

Experimental Study on the Load-Bearing Characteristics of Light Foam Concrete

Zhe Wang¹, Liyao Wan¹, Zhenjiang Li², Yisheng Yao¹, Han Yu¹

¹School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

²Shandong Traffic Planning and Design Institute, Jinan Shandong

Email: 475752051@qq.com

Received: Mar. 3rd, 2020; accepted: Mar. 18th, 2020; published: Mar. 25th, 2020

Abstract

To explore the applicability of the light foam concrete in the subgrade, the destruction of light foam concrete as embankment filling pattern and stress state is studied. This paper uses the indoor model test research, and simulation of light foam concrete roadbed filler; under the condition of load and the rigid support, different filling thickness changing of light foam concrete roadbed and the lower part of soil sandy roadbed internal force and deformation are studied. The test results show that the failure loads of the samples with different heights of light foam concrete are different; and the higher the height, the greater the failure loads, but the allowable tensile stress at the bottom of the samples is basically the same. With the increase of the width of the light foam concrete specimen, the compressive stress zone at the bottom of the specimen increases and the specimen can bear more loads. The height of the light foam concrete specimen has the greatest influence on the load.

Keywords

Light Foam Concrete, the Bearing Performance, Different Filling Thickness

气泡混合轻质土承载特性模型试验研究

王喆¹, 万立尧¹, 李振江², 姚义胜¹, 于瀚¹

¹山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

²山东省交通规划设计院, 山东 济南

Email: 475752051@qq.com

收稿日期: 2020年3月3日; 录用日期: 2020年3月18日; 发布日期: 2020年3月25日

摘要

为了探究气泡混合轻质土在路基中的适用性研究, 得到气泡混合轻质土作为路堤填料时的破坏模式及受力状况。制作了不同高度的气泡混合轻质土试件, 将其作为路基填料部分, 在模拟行车荷载作用下, 研

究其承载性能和下部砂质路基的受力以及变形情况。试验结果表明：不同高度的气泡混合轻质土试件所能承受的荷载并不一样，随着轻质土试件高度的增加，承受荷载越大，然而试件底部的容许拉应力变化不大。经过破坏荷载影响因素灵敏度分析后，试件宽度的增加也可以使试件的破坏荷载增大。不过试件高度对其影响最大。

关键词

气泡混合轻质土，承载性能，换填厚度

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气泡混合轻质土是一种新型轻质填土材料，先用水将发泡剂稀释，通过发泡设备将发泡液制备成泡沫，与水、水泥、水及集料、掺和料混合搅拌，经过水化反应形成的一种轻质材料。因具有轻质性、密度可调性、施工便捷、环保等特性近年来被大量应用[1] [2] [3]。相比较传统路基施工方法，气泡混合轻质土应用于高等级公路、桥涵等公路工程时，克服了传统路基施工取土困难、工序复杂、工后沉降大等诸多问题，可替代常规填土进行路基填筑，减少工后沉降，加快施工进度，有效改善路基路面结构刚度匹配，大幅节约工程占地，有利于环境及文物保护[4] [5] [6] [7] [8]。目前，广东、浙江、天津等地在公路工程中已经将其作为路基填料成功应用，取得了良好的经济效益和社会效益，具有广阔的推广应用前景[9] [10] [11]。

然而现阶段对于气泡混合轻质土的研究大多数处于对其基本力学性能和现场施工工艺阶段，缺少把气泡混合轻质土当做路基填料使用时的承载性能研究。因此针对这个问题，本文通过制作不同高度气泡混合轻质土试件，将其作为路基换填材料。研究在行车荷载作用下，气泡混合轻质土的承载性能以及其影响因素，并对轻质土下部砂质填料的受力情况进行研究，得到荷载分布规律。

1.1. 试验方案

车辆荷载的布置图设计参考《公路桥涵设计通用规范》。按照最不利情况设计，车轮间距 1.8 m，研究宽度取两侧车轮 0.4 m。其平面、立面布置图和横向布置图如图 1 和图 2 所示。

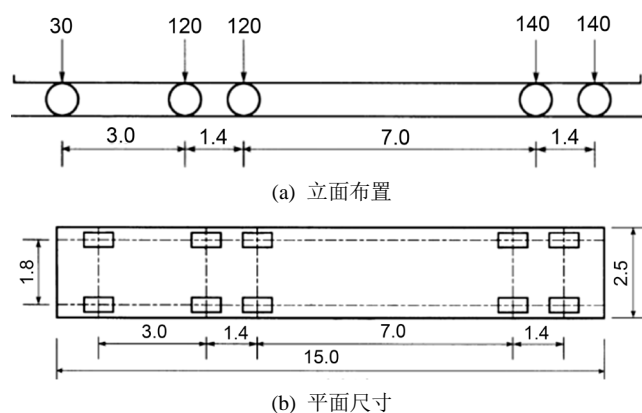


Figure 1. Elevation and plane size of vehicle load (the size unit: mm, the load unit: kN)

图 1. 车辆荷载的立面、平面尺寸(尺寸单位: mm, 荷载单位: kN)

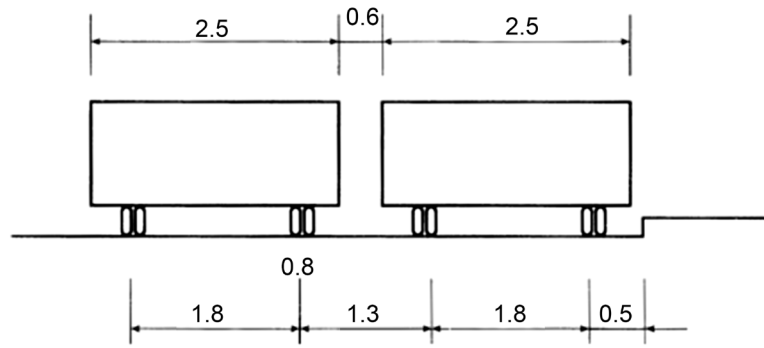


Figure 2. Lateral arrangement of vehicle loads (the size unit: m)
图 2. 车辆荷载横向布置(尺寸单位: m)

