

# 基于等强度设计的高性能混凝土抗裂性研究

宁逢伟<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 简耀<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为避免强度不同对高性能混凝土抗裂性评价结果带来的影响, 介绍了高性能混凝土配合比的等强度设计方法。以掺合料分别为40%粉煤灰、5%硅灰与35%粉煤灰复掺的两组50 MPa配制强度的高性能混凝土为例, 进行了配合比的等强度设计, 并在此基础上开展了等强度混凝土的抗裂性对比分析。结果表明: 采用胶凝材料影响系数来进行高性能混凝土配合比的等强度设计是可行的; 掺5%硅灰的胶凝材料影响系数取值为1.04是合适的; 等强度条件下, 不同混凝土的抗裂性存在明显差异, 与40%粉煤灰混凝土相比, 5%硅灰与35%粉煤灰复掺等强度高性能混凝土的干缩值增大, 极限拉伸值降低, 开裂敏感性增加。

**关键词:** 高性能混凝土; 等强度设计; 胶凝材料影响系数; 抗裂性

中图分类号: TV431

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.24.019

应用掺合料改善高性能混凝土的抗裂性已逐渐被人们所接受。但当前高性能混凝土抗裂性方案比选时, 多采用固定水胶比考察不同的掺合料品种、用量, 或者固定水胶比和掺合料用量对比不同的掺合料品种, 亦或者固定掺合料品种及其用量研究不同的水胶比。在上述抗裂性对比试验中, 受掺合料特有的火山灰活性影响, 即使同水胶比条件下也不是基于等强度开展的<sup>[1]</sup>, 这在一定程度上降低了对工程的实际指导作用。工程建设中, 混凝土的强度等级通常是最先经过结构工程师计算确定的, 包括抗裂性在内的混凝土耐久性指标必须在此固定强度的基础上开展<sup>[2]</sup>, 并且混凝土强度对抗裂性的影响较为显著<sup>[3-5]</sup>, 可见, 基于等强度设计开展高性能混凝土的抗裂性研究确有必要。三峡大坝工程中就曾采用提高粉煤灰用量同时降低水胶比的方案(以等强度为前提)改善了抗裂性<sup>[6]</sup>。

综合以上工程实际, 本文对高性能混凝土配合比的等强度设计方法进行概述, 并以两组高性能混凝土为例进行了等强度设计, 在此基础上开展了抗裂性对比分析。

## 1 高性能混凝土配合比的等强度设计

若要实现等强度下的抗裂性研究, 先要建立相对成熟的等强度设计方法。等强度设计应以鲍罗比公式为前提, 并能够合理表达掺合料对混凝土强度的贡献。使用掺合料的高性能混凝土强度设计主要经历了两个阶段: 第一阶段, 将水泥和掺合料看成两个独立的胶凝材料主体, 掺合料的作用多以对水泥的取代程度来表示; 第二阶段, 将水泥和掺合料看作统一的复合胶凝材料体系, 共同发挥混凝土硬化过程中的胶凝作用。现以粉煤灰混凝土为例, 对高性能混凝土的配合比设计进行介绍。

1967年, 英国学者 Smith 率先提出了具有代表性的粉煤灰胶凝因子概念, 建立了等效水灰比公式<sup>[7]</sup>。

$$\frac{w}{c} = \frac{w}{c + kf} \quad (1)$$

式中  $w$  为用水量;  $c$  和  $f$  分别为水泥和粉煤灰的用量;  $k$  为粉煤灰胶凝因子, 可近似看成粉煤灰对水泥的“取代系数”。

收稿日期: 2015-07-10

作者简介: 宁逢伟, 男, 硕士研究生, 主要从事混凝土耐久性研究。E-mail: fwning@nhri.cn

引入粉煤灰胶凝因子的鲍罗比公式如式(2)所示<sup>[7]</sup>。这是将水泥和掺合料作为两个独立胶凝材料主体的典型代表,物理意义明确,但其求解过程繁琐,而且针对此项研究的尝试结果并不理想<sup>[8]</sup>。

$$f_c = A \left( \frac{c + kf}{w} - B \right) \quad (2)$$

式中  $f_c$  为粉煤灰混凝土的强度;  $A$ 、 $B$  为适用于粉煤灰混凝土的常数。

鉴于粉煤灰胶凝因子较难准确获取,研究者们渐渐将水泥与掺合料看作统一的复合胶凝材料体系来考虑。通常采用复合胶凝材料体系与纯水泥体系的胶砂强度比来表征新的胶凝材料主体活性,在此基础上产生的基于“活性指数”的高性能混凝土配合比设计方法逐渐推广开来<sup>[9]</sup>。

