

# 掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量特性研究

苑智江<sup>1</sup>, 王川<sup>2</sup>, 关宏信<sup>3</sup>, 高英力<sup>3</sup>

(1. 内蒙古自治区乌兰察布市公路工程质量监督站, 内蒙古 乌兰察布 012000; 2. 苏州规划设计研究院股份有限公司惠州分公司; 3. 长沙理工大学 交通运输工程学院)

**摘要:**为了适应公路路基工程设计的需要,对掺粉煤灰气泡轻质土的动态回弹模量开展了室内试验研究。采用正交试验方案开展动三轴试验,对胶凝材料用量、粉煤灰掺加比例、水胶比影响气泡轻质土动态回弹模量的程度进行对比分析。结果表明:胶凝材料用量影响最大,粉煤灰掺加比例次之;在不同围压和偏应力的组合加载条件下,当轴向应力和围压同步等量增大时,掺粉煤灰气泡轻质土的动态回弹模量随之增加;仅轴向应力增加时,动态回弹模量随之减小。并基于 JTG D30—2015《公路路基设计规范》推荐的通用模型,建立掺粉煤灰气泡轻质土的动态回弹模量预估模型。

**关键词:**气泡轻质土; 动态回弹模量; 粉煤灰; 动三轴试验

## 1 前言

气泡轻质土是一种以水泥浆为基材并混入气泡的轻型建筑材料,由于其具有质量轻、可泵送等优势而得到越来越广泛的应用。在公路工程领域,气泡轻质土主要用于软基换填、桥台台背填筑、路基拓宽和路基填筑等场合,然而,气泡轻质土造价相对较高也限制了其进一步的推广应用。采用粉煤灰替代部分水泥是一种行之有效的降低气泡轻质土造价的措施。同时,现行的 JTG D30—2015《公路路基设计规范》已经引入动态回弹模量,作为替代路基传统土质填料的材料,气泡轻质土的动态回弹模量特性也需要跟进研究。

近年来,随着工程应用的日益广泛,国内外对气泡轻质土力学性能的研究也日趋活跃。陈忠平在室内修建了含气泡轻质土的大型路基模型,施加动态循环荷载研究了路基的动力响应;开展室内试验研究了泡沫轻质土的动静强度比,以及不同潮湿状态、不同频率下的动弹性模量;刘勇、陈金威、高英力开展室内试验研究了粉煤灰、矿粉等不同外掺剂气泡轻质土的抗压强度、抗剪强度、干缩变形以及干湿循环和冻融循环后的强度损失;邹洽宇研究了发泡轻质土弹性模量与抗压

强度之间的相关关系;Tae-Hyung K 开展无侧限压缩试验,研究了气泡轻质土的应力应变特性;赵全胜开展三轴试验,分析了气泡轻质土的压缩变形特征;李苏醒从应用于机场道面垫层的角度,研究了气泡轻质土的抗冲击性能。

该文将开展动三轴试验,研究掺粉煤灰气泡轻质土的动态回弹模量,为气泡轻质土的工程应用提供参考。

## 2 试验材料及其制备

该文采用的发泡剂是自行配制的植物蛋白—松香蛋白复合发泡剂,稀释倍率为 40 倍。粉煤灰采用Ⅱ级灰,水泥采用 P. O. 42.5 级水泥。试验用多种粉煤灰掺量的气泡轻质土,其材料组成如表 1 所示。

表 1 掺粉煤灰气泡轻质土材料组成

编号	水泥/ (kg · m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg · m <sup>-3</sup> )	水/ (kg · m <sup>-3</sup> )	气泡/ (L · m <sup>-3</sup> )	湿密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )
1	272	68	170.0	709.88	545.49
2	238	102	187.0	687.65	561.38

收稿日期:2021-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51978080);国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金资助项目(编号:U1833127);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2018JJ4016);湖南省教育厅科学研究重点项目(编号:18A129)

作者简介:苑智江,男,硕士,高级工程师。

续表 1

编号	水泥/ (kg· m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg· m <sup>-3</sup> )	水/ (kg· m <sup>-3</sup> )	气泡/ (L· m <sup>-3</sup> )	湿密度/ (kg· m <sup>-3</sup> )
3	204	136	204.0	665.43	577.27
4	296	74	203.5	665.78	606.79
5	259	111	222.0	641.59	624.08
6	222	148	185.0	672.91	588.65
7	320	80	240.0	618.68	670.93
8	280	120	200.0	652.53	632.63
9	240	160	220.0	626.39	651.32

