

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.06.012

流态粉煤灰路基填料配合比设计及路用性能试验研究

张思峰^{*1}, 王雨佳¹, 高立勇², 郭光明^{2,3}, 姜维亮^{2,3}

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东高速基础设施建设有限公司, 山东 济南 250101;
3. 山东高速淄博高速公路有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要:为解决高速公路桥涵台背段路基工作面狭小而导致的压实质量无法保证等问题, 兼顾环保的要求, 开展了无需振捣、可自密实、容重低、价格低廉的流态粉煤灰路基填料配合比设计, 进行了各项路用性能影响因素分析及性能评价。采用低标号水泥、低等级粉煤灰及聚羧酸高性能减水剂配制了流态粉煤灰, 以获得高性价比并满足路用性能的配合比。基于流态粉煤灰的流动度、抗压强度、泌水率及密度确定了其初始配合比, 并与使用高标号水泥的流态粉煤灰相关指标进行了对比。然后对该配合比下填料的其他路用性能及其影响因素开展了试验研究, 并进行了参数敏感度分析。结果表明: 采用F类Ⅲ级粉煤灰及PSA325水泥配制的流态粉煤灰的各项物理力学性能均满足工程要求; 用水量对流态粉煤灰流动度、抗压强度及泌水率均有较大影响, 随着用水量的增加, 泌水率和流动度均不断增大, 但抗压强度则减小; 用水量对上述4个指标中泌水率的影响最为显著, 随着外加剂掺量的增多, 填料流动度、抗压强度及泌水率均增高, 冻融循环系数减小; 外加剂掺量为1%时, 流态粉煤灰的水稳定性最佳, 最终得出的满足施工及路用性能的流态粉煤灰最佳配合比为: 水泥与粉煤灰质量比为10:90, 用水量为70%, 外加剂掺量为1%。

关键词: 道路工程; 配合比设计; 试验研究; 流态粉煤灰; 路用性能; 影响因素

中图分类号: U414.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2023)06-0084-09

Experimental Study on Mix Design and Road Performance of Fluid Fly Ash Subgrade Filler

ZHANG Si-feng^{*1}, WANG Yu-jia¹, GAO Li-yong², GUO Guang-ming^{2,3}, JIANG Wei-liang^{2,3}

(1. School of Traffic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong 250101, China;

2. Shandong Hi-speed Infrastructure Construction Co., Ltd., Jinan Shandong 250101, China;

3. Shandong Hi-speed Zibo-Linyi Expressway Co., Ltd., Zibo Shandong 255000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the compaction quality cannot be guaranteed due to the small working surface of the subgrade at bridge and culvert abutments of expressway and consider the requirements of environmental protection, the mix design of fluid fly ash subgrade filler that without vibrating, can self compact, have low bulk density and are cost-effective is carried out, the analysis of the factors affecting the road performance and the evaluation of the road performance are also carried out. The fluid fly ash is prepared by using low grade cement, low grade fly ash and polycarboxylic acid high-performance water reducing agent to obtain the high performance/cost ratio and the mix proportion that meet road performance requirements. The initial mix proportion is determined based on the flowability, compressive strength, bleeding rate and density of fluidized fly ash, and compared with the relevant indicators of fluid fly ash that

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022QE082); 山东省交通运输科技计划项目(2021B89)

作者简介(*通讯作者): 张思峰(1976-), 男, 山东金乡人, 博士, 教授。(sddxzs@sdjzu.edu.cn)

using high-grade cement. Then, the experimental study is on the other road performance and influencing factors of the filler with this mix proportion is conducted, and the parameter sensitivity analysis is conducted as well. The result shows that (1) The physical and mechanical properties of the fluid fly ash prepared by class F grade III fly ash and PSA325 cement meet the engineering requirements. (2) The water consumption has great influence on the flowability, compressive strength and bleeding rate of fluid fly ash. As the water consumption increases, the bleeding rate and flowability continue to increase, but the compressive strength decreases. (3) The water consumption has the most significant influence on the bleeding rate among the abovementioned 4 indicators. As the dosage of additives increases, the fluidity, compressive strength and bleeding rate of the filler all increase, while the freeze-thaw cycle coefficient decreases. (4) When the admixture dosage is 1%, the water stability of fluid fly ash is the best. The optimal ratio of fluid fly ash that meets the construction and road performance is determined as follows: mass ratio of cement to fly ash is 10 : 90, water consumption is 70%, and the additive dosage is 1%.

Key words: road engineering; mix design; experimental study; fluid fly ash; road performance; influencing factor

0 引言

软土地区高速公路高填方路段、公路拓宽改建及桥涵台背回填等工程建设中,受地基附加应力较大、施工工作面狭小、路基难以压实等因素的影响,易导致路基工后及差异沉降量过大,从而引发桥头跳车等工程问题的多次发生,严重影响高速公路运营的舒适性和安全性。因此,控制路基工后及差异沉降量,提高路基施工的便捷性,是保障高速公路建设及安全运营的重要前提和基础。

