

粉煤灰基气泡轻质土配合比和抗压强度研究<sup>\*</sup>陈朋<sup>1</sup>, 惠冰<sup>1</sup>, 孟凌霄<sup>2</sup>, 刘广波<sup>1</sup>, 马明畅<sup>1</sup>, 王翠雪<sup>1</sup>

(1.山东省交通科学研究院, 山东 济南 250104; 2.中国建设基础设施有限公司, 北京 100029)

**摘要:** 依托具体工程项目, 优选水泥、低等级粉煤灰、发泡剂及土体等进行配合比试验, 研究不同水泥掺量下粉煤灰基气泡轻质土的物理力学特征。结果表明, 低等级粉煤灰掺量在 20% 以内时, 粉煤灰基气泡轻质土的抗压强度随着低等级粉煤灰掺量的增大而增大; 低等级粉煤灰掺量超过 20% 时, 粉煤灰基气泡轻质土的抗压强度明显降低; 低等级粉煤灰掺量为 15% 时, 粉煤灰气泡轻质土的各项物理力学指标均最优, 且经济效益显著。

**关键词:** 公路; 低等级粉煤灰; 气泡轻质土; 配合比设计; 抗压强度

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

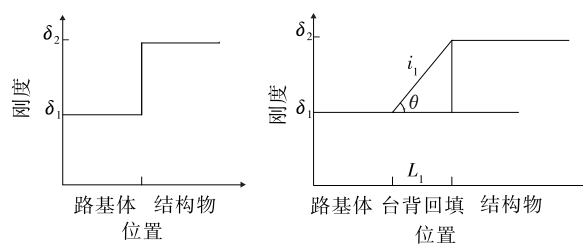
**文章编号:** 1671-2668(2022)05-0047-03

路桥过渡段属于刚柔过渡区域, 极易发生不均匀沉降, 严重时引起桥头跳车, 影响出行安全与交通品质。气泡轻质土具有轻质、强度可调、高流动性、施工简便、耐久性好、隔热性好、渗透系数低、经济环保等优点, 被广泛应用于公路工程台背回填、路基扩宽及旧路抬高等建设项目, 是工程领域大力推广的新型绿色、环保、节能材料。对建设项目附近的粉煤灰等工业废料加以利用, 可有效实现资源利用与降本增效。本文依托具体工程项目, 优选水泥、低等级粉煤灰、发泡剂及土体等材料进行配合比试验, 研究不同水泥掺量下粉煤灰基气泡轻质土的物理力学特征。

## 1 刚柔过渡段渐变原理

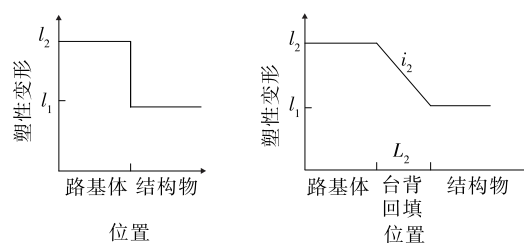
台背墙体由刚性很大的坚石、钢筋混凝土浇筑而成, 为刚性体。路基一般采用刚性较小且柔性较大的土体填筑而成, 为弹塑性体。从结构力学角度分析, 路基土体与混凝土结构物之间存在较大的刚度差异, 引起路基土体与结构物之间产生较大塑性变形, 同时造成较大的刚度突变。为保证行车安全和舒适性, 应使路基土体与台背墙体之间的刚度差异在一定范围内逐渐变化、塑性变形不均匀差异逐渐变化, 保证渐变后任何一点的刚度差不致于引起跳车, 任何一点的塑性变形相对差不致于使路面产生差异沉降、沉陷、断裂等病害(见图 1、图 2)。

如图 1、图 2 所示, 台背回填长度与刚度差值



$\delta_1$  为路基土体刚度;  $\delta_2$  为结构物刚度;  $\Delta\delta$  为路基刚度与结构物刚度差值,  $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$ ;  $i_1$  为刚度渐变坡度,  $i_1 = \Delta\delta / L_1$

图 1 刚度突变原理示意图



$l_1$  为结构物塑性变形;  $l_2$  为路基土体塑性变形;  $\Delta l$  为路基土体塑性变形与结构物塑性变形差值,  $\Delta l = l_2 - l_1$ ;  $i_2$  为塑性变形渐变坡度,  $i_2 = \Delta l / L_2$

图 2 塑性变形渐变原理示意图

$\Delta\delta$ 、刚度坡度  $i_1$ 、塑性变形差值  $\Delta l$ 、塑性变形坡度  $i_2$  等参数有关。对于台背回填的质量要求, 是保证刚度变化和塑性变形的根本原因。