气泡轻质土的制备:首先将水泥、胶凝材料、水在搅拌机中混拌不少于 2 min,同时对发泡剂稀释液进行发泡;然后注入搅拌机,并与混合料混拌不少于 2 min;再将拌和均匀的混合料倒入备好的试模中,试模为底面直径 100 mm、高 200 mm 的圆柱体塑模;最后将试件用塑料薄膜裹覆后,放入温度为 20~25 ℃ 的养生室中进行养生,2 d 后脱模(图 1)。

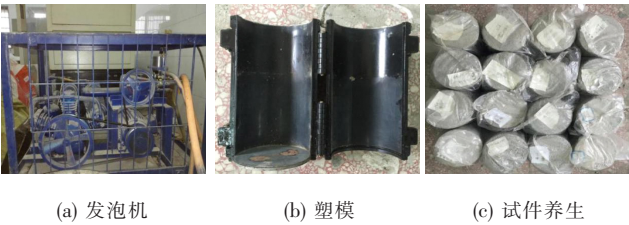


图 1 气泡轻质土制作设备

3 气泡轻质土动态回弹模量试验方法

该文采用从动三轴试验系统开展三轴试验。

由于加载的初始阶段试件会产生比较大的塑性变形,试验误差较大,一般需要进行预加载以消除这种影响。该文采用的预压次数为 1 500 次,围压为 40 kPa,偏应力为 30 kPa。

动态回弹模量正式试验时采用的半正弦波荷载频率为 1 Hz,加载时间为 0.2 s,间歇时间为 0.8 s,作用次数为 150 次。为分析加载条件对模量的影响,采用的围压与偏应力均在 10、20、30、40 kPa 中选择。试验过程中采集压力和回弹变形,每次试验取最后 5 次加载(即第 146、147、148、149、150 次)的动态回弹模量平均值作为该次试验的结果。平行试验次数为 3 次,每

次采用未受过荷载的不同试件。

4 材料组成对掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量影响分析

采用粉煤灰替代部分水泥虽然可以降低气泡轻质土的造价,但是也会对气泡轻质土的力学性能带来一定的影响。该文分析粉煤灰不同掺量比例对气泡轻质土动态回弹模量的影响,同时也将考虑与粉煤灰掺量相关的胶凝材料用量和水灰比的影响。为此,设计四因素三水平正交试验(表 2,由于因素 4 不对应具体的指标,在表中没有列出),以对比分析胶凝材料用量、粉煤灰掺配比例、水胶比 3 种因素对气泡轻质土动态回弹模量的影响。动三轴试验时,围压为 10 kPa,偏应力为 40 kPa,试验结果见表 2。表 2 中与三因素组合对应的水泥用量、粉煤灰用量和用水量与表 1 中相同编号情况下相同。

表 2 掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量正交试验设计及试验结果

编号	胶凝材料 用量(A)/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰掺 比(B)/ %	水胶比 (C)	空列 (D)	动态回 弹模 量/MPa
1		1(20)	1(0.50)	1	189.1
2	1(340)	2(30)	2(0.55)	2	177.3
3		3(40)	3(0.60)	3	158.3
4		1(20)	2(0.55)	3	219.0
5	2(370)	2(30)	3(0.60)	1	198.9
6		3(40)	1(0.50)	2	185.2
7		1(20)	3(0.60)	2	226.1
8	3(400)	2(30)	1(0.50)	3	214.6
9		3(40)	2(0.55)	1	206.9
K <sub>1</sub>	524.7	634.2	588.9		
K <sub>2</sub>	603.1	590.8	603.2		总和 T=
K <sub>3</sub>	647.6	550.4	583.3		1 775.4
R	41.0	27.9	6.7		

由表 2 可见:

(1) 按照动态回弹模量大小进行简单排序后可以发现:胶凝材料用量越大,模量越大;粉煤灰掺比越大,模量越小;虽然胶凝材料用量大时动态回弹模量一般也大,但同时粉煤灰掺比对排序也有一定影响,即粉煤

灰取代水泥比例较小时,动态回弹模量偏大。说明水泥在胶凝材料中起主要作用。

(2) 极差分析数据表明:对气泡轻质土动态回弹模量影响最大的因素是胶凝材料用量,影响最小的因素是水胶比。

(3) 一般情况下,模量值越大,说明试件强度越高,力学性能越好。 $A_3B_1C_2$  组合的动态回弹模量值最大,但是此时的水泥使用量最多,工程造价也最高。

从经济性的角度考虑,该文后续试验在  $A_3B_1C_2$  组合的基础上,采用粉煤灰掺比为  $B_3$  的组合  $A_3B_3C_2$  作为试验材料,即表 2 中编号为 9 的配合比(具体见表 1 中的编号 9)。

