

文章编号:0451-0712(2006)05-0015-05

中图分类号:TU528.04

文献标识码:B

# 五河口斜拉桥主梁高性能混凝土试验研究

刘世同<sup>1</sup>, 王永安<sup>1</sup>, 陆采荣<sup>2</sup>, 单国良<sup>2</sup>

(1. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004; 2. 南京水利科学研究院 南京市 210024)

**摘要:** 针对五河口斜拉桥箱梁,重点研究了粉煤灰、粉煤灰和硅粉复掺、纤维对高性能混凝土物理力学性能和耐久性能的影响。试验研究结果表明,采用粉煤灰和高效减水剂的双掺技术,配制的C60高性能混凝土具有良好的工作性能、力学性能和耐久性能,尤其是具有较小的干缩变形,能满足工程进度要求的3d张拉预应力束和大体积混凝土的温控要求,高性能混凝土在五河口斜拉桥箱梁上得到了成功应用。

**关键词:** 高性能混凝土; 粉煤灰; 双掺技术; 工作性; 耐久性; 工程应用

五河口斜拉桥是江苏省宿迁~淮安高速公路的一座特大型桥梁,全长2 062 m,主桥为152 m+370 m+152 m的预应力混凝土双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,桥面宽38.6 m,在国内同类型桥梁中位居第一。在国内如此大跨径桥梁中采用预应力混凝土箱梁并不多见,作为薄壁结构的箱梁使用高强预应力混凝土尚存在着诸多难点,并且0号块底板最大厚度为0.8 m,一次性浇注387 m<sup>3</sup>已是大体积混凝土,其温控防裂问题突出。采用粉煤灰混凝土是温控防裂的有效途径之一,但《粉煤灰混凝土应用技术规范》GBJ146-90第3.0.1条规定:I级粉煤灰适用于跨径小于6 m的预应力钢筋混凝土。

在跨径达370 m的五河口斜拉桥主箱梁上掺用粉煤灰或其他活性掺合料,在技术上突破了现行有关技术规范,需要通过生产性试验进行专门的技术论证。

## 1 试验原材料及试验方法

### 1.1 试验原材料

在对已有工程经验的系统研究基础上,提出了对五河口斜拉桥C60高性能混凝土原材料的技术要求,并据此进行了材料筛选。

水泥:为巨龙牌52.5(R)水泥,初凝时间2 h 7 min,终凝时间3 h 59 min,28 d抗压强度71.6 MPa,28 d抗折强度14.1 MPa;

收稿日期:2006-03-10

## Design and Construction of Main Girder of Wuhekou PC Cable-stayed Bridge

WANG Yong-an<sup>1</sup>, JIAN Zhu-sheng<sup>1</sup>, XUE Zheng-qun<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Department for Expressway Construction, Nanjing 210004, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** In this paper the design and construction of the main PC girder with double side box girders in the Wuhekou Cable-stayed Bridge is introduced. Because of its longer span and a very wide deck, as well as the using of Epoxy coating parallel steel strand, many technical problems have to be concerned. The informations are reference for the design and construction of the similar PC cable-stayed bridge.

**Key words:** PC cable-stayed bridge; side box girder; suspended wagon; cantilever placing method; design; construction.

粉煤灰:南京热电厂 I 级粉煤灰;

矿粉:上海宝田新型建材有限公司生产的 S95 级矿粉;

硅粉:遵义铁合金厂硅粉,比表面积  $18.5 \text{ m}^2/\text{g}$ , 活性  $\text{SiO}_2$  含量为 96%;

聚酯纤维:杜强 01 号纤维,分为 O 型(抗拉强度 100 MPa)和 I 型(抗拉强度 50~60 MPa);

细骨料:宿迁洛马湖砂,表观密度  $2\,640 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 细度模数 3.07;

粗骨料:本地产石灰岩碎石,5~25 mm 连续级配,表观密度  $2\,730 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,吸水率 0.39%;

外加剂:UC—II 型高效减水剂(萘系)、马贝超塑化剂 SX(聚羧酸类)、JM—PCA(I)高效减水剂(聚羧酸类)。

## 1.2 试验方法

混凝土力学性能、干缩性能、耐久性能试验依据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》JTGE30—2005 中有关规定进行。混凝土碳化性能试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GBJ82—85 的规定进行。

