

# 土工格栅加筋泡沫轻质土抗折性能试验研究

李银河<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1\*</sup>, 张宏博<sup>2</sup>

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250061

**摘要:**为研究土工格栅加筋泡沫轻质土的抗折性能,将水、水泥、发泡剂按一定质量比配备,满足流值为160~200 mm,采用4种不同的土工格栅加筋层数(0、1、2、3)和3种湿密度(600、700、800 kg/m<sup>3</sup>),将边长95 mm的正方形和宽95 mm、长395 mm的矩形土工格栅放入试模指定位置,养护28 d后脱模,制备土工格栅加筋泡沫轻质土试件,对其进行无侧限抗压强度试验和四点弯曲试验,从位移-荷载曲线、破坏形态、位移-荷载特征、无侧限抗压强度和抗折强度等方面分析湿密度和加筋层数对泡沫轻质土抗折性能的影响。试验结果发现:施载后土工格栅加筋泡沫轻质土由脆性破坏变为弹塑性破坏,根据黏结应力机制将荷载传递到试件内部,显著提高泡沫轻质土的抗折性能;在加载过程中,前期主要由泡沫轻质土承担荷载,后期主要由土工格栅承担荷载;加入土工格栅明显提高泡沫轻质土的无侧限抗压强度和抗折强度,最大无侧限抗压强度为3.16 MPa,抗折强度最大可提高168%;建立基于湿密度和加筋层数的无侧限抗压强度拟合方程,发现无侧限抗压强度与抗折强度之比与湿密度间相关性较好。

**关键词:**泡沫轻质土;土工格栅;抗折性能;位移-荷载曲线

**中图分类号:**U414;TU502<sup>+</sup>.6

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2025)02-0077-09

**引用格式:**李银河,刘勇,张宏博.土工格栅加筋泡沫轻质土抗折性能试验研究[J].山东交通学院学报,2025,33(2):77-85.

LI Yinhe, LIU Yong, ZHANG Hongbo. Experimental study on the flexural performance of geogrid-reinforced foamed lightweight soil[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(2): 77-85.

## 0 引言

泡沫轻质土是含大量封闭气孔的轻质混凝土,具有流动性高、轻质高强、保温隔热、防火、隔声、抗震及耐久等特点<sup>[1-3]</sup>,常用于台背回填<sup>[4]</sup>、路基填充<sup>[5]</sup>及墙体填充<sup>[6]</sup>等,在工程领域应用广泛。在路基拓宽、道路改扩建及坡地区域维护等实际工程中,传统回填土能承受一定压力和剪力,但其承载力难以满足更高要求。采用泡沫轻质土回填时,受新、老路基间的衔接差异、材料自身压缩差异及地势空间限制<sup>[7]</sup>,泡沫轻质土在受力过程中呈现较低的韧性和较差的抗折性能,在极限荷载下易发生脆性破坏,承载力急剧下降。在汽车动荷载和路面结构静荷载反复作用下,泡沫轻质土易因应力集中、过量应变及位移累积引发压碎、拉裂及剪切破坏<sup>[8]</sup>,导致路基不均匀沉降、错台和整体滑移等严重问题,影响道路的完整性和使用寿命。在泡沫轻质土中添加特定的土工合成材料对其进行改性处理,可增强泡沫轻质土延性,显著提高其抗折性能,满足更严格的工程应用要求。

许多学者在泡沫轻质土中加入纤维类材料,如玻璃纤维<sup>[9]</sup>、玄武岩纤维<sup>[10]</sup>、碳纤维、聚丙烯纤维

收稿日期:2024-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51978034);国家重点研发计划项目(2022YFB2601900)

第一作者简介:李银河(2000—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:1870212052@qq.com。

\*通信作者简介:刘勇(1974—),男,山东青岛人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为高大边坡、挡墙变形破坏及稳定性分析,E-mail:307102589@qq.com。

等<sup>[11]</sup>,提高轻质土的抗折强度、韧性、刚度和延性性能,降低脆性破坏的风险。在极端荷载或不利施工条件下,纤维材料的尺度和分布限制了其对泡沫轻质土整体性能的改善,材料仍可能发生脆性破坏。将价格低廉和柔性大的塑料土工格栅加入泡沫轻质土中,其网格结构与泡沫轻质土相互嵌锁,有效提高承载能力,并增强在工程应用中的整体稳定性。塑料土工格栅的网格系统在抑制泡沫轻质土裂缝发展方面发挥关键作用,显著提高材料的抗裂性和耐久性,特别在道路建设、边坡稳定、地基加固<sup>[12]</sup>等领域具有巨大的应用潜力。目前研究主要集中在土工格栅与土体的界面交互作用,土工格栅与复合胶凝材料结合的研究较少<sup>[13]</sup>,所用土工合成材料主要是玻璃纤维格栅<sup>[14]</sup>、玄武岩纤维格栅、碳纤维格栅<sup>[15]</sup>等,对经济高效且柔性较大的塑料土工格栅研究较少,对不同土工格栅层数的泡沫轻质土抗折性能和宏观增韧机理的研究相对缺乏。

为探究不同加筋层数和湿密度对泡沫轻质土抗折性能的影响,制备土工格栅加筋泡沫轻质土,对其进行无侧限抗压强度试验和四点弯曲试验,分析荷载-位移曲线,结合破坏形式研究材料的宏观增韧机理,以期开发抗折性能好、经济环保的新型轻质材料。