## 5 加载条件对掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量影响分析

前文试验是在固定加载条件下完成的,该节将针对动三轴试验,分析围压和偏应力及体应力对表 1 中编号 9 对应的掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量的影响。

该节不采用正交试验,对 4 种围压和 4 种偏应力的全面组合(一共 16 种荷载组合)开展动三轴试验,试验结果如图 2~4 所示。

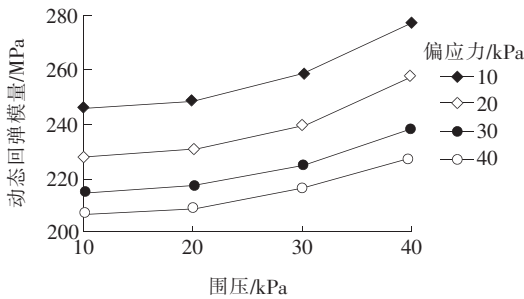


图 2 围压对气泡轻质土动态回弹模量的影响

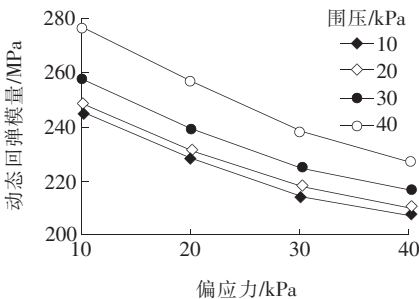
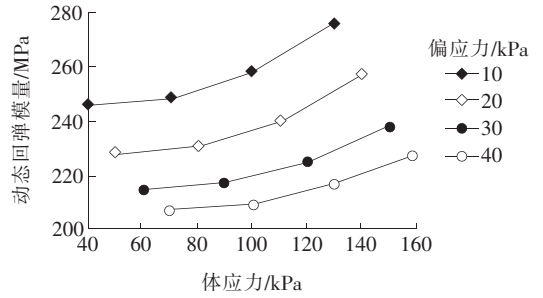
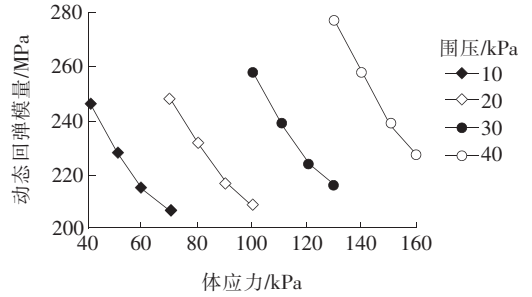


图 3 偏应力对气泡轻质土动态回弹模量的影响



(a) 偏应力变化



(b) 围压变化

图 4 体应力对气泡轻质土动态回弹模量的影响

由图 2~4 可见:

(1) 围压恒定时,气泡轻质土的动态回弹模量随偏应力或体应力的增加而减小;偏应力恒定时,气泡轻质土的动态回弹模量随围压或体应力的增加而增大。

(2) 当偏应力固定,而围压增大时,轴向应力(偏应力+围压)也应同步等量增大(图 2);当偏应力固定,而体应力(偏应力+3 倍围压)增大时,对应的其实也是轴向应力和围压同步等量增大[图 4(a)]。两图都表明:当轴向应力和围压同步等量增大时,气泡轻质土的动态回弹模量逐渐增加;不同的是,变化率有所区别。

(3) 当围压固定,而偏应力增大时,对应的只有轴向应力增大(图 3);当围压固定,而体应力增大时,对应的也只有轴向应力增大[图 4(b)]。故[图 4(b)]反映的规律与图 3 相同,即只有轴向应力增加时,气泡轻质土的动态回弹模量随之减小。

## 6 掺粉煤灰气泡轻质土回弹模量预估模型

试验结果已经表明,体应力与偏应力对气泡轻质土的动态回弹模量影响很大,因此该文选择 JTG D30—2015《公路路基设计规范》推荐的通用模型进行拟合,如式(1)所示:

$$M_R = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$$

式中:  $M_R$  为动态回弹模量(MPa);  $p_a$  为大气压, 取值为 100 kPa;  $\theta$  为体应力(kPa);  $\tau_{oct}$  为八面体剪应力(kPa), 对于三轴试验,  $\tau_{oct} = \sigma_d$ , 为偏应力;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为系数。