我国制定 JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》时引入了胶凝材料影响系数的概念,通过复合胶凝材料体系-水泥胶砂的抗压强度比来反映复合胶凝材料体系的活性,该系数强调以试验为基础,并在对粉煤灰和粒化高炉矿渣的应用进行大量总结的基础上,提出了与各自掺量、品种相关的胶凝材料影响系数,具体见表 1。

表 1 复合胶凝材料体系的胶凝材料影响系数

| 掺合料品种  | 不同掺量的影响系数 |           |           |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|        | 0         | 10%       | 20%       | 30%       | 40%       | 50%       |
| 粉煤灰    | 1.00      | 0.85~0.95 | 0.75~0.85 | 0.65~0.75 | 0.55~0.65 | —         |
| 粒化高炉矿渣 | 1.00      | 1.00      | 0.95~1.00 | 0.90~1.00 | 0.80~0.90 | 0.70~0.85 |

该标准中引入了用胶凝材料影响系数改进的鲍罗比公式,如式(3)所示。

$$f_{cu, \rho} = \alpha_b \gamma_1 \gamma_2 f_c \left( \frac{b}{w} - \alpha_a \right) \quad (3)$$

式中  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  即为粉煤灰和粒化高炉矿渣的胶凝材料影响系数;  $b$  为胶凝材料总量;  $\alpha_a$  和  $\alpha_b$  为回归系数,主要与粗骨料的品种有关。

但面对现有混凝土中普遍使用硅灰的工程实际,该标准中尚缺少硅灰的胶凝材料影响系数,研究者们需在进一步工作中予以补充、完善。

总体上,该标准系统地采用了复合胶凝材料体系取代纯水泥系统作为混凝土的强度源<sup>[10]</sup>,具有较强的科学性和应用性,可为高性能混凝土的强度设计和配制提供依据。

## 2 基于等强度设计的混凝土抗裂性对比

### 2.1 原材料及配合比设计

水泥为 P·MH42.5 中热硅酸盐水泥,物理力学性能满足 GB 200-2003《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐

水泥、低热矿渣硅酸盐水泥》的要求(见表 2)。

表 2 水泥的物理力学性能

| 凝结时间/min |     | 标准稠度  | 密度/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 比表面积/<br>( $m^2 \cdot kg^{-1}$ ) | 抗折强度/MPa |      | 抗压强度/MPa |      |
|----------|-----|-------|------------------------------|----------------------------------|----------|------|----------|------|
| 初凝       | 终凝  | 用水量/% |                              |                                  | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 130      | 220 | 23    | 3.18                         | 295                              | 7.8      | 12.4 | 16.8     | 46.2 |

粉煤灰为 I 级粉煤灰,密度为  $2.26 g/cm^3$ ,需水量比为 93.5%,45  $\mu m$  筛余为 13.9%;硅灰的平均粒径  $D(4.75)$  为 147 nm;细骨料采用密度为  $2.61 g/cm^3$ 、细度模数为 2.31 的河砂;粗骨料采用粒径为 5~40 mm、密度为  $2.78 g/cm^3$  的碎石;外加剂采用 FDN 系高效减水剂,质量满足 GB/T 8076-2008《混凝土外加剂》标准要求。

为客观对比 40% 粉煤灰(F40)、5% 硅灰与 35% 粉煤灰复掺(S5F40)高性能混凝土之间的抗裂性差异,参考标准 JGJ 55-2011 对两组 50 MPa 配制强度的高性能混凝土进行等强度设计。计算水胶比时掺合料的反应活性通过胶凝材料影响系数来实现。鉴于 JGJ 55-2011 中未规定硅灰的胶凝材料影响系数,对相关文献展开调研后发现<sup>[11]</sup>,在设计水胶比接近 0.30 的情况下,硅灰掺量在 3%~9% 之间变化时,胶凝材料影响系数变化规律如图 1 所示。

