

# UHPC超高性能混凝土



# 一、概述

## 1、定义

超高性能混凝土（Ultra-High Performance Concrete，简称**UHPC**），以水泥和矿物掺合料等为胶凝材料，配合骨料、外加剂、高强度微细钢纤维和 / 或非金属纤维、水等原料生产的超高强纤维增韧混凝土。UHPC以**超高的强度、高耐久性、高韧性和优异的工作性能**为特征，成为实现水泥基材料性能大跨越的新体系----《超高性能混凝土》GB/T31387—2025。

UHPC不同于传统的高强混凝土（HSC）和钢纤维混凝土（SFRC），也不是传统意义的高性能混凝土（HPC）的高强化改性，而是性能指标明确、具有新本构关系和结构寿命的水泥基结构工程材料。



# 一、概述

## 1、定义

- 是一种组成材料颗粒的级配达到最佳的水泥基复合材料；
- 水胶比 $<0.25$ ，含有较高比例的微细短钢纤维增强材料和 / 或非金属纤维
- 抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$ ，具有受拉状态的韧性，开裂后仍保持抗拉强度不低于 $5\text{MPa}$ （法国规定 $7\text{MPa}$ ）；
- 内部具有不连通孔结构，有很高抵抗气、液体侵入的能力，与传统混凝土和高性能混凝土相比，耐久性可大幅度提高。

“活性粉末混凝土”（**RPC**, Reactive Powder Concrete），是法国 Bouygues 建筑公司的一项专利产品，因广泛传播引起关注，RPC 一度成为超高性能混凝土的代名词。而“**UHPC**”名称能更好地表达这种水泥基材料或混凝土在全面性能上的跨越式进步，逐步被广泛接受和采用。

# 一、概述

## 2、发展历程

20世纪70年代高效减水剂的开发和90年代优质活性矿物细粉、超细粉（硅灰、沸石粉等）的应用，使混凝土制品的水胶比降低，结构密实，强度大大提高。

水泥材料高强度发展的两个模型：

**宏观无缺陷水泥基材料（MDF）**，1979年英国化学公司和牛津大学研制成功MDF，抗压强度高达300MPa，抗弯强度150-200MPa，弹模50GPa，配比及工艺如下：

90%~99%硅酸盐水泥或铝酸盐水泥；4%~7%聚合物树脂；水胶比<0.2；搅拌时强力拌和；成型时采用热蒸压工艺，使基体内无大孔隙，且孔隙率小于1%，属于化学键陶瓷范畴。

中国的刘焱确定的MDF最佳配比：液固比0.26:1，乳液固含量为20%，减水剂掺量为0.9%，凯夫拉纤维掺量为0.7%，最佳配比水泥：硅灰：膨润土=1:0.163:0.035

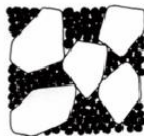
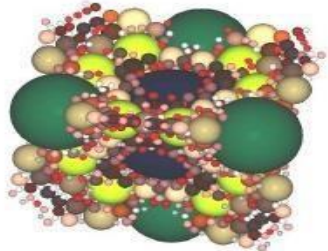
缺点：需要辊压或挤压成型；材料对水敏感，水分侵入后，体积膨胀，强度下降。

# 一、概述

## 2、发展历程

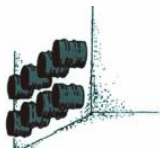
**高致密水泥基材料 (DSP)**，采用高效减水剂和硅灰，掺加超硬度骨料，用充分分散的超细颗粒硅灰 (0.5nm~0.5 $\mu$ m) 填充在水泥颗粒堆积体系 (0.5~100 $\mu$ m) 的空隙中，实现颗粒堆积致密化，同时采用压制密实成型工艺 (强制式拌合，高频振捣和振动加压成型)，可通过添加纤维增加韧性。

缺点：硬化过程中，由于低水固比和超细颗粒的特性，能会产生较大的收缩，包括干燥收缩和自收缩等，容易导致材料内部产生微裂缝，影响其耐久性和结构的整体性。



水泥与硅灰组成的DSP胶凝材料——高脆性，易开裂

新型混凝土 (Densit)  
砂、石 (骨料)  
0~2%体积纤维  
或4~10%体积纤维



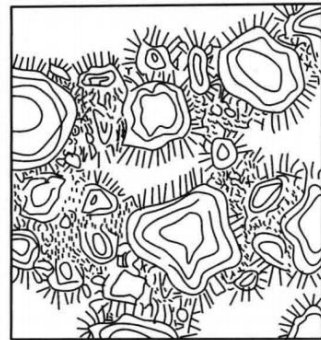
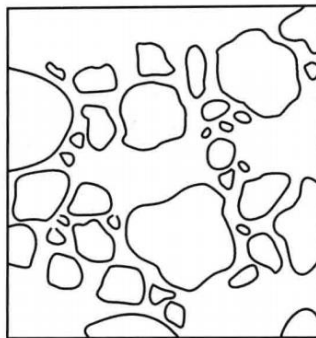
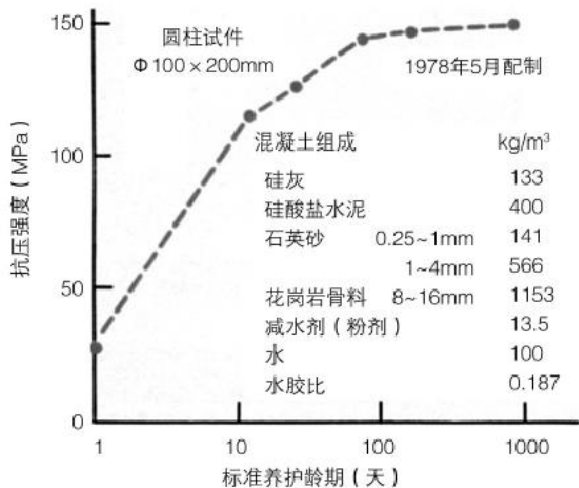
新型钢筋混凝土 (CRC)  
5~20%体积、直径6~25mm钢筋



# 一、概述

## 2、发展历程

DSP理论奠定了UHPC的理论基础



降低用水量，提高密实度，优

化孔结构

第一个DSP体系UHPC的组成和强度发展

超细颗粒硅灰填充在水泥颗粒之间的空隙中，提高了固体颗粒堆积密实度，并在高效减水剂的作用下，使DSP浆体的水胶比降低到0.15~0.19水平。

# 一、概述

## 2、发展历程

### 活性粉末混凝土 (RPC)

1993年，法国皮埃尔·理查德研究小组通过模仿“DSP材料”，按照最紧密堆积理论，剔除粗集料，使用最大粒径约为0.6mm的石英砂作为集料，掺入适量钢短纤维和活性掺合料，配以成型施压、热处理养护等制备方法，成功地研制出了高韧性、高强度、耐久性优良和体积稳定性好的活性粉末混凝土RPC。

典型的钢纤维长13mm，直径0.15mm，最大掺量2.5%。

3d强度：90℃热水养护200MPa；400℃养护800MPa。

# 一、概述

## 2、发展历程

### 密实增强复合材料 (CRC)

丹麦研究人员Bache在DSP材料的基础上，采用长6mm，直径0.15mm，掺量5-10%的钢纤维，同时配合传统的钢筋制备而成，胶材中含有大量的微硅粉，水 / 水泥比一般为 0.16 或更低。

缺点：钢纤维掺量高，成本大大增加，适用于有特殊要求的结构，如：抗冲击性能或很高的力学性能等。

原理：基于最大堆积密度理论，使组成材料不同粒径颗粒以最佳比例形成最紧密堆积，即毫米级颗粒（骨料）堆积的间隙由微米级颗粒（水泥、粉煤灰、矿粉）填充，微米级颗粒堆积的间隙由亚微米级颗粒（硅灰）填充，从而使材料内部的缺陷即孔隙与微裂缝减到最少，提高组分细度与活性，获得极高的密实度和超高强度。

