

DOI: 10.11779/CJGE20230955

碱渣轻质土路基填筑应用试验研究

刘松玉^{1,2}, 王正成^{*1}, 吴 晓¹, 杜广印¹, 汪建斌³, 陈加富⁴, 江舜根⁵

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2. 南京现代综合交通实验室, 江苏 南京 211100; 3. 广东盛瑞科技股份有限公司, 广东 广州 511447; 4. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004; 5. 连云港市高速公路建设指挥部, 江苏 连云港 222006)

摘要: 碱渣是氨碱法制纯碱过程中产生的废渣, 其大量堆积往往导致土壤、空气和水体污染。为实现碱渣的再利用, 提出了利用碱渣废弃物制备碱渣轻质土 (A-LS) 的技术思路与方法, 并通过室内试验和现场填筑试验论证了该方法的可行性。通过系统试验分析, 得出了 A-LS 的材料配比及其制备方法; 通过抗压强度试验、直剪试验、CBR 试验、干湿循环试验、冻融循环试验和现场填筑试验, 对 A-LS 的力学特性、耐久性和路用性能进行了系统研究。研究结果表明: A-LS 的抗压强度、割线模量、抗剪强度和 CBR 均随着湿密度的增加而增大, 亦随着龄期的延长而增大。A-LS 抵抗干湿循环和冻融循环的能力强, 具有良好的耐久性。将 A-LS 应用于连云港至宿迁高速公路徐圩至灌云段 X204 桥头, 现场试验表明 A-LS 的抗压强度、CBR、回弹模量和弯沉均满足设计及规范要求。A-LS 可大量消纳碱渣废弃物, 节约 70% 的水泥, 减小碳排放, 具有工艺简单、经济环保、密度和强度可调节、适用范围广等特点, 具有很好的推广应用前景。

关键词: 碱渣; 碱渣轻质土; 力学性能; 耐久性; 路基填筑

中图分类号: TU525 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)10-2019-11

作者简介: 刘松玉(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊地基处理、原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

Experimental research on application of alkali residue-based lightweight soil subgrade filling

LIU Songyu^{1,2}, WANG Zhengcheng¹, WU Kai¹, DU Guangyin¹, WANG Jianbin³, CHEN Jiafu⁴, JIANG Shungen⁵

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing Modern Multimodal Transportation

Laboratory, Nanjing 211100, China; 3. Guangdong Shengru Technology Co., Ltd., Guangzhou 511447, China; 4. Jiangsu Traffic

Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China; 5. Lianyungang Expressway Construction Command Headquarters,

Lianyungang 222006, China)

Abstract: The alkali residue (AR) is a waste byproduct generated during the soda production process using the ammonia alkali method, leading to significant environmental pollution in soil, air and water as a result of its extensive accumulation. The proposed technology and method for producing alkali residue-based lightweight soil (A-LS) with AR is designed to facilitate the efficient reuse of AR. The feasibility of the proposed method is substantiated through the indoor trials and field-filling tests. This study involves an experimental analysis to determine the material proportion and preparation method for A-LS. The compressive strength tests, shear tests, CBR tests, dry-wet cycle tests, freeze-thaw cycle tests and field filling tests are conducted to investigate the mechanical properties, durability and road performance of A-LS. The findings demonstrate that the compressive strength, secant modulus, shear strength and CBR increase with the increase of wet density. These properties exhibit an upward trend with the extension of age. A-LS exhibits remarkable resistance to dry-wet and freeze-thaw cycles, boasting excellent durability. A-LS is applied to the X204 bridgehead of Xuwei-Guanyun section of Lianyungang-Suqian Expressway. The field-filling tests demonstrate that A-LS meets the design and specification requirements in terms of the compressive strength, CBR, resilient modulus and deflection. A-LS demonstrates exceptional capacity to absorb significant quantities of AR waste, resulting in a remarkable reduction of 70% in the usage of the ordinary Portland cement. This substantial reduction in ordinary

项目基金: 国家自然科学基金面上项目 (42277146); 江苏省交通工程建设局科技项目 (7621009140); 江苏省研究生实践创新计划项目 (SJCX23_0074)

收稿日期: 2023-09-27

*通信作者 (E-mail: 230219237@seu.edu.cn)

Portland cement signifies a substantial decrease in carbon emissions. A-LS boasts several noteworthy attributes, encompassing simple process, economic and environmental protection, adjustable density and strength, and wide application range. A-LS exhibits a good application prospect.

Key words: alkali residue; alkali residue-based lightweight soil; mechanical property; durability; subgrade construction

0 引言

碱渣是氨碱法制纯碱 (Na_2CO_3)^[1]过程中产生的废渣, 主要来源于氨碱法蒸馏回收氨气的过程, 每生产 1 t 纯碱会产生 0.3 t 碱渣^[2]。据统计, 中国每年排出的碱渣高达 600~1200 万 t, 碱渣堆放问题难以解决。地表堆积和排入海中是当前碱渣的主要处理方式, 碱渣的这种处理方式会造成严重的资源浪费和环境污染^[1]。

学者们针对碱渣的物理力学特性及其应用开展了研究。碱渣主要由纳米级碳酸钙通过结合和搭接形成的多孔碳酸钙和二水石膏颗粒构成, 具有发达的孔隙结构, 吸水性强。在碱渣利用方面, 碱渣可作为原材料制备水泥^[3]和砂浆^[4], 基于碱渣的特殊化学成分, 也被用作土壤改良剂, 处理膨胀土^[5]、软土和污染土等^[6-7]。利用碱渣、粉煤灰、石灰、粒化高炉矿渣 (GGBS) 和砂制备碱渣土可应用于路基工程^[8]。或将碱渣、粉煤灰和饱和卤水混合制成浆体回填到废弃盐腔, 可同时解决碱渣堆放和盐腔存在的地质隐患^[9]。未经压滤的液态碱渣亦可直接使用, 与液态粉煤灰混合制备碱渣土^[10]。此外, 碱渣也可以作为脱硫剂和吸附剂^[11-12]。然而, 这些利用方法消纳碱渣量有限, 亟需为碱渣的大量使用寻找新途径。

泡沫轻质土, 亦称气泡混合轻质土, 是一种新型建筑材料^[13-14], 具有轻质性、密度和强度可调节性、自流性、直立性、生产流程简单、施工方便、成本低、保温隔热性能和耐久性好等优势, 已大量用于新建及改扩建道路的路基填筑和桥背回填等工程^[15-17]。

常规泡沫轻质土的原材料为水泥, 造价较高, 碳排放量高, 工程应用受到一定限制。利用废弃物碱渣代替部分水泥制备泡沫轻质土并应用于道路工程, 不仅可以大量消纳碱渣减少污染, 又能有效缓解工程缺土难题, 降低工程造价。

本文提出一种碱渣轻质土 (A-LS) 技术原理与施工工艺。通过室内试验, 研究 A-LS 的力学性能及耐久性, 具体包括抗压强度、割线模量、抗剪强度、CBR、干湿强度系数和耐久性系数。通过现场试验, 研究 A-LS 的路用性能, 提出 A-LS 的现场制备及填筑工艺, 重点分析 A-LS 的路用性能指标, 包括抗压强度、CBR、回弹模量和弯沉, 为碱渣轻质土技术应用推广提供依据。

1 材料和试验方法

1.1 材料

A-LS 的主要材料包含水泥 (OPC)、GGBS、碱渣 (AR)、水和泡沫。水泥为南京海螺水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥 (P.O 42.5R)。GGBS 为 S95 级, 密度为 2.91 kg/m^3 , 比表面积为 $441 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。碱渣来源于江苏连云港碱业有限公司。发泡剂为广东盛瑞科技股份有限公司生产的复合增强发泡剂, 水为自来水。固体材料的化学组成见表 1。