粉煤灰是我国当前排放量较大的工业废渣之一。作为原材料制备的液态粉煤灰由于具有无需振捣、可自密实、容重低、价格低廉等优势,为控制路基工后及差异沉降提供了有效手段。目前,国内外学者对以粉煤灰为主要原材料研发的系列轻质填料在路基工程中的初步应用开展了研究。雷钰^[1]将粉煤灰、PO425 水泥、气泡群、早强剂和水作为原材料制成轻质水泥粉煤灰路基填料,经试验验证具有良好的耐盐蚀及保温性能。孙吉书等^[2]采用粉煤灰、水泥、发泡剂等材料制备泡沫流态粉煤灰,通过室内试验分析了该材料的密度、抗压强度、水稳定性、冻融稳定性等指标,并推荐了该材料的施工配合比。杨春风等^[3]、郭丽丽^[4]、闫利强等^[5]采用Ⅱ级粉煤灰、PO325 水泥、萘系减水剂或早强减水剂,通过正交试验明确了流态粉煤灰的配合比。陆成龙^[6]通过室内试验研究了流态粉煤灰中水和外加剂对其流动度的影响规律,并分析了水泥含量对流态粉煤灰的干缩性能及抗压强度的影响,对优化材料配合比起到了积极作用。可以看出,现有粉煤灰轻质填料

研发中,多采用 PO425 或 PO325 水泥与Ⅱ级粉煤灰开展试验研究,这导致了大规模工程应用中材料成本的高昂,在一定程度上限制了流态粉煤灰在路基工程中的应用规模。同时,现有关于流态粉煤灰的配合比及影响因素的研究还不系统,更缺少对其耐久性、路用性能的相关评价,无法科学预测流态粉煤灰的工程应用效果。

基于此,本研究通过室内试验方式,利用价格低廉的 F 类Ⅲ级粉煤灰及 2 种类型和标号的水泥(PSA325 和 PO425),通过其流动度、抗压强度、泌水率及密度确定其初始配合比,并以此为基础开展流态粉煤灰 CBR 值、水稳定性及冻融稳定性等路用性能的研究,最终得到 F 类Ⅲ级粉煤灰与 PSA325 水泥的最佳配合比。

1 试验材料

1.1 粉煤灰

选用的粉煤灰原材料的有效成分含量如表 1 所示,参照相关规范可知^[7],它属于 F 类Ⅲ级粉煤灰。

表 1 F 类Ⅲ级粉煤灰的有效成分(单位:%)

Tab. 1 Active constituent of class F grade III fly ash (unit:%)

检测项目	有效成分含量			烧失量	需水量比	三氧化硫质量比
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃			
标准值	≥70	≤15	≤115	≤3.0	—	—
实测值	50.8	28.1	3.24	12.02	110	2.36

1.2 水泥

目前国内外少有选用 PSA325 水泥制备流态粉煤灰的相关报道。为验证 PSA325 水泥的可行性并比较其与 PO425 水泥的区别,选用上述 2 类水泥分

别进行试验。2 种水泥的主要性质见表 2，其性质均满足《通用硅酸盐水泥》（GB 175—2007）^{〔8〕}规范要求。

表 2 两类水泥的主要性质
Tab. 2 Main properties of 2 cements

检测项目	细度		初凝	终凝	3 d 抗压	28 d 抗
	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.08 mm 方孔筛余量/%	时间/ min	时间/ min	强度/ MPa	压强度/ MPa
PSA325	358	2.6	236	308	15.2	38
PO425	352	—	169	234	26.9	49.7

1.3 减水剂

选用的添加剂为聚羧酸高性能减水剂（标准型），根据《混凝土外加剂》（GB 8076—2008）^{〔9〕}检验得到的其主要物理力学性质如表 3 所示。

表 3 聚羧酸减水剂的主要性质（单位：%）

Tab. 3 Main properties of polycarboxylate superplasticizer
(unit: %)

检测项目	抗压强度比		减水率	含气量	泌水率比	收缩率比
	7 d	28 d				
标准值	≥150	≥140	≥25	≤6.0	≤60	≤110
实测值	176	160	30	3.5	15	105

2 配合比设计方案及确定方法

影响流态粉煤灰路基填料性能的主要因素包括水泥与粉煤灰配合比、用水量及外加剂掺量。各原材料配合比的确定主要考虑到实际工程质量、施工和易性及造价等因素，选用水泥粉煤灰配合比分别为 2：98，10：90，18：82，26：74，用水量（水的质量与固体混合料质量之比）分别选择 50%，60%，70%，80%，外加剂掺量分别为水泥质量的 0，1%，2%，3%。对于上述配合比，采用控制变量法进行正交试验，共开展了 128 组流动度试验、64 组抗压强度试验（每组 6 个试件，共计 384 个试件）、36 组泌水率试验（每组包含 3 个平行试验，共计 108 个试件）、7 组 CBR 试验（每组包含 3 个平行试验，共计 21 个试件）、水稳定性及冻融循环试验各进行 6 组（每组制备 3 组平行试件）。

确定流态粉煤灰的最佳配合比方法如下：首先进行流态粉煤灰流动度试验，筛选出满足流动度要求的配合比组 1，而后进行抗压强度试验，在组 1 中筛选出满足抗压强度要求的配合比组 2，其后进行泌水率试验及密度试验，确定出全部满足上述 4 个指标的配合比组 3。将筛选出的组 3 进行 CBR、水稳定性、冻融循环等材料的路用性能试验，最后综合各

项路用性能指标及工程经济性，筛选出流态粉煤灰路基填料的最佳配合比。

3 初始配合比确定

3.1 流动度

为保证填料在无需振捣情况下能够实现自流平，须将其流动度控制在合理范围内，但也不宜过大，以免后期泌水率过高造成收缩开裂现象严重。本研究选用水泥砂浆稠度仪作为检测流态粉煤灰填料流动性大小的主要设备。根据流态粉煤灰在不同配合比下的流动状态，参考文献〔3—6〕确定流态粉煤灰的流动度宜为 11~14 cm。表 4 为水泥与粉煤灰配合比 10：90、用水量分别为 50%~80%、减水剂分别为 0~3% 工况下的流动度试验结果（其余配合比下的试验结果略）。

