

文章编号:1673-2049(2006)04-0019-05

# 矿物掺和料对混凝土早期开裂的影响

高小建,巴恒静,杨英姿

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**针对高性能混凝土普遍存在的早期开裂问题,采用板式混凝土开裂架研究了掺硅灰、粉煤灰、矿渣粉对混凝土早期开裂的影响规律,同时测量了混凝土早期自收缩及在干燥条件下的总收缩。试验结果表明:掺硅灰对混凝土在干燥条件下的早期总收缩影响不大,但使混凝土早期开裂加重;掺粉煤灰使混凝土早期自收缩明显减小,而总收缩并不降低;掺矿渣粉使混凝土早期自收缩和总收缩都增大,而掺粉煤灰和矿渣粉均使混凝土早期抗裂性改善,且掺粉煤灰抗裂性优于矿渣粉。掺硅灰混凝土早期抗裂性差的主要原因是混凝土早期弹性模量增大,徐变和应力松弛能力降低;而掺矿渣粉或粉煤灰混凝土早期抗裂性改善的主要原因在于混凝土早期弹性模量减小、徐变和松弛能力提高。

**关键词:**混凝土;早期开裂;矿物掺和料;自收缩;干燥收缩;徐变

**中图分类号:**TU528.041

**文献标志码:**A

## Effect of Mineral Admixture on Early Age Cracking of Concrete

GAO Xiao-jian, BA Heng-jing, YANG Ying-zi

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Early age cracking has been an ever-present problem during the application of high performance concrete. Influences of silica fume, fly-ash and ground granulated blast-furnace slag (GGBS) on early age cracking tendency of concrete were studied using the plate type concrete cracking frame, and autogenous shrinkage, total shrinkage of early age concrete under the drying condition were also measured in this experiment. The test results show that the addition of silica fume worsens the early age cracking of concrete, though it has little influence on the total shrinkage of early age concrete under drying condition. The addition of fly-ash reduces evidently the early age autogenous shrinkage of concrete and it doesn't decrease the total shrinkage of concrete. The addition of GGBS increases both autogenous shrinkage and total shrinkage of concrete at early ages. However, the addition of fly-ash or GGBS improves the early age cracking resistance of concrete, and fly-ash exceeds GGBS. As a result, the main reason of the lower cracking resistance of the silica fume concrete is that the addition of silica fume increases the elastic modulus and reduces the creep stress relaxation capability of concrete at early ages. The higher cracking resistance of the concrete added with fly-ash or GGBS is due to the lower elastic modulus and the better creep stress relaxation capability of concretes at early ages.

**Key words:** concrete; early age cracking; mineral admixture; autogenous shrinkage; drying shrinkage; creep

收稿日期:2006-11-01

基金项目:国家自然科学基金项目(50408016)

作者简介:高小建(1976-),男,陕西白水人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:xjgao2002@yahoo.com.cn。

# 0 引 言

裂缝是导致混凝土结构耐久性和使用寿命降低的主要因素<sup>[1]</sup>。据统计,绝大多数混凝土裂缝是由约束条件下的体积变形引起的,而混凝土处于硬化阶段的早期开裂是困扰现代混凝土工程界的一个普遍问题<sup>[2]</sup>。近年来,各国在混凝土早期开裂方面进行了大量研究,但大多数都是从混凝土养护1 d左右才开始测定混凝土开裂情况<sup>[3-4]</sup>。研究表明,低水胶比的高性能混凝土在初凝后到1 d内的收缩速率非常快,而这时混凝土拉抗强度并不高,因而实际工程中早期开裂常发生于最开始的1 d龄期内<sup>[5]</sup>。矿物掺和料是现代混凝土中不可或缺的一个重要组成部分<sup>[6-8]</sup>,但关于不同矿物掺和料对混凝土早期开裂影响的研究还较少,因此,笔者采用板式混凝土开裂试验方法,研究了加不同矿物掺和料的混凝土在初凝后到3 d龄期内表面开裂情况,同时分析了各混凝土早期收缩和水分散失率,得出了不同矿物掺和料对高性能混凝土早期开裂的影响规律与作用机理。