利用前文经数据进行拟合, 得到  $k_1 = 2.844\ 3$ ,  $k_2 = 0.104\ 55$ ,  $k_3 = -1.741\ 92$ , 相关系数为 0.925。

将  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  代入式(1), 利用图 4 中的体应力和偏应力, 计算得到回弹模量, 见图 5 中“模型值”, 并与前文试验结果(实测值)进行了对比, 结果见图 5。

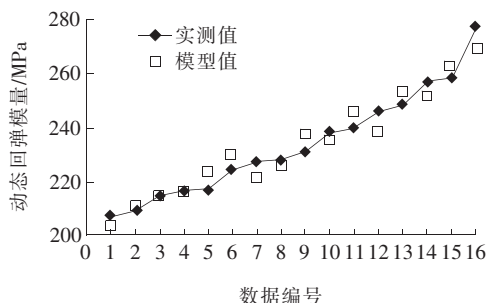


图 5 掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量预估结果

文献[10]也曾采用式(1)的模型建立了红黏土的动态回弹模量预估模型, 其  $k_1$  为 0.85~2.23,  $k_2$  为 0.15~0.37,  $k_3$  为 -1.76~-2.63。与之相比, 掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量不仅数值上更大一些, 而且其应力依赖性更小一些。这是因为气泡轻质土的材料组成更均匀, 弹性性质更明显。间接说明以气泡轻质土作为路基填料, 路基的性能更加稳定。

## 7 结论

(1) 胶凝材料用量对掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量的影响最大, 粉煤灰掺比的影响次之, 水胶比的影响最小。

(2) 当轴向应力和围压同步等量增大时, 掺粉煤灰气泡轻质土的动态回弹模量逐渐增加; 仅轴向应力增加时, 掺粉煤灰气泡轻质土的动态回弹模量随之减小。

(3) 现行 JTG D30—2015《公路路基设计规范》推

荐的通用模型可以用作掺粉煤灰气泡轻质土动态回弹模量的预估模型。

该文只对一种配比的掺粉煤灰气泡轻质土建立了动态回弹模量预估模型, 而动态回弹模量还受到气泡轻质土材料组成的影响, 故该文所建立模型的相关参数还需要进一步修正。

## 参考文献:

- [1] 陈忠平, 汪建斌, 刘吉福, 等. 现浇泡沫轻质土路堤模型循环动载试验研究[J]. 公路, 2019(5).
- [2] 陈忠平, 汪建斌, 刘吉福, 等. 泡沫轻质土动力工程特性试验研究[J]. 公路, 2019(2).
- [3] 刘勇, 孙赛炜, 马路, 等. 不同掺合料的气泡混合轻质土性能试验研究[J]. 中外公路, 2018(3).
- [4] 陈金威, 刘勇, 石苏意, 等. 不同掺料泡沫轻质土的强度特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016(4).
- [5] 高英力, 马路, 关宏信, 等. 矿粉气泡混合轻质土组成设计及性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017(1).
- [6] 邹洽宇. 桥背发泡轻质土填筑工程沉降计算研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2015.
- [7] Tae-Hyung K, Gi-Chun K, Lee-Keun P. Development and Mechanical Strength Properties of a New Lightweight Soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(2): 1109-1116.
- [8] 赵全胜, 梁小勇. 气泡混合轻质土变形特性三轴试验研究[J]. 公路, 2010(10).
- [9] 李苏醒. 气泡混合轻质土抗冲击试验与应用在机场中的有限元分析[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2011.
- [10] 刘维正, 曾奕珺, 姚永胜, 等. 含水率变化下压实路基土动态回弹模量试验研究与预估模型[J]. 岩土工程学报, 2019(1).
- [11] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
- [12] 刘胜, 刘靖宇. 测试方法对沥青混合料动态模量取值的影响[J]. 中外公路, 2019(4).
- [13] 陈龙旭, 王帅, 罗大天, 等. 干湿循环下红砂岩路基填料回弹模量控制研究[J]. 中外公路, 2020(4).
- [14] 支守根, 卢志刚, 马旭, 等. 气泡混合轻质土发泡剂优选及性能试验研究[J]. 中外公路, 2017(5).
- [15] 裘友强, 李永良, 刘耀富, 等. 泡沫轻质土的微观结构及其强度特性研究[J]. 中外公路, 2019(1).