

# 超高性能混凝土 (UHPC) 试验及应用研究

周红梅 朱万旭 陈钰焯 王日艺 庞忠华 潘水兰

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

**摘要:**超高性能混凝土 (UHPC) 是一种力学性能超高、耐久性能优异、体积稳定性优良的新型水泥基复合材料, 本文介绍了这种新型复合材料基本制备原理, 介绍采用水泥、石英砂、矿物掺合料等常用建筑原材料配制出超高性能的混凝土, 并通过对比试验, 研究了矿物掺和料种类、纤维掺量以及养护工艺对超高性能混凝土抗压、抗折强度的影响, 确定了最佳配合比。实验结果表明: 此超高性能混凝土 (UHPC) 流动性好, 在高温环境养护下, 试件抗压强度达到325MPa, 抗折强度达54MPa; 在自然条件下养护, 试件30天抗压强度为187MPa, 抗折强度为35MPa。本文继而探索该种超高性能混凝土在预应力结构工程方面的应用, 将其替代钢制锚垫板和其它产品, 采用其制备出的预应力构件, 各项性能指标均满足技术要求, 并且成本显著降低, 为超高性能混凝土在预应力结构工程方面的推广应用奠定基础。

**关键词:**超高性能 混凝土 (UHPC) 超高强 高耐久性 锚垫板 偏向器

## 引言

1993年法国率先研制出一种超高性能水泥基材料—活性粉末混凝土 (RPC), 并成功应用于许多重大工程。我国对超高性能混凝土 (UHPC) 的研究于1993年由湖南大学沈蒲教授开始, 直至近年来包括清华大学等众多院校均在进行研究。与普通混凝土相比, 超高性能混凝土有以下优势:

(1) 可以代替部分钢结构, 降低成本, 特别是用在预应力产品结构上, 可以减轻结构重量, 并提高产品的安全性能;

(2) 用于预制薄壁构件、细长构件以及其它特殊结构形式的构件, 可以不配筋或者少配筋, 降低生产造价;

(3) 用于大型民用建筑, 可以大幅度缩减结构的尺寸, 增大使用空间, 使结构更美观;

(4) 用于基础建设, 比如水库大坝等, 可以大大减少混凝土用量, 降低建筑成本, 节约资源, 减少生产、运输和施工能耗, 提高工程质量;

(5) 其超高的抗渗性和高抗冲击韧性, 用在制作压力管道、腐蚀性介质输送管道以及制造中低放射线核废物储藏容器, 可延长使用寿命并降低发生泄漏的概率。

对于专业的、高品质要求的建筑工程, 超高性能混凝土具有广阔的应用前景。本文介绍了这种新型材料的制备原理。通过试验, 确定了最佳配合

比, 并探索了其在预应力结构工程方面的应用。

## 1 配合比设计

### 1.1 配制原则

通过提高组分的细度与活性, 使材料的内部缺陷 (塑性状态下的孔隙与硬化过程的微裂隙) 减小到最少, 包括各种材料的颗粒之间的空隙能相互填充完全, 塑性状态下的孔隙能互相进行挤压, 同时排除浇注过程中引入的气体和多余的水气, 由此获得超高强度与高耐久性。

### 1.2 方案设计

#### 1.2.1 原材料的选择

##### (1) 水泥的选择

水泥通常选用C<sub>3</sub>A含量低, C<sub>3</sub>S含量高的水泥。根据本地的实际情况, 我们选择了柳州产的鱼峰42.5硅酸盐水泥。

##### (2) 石英砂

选用坚硬不含杂质的硅质砂粒, 对粒度的范围和分布有一定的要求, 且由于其要求抗渗、抗冻性好, 因此含泥量必须极少, 砂粒经过水洗、烘干、粒度分布均匀。

##### (3) 膨胀剂

用以补偿混凝土的收缩, 并在混凝土中后期仍能保持微弱的膨胀势头, 稳定性能好, 同时改善混凝土的孔隙结构, 提高密实度, 达到抗裂防渗的目的。

##### (4) 矿物掺合料

选用多种掺合料来填充不同颗粒之间的孔隙,并通过二次水化作用,提高结构的密实度和强度。选择掺合料时,主要考虑颗粒的聚集程度、纯度和颗粒粒径三个参数,并由此增强后期抗拉强度、弹性模量及耐久性(抗渗能力提高)。我们利用不同的活性掺合材料进行复配,以达到理想效果。