## 灌浆纤维混凝土 (SIFCON)

### 制备工艺

纤维放置：先在模具中预先放置高纤维体积含量（大约 5%-20%）的钢纤维，形成纤维网络。这些钢纤维可以是直形、弧形、带钩端等不同形状，其长度、直径等参数也根据具体需求进行选择。

浆料灌注：将具有高流动性的水泥浆或砂浆渗透到纤维网络中，使水泥浆或砂浆充分填充纤维之间的空隙，实现纤维与基体的紧密结合。

在高纤维含量的 SIFCON 中，纤维之间相互交叉、重叠，形成一种“交叉锁定”的现象，这种现象进一步增强了混凝土的力学性能，特别是在裂缝开展后的阶段，能够提供额外的阻力，使混凝土表现出应变硬化特性

# 一、概述

## 2、发展历程

1999年清华大学覃维祖教授最早将RPC引入中国。

近年来，北京交通大学、湖南大学、东南大学等高等院校相继开展研究，取得了系列成果。

经过35年发展，UHPC到了一个可以实际应用的水平，其抗压强度150~200MPa，几乎等同于钢材，抗拉强度可超过20MPa，弯曲抗拉强度达到50MPa，并且在普通养护条件也可制备出满足性能要求的UHPC，并在高铁电缆槽盖板、桥梁、高层建筑、海洋工程等结构中开始得到应用。



# 一、概述

## 3、配制与性能

### RPC典型组成、配合比和性能

原材料与配合比 (重量比)	RPC 200				RPC 800	
	无纤维		有纤维		硅质骨料	钢质骨料
硅酸盐水泥	1	1	1	1	1	1
硅灰	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
砂 (粒径 $150\mu\text{m} \sim 600\mu\text{m}$ )	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	—
磨细石英粉 ( $d_{50}=10\mu\text{m}$ )	—	0.39	—	0.39	0.39	0.39
高效减水剂 (聚丙烯酸系)	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
钢纤维 ( $l_f=12\text{mm}$ , $d_f=0.15\text{mm}$ )	—	—	0.175	0.175	—	—
钢纤维 ( $l_f=3\text{mm}$ , 不规则形状)	—	—	—	—	0.63	0.63
钢骨料 (粒径 $< 800\mu\text{m}$ )	—	—	—	—	—	1.49
水胶比	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
成型密实压力 (MPa)	—	—	—	—	50	50
热处理 (养护) 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	90	20	90	250 ~ 400	250 ~ 400

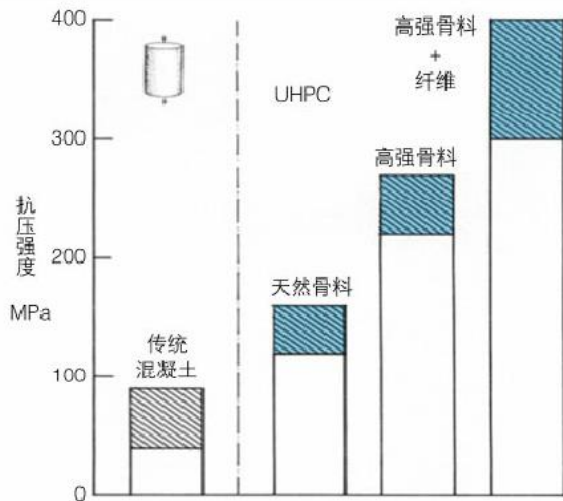
#### 性能

抗压强度 (MPa)	170 ~ 230	490 ~ 680	650 ~ 810
抗弯强度 (MPa)	30 ~ 60	45 ~ 141	
断裂能 (N/m)	20000 ~ 40000	12000 ~ 20000	
弹性模量 (GPa)	50 ~ 60	65 ~ 75	
极限伸长率 ( $\times 10^{-6}$ )	5000 ~ 7000		—

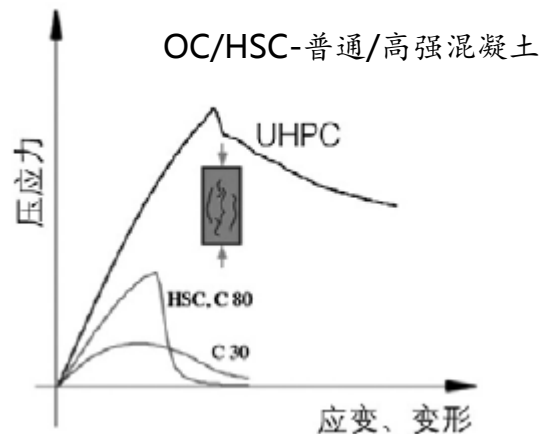
# 一、概述

## 3、配制与性能

### 抗压性能



传统混凝土与UHPC的抗压强度范围



UHPC单轴压缩应力、应变曲线

## 上升段

**UHPC:** 弹性模量通常比普通混凝土高，一般在 40 - 60GPa 左右，甚至更高。这使得 UHPC 在受力初期，应力 - 应变曲线的斜率更陡，即相同应力增量下产生的应变更小，表现出更刚硬的力学特性。

**普通混凝土:** 弹性模量相对较低，一般在 20 - 40GPa 范围，应力 - 应变曲线斜率相对较缓，在承受相同荷载时，会产生比 UHPC 更大的弹性变形。

## 峰值应力

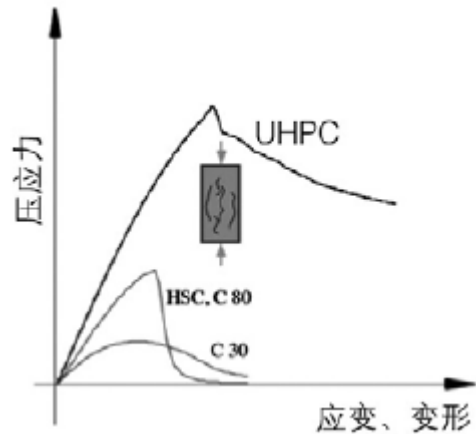
**UHPC:** 能达到很高的抗压强度，其峰值应力通常在 120MPa 以上，甚至可高达 200MPa 或更高。

**普通混凝土:** 抗压强度一般在 20 - 60MPa 之间，峰值应力明显低于 UHPC，应力 - 应变曲线的峰值相对较低。

## 上升段形状

**UHPC:** 上升段相对更接近直线，从开始加载到峰值应力点，材料基本处于弹性阶段向弹塑性阶段的平稳过渡，没有明显的非线性转折点，说明其在受力过程中，内部结构的损伤发展相对较为缓慢和均匀。

**普通混凝土:** 上升段在接近峰值应力时，曲线会逐渐变得平缓，表现出明显的非线性特征，这是因为普通混凝土内部开始出现大量微裂缝，材料的刚度逐渐降低。



## 下降段

### 下降段斜率

**UHPC:** 下降段相对较缓, 表明 UHPC 在达到峰值应力后, 仍能保持一定的承载能力, 不会像普通混凝土那样迅速丧失承载能力, 具有较好的后期韧性。

**普通混凝土:** 下降段斜率较大, 一旦达到峰值应力, 承载能力会迅速下降, 这是由于普通混凝土内部裂缝迅速扩展和贯通, 导致结构快速破坏。

### 残余应力

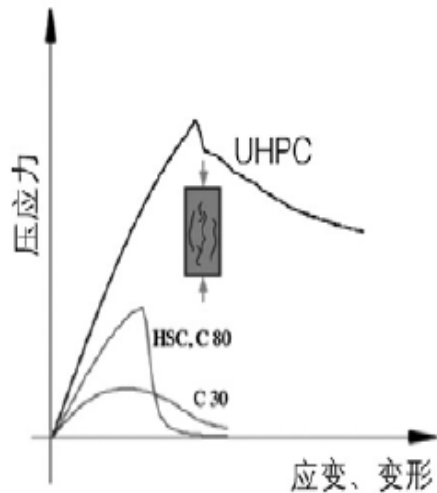
**UHPC:** 在应变较大时仍能保留较高的残余应力, 一般能保持峰值应力的 30% - 50% 甚至更高, 这使得 UHPC 在破坏后仍能维持一定的结构整体性, 对结构的安全性非常有利。