1 材料与方法

1.1 原材料

选用普通硅酸盐水泥 P·O 42.5,物理和力学性能如表 1 所示。采用复合型发泡剂,稀释倍率为 1:50,通过物理发泡法制备泡沫,发泡压力为 0.4 MPa,泡沫密度为 50 kg/m<sup>3</sup>,泌水率为 15.71%。选用不影响水泥正常凝结、硬化物质的实验室用水为拌和用水。选用抗拉强度较高的双向拉伸塑料土工格栅,原材料为聚丙烯。将土工格栅裁剪为宽 95 mm,长 395 mm 的矩形和边长 95 mm 的正方形<sup>[16]</sup>,如图 1 所示,保证土工格栅与上下填料的充分接触。通过拉伸试验,获得型号为 TGSG50-50 的土工格栅基本性能参数如表 2 所示。

表 1 选用水泥的物理和力学性能

| 比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 标准稠度/% | 初凝时间/min | 终凝时间/min | 3 d 抗压强度/MPa | 3 d 抗折强度/MPa |
|------------------------------------------|--------------------------|--------|----------|----------|--------------|--------------|
| 359                                      | 3 100                    | 28.5   | 230      | 294      | 5.60         | 2.72         |

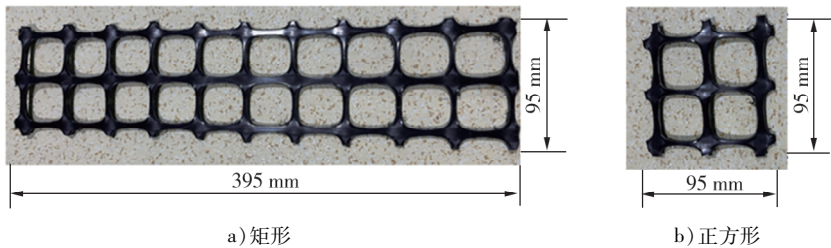


图 1 2 种双向塑料土工格栅

表 2 土工格栅基本性能参数

| 网格边长/<br>mm | 抗拉强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) |      | 断裂伸长率/% |     | 伸长率为 2%时抗拉强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) |      | 伸长率为 5%时抗拉强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) |      |
|-------------|----------------------------|------|---------|-----|------------------------------------|------|------------------------------------|------|
|             | 纵向                         | 横向   | 纵向      | 横向  | 纵向                                 | 横向   | 纵向                                 | 横向   |
| 33          | 55.8                       | 60.3 | 6.3     | 7.6 | 22.7                               | 21.6 | 43.5                               | 40.7 |

1.2 试验设计

不同土工格栅加筋泡沫轻质土的配合比及基本物理性能如表 3 所示,水灰比均为 0.55。试验中采用 4 种不同的土工格栅加筋层数(0、1、2、3)<sup>[17]</sup>和 3 种湿密度(600、700、800 kg/m<sup>3</sup>),土工格栅在试件中侧面布置方式如图 2 所示。根据文献[18],土工格栅加筋泡沫轻质土的流值应为 160~200 mm。每组试件编号制备 3 个试件。

表3 土工格栅加筋泡沫轻质土的配合比及基本物理性能

| 编号    | 目标湿密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 加筋<br>层数 | 每 $\text{m}^3$ 泡沫轻质<br>土水泥用量/kg | 每 $\text{m}^3$ 泡沫轻质<br>土用水量/kg | 每 $\text{m}^3$ 泡沫轻质<br>土泡沫用量/kg | 实测湿密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 流值/mm |
|-------|-----------------------------------------------|----------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
| 600-0 | 600                                           | 0        | 365                             | 201                            | 34                              | 608                                           | 183   |
| 600-1 |                                               | 1        |                                 |                                |                                 | 592                                           | 181   |
| 600-2 |                                               | 2        |                                 |                                |                                 | 605                                           | 184   |
| 600-3 |                                               | 3        |                                 |                                |                                 | 602                                           | 184   |
| 700-0 | 700                                           | 0        | 432                             | 237                            | 31                              | 697                                           | 181   |
| 700-1 |                                               | 1        |                                 |                                |                                 | 705                                           | 185   |
| 700-2 |                                               | 2        |                                 |                                |                                 | 700                                           | 183   |
| 700-3 |                                               | 3        |                                 |                                |                                 | 710                                           | 191   |
| 800-0 | 800                                           | 0        | 498                             | 274                            | 28                              | 805                                           | 182   |
| 800-1 |                                               | 1        |                                 |                                |                                 | 800                                           | 185   |
| 800-2 |                                               | 2        |                                 |                                |                                 | 802                                           | 190   |
| 800-3 |                                               | 3        |                                 |                                |                                 | 808                                           | 186   |

