

文章编号: 0451-0712(2005)11-0187-05

中图分类号: U414.180.3

文献标识码: A

活性掺合料对路面水泥混凝土性能的影响和应用研究

曹长伟¹, 凌建明¹, 张文献²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092; 2. 东北大学资源与土木工程学院 沈阳市 110004)

摘要: 针对粉煤灰和硅粉活性掺合料对路面水泥混凝土性能影响进行了研究。采用正交法设计了 10 种混凝土配合比, 对在标准条件下养护 28 d 的各配比混凝土试件进行了抗折强度、断块抗压强度、抗渗性能和抗冻融性能的测试, 并通过回归方法建立了各指标与配合比的关系。试验结果表明, 通过添加适量的粉煤灰和硅粉, 可以在不降低混凝土强度基础上有效地提高混凝土的密实性和抗渗性能, 并改善其抗冻融性能。同时, 再通过技术、经济比较及现场验证, 得出适合当地实际情况的最佳配合比。

关键词: 水泥混凝土; 粉煤灰; 硅粉; 抗折强度; 抗压强度; 抗渗性能; 抗冻融性能

随着我国能源需求激增, 火力发电迅猛增加, 导致粉煤灰排放量逐年锐增。若不对其合理利用处置, 将会给资源利用和环境保护带来不可估量的严重后果。其综合利用价值已引起国内工程领域的广泛重视, 尤其是在路面工程领域的研究和应用。而路面混凝土除力学性能要满足设计要求外, 其耐久性问题日益突出。已有研究表明^[1~3], 用粉煤灰取代了部分水泥, 将改善混凝土路面的抗冻性和抗渗性, 同时, 为了不影响交通及早开放, 可添加适量硅粉提高其早期强度。

双鸭山市作为我国重要的能源基地, 其煤炭和粉煤灰的产量很大, 占用大量农田。关于粉煤灰的合理利用及相应的应用技术开发一直是双鸭山市政府非常关心的问题之一。本文针对双鸭山市目前的现

状, 对粉煤灰和硅粉混凝土进行了大量的室内试验, 研究了不同粉煤灰和硅粉掺量的混凝土在标准条件下养护 28 d 的抗折强度、断块抗压强度、抗冻融性能及抗渗性能, 综合比较了混凝土各项指标性能及造价, 再现场验证抗折强度, 提出满足当地要求的、合理的最佳配合比, 为粉煤灰利用及粉煤灰混凝土在路面应用提供借鉴和指导意义。

1 试验方案设计

1.1 试验材料

(1) 粉煤灰。

采用沈海热电厂的 II 级粉煤灰, 其成分如表 1。粉煤灰烧失量为 1.24% (<5%), 符合标准《用

表 1 粉煤灰主要成分

%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	富水量比	烧失量	比表面(m ² /kg)
55.01	28.50	8.05	2.39	2.19	0.79	1.71	103	1.24	540

于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB 1596-91) 要求。

(2) 硅粉。

采用青海山川铁合金股份公司生产的硅粉, 其成分见表 2。SiO₂ 含量为 86.99%, 符合规范 86%~90% 的要求。

(3) 水泥。

表 2 硅粉主要成分

%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
86.99	3.20	1.60	0.52	1.41	1.37	3.69

大连小野田水泥厂产 42.5(R) 华日牌普通硅酸盐水泥。

(4)砂。

沈阳浑河河砂,其细度模数2.9,属Ⅱ区中砂,含泥率为0.8%,符合标准《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》(JGJ 52-1992)要求。

(5)碎石。

康佳山石灰厂的石灰岩,符合粒径为5~30 mm连续级配要求,压碎值为4.7%(<10%),含泥量为0.89%(<1%),符合标准《普通混凝土用碎石或卵

石质量标准及检验方法》(JGJ 53-1992)要求。

(6)水:自来水。

1.2 材料配比方案

本试验采用正交法进行混凝土配合比设计。粉煤灰取代率为25%~35%,间隔为5%,且超量取代水泥,其增大系数取1.2^[4]。硅粉掺入率分别为6%、7%和8%,对超量部分粉煤灰和添加的硅粉减少相同质量的砂,共计10组配合比,见表3。