## 2 C60 高性能混凝土配合比

为保证高性能混凝土的高耐久性,在配制高性能混凝土时,应掺有一种或多种活性矿物掺合料,如

粉煤灰、矿渣、硅粉等活性掺合料。活性矿物掺合料在混凝土中的主要作用有:填充效应、活性效应。高性能混凝土一方面通过降低水灰比提高混凝土密实度和抗渗性,以达到高耐久性;另一方面由于矿物掺合料的微填充效应,使得混凝土中的颗粒分布更趋合理,混凝土更加致密,矿物掺合料的活性效应又使混凝土的强度得以保证。大量的研究资料以及工程实践表明,在混凝土中掺入适量的粉煤灰、矿渣、硅粉等活性矿物掺合料,能大大改善混凝土的抗碳化性、抗渗性、抗冻性、抗碱集料反应能力及抗有害离子渗透等性能。

五河口斜拉桥主梁混凝土强度等级为 C60,施工工艺要求坍落度为  $210 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ ,坍扩度为 450~500 mm,粘聚性好,满足泵送要求,坍落度损失小,每小时坍落度损失不大于 20 mm,初凝时间 15 h 左右。为保证工期要求,混凝土 3 d 抗压强度要求达到设计强度的 85%,以满足预应力束张拉需要。依据《公路桥涵施工技术规范》JTJ041—2000 的有关规定,C60 混凝土的配制强度为 69.9 MPa。

参考国内外其他工程经验及有关高性能混凝土的研究成果,采取掺用活性掺合料、聚酯纤维等技术路线对混凝土配合比进行优化。主要开展了掺粉煤灰、粉煤灰和硅粉复掺、掺纤维等三类方案的 C60 高性能混凝土配合比试验,各方案的 C60 混凝土配合比见表 1。

表 1 五河口斜拉桥主梁各方案 C60 混凝土试验配合比

编号	方案	材料用量/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )							外加剂
		水泥	粉煤灰	硅粉	聚酯纤维	砂	石	水	
W-15-2	普通混凝土	544	0	0	0	666	1 041	174	UC—II:6.8
W-15-1	粉煤灰混凝土 1	490	54	0	0	660	1 032	172	UC—II:6.8
w-23-1	粉煤灰混凝土 2	464	52	0	0	672	1 051	163	马贝 SX:6.7
W-15-3	硅粉、粉煤灰混凝土	373	46	36	0	707	1 105	152	UC—II:8.2
W-15-4	纤维混凝土	435	53	42	1	651	1 062	162	JM—PCA:10.6

## 3 C60 高性能混凝土性能

主梁 C60 混凝土拌和物性能见表 2。

### 3.1 拌和物性能

表 2 主梁 C60 高性能混凝土拌和物性能

方案	坍落度/mm	含气量/%	密度/ $\text{kg}/\text{m}^3$	泌水率/%	凝结时间 h:min		坍落度经时变化/mm		
					初凝	终凝	1.0 h	2.0 h	3.0 h
普通混凝土	220	1.2	2 460	6.4	9:39	11:55	210	220	205
粉煤灰混凝土 1	220	1.1	2 440	2.0	11:25	13:22	230	219	220
粉煤灰混凝土 2	225	1.8	2 420	0	14:00	—	225	215	195
硅粉、粉煤灰混凝土	212	1.1	2 460	0	16:55	19:16	210	198	—
纤维混凝土	194	1.7	2 420	0	16:03	18:08	159	—	—

由表 2 可知,在混凝土中掺活性掺合料后,混凝土的泌水率明显减少,粉煤灰、硅粉复掺混凝土和纤维混凝土均不泌水,混凝土泌水率的大幅度减少对提高混凝土外观质量有利。单掺 10% 粉煤灰混凝土、粉煤灰和硅粉复掺混凝土和纤维混凝土凝结时间较普通混凝土相应延缓 1~6 h 不等;单掺 10% 粉煤灰,混凝土 3 h 内坍落度基本不损失;粉煤灰、硅粉