试验模型槽设计参考《公路路基设计规范》，根据汽车荷载通过路面传递到路基的应力与路基土自重应力之比大于 0.1 的应力分布深度要求。模型槽长宽高为 1.2 m × 1.2 m × 1.6 m，并在其顶部架设反力梁。

1.2. 轻质土试件的制备及工况设计

本文根据姜海龙，王喆等人研究结果[12]，采用湿密度 700 kg/m³、粉砂掺量 30%的配合比制成的气泡混合轻质土试件进行承载性能研究。配合比组成见表 1。

Table 1. Mix proportion
表 1. 试验用配合比

湿密度(kg/m ³)	水泥用量(kg/m ³)	用水量(kg/m ³)	粉砂土掺量(%)	粉砂土用量(kg/m ³)	泡沫用量(kg/m ³)
700	339	187	30	145	28

根据相似理论公式：

$$S_1 = \frac{l_p}{l_m} = \frac{b_p}{b_m} = \frac{h_p}{h_m} \tag{1-1}$$

式中， S_1 ——几何相似常数；

l_p, l_m ——模型长度；

b_p, b_m ——模型宽度；

h_p, h_m ——模型高度。

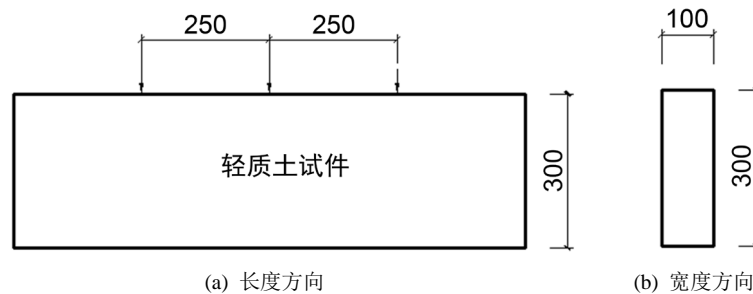


Figure 3. Schematic diagram of load arrangement and specimen width (Unit: mm)
图 3. 荷载布设及试件宽度示意图(单位: mm)

根据图 2, 取 $S_1 = 8$, 本文模型试验的加载间距为: $\frac{1.8\text{m}}{S_1} = \frac{1.8\text{m}}{8} = 0.225\text{m}$, 取 0.25m ; 气泡混合轻质土试件宽度为 $\frac{0.8\text{m}}{S_1} = \frac{0.8\text{m}}{8} = 0.1\text{m}$: 因为气泡混合轻质土在实际浇筑过程中每 80 公分浇筑一层, 所以在选取实际换填厚度时, 用 0.8m , 1.6m , 2.4m 和 3.2m 按 $S_1 = 8$ 进行换算得到试验用轻质土试件高度: 0.1m , 0.2m , 0.3m 和 0.4m , 如图 3 所示。

考虑到气泡混合轻质土作为路基填料时, 更接近于条形基础, 其长度方向为路基纵向, 其宽度方向为路基横向。根据条形基础需满足长宽比 ≥ 10 , 因此长度取 1m 。

1.3. 填料参数

本试验中, 用《公路土工试验规程》(下称土工规程)中筛分法测得试验用砂的颗粒级配。试验结果如图 4 所示, 由图可以得到:

$$d_{10} = 0.27, d_{30} = 0.61, d_{60} = 2,$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 8.3 \geq 5, C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}} = 0.69 < 1, \text{级配不良。}$$

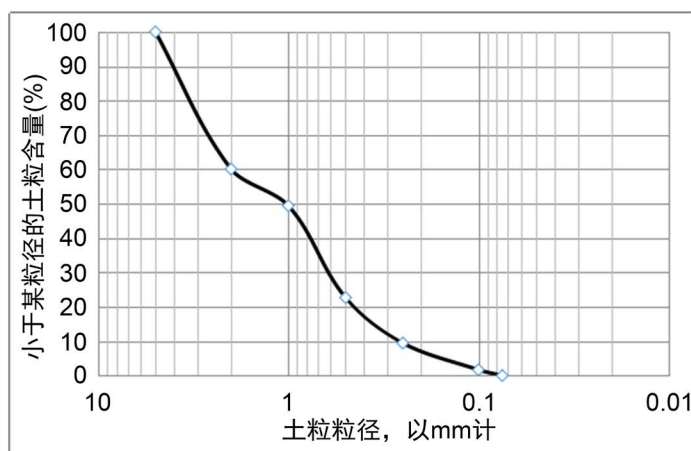


Figure 4. Grading curve of test sand
图 4. 试验砂级配曲线

在试验中除去粒径大于 5mm 的颗粒。依据土工规程, 测得试验用砂的最小、最大干密度, 得到 $\rho_{d,\min} = 1.552\text{g/cm}^3$, $\rho_{d,\max} = 1.963\text{g/cm}^3$ 。在进行试验前, 将砂子进行烘干, 然后填入模型槽。因干砂在实际试验过程中压实困难, 所以选择压实度为 60% , 采用质量控制法确定试验用砂压实度。

将模型槽高度分成 7 层进行干砂填筑, 进行填筑前在模型槽内部模板上画出分层线以便于换填, 一层的换填质量为 $1/7\text{m}$ 。在每层干砂换填完成后, 使用小型压实线将干砂压实至分层线以确保干砂压实度。

1.4. 监测方案

1) 应变片布设

为了探究气泡混合轻质土在路堤的受力及变形情况, 根据要求使用 5cm 长度应变片测试气泡混合轻质土试件底部在分级加载作用下应变参数。因试件底部应变主要发生在中部, 所以集中将应变片粘贴在中部区域, 如图 5 所示。

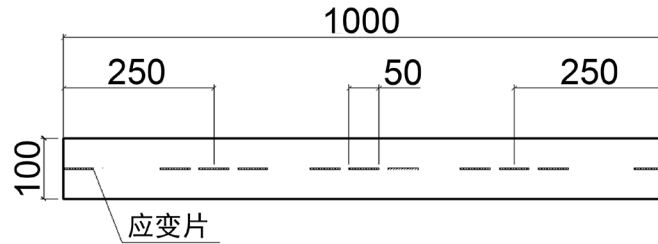


Figure 5. Strain gauge arrangement (Unit: mm)
图 5. 应变片布置图(单位: mm)