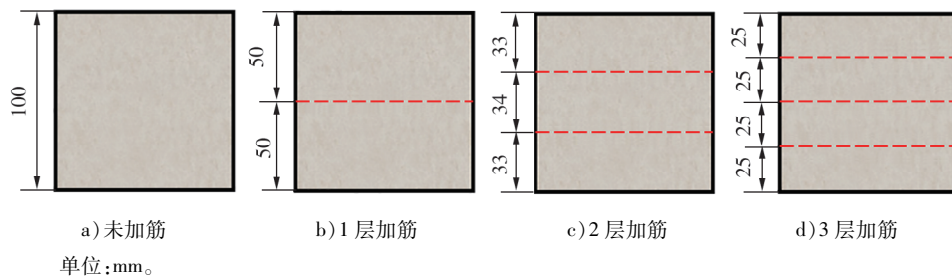


图2 土工格栅在试件中侧面布置方式

### 1.3 试件制备方法

将称量好的水和水泥倒入搅拌桶中,用手持搅拌器快速搅拌 1.5 min 后生成水泥浆。将水与发泡剂按质量比 1 : 50 混合均匀成发泡液,在发泡压力为 0.4 MPa 下制备泡沫。将水泥浆与泡沫放入搅拌机慢速搅拌 30 s,满足流值和湿密度要求后倒入试模<sup>[19]</sup>,将按设计要求裁切的土工格栅垂直放到试模指定位置,养护 28 d 后脱模,制备土工格栅加筋泡沫轻质土试件。

### 1.4 试验方法

参照文献[20],无侧限抗压强度测试试件边长 100 mm,加载速率为 1 kN/s。采用四点加载方式进行抗折强度试验,示意图如图 3 所示。测试试件长 400 mm,宽 100 mm,高 100 mm,加载速率为  $(0.20 \pm 0.05) \text{ kN/s}$ ,开始试验后计算机自动采集竖向荷载和加载板位移。

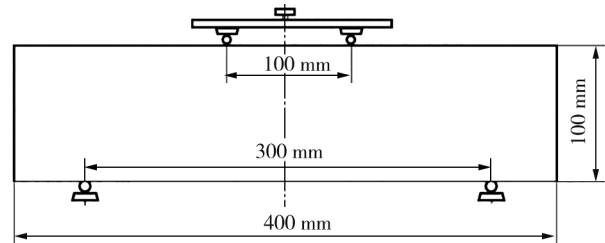


图3 四点弯曲试验示意图

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 土工格栅加筋泡沫轻质土的抗折性能

#### 2.1.1 位移-荷载曲线

不同湿密度下,不同土工格栅加筋泡沫轻质土试件在四点弯曲试验下的位移-荷载曲线如图 4 所示。由图 4 可知:3 种湿密度  $\rho$  下,相同加筋层数的土工格栅加筋泡沫轻质土试件在四点弯曲试验下的位移-

荷载曲线变化规律相似;未加筋的泡沫轻质土在达到峰值荷载后荷载骤降,呈脆性破坏特征;加入土工格栅后,荷载达到第一峰值后短暂下降,后随位移的增大而持续增大,并随加筋层数的增大,荷载的增速变快,表现为弹塑性破坏特征。

原因是湿密度较小的泡沫轻质土需较大位移达到峰值荷载;湿密度较大的泡沫轻质土仅需较小位移就能达到峰值荷载,变形较小。与普通泡沫轻质土相比,加入土工格栅能明显提高泡沫轻质土的峰值荷载和抗折性能,减小位移。

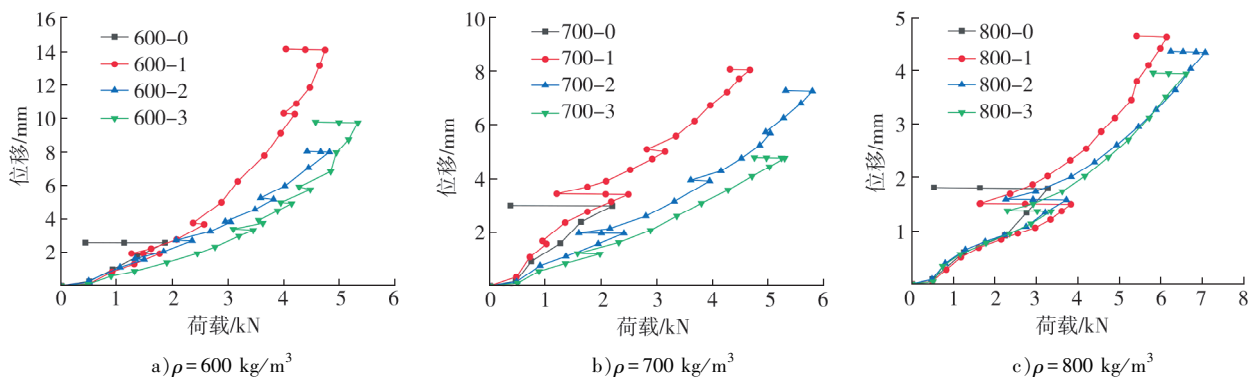


图4 不同湿密度下土工格栅加筋泡沫轻质土试件在四点弯曲试验下的位移-荷载曲线

土工格栅加筋泡沫轻质土的竖向荷载包括初裂荷载  $F_{cr}$ 、峰值荷载  $F_f$ , 对应位移为  $\delta_{cr}$  和  $\delta_f$ 。土工格栅加筋泡沫轻质土的位移-荷载典型曲线如图5所示, 由线弹性阶段  $OA$ 、硬化阶段  $AB$ 、软化-硬化循环阶段  $BC$  和破坏阶段  $CD$  组成。

在线弹性阶段  $OA$ , 荷载较小且随位移线性增大, 原因是离散孔隙间的水泥石结晶体承担荷载, 表现为线性特征。

进入硬化阶段  $AB$ , 荷载略减, 位移-荷载曲线变为非线性曲线, 内部自身结构的微裂缝开始扩展出新裂缝, 荷载持续增大到初裂荷载, 标志硬化阶段结束。采用位移-荷载曲线上上升段首次出现拐点对应的荷载为初裂荷载。

