

⑨  
71-76

# 特细砂高强砼的性能研究

雷映平 陈惟时<sup>✓</sup> 张 沪

(重庆建筑大学材料科学与工程系 630045)

TU528.31

**摘要** 本研究采用特细砂配制  $C_{50} \sim C_{60}$  高强砼, 并对其主要的物理力学性能和长期性能、耐久性能进行了测试与研究。

**关键词** 特细砂, 高强混凝土, 级配, 强度, 耐久性

**中图法分类号** TU 528.31

特细砂分布极广, 资源十分丰富, 长期未能得到充分应用; 尤其是在配制高强砼中应用受到限制。其主要原因是特细砂砼水泥用量大, 需水量大, 砼的强度低而收缩徐变大, 因而国外限制特细砂在砼中应用。我国只有重庆等少数地区采用特细砂做砼, 但仅限于一般工程中, 在四川省地方标准《特细砂砼应用技术规程》(DB51/5002-92)中, 规定的最高特细砂砼强度等级为  $C_{40}$ 。随着建筑工业的迅速发展, 现代建筑工程结构要求砼的强度越来越高, 建设部已将高强砼列入“九五”期间重点推广的新技术项目。由于高强砼能够大幅度提高工程结构和构件的承载能力, 减小结构构件尺寸和自重, 加快施工进度, 并能经受恶劣环境条件。所以, 利用特细砂, 普通的水泥和常规工艺配制具有良好性能的高强砼就更具有重大的社会效益和经济效益。

## 1 原材料及试验方法

采用重庆水泥厂生产的 425、525 矿渣水泥, 峨嵋水泥厂生产的 425、525 普通水泥, 重庆特细砂, 歌乐山石灰石碎石, 市售高效减水剂, 饮用水。砂石性能分别见表 1 和表 2、表 3。

拌和方法采用人工拌和, 实验室强制式搅拌机拌和, 工地自落式、强制式搅拌机拌和, 振动台和振动棒成形, 养护方式为实验室标准养护。

测试方法按《普通砼力学性能试验方法》(GBJ81-85)及《普通砼长期性能和耐久性能试验方法》(GB82-85)进行。

## 2 技术路线

特细砂含泥量大, 砂粒总表面积大, 空隙率大, 级配差, 导致其砼水泥用量大, 需水量大, 硬化后砼中的孔隙率大, 水泥石及水泥石与骨料界面强度低, 收缩徐变大。为克服上述缺陷,

收稿日期: 1996-04-08

雷映平, 男, 1958年生, 副教授

表 1 特细砂物理性能表

密度 ( $g/cm^3$ )	紧密体 积密度 ( $kg/m^3$ )	松散体 积密度 ( $kg/m^3$ )	紧密空 隙率 (%)	松散空 隙率 (%)	分 计 筛 余 (%)								细度 模数
					筛 孔 尺 寸 (mm)								
					5.00	2.50	1.25	0.630	0.315	0.160	0.080	筛底	
2.64	1.540	1.310	41.7	50.4	0	0	0	0	5.1	45.8	44.5	5.0	0.56

表 2 石灰石碎石物理性能表

密 度 ( $g/cm^3$ )	紧密体 积密度 ( $kg/m^3$ )	松散体 积密度 ( $kg/m^3$ )	紧密空 隙率 (%)	松散空 隙率 (%)	分 计 筛 余 (%)					压碎值 (%)
					筛 孔 尺 寸 (mm)					
					16.0	10.0	5.00	2.50	< 2.50	
2.70	1.730	1.490	35.9	44.8	0	26.3	35.7	21.2	16.8	7.2

表 3 5.00 mm 以下碎石颗粒筛分析表

筛孔尺寸(mm)	5.00	2.50	1.25	0.630	0.315	0.160	0.080	筛底
分计筛余(%)	0.0	49.0	21.0	11.0	6.4	5.6	4.0	3.0
细 度 模 数	3.8							