表 1 材料的主要化学组成

Table 1 Main chemical compositions of solid materials 单位: %

| 材料 | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | Cl | SO ₃ |
|------|-------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|-----------------|
| 水泥 | 62.44 | 20.81 | 5.69 | 1.82 | 4.26 | 0.02 | 3.11 |
| GGBS | 40.14 | 30.61 | 15.23 | 8.01 | 0.92 | 0.03 | 2.11 |
| 碱渣 | 74.09 | 4.08 | 1.62 | 6.73 | 0.72 | 2.46 | 9.63 |

针对连云港碱渣的重金属及腐蚀性进行检测, 检测结果如表 2 所示。分析可知, 碱渣浸出液中危害成分浓度皆小于限值, pH 值 (8.79) 也不在腐蚀性范围 ($\text{pH} \leq 2$ 或 $\text{pH} \geq 12.5$)。碱渣符合环保要求, 用作路基填料时, 不会对环境造成影响。

表 2 碱渣浸出液测试结果

Table 2 Test results of alkali residue leaching solution

| 序号 | 危害成分项目 (无机元素及化合物) | 碱渣测试 | |
|----|---------------------------|---|----------|
| | | 浓度限值 | 结果 |
| 1 | 铜 (以总铜计) | 100 | 0.0025 |
| 2 | 锌 (以总锌计) | 100 | 0.0022 |
| 3 | 镉 (以总镉计) | 1 | 0.0015 |
| 4 | 铅 (以总铅计) | 5 | 0.0044 |
| 5 | 总铬 | 15 | 0.0034 |
| 6 | 铬 (六价) | 5 | <0.004 |
| 7 | 烷基汞 | — | — |
| 8 | 汞 (以总汞计) | 0.1 | <0.0002 |
| 9 | 铍 (以总铍计) | 0.02 | <0.00003 |
| 10 | 钡 (以总钡计) | 100 | 0.0291 |
| 11 | 镍 (以总镍计) | 5 | 0.00083 |
| 12 | 总银 | 5 | 0.000016 |
| 13 | 砷 (以总砷计) | 5 | 0.0002 |
| 14 | 硒 (以总硒计) | 1 | 0.0013 |
| 15 | 无机氟化物 (不包括氟化钙) | 100 | — |
| 16 | 氰化物 (以 CN ⁻ 计) | 5 | — |
| 17 | 腐蚀性 (pH 值) | 腐蚀性范围: $\text{pH} \leq 2$ 或 $\text{pH} \geq 12.5$ | 8.79 |

1.2 A-LS 的配合比

为了研究 A-LS 的力学性能及耐久性, 考虑湿密度的影响, 设计了 5 种配合比, 编号为 A-LS_x, _x 代表湿密度。基于式 (1) ~ (3) 计算出材料的用量, 如表 3 所示。

表 3 A-LS 室内试验配合比
Table 3 Laboratory test mix proportions of A-LS

| 试件编号 (A-LSx) | 湿密度/ (kg·m ⁻³) | 水固比 J | 材料配比/ % | 碱渣/ (kg·m ⁻³) | GGBS/ (kg·m ⁻³) | 水泥/ (kg·m ⁻³) | 水/ (kg·m ⁻³) | 泡沫/ (kg·m ⁻³) |
|-----------------|-------------------------------|----------|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| A-LS500 | 500 | 0.6 | | 87.01 | 116.01 | 87.01 | 174.02 | 35.95 |
| A-LS600 | 600 | 0.6 | 碱渣: 30% | 106.35 | 141.79 | 106.35 | 212.69 | 32.82 |
| A-LS700 | 700 | 0.6 | GGBS: 40% | 125.68 | 167.58 | 125.68 | 251.36 | 29.70 |
| A-LS800 | 800 | 0.6 | 水泥: 30% | 145.02 | 193.36 | 145.02 | 290.03 | 26.58 |
| A-LS900 | 900 | 0.6 | | 164.35 | 219.14 | 164.35 | 328.71 | 23.45 |

$$\frac{m_o}{\rho_o} + \frac{m_g}{\rho_g} + \frac{m_a}{\rho_a} + \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_w}{\rho_w} = 1 \quad , \quad (1)$$

$$m_w = J \times (m_o + m_g + m_a) \quad , \quad (2)$$

$$m_f = \left(\frac{m_t}{\rho} - \frac{m_o}{\rho_o} - \frac{m_g}{\rho_g} - \frac{m_a}{\rho_a} - \frac{m_w}{\rho_w} \right) \times \rho_f \quad . \quad (3)$$

式中: m_o , m_g , m_a , m_f 和 m_w 分别为水泥、GGBS、碱渣、泡沫和水的质量 (kg); ρ_o , ρ_g , ρ_a , ρ_f , ρ_w 分别为水泥、GGBS、碱渣、泡沫和水的密度 (kg/m³); J 为水固比; ρ 为湿密度 (kg/m³); m_t 为 A-LS 浆料的总质量 (kg)。

1.3 试验内容及方法

(1) 抗压试验: 标准养护 7, 14, 28 d, 参照《气泡混合轻质土填筑工程技术规程: CJJ/T 177—2012》开展抗压试验^[18]。

(2) 直剪试验: 浇筑成环刀试件 ($\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$), 标准养护 7, 14, 28 d, 法向应力为 100, 200, 300, 400 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min。

(3) CBR 试验: 浇筑成 CBR 试件 ($\phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$), 标准养护 28 d, 贯入速度为 1 mm/min。

(4) 干湿循环和冻融循环试验: 参照《蒸压加气混凝土试验方法: GB/T 11969—2020》^[19]开展干湿循环和冻融循环试验, 循环次数为 15 次。在道路工程中需考虑泡沫轻质土的抗浮稳定性^[20], A-LS500 在工程中不常用, 不针对其开展耐久性试验。

2 A-LS 的力学性能及耐久性

2.1 A-LS 的力学性能

(1) 抗压强度

图 1 给出了 A-LS 的抗压强度 q_u 随湿密度的变化规律。可以发现, A-LS 的抗压强度随湿密度的增加而增大。增大湿密度是提高 A-LS 抗压强度的主要途径。分析其原因在于, 湿密度增大的实质是增加固体材料用量和降低泡沫掺量; 当湿密度由 500 kg/m³ 增大至 900 kg/m³ 时, 水泥和碱渣用量增大 88.89%, GGBS 用量增大 88.9%, 泡沫用量降低 34.77%。A-LS 的抗压强度由其骨架决定, 具体包含骨架强度和骨架体积

占比 (骨架体积占比=1-孔隙率), 骨架强度相同的情况下, 骨架体积占比越高, A-LS 的抗压强度越大。此外, 随着养护龄期的延长, 抗压强度也呈增大的趋势。

《公路路基设计规范: JTGD30—2015》^[20]中规定, 用于公路路基的泡沫轻质土抗压强度应满足表 4 的规定。可见, A-LS500 可用作高速公路和一级公路的路堤填料, 其余 4 种 A-LS 可作为路床填料。