# 1 原材料与试验方案

## 1.1 原材料

采用黑龙江牡丹江水泥厂生产的P.O 42.5普

通硅酸盐水泥。3种矿物掺和料包括:挪威埃肯公司生产的中密质硅灰(SF)、广东深圳第二电厂生产的Ⅰ级粉煤灰(FA)和辽宁鞍山钢铁集团生产的磨细矿渣粉(SL),比表面积为 $450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。粗骨料采用石灰岩质碎石, $D_{\text{max}}=20\text{ mm}$ ,连续级配,压碎指标为4.9%;细骨料为松花江江砂,细度模数为2.82,属中砂、Ⅱ区级配。减水剂采用萘系高效减水剂M100,减水率为25%~35%。

## 1.2 混凝土配合比

所有混凝土胶凝材料总用量固定为 $520\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,水胶比固定为0.3,砂率固定为0.38,通过控制减水剂用量使新拌混凝土坍落度在18~22 cm范围内,共设计了基准混凝土、掺硅灰5%(SF5)和10%(SF10)、掺粉煤灰20%(FA20)和40%(FA40)、掺磨细矿渣粉20%(SL20)和40%(SL40)7个配合比的混凝土(文中的掺量均为质量分数),具体配合比及相对应的坍落度、抗压强度值见表1。

## 1.3 测试方法

采用尺寸为 $600\text{ mm}\times600\text{ mm}\times63\text{ mm}$ 的板状混凝土进行约束开裂试验评价各混凝土的早期抗裂性能,如图1所示。钢制模具每个边的外侧都增加了4条肋,以提高模具的刚度;模具的4个边内侧各装配了14个 $\Phi10\times100$ 的全螺纹螺栓以对混凝土

表 1 混凝土配合比及基本性能

Tab. 1 Mixture Proportion and Basic Performances of Concrete

材 料	原材料用量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )						坍落度/cm	不同龄期(d)下的抗压强度/MPa			
	水 泥	掺和料	砂	石	水	减水剂		1	3	7	28
基准混凝土	520	0	685	1 119	156	4.47	18.5	35.7	51.8	65.5	76.8
SF5	494	26	685	1 119	156	4.94	18.5	35.2	53.0	67.4	83.3
SF10	468	52	685	1 119	156	5.46	18.0	35.1	53.6	69.5	85.6
FA20	416	104	685	1 119	156	4.42	19.5	21.6	40.2	57.5	74.8
FA40	312	208	685	1 119	156	4.47	19.0	16.5	32.8	45.9	65.4
SL20	416	104	685	1 119	156	4.42	18.5	31.2	49.7	71.8	79.2
SL40	312	208	685	1 119	156	4.68	20.0	21.1	36.2	54.2	76.5

土收缩起约束作用。混凝土板浇注后密封养护6 h,然后置于风吹加速干燥条件下[温度为 $(20\pm0.5)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(50\pm5)\%$ 、风速为 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],用50倍读数放大镜定期观察每个混凝土板出现裂缝的时间及裂缝数量、长度、宽度等随时间的变化情况。当混凝土养护到3 d时停止试验,记录每个混凝土板表面出现裂缝的最大宽度和总长度,此时将整个混凝土板表面等分成 $20\times20$ 个方格,凡有裂缝经过的方格都计为开裂区域,从而统计各混凝土板的表面开裂面积率<sup>[9]</sup>。