复掺混凝土 2 h 坍落度损失 7%;纤维混凝土坍落度损失相对较大。

3.2 物理力学性能

3.2.1 混凝土强度和弹性模量

主梁 C60 混凝土的抗压、劈裂抗拉强度和抗压弹性模量试验结果见表 3。

表 3 主梁 C60 混凝土强度和弹性模量

方 案	抗压强度/MPa				28 d 劈拉强度/MPa	轴心抗压强度/MPa			抗压弹性模量/GPa		
	3 d	7 d	28 d	90 d		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
普通混凝土	54.3	59.7	70.0	70.5	4.32	41.8	44.3	55.0	39.9	42.7	45.3
粉煤灰混凝土 1	51.0	58.5	70.2	70.5	4.50	41.6	45.5	56.3	39.8	41.4	46.6
粉煤灰混凝土 2	55.8	62.8	72.9	—	4.60	48.1	53.8	64.5	39.5	—	44.0
硅粉、粉煤灰混凝土	51.1	60.9	71.8	74.1	5.52	48.1	53.8	67.2	40.9	44.3	48.0
纤维混凝土	51.6	60.5	72.4	75.9	6.09	45.3	53.9	75.2	39.1	41.9	46.3

从表 3 中的试验结果可以看出,各方案的 28 d 抗压强度均在 70 MPa 以上,均满足配制强度要求;3 d 抗压强度均在 51 MPa 以上,3 d 抗压弹性模量均大于 39 GPa,混凝土 3 d 抗压强度达到设计强度的 85%,可满足主梁 3 d 张拉预应力束的要求。与普通混凝土相比,掺 10% I 级粉煤灰,混凝土 3 d 抗压强度略有降低,7 d、28 d 抗压强度相近,3 d、7 d、28 d 的抗压弹性模量接近。硅粉、粉煤灰复掺混凝土和纤维混凝土因缓凝型减水剂掺量偏大,混凝土 3 d 抗压强度略低于普通混凝土,7 d 抗压强度与普通混

凝土相近,28 d 抗压强度高于普通混凝土;硅粉、粉煤灰复掺混凝土的劈拉强度、轴心抗压强度和抗压弹性模量均高于普通混凝土。

3.2.2 混凝土干缩性能

为比较不同养护条件对混凝土干缩性能的影响,进行了不同养护条件的试验。具体方法为:试件成型一昼夜后拆模,在养护室继续养护一昼夜后测基长,放入标准养护室再继续潮湿养护 2 d、7 d 后移入干缩室,试件自成型日起计算龄期,测定不同干缩龄期的干缩值,计算干缩率。试验结果见表 4、图 1 和图 2。

表 4 主梁 C60 混凝土干缩性能

编号	养护条件	干缩率/ $\times 10^{-6}$											
		3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d	180 d	284 d				
W-15-1	潮养 2 d	48	109	139	207	245	281	314	341				
W-15-2		67	131	161	221	275	330	354	397				
W-15-3		69	135	169	230	249	292	319	343				
W-15-4		60	125	169	220	250	287	313	328				
编号	养护条件	干缩率/ $\times 10^{-6}$											
		7 d	8 d	10 d	14 d	21 d	35 d	52 d	67 d	97 d	125 d	187 d	284 d
W-15-1	潮养 7 d	-20	59	80	102	181	209	235	255	266	277	293	329
W-15-2		-21	36	62	92	169	195	236	255	271	279	300	335
W-15-3		-27	39	53	73	155	172	200	214	223	237	244	263
W-15-4		11	75	96	122	195	211	244	249	259	270	282	318

由表 4、图 1 可见,主梁 C60 混凝土干缩变形,干缩龄期 14 d 前变化较大,以后随干缩龄期增加逐步减少。4 种方案的 C60 混凝土 180 d 干缩龄期的干缩率均小于  $400 \times 10^{-6}$ ,C60 粉煤灰高性能混凝土在

干缩龄期 180 d 前的干缩率均小于普通混凝土,C60 硅粉、粉煤灰复掺混凝土在 28 d 干缩龄期前略大于普通混凝土,在 28 d 干缩龄期后略小于普通混凝土。