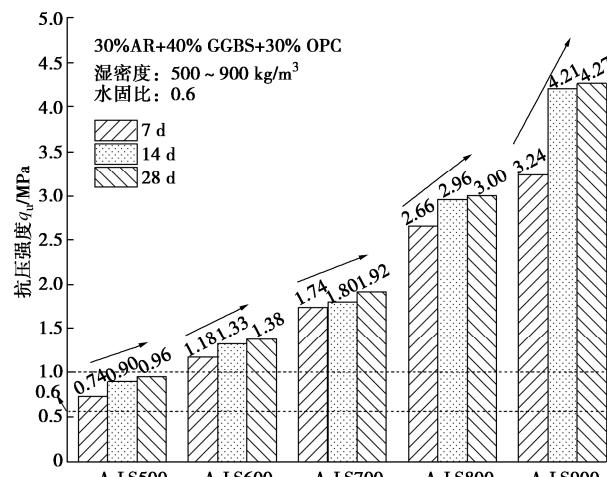


图 1 A-LS 的抗压强度

Fig. 1 Compressive strengths of A-LS

表 4 泡沫轻质土的抗压强度要求^[20]

Table 4 Compressive strength requirements for foamed lightweight soil^[20]

| 路基部位 | 28 d 无侧限抗压强度/MPa | | |
|---------|------------------|-----------|------|
| | 高速、一级公路 | 二级及二级以下公路 | |
| 路床 | 轻、中及重交通 | ≥0.8 | ≥0.6 |
| | 特重、极重交通 | ≥1 | |
| 上路堤、下路堤 | ≥0.6 | ≥0.5 | |

(2) 割线模量

基于抗压试验, 获得 A-LS 的应力应变曲线, 计算得出 A-LS 的割线模量, 如图 2 所示。可以发现, 割线模量随湿密度的增加而增大。当湿密度从 700 kg/m³ 增大至 800 kg/m³ 时, 割线模量增大较显著。此外, 割线模量随着龄期的延长而增大。

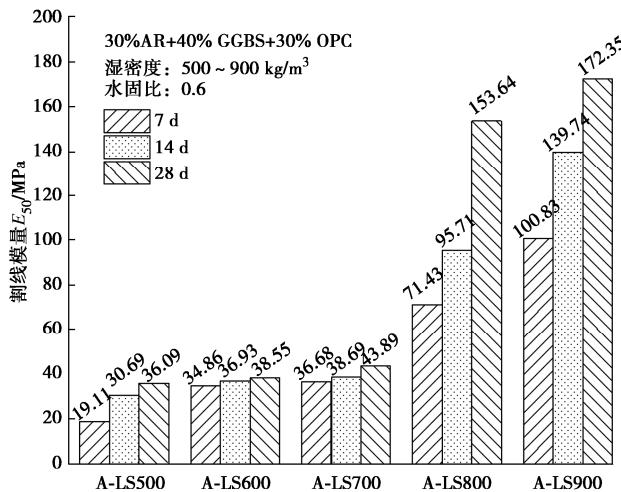


图 2 A-LS 的割线模量

Fig. 2 Secant moduli of A-LS

(3) 抗剪强度

基于直剪试验获得 A-LS 的应力应变曲线, A-LS700 (28 d) 的应力应变曲线如图 3 所示。可以看出, A-LS 的剪应力随着应变的增加而增大, 剪应力在起始阶段增大速率高, 随后呈减小趋势。应力应变曲线呈硬化型, 试件发生塑性变形。在同一剪切位移下, 试件的剪应力随着法向应力的增加而增大。

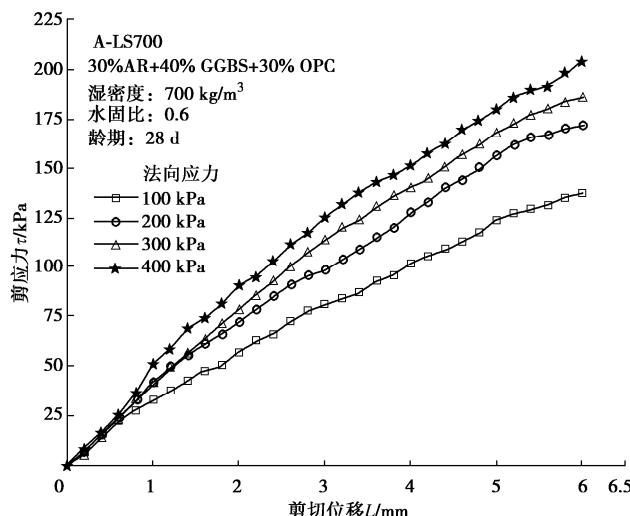


图 3 A-LS700 的剪切变形与剪应力间的关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of A-LS700 at 28 d

基于应力-应变曲线, 得出各法向应力下 A-LS 的抗剪强度, 如图 4 所示。可以看出, 湿密度恒定时, A-LS 的抗剪强度随着法向应力的增加而增大, 且两者近似满足线性关系, 符合库仑定律, 抗剪强度随着湿密度的增加而增大。

基于库仑定律 ($\tau = \sigma \tan \varphi + c$) 得出 A-LS 的黏聚力 c 和内摩擦角 φ , A-LS 的黏聚力如图 5 所示。可以看出, 黏聚力随着湿密度的增加而增大, 且二者近似满足线性关系。

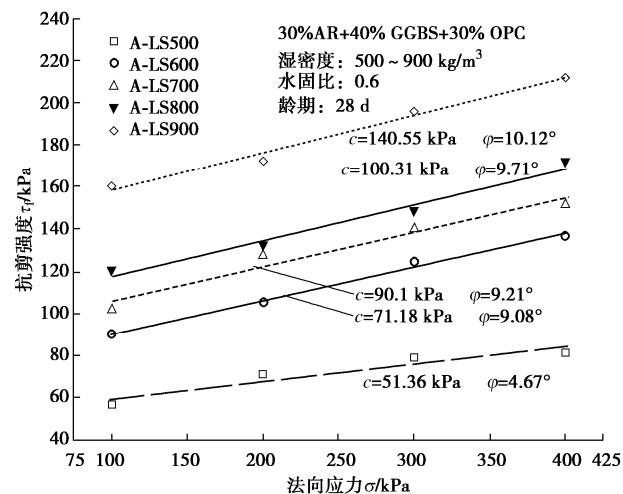


图 4 A-LS 的抗剪强度

Fig. 4 Shear strengths of A-LS

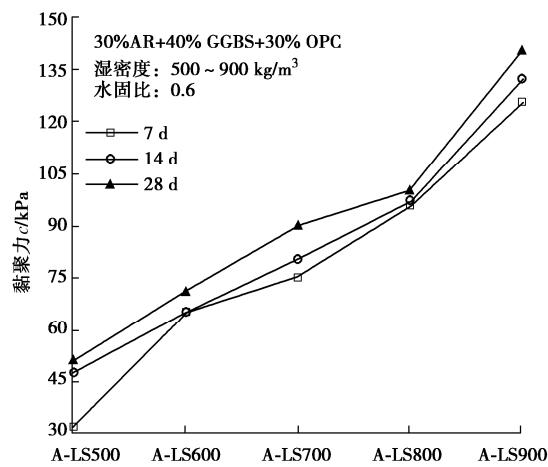


图 5 A-LS 的黏聚力

Fig. 5 Cohesions of A-LS

A-LS 的内摩擦角如图 6 所示。分析可得, A-LS 的内摩擦角随着湿密度和龄期的增加而增大。当湿密度 $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ 时, 龄期对内摩擦角的影响较大。