2) 土压力盒布设

土压力盒布设位置如图 6 所示, 在图示指定位置的干砂处挖出直径为 12 cm, 深度 4 cm 的圆形坑, 在底端 5 cm 范围内撒入细砂然后进行整平。整平后将土压力盒放入其中, 然后在其上部撒入相同细砂, 然后进行下一层干砂填筑。

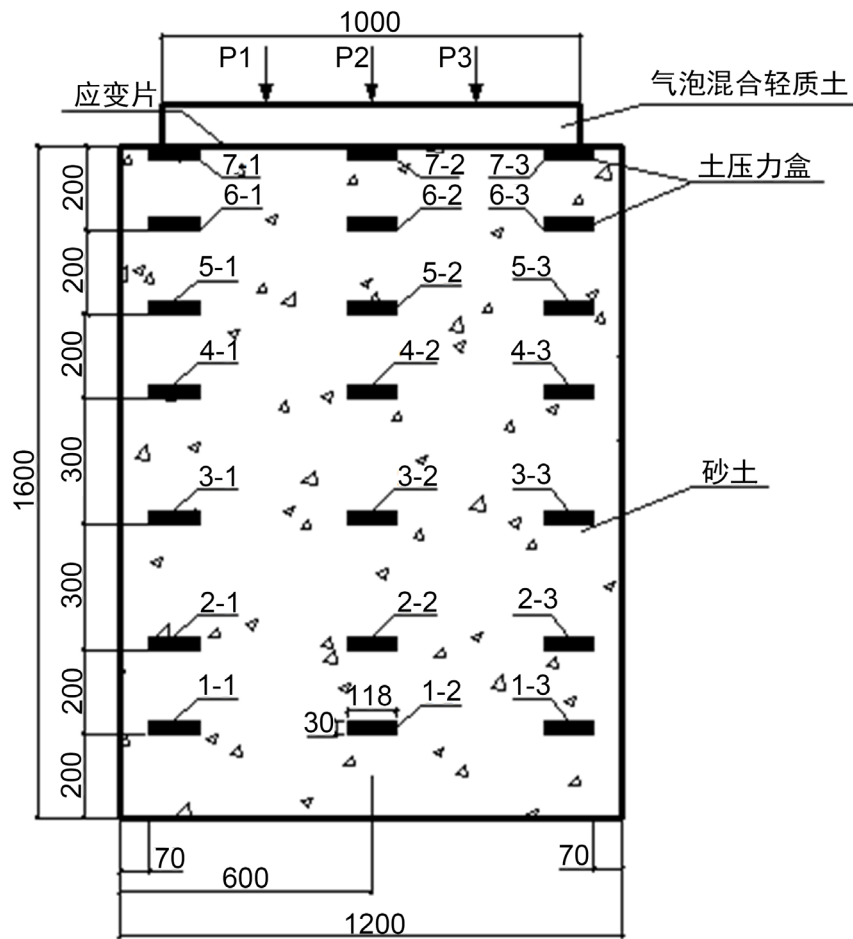


Figure 6. Earth pressure box arrangement
图 6. 土压力盒布置图

1.5. 试验步骤

本室内模型试验步骤如下:

- 1) 在试验开始前, 对所用土压力盒进行标定, 检查应变片是否损坏, 然后对应变片和土压力盒进行编号;
- 2) 在进行干砂填筑时, 精确控制分层填筑高度, 以确保将干砂密实度控制在 60%;
- 3) 布设土压力盒时, 对其上下部进行整平, 确保数据精确, 在土压力盒布设完成后下一层干砂填筑前, 及时记录土压力盒数据, 并在每层干砂填筑完成后, 对其下部各层土压力盒进行测量;
- 4) 进行下一层的填筑、夯实, 以及土压力盒布设, 直到填满整个模型箱; 按照上述步骤进行土压力盒布设和干砂填筑, 直到干砂填满模型槽;
- 5) 将应变片粘贴在不同高度气泡混合轻质土试件底部;
- 6) 用千斤顶对在气泡混合轻质土试件进行分级加载, 因试件高度不够, 在其顶部放置垫块以确保可以达到预定荷载。在每一级加载完成后测量土压力盒和应变片及相应数据。并观察试件变形及破坏模式。

2. 试验结果与分析

在气泡混合轻质土试件脱模过程中, 由于养护龄期较短, 试件较大, 以致 20 cm 高度的气泡混合轻质土试件没有完成脱模, 试件部分有较大损坏, 因此不对 20 cm 轻质土试件进行试验。

1) 气泡混合轻质土裂缝的产生及发展

在对试件进行加载过程中发现, 裂缝首先会出现在气泡混合轻质土试件底部中心区域, 当分级荷载逐渐加大时, 试件裂缝会沿试件中部向上发展, 直到试件破坏。试件裂缝如图 7 所示。

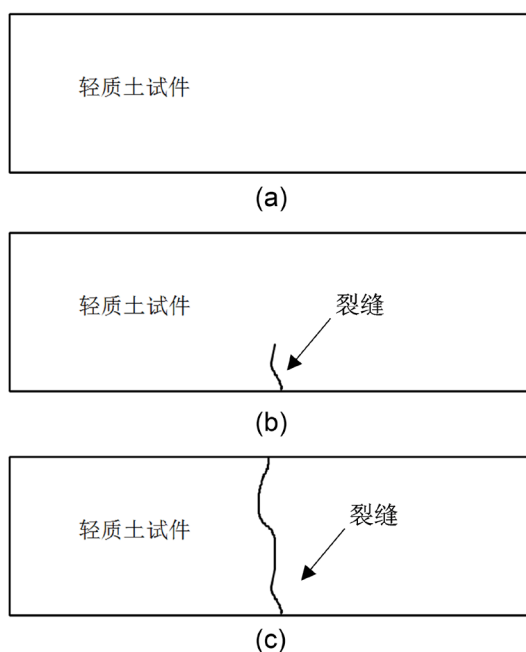


Figure 7. Formation and development of cracks in specimens with height of 30 cm. (a) The first stage load; (b) The sixth stage load; (c) The seventh stage load