笔者利用自行研制的非接触式微位移传感器收

缩仪测量混凝土从浇注6 h到3 d龄期内的收缩,具体试验方法见文献[10]。分别测量混凝土在 $(20\pm0.5)^{\circ}\text{C}$ 恒温绝湿条件下的自收缩及混凝土在单面自然干燥条件下[温度为 $(20\pm0.5)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(50\pm5)\%$ ]的总收缩,同时还测量了混凝土在单面干燥条件下的质量损失情况,换算出了水分损失率。本文中定义水分损失量占混凝土中水分总用量的百分率为水分损失率 $\varphi_w$

$$\varphi_w = \frac{G(t) - G(0)}{W_{\text{total}}} \times 100\%$$

(1)

式中: $G(t)$ 、 $G(0)$ 分别为试件在 $t$ 时和开始时的质

量; $W_{total}$ 为计算出的混凝土试件中总拌和水用量。

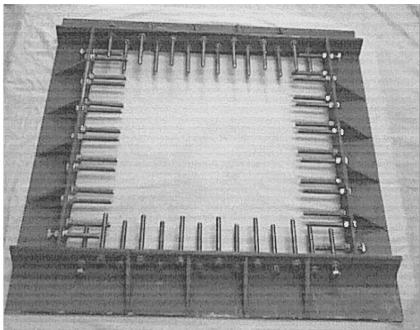


图 1 板状混凝土约束收缩开裂架

Fig. 1 Cracking Frame of Restraint Shrinkage for Plate Type Concrete

2 试验结果与分析

2.1 早期开裂

不同矿物掺和料对混凝土早期开裂的影响见表 2。由表 2 可知,掺硅灰使混凝土表面出现裂缝的时

间提前,裂缝贯穿整个混凝土表面所需时间缩短,最终裂缝条数增多,最终的最大裂缝宽度与裂缝总长度及开裂面积都有所增加,因此说处于恶劣的干燥条件下,掺硅灰使混凝土早期抗裂性变差。掺粉煤灰比不掺粉煤灰的混凝土出现裂缝的时间及裂缝伸展到贯穿整个混凝土表面的时间都明显推迟,最终的最大裂缝宽度、裂缝数量、裂缝总长度和开裂区面积都降低,而且粉煤灰掺量越大,减轻混凝土开裂的效果越显著。磨细矿渣的掺入对混凝土早期开裂的改善作用整体来说不如粉煤灰效果好;但当磨细矿渣掺量增加到 40% 时,混凝土开裂时间明显推迟,最终裂缝扩展速度、最大裂缝宽度、裂缝数量和开裂面积都有大幅度降低,所以,要通过掺加磨细矿渣来提高混凝土早期抗裂性,就必须保证有足够高的掺量。由此可得不同矿物掺和料对混凝土早期抗裂性的作用效果优劣依次为:粉煤灰、磨细矿渣、基准混凝土、硅灰。

表 2 不同混凝土的早期开裂性试验结果

Tab. 2 Testing Results of Early Age Cracking of Different Concretes

材 料	初裂时间/h	裂缝贯穿时间/h	不同龄期(d)下的最大裂缝宽度/mm		最终裂缝数/条	最终裂缝总长度/cm	最终开裂面积率/%
			1	3			
基准混凝土	1. 00	2. 00	1. 10	1. 10	24	264	22. 8
SF5	0. 83	1. 83	1. 20	1. 30	26	287	25. 0
SF10	0. 75	1. 92	1. 35	1. 40	27	288	24. 5
FA20	3. 00	5. 50	0. 70	0. 75	21	256	21. 3
FA40	3. 50	6. 75	0. 35	0. 40	19	239	19. 6
SL20	1. 10	3. 00	0. 80	0. 85	26	278	27. 0
SL40	2. 00	7. 00	0. 60	0. 65	25	241	21. 3