**普通混凝土:** 残余应力较低, 通常在峰值应力的 10% - 20% 左右, 破坏后结构的整体性较差, 剩余承载能力有限。

### 极限应变

**UHPC:** 极限应变一般在 0.003 - 0.005 左右, 有些高性能的 UHPC 极限应变甚至更高, 这意味着 UHPC 在破坏前能够承受较大的变形, 表现出较好的延性。

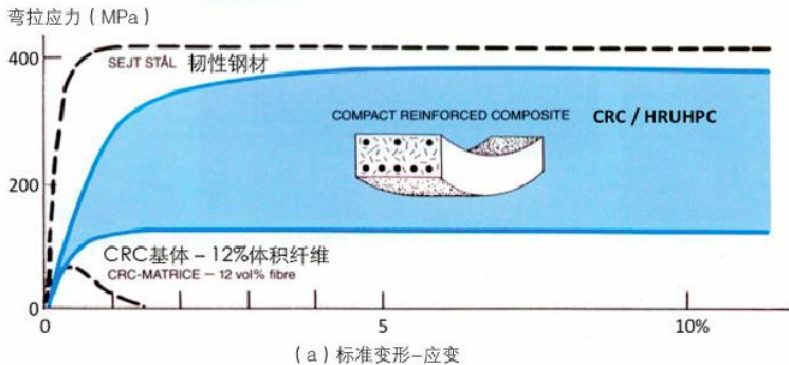
**普通混凝土:** 极限应变通常在 0.002 - 0.003 之间, 相对较小, 在较小的变形下就会发生破坏, 延性不如 UHPC。



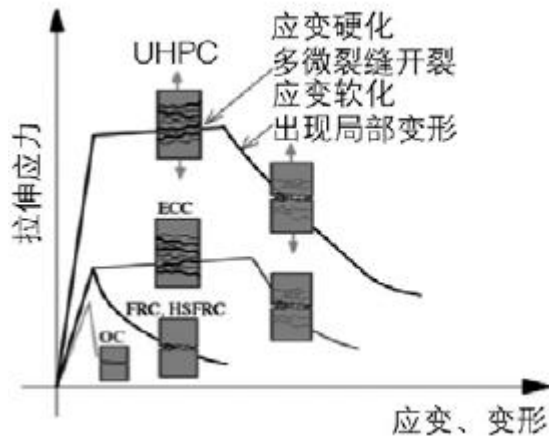
# 一、概述

## 3、配制与性能

### 抗拉性能



FRC/HSFRC-普通/高强纤维混凝土  
，ECC-高延性水泥基复合材料



UHPC单轴拉伸应力、应变曲线



钢筋增强UHPC—CRC的抗弯承载能力接近钢梁承载力水平，抗弯行为相似。

# 一、概述

## 3、配制与性能

### HPC、UHPC、钢筋增强UHPC和高韧性钢材的性能对比

性能	普通高强混凝土	Densit/UHPC		CRC HRUHPC	韧性高强钢材
		0% ~ 2% 纤维	4% ~ 12% 纤维		
抗压强度 (MPa)	80	120~270	160~400	160~400	500~600
抗拉强度 (f <sub>t</sub> ) (MPa)	5	6~15	10~30	100~300	
抗弯强度 (f <sub>b</sub> ) (MPa)				100~400	
抗剪强度 (MPa)				15~150	
密度 (ρ) (kg/m <sup>3</sup> )	2500	2500~2800	2600~3200	3000~4000	7800
弹性模量 (E) (GPa)	50	60~100	60~100	60~110	210
断裂能 (N/m)	150	150~1500	5000~40000	2×10 <sup>5</sup> ~4×10 <sup>6</sup>	2×10 <sup>5</sup>
强度/质量比 (f <sub>t</sub> /ρ) (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )				3×10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup>	7.7×10 <sup>4</sup>
刚度/质量比 (E/ρ) (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )				2×10 <sup>7</sup> ~3×10 <sup>7</sup>	2.7×10 <sup>7</sup>
抗冻性	中等/好	不用引气, 绝对抗冻			
抗腐蚀性	中等/好	仅需要5mm~10mm保护层, 抗腐蚀优良			差

性能	普通混凝土	高性能混凝土	UHPC
抗压强度/MPa	20~60	60~100	100~200
抗折强度/MPa	4~8	6~8	10~50
弹性模量/GPa	30~40	30~40	30~60
氯离子扩散系数 (10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1.1	0.6	0.02
碳化深度 (mm)	10	2	极小
冻融脱落 (g·m <sup>-2</sup> )	≥1000	900	7
磨损系数	4.0	2.8	1.3

# 一、概述

## 3、配制与性能

### UHPC渗透性、耐久性平均指标，以及与HPC、OC对比

耐久性指标	UHPC 指标	高性能混凝土 (HPC)		普通混凝土 (NC)	
		指标	与UHPC比	指标	与UHPC比
盐剥蚀表面重量损失 (28个循环)	$50 \text{ g}/\text{m}^2$	$150 \text{ g}/\text{m}^2$	3	$1500 \text{ g}/\text{m}^2$	30
氯离子扩散系数	$2.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$	$6.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$	30	$1.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	55
氯离子渗透深度	1m m	8m m	8	23m m	23
氯离子渗透性 (电量法)	10 ~ 25	200 ~ 1000	34	1800 ~ 6000	220
氧气渗透性	$1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$	$1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$	10	$1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$	100
氮气渗透性	$1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$	$4 \times 10^{-17} \text{ m}^2$	400	$6.7 \times 10^{-17} \text{ m}^2$	670
表面吸水率	$0.20 \text{ kg}/\text{m}^2$	--	11	--	60
碳化深度 (3年)	1.5m m	4m m	2.7	7m m	4.7
钢筋锈蚀速率	$< 0.01 \mu\text{m}/\text{年}$	$0.25 \mu\text{m}/\text{年}$	25	$1.2 \mu\text{m}/\text{年}$	120
耐磨性 (相对体积损失指数, 与玻璃对比)	1.1 ~ 1.7	2.8	2.0	4.0	2.9
抗冻性 (1000冻融循环后相对动弹性模量)	90%	78%	0.87	39%	0.43
电阻率	$137 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (2% V碳纤维)	$96 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (无碳纤维)	0.7	$16 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	0.12
耐酸性 (80周腐蚀深度)	pH=5	$993 \mu\text{m}$	--	$1845 \mu\text{m}$	1.86
	pH=3	$1217 \mu\text{m}$	--	$3023 \mu\text{m}$	2.48

# 一、概述

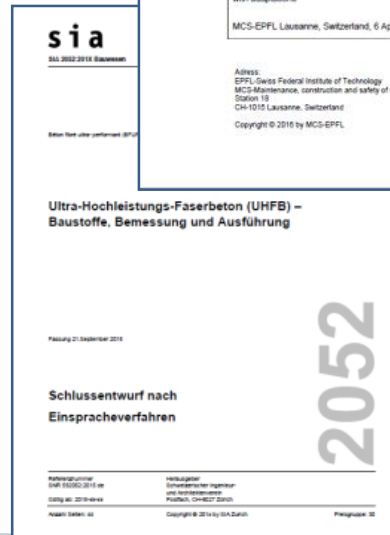
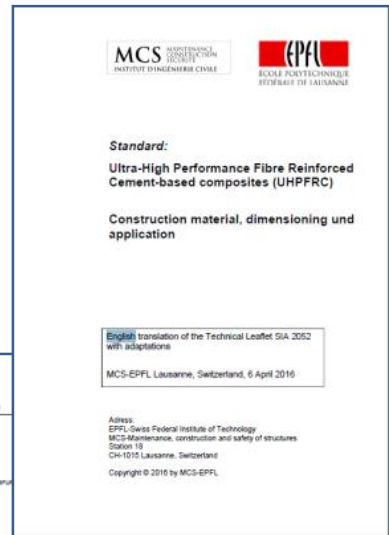
## 4、标准规范

### (1) 法国

2002年，发布了**第一部** UHPC设计指南《Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete - Interim Recommendations 超高性能纤维增强型混凝土临时建议》，并于2013年发布修订版建议。由于缺少相应设计方法，这部“准标准”也被法国以外地区广泛采用。