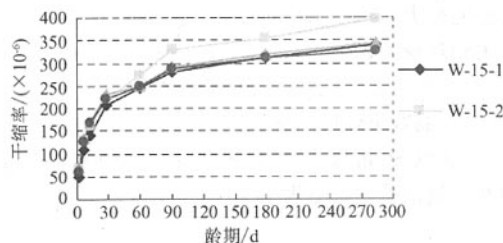


图1 潮养2 d主梁C60混凝土干缩变化曲线

从表4、图1、图2中可看出,延长潮湿养护时间,可减少混凝土的干缩率,对防止混凝土开裂有利。

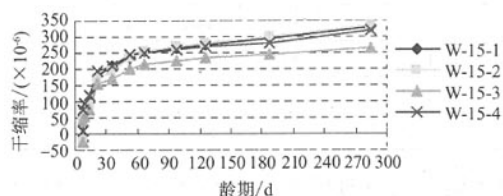


图2 潮养7 d主梁C60混凝土干缩变化曲线

### 3.3 耐久性能

对各方案混凝土进行抗冻性、抗渗性、抗碳化试验,试验结果见表5。

表5 主梁C60高性能混凝土的耐久性

编号	抗冻等级	抗渗性		碳化深度/mm			
		抗渗等级	渗水高度/mm	3 d	7 d	14 d	28 d
W-15-2	>F250	>S18	14.4	0	0	0.5	0.9
W-15-1	>F250	>S18	13.8	0	0	0.4	1.1
W-15-3	>F250	>S18	6.9	0	0	0	0.5
W-15-4	>F250	>S18	12.6	0	0	0.4	0.8

从表5可知,各方案C60混凝土的抗渗等级均大于S18,在水压为1.9 MPa恒压8 h,其渗水高度均在20 mm之内。粉煤灰混凝土、纤维混凝土的渗水高度与普通混凝土接近,硅粉、粉煤灰混凝土的渗水高度比普通混凝土下降一半。各方案混凝土的碳化深度均很小,碳化龄期28 d的碳化深度在1 mm左右,硅粉、粉煤灰混凝土的碳化深度更小,几乎为0。粉煤灰混凝土、硅粉和粉煤灰复掺混凝土、纤维混凝土的抗冻标号均大于F250,混凝土试件重量不损失。

综合五河口斜拉桥索塔C50、主梁C60高性能混凝土试验研究,从混凝土的工作性能、物理力学性能、耐久性能等技术指标综合分析,提出五河口斜拉

桥主梁C60高性能混凝土的参考配合比,见表6。

表6 主梁C60高性能混凝土参考配合比  $\text{kg/m}^3$ 

编号	水泥	粉煤灰(I级)	砂	石	用水量	外加剂
W-15-1	490	54	660	1 032	172	UC-I:6.8
W-23-1	464	52	672	1 051	163	马贝SX:6.7

## 4 工程应用

### 4.1 主梁施工

五河口斜拉桥主梁为C60预应力混凝土双边箱梁,标准节段长度为6 m,梁宽38.6 m,其宽度在国内同类型桥梁中位居第一,施工难度较大。因主梁钢筋布置较密,底板浇注模板又采用压模反拉封闭方式,局部开设下料口及振捣口。要求混凝土具有良好的可泵性和流动性。混凝土施工工艺为:拌和楼生产混凝土,混凝土出料后,经拖泵泵至作业面,通过串筒或溜槽由上往下入模,由于主梁钢筋布置较密,用50 mm插入式振捣器振捣密实,顶板浇注结束至混凝土终凝后即进行潮湿养护。

试验研究的中间成果,经吕志涛院士等专家组评审认为:通过优化选用的低吸水性粗骨料配制的混凝土,可降低用水量,减少混凝土的干缩,提高混凝土的耐久性能;掺用适量的I级粉煤灰可减少干缩值,也能改善混凝土的和易性,可应用于主梁工程,但掺量应控制在10%以内。室内试验研究推荐的主梁C60高性能混凝土参考配合比,经施工单位现场复核后,在27号墩和28号墩的0号(托架现浇)、1号~1'号、2号~2'号、3号~3'号梁段(支架现浇)上使用。前期施工配合比采用表6中W-15-1方案。混凝土用量为4 373.8  $\text{m}^3$ 。由机口检测的平均坍落度在200~220 mm之间,混凝土和易性及泵送性能良好。