2.2 早期收缩

各混凝土早期自收缩测量结果如图 2 所示。由图 2 可知,掺硅灰对混凝土 1 d 内自收缩基本无影响,而 1 d 后掺硅灰混凝土收缩开始加快,超过了基准混凝土,到 3 d 时掺 5% 硅灰使混凝土自收缩增加了 6.8%。掺粉煤灰使混凝土早期自收缩明显减小,掺粉煤灰 20% 使混凝土 1、3 d 时早期自收缩分别减小了 29.7% 和 20.5%。在开始测量的几小时,掺矿渣混凝土自收缩小于基准混凝土;1 d 后掺矿渣粉混凝土自收缩开始超过基准混凝土;到 3 d 时掺矿渣粉 20% 混凝土自收缩值为基准混凝土的 110.6%。

处于单面干燥条件下混凝土早期总收缩的测量结果如图 3 所示。在整个试验期间,掺与不掺硅灰混凝土的早期总收缩量相差很小,到 3 d 时掺硅灰混凝土的总收缩量比基准混凝土大 6% 左右。由于明显地减小了早期自收缩,掺粉煤灰混凝土的早期总

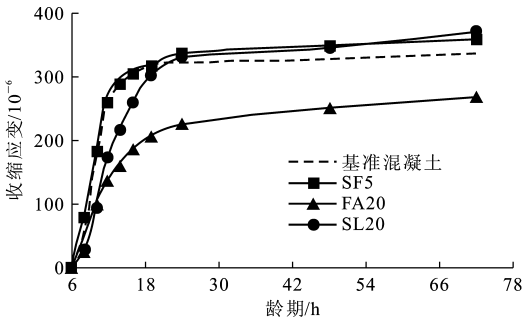


图 2 矿物掺和料对混凝土早期自收缩的影响

Fig. 2 Influence of Mineral Admixture on Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages

收缩值低于基准混凝土;但由于掺粉煤灰混凝土强度发展较慢,特别是早期密实度低于基准混凝土,在干燥条件下的水分散失较多、引起的干燥收缩较大,因而掺粉煤灰混凝土的早期总收缩与基准混凝土接近。在开始测量的 6~8 h 里,掺矿渣粉混凝土的早

期总收缩小于基准混凝土,这是由于在此期间掺矿渣粉混凝土自收缩较小,同时因其表面泌水能够及时地补充水分蒸发,使混凝土内部水分向外迁移和由此带来的相对湿度降低还不明显。随后,由于混凝土强度发展缓慢且矿渣粉的保水性不好,掺矿渣粉混凝土中水分的不断散失以及相对应早期自收缩增长速度的加快,使早期总收缩增长速率加快,逐渐超过了基准混凝土。1 d龄期时,掺20%矿渣粉混凝土的早期总收缩比基准混凝土高13.7%左右;3 d龄期时高出18.7%。

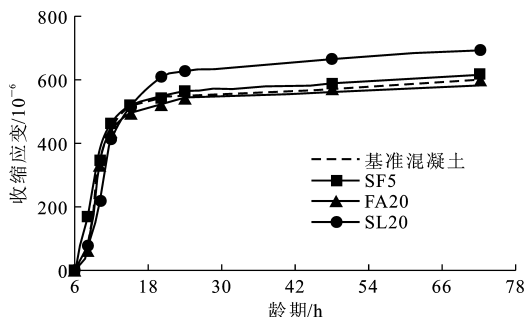


图3 单面干燥条件下混凝土的早期总收缩

Fig. 3 Total Shrinkage of Concrete at Early Age Under Single-Faced Dry Condition

## 2.3 表面水分散失

各试件在单面自然干燥条件下的水分散失率如图4所示。由于硅灰颗粒小、细度大,对水的吸附作用强,同时掺硅灰使混凝土中大孔减少,密实度提高,并降低了混凝土早期水分散失率。磨细矿渣粉和粉煤灰的细度都大于水泥,掺入混凝土中能提高混凝土的初始物理填充密实度,但因其化学活性低,它们的掺入减少了单位体积水泥用量,使混凝土的凝结和硬化过程推迟,混凝土早期结构强度和密实度都有所降低,因此处于干燥条件下混凝土的早期水分散失率明显高于基准混凝土;同时由于矿渣粉本身保水性差,同掺量时其水分散失率高于粉煤灰混凝土。