图 7. 高度 30 cm 试件裂缝的产生及发展。(a) 第一级荷载; (b) 第六级荷载; (c) 第七级荷载

在 10 cm 高度气泡混合轻质土试件在荷载加到 55.48 kPa 时, 裂缝出现在底部中心处, 并且试件很快发生破坏。而在两侧加载点的下方也很快发生断裂, 如图 8 所示。说明在气泡混合轻质土试件底部中心区域有较大拉应力。在试件右侧画圈处的裂缝是由上而下产生, 说明 10 cm 气泡混合轻质土试件在其顶部和底部都会产生较大拉应力。究其原因, 是因为在分加载过程中发生了明显变形情况, 进而导致气泡

混合轻质土底部有非常大的拉应力发生，随后出现裂缝并很快破坏。然而由于不知道是不是高度对其产生影响，所以继续对剩下试件进行试验研究和观察。



Figure 8. Failure diagram of 10 cm specimen
图 8. 10 cm 试件破坏图

在进行完 30 cm 和 40 cm 高度气泡混合轻质土试验后，我们发现试件底部分别在荷载达到 83.20 kPa 和 97.07 kPa 时出现裂缝。由此可以得出结论，高度越高的试件，其所能承受的破坏荷载越大，并且时间不会发生较为明显的变形。试件破坏图如图 9 和图 10 所示，从图中我们可以看出试件裂缝并不是发生在正中间位置处，大多数裂缝发生在加载垫块边缘处，这是由于气泡混合轻质土试件刚度远小于垫块，所以在其边缘处容易发生剪切破坏。我们可以得出结论：气泡混合轻质土试件的破坏是由剪切和弯拉作用共同造成。

在进行完上述三组实验过后，我们可以总结出以下结论：使裂缝出现的荷载与试件高度为正相关关系，即试件高度越高，气泡混合轻质土试件的承受荷载越大。并且试件高度越高，试件变形越不明显，即试件基础刚度越大，试件底部所能承受的应力也就越大。



Figure 9. Failure diagram of 30 cm specimen
图 9. 30 cm 试件破坏图



Figure 10. Failure diagram of 40 cm specimen. (a) Side; (b) Bottom
图 10. 40 cm 试件破坏图。(a) 侧面; (b) 底面

2) 气泡混合轻质土基底拉应力

图 11~13 所示气泡混合轻质土试件在分加载过程中, 其底部各点处拉应力变化规律。根据混凝土相关规范, 当试件结构出现裂缝时可以将视为达到使用寿命, 也就是说视为结构破坏。因此在本试验中, 将底部发生裂缝时所得拉应力视为气泡混合轻质土试件容许拉应力。从图中我们可以得到三个高度试件的容许拉应力分别为 0.27 MPa、0.29 MPa 和 0.30 MPa。其平均值作为此配合比试件的容许拉应力。

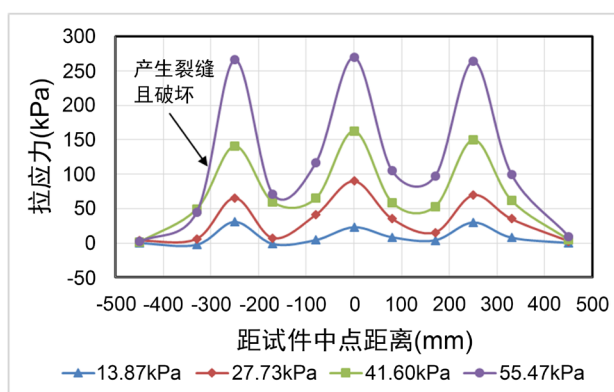


Figure 11. Variation of tensile stress of the 10 cm specimen bottom
图 11. 高度 10 cm 试件底部拉应力变化规律

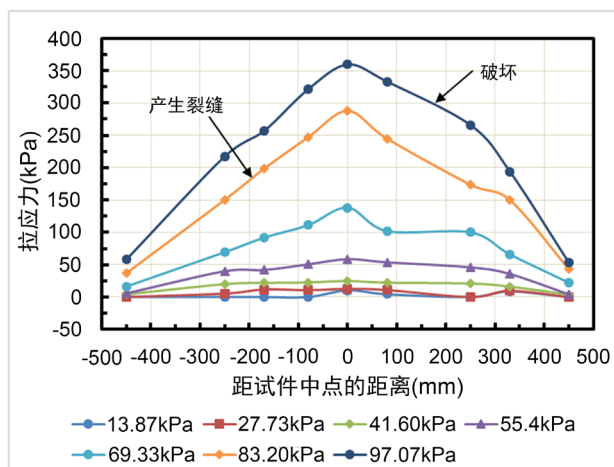


Figure 12. Variation of tensile stress of the 30 cm specimen bottom
图 12. 高度 30 cm 试件底部拉应力变化规律

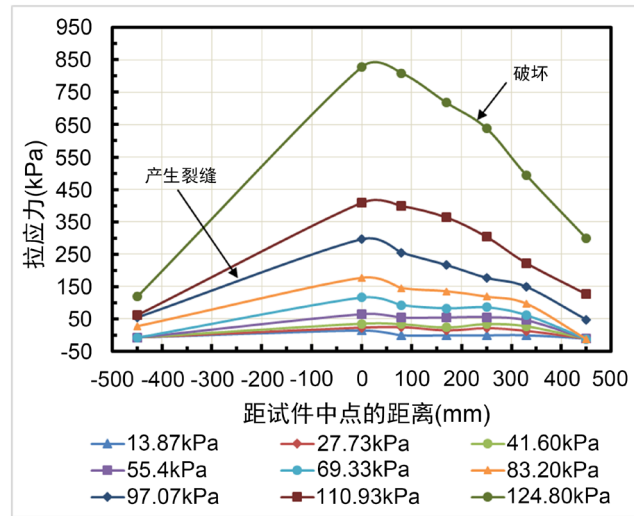


Figure 13. Variation of tensile stress of the 40 cm specimen bottom
 图 13. 高度 40 cm 试件底部拉应力变化规律