软化-硬化循环阶段  $BC$  主要发生在湿密度为  $600$ 、 $700 \text{ kg/m}^3$  的土工格栅加筋泡沫轻质土中, 经多次软化阶段和硬化阶段循环达到峰值荷载, 湿密度为  $800 \text{ kg/m}^3$  的土工格栅加筋泡沫轻质土只经历1次循环。

达到峰值荷载后进入破坏阶段  $CD$ , 此时荷载骤降, 裂缝延伸至试件顶部, 同时土工格栅和泡沫轻质土失去抵抗荷载能力, 试件破坏。

### 2.1.2 破坏形态

普通泡沫轻质土的破坏形态如图6所示, 水泥混凝土发生类似的脆性破坏, 裂纹由试件底部迅速扩展至顶面, 在试件横截面弯矩最大处瞬间断裂<sup>[21]</sup>。

加入土工格栅使泡沫轻质土从脆性破坏转变为明显的弹塑性破坏。加筋后不同加筋层数的试样破坏形态一致, 以加筋1层的试样为例分析, 不同湿密度下土工格栅加筋泡沫轻质土典型破坏过程如图7、8所示。

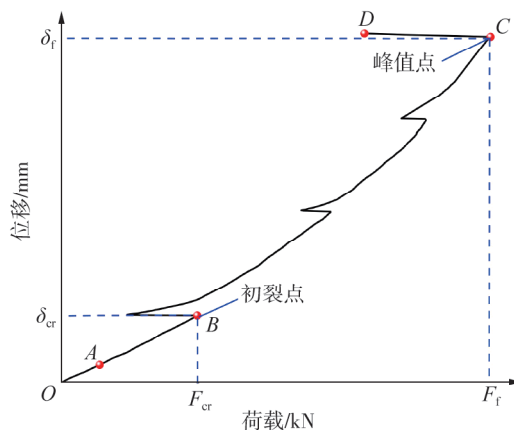


图5 土工格栅加筋泡沫轻质土位移-荷载典型曲线



图6 普通泡沫轻质土的破坏形态

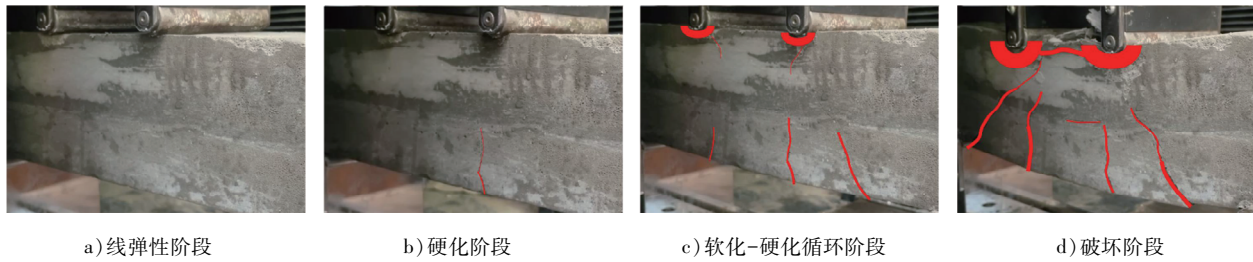


图7 湿密度为  $600 \text{ kg/m}^3$  的土工格栅加筋泡沫轻质土典型破坏过程

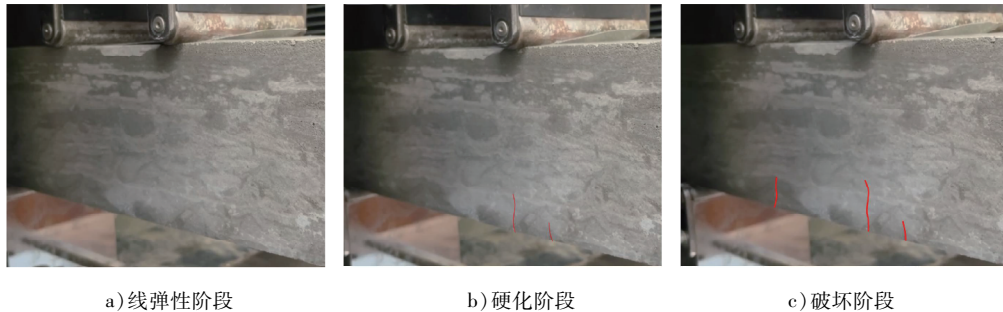


图8 湿密度为  $700, 800 \text{ kg/m}^3$  的土工格栅加筋泡沫轻质土典型破坏过程

由图 7a) 和 8a) 可知,在低荷载下泡沫轻质土保持无裂缝的线弹性行为。由图 7b) 和 8b) 可知:硬化阶段开始向软化阶段过渡,随荷载增大,达到第一峰值荷载时,底部开始产生裂缝。由图 7c) 可知:在软化-硬化循环阶段,裂缝的宽度和数量随荷载的增大而增大。由图 7d) 可知:湿密度为  $600 \text{ kg/m}^3$  的泡沫轻质土中,气孔占比较高,无侧限抗压强度较低<sup>[22]</sup>,顶侧受压区下凹变形,裂缝扩展,当土工格栅周围出现横向剪切裂缝时,土工格栅与泡沫轻质土界面滑移或局部黏结破裂,试件在峰值荷载作用下最终破坏。由图 8c) 可知:湿密度为  $700, 800 \text{ kg/m}^3$  泡沫轻质土中,气孔占比较小,无侧限抗压强度较高<sup>[23]</sup>,黏结力较大,底部仅产生少量裂缝,顶部受压区变形较小。