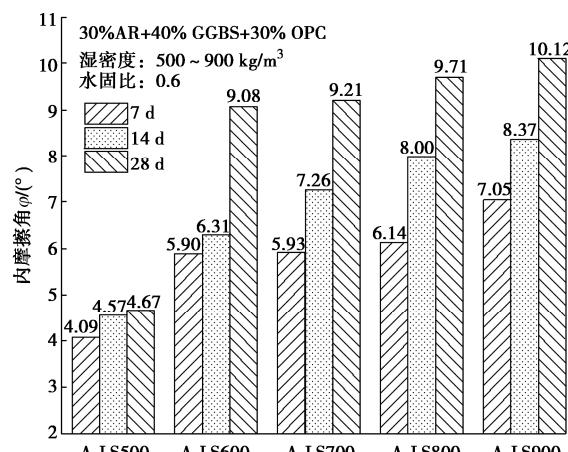


图 6 A-LS 的内摩擦角

Fig. 6 Internal friction angles of A-LS

(4) CBR

CBR 是路基填料承载力的重要指标, CBR 试验结果如图 7 所示。可以发现, A-LS 的 CBR 值随着湿密度的增加而增大, 两者近似满足线性关系。A-LS 的 CBR=25.82%~117.49%, 根据《公路路基设计规范: JTG D30—2015》^[20]要求, 高速公路和一级公路上路床和下路床的 CBR 分别不小于 8%, 5%, 上路堤和下路堤的 CBR 分别不小于 4%, 3%, A-LS 的 CBR 远大于规范要求。可见 A-LS 均满足高速公路和一级公路的路基填料要求。

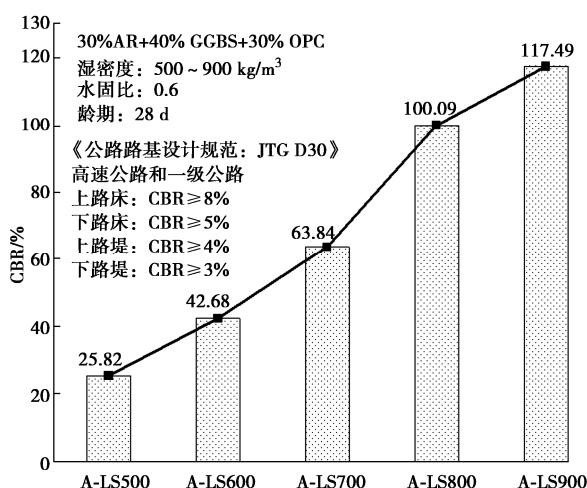


图 7 A-LS 的 CBR

Fig. 7 CBRs of A-LS with different wet densities

2.2 A-LS 的耐久性

(1) 干湿循环

干湿循环前后 A-LS 的抗压强度如图 8 所示。可以看出, A-LS 的抗压强度随着湿密度的增加而增大。经历 15 次干湿循环后, A-LS 的抗压强度有所降低。

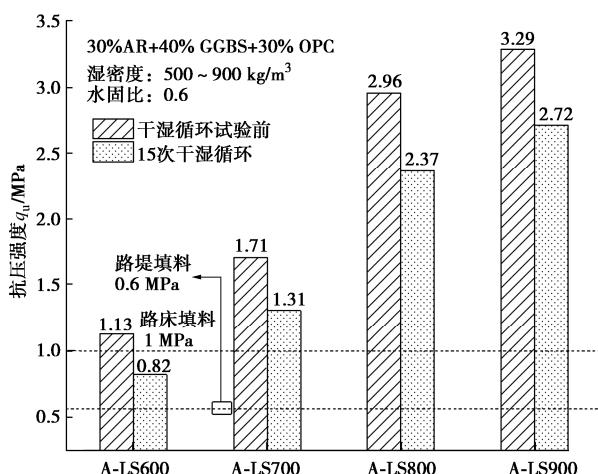


图 8 干湿循环后 A-LS 的抗压强度

Fig. 8 Compressive strengths of A-LS after dry-wet cycle

根据干湿循环前后 A-LS 的抗压强度, 通过式(4)计算得出干湿强度系数^[19, 21]。

$$k = \frac{q_u'}{q_u} \quad (4)$$

式中: q_u' 为经历 15 次干湿循环后 A-LS 的抗压强度 (MPa); q_u 为干湿循环试验前的抗压强度 (MPa)。

A-LS 的干湿强度系数如图 9 所示。可以看出, 随着湿密度增大, A-LS 的干湿强度系数逐渐增大。常规泡沫轻质土的密度为 600, 700, 800 kg/m³ 时, 其干湿强度系数分别为 0.67, 0.71, 0.72^[21]。相同密度下, A-LS 的干湿强度系数明显高于常规泡沫轻质土, 即其抵抗干湿循环能力强于常规泡沫轻质土。

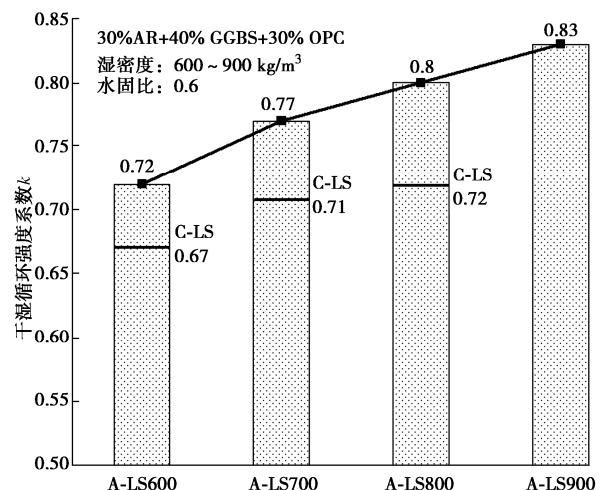


图 9 A-LS 的干湿强度系数

Fig. 9 Dry-wet strength coefficients of A-LS

(2) 冻融循环

冻融循环前后 A-LS 的抗压强度如图 10 所示。A-LS 的抗压强度随着湿密度的增加而增大。经历 15 次冻融循环后, A-LS 的抗压强度略有降低, A-LS500、A-LS600、A-LS700、A-LS800 和 A-LS900 的抗压强度分别降低 13.65%, 12.3%, 11.22%, 8.16%, 4.45%。经历 15 次冻融循环后, A-LS 的抗压强度皆大于 1 MPa, 依然满足高速公路路基填料的强度要求。

基于式(5)可计算得出耐久性系数, 该系数可以表征泡沫轻质土的耐久性^[22-23]。

$$L_i = \frac{q_u''}{q_u} \quad (5)$$

式中: L_i 为耐久性系数; q_u'' 为泡沫轻质土经历冻融循环后的抗压强度 (MPa); q_u 为冻融循环试验前的抗压强度 (MPa)。

图 11 给出了 A-LS 的耐久性系数。经历 15 次冻融循环后, A-LS600、A-LS700、A-LS800 和 A-LS900 的耐久性系数分别为 0.88, 0.89, 0.92, 0.96, 可见 A-LS 具有较高的耐久性系数。泡沫轻质土内部的闭合孔隙有效地缓解水结冰产生的冰胀压力, 提高了泡沫轻质土的抗冻性能^[24]。