### (2) 瑞士

2015年，瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）发布了《Swiss Standard SIA 2052 UHPFRC SIA 2052 UHPFRC瑞士标准》设计规范。



# 一、概述

## 4、标准规范

法国三种UHPC材料性能参考值

特征性能	Ductal®	BSI®	BCV®	试验
28d特征抗压强度	150~200MPa (热养护后)	180MPa	150~200MPa (热养护后)	不同试件试验结果, 圆柱试件直径 $U \geq 5l_f$ , $U \geq 6d_{max}$
28d轴向抗拉强度(峰值)	9~10MPa (切槽试件)	8.8MPa (没切槽)		
$f_{cm}$ 平均最大裂缝后拉应力 (裂缝宽度 $w = 0.3mm$ )	7~10MPa	7.9MPa		AFREM 试验方法= 曲线
弹性模量 E	45~55GPa	65GPa	44GPa	
剪切模量 G	24GPa	25GPa		
泊松比	0.2	0.2		
密度	2500kg/m <sup>3</sup>	2750kg/m <sup>3</sup>	2480kg/m <sup>3</sup>	
热膨胀系数	12nm/m/°C	10.4nm/m/°C		
收缩	600~800nm/m (总收缩)	570nm/m (自收缩)	600nm/m	
基本和干燥徐变 (徐变系数 $K_a$ )	热养护后 $K_a = 0.2 \sim 0.4$ 常温养护 $K_a = 1.0$	常温养护 $K_a = 0.8$		LCPC/RILEM 试验方法
孔隙率	1.9%	3%		
吸水率	0.06g/cm <sup>2</sup>	0.22g/cm <sup>2</sup>		
透气系数	<10~20m <sup>2</sup>			
抗冻性(动弹模降低)	0%	2.8%		
坍落流动度	550mm	640mm		

# 一、概述

## 4、标准规范

### (3) 德国

德国从2004年到2016年，UHPC国际研讨会每4年开一次，UHPC的综合研究与欧洲规范（DFG SSP 1182）都正在编制。

德国钢筋混凝土协会（DAfStb）2003/2008年出版UHPC最新进展报告《Sachstandsbericht-Ultrahochfester Beton》，详细总结了UHPC材料性能、设计与施工方法，作为过渡性UHPC设计施工指南。

fib（国际结构混凝土协会）的规范Model Code 2010，已经将纤维混凝土强度等级扩展到C200。现在，fib的TG8.6工作组（Task Group）正在编制UHPC设计指南。

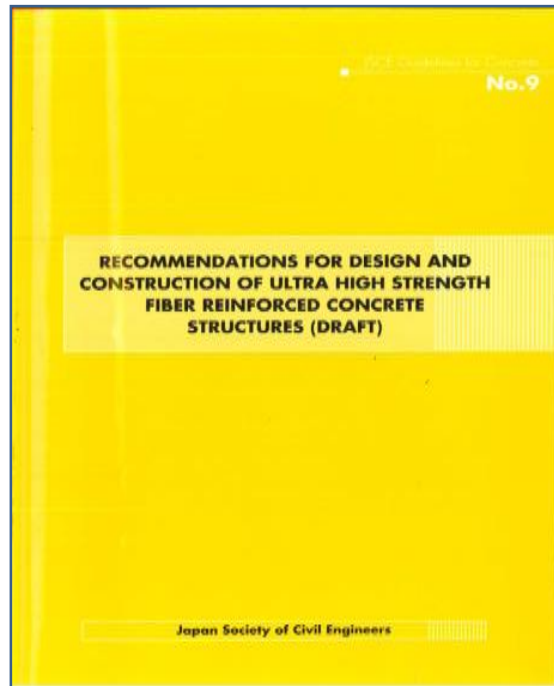
# 一、概述

## 4、标准规范

### (4) 日本

2004年成功发布《UHPFRC设计与施工建议》（暂定），建议成功地应用到了羽田机场跑道的扩建工程中，这是迄今为止最大规模的UHPC应用。

2004年日本土木工程学会（JSCE）颁布了《超高强纤维增强混凝土结构设计施工指南（草案）》，2006年出了英文版本。



# 一、概述

## 4、标准规范

### (5) 韩国

韩国在2008年制定了《K-UHPC Design Guidelines (1st Draft) K-UHPC设计指南》（暂定），并在韩国混凝土协会（KCI）的协助下，于2012年发布《K-UHPC Design Guidelines K-UHPC设计指南》。

### (6) 美国

2015年，美国混凝土协会（ACI）成立了专注于UHPC的ACI239C委员会，负责编制《UHPC设计指南》。同时相关的ASTM标准工作正在进行。除此之外，美国联邦公路管理署（FHWA）出版系列UHPC技术文献，作为UHPC桥梁设计与发展的基础性技术文件。

### (7) 加拿大

2015年，加拿大标准协会（CSA）成立了UHPC工作组，负责编制设计规程

# 一、概述

## 4、标准规范

### (8) 中国标准- GB/T 31387-2015 《活性粉末混凝土》

对RPC的定义、等级分类、性能、材料要求、拌和、养护、检验等进行了规定。将RPC混凝土按照**力学性能**分为**RPC100**，**RPC120**，**RPC140**，**RPC160**，**RPC180**五个等级,同时对抗冻性、抗氯离子渗透性和抗硫酸盐侵蚀作出了规定。



等级	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	弹性模量/GPa
RPC100	≥100	≥12	≥40
RPC120	≥120	≥14	≥40
RPC140	≥140	≥18	≥40
RPC160	≥160	≥22	≥40
RPC180	≥180	≥24	≥40

当对于混凝土的韧性或延性有特殊要求时，混凝土的等级可由抗折强度决定，抗压强度不应低于100MPa。

# 一、概述

## 4、标准规范

抗冻性 (快冻法)	抗氯离子渗透性 (电量法) /C	抗硫酸盐侵蚀性
≥F500	Q≤100	≥KS120

采用电量法测试活性粉末混凝土的抗氯离子渗透性时，试件不应掺加钢纤维等导电介质。

等级	水胶比	胶凝材料用量/ (kg/m <sup>3</sup> )	钢纤维体积掺量 /%
RPC100	≤0.22	≤850	≥0.7
RPC120	≤0.20	≤900	≥1.2
RPC140	≤0.18	≤950	≥1.7
RPC160	≤0.15	≤1000	≥2.0
RPC180	≤0.14	≤1000	≥2.5

掺加有机合成纤维时，其掺量不宜大于1.5kg/m<sup>3</sup>，硅灰用量不宜小于胶凝材料用量的10%，水泥用量不宜小于胶凝材料用量的50%。

# 一、概述

## 4、标准规范

### (9) 《超高性能混凝土》 GB/T 31387—2025

以水泥和矿物掺合料等为胶凝材料，配合骨料、外加剂、高强度微细钢纤维和 / 或非金属纤维、水等原料生产的超高强纤维增韧混凝土

抗压强度：超高性能混凝土（UHPC）按照抗压强度等级划分，起步强度为 UC100，即抗压强度 $\geq 100\text{MPa}$ ，最高强度为 UC200。抗拉强度：UHPC 的基本性能指标门槛要求抗拉强度 $\geq 3.5\text{MPa}$ 。

# 一、概述

## 4、标准规范

### 硬化超高性能混凝土的基本技术指标

性能	符号	典型值(28d龄期或蒸养后)	检验标准/计算公式
抗拉强度	$f_{Utu}$	5 – 15MPa	附录B/附录C
弹性抗拉强度	$f_{Ute}$	7 – 12MPa	附录B/附录C
抗折强度	$f_{Ub}$	10~30MPa	GB/T 50081
抗压强度	$f_{Uc}$	100 – 200MPa	GB/T 50081
弹性模量	$E_U$	40 – 60GPa	附录B/附录C
泊松比	$\gamma_U$	0.2	/
抗拉强度对应应变	$\epsilon_{Utu}$	0 – 5‰	附录B/附录C
比断裂能	$G_{FU}$	8 – 25kJ/m <sup>2</sup>	RILEM
最终收缩值	$\epsilon_U$	0.03%	GB/T 50082
热膨胀系数	$\alpha_U$	$(6\sim12) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	?
容重	$\rho_U$	2300~2700kg/m <sup>3</sup>	?