进入挂篮悬浇阶段,改用京阳52.5(R)水泥,在工地试验室选择几种外加剂进行了适应性试验,经试验确定马贝超塑化剂SX(聚羧酸类),后期施工配合比采用表6中的W-23-1方案,C60混凝土性能见表7。

表7 主梁后期C60高性能混凝土性能

坍落度/mm	坍落度经时变化/mm			泌水率/%	初凝时间/h:min	抗压强度/MPa		
	1 h	2 h	3 h			3 d	7 d	28 d
230	235	226	208	0	14:00	55.8	62.8	72.6

主梁后期C60高性能混凝土在27号墩、28号墩4~30号梁段(挂篮悬浇)及中跨合拢段共浇注了19 312.8  $\text{m}^3$ 。现场施工表明,C60高性能混凝土的

和易性、可泵性良好,混凝土坍落度在210~230 mm之间,坍扩度420~580 mm。坍落度损失小,粘聚性佳,工人易于操作,提高了操作可靠性。成型混凝土表面平整、密实,无蜂窝、露筋现象,外观基本无色差,有胶质感受。

4.2 混凝土抗压强度及抗压弹性模量评定

27号墩、28号墩主梁分别自0号块至30号块前期、后期浇注取样的混凝土试件中进行抗压强度统计。每一梁段施工均取样,进行混凝土抗压强度和抗压弹性模量检验。

对现场取样的主梁C60混凝土以数理统计方法进行评定,评定结果见表8、表9。

表8 主梁前期C60混凝土抗压强度评定

结构部位	试件组数 $n$	强度等级 $R$ MPa	强度平均值 $R_n$ MPa	强度最小值 $R_{min}$ MPa	标准差 $S_n$ MPa	离差系数 $C_v$ %	判定系数		评定结论
							$K_1$	$K_2$	
27号墩、 28号墩主梁	42	60	70.0	65.8	3.6	0.05	1.60	0.85	合格

表9 主梁后期C60混凝土抗压强度评定

结构部位	试件组数 $n$	强度等级 $R$ MPa	强度平均值 $R_n$ MPa	强度最小值 $R_{min}$ MPa	标准差 $S_n$ MPa	离差系数 $C_v$ %	判定系数		评定结论
							$K_1$	$K_2$	
27号墩、 28号墩主梁	324	60	70.4	69.0	3.6	0.05	1.60	0.85	合格

由表8、表9可知,27号墩、28号墩主梁分别自0~30号块梁段,共366组混凝土试件,抗压强度评定为合格。

对每一梁段取样进行抗压弹性模量检验,前期14组,最小值为36.6GPa,平均值为39.5GPa,后期68组,最小值为36.6GPa,平均值为39.6GPa,满足质量检验标准的规定。

五河口斜拉桥工程实践表明,采用粉煤灰和高效减水剂双掺技术后,利用现有的生产工艺,不仅能满足主梁结构复杂、钢筋高密度布置的高流动性要求、抗压强度及早期预应力束张拉要求,而且具有很明显的技术经济效益和社会效益。

5 结论

室内试验表明,配制的C60高性能混凝土具有较高的物理力学性能和良好的工作性能,在满足配制强度要求下,早期强度和弹性模量高,坍落度损失小,可泵性好。

混凝土干缩试验表明,所配制的主梁C60高性能混凝土,28d的干缩率小于 $400 \times 10^{-6}$ ,如延长混凝土的潮湿养护时间,还能进一步减少混凝土的干缩率。

混凝土耐久性试验表明,所配制的主梁C60高性能混凝土抗渗性能、抗碳化性能优异,抗渗等级大于S18,经28d碳化后的碳化深度小于2mm,抗冻等级均大于F250。

现场施工表明,C60高性能混凝土较普通混凝土水泥用量低,对一次性浇注387m<sup>3</sup>的0号块来说,可以避免大体积混凝土因水化热过高而出现温度裂缝。其粘聚性好可以使混凝土在下料过程防止骨料分离,特别是经振捣后骨料不下沉,从而避免了混凝土顶面因砂浆太厚而容易出现的干缩裂缝。

