highway [S].

(编辑 荐华)