

路桥过渡段工程渣土改良成泡沫聚合土力学性能研究与应用

朱 杰

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000]

摘 要:为缓解传统搭板结构路桥过渡段差异沉降引起的桥头跳车问题,将工程渣土资源化利用技术引入泡沫聚合土制备中,通过室内试验研究其工程特性与力学特性,结合具体工程实例对路基路面的承载力、强度及内部完整性进行全面评价。研究结果表明:泡沫聚合土具有良好的抗折强度、抗压强度、弹性模量、耐干湿循环性能和抗压耐疲劳性能,采用泡沫聚合土作为台后填料,可显著减少路桥过渡段的差异沉降。相比常规泡沫轻质土,泡沫聚合土不仅降低水泥用量,节约造价,具有显著的经济性和节能环保效益。研究结论有助于提高路桥结构的稳定性和行车安全性,为类似工程提供参考和借鉴。

关键词:路基工程;路桥过渡段;泡沫聚合土;力学性能;节能环保

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0271-05

0 引 言

泡沫聚合土指原材料采用胶凝材料加原料土的一种泡沫轻质土,通过将原料土制成泥浆并与胶凝材料外加剂、泡沫进行充分混合后经硬化形成的轻质材料。泡沫聚合土通过引入工程渣土资源化利用技术,助力消耗工业固废和工程渣土,降低水泥用量和节约工程造价,同时解决泡沫轻质土换填弃方问题和水泥用量高成本增加等问题。为缓解传统搭板结构路桥过渡段差异沉降引起的桥头跳车问题,路桥过渡段回填采用砂土或轻质材料,以减小工后沉降差异^[1,2]。党海明等^[3]分析了路桥过渡段病害产生的成因,采用在桥台台背回填片石的技术措施,提高路基整体稳定性。采用 PHC 管桩复合地基对路桥过渡段进行路基处理,降低不均匀沉降的成效明显,施工速度快且工程造价低^[4]。肖源杰^[5]等通过埋设智能颗粒传感器实时监测道砟颗粒的运动,获得铁道道砟颗粒运动及能量特征的变化规律。为了克服路桥显著的沉降差异,通过刚度协调分析方法和三维有限元模型,栾利强等^[6]分析了不同因素作用路桥过渡段路面性能的变化规律,建立了结构组合和力学指标疲劳寿命预估模型。泡沫轻质土作为台背回填

的轻型材料,对于减少路桥过渡段沉降差异有明显的作用。对于泡沫轻质土的研究,包括采用 X 射线计算断层扫描技术研究泡沫轻质土内部孔隙分布状态和形态特征^[7],泡沫轻质土的细观结构^[8],掺加粉质黏土或粉煤灰的泡沫轻质土材料性能试验研究等^[9]。

文献调研结果表明,路桥过渡段是不均匀沉降的关键工点,国内外学者对于缓解因差异沉降引起的桥头跳车等问题提出了不同的处理方案。但是对于路桥过渡段泡沫聚合土的相关研究,并未见相关的文献。因此,本文对泡沫聚合土路基填料进行室内试验,研究其工程特性与力学特性,为后期数值模拟计算提供参数依据。泡沫聚合土路基浇筑完成后养护阶段,综合运用无损检测与无损检测技术,对路基路面的承载力、强度及内部完整性进行全面评价,为类似工程提供有益的参考和借鉴。

1 泡沫聚合土路基填料工程特性及力学参数

现浇泡沫聚合土所用原料土主要为项目沿线施工产生的淤泥质土、黏土等废弃土。试验配制不同配合比泡沫聚合土材料进行力学性能试验,得到抗压强度、抗折强度、弹性模量等参数。采用无侧限抗压强度试验及三轴压缩试验得到泡沫聚合土工程特性及力学参数,如图 1 所示。

根据图 1 可得以下结论:

收稿日期: 2024-09-10

作者简介: 朱杰(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事路桥设计工作。

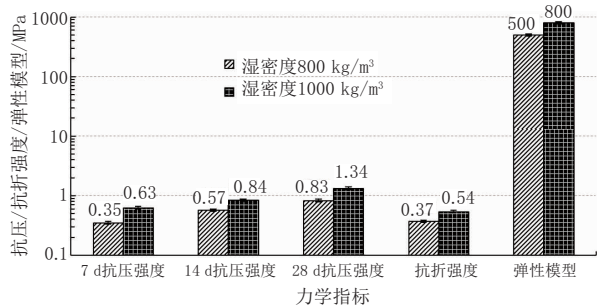


图1 泡沫聚合土路基填料力学参数

(1)泡沫聚合土的湿密度为 800 kg/m^3 时,28 d 抗压强度为 0.83 MPa ,当湿密度增加至 1000 kg/m^3 时,28 d 抗压强度达 1.34 MPa ,表明泡沫聚合土的湿密度显著影响其强度发展,湿密度越大的试验组各龄期的强度均高于湿密度低的试验组。

(2)泡沫聚合土湿密度为 800 kg/m^3 时,抗折强度为 0.37 MPa ,湿密度 1000 kg/m^3 时,抗折强度达 0.54 MPa ,表明增加湿密度有助于提升泡沫聚合土的抗折能力。抗折强度与抗压强度间有着正相关关系,均随着湿密度的增加显著提升。

(3)泡沫聚合土弹性模量远高于一般填土,且随着湿密度的增加得到显著提升。原因在于泡沫聚合土密度越大,其气孔率和孔隙率越低,材料越密实且抗压强度越高,其弹性模量就越高。

(4)根据规范要求,湿密度大于 800 kg/m^3 时,28 d 抗压强度和抗折强度均可满足路基填料的工程技术要求。

配制不同配合比的泡沫聚合土试件,密度为 1000 kg/m^3 。无侧限抗压试验采用数控万能试验机进行,试验速率选择 0.25 kN/s ,应力应变曲线见图2。

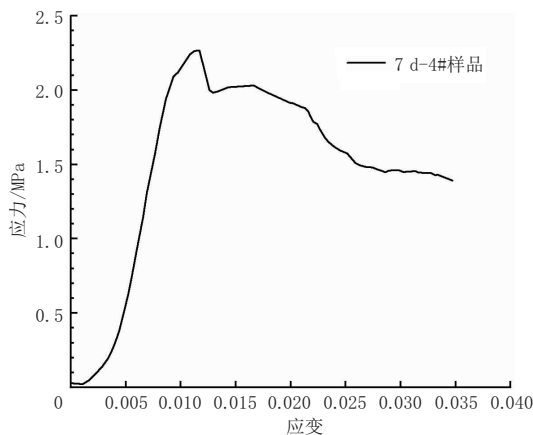


图2 7 d-4# 样品应力应变曲线

根据图2和图3可知,泡沫聚合土在受压过程中经历预压缩、弹性变形达到峰值强度,此时试样产生较大裂痕,继续施压则承载能力开始下降,但仍能

继续承载部分荷载,也就是说泡沫聚合土的破坏具有延性。

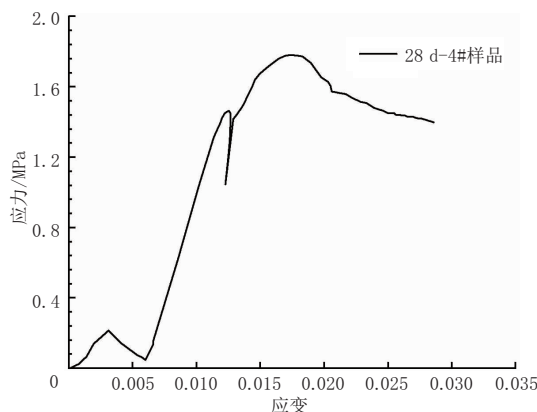


图3 28 d-4# 样品受应力应变曲线

2 泡沫聚合土路基填料耐久特性

2.1 软化系数

试验控制泡沫聚合土的湿密度分别为 1000 kg/m^3 和 1200 kg/m^3 ,并提供了标准养护、淡水养护和海水养护三种养护条件。对于不同湿密度、不同养护条件下泡沫聚合土试样,强度及软化系数随养护龄期的变化趋势见图4、图5。