图 11~13 可以看出气泡混合轻质土在模型试验条件下，作为路堤材料，在试件彻底破坏前，拉应力会有较大的突变。在图 11 中，高度 10 cm 的气泡混合轻质土试件有柔性基础受力的特征，即最大拉应力出现在多处。图 12 和图 13 与图 11 正好相反，气泡混合轻质土试件最大拉应力集中在一点出现。说明这两个高度的试件为刚性基础受力特征。

如图 14 所示，我们可以看出 L/H (长高比)分别为 10、3.3 和 2.5 的气泡混合轻质土试件的容许拉应力相差不大，然而破坏拉应力随着 L/H 的减小而增大，即气泡混合轻质土试件长高比越小，其在破坏时所能承受的荷载也就越大。Ps: 高度 10 cm、30 cm 和 40 cm 试件的长高比分别为 10、3.3 和 2.5。

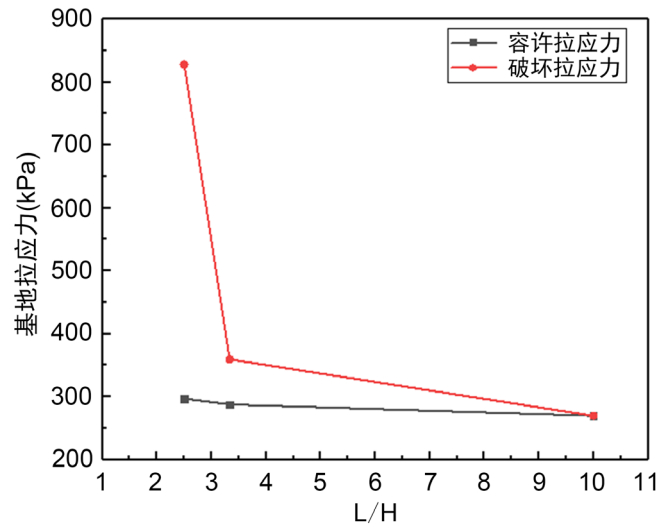


Figure 14. Variation of tensile stress of the different ratio of length and height specimen
 图 14. 不同长高比试件拉应力变化规律

如图 15 和图 16 所示，我们可以得出结论：气泡混合轻质土底部中心区域的拉应力随着分级荷载的增加而增加，并且是呈指数增长趋势。而试件两侧较远处拉应力增长趋势平缓。

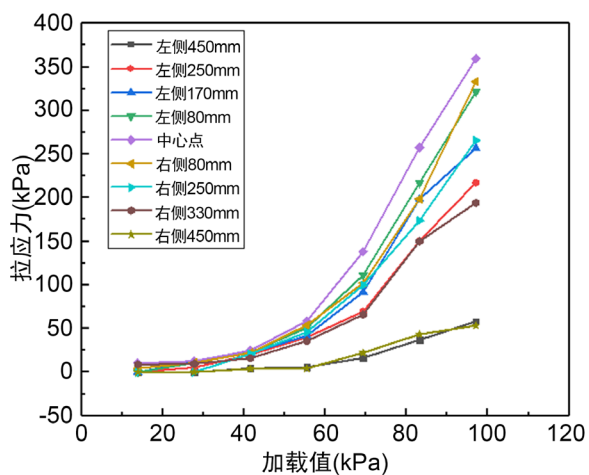


Figure 15. Variation of tensile stress of 30 cm specimen

图 15. 高度 30 cm 试件拉应力变化规律

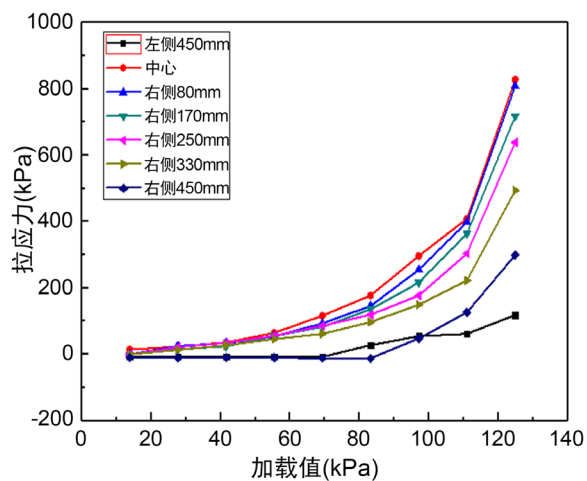


Figure 16. Variation of tensile stress of 40 cm specimen

图 16. 高度 40 cm 试件拉应力变化规律

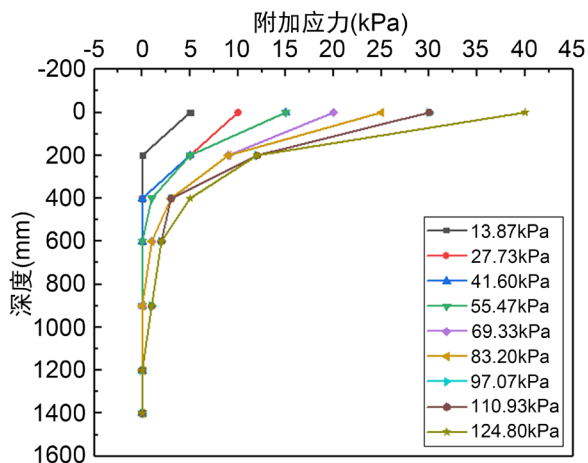


Figure 17. Variation of additional stress with depth at the center of model box

图 17. 模型槽中心位置处附加应力随深度的变化规律

3) 砂质路基附加应力

图 17 表示 40 cm 气泡混合轻质土试件下部路基附加应力的变化规律。由图所知：当砂质路基深度为 1200 mm 位置以下时，所有荷载对砂质路基造成附加应力都为 0，即行车荷载对砂土路基的影响深度小于 120 mm，间接证明了模型槽高度满足应力扩散要求。在进行其他试件附加应力试验时，其规律皆与 40 cm 高度试件一样，不再陈述。