表 4 流态粉煤灰流动度试验结果

Tab. 4 Flowability of fluid fly ash

水泥粉煤灰配合比	用水量/%	减水剂/%	PSA325 流动度/cm	PO425 流动度/cm
10：90	50	0	2.0	1.9
		1	3.1	2.1
		2	3.3	2.3
		3	3.3	2.7
	60	0	6.9	4.7
		1	9.4	6.2
		2	10.5	6.5
		3	10.7	6.6
	70	0	11.9	11.8
		1	12.3	12.3
		2	13.2	12.9
		3	13.4	13.0
	80	0	13.2	13.1
		1	13.4	13.1
		2	13.5	13.4
		3	13.6	13.5

试验结果表明，用水量为 50%~60%、水泥与粉煤灰比例在 2：98 及 10：90 时，其流动度均较差，无法满足流动性要求。而当用水量为 70%~80% 时，各配合比下的流动度均满足 11~14 cm 的要求。另外，从表 4 所示的水泥与粉煤灰配合比为 10：90 时的流动度试验结果可以看出，同一配合比下，使用 PO425 水泥制备的流态粉煤灰流动度要低于使用 PSA325 水泥制备的流态粉煤灰流动度。主要原因是：水泥标号越高，细度越小，其比表面积越大，

水化反应所需水量则越高。因此,实际工程中在满足各项物理力学性能指标的前提下,应尽可能选用低标号水泥,以增大混合料的流动度。

在水泥种类和强度相同的情况下,影响流态粉煤灰流动度的因素包括水泥与粉煤灰配合比、用水量及外加剂掺量。以 PSA325 水泥为例,上述 3 个因素与流动度关系曲线如图 1 所示。可以看出,在用水量及外加剂掺量相同的情况下,水泥用量越多,材料流动度越高,这是由于使用 F 类Ⅲ级粉煤灰,其需水量比大于 100%^[10],因此粉煤灰质量占比越大,材料的流动性越小。综合分析表 4 及图 1 可以看出,在水泥与粉煤灰配合比中,水泥标号对流动度的影响要小于粉煤灰用量对流动度的影响。在控制单一变量的前提下,流态粉煤灰流动度均随着用水量和外加剂掺量的增大而增大,但当用水量超过 60% 或 70% (与水泥粉煤灰比值有关)、外加剂掺量超过 2% 后,各配合比下的流动度增长率均逐渐减小。

由于各影响因素的单位不一致,为便于对各个因素敏感性进行比较,采用无量纲形式的参数敏感度函数^[11]进行分析,其表达式为:

$$a_i = \left| \frac{\Delta F}{F^*} \right| / \left| \frac{\Delta x_i}{x_i^*} \right|, \quad (1)$$

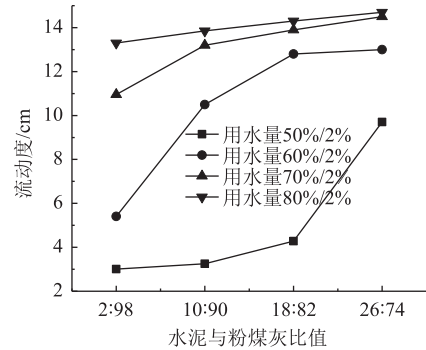
式中, x_i^* 为某基准参数; F^* 为该基准参数对应的基准状态; Δx_i 为相对于基准参数的改变量; ΔF 为相对于基准状态的改变量。以试验中外加剂为 2%、用水量为 70% 及水泥与粉煤灰质量比 10:90 为基准参数,该状态下的流动度为基准状态,计算得到外加剂对流动度的平均参数敏感度为 0.87,用水量对流动度的平均参数敏感度为 1.48,而水泥与粉煤灰配合比对流动度的平均参数敏感度仅为 0.11。

由以上分析可知,用水量是影响流态粉煤灰流动度的最显著因素,其次是外加剂,而水泥粉煤灰配合比对流动度的影响最小。

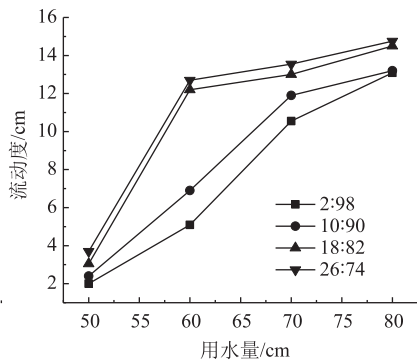
上述规律出现的原因是:虽然减水剂的加入可以释放出被水泥凝团包裹的拌合水^[12],由此提高混合料的流动度,但减水剂的掺量仅为水泥质量的 1%~3%,其与用水量 50%~80% 的差距较大,因此用水量成为影响流动度的各因素中最为重要的因素。因此,实际工程中调节混合料流动度的主要方式应为调整混合料用水量,同时增加相应措施以减小流态粉煤灰的泌水率。

