

# 粉煤灰在砼中的效应分析

王松成

李玉寿

(盐城建筑工程学校,盐城,224002 · 盐城工学院建筑材料工程系,盐城,224003)

**摘要** 从普通砼和高强砼掺用粉煤灰对强度的影响入手,分析了粉煤灰在砼中的效应,并说明了这些效应对强度的影响机理。

**关键词** 粉煤灰 火山灰效应 形态 填充 紧密堆积 超量取代系数

**分类号** TU528

粉煤灰具有潜在活性,可与水泥熟料水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生“二次反应”,即所谓火山灰效应,属化学方面的效应,但粉煤灰在砼中还同时具有物理方面的效应,它包括形态效应及填充效应,其综合作用的结果,可通过其对砼强度的影响来反映,如 Dunstan 推荐的粉煤灰—水胶比—强度三维关系模型<sup>[1]</sup>,见图 1。从图中看出,对一定质量的粉煤灰而言,砼强度受到其掺量  $F/(C+F)$ ,及水胶比  $W/(C+F)$  等因素的影响。

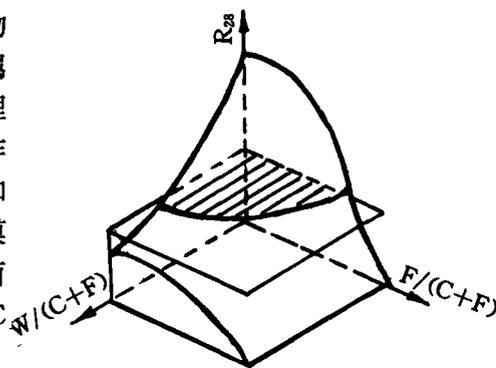


图1  $R_{28}-W/(C+F)-F/(C+F)$  三维关系

## 1 普通砼中粉煤灰效应

普通砼是指 C50 以下等级的水泥砼,在配置这类砼时,常掺入符合国家标准的 I、II、III 级粉煤灰。普通砼的特点是水胶比较大,根据 Dunstan 模型,砼强度应受到  $W/(C+F)$ 、粉煤灰掺量及粉煤灰性质的影响,此情况下,粉煤灰效应主要是火山灰效应。图 2 为某种砼中粉煤灰和水泥对强度的贡献随  $W/(C+F)$  的变化情况。从图中看出,粉煤灰对砼强度的贡献随龄期延长而增大,随水胶比增大而增大。有研究人员用下列强度公式:

$$R_{28} = K \left[ \frac{C}{W} + k \left( \frac{F}{W} \right)^q - Z \right] \quad (1)$$

式中  $R_{28}$  为砼 28 天抗压强度 (MPa);  $C$ 、 $F$ 、 $W$  分别为水泥用量、粉煤灰用量、用水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $K$ 、 $Z$  为回归系数,取决于水泥标号、骨料性质;  $k$ 、 $q$  为粉煤灰活性系数、活性指数。

对用 425 号硅酸盐水泥、I 级粉煤灰配制的 C20 至 C50 碎石砼的若干组试件进行回归分

析得以下关系式:

$$R_{28} = 22.38 \left[ \frac{C}{W} + 0.82 \left( \frac{F}{W} \right)^{0.72} - 0.59 \right] \quad (2)$$

该关系式具有较高的相关性,基本反映了掺粉煤灰普通砼的强度规律<sup>[2]</sup>。

从公式(2)可见,粉煤灰活性系数和活性指数均小于 1,所以用粉煤灰取代水泥必须采用超量取代。将公式(1)进行变换,设用水量 W 不变,得:

$$\partial R_{28} = K \left[ \frac{\partial C}{W} + kq \left( \frac{\partial F}{W} \right)^{q-1} \frac{F}{W} \right] \quad (3)$$

保持强度不变,则得超量取代系数  $K_{超}$ :

$$K_{超} = \left| \frac{\partial F}{\partial C} \right| = \frac{1}{kq \left( \frac{F}{W} \right)^{q-1}} \quad (4)$$

对于掺量小于 50%原状粉煤灰水泥砼,  $K_{超}$  取决于粉煤灰的性质,即活性和细度,以及掺量,其值在 1.25~2.00 之间,也就是说粉煤灰活性为水泥活性的 50%~80%。