3. 破坏荷载灵敏度分析

本文模型试验仅研究了高度对气泡混合轻质土破坏荷载的影响，下面通过数值模拟研究各因素对气泡混合轻质土试件破坏荷载的影响。并对其进行灵敏度分析。

3.1. 模型验证

运用 FLAC3D 软件首先对试验模型进行验证，所建模型见图 18，然后按照实际试验方法对所建模型进行模拟，得到模拟值与实际测试值对比图(图 19 和图 20)。由图中可看出模拟值与实际测试值结果临近。

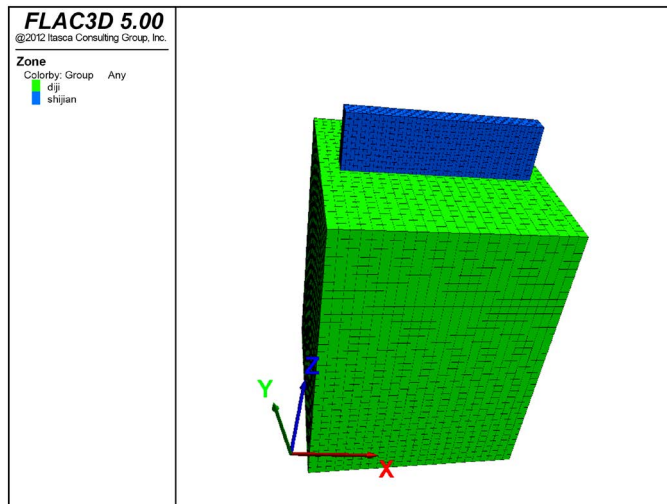
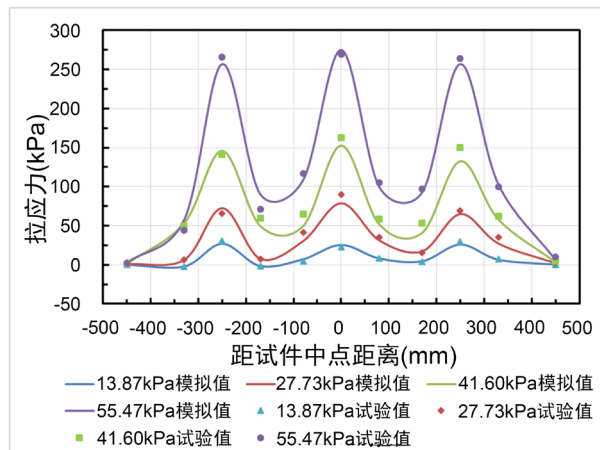
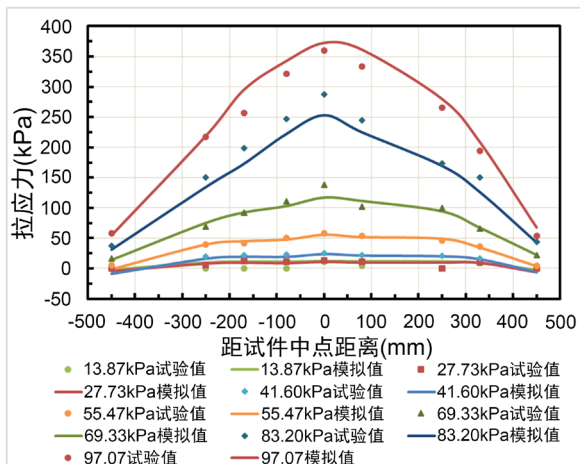


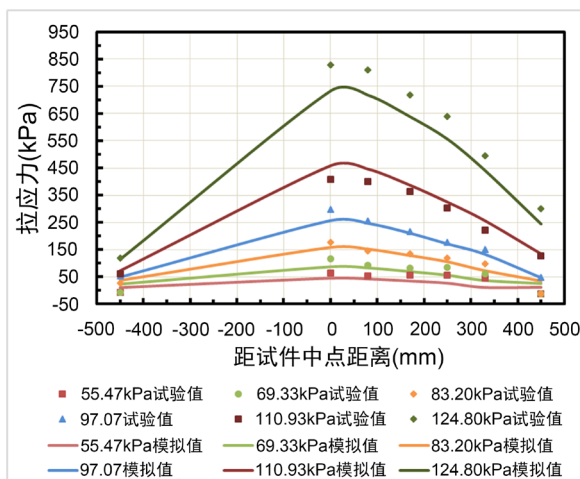
Figure 18. Model building
图 18. 模型建立



(a)



(b)



(c)

Figure 19. The measured and simulated values of tensile stress of the specimen bottom. (a) The specimen with a height of 10 cm; (b) The specimen with a height of 30 cm; (c) The specimen with a height of 40 cm

图 19. 试件底部拉应力实际值与模拟值。(a) 10 cm 高试件；(b) 30 cm 高试件；(c) 40 cm 高试件

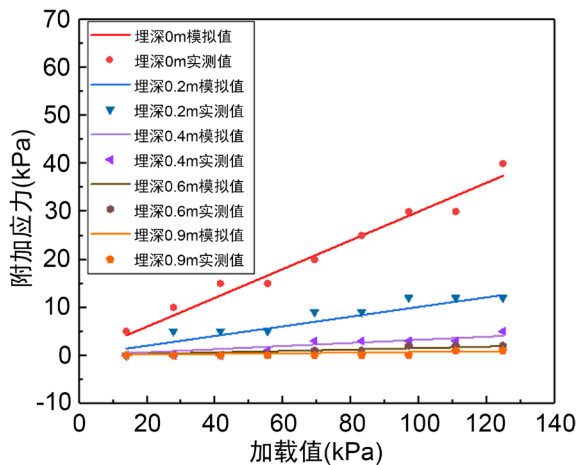


Figure 20. The measured and simulated values of additional stresses at the center of the model box