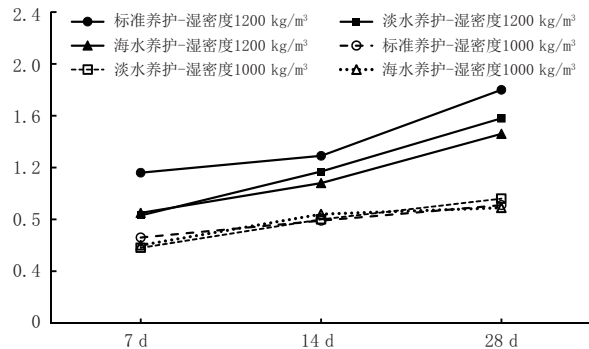


图4 不同龄期中水中养护的无侧限抗压强度对比

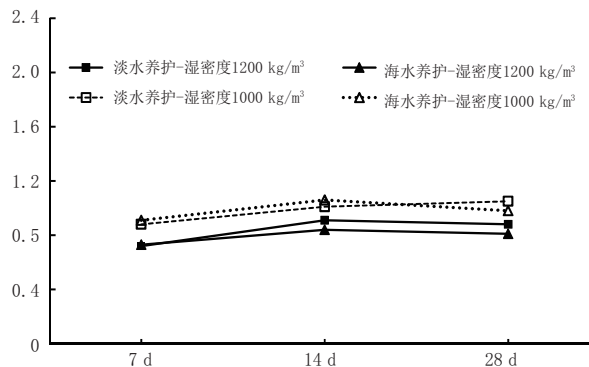


图5 不同龄期中水中养护的软化系数对比

根据图4、图5可得以下结论:

(1)根据图4可知,泡沫聚合土的强度随湿密度增加而提高。湿密度 1000 kg/m^3 时,养护条件对强度影响较小;但当湿密度增至 1200 kg/m^3 ,养护条件

影响显著,且顺序为:标准养护效果最好,淡水养护次之,海水养护最差,暗示海水中的盐分可能抑制强度发展。

(2)图5的软化试验显示,泡沫聚合土的软化系数在14 d达到峰值后下降。湿密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 的泡沫聚合土软化不明显,14 d时软化系数超过1.0;而湿密度 $1\,200\text{ kg/m}^3$ 的泡沫聚合土软化系数显著降低。

(3)泡沫聚合土软化系数虽随着养护龄期从14 d增至28 d而出现下降,但均大于0.85,属于耐水材料。

2.2 干湿循环系数和耐腐蚀系数

根据规范提供的试验方法,将一组养护28 d龄期的试件浸入 $(20\pm5)^\circ\text{C}$ 的水中,水面高出试件上表面30 mm,保持24 h后取出,放在室内用风扇吹24 h,作为一个干湿循环,以此干湿循环15次。对干湿循环后的试件和平行试件进行抗压强度试验。

根据图6可得以下结论:

(1)干湿强度系数越低,泡沫聚合土在干湿循环中的劈裂抗拉强度损失越大,且质量损失率与干湿强度系数负相关。泡沫聚合土的耐干湿循环性能随密度增加而提高。

(2)泡沫聚合土在10%硫酸浓度下的耐酸腐蚀试验显示,其耐酸腐蚀性能随密度降低而减弱。尽管试验条件下腐蚀程度较重,但在实际应用中酸浓度通常较低,泡沫聚合土能满足耐酸腐蚀的需求。

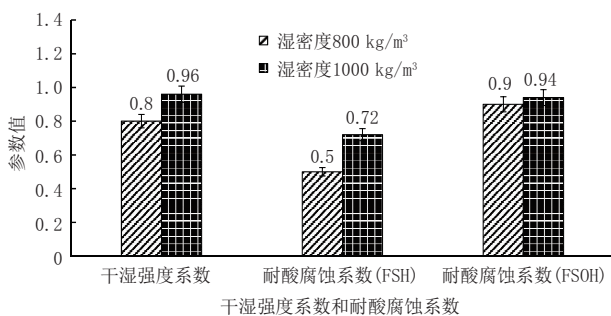


图6 干湿循环系数和耐腐蚀系数

2.3 抗压耐疲劳性能

抗压耐疲劳试验每 1×10^5 次重复加载后进行累积变形测量,继续加载直至破坏,若加载至 2×10^6 次仍未破坏,则停止试验。试验荷载上限应力取350 N,下限应力取200 N。检测指标为抗压耐疲劳变形3次测定值的平均值。