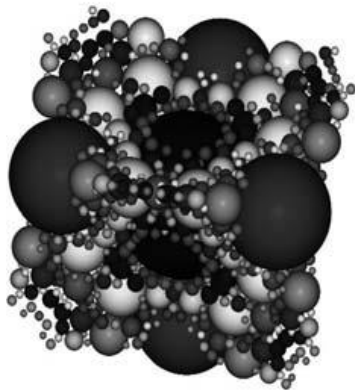
## 5、存在问题

- 需要建立可靠的UHPC本构关系，包括UHPC在各种结构上的性能、结构是否配筋或配筋方法、预应力技术、结构设计与验证方法。
- 材料价格较高，制备成本较高。钢纤维和细骨料是增大成本的主要因素，需要努力提高纤维的抗拉增强增韧效率，降低纤维用量和UHPC结构造价，钢纤维在这方面还有较大提高空间。
- UHPC 对养护条件要求较高，不同的养护方式如标准养护、蒸汽养护、高温热养护等对其性能影响较大。如果养护不当，可能无法充分发挥其高性能特性，甚至会导致强度不足、收缩开裂等问题。
- 设计规范缺乏：缺乏广泛接受的设计条款，工程师在进行结构设计时，对于 UHPC 的力学性能取值、结构计算方法等方面缺乏足够的依据和指导。

## 二、配制技术

### ■ 设计理论

**最紧密堆积理论：**UHPC 的最紧密堆积理论基于颗粒级配原理，旨在让不同粒径的颗粒以最佳比例组合，使体系达到最大密实度、最小孔隙率。具体来说，就是毫米级的骨料颗粒堆积形成的间隙，由微米级的水泥、粉煤灰、矿粉颗粒去填充；而微米级颗粒堆积产生的间隙，再由亚微米级的硅灰颗粒等填充。通过这种逐级填充的方式，让材料内部的颗粒排列为最紧密，尽可能减少空隙，从而提高材料的性能。



**HPC 原材料粒径分布如下：**

石英砂

粗粒径砂：1.25-0.63mm。

中粒径砂：0.63-0.315mm。

细粒径砂：0.315-0.16mm。

石英粉：公称粒径小于 0.16mm 的颗粒比例应大于 95%。

水泥：粒径一般在十几微米至几十微米之间。

粉煤灰漂珠：一般小于 10 微米。

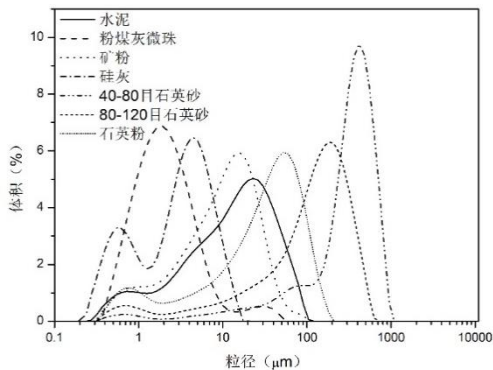
硅灰：粒径一般小于 0.1 $\mu$ m。

## 二、配制技术

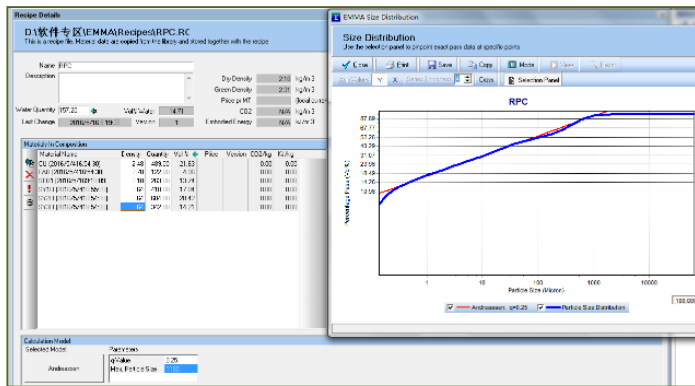
### ■ 设计理论

基于Andreasen方程编制的EMMA软件，可根据原材料颗粒粒径分布，计算出最优的材料组成比例，使其达到理论上的最大堆积密度。

在不考虑钢纤维的加入时，根据成型后容重将其换算为单方材料用量。水胶比为0.20，胶材用量为924kg/m<sup>3</sup>，集料用量1386kg/m<sup>3</sup>，胶砂比1:1.54，硅灰占胶材用量的20%。



材料粒径测试



计算机分析得出组成比例

## 二、配制技术

### ■ 设计理论

由于UHPC还需要添加一定量的钢纤维，因此模拟配比需根据其工作性做进一步的调整。根据目前国内外大多数学者的研究，加入钢纤维后的UHPC，流动性会变差，所以其硅灰比例、减水剂掺量、浆体和砂子的比例都得调整。

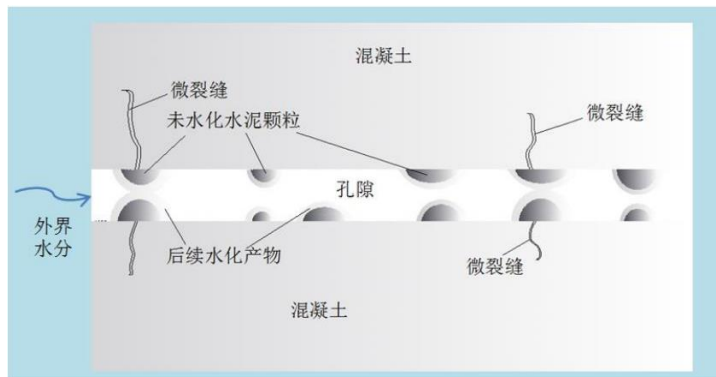
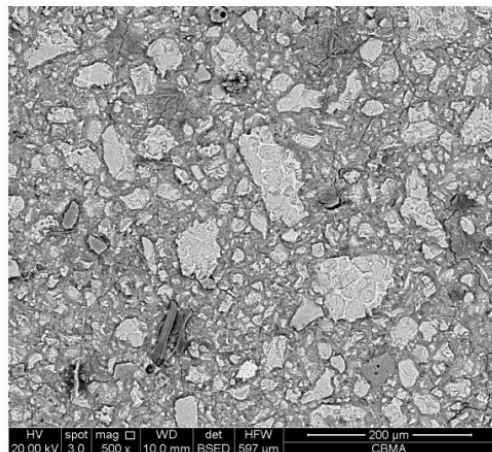


图 1-3 后续水化对混凝土材料的影响

-2 标准养护 28 d 后水灰比 0.20 水泥净浆微观形貌

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (1) 水泥

- 水泥品种
- 通常优先选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，不宜使用早强型水泥。
- 化学成分
- $C_3A$  含量：一般要求  $C_3A$  含量不大于 8%。
- 碱含量：碱含量应小于 0.8%。
- 氯离子含量：氯离子含量需小于 0.1%。
- 强度等级：宜使用高强度等级的水泥，如 42.5 级或更高等级的水泥。
- 其他方面
- 需水量：水泥的需水量要低，这样可以在低水胶比的条件下，保证混凝土具有良好的工作性能，如流动性、黏聚性和保水性等。
- 与外加剂的适应性：水泥与减水剂等外加剂要有良好的适应性。