通过对胶凝材料影响系数-硅灰掺量曲线进行回归和插值法分析,初步确定硅灰掺量为 5% 时胶凝材料影响系数为 1.04,以此作为配合比设计依据。

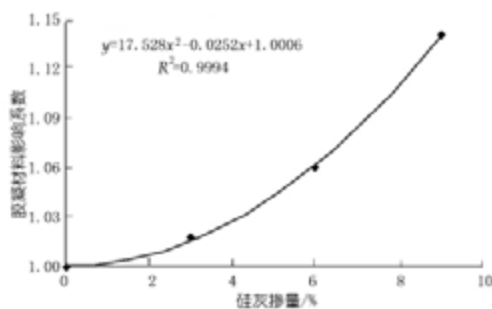


图 1 掺 3%~9% 硅灰时的胶凝材料影响系数变化<sup>[11]</sup>

两组高性能混凝土配合比等强度设计参数如表 3 所示。其中  $f_{cu, \rho}$  为混凝土的配制强度 50 MPa;  $f_{ce}$  为 28 d 实测水泥胶砂强度 46.2 MPa;粗骨料为碎石  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  取值分别为 0.53 和 0.20;  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  分别表示粉煤灰和硅灰的胶凝材料影响系数,鉴于粉煤灰颗粒偏粗,活性可能会有所降低,  $\gamma_1$  取值时在 JGJ 55-2011 推荐的范围内适当下降了 0.02,即 S5F35 和 F40 的  $\gamma_1$  取值分别为 0.68 和 0.63,  $\gamma_2$  取值分别为 1.04 和 1;  $w/b$  为计算水胶比, S5F35 和 F40 的计算水胶比分别为 0.32 和 0.30。

其余配合比参数如下:胶凝材料用量为 500

kg/m<sup>3</sup> 掺合料采用内掺法; 减水剂的用量适时调整, 保证混凝土的坍落度控制在 130 mm ± 10 mm( 见表 3)。

表 3 混凝土配合比

| 材料类别  | 水泥  | 硅灰 | 粉煤灰 | 水   | 砂   | 碎石   | 减水剂  |
|-------|-----|----|-----|-----|-----|------|------|
| S5F35 | 300 | 25 | 175 | 160 | 642 | 1047 | 1.85 |
| F40   | 300 | 0  | 200 | 150 | 612 | 1088 | 1.65 |

## 2.2 试验方法

依据 DL/T 5150-2001《水工混凝土试验规程》测试混凝土的抗压强度、抗拉强度、极限拉伸值、抗拉弹性模量和干缩性能。其中混凝土抗压强度试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm, 其余试件尺寸均为 100 mm × 100 mm × 515 mm。

## 3 结果与讨论

### 3.1 力学性能

S5F35 和 F40 的抗压和抗拉强度测试结果分别见图 2 和图 3。

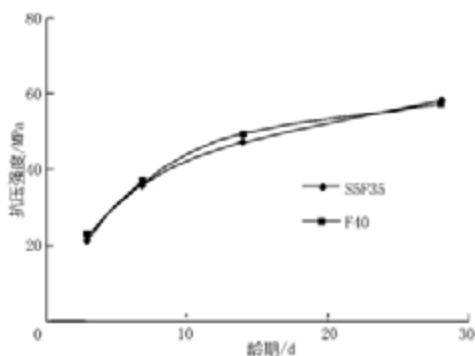


图 2 混凝土的抗压强度变化

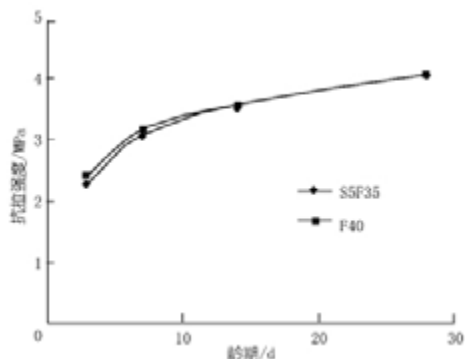


图 3 混凝土的抗拉强度变化

由图 2~3 可见, 与常规纯水泥混凝土早期强度发展迅速后期趋于稳定的特点相比, 高性能混凝土的早期强度增长速率略有降低, 这主要是由于复合胶凝材料体系早期水化速率总体上有所降低。