以上粉煤灰在普通水泥砼中的效应主要是由粉煤灰的火山灰效应特点所决定的。实验观察表明,粉煤灰砼中,水化 7 天的粉煤灰颗粒表面上,几乎没有什么变化,直到 28 天刚能看到表面开始初步水化,略有凝胶状的水化产物出现,该凝胶状水化产物即为熟料水化析出的  $Ca(OH)_2$  通过液相扩散到粉煤灰颗粒表面与粉煤灰中活性成分作用而形成;从砼中胶结材结合水和  $Ca(OH)_2$  含量测定结果(图 3)也可看出,粉煤灰砼后期水化产物逐渐增多,  $Ca(OH)_2$  含量变小,使砼孔隙减少,孔径减小,从而提高后期强度,因而砼中胶结材早期结合水较少,水泥与水实际水灰比大,因而水泥对强度贡献低,同时由于液相多,  $Ca^{+2}$ 、 $OH^-$  离子易扩散,因而粉煤灰对砼强度贡献增多。

### 2 高强砼中粉煤灰的效应

高强砼的特点是水胶比较低,从图 1 可见,当水胶比较小,粉煤灰掺量在一定范围内时,粉煤灰掺量对砼强度影响并不显著。

表 1 为用 II 级粉煤灰以 8% 至 24% 掺量配置的砼,控制坍落度相同时,强度和配合比的关系。其结果也表现了这样的规律。同时还可看出,由于掺用的 II 级粉煤灰,需水性大(国标规定小于 105%),故保持流动性不变,需适当增大水胶比。

大量实验资料表明:当水胶比较低,粉煤灰掺量在一定范围时,砼强度主要取决于水泥标号和胶水比。如同济大学提出的采用碎石粉煤灰配制的高强砼强度公式为<sup>[3]</sup>:

$$f_{28} = 0.304 f_{ce} \left( \frac{C+F}{W} + 0.62 \right) \quad (5)$$

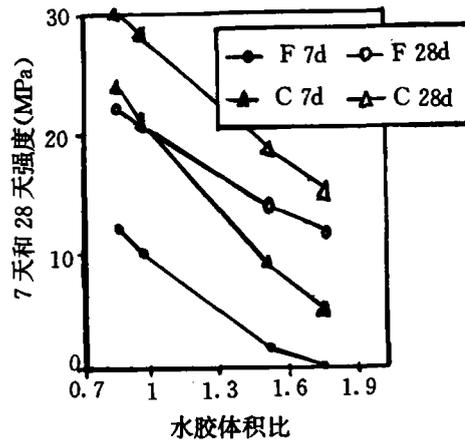


图 2 粉煤灰和水泥对强度的贡献

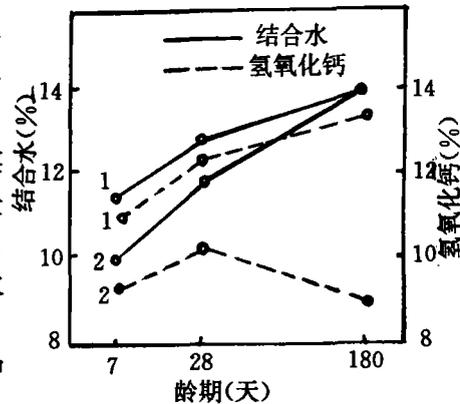


图 3 结合水和氢氧化钙的含量的变化规律  
1—纯熟料水泥 2—掺 30%粉煤灰

表1 粉煤灰掺量对砵强度和配合比的影响

序号	水泥用量 kg/m <sup>3</sup>	粉煤灰%	$\frac{W}{C+F}$	坍落度 mm	抗压强度(MPa)		
					3天	7天	28天
1	424	8	0.355	190	47.5	54.0	63.6
2	396	12	0.359	190	46.5	54.1	64.9
3	369	18	0.360	190	47.5	54.3	65.3
4	342	24	0.365	190	41.5	49.0	62.9

式中  $f_{ce}$  为水泥实际强度。此公式表明,在高强砵中,粉煤灰对砵强度的贡献较在普通砵中有所增大。而从高强砵的 SEM 分析,同样发现在 28 天时,粉煤灰的水化程度也较低,所以对于高强砵而言,粉煤灰效应除火山灰效应外,还应具有其它效应,即粉煤灰形态效应和填充效应。形态效应是由于粉煤灰具有表面光滑、结构比较致密、内比表面积小、比重较小、对水的吸附能力小的特点而产生的,其对砵强度的作用主要有三方面:一是改善砵的施工性能。对水泥净浆和水泥砂浆的振动触变研究表明,在相同水胶比条件下,掺入 I 级粉煤灰可提高流动性,掺入 II 级粉煤灰,流动性有所降低,但由于粉煤灰的微珠效应,可改善浆体的流变学性质,振动粘度系数变小,使砵易于密实成型。二是降低水泥石的孔隙率。粉煤灰的比重较水泥低,且结构较致密,即使不考虑火山灰效应,在相同的水胶比下,掺入粉煤灰的砵中水泥石和孔隙率也会低于不掺粉煤灰的水泥石的孔隙率。三是改善外加剂与水泥的相容性。粉煤灰对水和外加剂的吸附力较弱,从而改善新拌砵的工作性,有利于砵强度的提高。