3.2 抗压强度

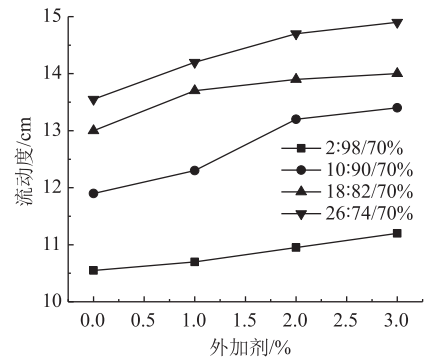
流态粉煤灰作为一种路基填料,应具有一定



(a) 配合比与流动度



(b) 用水量与流动度



(c) 外加剂掺量与流动度

图1 流动度与相关因素关系曲线

Fig. 1 Curves of flowability vs. relevant factors

的抗压强度,以满足承载上覆荷载的要求,为此要求该材料 7 d 抗压强度大于 0.4 MPa, 28 d 抗压强度大于 0.8 MPa。为研究不同因素对强度的影响规律,在筛除不满足流动性要求的配合比后,参考《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70—2009)^[13],对满足流动度要求的每个配合比进行了抗压强度试验。每个配合比制作 6 个试件,3 个用于测试 7 d 抗压强度,3 个用于测试 28 d 抗压强度,试件尺寸为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm。

试验结果表明,水泥与粉煤灰比值为 2:98 时,部分满足流动度要求的配合比,其 7 d 和 28 d 抗压

强度分别为 0.12~0.26 MPa 和 0.24~0.32 MPa, 无法满足抗压强度要求, 其余配合比下的抗压强度均满足上述要求。表 5 为水泥粉煤灰比值为 10 : 90 时部分配合比下的抗压强度值。可以看出, 无论是使用 PSA325 水泥还是 PO425 水泥, 其 7 d 和 28 d 抗

表 5 流态粉煤灰抗压强度

Tab. 5 Compressive strength of fluid fly ash						
水泥粉煤 灰配合比	用水 量/%	外加 剂/%	PSA325 抗压强度/MPa		PO425 抗压强度/MPa	
			7 d	28 d	7 d	28 d
10 : 90	70	0	0.83	1.28	1.32	1.90
		1	0.99	1.59	1.17	1.64
		2	1.18	1.73	1.65	2.38
		3	1.21	1.81	2.73	2.46
	80	0	0.61	0.86	0.87	1.26
		1	0.67	1.00	0.95	1.47
		2	0.80	1.11	1.12	1.63
		3	0.93	1.21	1.30	1.78

压强度均满足要求。

图 2 为各影响因素与流态粉煤灰抗压强度的关系曲线。可以看出: (1) 水泥粉煤灰比值及用水量相同的情况下, 外加剂掺量越大, 填料的抗压强度越高, 但外加剂掺量对抗压强度的提高程度有限。(2) 在水泥粉煤灰配合比和外加剂掺量相同的情况下, 流态粉煤灰的抗压强度随用水量的增加而减小。(3) 在用水量及外加剂掺量相同的情况下, 流态粉煤灰的抗压强度随水泥质量占比升高而增大, 但当水泥与粉煤灰比值由 10 : 90 上升至 18 : 82 时, 水泥用量的增加对混合料 28 d 抗压强度影响并不明显, 而 10 : 90 的水泥与粉煤灰比值下的所有配合比, 其 7 d 和 28 d 抗压强度的平均值分别为 1.05 MPa 和 1.55 MPa, 故考虑工程经济性, 水泥与粉煤灰配合比以 10 : 90 为宜。(4) 同一配合比下的 7 d 抗压强度已能达到 28 d 抗压强度的 60%~70%, 说明流态粉煤灰抗压强度在养护前期增长迅速, 7~28 d 期间抗压强度增长速率减缓, 故提高该填料初期的养护质量至关重要。

