



# I 级粉煤灰对水泥净浆开裂的影响

## Influence of Class I Fly Ash on Cracking of Cement Paste

胡红梅, 杨帆, 余彬彬, 曾韶崑, 刘冬冬

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 采用环约束法, 试验研究了I级粉煤灰对不同水胶比下水泥净浆开裂的影响。试验研究发现: I级粉煤灰在低水胶比(0.24)情况下对净浆开裂几乎没有影响, 当水胶比为0.32和0.40时抗裂作用明显; 较高水胶比(0.32、0.40)情况下, I级粉煤灰对净浆的抗裂性能有较好的改善作用, 在20%~65%掺量范围内, 随着掺量的增大, 净浆的开裂龄期延长, 抗裂性能提高。

**关键词:** I级粉煤灰; 水胶比; 水泥净浆开裂; 环约束法

中图分类号: TQ172.4+4      文献标志码: A

**Abstract:** By using the ring constraint test, the influence of class I fly ash on the cracking of cement paste was studied at different water binder ratio. The results of test show: when water-binder ratio is 0.24, class I fly ash has no effect on the cracking of cement paste; In the range of water-binder ratio 0.32 to 0.40, class I fly ash has a significant effect on anti-cracking of cement paste; within 20% to 65% dosage range, with increase of the dosage, the anti-cracking performance of cement paste is improved.

**Key words:** class I fly ash; water binder ratio; cracking of cement paste; ring constraint test

## 0 前言

混凝土裂缝问题自其诞生之日起就困扰着工程技术人员。混凝土开裂是混凝土结构劣化病变的宏观体现, 还会进一步引起其他病害的发生与发展, 所以相关专业人员一直很关注这方面的研究<sup>[1]</sup>。混凝土裂缝的成因非常复杂, 除了建筑施工、结构设计、环境条件等因素的影响之外, 预拌混凝土日趋复杂的材料组成和配合比的影响不容忽视。有关专家认为, 普遍采用的矿物掺合料和化学外加剂, 使预拌混凝土往往具有较高的收缩变形<sup>[2]</sup>。

从20世纪90年代开始, 由于发现粉煤灰等工业废渣具有许多优良的特性, 可以改善混凝土性能, 因此作为混凝土的第六组分而被广泛使用。国内外研究普遍认为, 粉煤灰的掺入有利于降低混凝土的水化热, 改善混凝土的工作性和耐久性等。关于矿物掺合料对混凝土收缩变形的影响极为复杂, 由于受掺合料种类和品质、掺量以及水胶比、养护条件等因素的影响, 故不同研究者往往得出不同的结论<sup>[3]</sup>。本文采用环约束法, 试验研究预拌混凝土采用粉煤灰后对水泥净浆开裂的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

水泥: 厦门“建福”牌 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥, 主要性能指标见表1, 化学组分见表2。

表1 水泥的主要性能指标

水泥品种	筛余 /%	安定性	初凝时间 /min	终凝时间 /min	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
P.O42.5	1.74	合格	150	210	5.0	8.4	29.4	52.9

表2 水泥的化学组分

表2 水泥的化学组分					%
SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
21.02	4.03	4.40	64.34	3.6	1.8

砂: 漳州九龙江河砂, 中砂。

石子: 漳州龙海市和厦门海沧区周边的采石场生产的粒径为10 mm~31.5 mm的碎石。

水: 自来水。

粉煤灰: 厦门益材粉煤灰有限公司生产的 I 级粉煤

灰, 主要技术指标见表 3。

表 3 I 级粉煤灰的主要技术指标 %

细度	需水量比	烧失量	含水率	SO <sub>3</sub>	游离氧化钙
8.9	89	3.1	0.89	2.1	0.91

## 1.2 试验方法

环约束法是各国研究者们研究水泥基材料早期开裂敏感性和抵抗长期收缩开裂时普遍采用的一种方法<sup>[4]</sup>, 可用于混凝土组成材料和配合比的优选。我国于 2010 年 7 月开始实施新的国家标准 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》, 首次将环约束法列入国家标准。本文采用环约束法进行净浆收缩开裂试验, 水泥净浆试件按 GB/T 1346—2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》成型, 试件的外径为 140 mm、内径为 90 mm、高为 25 mm。试模成型后立即放入温度为 (20±2)℃ 的环境中养护, 24 h 后脱模, 脱模后的抗裂试件立即放入温度为 (20±3)℃、相对湿度 (60±5)%、风速为 5 m/s 的环境中, 并对顶面涂抹硅胶进行密封处理, 立即计时, 用放大镜和 PTS-C 10 裂缝测宽仪观察并记录试件环立面第一条裂缝出现的间隔时间。每组试验制备 3 个试件, 取其平均值。混凝土试件成型后在 (20±2)℃ 环境中养护 24 h 后拆去外模, 立即放入 (20±3)℃、相对湿度 (50±5)% 的环境中, 试件顶面贴一层 0.15 mm 厚聚乙烯薄膜, 使试件只能从环立面干燥。然后记录环立面出现裂缝的时间、长度和宽度。试验实物图见图 1。