填充效应是粉煤灰中较小粒径颗粒产生的,其作用有以下几方面:

一是改善系统需水性。新拌砵中水可分为两部分:一为填充水,二为表层水。填充水填充在颗粒间空隙中,对浆体流动性没有贡献,表层水膜厚度是影响流动性的主要因素。掺用减水剂只能减少表层水,不能减少填充水。而填充水的数量取决于系统堆积密实程度,也就是取决于填充料颗粒粒径  $d_F$  与水泥颗粒  $d_c$  之比  $d_F/d_c$ ,此比值愈小,系统紧密堆积效应愈高,需填充水愈少。对纯水泥来说,由于可减少的表层水较少,所以减水率较低,  $W/C$  较小时,得不到均匀致密所需的流动性,故  $W/C$  为 0.19 的砵反而低于  $W/C$  为 0.24 的砵强度,见表 2 中基准砵。较细粒径粉煤灰填充了空隙,降低了填充水量,尽管使总面积增大,表层需水量增多,但表层水可通过掺入减水剂来降低。

表2 掺超细粉煤灰与基准砵强度对照表

砵类别	水胶比	粉煤灰掺量(%)	抗压强度(MPa)		
			3天	28天	90天
基准砵	0.24	—	—	97.7	106.7
	0.19	—	—	92.5	96.5
掺超细粉煤灰	0.24	15	84.8	114.3	122.5
	0.19	15	—	121.0	132.0

注:高效减水剂:ZP-II 掺量 2%;水泥:525 硅酸盐水泥;粉煤灰密度:2.42g/cm<sup>3</sup>,  
需水比:88%;细度:45 $\mu$ m 方孔筛筛余 2.36%。

二是分散熟料颗粒。均匀分散在熟料颗粒中间的粉煤灰使各个熟料不致相互粘聚,从而有利于水化进行,反映在图 3 中,掺粉煤灰的砵中结合水的增长率较不掺粉煤灰的砵快,且此作

用随水胶比降低而显著降低。

此外,还起到细化孔径的作用。由于优质粉煤灰及超细粉煤灰的填充作用,减少了填充水量,不仅降低了孔隙率,更重要的是减小了孔径,使有害孔所占比例显著减小。

所以粉煤灰的形态效应和填充效应对高强砼的强度的作用尤其重要,且其效应的大小取决于粉煤灰的细度。粉煤灰的细度愈细,效应愈高。从表 2 中数据可以看出,在相同水胶比条件下,掺入超细粉煤灰的砼 28 天强度提高 17%~30%,水胶比愈低,强度提高率愈大,90 天强度也有所提高,但提高幅度低于掺原状粉煤灰。说明粉煤灰在砼中的效应大小主要取决于粉煤灰的细度,细度愈小,火山灰效应发展快;细度愈小,需水比小,形态效应高;细度愈小, $d_f/d_c$  愈小,填充效应愈高。

### 3 结论

粉煤灰在普通砼中的效应主要是火山灰效应,其效应取决于粉煤灰活性,即细度和需水性,且粉煤灰对强度的贡献取决于龄期和水胶比。

粉煤灰在高强砼中的效应则是火山灰效应、形态效应和填充效应综合作用的结果,其效应大小主要取决于粉煤灰的细度。细度愈细,效应愈高。

### 参 考 文 献

- 1 M. R. H. D. untanacisp, ACISP, 97. 7
- 2 陈宗严. 砼硅质掺合料的效能分析. 混凝土. 1996(1)
- 3 同济大学. 混凝土学. 高教出版社. 1991
- 4 潘钢华, 孙伟等. 超细粉煤灰与硅灰复合对高性能砼强度的影响. 混凝土. 1996(3)

## Anelyses of effects of fly - ash in concrete

Wang Songcheng<sup>1)</sup>      Li Yushou<sup>2)</sup>

(1)Yancheng Junior College of Construction, Yancheng, 224002, PRC;

2)Department of Building Material Engineering of Yancheng institute of technology, Yancheng, 224003, PRC)

**Abstract** The paper starts from effection of strength of ordinary concrete and high - strength concrete of mixed fly - ash, and then furthur analyses the effects of fly - ash in concrete and explains these influential mechanisms to strength.

**Keywords** fly - ash pozzolan effects; formal effects; filling effects; close pile effects; overquantity substitutionary coefficient