#### (5) 高效减水剂(超塑化剂)

高效减水剂是一种表面活性剂,它对新拌砂浆和易性有很大的影响。在实际使用中,必须对水泥、减水剂做出合理的选择,使其相互适合、匹配。因此要进行配比试验进行确定,我们选择了聚羧酸减水剂,其掺量为水泥含量的1%~3%。

#### (6) 纤维

随着混凝土强度的提高,混凝土极限力破坏是突然的、毫无征兆的破坏,对结构来说是致命的。要增强混凝土的抗折性能与韧性,必须添加纤维,纤维对增加混凝土的韧性、抗冲击能力起着关键的作用,可使整体性破坏转变为局部微裂纹的形式,对结构破坏起了很好的缓冲作用。

#### (7) 其它

适当添加消泡剂、可分散性乳胶粉等等,目的是有效提高超高性能混凝土的稳定性、密实度,以及抗渗性、抗裂性、抗冲击韧性、粘结性。

### 1.2.2 生产工艺的选择

(1) 在许多文献中均有报道,热养护有利于超高性能混凝土内部结构的改善,使材料的活性充分的发挥出来,因此在最初的工艺中,我们也选择了热养护,并且试验了多种方式。

(2) 试验在自然养护条件下,同样的配合比其抗压强度与抗折强度变化大小。

## 2 配合比试验

### 2.1 试验准备

- (1) 根据试验所需,把原材料准备好;
- (2) 搅拌设备:水泥胶砂搅拌机,强制式混凝土搅拌机;
- (3) 振动台;
- (4) 电子秤、料斗各1;
- (5) 恒温水浴试验箱(0℃~100℃)
- (6) 恒温烘箱(0℃~300℃)

(7) 液压万能试验机(1000kN)、(600kN)各1;

(8) 测抗压强度标准夹具、测抗折强度标准夹具;

(9) 系列标准试模若干;

(10) 其它辅助工具若干。

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 流动度

拌合物流动度的测定采用跳桌法,方法根据规范GB/T2419-2005中的《水泥胶砂流动度测定方法》进行,在实际测定过程中,我们制作的拌合物因流动度好,在跳桌跳动时流摊出圆盘桌面,导致扩散直径无法测定。

#### 2.2.2 力学性能

超高性能混凝土的力学性能根据国家标准《水泥胶砂强度检验方法(ISO)》GB/T17671-1999进行测定。

### 2.3 试验步骤

#### 2.2.1 称量

根据预想的配合比把所需要的原材料(水泥、石英砂、硅灰、石英粉、硅微粉、膨胀剂、钢纤维、水等材料),按质量比称量好,并将所有的干粉材料放入搅拌机中,搅拌均匀。

#### 2.2.2 搅拌

加入需要的水,搅拌均匀;若有钢纤维,此时均匀的投入钢纤维,最后搅拌均匀。

#### 2.2.3 成型

分成3种方式试验:

(1) 把搅拌均匀的混凝土倒入试模中,放入振动台,振动2~4分钟。

(2) 把搅拌均匀的混凝土倒入试模中,放入振动台,振动2~4分钟;利用压力机即时加压。

(3) 把搅拌均匀的混凝土倒入试模中,放入振动台,振动2~4分钟;4小时之后,利用压力机加压。

#### 2.2.4 养护

成型的试模,自然养护24小时以后,拆模。接下来的试件养护分成以下2种方式:

(1) 自然养护,自然养护的成型方式只经过振动,不做其它处理。

(2) 放入90°C热水养护48小时后,取出放入200°C~300°C高温环境下养护8小时。

### 2.2.5 试验

(1) 热养护完成之后,将试件取出,放置室内,使其恢复到常温,首先进行抗折强度试验,然后再进行抗压强度试验。

(2) 自然养护28天或者60天后,首先进行抗折强度试验,然后再进行抗压强度试验。

## 2.3 热养护条件的试验情况

### 2.3.1 使用矿渣粉与硅灰复合掺合料试验情况

使用矿渣粉与硅灰复合掺合料总共做了95组,从抗压强度分布图(图1)中可以看出,其抗压强度集中在150~200MPa,其次在200~250MPa。

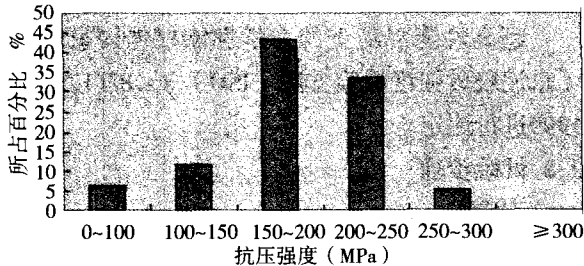


图1 矿渣粉与硅灰复合掺合料抗压强度分布图

### 2.3.2 使用石英粉、硅微粉与硅灰复合掺合料试验情况

试验共做了220组,从抗压强度分布图(图2)中可以看出,使用石英粉、硅微粉与硅灰复合掺合料其抗压强度多数集中在250~300MPa,其次在200~250MPa。

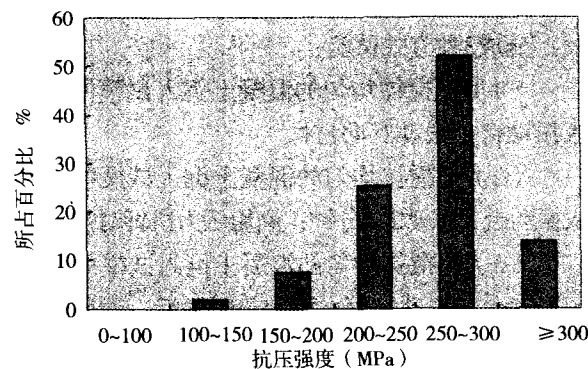


图2 石英粉、硅微粉与硅灰粉掺合料抗压强度分布图

### 2.3.3 增加复合钢纤维的试验情况

对于稳定的配合比,当所加的钢纤维质量不同的时候,强度差别不大,抗折强度提高,效果不是很明显;但对于破坏的形式,加入的钢纤维

有决定性的作用,增加钢纤维极限破坏后只是造成试件局部裂纹或者微裂纹,试块是完整的,不影响结构;而不加钢纤维极限破坏后是粉碎性的破坏,整体结构崩溃。不加钢纤维抗折强度能达到23MPa,加入钢纤维从1%~16%,抗折强度集中在20~35MPa,试验数据见图3。

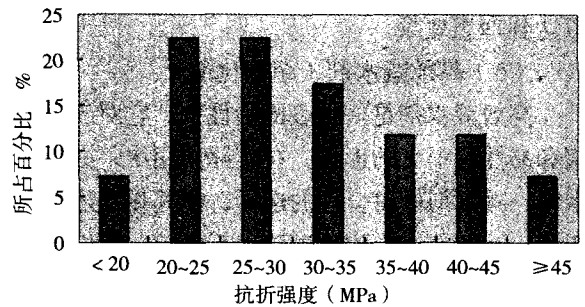


图3 增加复合钢纤维的抗折强度分布图

### 2.3.4 半年后的试验结果对比

试验的过程中,为了检验时间对强度的影响,我们用同一组试块进行了6个月的抗压强度和抗折强度的对比试验,见表1:

表1 试验数据表

成型时间	试验时间	抗压强度平均值 (MPa)	抗折强度平均值 (MPa)	备注
2007.10.10	2007.10.15	273	26	
	2008.3.14	275	28.1	
2007.10.15	2007.10.20	181	28	
	2008.3.14	184	29.3	

## 2.4 自然养护条件下的试验情况

根据热养护条件下试验得出的最佳配合比,我们在自然养护下进行试验,测量28天以及60天的抗压强度以及抗折强度。总共进行了180组,其中有半数生产试制过程中制作的试块,抗压强度集中在180MPa,抗折强度集中在35MPa附近,试验分布图见图4、图5。