将图4与表2、图2对比可见:混凝土在单面干燥条件下的表面水分散失率与早期收缩、开裂程度并无对应关系,因此,混凝土表面水分散失率并不能直接用来判定混凝土早期收缩、开裂情况。这主要是因为低水胶比的高性能混凝土早期自收缩大,早期开裂是由自收缩、干燥收缩及温度变形(本文中研究的混凝土体积较小,可忽略)共同作用的结果。

## 2.4 早期收缩与开裂的关系

混凝土早期开裂的基本原理为:混凝土早期收缩因受到外部约束而在混凝土中产生收缩拉应力,

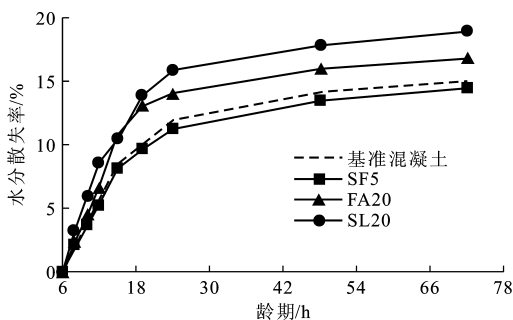


图4 单面干燥条件下混凝土水分散失率

Fig. 4 Water Loss Ratio of Concrete Under Single-Faced Drying Condition

当收缩拉应力超过混凝土抗拉极限时便导致混凝土开裂。假设混凝土处于单轴约束状态(图5),则约束条件下混凝土的总应变为

$$\epsilon_{\text{total}}^r = \epsilon_f + \epsilon_r = \epsilon_f + \epsilon_{\text{er}} + \epsilon_{\text{cr}} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_f$ 为自由状态下混凝土的收缩应变,取负值; $\epsilon_r$ 为约束拉伸应变; $\epsilon_{\text{er}}$ 、 $\epsilon_{\text{cr}}$ 分别为约束拉伸弹性应变和徐变。

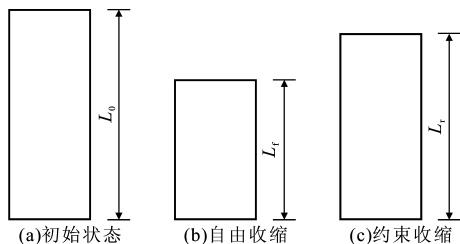


图5 约束条件下混凝土早期收缩变形

Fig. 5 Shrinkage Deformation of Concrete at Early Age Under Condition of Restraint

若混凝土受约束程度用系数  $K_r$  表示

$$K_r = -(\epsilon_{\text{er}} + \epsilon_{\text{cr}}) / \epsilon_f \quad (3)$$

则约束状态下混凝土中产生的收缩拉应力  $\sigma_c$  为

$$\sigma_c = \epsilon_{\text{er}} E_c = -(K_r \epsilon_f - \epsilon_{\text{cr}}) E_c \quad (4)$$

由文献[11]可知:当混凝土中产生的收缩拉应力达到混凝土抗拉强度  $f_t$  的0.75~0.8倍(本文中用系数  $k$  表示)时,混凝土出现开裂,由此可得混凝土收缩、开裂判定公式为

$$-(K_r \epsilon_f - \epsilon_{\text{cr}}) E_c \geq k f_t \quad (5)$$

由式(5)可知,混凝土早期收缩、开裂取决于混凝土收缩、徐变、弹性模量、抗拉强度发展及受约束程度等多方面因素。混凝土收缩量越大、弹性模量越高、受约束程度越高,混凝土中产生的收缩应力就越大,就越容易产生开裂;相反,混凝土早期受拉徐变量越大、抗拉强度越高,混凝土抗裂性能就越好。