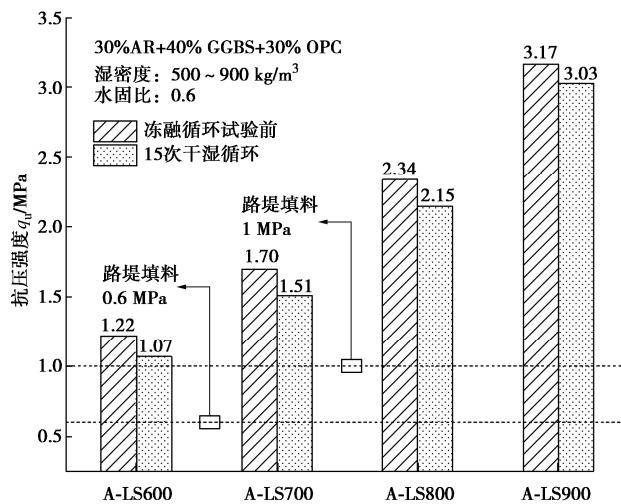


图 10 冻融循环后 A-LS 的抗压强度

Fig. 10 Compressive strengths of A-LS after freeze-thaw cycle

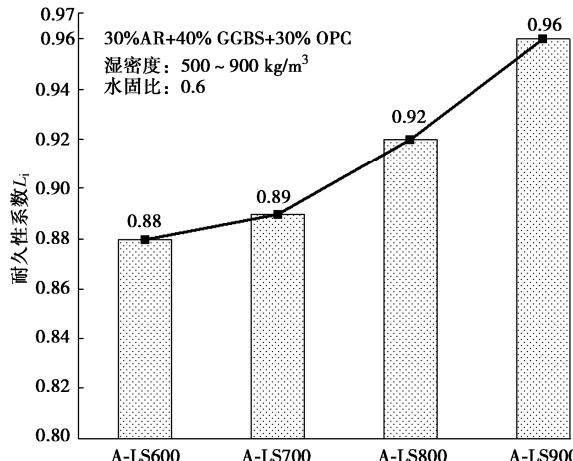


图 11 A-LS 的耐久性系数

Fig. 11 Durability coefficients of A-LS after freeze-thaw cycle

常规泡沫轻质土的密度为 600, 700, 800 kg/m³ 时, 经历 15 次干湿循环后, 其耐久性系数分别为 0.96, 0.92, 0.95^[24]。可以看出, A-LS 与常规泡沫轻质土的耐久性系数差异较小, 其抵抗冻融破坏的能力与常规泡沫轻质土类似。

2.3 室内试验结果与规范值对比分析

将 7 d 和 28 d 抗压强度、CBR、干湿循环和冻融循环前后的抗压强度指标与相关规范要求进行对比分析, 见表 5。对比分析表明, A-LS 具有良好的路用性能。

3 现场填筑应用研究

3.1 工程概况

A-LS 现场填筑试验段位于连云港至宿迁高速公路徐圩至灌云段 X204 支线上跨桥桥头, 如图 12 所示。地基土层自上而下分别为素填土(厚 0.6 m)、黏土(厚 2.5 m)、淤泥(厚 8.8 m)、粉质黏土(厚 1.1 m)等。

地基采用双向搅拌粉喷桩处理, 桩径 50 cm, 桩间距 1.2 m, 桩长 12.5 m, 处理宽度为 31.8 m。



图 12 连云港至宿迁高速公路徐圩至灌云段 X204 支线上跨桥桥头

Fig. 12 Crossing bridge head on X204 branch line of Xuwei-Guanyun section of Lianyungang-Suqian Expressway

根据室内试验结果, 现场填筑采用的 A-LS 配合比见表 6, 碱渣、GGBS 和水泥的质量比为 3:4:3, 与室内试验一致。根据工程实际需求, 对 A-LS 的湿密度和制备方案进行了相应调整。碱渣来源于江苏连云港碱业有限公司, 为原状碱渣; GGBS 为 S95 级。

3.2 A-LS 的现场制备及浇筑工艺

采用湿法制浆制备 A-LS, 详细制备方法及浇筑工艺如图 13 所示。具体步骤: ① 将连云港碱厂碱渣运至搅拌场, 如图 14 所示; ② 采用湿法制备碱渣浆, 借助原位搅拌机对未分选碱渣在粗浆池内搅拌制成碱渣浆, 如图 15 所示, 搅拌时长约 70 s, 并将碱渣浆的密度控制为 1198 kg/m³; ③ 卸入精浆池, 再借助搅拌机对精浆池内的浆料进行搅拌; ④ 搅拌均匀后通过泥浆泵泵入高搅拌缸; ⑤ 搅拌均匀后卸入低搅拌缸, 再经泥浆泵泵送至前端搅拌缸; ⑥ 借助智能发泡机发泡, 与浆液充分拌合制成 A-LS, 再经泥浆泵泵送至浇筑断面。

浇筑完成后的 A-LS 路基断面如图 16 所示。靠近 X204 支线上跨桥桥头端, A-LS 路基的顶面宽 12 m, 底面宽 23.2 m, 路基填筑高度为 4.23 m, 共分 7 层浇筑, 历时 26 d 完成。

3.3 A-LS 填筑路基性能

(1) 抗压强度

A-LS 共分 7 层浇筑, 每层浇筑完成 3 d 后, 借助钻机取芯, 芯样直径为 100 mm, 高度约为 500 mm, 并切割成直径和高度均为 100 mm 的标准圆柱芯样(图 17)进行抗压试验。

表5 室内试验结果与规范值对比分析

Table 5 Comparative analysis of laboratory test results and standard values

| 路用指标 | | 实测值 | 规范值 | 是否满足规范要求 | 参考依据 |
|----------------------|---------|--------------------|----------------|--------------------------|---|
| 抗压强度/ MPa | A-LS500 | 7 d 28 d | 0.74 0.96 | ≥ 0.3 ≥ 0.6 | 是 是 |
| | A-LS600 | 7 d | 1.18~3.24 | ≥ 0.5 | 是 |
| | A-LS700 | | | | CJJ/T 177—2012 ^[18] , JTG D30 —2015 ^[20] |
| | A-LS800 | 28 d | 1.38~4.27 | ≥ 1 | |
| | A-LS900 | | | | |
| CBR/% | A-LS500 | | 上路床 $\geq 8\%$ | | |
| | A-LS600 | | 下路床 $\geq 5\%$ | | |
| | A-LS700 | 25.82%~ 117.49% | 上路堤 $\geq 4\%$ | 是 | JTG D30—2015 ^[20] |
| | A-LS800 | | | | |
| | A-LS900 | | 下路堤 $\geq 3\%$ | | |
| 干湿循环 抗压强度/ MPa | A-LS600 | 循环前 循环后 | 1.13 0.82 | ≥ 0.6 ≥ 0.6 | 是 是 |
| | A-LS700 | 循环前 | 1.71~3.29 | ≥ 1 | 是 |
| | A-LS800 | 循环后 | 1.31~2.72 | ≥ 1 | 是 |
| | A-LS900 | | | | |
| | A-LS600 | 循环前 | 1.22~3.17 | ≥ 1 | 是 |
| 冻融循环 抗压强度/ MPa | A-LS700 | 循环后 | 1.07~3.03 | ≥ 1 | 是 |
| | A-LS800 | | | | CJJ/T 177—2012 ^[18] , JTG D30 —2015 ^[20] |
| | A-LS900 | | | | |

表6 现场填筑 A-LS 配合比

Table 6 A-LS mix proportions for on-site filling

| 编号 | 填筑位置 | 湿密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 设计抗压强度/ MPa | 水固比 J | 材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | | 浆料密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | | |
|---------|------|---|----------------|------------|--|------------------|--|------|------|
| | | | | | 碱渣浆 | GGBS 水泥 矿粉 | | | |
| A-LS650 | 路床 | 650 | 1 | 0.6 | 356.19 | 150.87 | 112.30 | 1198 | 1589 |
| A-LS580 | 路堤 | 580 | 0.6 | 0.6 | 314.82 | 132.50 | 99.64 | 1198 | 1589 |