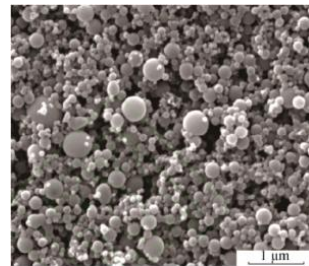
## 二、配制技术

### ■ 原材料

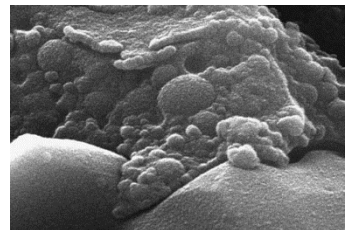
#### (2) 硅灰

硅灰 (Silica Fume, 简称SF) 也被称为微硅粉或凝聚硅灰, 是从硅铁合金或金属硅冶炼的烟尘中回收的粉末, 外观颜色为灰白色或者白色, 主要成分为非晶态 $\text{SiO}_2$ , 含量一般在80%~95%, 硅灰颗粒极其细小, 细度小于 $1\mu\text{m}$ 的占80%以上, 平均粒径在 $0.1 - 0.3\mu\text{m}$ , 比表面积为 $20 - 28\text{m}^2/\text{g}$ , 是水泥颗粒粒径的 $1/50 - 1/100$ , 比表面积约为水泥的80 - 100倍。颗粒多为球形, 表面较为光滑

硅灰极细的颗粒形态使其可填充孔隙 (填充效应), 使得浆体结构更密实; 含量很高的非晶态 $\text{SiO}_2$ 与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应, 增加水化硅酸钙C-S-H凝胶量 (火山灰效应); 球形形态良好, 与水泥颗粒存在静电斥力作用, 可以产“滚珠”作用, 对混凝土拌合物有良好的增塑作用。 提高强度---优化微观结构---提高工作性能



硅灰颗粒



基体中硅灰颗粒

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (3) 玄武岩粉

- 一般来说，玄武岩粉的掺量在 5% - 15% 左右，优化颗粒级配，使混凝土的流动性、黏聚性和保水性更加协调，改善工作性能，玄武岩粉中的活性成分能与水泥水化产物发生二次反应，生成更多的胶凝物质，填充混凝土内部孔隙，增强界面过渡区，提高混凝土的抗压、抗折等力学性能。

#### (4) 石灰石粉

- 石灰石粉的低强度不适合UHPC，并会造成UHPC更加粘稠；
- 不得采用磨细石灰石粉——《超高性能混凝土技术规范：材料与检验》。



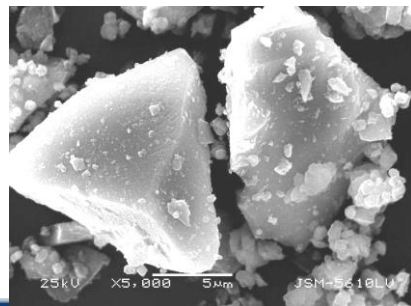
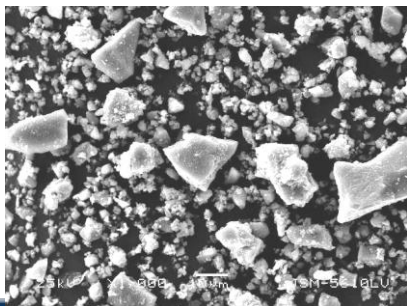
## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (5) 粒化高炉矿渣

矿渣微粉作为混凝土和水泥制品的掺合料，具有改善各种性能的优点：

- 可大幅度提高水泥混凝土强度，能配制出超高强水泥混凝土；
- 可有效抑制水泥混凝土碱骨料反应，显著提高水泥混凝土抗碱骨料反应性能；
- 可有效提高水泥混凝土抗海水浸蚀性能，特别适用于抗海水工程；
- 可显著减少水泥混凝土泌水量，改善混凝土和易性；
- 可显著提高水泥混凝土致密性，改善水泥混凝土抗渗性；



## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (4) 粒化高炉矿渣

- 粒化高炉矿渣粉磨得越细，其活性越高，早期产生的水化热越大，并且早期的自收缩随矿渣掺量的增加而增大，因此掺入UHPC中的磨细矿渣的比表面积不宜过细，一般以不超过 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 为宜；
- 粒化高炉矿渣粉应符合GB/T 18046的规定，宜采用S95及以上等级的粒化高炉矿渣粉—GB/T 31387-2015《活性粉末混凝土》和《超高性能混凝土技术规范：材料与检验》；

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (6) 粉煤灰（一级粉煤灰）

粉煤灰特有的**空心球形态**可节约大量水泥和细骨料，并具有以下特点：

- 减少用水量；
- 改善和易性；
- 增强可泵性；
- 提高流动性；
- 减少水化热和降低孔隙率；
- 提高抗渗能力；
- 抑制碱骨料反应。

含碳量高的粉煤灰需水量大，对混凝土的流变性、强度和变形都有不利的影响，因此用于UHPC中的粉煤灰的烧失量以小于3%为宜

## 二、配制技术

### ■ 原材料



#### (7) 石英砂（粉）

各种石英砂（ $\text{SiO}_2$ 含量大于90%）用于实现颗粒组合的最佳堆积，这使水泥的‘填充效果’被部分取代，并弥补细砂的‘颗粒间隙’。

- UC120以上等级所用骨料宜为单粒级石英砂和石英粉，应分为粗粒径砂（1.25-0.63mm）、中粒径砂（0.63-0.315mm）和细粒径砂（0.315-0.16mm）三个粒级；
- 石英粉中公称粒径小于0.16 mm的颗粒比例应大于95%；
- UC120及以下等级可选用级配Ⅱ区的中砂，砂中公称粒径大于5 mm的颗粒含量应小于1%，天然砂的含泥量<0.5%、无泥块，人工砂的亚甲蓝试验结果（MB值）应小于1.4，石粉含量<2.0%。

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (6) 石英砂（粉）

##### 技术指标

项目	技术指标
二氧化硅含量	$\geq 97$
氯离子含量	$\leq 0.02$
硫化物及硫酸盐含量	$\leq 0.50$
云母含量	$\leq 0.50$

##### 不同粒级石英砂的超粒径颗粒含量

粒级要求	1.25 mm~0.63 mm 粒级		0.63 mm~0.315 mm 粒级		0.315 mm~0.16 mm 粒级	
	$\geq 1.25$ mm	$< 0.63$ mm	$\geq 0.63$ mm	$< 0.315$ mm	$\geq 0.315$ mm	$< 0.16$ mm
超粒径颗粒含量	$\leq 5$	$\leq 10$	$\leq 5$	$\leq 10$	$\leq 5$	$\leq 5$

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (7) 粗骨料

一般不宜超过 10mm，对于一些特殊要求的超高性能混凝土，最大粒径可能会限制在 5mm 甚至更小。

也有资料显示制备粗骨料超高性能混凝土，但是粗骨料与水泥浆体之间的界面过渡区是混凝土结构中的薄弱环节。在受力时，界面过渡区容易产生微裂缝，影响混凝土的整体性能。不使用粗骨料可以减少这种界面过渡区的影响，使混凝土内部结构更加均匀，提高其力学性能和耐久性。

流动性和可施工性：UHPC 通常需要具有良好的流动性和自密实性，以便在复杂形状的模具或结构中能够顺利填充和成型，且不会出现离析、泌水等问题。粗骨料的存在可能会降低混凝土拌合物的流动性，增加施工难度。特别是在一些对外观质量和尺寸精度要求极高的工程中，如薄壁结构、装饰性混凝土构件等，不使用粗骨料更有利于保证混凝土的工作性能和施工质量。



## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (8) 专用聚羧酸减水剂

- 《超高性能混凝土用减水剂技术要求》  
2022年9月20日第一次会议召开。
- 基体砂浆减水率 $\geq 60\%$ ；基体流动度 $\geq 220\text{mm}$ ；含气量 $\leq 3.5\%$ ；凝结时间差 $-120\sim 360\text{min}$ ；基体砂浆抗压强度比 $\geq 200\%$ ；28d收缩率比 $\leq 90\%$ 。
- 区别：凝结时间
- 含气量
- 早期强度



## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (9) 钢纤维

- 钢纤维可以紧密嵌入密实、固相均匀的UHPC基体中；
- 纤维增加延展性是基于基体破裂时，基体和纤维间的静态摩擦力被克服，纤维没有断裂；
- 直径0.20mm，长度9-17mm，抗拉强度 $\geq 2000\text{N/mm}^2$ 的微细钢纤维被证明是最好的选择，和易性也较好，体积掺量不小于2.5%；