图 20. 模型箱中心位置处附加应力实测值与模拟值

3.2. 参数灵敏度分析

1) 高度变化

在实际试验过程中没有进行 20 cm 高度气泡混合轻质土试件加载, 由于模拟值与实际值临近, 用软件得到 20 cm 时间底部拉应力变化规律基本可以视为实际变化规律。由图 21 可以看出当气泡混合轻质土试件加载到 41.60 kPa 时, 应力值大于 0.29 MPa, 试件已经出现裂缝。并且其底部拉应力变化规律与 10 cm 气泡混合轻质土底部拉应力变化规律相似, 有多处拉应力突点, 说明其为柔性基础承载特性。即高度 20 cm 以下气泡混合轻质土试件为柔性基础特性, 反之为刚性基础特性。

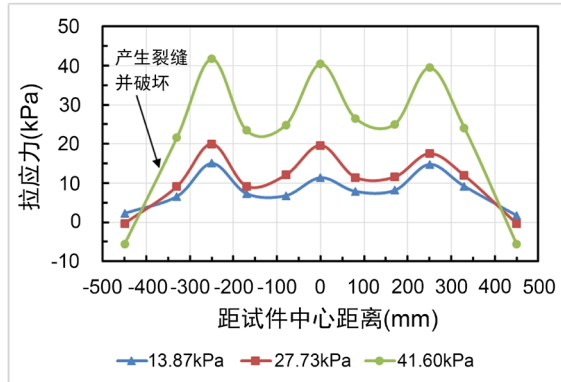


Figure 21. Variation of tensile stress of the 20 cm specimen bottom
图 21. 20 cm 试件底部拉应力变化规律

图 22 为不同高度试件底部拉应力变化规律, 加载荷载为 41.60 kPa。由图可以看出加载荷载一定时, 气泡混合轻质土底部拉应力随试件高度的增大而减小, 即高度越高的气泡混合轻质土试件所能承受的荷载越大。

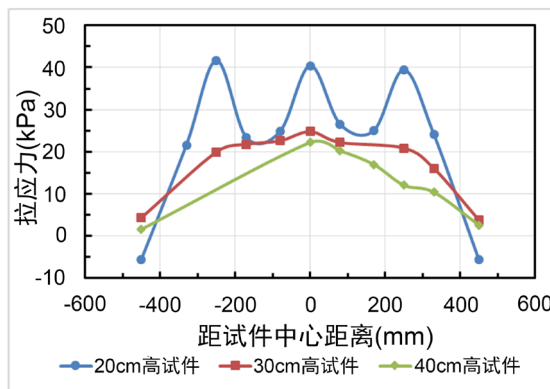


Figure 22. Variation of tensile stress at the bottom of specimens at different heights (with 41.60 kPa)
图 22. 不同高度试件底部拉应力变化规律(加载 41.60 kPa)

2) 宽度变化

在实际试验过程中, 试件宽度固定为 10 cm, 本节采用数值模拟研究宽度对气泡混合轻质土试件底部拉应力的影响, 研究结果如图 23 所示, 得到宽度为 15 cm 和 20 cm 的气泡混合轻质土试件底部拉应力变化规律, 由图可知轻质土试件底部拉应力随宽度的增加而减小, 即气泡混合轻质土试件宽度越大, 其所能承受的荷载也越大。在图 23 圈出的位置表示气泡混合轻质土试件底部长度方向中线上部分区域出现了压应力区域。

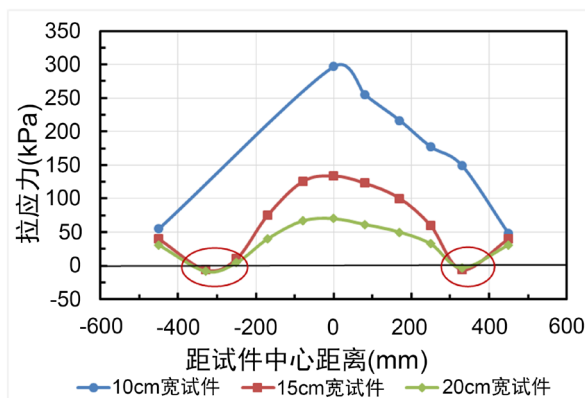


Figure 23. Variation of tensile stress at the bottom of specimens at different width (with 97.07 kPa)

图 23. 不同宽度试件底部拉应力变化规律(加载 97.07 kPa)

3) 静弹性模量

不同配合比的气泡混合轻质土具有不同刚度，静弹性模量是表征试件刚度的一个参量，本文根据姜海龙，王喆等人[12]得到的气泡混合轻质土(静)弹性模量试验结果通过 FLAC3D 进行数值仿真计算，研究静弹性模量对气泡混合轻质土试件底部的影响。

图 24 表示不同弹性模量条件下气泡混合轻质土试件底部拉应力变化规律。在荷载一定时，气泡混合轻质土试件底部拉应力随静弹性模量的增大而减小，不过减小量除在中心位置处较为明显，在其他位置处变化不大。即静弹性模量对气泡混合轻质土试件的破坏荷载影响较小。

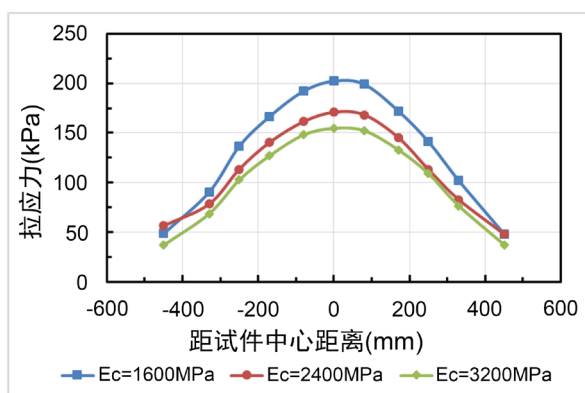


Figure 24. Variation of tensile stress of the specimen bottom with different elastic modulus (with 86.67 kPa)