## 2 粉煤灰基气泡轻质土配合比方案

粉煤灰基气泡轻质土的主要材料为水泥、粉煤灰、发泡剂、土体、水等, 其中水泥采用 P.O42.5 水泥, 粉煤灰采用 II 类粉煤灰, 发泡剂采用动物蛋白发

<sup>\*</sup> 基金项目: 中建股份科技研发计划资助项目(CSCEC-2020-Z-52); 山东省交通运输厅科技计划项目(2021B40)

泡剂,土体为粉质黏土,水采用自来水。根据粉煤灰基气泡轻质土配合比试验研究内容制订 3 种方案:配合比方案 1 为水泥、10% 掺量Ⅱ类粉煤灰、发泡剂、5% 粉质黏土、水(见表 1);配合比方案 2 为水泥、15% 掺量Ⅱ类粉煤灰、发泡剂、5% 粉质黏土、水(见表 2);配合比方案 3 为水泥、20% 掺量Ⅱ类粉煤灰、发泡剂、5% 粉质黏土、水(见表 3)。

对发泡剂按 1 : 60 进行稀释,采用 LC—5 型发泡机对发泡稀释液进行发泡。将水泥、粉煤灰、粉质黏土按照相应配合比掺合在一起,倒入搅拌机中,加入自来水快速搅拌 60 s;称量泡沫后倒入搅拌机中慢速搅拌 30 s,静置 20 s 后倒入试模。试模尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,每 3 个试块为 1 组。每种配合比进行 3 组试验。

表 1 10%掺量粉煤灰气泡轻质土的试验配合比

水灰比	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	发泡剂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉质黏土/ (kg·m <sup>-3</sup> )	湿容重/ (kg·m <sup>-3</sup> )
0.55	270	27.2	36.6	164.6	13.6	512.0
0.58	270	27.2	36.2	173.5	13.6	520.5
0.60	270	27.2	35.9	179.5	13.6	526.2

表 2 15%掺量粉煤灰气泡轻质土的试验配合比

水灰比	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	发泡剂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉质黏土/ (kg·m <sup>-3</sup> )	湿容重/ (kg·m <sup>-3</sup> )
0.55	260	39	36.6	164.5	13	513.1
0.58	260	39	36.1	173.4	13	521.5
0.60	260	39	35.8	179.4	13	527.2

表 3 20%掺量粉煤灰气泡轻质土的试验配合比

水灰比	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	发泡剂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉质黏土/ (kg·m <sup>-3</sup> )	湿容重/ (kg·m <sup>-3</sup> )
0.55	250	50	36.5	165	12.5	514.0
0.58	250	50	36.1	174	12.5	522.6
0.60	250	50	35.8	180	12.5	528.3

3 粉煤灰基气泡轻质土物理力学特征研究

根据相关规范,公路工程中粉煤灰基气泡轻质土的物理力学指标主要为发泡剂 1 h 沉降距、泌水量、气泡轻质土流值、湿容重、抗压强度。

3.1 物理力学指标测试结果

对不同粉煤灰掺量粉煤灰基气泡轻质土的物理力学指标进行测试,结果见表 4~6。

表 4 水灰比 0.55 下不同粉煤灰掺量粉煤灰基气泡轻质土的物理力学指标

粉煤灰 掺量/%	沉降 距/mm	泌水 量/mL	流值/ mm	抗压强度/MPa	
				7 d	28 d
10	2.6	6.8	168	0.58	1.43
15	2.2	9.2	178	0.45	1.26
20	3.1	11.1	170	0.39	0.98

表 5 水灰比 0.58 下不同粉煤灰掺量粉煤灰基气泡轻质土的物理力学指标

粉煤灰 掺量/%	沉降 距/mm	泌水 量/mL	流值/ mm	抗压强度/MPa	
				7 d	28 d
10	3.2	8.3	170	0.52	1.32
15	3.7	10.6	183	0.42	1.18
20	4.2	12.3	175	0.36	0.92

表 6 水灰比 0.6 下不同粉煤灰掺量粉煤灰基气泡轻质土的物理力学指标

粉煤灰 掺量/%	沉降 距/mm	泌水 量/mL	流值/ mm	抗压强度/MPa	
				7 d	28 d
10	3.5	9.4	180	0.43	1.16
15	3.8	12.2	188	0.39	1.08
20	4.4	15.3	179	0.33	0.86

3.2 拌合物工作性能分析

常规气泡轻质土的技术指标要求如下:湿容重

500~700 kg/m<sup>3</sup>; 1 h 沉降距 ≤ 5 mm; 泌水量 ≤ 25 mL; 流值(180±20) mm; 28 d 抗压强度 ≥ 1.0 MPa。