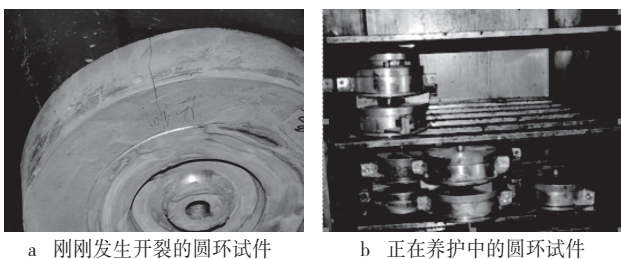


图 1 水泥净浆的环约束试验实物图

## 2 试验方案及结果分析

### 2.1 对不同水胶比水泥净浆开裂的影响

为了研究 I 级粉煤灰对水泥净浆开裂的影响, 设计了如下试验方案: 水胶比分别为 0.24、0.32、0.40 时, I 级粉煤灰均按 20%、35%、50%、65% 的掺量参加, 制成净浆后用环约束法测其开裂龄期。水泥净浆配比及试验结果见表 4 和图 2。

表 4 水泥净浆的配合比及开裂龄期

试件编号	水胶比	水泥/g	水/g	粉煤灰/g	试件的开裂龄期/h
A-0	0.24	500	120	0	14.9
A-1	0.24	400	120	100	15.9
A-2	0.24	325	120	175	15.4
A-3	0.24	250	120	250	16.7
A-4	0.24	175	120	325	18.9
B-0	0.32	500	160	0	29.5
B-1	0.32	400	160	100	42.1
B-2	0.32	325	160	175	47.2
B-3	0.32	250	160	250	51.4
B-4	0.32	175	160	325	52.4
C-0	0.40	500	200	0	31.7
C-1	0.40	400	200	100	44.3
C-2	0.40	325	200	175	53.5
C-3	0.40	250	200	250	57.5
C-4	0.40	175	200	325	58.0

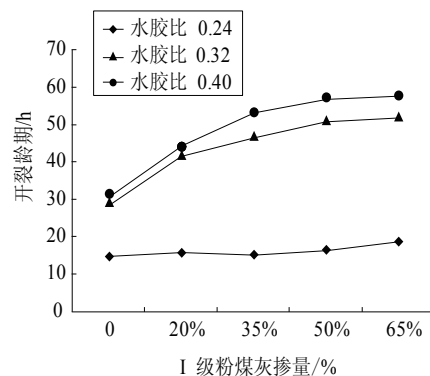


图 2 粉煤灰掺量对不同水胶比水泥净浆开裂龄期的影响

从图 2 试验结果可以看出: 当水胶比为 0.32 和 0.40 时, 随 I 级粉煤灰的掺量在 20%~65% 区间增加, 净浆的开裂时间持续增加。水胶比 0.32, 粉煤灰掺量 50% 的试件比基准组开裂龄期提高近 75%; 水胶比 0.40, 粉煤灰掺量 50% 的试件比基准组开裂龄期提高 81%。但掺量 >50% 后, 抗裂性能提高效果不再明显。当水胶比降低到 0.24 时, 基准组净浆开裂龄期很短, 约为水胶比 0.32 时基准组的一半。粉煤灰掺量增加对其开裂龄期的提高很小, 效果极不明显。

### 2.2 试验结果分析

水胶比为 0.32 和 0.40 时粉煤灰提高净浆抗裂性能的原因可以从粉煤灰具有形态效应、微集料效应和火山灰效应这三方面来解释。粉煤灰的表面比较光滑, 需水量较低, 所以其形态效应可以使相同水胶比条件下水泥净浆中保留相对较多的自由水, 降低净浆的绝对升温和温度裂缝发生

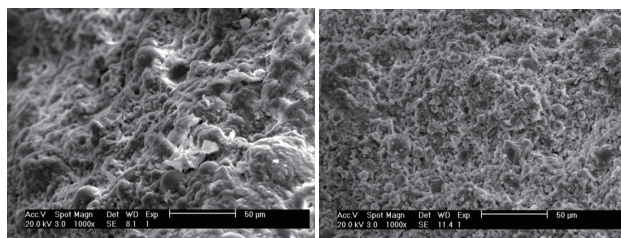
的概率<sup>[5]</sup>从而降低自收缩；粉煤灰的火山灰效应在早期较慢，水化率很小，从而抑制了净浆的干缩和自收缩；粉煤灰的微集料效应能有效提高混凝土的密实性，可减少水泥石中的有害孔比例，进而提高其抗裂性能<sup>[6]</sup>。