由第2节试验结果可知:掺硅灰对混凝土在干燥条件下的早期总收缩影响并不大,但却明显加重

了混凝土早期开裂,这主要是由于掺硅灰使混凝土早期强度发展加快,混凝土弹性模量增大而徐变和应力松弛能力减小的结果。掺矿渣粉使混凝土早期总收缩增大,掺粉煤灰对混凝土早期总收缩影响并不大,但这两种矿物掺和料却使混凝土早期开裂明显减轻,这主要是由于掺矿渣粉或粉煤灰使混凝土早期强度发展缓慢,弹性模量减小,而且混凝土徐变和应力松弛能力提高,因而使混凝土早期抗裂性能得以改善。

### 3 结 语

(1)掺硅灰使混凝土早期开裂时间缩短,裂缝宽度、长度和开裂面积均增大,早期抗裂性变差;掺粉煤灰或矿渣粉均使混凝土开裂时间延长,裂缝宽度减小,混凝土抗裂性能改善;而且同掺量时粉煤灰对提高混凝土早期抗裂性的作用效果优于矿渣粉。

(2)掺硅灰对混凝土早期自收缩和干燥收缩的影响不大,掺粉煤灰明显减小了混凝土早期自收缩,但对在干燥条件下的混凝土早期总收缩无明显减小作用,掺矿渣粉使混凝土早期自收缩和干燥收缩均明显增大;各掺和料对混凝土早期收缩的影响与其对早期开裂的影响规律无对应关系。

(3)掺矿渣粉或粉煤灰对混凝土早期开裂的改善作用机理主要在于其使混凝土早期弹性模量减小,徐变和应力松弛能力提高。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] JENSEN A D, CHATTERJI S. State of the Art Report on Micro-cracking and Lifetime of Concrete; Part I [J]. Materials and Structures, 1996, 29(1): 3-8.
- [2] GUSE U, HILSDORF H K. Surface Cracking of High Strength Concrete [C]//WITTMANN F H, SCHWESINGER P. High Performance Concrete; Material Properties and Design. Freiburg: Aedificatio Verlag GmbH, 1995: 69-89.
- [3] WIEGRINK K, MARIKUNTE S, SHAH S P. Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(5): 409-415.
- [4] 梁文泉, 王信刚, 何 真, 等. 矿渣微粉掺量对混凝土收缩开裂的影响[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2004, 37(1): 77-81.  
LIANG Wen-quan, WANG Xin-gang, HE Zhen, et al. Influence of GGBFS Content on Shrinkage Cracking of Concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004, 37(1): 77-81.
- [5] RADOCEA A. Autogenous Volume Change of Concrete at Very Early Age[J]. Magazine of Concrete Research, 1998, 50(2): 107-109.
- [6] 贺拴海, 吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 71-75.  
HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 71-75.
- [7] 马玉平, 马 昕, 崔建涛. 高强度混凝土试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 67-69.  
MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-Strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 67-69.
- [8] 王大宏. 自密实轻骨料高性能混凝土配合比优化设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 68-71.  
WANG Da-hong. Optimal Design of Mixing Ratio for Self-compacting Light-Aggregate High Performance Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 68-71.
- [9] 高小建, 何忠茂, 杨英姿, 等. 周边约束状态下板式混凝土早期开裂模式及收缩应变的分布[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(3): 334-339.  
GAO Xiao-jian, HE Zhong-mao, YANG Ying-zi, et al. Distribution of Shrinkage Strain and Induced Cracks of a Round Restrained Concrete Plate at Early Age[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(3): 334-339.
- [10] 高小建, 巴恒静, 祁景玉. 混凝土水灰质量比与其早期收缩关系的研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 67-71.  
GAO Xiao-jian, BA Heng-jing, QI Jing-yu. Study on Relationship Between Water-Cement Mass Ratio and Early Age Shrinkage of Concrete [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(1): 67-71.
- [11] SAHAH A A, DAVID A L. Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(4): 323-331.