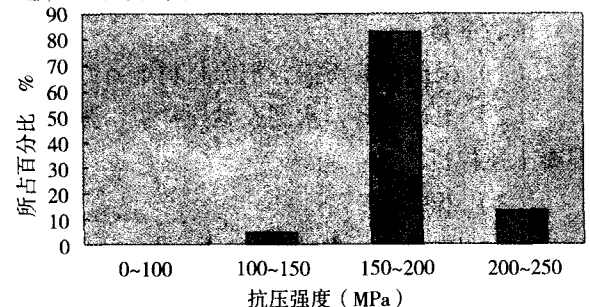


图4 自然养护下的抗压强度分布图

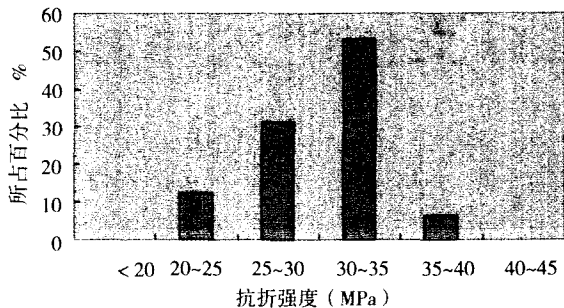


图5 自然养护下的抗折强度分布图

2.5 以上典型的配合比试验数据见表2。

### 3 应用研究

#### 3.1 超高性能混凝土锚垫板

在预应力产品中，锚固体系是最重要的受力单元，其中锚垫板起到连接混凝土与锚夹具的力的传递的作用。传统的锚垫板材料是铸铁。经过几年来对超高性能混凝土制品的深入研究，我公司成功开发出新一代超高性能混凝土锚垫板产品—OVM.M15ZH型锚垫板。OVM.M15ZH型锚垫板由芯板、超高性能混凝土和喇叭管组成。芯板为中空铸铁或铸钢件，其与工作锚板接触，并将预应力传递给外周的超高性能混凝土；超高性能混凝土有效地包络住芯板，并将预应力传递、分散给预应力混凝土构件。OVM.M15ZH型锚垫板具有以下的特点：

- (1) 锚垫板满足FIP-1993《后张预应力体系验收建议》关于荷载传递试验的性能要求；
- (2) 锚垫板具有很好的耐久性和耐腐蚀性；
- (3) 安全性高，消除了整体铸造锚垫板炸裂的潜在危险；
- (4) 不导电，有效地减少预应力筋在锚具处的电化学腐蚀；
- (5) 喇叭口摩阻较小；
- (6) 锚下混凝土应力传递更均匀、合理，承载力不低于同规格的整体铸造锚垫板。

超高性能混凝土锚垫板与目前的铸铁锚垫板相比，它有相同的抗压强度，满足同样的技术指标，而它的成本较低，重量较轻，减少运输费用，与混凝土构件结合紧密，力的传递更趋于均匀，优化了整个结构。



铸铁锚垫板

超高性能混凝土锚垫板

图6 铸铁的锚垫板与超高性能混凝土的锚垫板对比

表2 部分超高性能混凝土配合比及试验数据

材料规格	普硅水泥		石英砂	硅灰	矿渣粉	石英粉	硅微粉	减水剂	膨胀剂	水	乳胶粉	钢纤维	力学性能试验数据		
	52.5	42.5	机制砂	95%		1#	2#	聚羧酸	AEA				0.2mm	抗压强度	抗折强度
成型时间													平均值	平均值	
													(MPa)	(MPa)	
2006.11.30 1#	0	1000	1100	300	300	0	0	0	4.7	-	346	2	0	150	(未测)
2006.12.26	0	1000	500	300	350	0	0	0	25	-	250	3	0	220	(未测)
2007.1.18	0	1000	700	300	300	200	0	0	30	100	315	3	100	204	(未测)
2007.2.10	0	1000	900	400	350	100	100	200	25	100	310	2	80	260	37
2007.3.21	0	1000	1000	200	0	250	0	250	30	100	290	5	150	243	31
2007.4.28	0	1000	800	250	0	250	0	300	30	100	290	20	200	288	35
2007.7.25	0	1000	800	300	0	100	0	400	20	100	290	20	250	270	27
2007.9.25	0	1000	1000	350	0	150	0	350	25	100	300	15	500	308	54
2007.10.8	0	1000	850	300	0	200	0	300	30	100	300	20	0	296	24
2007.11.25	0	1000	900	300	0	250	0	250	15	100	310	25	300	292	40
2007.12.30	0	1000	900	250	0	200	0	400	30	100	290	18	200	310	37
2008.2.18	0	1000	800	300	0	200	0	300	20	100	310	20	300	325	45

(下转第35页)

综上所述,该大跨度土质洞库采用台阶和导洞式开挖方法和复合土钉支护方案,是成功的,70天后支护结构已完全稳定。该工程中所积累的设计施工经验对于类似条件下的工程建设具有参考价值。

## 8 结论

(1) 该工程竣工并投入使用已2年之久,未发现任何变形破坏迹象,说明此种新颖的复合土钉支护结构的设计与施工比较成功,其经验对于类似条件下的工程建设具有参考价值。

(2) 同传统喷锚临时支护加二次永久衬砌隧道建设方法相比,这种特殊型式的复合土钉支护的工程造价约低50%或以上,经济效益非常显著。

(3) 经验表明,在进行土洞复合土钉支护时,开展详细勘察,进行理论分析和必要的试验,洞形的选择,特别是土钉临界锚固长度的确定,以及正确的开挖,和必要的量测与反馈,都是十分必要和重要的。