湿密度为  $600 \text{ kg/m}^3$  的试件破化形态分别为受压区下凹变形、受拉区多条裂缝、土工格栅周围出现横向剪切裂缝、土工格栅与泡沫轻质土界面滑移或局部黏结破裂,变形严重;湿密度为  $700, 800 \text{ kg/m}^3$  的试件破化形态为主要受拉区产生 1~3 条裂缝,无明显大变形破坏。

随加筋层数的增大,土工格栅有效减少了泡沫轻质土的裂缝数量和宽度。在湿密度较大的 3 层加筋泡沫轻质土中,仅在底部产生小裂缝,顶部未产生裂缝。土工格栅有效阻止底部受拉区泡沫轻质土产生的裂缝向上延伸,并通过土工格栅与泡沫轻质土间的黏结力将部分荷载传递到周围泡沫轻质土中,增强二者间的协同作用<sup>[14]</sup>;当荷载超过一定阈值,土工格栅与泡沫轻质土间的黏结力无法承受试件底部的主应力时,土工格栅和泡沫轻质土产生变形,抵抗荷载和变形的能力下降<sup>[13]</sup>。裂纹路径发展可证明这种应力传递机制。

### 2.1.3 不同阶段位移-荷载特征

为描述土工格栅加筋泡沫轻质土不同阶段荷载变化特征,根据文献[24],引入 3 种荷载  $F_{L/300}$ 、 $F_{L/150}$  和  $F_{L/100}$ ,分别对应峰值荷载前产生的位移 1、2、3 mm,定义此 3 种荷载为强化荷载。加筋层数和湿密度对土工格栅加筋泡沫轻质土不同阶段所受荷载的影响如表 4 所示。

由表 4 可知:强化荷载随加筋层数和湿密度的增大而增大,加入土工格栅和增大湿密度共同提高泡沫轻质土前中期荷载;相同湿密度下,初裂荷载随加筋层数增大而变化平缓,经计算可知,土工格栅加筋泡沫轻质土的初裂荷载与普通泡沫轻质土峰值荷载之比为  $0.80 \sim 1.17$ ,说明泡沫轻质土在加载前期承担主要荷载;不加筋的泡沫轻质土发生脆性破坏,初裂荷载和峰值荷载相等;土工格栅加筋泡沫轻质土的峰值荷载明显大于初裂荷载和强化荷载,显著提高泡沫轻质土的后期承载能力。

随泡沫轻质土湿密度的增大,达到初裂荷载和峰值荷载所需位移减小,泡沫轻质土的整体刚度增

大<sup>[25]</sup>。整体上,初裂荷载、峰值荷载和强化荷载均随泡沫轻质土湿密度的增大而增大,说明湿密度是提高泡沫轻质土竖向承载能力的关键因素之一。

表 4 加筋层数和湿密度对土工格栅加筋泡沫轻质土不同阶段所受荷载的影响

| $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 加筋层数 | $F_{cr}/\text{kN}$ | $F_t/\text{kN}$ | $F_{L/300}/\text{kN}$ | $F_{L/150}/\text{kN}$ | $F_{L/100}/\text{kN}$ |
|--------------------------------------|------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 600                                  | 0    | 1.92               | 1.92            |                       |                       |                       |
|                                      | 1    | 1.86               | 5.09            | 1.07                  | 1.35                  | 2.22                  |
|                                      | 2    | 1.49               | 4.54            | 0.96                  | 1.80                  | 2.48                  |
|                                      | 3    | 1.64               | 4.41            | 1.50                  | 2.47                  | 3.21                  |
| 700                                  | 0    | 2.03               | 2.03            |                       |                       |                       |
|                                      | 1    | 2.49               | 4.43            | 0.68                  | 1.15                  | 1.98                  |
|                                      | 2    | 2.41               | 5.58            | 1.24                  | 1.68                  | 3.18                  |
|                                      | 3    | 1.98               | 5.49            | 1.65                  | 2.81                  | 3.72                  |
| 800                                  | 0    | 3.14               | 3.14            |                       |                       |                       |
|                                      | 1    | 3.83               | 6.44            | 2.74                  | 3.20                  | 4.75                  |
|                                      | 2    | 3.73               | 7.07            | 2.51                  | 3.79                  | 5.54                  |
|                                      | 3    | 3.35               | 6.61            | 2.51                  | 4.11                  | 5.57                  |

2.2 土工格栅加筋泡沫轻质土的强度特性

2.2.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是泡沫轻质土力学性能的重要评价指标<sup>[26]</sup>。土工格栅加筋泡沫轻质土试件的无侧限抗压强度

$$f_{ec}=F_1/A_1,$$

式中: $F_1$  为抗压破坏荷载,N; $A_1$  为试件受压面积, $\text{mm}^2$ 。

不同加筋层数和湿密度  $\rho$  下土工格栅加筋泡沫轻质土的无侧限抗压强度如表 5 所示。

表 5 不同加筋层数和湿密度下土工格栅加筋泡沫轻质土的无侧限抗压强度

| 加筋层数 | $f_{ec}/\text{MPa}$      |                          |                          |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|      | $\rho=600\text{ kg/m}^3$ | $\rho=700\text{ kg/m}^3$ | $\rho=800\text{ kg/m}^3$ |
| 0    | 1.22                     | 1.89                     | 2.89                     |
| 1    | 1.65                     | 2.54                     | 3.01                     |
| 2    | 1.80                     | 2.88                     | 3.07                     |
| 3    | 1.73                     | 3.04                     | 3.16                     |