本研究采用较小粒径碎石连续级配法(通常称连槽骨料),利用 5 mm 以下的碎石屑与特细砂相互填充级配,形成连续密实的骨料。利用石灰石的表面粗糙特性和石灰石的微活性(特别是 5 mm 以下的颗粒),提高水泥石与骨料界面的机械咬合力和化学结合力,并促使水泥水化后产生的胶体早日形成一部分膨胀性晶体,以提高砼的早期强度减少干缩。采用高效减水剂,减小水灰比,使骨料表面水膜层减薄,并力图使  $Ca(OH)_2$  在骨料表面形成的弱效应层与其它活性物质生成稳定的、结晶的、高强度的物质。从而达到提高砼中水泥石的强度和水泥石与骨料表面的界面强度。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 物理力学性能

在已进行的 300 余组配合比试验中,表 4 和表 5 是其中具有代表性的特细砂砼抗压强度和其力学性能试验结果。

##### 3.1.1 抗压强度( $R$ )

用特细砂配制  $C_{30}$  流态砼和  $C_{60}$  低流态砼不仅早期强度高(3 天龄期强度即可达到 28 天龄期强度的 55% 以上),同时长期强度也有较大幅度增长(见表 4)。 $C_{60}$  组的孔结构测试其 28 天龄期和 340 天龄期最可几孔径由 186 Å 减小至 74 Å。

表4 特细砂高强砼抗压强度

强度等级	坍落度 (mm)	28天试件体积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	抗压强度 (MPa)				其它
			R <sub>c</sub>	R <sub>c</sub>	R <sub>c</sub>	R <sub>c,sp</sub>	
C <sub>50</sub>	16.5	2491	32.9	44.6	58.2	69.3	R <sub>c,sp</sub> = 72.0
	14.2	2492	37.3	49.5	62.4	72.2	R <sub>c,sp</sub> = 82.1
	17.0	2450	31.0	42.4	53.3	66.4	
	14.8	2450	33.4	45.6	55.5	64.0	
	10.0	2470	29.3	35.4	47.5		日落式提升
	18.2	2435	30.9	42.6	52.3	68.0	
	12.3	2495	35.0	48.4	57.3		
	12.0	2499	46.2	58.2	72.3	81.4	
	13.4	2491	36.3	49.7	66.4		
	14.5	2487	37.2	51.3	65.8	76.3	R <sub>c,sp</sub> = 90.0
15.0	2490	36.5	49.7	61.3			
C <sub>60</sub>	1.0	2546	51.6	71.0	83.1	91.2	R <sub>c,sp</sub> = 102.0
	0.5	2560	52.5	69.0	84.9		
	0.0	2580	55.0	78.4	91.3	101.0	维勃稠度10s
	1.2	2550	52.6	75.5	82.8	93.4	R <sub>c,sp</sub> = 104.0
	1.5	2570	53.4	70.5	85.0	90.3	
	2.0	2540	49.3	68.4	79.0		
	0.7	2550	53.4	72.3	85.0	95.2	
	0.3	2580	54.2	74.5	88.0		
	0.5	2570	54.3	72.6	85.2	96.7	R <sub>c,sp</sub> = 110.0
	0.7	2560	53.7	74.0	84.0		

3.1.2 劈拉强度 (R<sub>p</sub>' )

砼是弹粘塑性材料，其抗拉强度一般较低，同时拉压比率随砼的抗压强度增高而减小，其抗劈拉强度与抗压强度现有关系式：

中国建筑科学研究院为： $R_p' = 0.32 R^{0.765}$

中国水利水电科学研究院为： $R_p' = 0.305 R^{0.732}$

日本高强砼为： $R_p' = 0.323 R^{0.773}$

从表5可看出，特细砂高强砼劈拉强度随抗压强度增长而增长，其拉压比随抗压强度的增加而减小，但减小的程度并不高。拉压比C<sub>50</sub>组一般在7.5%左右，C<sub>50</sub>组在10%左右，其劈拉强度均大大高于按上述三式计算出的劈拉强度值。