因此，粉煤灰的形态、活性、微集料这三大效应叠加，起到了降低温升、增大水灰比、延缓水化硬化速率的作用，并在早期具有较强的徐变松弛能力，早期弹性模量发展相对缓慢。这些对改善净浆的开裂敏感性十分有利。粉煤灰是活性较低的矿物掺合料，界面效应和微集料效应相对有限，同等条件下以粉煤灰等量替代水泥，由于粉煤灰早期火山灰反应慢，粉煤灰与水化物之间连接很弱，初龄期水化率很小，所以替代率越高，水泥石孔隙率越大，孔径越粗，收缩越小。同时，掺加粉煤灰降低了水泥石的弹性模量，并提高了徐变性能，使抗裂性能得到提高。但当掺量增大到一定程度后，这种叠加效应的效果就达到极限，不再能显著提高净浆的抗裂性能。

试验结果表明，当水胶比低至 0.24 时，掺加粉煤灰对净浆开裂几乎没有影响。这可用 Wittman<sup>[7]</sup>等人提出的毛细管压力与塑性收缩关系理论来解释：由于水胶比较小，单个粒子之间的距离相对较小，毛细管压力较大，因而其塑性收缩量较大。

### 2.3 净浆 SEM 分析

为进一步了解掺加粉煤灰的水泥浆体硬化后的微观结构，采用 XL30 环境扫描电子显微镜对 I 级粉煤灰掺量分别为 20% 和 50% 的 B-1、B-3 组试件的 3 d 龄期硬化浆体进行微观观察，结果如图 3 所示。



a B-1 组试件 SEM 图

b B-3 组 SEM 图

图 3 3 d 龄期的两组试件 SEM 图

通过两组试件的 SEM 照片，可以很明显地看到很多表面光滑的球形粉煤灰颗粒。这些粉煤灰微细颗粒有相当部分在早期起到的是细集料的作用，较少参与水化反应，掺加大量的粉煤灰相当于早期用水量不变的情况下降低了

水泥用量，从而早期单位体积中水化产物量少，水泥石结构相对疏松，孔含量相对降低，早期自收缩明显降低，同时粉煤灰改善了胶凝材料的絮凝情况，提高了水泥石的整体均匀性，提高了总体上的致密性，也使得早期的干燥收缩较小。因此，在适当的水胶比条件下 I 级粉煤灰能明显降低净浆的收缩开裂趋势。

## 3 结论

用环约束法研究了不同水胶比下 I 级粉煤灰掺量变化对水泥净浆开裂的影响，结论有以下 2 点。

(1) I 级粉煤灰在低水胶比 (0.24) 情况下对净浆开裂几乎没有影响，当水胶比为 0.32 和 0.40 时抗裂作用明显。因此，掺 I 级粉煤灰提高混凝土抗裂性能的说法值得商榷，还要看水胶比的大小。水胶比过低时，I 级粉煤灰提高混凝土抗裂性能的优势得不到发挥。

(2) 较高水胶比(0.32、0.40)情况下，I 级粉煤灰对水泥净浆的抗裂性能有较好的改善作用，在 20% ~ 65% 掺量范围内，随着掺量的增大，净浆的开裂龄期延长，抗裂性能提高。净浆水胶比为 0.32、0.40 时，随掺量增大对净浆抗裂性能有较大提高，掺量达 50% 的试件开裂龄期比基准组延长 75% 以上。但当 I 级粉煤灰掺量超过 50% 之后，净浆抗裂性能提高幅度很小。因此建议，I 级粉煤灰的适宜掺量为 20% ~ 65%。

## 参考文献

- [1] 冯乃谦, 顾晴霞, 郝挺宇. 混凝土结构的裂缝与对策[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 姚燕. 高性能混凝土的体积变形及裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [3] 巴恒静, 高小建. 约束条件下高性能混凝土的早期开裂[J]. 混凝土, 2002 (5): 3-6.
- [4] 林晖, 高培伟, 刘加平, 等. 混凝土早期开裂试验方法评述[J]. 工业建筑, 2007 (37): 926-930.
- [5] 刘数华, 方坤河, 曾力, 等. 粉煤灰对混凝土抗裂性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2004 (2): 27-28.
- [6] 乔艳静, 费治华, 田倩, 等. 矿渣、粉煤灰掺量对混凝土收缩、开裂性能的研究[J]. 长江科学院院报, 2008 (4): 90-92.
- [7] WITTMAN F H. On the Action of Capillary Pressure[J]. CCR, 1976 (6): 49-56.

作者简介: 胡红梅, 女, 教授, 硕士生导师, 厦门大学建筑与土木工程学院. 通信地址: 厦门市思明区思明南路 422 号 (361005). E-mail: hhm@xmu.edu.cn

收稿日期: 2011 年 12 月 5 日