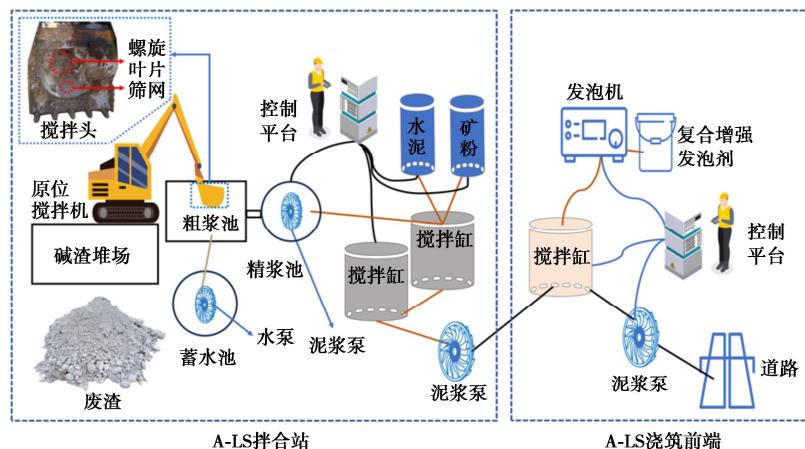


图13 现场 A-LS 的制备及浇筑方法

Fig.13 Preparation and pouring method of A-LS on site



图14 未分选的碱渣

Fig.14 Unassorted alkali residue



图15 湿法制浆

Fig. 15 Preparation of alkali residue slurry by stirring in water

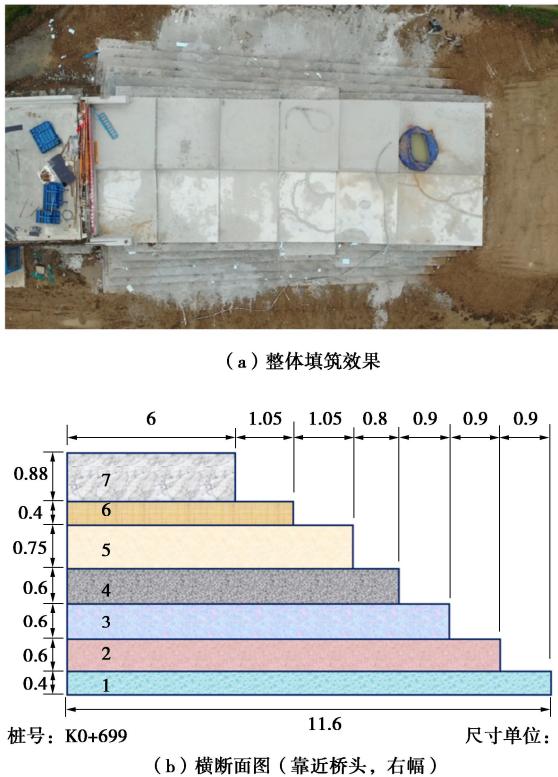


图 16 A-LS 浇筑完成

Fig. 16 Completion of A-LS pouring

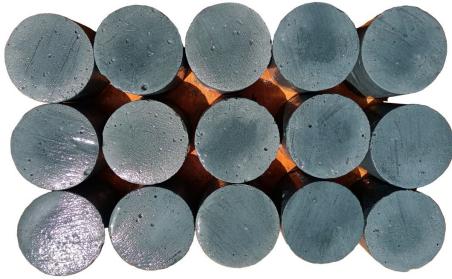


图 17 标准圆柱芯样 (第 7 层)

Fig. 17 Standard cylindrical core samples (7th layer)

A-LS 的抗压强度如图 18 所示。可以看出, 第 1~4 层 A-LS 芯样的 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 0.43~0.62 MPa 和 0.62~0.91 MPa。第 5~7 层 A-LS 芯样的 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 0.74~1.15 MPa 和 1.36~1.59 MPa, 28d 平均抗压强度为 1.44 MPa。均满足《公路路基施工技术规范: JTG/T3610—2019》^[25]要求。

进一步分析 A-LS 抗压强度的增长规律, 以第 2 层为例, 其抗压强度随着龄期的增长如图 19 所示。分析可得, A-LS 的抗压强度随着龄期的延长而增大。

(2) CBR

A-LS 全部浇筑完成养护 10 d 后, 参照《公路路基路面现场测试规程: JTG 3450—2019》^[26]在路基顶部采用承载板法进行 CBR 试验。由于道路纵坡为 3%, 沿着道路轴向, A-LS 顶面设置了 6 级台阶, 每级台阶检测 1 次, 共检测 6 个点。A-LS 的 1 级台阶荷载压强

贯入量关系曲线如图 20 所示。可以看出, 随着贯入量的增加, 荷载压强逐渐增大。

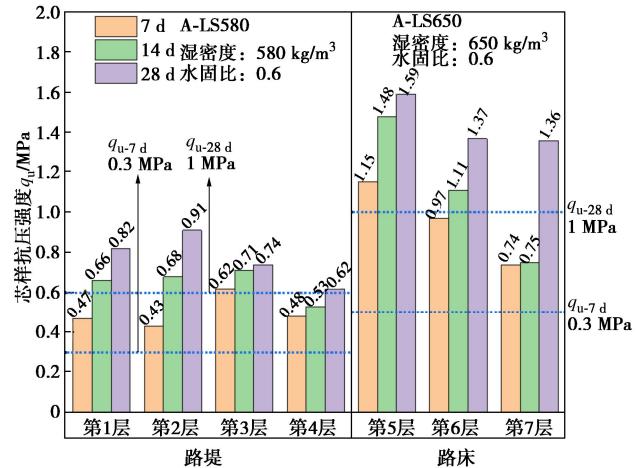


图 18 A-LS 芯样的抗压强度

Fig. 18 Compressive strengths of A-LS core samples

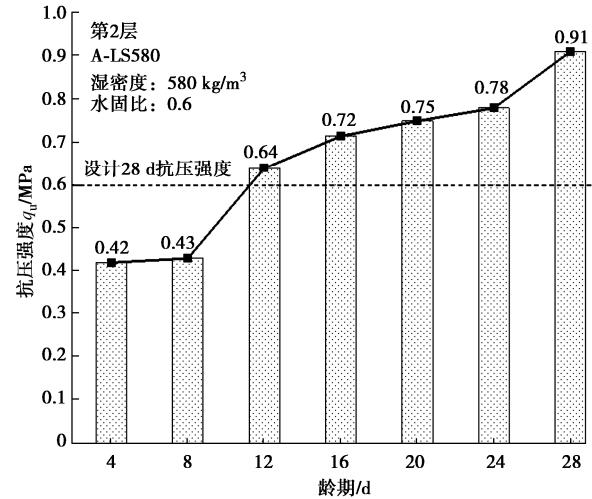


图 19 A-LS 的抗压强度增长规律 (第 2 层)

Fig. 19 Growth laws of compressive strength of A-LS (2nd layer)

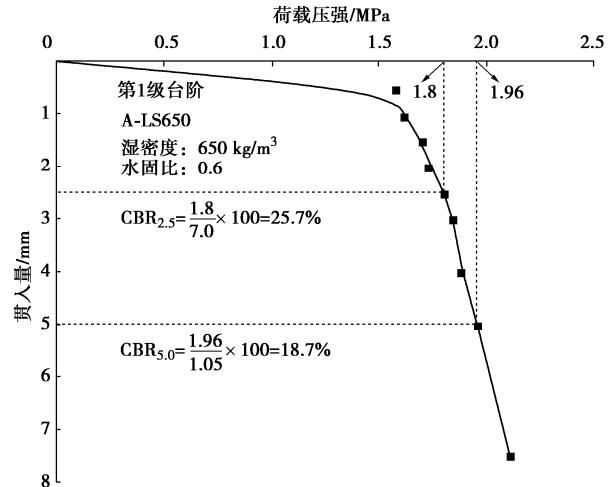


图 20 A-LS 的荷载压强-贯入量关系曲线

Fig. 20 Load pressure-penetration relationship curves of A-LS

CBR 测试结果如图 21 所示。可以发现, 各级台阶的 CBR 波动幅度较小, 处于 23%~27.6%, 完全满足《公路路基设计规范: JTGD30—2015》^[20]要求。