表 5 特细砂高强砼力学性能

强度等级	砼强度(MPa)					比例(%)		
	抗压	劈拉	抗弯	轴压	弹模( $\times 10^4$ )	抗压比	弯压比	轴压比
C <sub>50</sub>	52.3	5.10	10.61	42.6	3.80	9.8	20.2	81.4
	58.2	5.91	10.90	48.3	3.80	10.2	18.7	82.9
	65.8	6.23	10.94	55.1	4.00	9.5	16.6	83.7
	66.4	6.11	11.20	56.8	4.02	9.2	16.8	85.5
	72.3	6.51	11.52	58.2	4.24	9.0	15.9	80.5
C <sub>60</sub>	82.8	6.45	11.90	67.8	4.70	7.8	14.4	81.8
	85.0	6.55	12.20	69.0	4.72	7.7	14.3	81.2
	85.2	6.65	12.60	68.0	4.80	7.8	14.8	80.0
	88.0	6.60	12.40	70.2	4.90	7.5	14.1	80.0
	91.3	6.60	12.00	72.4	5.20	7.3	13.2	80.0

### 3.1.3 弯曲强度( $R_w$ )

道路、机场等工程所用砼的设计和施工均以抗弯曲强度为依据。一般砼的弯曲强度为抗压强度的 10%~20%，高强砼接近下限值。日本提出高强砼抗压强度与弯曲强度关系式为  $R_w = 0.1R_c$ 。从表 5 可看出 C<sub>50</sub> 组砼弯压比在 15.9%~20.2% 之间，C<sub>60</sub> 组弯压比在 13.2%~14.4% 之间，其值均较按关系式  $R_w = 0.1R_c$  计算值高。

### 3.1.4 轴心抗压强度( $R_c$ )

砼的轴心抗压强度一般均低于立方体抗压强度，其二者之比 ( $R_c/R$ ) 在 70%~80% 范围变动。对于高强砼  $R_c/R$  常常比普通砼还低，而结构构件则希望轴心抗压强度愈高愈好。从表 5 中可看出特细砂高强砼的  $R_c/R$  比值均大于 80%。

同时，我们在进行砼静弹性模量测定时，观察到，经弹性模量测试后的试件的轴心抗压强度有明显的提高。

### 3.1.5 静弹性模量( $E_c$ )

砼的弹性模量高，表示砼的刚度大，对于大跨度的钢筋砼桥梁可减少挠度和裂缝。弹性模量一般随砼的抗压强度的增高而增高。其弹性模量与抗压强度现有关系式

$$\text{中国建筑科学研究院: } E_c = 10^4 / (2.2 + 330/R)$$

$$\text{中国铁道建筑研究所: } E_c = 10^4 / (2.3 + 275/R)$$

$$\text{日本高强砼为: } E_c = (0.744 + 0.1047 \sqrt{R}) \cdot 10^4$$

表 5 所列特细砂高强砼的静弹性模量均高于上述三式计算值。

## 3.2 长期性能和耐久性能

### 3.2.1 收缩

特细砂砼的收缩在人们心目中总是认为比粗、中砂砼大。因此，重要的工程及大跨桥梁和

预应力钢筋混凝土结构不敢采用,其主要原因是砼收缩大易产生收缩裂缝,也容易导致预应力损失。特细砂高强砼收缩值测试结果见表6。有资料表明,水养护后的砼完全干燥时的收缩量为 $(600 \sim 900) \cdot 10^{-6}$ 左右,砼的典型收缩值见表7。由此说明特细砂高强砼收缩值并不比粗、中砂砼大。

表6 特细砂高强砼收缩值

试件编号	1	2	3	4	5
水灰比	0.28	0.30	0.32	0.35	0.40
180天收缩值 ( $10^{-6}$ m/m)	105	112	200	260	310

注: 试验环境: 温度  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $60\% \pm 5\%$

表7 砼典型收缩值<sup>[1]</sup>

集灰比	相应水灰比下的6个月收缩值( $10^{-6}$ m/m)			
	0.4	0.5	0.6	0.7
5	400	600	750	850
6	300	400	550	650
7	200	300	400	500

注: 试件横截面为  $127\text{mm} \times 127\text{mm}$ , 置于相对湿度  $50\%$ , 温度为  $21^{\circ}\text{C}$  的条件下干燥。