表3 混凝土配比

编号	水胶比	混凝土各种材料用量/(kg/m ³)						粉煤灰取代率/%	硅粉添加率/%
		水泥	砂	石	粉煤灰	硅粉	水		
0	0.45	380	540	1 330	0	0	172.0	0	0
1	0.45	285	498	1 330	114	23	179.6	25	6
2	0.45	285	494	1 330	114	27	179.6	25	7
3	0.45	285	491	1 330	114	30	179.6	25	8
4	0.44	266	494	1 330	137	23	179.0	30	6
5	0.44	266	490	1 330	137	27	179.0	30	7
6	0.44	266	487	1 330	137	30	179.0	30	8
7	0.44	247	490	1 330	160	23	180.1	35	6
8	0.44	247	486	1 330	160	27	178.9	35	7
9	0.44	247	483	1 330	160	30	178.1	35	8

1.3 试验内容

试件尺寸与数量如下:抗折试件3个,其尺寸为150 mm×150 mm×550 mm;冻融试件3个,其尺寸为100 mm×100 mm×400 mm;渗透试件6个,试件为顶面直径175 mm、底面直径185 mm、高150 mm圆台体。

试件成型后在室内20℃±5℃静置1 d,然后拆模编号,放在标准养护室,温度20℃±3℃,相对湿度90%以上,养护28 d。

测试试样的抗折强度和断块抗压强度、渗透性能和抗冻性能。

现场试验地点:双鸭山市依兰~宝清公路段,仅做抗折强度试验。

2 试验结果与分析

2.1 抗折强度与抗压强度

路面水泥混凝土力学性能主要以抗折强度为主要控制指标,并参考抗压强度。试验各配比混凝土28 d的抗折强度及断块抗压强度见图1~图4,其中基准混凝土的抗折强度为6.33 MPa,断块平均抗压强度为44.74 MPa。由图1和图3可以看出,当粉煤

灰取代率为25%而硅粉掺入率为7%和8%时,混凝土抗折强度高于基准混凝土,即使硅粉掺入率为6%,其抗折强度也接近于基准混凝土,也能满足抗折强度设计要求。当粉煤灰取代率为30%和35%时,其抗折强度下降,不能满足混凝土设计要求。而抗压强度在掺入粉煤灰和硅粉后显著提高,由图2和图4可知,在粉煤灰取代率为25%和30%时,其抗压强度均高于或接近于基准混凝土。

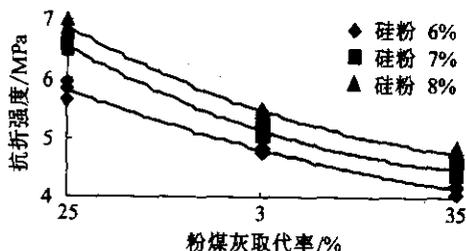


图1 抗折强度与粉煤灰取代率之间关系

同时由图1和图2可知,当硅粉掺入率一定时,混凝土抗折强度和抗压强度均随粉煤灰取代率增大而降低。根据其数据回归了混凝土抗折强度和断块抗压强度与粉煤灰取代率之间关系模型。

硅粉掺入率为6%:

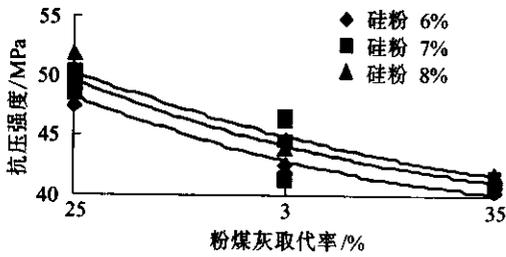


图2 断块抗压强度与粉煤灰取代率之间关系

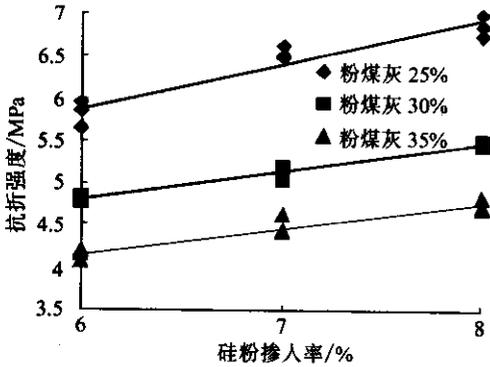


图3 抗折强度与硅粉掺入率之间关系

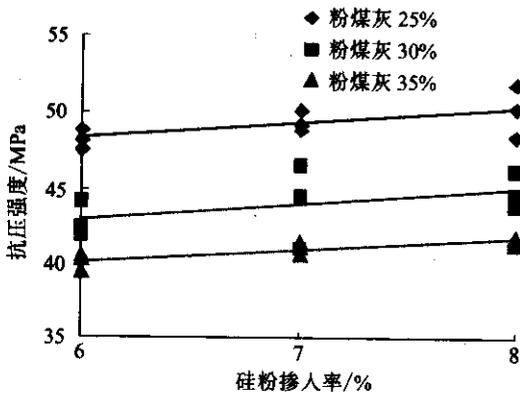


图4 抗压强度与硅粉掺入率之间关系

$$R_b = 65.333 \mu_f^2 - 55.867 \mu_f + 15.69 \quad (R^2 = 0.986)$$

$$R' = 533.33 \mu_f^2 - 400 \mu_f + 114.87 \quad (R^2 = 0.958)$$

硅粉掺入率为7%:

$$R_b = 152 \mu_f^2 - 111.67 \mu_f + 24.953 \quad (R^2 = 0.993)$$

$$R' = 466.67 \mu_f^2 - 362.67 \mu_f + 110.93 \quad (R^2 = 0.866)$$

硅粉掺入率为8%:

$$R_b = 140 \mu_f^2 - 105 \mu_f + 24.367 \quad (R^2 = 0.994)$$

$$R' = 393.33 \mu_f^2 - 321 \mu_f + 105.83 \quad (R^2 = 0.927)$$

式中: R_b 为混凝土抗折强度, MPa; R' 为断块抗压强度, MPa; μ_f 为粉煤灰取代率, %。

由图3和图4而知,当粉煤灰取代率一定时,混凝土抗折强度和抗压强度均随硅粉掺入率增大而提高,且呈线性增加,这说明硅粉能够提高混凝土早期强度,有利于及早开放交通。并根据图3和图4数据回归其关系模型。

粉煤灰取代25%水泥:

$$R_b = 0.53 \mu_s + 2.69 \quad (R^2 = 0.91)$$

$$R' = 0.98 \mu_s + 42.38 \quad (R^2 = 0.75)$$

粉煤灰取代30%水泥:

$$R_b = 0.33 \mu_s + 2.84 \quad (R^2 = 0.97)$$

$$R' = 1.03 \mu_s + 36.74 \quad (R^2 = 0.70)$$

粉煤灰取代35%水泥:

$$R_b = 0.31 \mu_s + 2.27 \quad (R^2 = 0.93)$$

$$R' = 0.73 \mu_s + 35.88 \quad (R^2 = 0.75)$$

式中: μ_s 为硅粉取代率, %; 其余同上。

2.2 抗渗性能

根据《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ053-94)^[5]规定,每组试验制作6个抗渗试样,标准养护28d后,分别用水泥和黄油密封4周,置于抗渗仪上,从0.1MPa开始加压,每8h加0.1MPa,抗渗标号:

$$S = 10H - 1$$

式中: S 为混凝土的抗渗标号; H 为第三个试件顶面开始有渗水时的水压力, MPa。

由图5可看出,混凝土在粉煤灰取代率为25%~35%,硅粉掺入率为6%~8%时,能够显著提高混凝土抗渗性能。且其抗渗性能随着粉煤灰取代率增大而降低,随硅粉掺入率增加而增大。说明掺入粉煤灰和硅粉能够显著提高混凝土密实性能,故能提高混凝土抗渗性能。