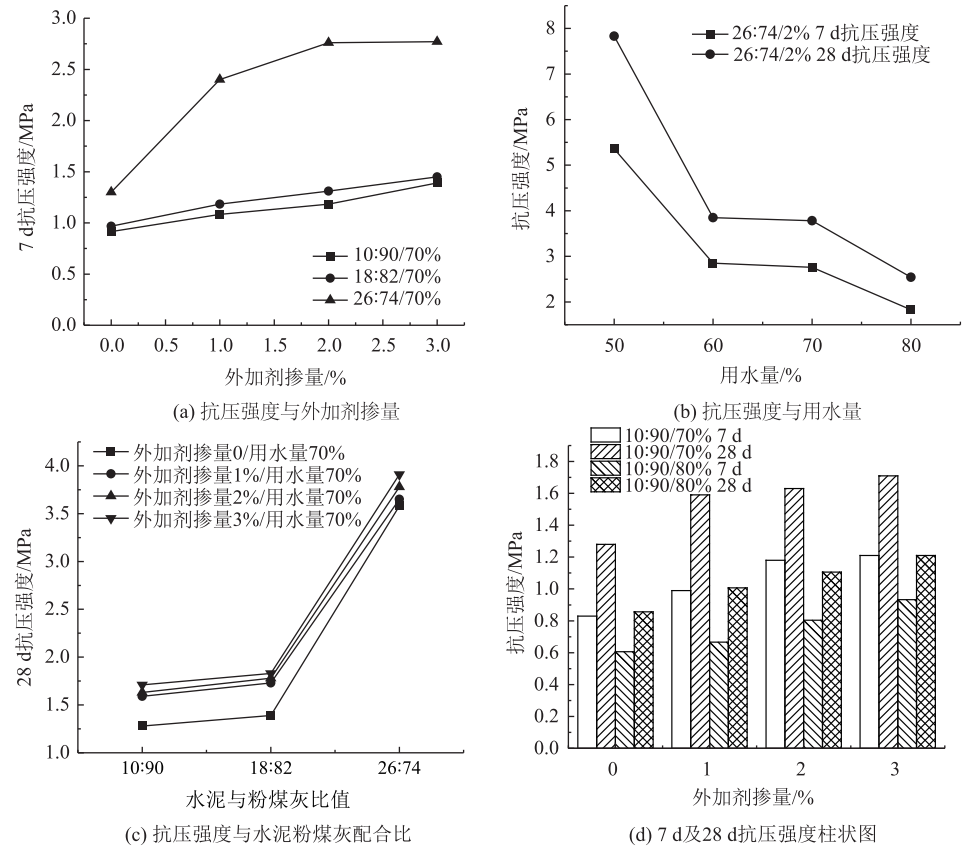


图 2 抗压强度与相关因素关系曲线

Fig. 2 Curves of compressive strength vs. relevant factors

分析认为, 水泥与粉煤灰质量比越高, 即水泥用量越大, 其混合料水化反应则更充分, 同时水泥

与粉煤灰发生火山灰反应也更完全, 产生的水化硅酸钙及水化铝酸钙更多, 使得流态粉煤灰抗压强度

也越高^[14]。同理,用水量越大,即水固比越大,虽混合料流动性增强,但由于固体粉料占比变小,故其产生的具有水硬性的胶凝物质也越少,抗压强度也就越低。同时,试验中选用的外加剂为聚羧酸高效减水剂,对提高流态粉煤灰的早期强度有一定效果,但为控制泌水率在工程要求范围内,其掺加量仅为水泥质量的1%~3%,因此在流态粉煤灰中提高强度的效果并不明显。

3.3 泌水率

为保证流态粉煤灰的流动度,该路基填料需要较大的用水量,但用水量的增加也会导致施工过程中泌水现象的产生,而泌水率的大小会直接影响其收缩率,过大的收缩率会使得路基回填段产生过多裂缝,从而无法保证其长期强度和耐久性。本节通过对上述满足流动度和抗压强度指标的各配合比进行泌水率试验,以求找出满足泌水率指标要求的相应配合比。为保证公路路基的耐久性,基于相关文献在可控低强度材料方面的研究成果及工程案例^[15],认为填料浇注后的泌水率应控制在8.0%以下。

图3为用水量与泌水率的关系曲线。可以看出,在一定的水泥粉煤灰配合比及外加剂掺量下,泌水率随用水量的增大而增大,尤其当用水量超过70%后,泌水率增长速率变大。在相同用水量及外加剂掺量下,水泥在水泥粉煤灰配合比中占比越大,材料的泌水率越高。由图4所示的外加剂掺量与泌水率关系曲线可以看出,在相同的水泥粉煤灰质量比和用水量下,泌水率随外加剂掺量的增大而增大。当外加剂掺量大于2%后,泌水率尤其是PSA325水泥的泌水率增长率迅速升高,大部分配合比已无法满足工程要求。因此,在满足流动度要求的前提下,外加剂掺量宜控制在2%之内。

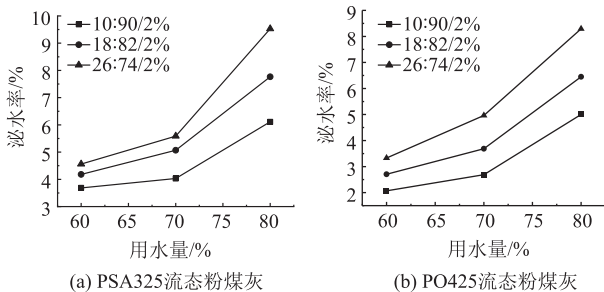


图3 用水量与泌水率关系曲线

Fig.3 Curves of water consumption vs. bleeding rate

利用式(1)开展各因素对泌水率的敏感度分

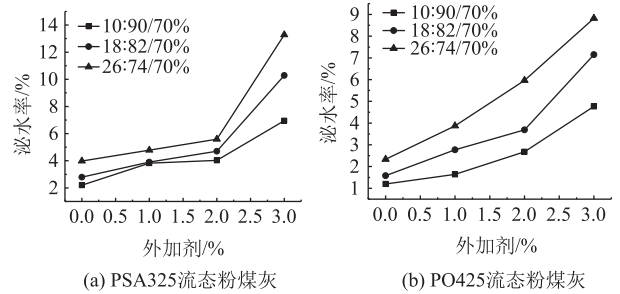


图4 外加剂掺量与泌水率关系曲线

Fig.4 Curves of admixture dosage vs. bleeding rate

析。以外加剂为2%、用水量为70%及水泥粉煤灰比值10:90为基准参数,其对应的泌水率为基准状态。计算得到外加剂对泌水率的平均参数敏感度为0.77,用水量对泌水率的平均参数敏感度为2.11,而水泥粉煤灰配合比对泌水率的平均参数敏感度为0.28。由此可见,与填料流动度和敏感度的分析结果相同,用水量也是影响流态粉煤灰泌水率的显著因素。

3.4 密度

流态粉煤灰作为一种轻质填料,应具有较低的密度,以减小其作为路基材料的自重,从而达到减轻对地基的附加应力和减小后期差异沉降的效果。试验得到的流态粉煤灰湿密度与水泥粉煤灰质量比、用水量关系曲线如图5~图6所示。