### 3.2.2 徐变

特细砂高强砼  $C_{30}$  组 180天砼的徐变度  $C = 56.0 \cdot 10^{-4}$ , 徐变系数  $\phi = 2.06$ , 而国内相同强度等级的中砂砼 180天其徐变度  $C = (45.7 \sim 67.5) \cdot 10^{-4}$ , 徐变系数  $\phi = 1.44 \sim 3.60$ ,  $C_{40}$  组限于设备压力不够未测。

### 3.2.3 抗渗透性

按标准 GBJ 82-85 对特细砂  $C_{30}$ 、 $C_{40}$  组进行抗渗透试验, 水压加至  $4.4\text{MPa}$  (设备最大值), 恒压 8 小时, 无渗透。后改用煤油做渗透介质, 加压至  $4.0\text{MPa}$  抗渗试验仪管道接头处发生渗漏, 而砼试件仍未渗漏。又在四川省水泥制品厂用特细砂高强砼生产  $\phi 1000\text{mm} \times 5000\text{mm}$  的压力输水管, 加压至  $1.76\text{MPa}$  时, 管道堵水胶圈被压出, 而管道无渗透。

### 3.2.4 抗冻性

我们采用  $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 6\text{cm}$  小试件, 在  $-30^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  条件下冻融循环 50 次, 试件完好, 未见开裂和重量损失。根据蔡正咏著的“砼性能”一书介绍, 小试件 50 次冻融循环相当于标准试件冻融循环 350~500 次。

### 3.2.5 耐磨性

过去人们普遍认为特细砂砼耐磨性差, 因此机场等耐磨性要求较高的工程不敢采用特细砂砼, 1988 年在重庆市沙坪坝杨公桥路段公路改造时, 采用特细砂高强砼在该路段修筑了宽 5 m, 长 25 m 路段作对比试验, 时至今日, 其他周边路面已磨损得坑洼不平, 而特细砂高强砼路段仍完好无损。

## 4 讨 论

由以上研究可知特细砂高强砼不仅具有较高的抗压强度,而且其它物理力学性能、长期性能和耐久性能优异。其原因主要在于石灰石骨料表面粗糙多孔状态和其微活性,5 mm 以下石灰石颗粒对特细砂级配的改善和高效减水剂的减水作用的综合效应。石灰石表面粗糙多孔,与水泥石的机械咬合力强,水泥水化时碱性溶液进入石灰石表面孔内,发生一系列物理、化学和物理化学反应(物相测试有  $C_3AH_6 \cdot 1/2 \bar{c}$  和  $C_3A \bar{c}H_4$  等结晶化水化物产生),因而与水泥石之间有良好的界面粘结,界面强度高。THOMAS 研究石灰石、花岗岩和砂岩与水泥石界面粘结强度依次分别为 2.85、2.53 和 1.95 MPa。而 5 mm 以下的石灰石颗粒改善了特细砂的级配,骨料的表面积和空隙率减小,砼单位用水量降低,从而提高了砼拌合物的和易性,使砼的均匀性得到改善。高效减水剂可大幅度地减小砼的水灰比,减水剂的分散作用和石灰石粉末的晶核作用,促使水泥水化,水化物增多,改善了砼中的孔隙结构(砼孔结构测试表明大于 1000 Å 的有害孔明显减少)。从而提高了砼的物理力学性能、长期性能和耐久性能。

### 参 考 文 献

- 1 李国洋等译, 砼性能, 北京: 中国建工出版社, 1983
- 2 祝水年等译, 砼的结构、性能与材料, 上海: 同济大学出版社, 1991
- 3 陈惟时, 特细砂配制优质砼的研究报告, 第二届北京国际水泥和砼学会论文, 1989

(编辑: 刘家凯)

## A Study on Properties of Superfine - sand High Strength Concrete

Lei Yingping    Chen Weishi    Zhang Lu

(Dept. of Material Science and Engineering, Chongqing Jianzhu University)

**Abstract** In this paper  $C_{50} - C_{60}$  high strength concrete with superfine sand were introduced. Some experiments and studies on main physicommechanical properties, long term performances and durability were carried out.

**Key Words** superfine sand, high strength concrete, grading, strength, durability