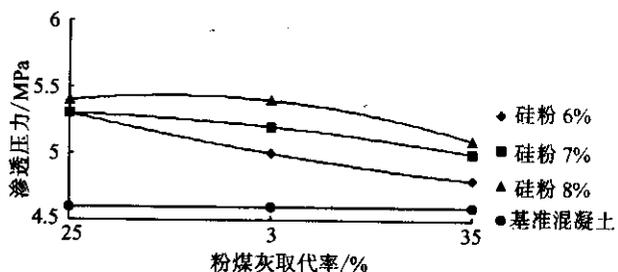


图5 渗透性能与粉煤灰取代率之间关系

2.3 抗冻性能

混凝土的抗冻试验采用快冻法,试验设备为日

本产全自动快速冻融试验机,混凝土中心冻融温度为 $-17\text{C}\pm 2\text{C}\sim 6\text{C}\pm 2\text{C}$,一个冻融循环时间为 $3\sim 4\text{h}$ 。混凝土冻融破坏的控制指标取质量损失率,比较各配比混凝土试样在相同冻融循环次数条件下的质量损失情况。试验方法按《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ053-94)^[5]进行。因试验条件限制,实验室仅考虑了硅粉掺入率为7%的混凝土抗冻融性能。试样分别测试了25次、50次、75次和100次冻融循环的质量损失率,试验结果见图6。

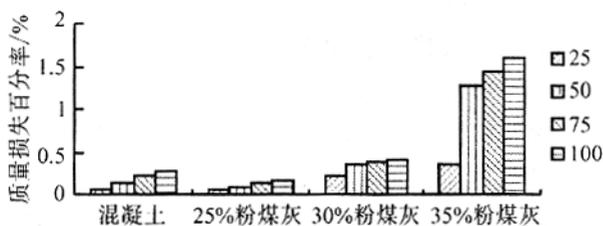


图6 抗冻性能与粉煤灰取代率之间的关系

由图6可知,掺入粉煤灰和硅粉混凝土,粉煤灰取代率为25%时,其质量损失率较基准混凝土小,粉煤灰取代率不小于30%时,其重量损失率明显增加。因此当混凝土应用于抗冻性能要求高的地方,需考虑再加入引气减水剂。

2.4 现场测试结果

现场试验选用4种配合比,分别是基准混凝土及粉煤灰取代率为25%、30%和35%的混凝土,并加入7%的硅粉。因现场条件限制,仅比较抗折强度,测试结果如图7。

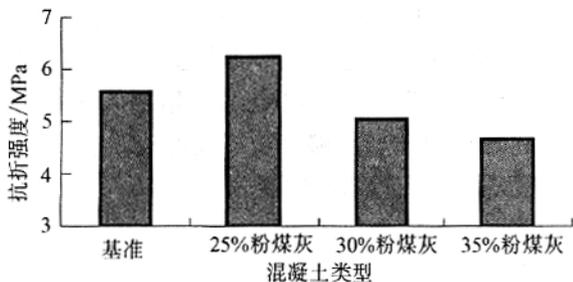


图7 现场试验抗折强度比较

由图7可知,硅粉掺入率7%、粉煤灰取代率25%的混凝土抗折强度明显增加,比基准混凝土强度提高12%,而粉煤灰取代率30%和35%的混凝土,其抗折强度低于基准混凝土,不能满足工程需要。故粉煤灰取代率25%、硅粉掺入率7%的配合比能够满足设计要求。由于粉煤灰取代率一定量时,硅粉掺入率增加,混凝土抗折强度增加,故本文推荐粉煤

灰取代率25%、硅粉掺入率7%和8%的两种配合比。

2.5 经济效益分析和施工工艺

基准混凝土材料价格为 $181.09\text{元}/\text{m}^3$ 。粉煤灰取代率25%、硅粉掺入率7%的混凝土材料价格为 $169.86\text{元}/\text{m}^3$,减少了 11.23元 ,造价降低了 6.2% 。粉煤灰取代率25%、硅粉掺入率8%的混凝土的材料价格是 $172.86\text{元}/\text{m}^3$,造价降低 4.5% 。综合比较,本文推荐粉煤灰取代率25%、硅粉掺入率7%的混凝土配合比,即各材料用量如下: $W=179.6\text{kg}/\text{m}^3$, $C=285\text{kg}/\text{m}^3$, $S=494\text{kg}/\text{m}^3$, $G=1\ 330\text{kg}/\text{m}^3$, $F=114\text{kg}/\text{m}^3$, $SF=27\text{kg}/\text{m}^3$ 。