由表 5 可知:1)不同湿密度下,土工格栅加筋泡沫轻质土的抗压强度随加筋层数的增大而增大,湿密度为  $700\text{ kg/m}^3$  的土工格栅加筋泡沫轻质土抗压强度的增速最快,最大提高 60%;湿密度为  $800\text{ kg/m}^3$  加筋 3 层的土工格栅加筋泡沫轻质土最大抗压强度为  $3.16\text{ MPa}$ 。加入土工格栅后,通过界面约束效应有效改善普通泡沫轻质土的前期脆性破坏特性,限制土体的侧向变形,阻止裂缝扩展,延缓破坏过程,提高抗压强度。2)加入土工格栅后,随加筋层数的增大,抗压强度增速较慢;湿密度为  $600\text{ kg/m}^3$  的泡沫轻质土,加筋 3 层时的抗压强度比加筋 2 层略降。原因是泡沫轻质土加筋层数过多,且自身抗压强度较低,未充分与泡沫轻质土结合,影响泡沫轻质土的整体稳定性。3)土工格栅加筋泡沫轻质土的无侧限抗压强度随湿密度的增大而增大,表明泡沫轻质土自身的抗压强度对土工格栅加筋泡沫轻质土的抗压强度起关键作用。

建立泡沫轻质土的无侧限抗压强度与湿密度和加筋层数间的关系,拟合式为:

$$f_{cc} = -2.924 + 0.211n + 0.00716\rho,$$

式中: $n$  为加筋层数,  $n=0,1,2,3$ 。

拟合关系式的决定系数  $R^2=0.87$ , 拟合结果良好。不同湿密度和加筋层数下, 实测无侧限抗压强度与计算无侧限抗压强度如表 6 所示。由表 6 可知, 无侧限抗压强度实测结果与计算结果的相对差为 0.33%~16.18%。理论分析未考虑土工格栅边界效应及材料内部缺陷, 导致实测结果普遍小于预测结果。二者呈现的显著相关性表明, 该模型可为泡沫轻质土工程设计与材料配比优化提供有效指导, 实现目标力学性能的精准调控。

表 6 不同湿密度和加筋层数下实测无侧限抗压强度与计算无侧限抗压强度

| $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 加筋层数 | 实测无侧限抗压强度/MPa | 计算无侧限抗压强度/MPa | 相对差/% |
|--------------------------------------|------|---------------|---------------|-------|
| 600                                  | 0    | 1.22          | 1.37          | 12.30 |
|                                      | 1    | 1.65          | 1.58          | 4.24  |
|                                      | 2    | 1.80          | 1.79          | 0.56  |
|                                      | 3    | 1.73          | 2.01          | 16.18 |
| 700                                  | 0    | 1.89          | 2.09          | 10.58 |
|                                      | 1    | 2.54          | 2.30          | 9.45  |
|                                      | 2    | 2.88          | 2.51          | 12.85 |
|                                      | 3    | 3.04          | 2.72          | 10.53 |
| 800                                  | 0    | 2.89          | 2.80          | 3.11  |
|                                      | 1    | 3.01          | 3.02          | 0.33  |
|                                      | 2    | 3.07          | 3.23          | 5.21  |
|                                      | 3    | 3.16          | 3.44          | 8.86  |

### 2.2.2 抗折强度

土工格栅加筋泡沫轻质土试件的抗折强度

$$f_t = F_t L / (bh^2),$$

式中: $L$  为支座间距,  $L=300\text{ mm}$ ;  $b$  为试件宽度,  $b=100\text{ mm}$ ;  $h$  为试件高度,  $h=100\text{ mm}$ 。

不同加筋层数和湿密度下土工格栅加筋泡沫轻质土抗折强度如表 7 所示。

表 7 不同加筋层数和湿密度下土工格栅加筋泡沫轻质土的抗折强度

| 加筋层数 | $f_t/\text{MPa}$         |                          |                          |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|      | $\rho=600\text{ kg/m}^3$ | $\rho=700\text{ kg/m}^3$ | $\rho=800\text{ kg/m}^3$ |
| 0    | 0.57                     | 0.75                     | 0.94                     |
| 1    | 1.53                     | 1.33                     | 1.93                     |
| 2    | 1.36                     | 1.67                     | 2.12                     |
| 3    | 1.32                     | 1.65                     | 1.98                     |

由表 7 可知: 加入土工格栅可明显提高泡沫轻质土的抗折强度, 加筋泡沫轻质土的抗折强度比不加筋泡沫轻质土最大可增大 168%。湿密度为  $600\text{ kg/m}^3$  的泡沫轻质土加筋 1 层时抗折强度提高最大, 随加筋层数的增大, 底部泡沫轻质土厚度减小且自身抗折强度较低, 黏结力不足, 抗折强度略降; 湿密度为  $700, 800\text{ kg/m}^3$  的泡沫轻质土加筋 2 层时, 抗折强度增幅最大, 原因是 2 层加筋在受压区和受拉区均能有效分担竖向荷载。土工格栅加筋泡沫轻质土的抗折强度随湿密度的增大而增大, 湿密度为