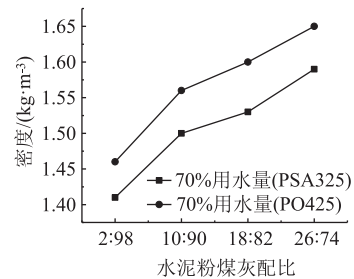


图5 流态粉煤灰密度与水泥粉煤灰质量比关系曲线

Fig.5 Curves of density of fluid fly ash vs. mass ratio of cement to fly ash

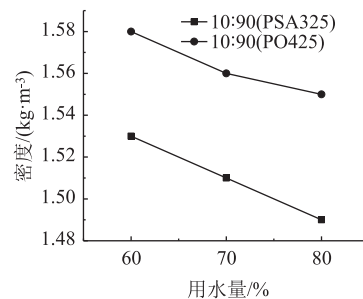


图6 流态粉煤灰湿密度与用水量关系曲线

Fig.6 Curves of wet density of fluid fly ash vs. water consumption

可以看出, 流态粉煤灰材料密度随水泥质量占比的增大而增大, 随用水量的增大而减小。这是由于粉煤灰胶结物自身结构疏松, 相较于水泥结石体而言更加松散, 因此其密度也较低, 故水泥质量占比越高, 材料的密度越大。流态粉煤灰浇注后, 由于各类反应用水消耗及自由水蒸发, 其质量会减轻, 从而使得其密度减小, 故在相同水泥粉煤灰配合比下, 用水量越高的流态粉煤灰密度越小。通过参数敏感性分析, 在同一基准水平下, 用水量的平均参数敏感度为 0.04, 而水泥掺量的参数敏感度为 0.95, 故用水量对材料密度的影响要小于水泥用量的影响, 因此工程中如需降低混合料密度, 还应从减少水泥用量方面加以考虑。

图 5~图 6 还表明, 由于粉煤灰的加入, 流态粉煤灰的密度较普通填土路基密度均大幅降低, PSA325 流态粉煤灰的最大湿密度不超过 1.60 g/cm^3 , 在水泥粉煤灰配合比为 10:90、用水量为 70%、外加剂掺量为 0~2% 的工况下, 其湿密度仅为 $1.49\sim1.53\text{ g/cm}^3$, 与普通填土路基密度相比减少了 15%~20%, 这对于有效减少地基附加应力, 避免公路运营期桥台等部位的差异沉降大有裨益。

3.5 初始配合比确定

由上述 4 个试验结果可知, 使用 PO425 或 PSA325 水泥, 在一定的配合比下, 其基本性能均满足相关规范及施工和易性要求。考虑到大规模应用时的性价比因素, 宜优先选用 PSA325 水泥作为原材料。

综合以上试验结果, 并根据流动度 11~14 cm、7 d 抗压强度大于 0.4 MPa、28 d 抗压强度大于 0.8 MPa 及泌水率小于 8.0% 的指标要求, 确定流态粉煤灰的初始配合比为: 水泥粉煤灰质量比为 10:90, 用水量为 70%、外加剂掺量为 0~2%。

4 路用性能及影响因素分析

4.1 CBR 值

作为路基填料的流态粉煤灰, 应保证后期使用过程中最不利状态下的承载能力。根据相应规范^[16], 高速公路和一级公路上路床不小于 8%, 下路床不小于 5%, 上路堤不小于 4%, 下路堤不小于 3%; 二级公路分别为 6%, 4%, 3%, 2%。

通过相应的试验, 对使用 PSA325 水泥的 CBR 值进行测定, 试验结果见表 6。可以看出, 流态粉煤灰在每个配合比下均满足路基承载能力要求。在单因素影响下, CBR 值随水泥质量占比的增大而增大, 随外加剂掺量和用水量的增大而减小。

表 6 流态粉煤灰 CBR 值
Tab. 6 CBR values of fluid fly ash

配合比	CBR 值/%		
	贯入 2.5 mm	贯入 5.0 mm	最终值
10:90/70%/1%	51.80	42.44	51.80
10:90/70%/2%	25.47	21.33	25.47
18:82/60%/2%	88.79	78.08	88.79
18:82/70%/2%	49.56	41.65	49.56
18:82/80%/2%	38.08	43.35	43.35
26:74/70%/2%	86.60	67.88	86.60
26:74/80%/2%	56.53	45.03	56.53

注: 配合比各数值含义为: 水泥与粉煤灰质量比/水固比/外加剂掺量占水泥质量的百分比。

4.2 水稳定性

流态粉煤灰作为桥涵台背和路基回填材料, 易受到地下水、地表水和降雨等因素影响, 且流态粉煤灰在成型初期也具有较高的含水量, 故本节开展流态粉煤灰填料的水稳定性试验, 以明确该填料在投入工程使用后的水稳定性。

试件为 $70.7\times70.7\times70.7\text{ mm}^3$ 的立方体试块, 在标准养护条件下养护 28 d 后, 将试件浸水 24 h, 取出将其表面擦拭干净后标养 48 h, 以此为 1 个循环, 进行 5 次循环后, 测定材料的残余强度, 并与未经过水稳定性循环试验的试件抗压强度对比^[17], 其比值即为水稳定系数。参照工程应用要求^[3], 其水稳定系数应大于 0.65。图 7 为水泥粉煤灰比值为 10:90、用水量为 70%、外加剂掺量为 0~2% 时的水稳定性系数与外加剂掺量的关系曲线。