6 结语

五河口斜拉桥主梁成功浇注了23686.6m<sup>3</sup>的C60高性能混凝土。工程实践表明,采用双掺技术,利用现有的生产工艺,不仅能满足主梁结构复杂、钢筋高密度布置要求的高流动性、抗压强度及早期预应力束的张拉要求,而且能满足薄壁结构箱梁的高标号大跨径预应力混凝土的工程要求,具有明显的技术经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] JTG E30—2005,公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].  
[2] 冯乃谦. 高性能混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.  
[3] H 索默,冯乃谦,丁建彤,张新华,庄青峰,译. 高性能混凝土[M]. 北京:科学出版社,1998.  
[4] 单国良,蔡跃波,余熠,蒋陈霞. 掺硅粉、粉煤灰、磨细矿渣海工高性能混凝土的耐久性研究[A]. 第五届高强与高性能混凝土及其应用技术学术讨论会文集[C]. 北京:中国建材工业出版社,2004.



文章编号: 0451-0712(2006)05-0020-06

中图分类号: TU502.4

文献标识码: A

# 五河口斜拉桥高性能混凝土长期变形试验研究

陆采荣<sup>1</sup>, 姜竹生<sup>2</sup>, 刘世同<sup>2</sup>, 陈灿明<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 南京市 210024; 2. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004)

**摘 要:** 五河口斜拉桥主桥和索塔高性能混凝土徐变试验研究, 给出了三个配比混凝土的瞬时弹性模量、徐变度、收缩变形和线膨胀系数, 依据测试结果提出混凝土的弹性模量、徐变度和徐变系数计算公式。分析认为, 混凝土的早期强度和弹性模量相对较高, 徐变系数较低, 对减少预应力损失和构造物后期变形、加快工程进程都是有利的; 测试结果合理可信, 计算公式拟合精度高, 报告提供的测值及公式可作应用参考。

**关键词:** 斜拉桥; 高性能混凝土; 徐变; 试验

## 1 五河口斜拉桥概况

五河口斜拉桥, 桥梁全长 2 062 m, 主桥为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥, 主跨为 370 m, 桥面宽

38.6 m, 双向六车道。根据设计要求, 主桥主梁和索塔分别采用 C60 和 C50 高性能混凝土浇注。

为配合五河口斜拉桥的施工, 以五河口斜拉桥

收稿日期: 2006-03-10

- [5] 杨学广, 于春, 王世杰. 高性能高耐久性混凝土在桥梁工程上的应用研究[J]. 森林工程, 2002.
- [6] 冯圣清, 肖镇辉. 超高泵程混凝土的研究与应用[J]. 混凝土与水泥制品, 1995.

- [7] 陆采荣, 梅国兴. 厦门海沧大桥混凝土试验专题报告[R]. 南京水利科学研究院, 1997.
- [8] 蔡跃波, 等. “九五”国家重点科技攻关项目, 海工高性能混凝土成套技术研究[R]. 2000.

## Test and Research on High Performance Concrete for Main Girder of Wuhekou Cable-stayed Bridge

LIU Shi-tong<sup>1</sup>, WANG Yong-an<sup>1</sup>, LU Cai-rong<sup>2</sup>, SHAN Guo-liang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Department for Expressway Construction, Nanjing 210004, China;

2. Hanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** To Counter the PC concrete box girder of Wuhekou Cable-stayed Bridge, the effect of mixing fly ash, compositely mixing fly ash and silicon powder or fibers addition on physical mechanic performance and durability of high performance concrete (HPC) are researched mainly. The results of researches show that the C60 HPC adopting composite mixing fly ash and superplasticizer techniques has good workability, advanced mechanisms performance, and durability, especially its less dry shrinkage. All these characteristics can meet the requirements for the project progress, such as the prestressed tension within 3 days and the temperature control for a large volume concrete cast. The C60 HPC are successfully applied to the box girder in the Wuhekou Cable-stayed Bridge.

**Key words:** high performance concrete; fly ash; combining fly ash and high performance admixture; workability; durability; application to engineering