对比两组高性能混凝土发现 3, 7, 14 d 和 28 d 抗压和抗拉强度总体上比较接近, 实现了等强度设计的

目的。这主要由于硅灰的反应活性高于粉煤灰, 硅灰等量取代 5% 粉煤灰后带来的强度增长与水胶比增大 0.02 带来的强度损失相互抵消。表明采用胶凝材料影响系数来进行高性能混凝土配合比的等强度设计是可行的, 5% 硅灰的胶凝材料影响系数取值为 1.04 是合适的。

抗拉弹性模量的测试结果见图 4。

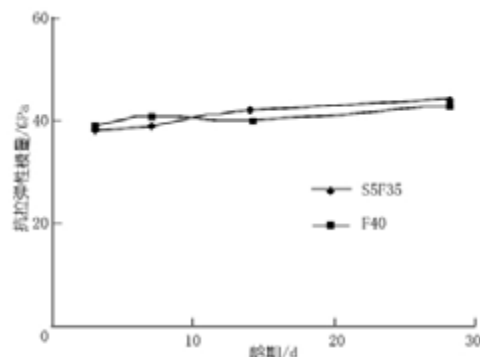


图 4 混凝土的抗拉弹性模量变化

由图 4 可见, 总体上抗拉弹性模量介于 38 ~ 44 GPa 之间, 3 ~ 28 d 强度发展过程中变幅不大, 表明高性能混凝土的抗拉弹性模量主要形成在第 3 天之前。两组高性能混凝土 3, 7, 14 d 和 28 d 实测值相差不大, 与抗压和抗拉强度测试结果类似, 实现了力学性能的等强度设计。

### 3.2 变形性能

极限拉伸值的测试结果见图 5。

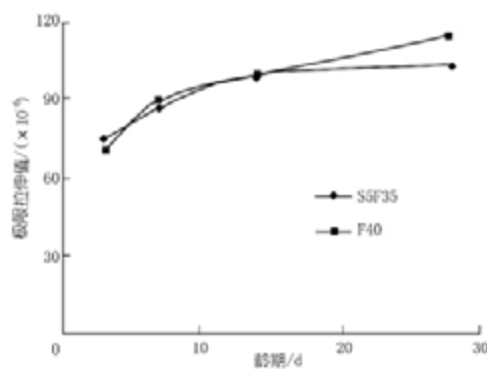


图 5 混凝土的极限拉伸值变化

由图 5 可以看出, 随着混凝土龄期的延长, 两组高性能混凝土的极限拉伸值总体上早期增长迅速后期趋于平缓。第 28 天以前两者较为接近, 在第 28 天时分别为  $104 \times 10^{-6}$  和  $115 \times 10^{-6}$ 。可见, 与 5% 硅灰和 35% 粉煤灰复掺混凝土相比, 等强度设计的 40% 粉煤灰混凝土早龄期极限拉伸值没有明显区别, 后期有所提高, 这表明在等强度条件下, 适当提高粉煤灰的掺量, 可提高混凝土的极限拉伸值, 改善抗裂性, 这与文献 [12] 结论一致。

干缩实验主要用来测试混凝土在无荷载和恒温条件下因混凝土自身水分散失而造成的收缩变形, 30 d 龄期内的干缩测试结果见图 6。

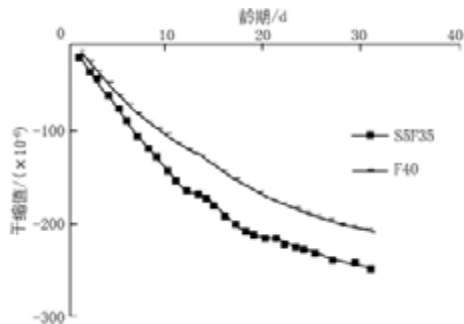


图 6 混凝土的干缩值变化

由图 6 可见, 两组混凝土的 30 d 干缩实测值分别为  $-200 \times 10^{-6}$  和  $-250 \times 10^{-6}$  左右, 并且早期干缩发展迅速, 后期增长速率逐渐变缓。这主要是由于 DL/T 5150-2001 规定的混凝土干缩测试变形同时包含了因水分散失造成的干燥收缩和胶凝材料水化作用引起的自收缩, 因测试环境与养护室相对湿度差异较大 (养护室中 95% 以上, 干缩室中 60%) , 并且胶凝材料早期水化比较迅速, 是干缩与自收缩叠加作用所致。