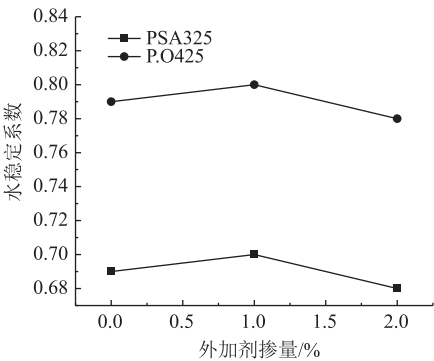


图 7 流态粉煤灰水稳定性与外加剂关系曲线

Fig.7 Curves of water stability of fluid fly ash vs. admixture

试验结果表明, 无论使用 PSA325 水泥还是 PO425 水泥, 材料的水稳定系数均大于 0.65, 满足工程应用需求。但总体来说, 0~2% 的外加剂掺量对混合料水稳定系数的影响较小, 外加剂掺量的增减对水稳定系数的影响仅为 1%~2.8%。

在外加剂掺量为1%时,水稳定系数最佳,这是由于外加剂1%的掺量可在一定程度上提高试件的强度,但当外加剂掺量达到水泥用量的2%时,将使得流态粉煤灰试件中的游离水过多,成型后游离水蒸发,使得试件密实性变差。水稳定性试验表明,由于水的浸入将对密实性差的试件产生不利影响,进而促使其水稳定系数降低。

4.3 冻融稳定性

我国北方大部分地区为季节性冻土地区,因此有必要开展冻融循环试验,以确保流态粉煤灰抵抗冻融循环的能力。

根据初始配合比共制备18个 $\phi 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的圆柱体试件,将试件放入 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温箱冷冻1 h后,取出试件测量其高度及质量变化,随后立即放入 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水槽中融化8 h,上述步骤为1次冻融循环^[18]。将冻融循环5次的试件进行标准养生28 d后,测定冻融试件的残余抗压强度,它与未冻融组试件抗压强度的比值为冻融循环稳定系数,将其作为冻融循环评价指标。

冻融稳定系数、冻融质量损失率与外加剂掺量的关系曲线分别如图8和图9所示。试验结果表明,初始配合比下,流态粉煤灰的冻融稳定系数均大于0.65,且质量损失率均在1.5%以下,满足工程应用要求。从图8还可看出,材料的冻融稳定系数随着外加剂掺量的增加而降低,外加剂掺量由1%增加到2%时,冻融稳定系数下降了约16%,下降幅度远大于外加剂由0增加至1%时的变化幅度。从图9可以看出,冻融质量损失率随着外加剂掺量的增大而增大。原因是聚羧酸减水剂的增加使得从水泥絮凝结构中释放出来的拌和水增多,这也导致冻融过程中由于游离水的冻结而使试件产生冻胀现象,在一定

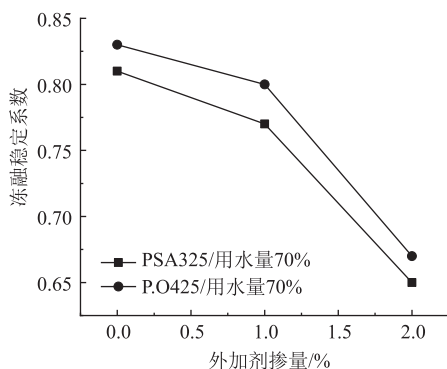


图8 冻融稳定系数与外加剂掺量关系曲线

Fig. 8 Curves of freeze-thaw stability coefficient vs. admixture dosage

程度上破坏了填料的胶凝结构,使得试件冻融后残余强度出现大幅衰减现象。因此要保证足够高的冻融稳定系数值,应减少外加剂掺量至1%以内。

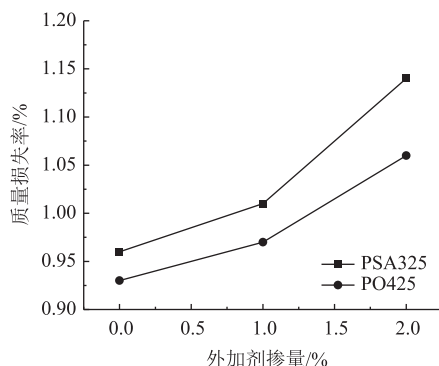


图9 冻融质量损失率与外加剂掺量关系曲线

Fig. 9 Curves of freeze-thaw mass loss rate vs. admixture dosage

5 结论

采用低标号水泥、低等级粉煤灰及聚羧酸高性能减水剂配制流态粉煤灰,分析了各影响因素与填料路用性能的关系,得到了其最佳配合比,主要结论如下:

(1) 采用F类Ⅲ级及PSA325水泥配制的流态粉煤灰的各项物理力学性能均满足工程要求。

(2) 流态粉煤灰填料的流动度和泌水率均随用水量、外加剂掺量及水泥质量占比的增加而增加。参数敏感性分析表明,用水量是影响流态粉煤灰流动度和泌水率的最显著因素;低标号水泥有利于流动度的增加。

(3) 水泥标号越高,其抗压强度越大。抗压强度随外加剂掺量及水泥质量占比的增大而增大,随用水量的增加而减小。外加剂掺量对抗压强度的影响远小于水泥质量占比的影响。加强该填料初期养护对提高其28 d抗压强度至关重要。

(4) 流态粉煤灰湿密度随水泥质量占比的增大而增大,随用水量的增大而减小。同时,其湿密度与普通填土路基密度相比减少了15%~20%。

(5) 外加剂掺量对该填料的耐久性有较大影响。掺量为1%时,其水稳定性最佳,水稳定系数可达0.70;冻融循环稳定性随外加剂掺量的增大而减小,工程应用中应减少外加剂掺量至1%以内。