图7结果表明,经抗压耐疲劳循环试验后强度变化不大,循环200万次累计位移0.751 mm,累计变形仅2.502 mm/m,表明泡沫聚合土能够满足抗压耐疲劳性能。

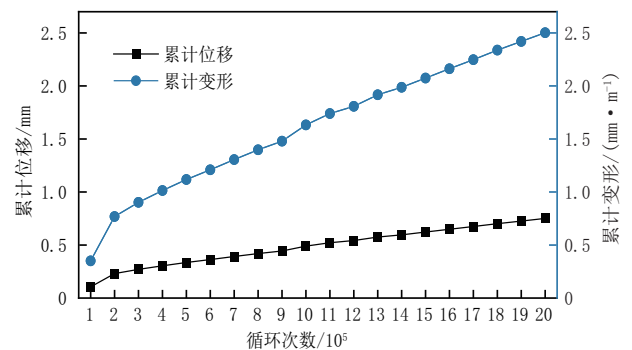


图7 抗压耐疲劳累计位移和累计变形曲线图

3 泡沫聚合土工程应用

本研究以“某高速公路改扩建工程”中为实例,试验段选取桥头路基段,泡沫聚合土路基浇筑完成后进入养护阶段,分阶段在聚合土路基顶面开展有损检测和无损检测。有损检测内容为轻型动力触探(N10)、CBR、现场取芯和弯沉检测,无损检测的内容为超声检测。根据各检测参数对路基及路基面的承载力、强度、内部完整性进行评价。

3.1 轻型动力触探(N10)

根据现场养护条件,利用落锤式轻型动力触探设备,在路基顶面养护至7~14 d、14~28 d和28 d分别进行测试。现场检测及不同龄期承载力趋势见图8。

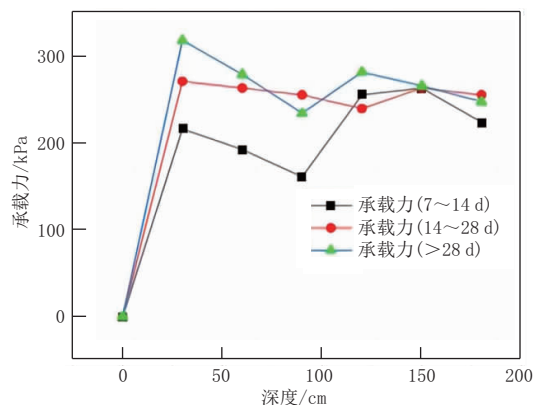


图8 轻型动力触探现场检测(N10)

根据图8所知,随着养护龄期的增加,路基的承载力稳步提升。7~14 d龄期的承载力介于160.72~262.64 kPa,14~28 d龄期的承载力介于239.12~270.48 kPa,而28 d龄期的承载力介于233.89~317.52 kPa。所有龄期的路基地基承载力均超过120 kPa,符合一般路基承载力要求。

3.2 加州承载比(CBR)