(上接第29页)

### 3.2 超高性能混凝土偏向器

防落梁装置是用于简支梁结构中预防地震时候梁体位移过大或者脱离桥墩的装置,其中偏向器是重要的受力组件之一。对于地震造成的多方向弯曲,偏向器具有导向作用,而且缓和发生在连接索的局部弯曲应力,使锚碇部位不产生弯应力和剪应力。偏向器如图7所示,内孔形状为喇叭形;为了便于安装和更换,制成两半式。在强震作用下,偏向器受到较大的偏向压应力,因此,要求其材料抗压强度大于90MPa,取3倍安全系数。试验表明,超高性能混凝土材料很好地达到了这一要求。

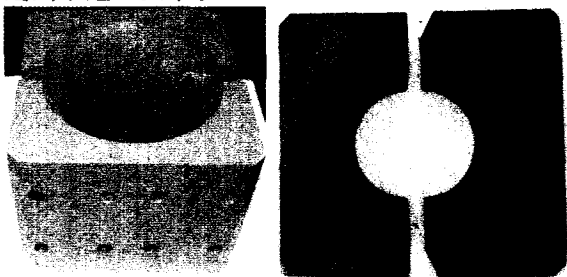


图7 超高性能混凝土的偏向器

## 4 小结

(1) 经过大量的试验,筛选出最佳配合比,在热养护的条件下,其抗压强度最高为325MPa,抗折强度最高为54MPa,而经大量数据

(4) 本工程的设计过程还表明,开展地下洞库复合土钉支护的设计理论研究、编制相应技术标准同样是十分紧迫而现实的问题。

[1]

### 参考文献

- 曾宪明,曾荣生,陈德兴,王作民编著. 岩土深基坑喷锚网支护法原理、设计、施工指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997年1月.
- [2] 陈肇元,崔京浩主编. 土钉支护在基坑工程中的应用(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000年12月.
- [3] 郑颖人,黄飞云等. 地下工程锚喷支护设计指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988年4月.
- [4] 刘祖典等. 《黄土的变形特性》[J]. 土木工程学报, 1985, 1.
- [5] 程良奎. 《喷锚支护监控设计及其在金川镍矿高挤压地层中的应用》[J]. 地下工程, 1983, 1.
- [6] 李世民,曾宪明,林大路. 锚固类结构抗爆性能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 3553-3562.
- [7] 曾宪明,赵林,李世民,林大路. 新型复合锚固结构静力弱化效应试验研究[J]. 防护工程, 第30卷 第4期 2008年8月.
- [8] 曾宪明,杜云鹤,李世民. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1892-1897.
- [9] 曾宪明,赵林,李世民,林大路. 锚固类结构杆体临界锚固长度与判别方法试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, Vol.1.30 Supp:404~409.

验证表明其抗压强度集中在290MPa左右,抗折强度集中在38MPa,非常稳定;在自然条件下,60d其抗压强度最高在226MPa,抗折强度为35MPa,而28d抗压强度集中在160MPa,抗折集中在28MPa。可以根据实际用途选择养护方式。

(2) 不掺钢纤维的情况下,制作出的超高性能混凝土流动性更好,抗压强度基本不变,抗折强度能达到23MPa左右,在一些受压、对抗折要求不高的构件中使用更有优势。

(3) 我们已将超高性能混凝土应用在预应力产品结构中,如:

a. 防落梁装置的偏向器材料,满足偏向器的技术指标,并已生产应用。

b. 代替部分钢材生产锚垫板,典型孔位通过了国家建筑质量检测中心的试验,满足GB/T14370-2000以及FIP1993中的技术要求,并已销售应用。

(4) 在现场施工中,自然养护能完全满足具体工程的要求,降低成本,并且操作简便,有利于环保。

### 参考文献

- [1] 何峰. 《200~300MPa活性粉末混凝土(RPC)的配制技术研究》[J]. 混凝土与混凝土施工, 2000, 4.
- [2] 冯乃谦主编. 《实用混凝土大全》[M]. 北京: 科学出版社, 2005-4-1第二版.
- [3] 徐至钧编著. 《纤维混凝土技术及应用》[M]. 中国建筑工业出版社. 北京: 2003.2 第一版.