(6) 综合考虑该填料的各项路用性能指标,并考虑性价比因素,推荐其最佳用量为:采用PSA325水泥,水泥粉煤灰配合比为10:90,用水量为70%,减水剂用量为1%。

参考文献:

References:

- [1] 雷钰. 轻质水泥粉煤灰路基填料的耐盐蚀性试验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
LEI Yu. Experimental Study on Salt Corrosion Resistance of Lightweight Cement Fly Ash Subgrade Filler [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [2] 孙吉书, 路旭, 李洪亮, 等. 泡沫流态粉煤灰的配合比设计与性能研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2017, 42 (1): 352-358.
SUN Ji-shu, LU Xu, LI Hong-liang, et al. Study on Mix Design and Properties of Foamed Fluid Fly Ash [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42 (1): 352-358.
- [3] 杨春风, 王朔, 孙吉书, 等. 关于液态粉煤灰最佳含水量的研究 [J]. 河北工业大学学报, 2014, 43 (1): 92-95.
YANG Chun-feng, WANG Shuo, SUN Ji-shu, et al. The Best Water Content of Liquid Fly Ash [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2014, 43 (1): 92-95.
- [4] 郭丽丽. 轻质流态粉煤灰材料在高速公路拓宽工程中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
GUO Li-li. Application of Lightweight Fluid Fly-ash Material in Expressway Widening Project [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [5] 闫利峰, 路旭. 流态粉煤灰稠度的影响因素分析 [J]. 低温建筑技术, 2016, 38 (1): 1-2.
YAN Li-feng, LU Xu. Analysis of Influencing Factors of Consistency of Fluidized Fly Ash [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016, 38 (1): 1-2.
- [6] 陆成龙. 轻质流态粉煤灰混合料的路用性能研究 [J]. 甘肃科技, 2018, 34 (16): 59-61.
LU Cheng-long. Research on Road Performance of Lightweight Fluid Fly Ash [J]. Gansu Science and Technology, 2018, 34 (16): 59-61.
- [7] DG/TJ 08-230—2006, 粉煤灰混凝土应用技术规程 [S].
DG/TJ 08-230—2006, Practice Code for Application of Fly Ash Concrete [S].
- [8] GB 175—2007, 通用硅酸盐水泥 [S].
GB175—2007, Common Portland Cement [S].
- [9] GB 8076—2008, 混凝土外加剂 [S].
GB 8076—2008, Concrete Admixtures [S].
- [10] DU L, FOLLIARD K J, TREJO D. Effects of Constituent Materials and Quantities on Water Demand and Compressive Strength of Controlled Low-strength Material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14 (6): 485-495.
- [11] 黄世斌, 梁乘玮, 王家全, 等. 加筋包裹碎石桩受力特性及参数影响分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2022, 47 (3): 577-587.
HUANG Shi-bin, LIANG Cheng-wei, WANG Jia-quan, et al. Analysis of Stress Characteristics and Parameter Influence of Geosynthetic-encased Stone Column [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2022, 47 (3): 577-587.
- [12] 胡成, 陈平, 向玮衡, 等. 减水剂和缓凝剂对石膏基自流平砂浆性能的影响 [J]. 湖北理工学院学报, 2021, 37 (6): 44-49.
HU Cheng, CHEN Ping, XIANG Wei-heng, et al. Effects of Water Reducer and Retarder on Properties of Gypsum-based Self-leveling Mortar [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2021, 37 (6): 44-49.
- [13] JGJ/T70—2009, 建筑砂浆基本性能试验方法标准 [S].
JGJ/T70—2009, Standard for Test Method of Performance of Building Mortar [S].
- [14] 杜天玲, 刘英, 于咏妍, 等. 水玻璃对粉煤灰矿渣地聚合物强度的影响及激发机理 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (1): 41-49.
DU Tian-ling, LIU Ying, YU Yong-yan, et al. Influence of Sodium Silicate on Fly Ash Slag Geopolymer Strength and Stimulating Mechanism [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (1): 41-49.
- [15] 刘浩, 朱祐增, 黄锐, 等. 建筑废土制备可控低强度材料的试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (26): 11736-11744.
LIU Hao, ZHU You-zeng, HUANG Rui, et al. Experimental Research on Preparation of Controllable Low-strength Materials from Construction Wasteland [J]. Science Technology and Engineering 2022, 22 (26): 11736-11744.
- [16] JTG D30—2015, 公路路基设计规范 [S].
JTG D30—2015, Specifications for Design of Highway Subgrades [S].
- [17] 崔宏环, 王伟浩, 闫利, 等. 季冻区高铁路基改良粗颗粒填料耐久性研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (9): 2225-2233.
CUI Hong-huan, WANG Wei-hao, YAN Li, et al. Durability of Stabilised Coarse-grained Soil as Fill Material for High-speed Rail Subgrade in Seasonally Frozen Regions [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18 (9): 2225-2233.
- [18] 王亮亮, 丁志平. 不同湿度膨胀土无侧限抗压强度随冻融循环的演化规律 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (5): 18-22, 30.
WANG Liang-liang, DING Zhi-ping. Evolution Rule of Unconfined Compressive Strength of Expansive Soil with Freeze-thaw Cycles in Different Humidity [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (5): 18-22, 30.