600 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫轻质土自身抗折强度较小,通过泡沫轻质土和土工格栅的变形增大竖向位移,加筋 1 层时抗折强度明显提高。

### 2.2.3 无侧限抗压强度与抗折强度的关系

将土工格栅加筋泡沫轻质土的无侧限抗压强度与抗折强度之比作为纵坐标,湿密度为横坐标,不加筋时采用线性拟合,加筋时用多项式拟合,无侧限抗压强度与抗折强度之比

$$y=a+cp+dp^2,$$

式中  $a$ 、 $c$ 、 $d$  为系数。

不同加筋层数对应的土工格栅加筋泡沫轻质土的无侧限抗压强度与抗折强度之比与湿密度拟合效果如图 9 所示。湿密度为 600~800 kg/m<sup>3</sup> 时,不加筋的泡沫轻质土无侧限抗压强度与抗折强度之比随湿密度的增大线性增大,加筋的泡沫轻质土无侧限抗压强度与抗折强度之比随湿密度的增大而先增大后减小。在道路工程中,选择合适的湿密度和加筋层数制备土工格栅加筋泡沫轻质土,可显著提高路基抗压抗折强度和韧性,增大路基承载力,减小不均匀沉降,增强整体稳定性和耐久性。

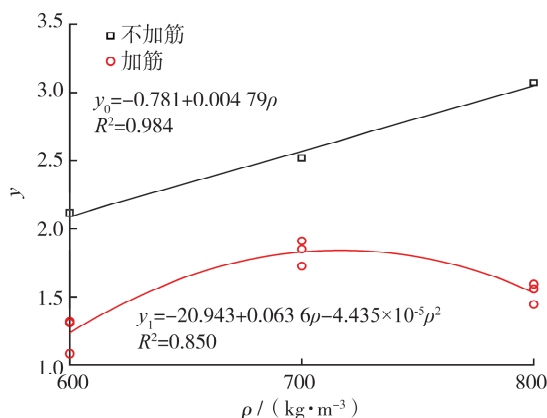


图 9 不同加筋层数的无侧限抗压强度与抗折强度之比与湿密度拟合效果

## 3 结论

将土工格栅与泡沫轻质土结合,制备土工格栅加筋泡沫轻质土试件,进行无侧限抗压强度试验和四点弯曲试验,分析位移-荷载曲线、破坏形态、位移-荷载特征、无侧限抗压强度和抗折强度,研究土工格栅加筋泡沫轻质土的抗折性能。

1) 土工格栅加筋泡沫轻质土的位移-荷载曲线符合弹塑性变形特征,可分为线弹性阶段、硬化阶段、软化-硬化循环阶段和破坏阶段。

2) 湿密度为 600 kg/m<sup>3</sup> 时,土工格栅加筋泡沫轻质土发生典型黏结失效破坏;湿密度为 700、800 kg/m<sup>3</sup> 时,达到峰值荷载时无大变形破坏,稳定性更好。泡沫轻质土通过土工格栅的孔隙锚固土工格栅,受竖向荷载时,通过黏结应力机制将荷载传递到泡沫轻质土内部,阻止裂缝扩展,延缓试件破坏,提高抗折性能。

3) 在加载初期,主要由泡沫轻质土自身承担荷载;在加载后期,主要由土工格栅承担荷载,泡沫轻质土和土工格栅二者协同作用共同承担荷载。

4) 加入土工格栅明显提高泡沫轻质土的无侧限抗压强度和抗折强度,最大无侧限抗压强度、抗折强度分别为 3.16、2.12 MPa,比不加筋泡沫轻质土最大分别增大 60%、168%。采用多元非线性回归方程建立基于湿密度和加筋层数的无侧限抗压强度预测模型,发现无侧限抗压强度与抗折强度之比与湿密度间相关性较好。

### 参考文献:

- [1] RAJ A, SATHYAN D, MINI K M. Physical and functional characteristics of foam concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221: 787-799.
- [2] MUGAHED AMRAN Y H, FARZADNIA N, ABANG ALI A A. Properties and applications of foamed concrete: a review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 990-1005.
- [3] 宋强, 邹颖杰, 张鹏, 等. 泡沫混凝土气泡性能与基体材料研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 706-724.
- [4] ZHANG H B, QI X L, WAN L Y, et al. Properties of silt-based foamed concrete: a type of material for use in backfill behind an abutment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 119966.