对比两种等强度高性能混凝土发现, 5% 硅灰与 35% 粉煤灰复掺混凝土的干缩变形高于 40% 粉煤灰混凝土, 并且在 12d 龄期之前这种差距随龄期的延长逐渐拉大, 而后趋于稳定。这主要由于硅灰能够显著提高混凝土的自收缩, 而且在低水胶比时自收缩占混凝土干缩值的很大比重<sup>[13]</sup>。12 d 龄期之前两种高性能混凝土的差异显著增大, 主要由于早龄期胶凝材料水化剧烈, 自收缩差异较大所致。

## 4 结论

(1) 基于等强度设计的两组混凝土力学性能基本

相同, 实现了等强度设计的目的。采用胶凝材料影响系数来进行高性能混凝土配合比的等强度设计是可行的。

(2) 5% 硅灰的胶凝材料影响系数取值为 1.04 是合适的。

(3) 与 40% 粉煤灰混凝土相比, 5% 硅灰与 35% 粉煤灰复掺等强度的高性能混凝土干缩值增大, 极限拉伸值降低, 开裂敏感性提高。

## 参考文献:

- [1] 张建峰. 水工抗冲磨混凝土的抗裂性能研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2011.
- [2] 何智海, 钱春香, 钱桂枫, 等. 等强度下混凝土组分对徐变性能的影响[J]. 功能材料, 2011, 42(5): 925-927, 932.
- [3] 张守治, 田倩, 郭飞, 等. 不等强度等级混凝土的变形特性[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(7): 8-10, 49.
- [4] 张守治, 姚婷, 郭飞, 等. 新型膨胀剂在不等强度等级混凝土中膨胀性能的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013, (5): 5-8.
- [5] 韩锡云, 袁志刚, 张守治, 等. 新型抗裂剂对不等强度等级混凝土自收缩的补偿[J]. 混凝土与水泥制品, 2014, (7): 13-16.
- [6] 杨华全, 陈如华, 王仲华, 等. 三峡工程大坝混凝土的配合比设计[J]. 长江科学院学报, 2001, 18(5): 41-45.
- [7] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京: 中国铁道工业出版社, 1989.
- [8] 艾红梅. 大掺量粉煤灰混凝土配合比设计与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [9] 尚连飞, 张亚梅, 孙伟, 等. 粉煤灰混凝土抗压强度计算模型[J]. 建筑技术, 2000, 31(1): 32-34.
- [10] 危加阳. JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》修订意义探讨[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(11): 27-30.
- [11] 王洪, 陈伟天, 陈昌礼. 硅灰对高强混凝土强度影响的试验研究[J]. 混凝土, 2011, (7): 74-76.
- [12] 韩吉禄. 大掺量粉煤灰混凝土抗裂性能的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [13] 刘建忠, 孙伟, 缪昌文, 等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 580-585.

(编辑: 胡旭东)

## Research on crack resistance of high performance concrete based on equivalent strength design

NING Fengwei<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, JIAN Yao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** In order to avoid influence of different concrete strength on crack resistance evaluation, the mixing ratio design of high performance concrete (HPC) based on equivalent strength was introduced. Two 50MPa HPC examples, single doped by 40% fly ash of, compound doped by 5% silica powder and 35% fly ash, were employed to conduct the mixing ratio design based on equivalent strength and their crack resistances were compared. The results indicated that the design of equivalent strength HPC by using cementing material coefficient is feasible; the cementing material coefficient of 1.04 for 5% silica powder example is suitable; under equivalent strength condition, the crack resistance of different concretes varied. Compared with the concrete of 40% fly ash single doped, the equivalent strength concrete of 5% silica powder and 35% fly ash compound doped has larger drying shrinkage, lower ultimate tension and higher cracking sensitivity.

**Key words:** high performance concrete (HPC); equivalent strength design; cementing material coefficient; crack resistance