图 24. 不同弹性模量条件下试件底部拉应力变化规律(加载 86.67 kPa)

4) 砂质路基回弹模量变化

在进行实际模型试验前，测得砂质路基回弹模量为 65 MPa。研究砂质路基回弹模量对气泡混合轻质土试件底部拉应力的影响时，分别取其 1.5 和 2 倍的回弹模量进行模拟，结果如图 25 所示。由图可知气泡混合轻质土试件底部拉应力变化不大，说明回弹模量对其影响较小。

5) 影响因素灵敏度分析

通过上述研究内容可以得到试件高度、宽度、静弹性模量以及砂土回弹模量对气泡混合轻质土底部拉应力有不同程度的影响。即气泡混合轻质土试件的破坏荷载受多因素影响，为探究影响程度对上述内容分析，得到结果如图 26 所示。对气泡混合轻质土试件破坏荷载的影响程度高度 > 宽度 > 静弹性模量 > 砂土回弹模量。增大气泡混合轻质土的高度和宽度是提高其承载性能的最有效方法。

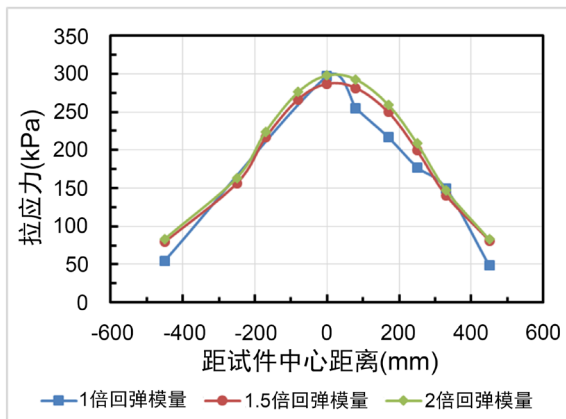


Figure 25. Variation of tensile stress of the specimen bottom with different rebound modulus (with 97.07 kPa)
 图 25. 不同回弹模量条件下试件底部拉应力变化规律(加载 97.07 kPa)

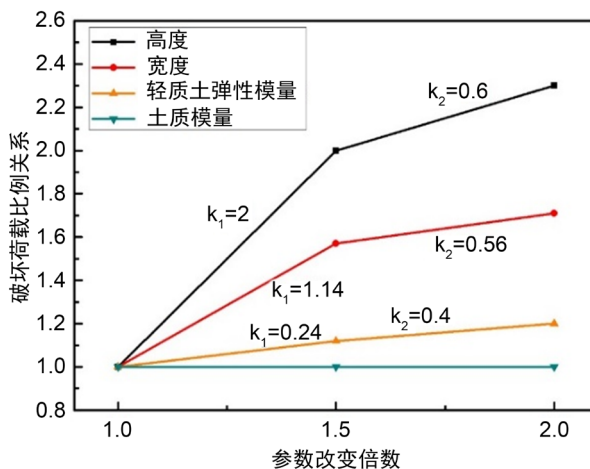


Figure 26. The influence of each parameter on the failure load
 图 26. 各参数对破坏荷载的影响

4. 结论

通过室内模型试验与数值模拟相结合的方法, 探究了气泡混合轻质土作路基换填材料时的承载性能, 得到以下主要结论:

- 1) 不同高度的气泡混合轻质土试件底部容许拉应力基本相同, 其破坏拉应力即破坏荷载与高度呈正相关关系。
- 2) 高度为 10 cm 和 20 cm 的气泡混合轻质土试件为柔性基础特性, 高度为 30 cm 和 40 cm 的气泡混合轻质土试件为刚性基础特性。
- 3) 通过数值仿真软件可以知道通过增加气泡混合轻质土试件宽度使试件可以承受更大荷载, 并且试件底部会出现压应力区域。
- 4) 对气泡混合轻质土试件破坏荷载的影响因素进行分析, 得出影响程度为高度 > 宽度 > 静弹性模量 > 砂土回弹模量。砂质路基回弹模量可以视为对试件破坏荷载没有影响。

参考文献

[1] Ramamurthy, K., Nambiar, E.K.K. and Ranjani, G.I.S. (2009) A Classification of Studies on Properties of Foam Con-

-
- crete. *Cement and Concrete Composites*, **31**, 388-396. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
- [2] Amran, Y.H.M., Farzadnia, N. and Ali, A.A.A. (2015) Properties and Applications of Foamed Concrete; A Review. *Construction and Building Materials*, **101**, 990-1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
- [3] Tian, T., Yan, Y., Hu, Z., et al. (2016) Utilization of Original Phosphogypsum for the Preparation of Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, **115**, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028>
- [4] Watabe, Y. and Noguchi, T. (2011) Site-Investigation and Geotechnical Design of d-Runway Cons Truction in Haneda Airport. *Soils & Foundations*, **51**, 1003-1018. <https://doi.org/10.3208/sandf.51.1003>
- [5] Kim, T.-H., Kim, T.-H. and Kang, G.-C. (2013) Performance Evaluation of Road Embankment Constructed Using Lightweight Soils on an Unimproved Soft Soil Layer. *Engineering Geology*, **160**, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.024>
- [6] 黄琴龙, 凌建明, 吴征, 钱劲松. EPS 轻质填料处治平原软基地区路基拓宽工程[J]. 塑料, 2004, 33(6): 74-78.
- [7] 史志楼. 气泡混合轻质土在桥头跳车问题处理中的应用[J]. 山西建筑, 2019, 45(7): 152-154.
- [8] 范鹏举, 武杨, 张磊. 高速公路改扩建工程气泡轻质土设计与优化[J]. 现代交通技术, 2018, 15(3): 18-22.
- [9] 童瑞铭. EPS 颗粒混合轻质土(LsEs)与砂土的动力特性对比试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [10] 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]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [11] 金菲力. 淤泥再生混合轻质土工程特性的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [12] 姜海龙, 王喆, 许孝滨, 毕玉峰, 宋杰, 万立尧. 水泥基泡沫轻质粉土力学性能试验研究[J]. 土木工程, 2019, 8(7): 1172-1178.