考虑到现场测试条件,将CBR试验调整至路基顶面龄期养护7~14 d、14~28 d、28 d条件下进行,用动力锥贯入仪(DCP)进行现场原位测试,通过现场

取芯室内试验予以标定,得到锤击数与贯入深度、贯入度的关系,见图9和图10。

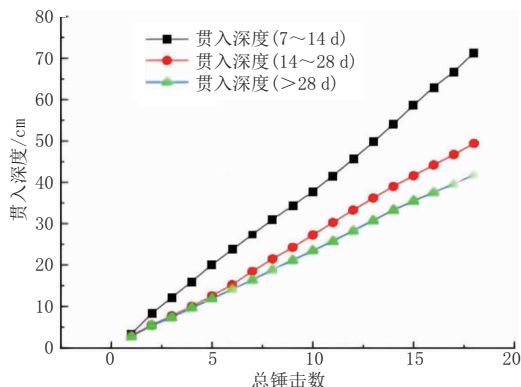


图9 总锤击数与贯入深度的关系

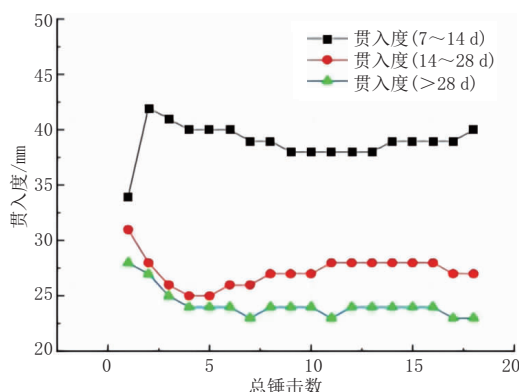


图10 贯入度与总锤击数的关系

根据图9和图10可知,DCP贯入数据基本与现场承载力发展趋势接近。随着养护时间的增长,贯入度逐渐降低,路基承载力逐渐提高。

3.3 取芯抗压试验

取芯周期为路基顶面浇筑完成后的7~14 d内、14~28 d内和28 d (50 d)。取芯位置为K18+535、K18+550、K18+560和K18+570所在断面。依照取芯深度和不同点位的浇筑进度,分两个浇筑层取得距路基顶面 ≥ 0.6 m深度的芯样。在室内将试块切割成以 ≤ 0.2 m、 ≤ 0.4 m、 ≤ 0.6 m为三层深度,150 mm(直径) $\times$ 150 mm(高度)的抗压强度小试块。将试块分组进行室内无侧限抗压试验,无侧限抗压强度曲线见图11。

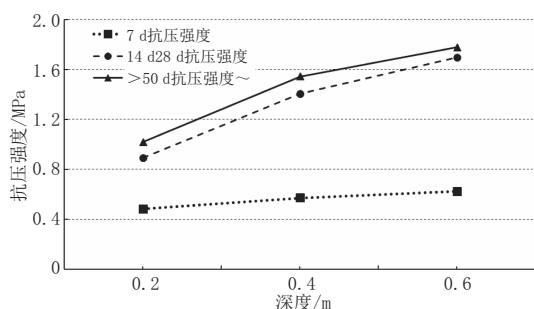


图11 无侧限抗压强度曲线

根据图11可知,现浇泡沫聚合土的无侧限抗压强度随养护龄期的增长而增加。7~14 d龄期的抗压强度从上至下为0.483、0.571、0.623 MPa;14~28 d龄期为0.893、1.407、1.696 MPa;50 d龄期为1.018、1.543、1.776 MPa。抗压强度的增长表明,在适宜的养护条件下,聚合土路基的强度得到显著提升。14 d龄期的抗压强度已超过0.6 MPa,28 d龄期超过0.8 MPa,均满足设计要求。

3.4 超声波检测

现场聚合土路基内声测管埋设测距为0.4 m。超声检测仪设备参数采用脉冲宽度0.04 ms、采样长度512点、采样周期0.4 μ s、测试电压500 V。聚合土路基的超声波检测在路基浇筑至路基顶面后,分别于龄期养护7、14、28 d和1~2月后对路基内声测管进行测试。最终得到声参量趋势曲线见图12和图13。

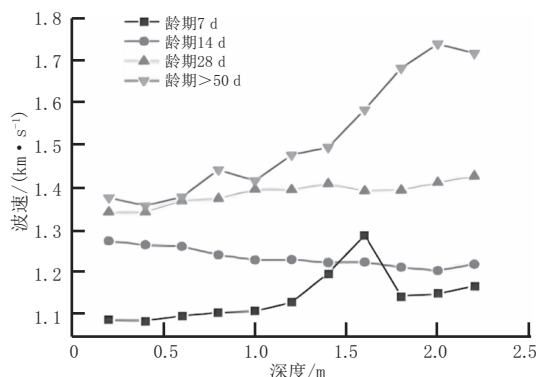


图12 波速检测结果

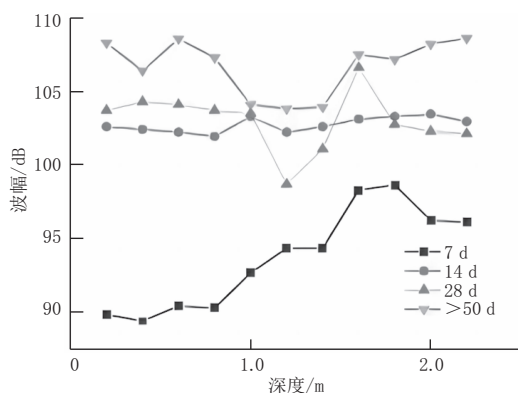


图13 波幅检测结果

由图12和图13可知:

(1)随着龄期的增长,轻质聚合土内部结构进一步稳定,声波传导速度逐渐增加。7 d龄期约1.1 km/s,14 d约1.2 km/s,28 d在1.3~1.4 km/s,超过50 d稳定在1.4~1.7 km/s。这比传统混凝土的3.2 km/s低,由于聚合土内部微观结构上存在气泡空间,其传导速率低于该值。

(2)波幅值随龄期增长而增加,7~50 d 龄期波动在 89~108 之间,没有明显衰减,表明内部结构稳定,无明显缺陷。

(3)同一龄期和位点,不同深度的波幅值有不超过 10%的衰减,这是由于气泡和结构差异造成的,不作为判定内部缺陷的依据。

4 结 语

(1)泡沫聚合土的湿密度显著影响其强度发展,增加湿密度有助于提升泡沫聚合土的抗折强度、抗压强度和弹性模量。湿密度大于 800 kg/m^3 时,28 d 抗压强度和抗折强度均可满足路基填料的工程技术要求。

(2)泡沫聚合土湿密度大于 $1\,200 \text{ kg/m}^3$ 时,养护条件对其强度发展影响显著,不同养护条件对强度的促进作用表现为标准养护>淡水养护>海水养护。泡沫聚合土软化系数和耐干湿循环的性能优良,密度越大性能越佳。泡沫聚合土能够满足抗压耐疲劳性能,循环 200 万次累计位移 0.751 mm ,累计变形仅 2.502 mm/m 。

(3)泡沫聚合土工程应用结果表明,随着养护龄期的增长,路基承载力逐渐提高,贯入度逐渐降低,抗压强度增长,14 d 和 28 d 抗压强度均满足大于设计抗压强度值。泡沫聚合土龄期的增长使其内部结构逐步稳定,未出现明显缺陷。

(4)本研究将工程渣土资源化利用技术引入泡沫聚合土制备中,有效促进了工业固废、工程渣土的消耗和循环利用。相比常规泡沫轻质土,泡沫聚合土不仅降低水泥用量,节约造价,还解决了换填弃方问题,具有显著的经济性和节能环保性能。

参考文献:

- [1] 赵冠华,朱俊波,常浩,等.路桥过渡段刚柔连续过渡结构研究[J].公路,2024,69(1):16-23.
- [2] Tri L M H, Seong-Hyeok L, Dae-Wook P, *et al.* Evaluation on the full-scale testbed performance of lightweight foamed soil using rail-road loading system [J].Construction and Building Materials,2022 (330):127249.
- [3] 党海明,苗学云,韩龙武,等.多年冻土区路桥过渡段变形整治措施研究[J].路基工程,2023(1):13-17.
- [4] 许海英.PHC 管桩复合地基处理技术在路桥过渡段的应用研究[J].城市道桥与防洪,2012(6):233-235.
- [5] 肖源杰,姜钰,王萌,等.重载铁路路桥过渡段道砟颗粒运动及能量特征对比分析[J].土木工程学报,2023,56(9):100-115.
- [6] 栾利强,文双寿,张婧怡,等.基于刚度协调的路桥过渡段路面疲劳寿命预估[J].科学技术与工程,2022,22(12):5027-5035.
- [7] 刘杰民,李辉,张宝华,等.基于 X-CT 扫描技术的泡沫轻质土孔结构分析[J].北京工业大学学报,2024(10):1228-1236.
- [8] Zheng L, Yang Z, Jie L, *et al.* Engineering properties and micro-pore structure of clay-based foamed lightweight Soil[J].Journal of Materials in Civil Engineering, 2024,36(3):04023598
- [9] 刘英,张鹏恒,赵相高.掺加粉质黏土的泡沫轻质土材料性能试验研究[J].公路交通科技,2024,41(5):20-26.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com