- [5] 刘雪雨,周国印,孔晓光,等. 新型赤泥基泡沫轻质土材料性能及应用[J]. 铁道建筑, 2023, 63(10):118-123.
- [6] 时磊,陈晗,窦俊艳,等. 中型泡沫混凝土自保温砌块墙体热工性能数值分析研究[J]. 砖瓦, 2024(5):18-23.
- [7] 莫娅婵,张军辉,杨豪,等. 改扩建工程路基差异沉降研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1):110-132.
- [8] 刘红. 土工格栅加筋高填路堤变形和稳定特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [9] 陈成华,黄志超,黄俊杰,等. 纤维丝和网加筋泡沫轻质土力学特性和抗冻性[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(2):462-469.
- [10] 刘曙光,张泽丰,肖俊杰,等. 玄武岩纤维加筋泡沫轻质土物理力学特性[J]. 公路工程, 2023, 48(4):134-138.
- [11] SHI X X, NING B K, WANG J X, et al. Improving flexural toughness of foamed concrete by mixing polyvinyl alcohol-polypropylene fibers;an experimental study[J]. Construction and Building Materials, 2023,400:132689.
- [12] 杨莹,陈尚勇,杭红星. 铁路泡沫轻质土路基挡护结构的优化设计研究[J]. 铁道建筑, 2024, 64(3): 112-116.
- [13] 陶宇. 格栅增强泡沫混凝土及其路用性能试验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2023.
- [14] FALLIANO D, DE DOMENICO D, RICCIARDI G, et al. Improving the flexural capacity of extrudable foamed concrete with glass-fiber bi-directional grid reinforcement: an experimental study[J]. Composite Structures, 2019, 209:45-59.
- [15] HULIMKA J, KRZYWOŃR, J Ę DRZEJEWSKA A. Laboratory tests of foam concrete slabs reinforced with composite grid [J]. Procedia Engineering, 2017,193:337-344.
- [16] 王志杰,蔡永明,齐逸飞,等. 土工格栅加筋橡胶碎石混合料大型三轴试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7):2509-2520.
- [17] 吴黎明,朱亚林,许倩,等. 土工格栅加筋砂土的三轴试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(1):83-90.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 全国水泥制品标准化技术委员会(SAC/TC 197). 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.
- [21] 张昕毅. 聚丙烯纤维改性橡胶泡沫轻质土静动力学特性及耐久性能研究[D]. 济南:山东大学, 2023.
- [22] 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, 50(10):1228-1236.
- [23] 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(增刊1):241-245.
- [24] 美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM). 使用三分点加载梁法测试纤维增强混凝土弯曲性能的标准试验方法: ASTM C1609/C1609M—2024 [S]. West Conshohocken, United States: ASTM, 19428-19437.
- [25] 程冠之. 制备参数对泡沫轻质土工作性能和力学性能的影响[J]. 铁道建筑, 2017,57(1):56-60.
- [26] 侯智坚,王爱涛,公彦昆,等. 泡沫轻质土力学性能与干湿循环试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021,53(1):80-85.

## Experimental study on the flexural performance of geogrid-reinforced foamed lightweight soil

LI Yinhe<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1\*</sup>, ZHANG Hongbo<sup>2</sup>

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China

**Abstract :** To study the flexural performance of geogrid - reinforced foam lightweight soil , water , cement , and  
(下转第 109 页)

is established using the finite element software COMSOL to analyze the dynamic mechanical response of the pavement layer under low temperature conditions and the coupling effects of low temperature and dynamic loads. The results indicate that under low temperature conditions, the maximum displacement at the top of the pavement layer reaches 28.75 mm, with an average principal stress of 0.79 MPa. Under the coupling effects of low temperature and dynamic loads, the pavement layer primarily experiences tensile stress, with the tensile stress in the upper layer being greater than that in the lower layer. The tensile stress in the pavement layer increases from the center of the load towards the edges, and the maximum displacement of the pavement layer increases with the increase of the load.

**Keywords:** concrete bridge; bridge deck; temperature-load coupling; mechanical response

(责任编辑:王惠)

.....  
(上接第 85 页)

foaming agent are mixed in a certain mass ratio to achieve a flow value of 160–200 mm. Four different numbers of geogrid reinforcement layers (0, 1, 2, 3 layers) and three wet densities (600, 700, 800 kg/m<sup>3</sup>) are used. Square geogrids with a side length of 95 mm and rectangular geogrids measuring 95 mm in width and 395 mm in length are placed in the test mold. After curing for 28 days, the specimens are demolded, and foam lightweight soil specimens reinforced with geogrids are prepared. Unconfined compressive strength tests and four-point bending tests are conducted to analyze the effects of wet density and reinforcement layers on the flexural performance of foam lightweight soil from the aspects of displacement-load curves, failure modes, displacement-load characteristics, unconfined compressive strength, and flexural strength. The research findings are as follows: After loading, the reinforced foam lightweight soil transitions from brittle failure to elastic-plastic failure, significantly enhancing the flexural performance of the foam lightweight soil by transmitting load to the interior of the specimen according to the bonding stress mechanism; during the loading process, the foam lightweight soil primarily bear the load in the early stage, while the geogrid mainly bear the load in the later stage; the addition of geogrids significantly improves both the unconfined compressive strength and flexural strength of foam lightweight soil, with the maximum unconfined compressive strength reaching 3.16 MPa and the flexural strength increasing by up to 168%; a predictive equation for unconfined compressive strength based on wet density and reinforcement layers is established, revealing a good correlation between the ratio of unconfined compressive strength to flexural strength and wet density.

**Keywords:** foam lightweight soil; geogrid; flexural performance; displacement-load curve

(责任编辑:王惠)

.....  
(上接第 92 页)

depth, dynamic modulus, freeze-thaw strength splitting ratio, and fatigue life. The low-temperature performance, water stability, and fatigue life of AC-10-SBS(H) are superior to those of AC-20-SBS(H), while the high-temperature stability of AC-20-SBS(H) is better than that of AC-10-SBS(H); at a temperature of 15 °C and a loading frequency of 10 Hz, the dynamic modulus of AC-20 and AC-10 high modulus modified asphalt mixtures are similar. It is recommended that in cold regions, AC-10 and AC-20 high modulus asphalt mixtures adopt a combination of high-modulus agent and SBS modified asphalt.

**Keywords:** SBS modified asphalt; high modulus asphalt mixture; road performance

(责任编辑:王惠)