与普通水泥混凝土路面的施工工艺相比较,掺加粉煤灰和硅粉的混凝土路面,其施工工艺应注意以下几个方面。

(1)掺粉煤灰和硅粉时混凝土拌和的投料顺序需做调整,因粉煤灰和硅粉的密度远小于其他成分,不易搅拌均匀,因此投料顺序依次为:粉煤灰→硅粉→水泥→砂→碎石→水。

(2)振捣时间缩短。因粉煤灰和硅粉形态为滚珠状,混合料间的摩擦力减小,易于成型,掺粉煤灰和硅粉混凝土的振捣时间应较不掺时的振捣时间缩短 $10\sim 20\text{s}$ 。

(3)养生时间延长。由于粉煤灰的水化反应要迟于水泥的水化反应,混凝土中掺入粉煤灰使早期强度降低,特别是在夏季大风天气情况下极易产生塑性收缩裂纹,所以要加强早期养护,增加养护时间,应比一般混凝土路面养护期增加 $5\sim 7\text{d}$ 。

3 结论

(1)混凝土抗折强度和断块抗压强度随着粉煤灰取代率的增大而降低。

(2)粉煤灰取代一定比例水泥时,混凝土抗折强度和断块抗压强度随硅粉掺入率(6%~8%)的增加而呈线性增大。

(3)添加硅粉和粉煤灰能显著增强混凝土抗渗性能。粉煤灰取代率为25%~35%、硅粉掺入率为6%、7%和8%时,混凝土的抗渗性能均好于基准混凝土。

(4)硅粉掺入率一定时,混凝土抗冻融性能随粉煤灰取代率增大而降低,但粉煤灰取代率25%时,其抗冻融性能比基准混凝土高。

(5)推荐如下配合比: $W=179.6\text{kg}/\text{m}^3$, $C=285\text{kg}/\text{m}^3$, $S=494\text{kg}/\text{m}^3$, $G=1\ 330\text{kg}/\text{m}^3$, $F=$

114 kg/m³, $SF=27$ kg/m³;其抗折强度为6.54 MPa (>5.0 MPa),抗压强度为49.43 MPa(>40 MPa),满足设计要求;也大于基准混凝土的抗折强度6.33 MPa及抗压强度44.72 MPa;其抗冻融性能优于基准混凝土,100次冻融循环其质量损失率为0.174%,小于基准混凝土的质量损失率0.265%;其抗渗性能较基准混凝土优良,其抗渗标号为52,明显高于基准混凝土抗渗标号45;其材料价格较基准混凝土节约了6.2%。

(6)粉煤灰在公路工程中的合理开发利用,既能提高混凝土路面的强度和抗渗性能、改善其抗冻性能,又能降低工程造价,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Rettner D L. Minnesota Department of Transportation Investigation of the Use of High Volumes of Class C Flyash in Portland Cement Concrete Pavement to Increase Strength and Reduce Permeability[R]. TRB 82nd Annual Meeting (CD ROM), 2003.
- [2] 覃理利. I级粉煤灰混凝土抗冻融性能[J]. 中国煤炭, 2003.
- [3] 李书惠. 路面混凝土添加粉煤灰的试验和应用[J]. 粉煤灰综合利用, 2003, (6).
- [4] 朱清江. 高强高性能混凝土研制与应用[M]. 建材工业出版社, 1999.
- [5] JTJ 053-94, 公路工程水泥混凝土试验规程[S].

Application Research and Influence of Active Mixtures on Performances of Cement Concrete for Pavements

CAO Chang-wei¹, LING Jian-ming¹, ZHANG Wen-xian²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The influence of active mixtures, including flyash and silicon fumes on the performances of cement concrete for pavement is mainly researched in the paper. 10 sorts of mixture ratio of concrete are designed by the orthogonal method. The samples are maintained for 28 days in the standard condition and then tested for bending strength, compression strength, impermeability, and anti-freezing and thawing performances. The relationships of their indexes and mixture ratio of concrete are found by regression method, and the corresponding curves are drawn. The results show that through additives of flyash and silicon fume, compactability and impermeability of concrete are improved, and anti-freezing and thawing performance is meliorated without strength decreased. The optimum mixture ratio is recommended by comparing economy with technology and tested in-situ.

Key words: cement concrete; flyash; silicon fumes; bending strength; compression strength; impermeability; anti-freezing and thawing performance