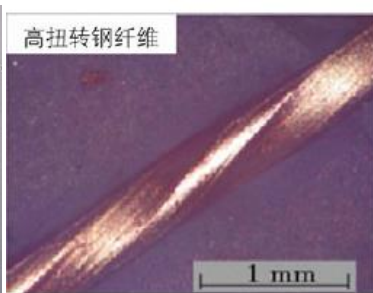
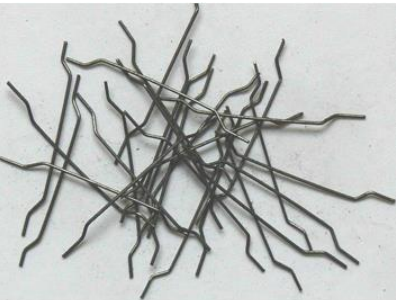
## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (9) 钢纤维

➤ 为提高钢纤维的有效性，使用异型钢纤维（端钩、大端头、压痕、波纹、扭转等）提高纤维握裹力或机械性粘结强度，使用长径比较大的微细纤维可增大纤维的粘结力和握裹力；

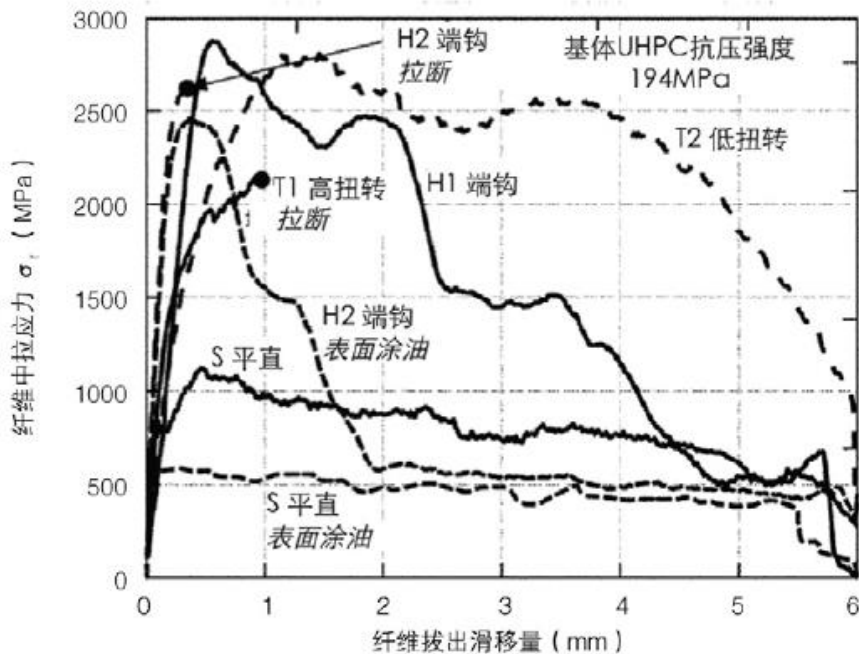
➤ 有机纤维中，PVA纤维对UHPC的增强增韧效果最好，PP纤维则用于提高UHPC的耐高温或耐火性能。



## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (9) 钢纤维



平直纤维为  
1100MPa;

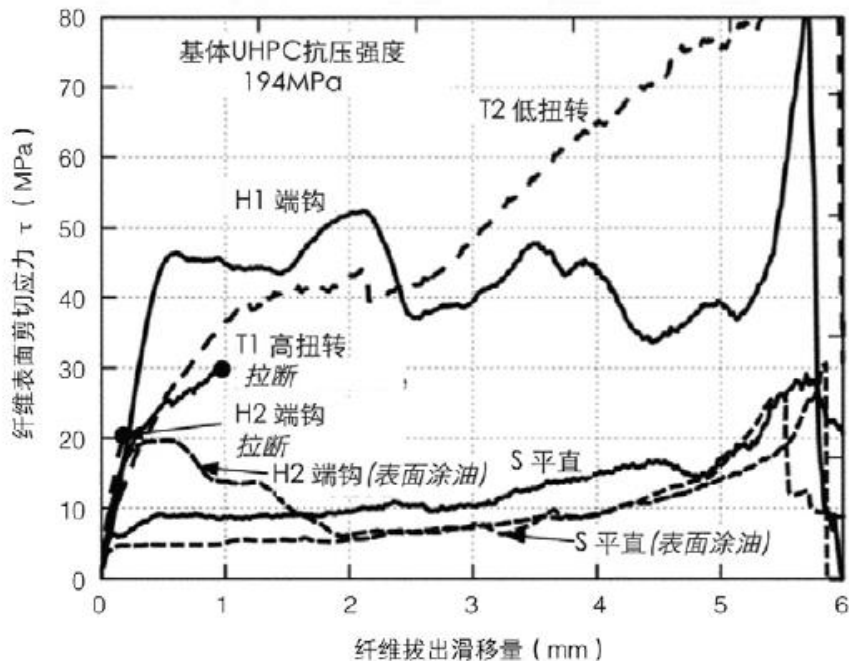
高前端钩和扭转纤维  
达到2150~2900MPa，接  
近或达到纤维的抗拉强度  
(T1、H2纤维拉断)

不同钢纤维拔出滑移量与纤维应力

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (9) 钢纤维



不同钢纤维拔出滑移量与表面剪切应力

- 平直纤维为10MPa左右，异形纤维则达到了42~47MPa，比平直纤维提高4倍多；
- 纤维脱粘后的拔出过程，平直纤维和异形纤维的剪切应力还继续增长或维持在较高水平，均呈现较高的机械性粘结强度；
- **扭转纤维**是目前UHPC应用效率最高的钢纤维。

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (9) 钢纤维（化学黏着力、静摩擦力、机械锚固）

不同钢纤维从UHPC拔出过程的最大拉应力与粘结强度

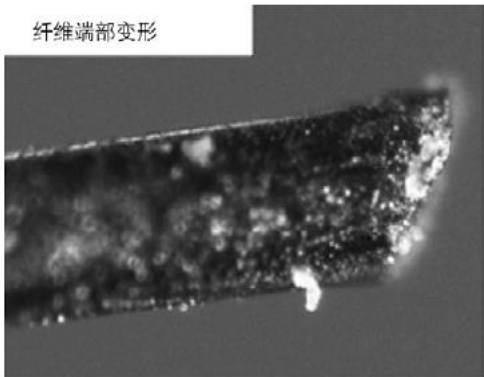
钢纤维类型	基体强度 M P a	纤维长度 $l_f$ (m m)	纤维直径 $d_f$ (m m)	纤维抗拉强度 M P a	纤维最大拉应力 $\sigma_{fmax}$ (M P a)	等效粘结强度 $\tau_{eq}$ (M P a)	平均粘结强度 $\tau_{av}$ (M P a)
S—平直纤维	194	13	0.20	$\approx 2600$	1133	10.4	8.7
S—平直纤维（表面涂油）		13	0.20	$\approx 2600$	554	6.2	4.3
H1—端钩纤维		30	0.38	$\approx 2900$	2900	42.2	42.4
H2—端钩纤维		13	0.20	$\approx 2600$	2610（拉断）	1.8	20.1
H2—端钩纤维（表面涂油）		13	0.20	$\approx 2600$	2465	11.7	19.0
T1—高扭转纤维（扭转节距4m m）		30	当量 $d_f=0.30$ （截面 $0.2 \times 0.3$ ）	$\approx 2150$	2150（拉断）	4.6	24.8
T2—低扭转纤维（扭转节距8m m）		30	当量 $d_f=0.30$ （截面 $0.2 \times 0.3$ ）	$\approx 3100$	2800	46.9	32.3
S—平直纤维		197	13	0.20	$\approx 2600$	1130	14.3
S—平直纤维	240	13	0.20	$\approx 2600$	1841	22.1	14.2