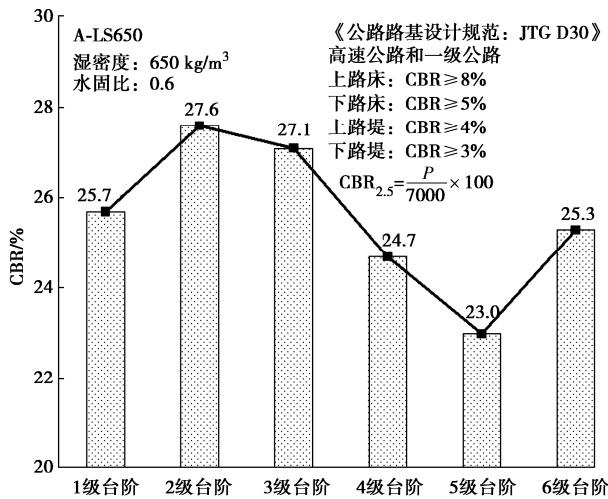


图 21 A-LS 的 CBR
Fig. 21 CBRs of A-LS

(3) 回弹模量

参照规范《公路路基路面现场测试规程: JTGD30—2017》^[26], 针对顶层 A-LS 的 6 级台阶开展回弹模量试验。A-LS 的回弹模量如图 22 所示。可以看出, A-LS 的回弹模量为 274.5~648.11 MPa, 平均回弹模量为 472.06 MPa, 满足《公路沥青路面设计规范: JTGD50—2017》^[27]对路基顶面回弹模量的要求 (40~70 MPa)。

(4) 弯沉

采用落锤式弯沉仪 (FWD) 针对 A-LS 路基顶面弯沉进行测试, 共计测量 20 个点。A-LS 的弯沉测试结果见表 7。以贝克曼梁法为准, A-LS 路基弯沉平均值和代表值分别为 47.38 (0.01 mm), 52.2 (0.01 mm), 设计文件中要求弯沉应小于 100 (0.01 mm)。可见, A-LS 的弯沉满足设计要求。

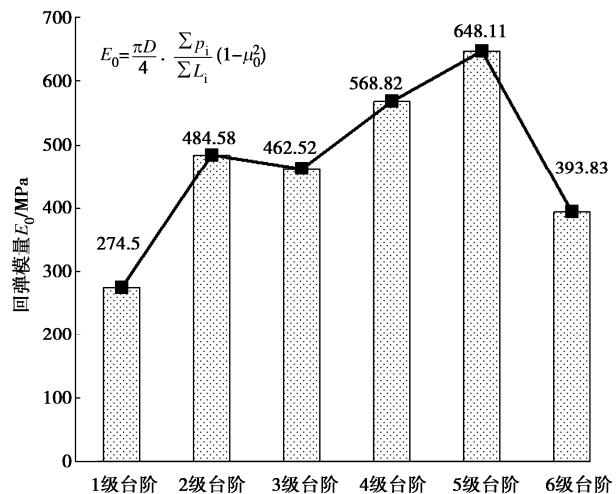


图 22 A-LS 的回弹模量
Fig. 22 Resilience modulus of A-LS

表 7 A-LS 路基的弯沉

Table 7 Deflections of A-LS subgrade

| 方法 | 均值 (0.01 mm) | 标准差 | 变异系数 | 代表值 (0.01 mm) |
|--------|-----------------|------|------|------------------|
| 落锤式弯沉仪 | 49.55 | 2.94 | 5.94 | 54.41 |
| 贝克曼梁法 | 47.38 | 2.92 | 6.17 | 52.2 |

现场填筑测试结果汇总于表 8。可以看出, A-LS 的抗压强度、CBR、回弹模量和弯沉均满足设计及规范要求。

4 讨论

考虑到材料价格波动, 常规泡沫轻质土的工程造价约为 330~430 元/t, A-LS 的工程造价约为 230~300 元/t。可见, 采用碱渣和 GGBS 替代部分水泥可大幅度降低轻质土的工程造价, 具有显著的经济效益。与此同时, 碱渣可被大规模的消纳, 有效解决了碱渣堆存的难题, 避免了碱渣对环境造成的污染; 水泥被替代后, 可有效降低碳排放; 可见 A-LS 具有显著的环境效益。虽然 A-LS 的优势显著, 但考虑到碱渣的运输成本, 碱渣的运输距离不宜超过 200 km。远离碱

表 8 A-LS 的路用指标验收

Table 8 Acceptance of road indexes of A-LS

| 路用指标 | 实测值 | 设计值 | 规范要求 | 满足要求 | 参考依据 |
|--------------|---------------------------------|----------------------------------|------------|------|--------------------------------|
| 抗压强度/MPa | 路堤 7 d: 0.43~0.62 | ≥ 0.3 | ≥ 0.3 | 是 | |
| | 路堤 28 d: 0.62~0.91 | ≥ 0.6 | ≥ 0.6 | 是 | CJT/T 177—2012 ^[18] |
| | 路床 7 d: 0.74~1.15 | ≥ 0.5 | ≥ 0.5 | 是 | JTG D30—2015 ^[20] |
| | 路床 28 d: 1.36~1.59 | ≥ 1 | ≥ 1 | 是 | |
| CBR/% | A-LS 顶面: 23%~27.6% | 路床: $\geq 8\%$ 路堤: $\geq 4\%$ | $\geq 8\%$ | 是 | JTG D30—2015 ^[20] |
| | A-LS 顶面: 均值: 47.38 代表值: 52.2 | <100 (路床顶面) | 不大于设计值 | 是 | 设计文件 |
| 回弹模量/MPa | A-LS 顶面: 274.5~648.11 | 50 | 40~70 | 是 | JTG D50—2017 ^[27] |
| 弯沉 (0.01 mm) | A-LS 顶面: 均值: 47.38 代表值: 52.2 | | | | JTG 3450—2019 ^[26] |

厂的区域, 可考虑使用当地固体废弃物来替代部分水泥。

5 结 论

提出了 A-LS 及其制备方法, 对其力学性能和耐久性进行了室内试验, 并进行了现场路基填筑试验, 主要得到以下 5 点结论。

(1) A-LS 室内制备方法: 材料准备及性能测试、配合比设计、发泡及性能测试、浆料拌合、浇筑成型和脱模养护。30%水泥+40%GGBS+30%碱渣, 水固比 0.6、湿密度 600 kg/m^3 时, A-LS 的 28 d 抗压强度为 1.38 MPa, 满足路基填筑应用要求。

(2) A-LS 的抗压强度、割线模量、CBR、抗剪强度、黏聚力和内摩擦角都随着湿密度的增加而增大; 随着龄期的延长也会提升 A-LS 的力学性能。

(3) 干湿和冻融循环后, A-LS 的抗压强度有所下降, 但仍然满足规范对路基填料的要求。A-LS 具有较高的干湿强度系数, 优于常规水泥轻质土; 抗冻融劣化的能力强。