由表 4~6 可知:随着低等级粉煤灰掺量的增加,沉降距和泌水量增加,表明粉煤灰对发泡剂具有一定消泡效应;随着低等级粉煤灰掺量的增加,流值增大,但粉煤灰掺量超过 15% 时,流值降低,说明流值控制粉煤灰基气泡轻质土的自流性和充填性,流值过大,粉煤灰基气泡轻质土的稳定性较差;随着水灰比的增大,粉煤灰基气泡轻质土的流值逐渐增加,抗压强度逐渐降低。

### 3.3 气泡轻质土抗压强度分析

由表 4~6 可知:随着水灰比从 0.55 变化至 0.6,气泡轻质土的 7 d、28 d 抗压强度逐渐降低;增大低等级粉煤灰掺量,气泡轻质土的早期强度缓慢降低;低等级粉煤灰掺量为 20% 时,气泡轻质土 28 d 抗压强度低于 1.0 MPa,不满足技术要求。

## 4 气泡轻质土经济性分析

对 1 m<sup>3</sup> 纯水泥气泡轻质土、低等级粉煤灰掺量 10% 和 15% 的粉煤灰基气泡轻质土进行成本核算。经计算,在工作性能和耐久性符合要求的条件下,与纯水泥气泡轻质土相比,低等级粉煤灰掺量为 15% 时,材料成本降低 13.46%;低等级粉煤灰掺量为 15% 时,材料成本降低 17.31% (见表 7)。考虑拌合工艺和质量控制要求,粉煤灰基气泡轻质土可实现节约成本近 20%,具有明显的经济效益。同时可实现粉煤灰工业废料的再循环利用,减少环境污染,达到绿色生态、高效节能效果。

表 7 水灰比 0.6 粉煤灰基气泡轻质土的经济性分析

材料类型		成本/(元·m <sup>-3</sup> )
纯水泥气泡轻质土		260
粉煤灰基气泡轻质土	粉煤灰掺量 10%	225
	粉煤灰掺量 15%	215

## 5 结论

(1) 随着低等级粉煤灰掺量的增加,粉煤灰基气泡轻质土的沉降距、流值和泌水量增大,低等级粉煤灰掺量超过 15% 时流值降低。流值过大,粉煤灰基气泡轻质土的稳定性较差。随着水灰比的增大,粉煤灰基气泡轻质土的流值逐渐增大,抗压强度逐渐降低。

(2) 低等级粉煤灰掺量在 20% 以内时,粉煤灰

基气泡轻质土的抗压强度随粉煤灰掺量的增大而增大,低等级粉煤灰掺量超过 20% 时抗压强度明显降低。低等级粉煤灰掺量为 15% 时,粉煤灰基气泡轻质土的各项物理力学指标均最优,且经济效益显著。

(3) 采用粉煤灰基气泡轻质土填筑路桥过渡段,可大大减轻回填土的荷载,降低地基应力,抑制新回填土的沉降、侧移和破坏,大大缩减刚柔过渡段附近的差异沉降,有效解决不均匀沉降,保证工程质量。

### 参考文献:

- [1] 杨少华,段冰,姜正晖,等.轻质土技术在公路建设中的应用与研究[J].公路,2011(8):211-217.
- [2] 杨少华,徐立新.EPS 超轻质路堤研究及其工程应用[J].公路,2004(8):157-162.
- [3] 顾建武.EPS 颗粒混合轻质土在高速公路的应用[J].公路,2013(10):9-12.
- [4] 王朔.液态粉煤灰在唐津高速扩建工程中的应用[D].天津:河北工业大学,2015.
- [5] 张连成.气泡混合轻质土在隧道塌方处治中的应用[J].公路,2007(7):191-195.
- [6] 李思清,陈达章,谭少华,等.气泡混合轻质土技术在高速公路扩建工程中的应用研究[J].公路,2007(7):123-127.
- [7] 陈文平,谭存茂,杨和平.气泡混合轻质土在台背回填施工中的应用[J].公路,2012(11):162-166.
- [8] 陈钊,刘勇,刘晖,等.高性能粉煤灰泡沫轻质土性能试验及应用分析[J].粉煤灰综合利用,2020,34(4):103-106+117.
- [9] 胡丕海.外掺料对气泡混合轻质土性能影响研究[J].安徽建筑,2021,28(3):168-169.
- [10] 章灿林,黄俭才,熊永松,等.不同原料土掺量的气泡轻质土耐久性研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(8):32-36.
- [11] 蒋功雪.高等级公路台背回填设计与施工的探讨[J].中国公路学报,1993,8(2):19-24.
- [12] 广东冠生土木工程技术有限公司,深圳市市政工程总公司.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.
- [13] 姚明,项小伟.侧限条件下泡沫轻质土压缩特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):42-48.
- [14] 毕玉峰,袁化强,张文武,等.水泥基粉煤灰粉土气泡混合轻质土性能研究[J].路基工程,2021(6):75-80.

(下转第 61 页)