(4) A-LS 现场制备方法: 准备材料、湿法制浆、加入水泥和 GGBS、加入泡沫、浆料拌合、泵送浆料和填筑养护。采用湿法制浆, 借助原位搅拌头直接利用未分选的原状碱渣制备 A-LS, 避免了干燥、粉化和筛分等复杂程序, 具有低成本、操作简便和高效等优势。现场填筑路基取芯抗压强度、CBR、回弹模量和弯沉均满足设计及规范要求。

(5) 提出的 A-LS, 利用未分选碱渣和 GGBS 替代 70%水泥, 具有工艺简单、经济环保、密度和强度可调节、适用范围广等优点。可替代传统泡沫轻质土, 在路基填筑工程中推广应用。

关于 A-LS 的微观机制在另文中介绍。

参 考 文 献:

- [1] GOMES H I, MAYES W M, ROGERSON M, et al. Alkaline residues and the environment: a review of impacts, management practices and opportunities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 3571-3582.
- [2] UÇAL G O, MAHYAR M, TOKYAY M. Hydration of alinite cement produced from soda waste sludge[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **164**: 178-184.
- [3] XU D, FU P, NI W, et al. Characterization and hydration mechanism of ammonia soda residue and Portland cement composite cementitious material[J]. *Materials (Basel)*, 2021, **14**(17): 4794.
- [4] ZHANG Z, ZHU Y C, YANG T, et al. Conversion of local industrial wastes into greener cement through geopolymers: a case study of high-magnesium nickel slag[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **141**: 463-471.
- [5] 孙树林, 郑青海, 唐俊, 等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(6): 1608-1612. (SUN Shulin, ZHENG Qinghai, TANG Jun, et al. Experimental research on expansive soil improved by soda residue[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(6): 1608-1612. (in Chinese))
- [6] GUO L, AI S, TANG M, et al. Effect of alkali slag on cadmium bioavailability in the contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology (China)*, 2011, **34**(4): 100-103.
- [7] HUANG M, LU F P, GUO Y W. Application research of caustic sludge, dredged sediment and coal ash in urban landscape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **26**(2): 748-753.
- [8] MA J, YAN N, ZHANG M, et al. Mechanical characteristics of soda residue soil incorporating different admixture: reuse of soda residue[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(14): 5852.
- [9] 冀国栋, 杨春和, 刘伟, 等. 粉煤灰增强回填碱渣工程特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(8): 2169-2176, 2183. (JI Guodong, YANG Chunhe, LIU Wei, et al. An experimental study on the engineering properties of backfilled alkali wastes reinforced by fly ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(8): 2169-2176, 2183. (in Chinese))
- [10] BAI X, MA J, LIU J, et al. Field experimental investigation on filling the soda residue soil with liquid soda residue and liquid fly ash[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2021, **30**(4): 502-517.
- [11] YU S, WU Z. Comparative study on desulfurization performance of several alkaline waste slags[J]. *Environ Eng*, 2002, **20**: 42-44.
- [12] RUI Y, LIANG Y, WANG Y. Wet simulation flue gas desulfurisation with soda-ash dregs absorbent[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, **29**: 21-25.
- [13] YOUSSEF M B, LAVERGNE F, SAB K, et al. Upscaling the elastic stiffness of foam concrete as a three-phase composite material[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, **110**: 13-23.
- [14] YUANLIANG X, CHAO Z, CHUN C, et al. Effect of superabsorbent polymer on the foam-stability of foamed concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, **127**: 104398.
- [15] GENG Y J, LI S C, HOU D S, et al. Fabrication of superhydrophobicity on foamed concrete surface by GO/silane coating[J]. *Materials Letters*, 2020, **265**: 127423.
- [16] RICCIOTTI L, OCCHICONE A, PETRILLO A, et al. Geopolymer-based hybrid foams: lightweight materials from

- a sustainable production process[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **250**: 119588.
- [17] STOLZ J, BOLUK Y, BINDIGANAVILE V. Mechanical, thermal and acoustic properties of cellular alkali activated fly ash concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, **94**: 24-32.
- [18] 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. (Technical Specification for Foamed Mixture Lightweight Soil Filling Engineering: CJJ/T 177—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 蒸压加气混凝土性能试验方法: GB/T 11969—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. (Test Methods of Autoclaved Aerated Concrete: GB/T 11969—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese))
- [20] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [21] SHI X N, HUANG J J, SU Q. Experimental and numerical analyses of lightweight foamed concrete as filler for widening embankment[J]. Construction and Building Materials, 2020, **250**: 118897.
- [22] QUE Y, ZHANG H, ZHU T, et al. Amending foamed
- lightweight soil with tailings sand for embankment applications: physical properties, durability, and microstructure[J]. Construction and Building Materials, 2022, **350**: 128912.
- [23] XU H Y, WANG Z J, SHAO Z M, et al. Experimental study on durability of fiber reinforced concrete: effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber[J]. Construction and Building Materials, 2021, **306**: 124867.
- [24] WU J Q, LV C, PI R D, et al. The stability and durability of silt-based foamed concrete: a new type of road engineering material[J]. Construction and Building Materials, 2021, **304**: 124674.
- [25] 公路路基施工技术规范: JTG/T 3610—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Technical Specifications for Construction of Highway Subgrades: JTG/T 3610—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese))
- [26] 公路路基路面现场测试规程: JTG 3450—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Field Test Methods of Highway Subgrade and Pavement: JTG 3450—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese))
- [27] 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017. (Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017. (in Chinese))

第三十一届全国土工测试学术研讨会（第1号通知） (中国·新疆·乌鲁木齐 2025年7月25日)

为了推动“一带一路”战略实施, 促进新疆地区的岩土工程技术发展, 加强国内外专家学者的交流与合作, 第三十一届全国土工测试学术研讨会将于2025年7月25日—7月27日在乌鲁木齐举行, 本次会议主题为“携手共建“一带一路”, 促进新疆岩土发展”。会议将汇聚国内外著名专家, 进行特邀报告和主题演讲, 并展示最新的土工测试设备和技术。我们诚挚邀请国内外的专家、学者和工程技术人员参与此次会议, 共同探讨解决新疆及“一带一路”沿线岩土工程难题的创新技术和解决方案。

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 中国水利学会岩土力学专业委员会。

会议主题: 冻土地质条件勘察和基本性质测试技术; 盐渍土原位测试和基本性质测试技术; 风积沙基本性质测试技术; 冻融环境下土工物理模型试验技术; 盐胀环境下土工物理模型试验技术; 地震活动区土工原位测试技术; 膨胀土性质测试技术; 粗粒土性质测试技术; 混合土性质测试技术; 土工测试新

型技术设备。

论文征集: 欢迎就本届研讨会交流内容提交论文, 论文将通过组委会审查、专家遴选推荐到《岩土工程学报》(增刊)(EI收录)、《新疆大学学报(自然科学版)》、《水力发电》等期刊发表。论文篇幅一般在5页以内, 格式请参考《岩土工程学报》。此外部分论文会被推荐到《应用基础与工程科学学报》(EI收录)、《长江科学院院报》、《人民长江》和《水利水电快报》进行发表, 其中《应用基础与工程科学学报》、《长江科学院院报》和《人民长江》会以专栏形式发表, 《水利水电快报》会以专刊形式发表。论文征集邮箱: geotest2025@126.com。2024年11月30日前提交论文全文, 2024年12月31日前返回论文录用通知, 2025年2月31日前返回修改后论文。

联系方式: 地址: 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市水磨沟区华瑞街777号新疆大学(博达校区)建筑工程学院; 邮编: 830047; 联系人: 刘欢 15241828240, 秦溯 15160925936, 王存根 15299051092。

(会议组委会 供稿)