## 二、配制技术

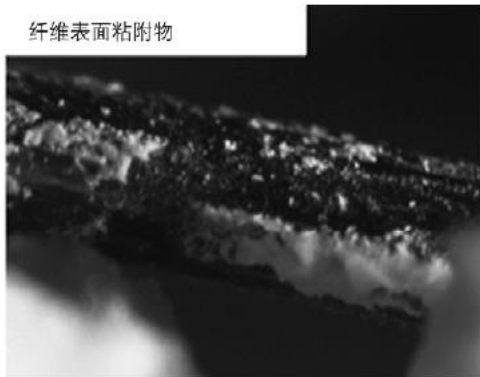
### ■ 原材料

#### (9) 钢纤维

纤维端部变形



纤维表面粘附物



纤维表面刮伤



表面镀黄铜的钢纤维从UHPC中拔出的表面破坏形态

平直纤维在UHPC中呈现的这种“机械性粘结”，没有出现在普通高强混凝土中。平直纤维较高的机械性粘结力，可能来源于纤维端部剪切产生的变形、纤维表面粘附物与表面刮伤等增加了拔出阻力。

## 二、配制技术

### ■ 原材料

#### (9) 钢纤维

《超高性能混凝土技术规范：材料与检验》要求如下：

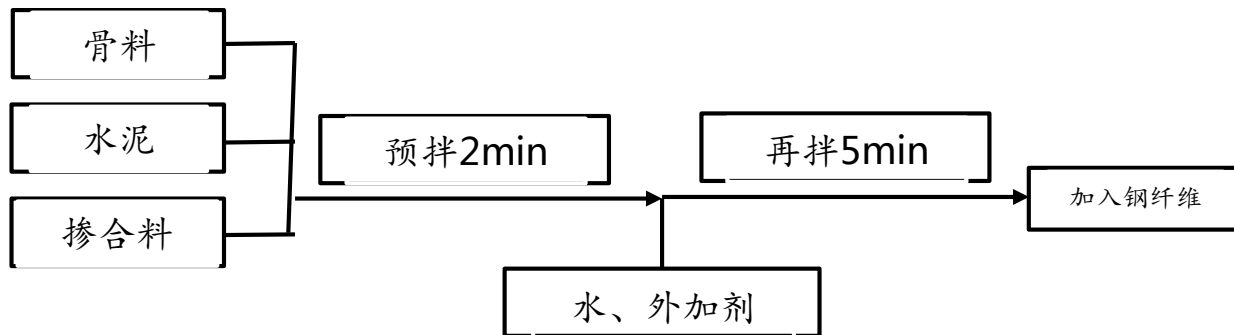
- 钢纤维长度/等效直径比值大于65、抗拉强度大于2000MPa的高强碳钢或不锈钢纤维材料；
- 有机纤维指聚乙烯醇（PVA）、聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）等有机纤维，PVA纤维的弹性模量不得小于30GPa，抗拉强度不得小于1000MPa，可单独或与钢纤维一起用于超高性能混凝土；
- 对考虑应变硬化的应用场合，钢纤维体积掺量不得小于2.5%，钢纤维与有机纤维复掺时，钢纤维体积掺量不得小于2.0%，有机纤维的体积掺量一般不大于2%；
- 对有钢筋配筋且配筋较密的场合，钢纤维的体积掺量可不超过2.0%，甚至不掺钢纤维。

## 二、配制技术

### ■ 搅拌

搅拌机：可调速的强制式混合机，如双卧轴式、盘式、及带刮铲的立轴行星式搅拌机。

GB/T 31387-2015 《活性粉末混凝土》、《客运专线活性粉末混凝土（RPC）材料人行道挡板、盖板暂行技术条件》



48

先加预搅拌，后加水再搅拌，最后加入纤维

## 二、配制技术

### ■ 搅拌

工作原理：搅拌轴既做公转运动又做自转运动，使搅拌叶片在搅拌桶内形成复杂的运动轨迹，从而实现对物料的全方位搅拌和混合。

优点：传动平稳、效率高，采用硬齿面减速机传动，扭矩大、耐用性强；搅拌均匀、无死角，运动轨迹覆盖整个搅拌桶；清洗方便，可配备高压清洗装置；布置灵活、卸料速度快，可灵活选择1-3个卸料门



立轴行星式搅拌机

## 二、配制技术

### ■ 浇筑

- UHPC 的流动性保持较短，因此浇筑速度需要根据其初凝时间和工作性能进行精确控制。在浇筑前，应通过试验确定 UHPC 的初凝时间和坍落度经时损失情况。一般来说，应在混凝土初凝时间的  $1/3 - 1/2$  内完成浇筑，以确保混凝土在浇筑过程中保持良好的工作性能。同时，根据混凝土的坍落度损失情况，及时调整浇筑速度，当坍落度损失较大时，适当加快浇筑速度，避免混凝土因流动性不足而影响浇筑质量。

## 二、配制技术

### ■ 养护要求

**养护时间：**UHPC 的养护时间一般比普通混凝土长，通常不少于 14 天。在养护初期，混凝土强度增长较快，要保证养护的及时性和连续性。

**养护方法：**可采用覆盖保湿养护、喷雾养护、蒸汽养护等方法。覆盖保湿养护时，可使用塑料薄膜、土工布等材料覆盖混凝土表面，保持表面湿润；喷雾养护能使混凝土表面始终处于湿润状态；蒸汽养护可加快混凝土的强度增长，但要控制好蒸汽的温度和湿度。

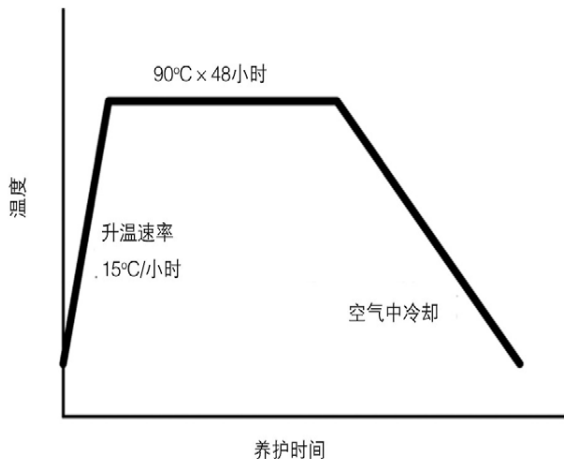
**温度控制：**养护期间要控制好混凝土的温度，避免温度过高或过低对混凝土性能产生不利影响。特别是在冬季和夏季，要采取相应的保温和降温措施。

## 二、配制技术

### ■ 养护要求

《客运专线活性粉末混凝土（RPC）材料人行道挡板、盖板暂行技术条件》

成型构件需要静停6h，采用蒸汽养护，养护过程分为升温、恒温、降温三个阶段，升温速度不应大于 $12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，降温速度不应大于 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，恒温应控制在 $80\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，恒温时间不应小于48h，撤除保温设施时，构件表面温度与环境温度之差不应超过 $20^{\circ}\text{C}$ 。构件蒸汽养护结束后需自然养护，环境温度不应低于 $20^{\circ}\text{C}$ ，并对构件进行洒水养护，时间不应少于7d。



## 二、配制技术

### ■ 养护要求

#### 《超高性能混凝土技术规范：材料与检验》

- 对于预制产品或构件，宜采用90℃以下的蒸汽养护工艺；
- 标准蒸汽养护制度：带模静停24h左右，脱模后以不超过15℃/h速率升温到90℃，恒温48h，然后以不大于15℃/h的速率降至室温；
- 蒸汽养护后，在出厂前，预制构件宜继续在环境温度下保湿养护5~7d；
- 对于非蒸养产品或构件，在浇筑抹面后，应立即采用塑料薄膜覆盖或采用养护剂养护，并用水雾或终凝后表面洒水等保湿措施养护，宜至少养护14d，构件内外温差不得大于20℃，否则宜采取保湿养护措施。

。

## 一、UHPC 强度与纤维掺量关系表

集料：石英砂；钢纤维规格：0.2\*20mm；掺配方式：单掺

钢纤维掺量 (%)	0	1	2	3	4
抗压强度 (MPa)	110	135.0	160.5	182.4	190.2
抗折强度 (MPa)	12.8	18.7	28.5	31.3	35.5
流动度 (mm)	240	225	213	130	100

集料：河砂；掺配方式：单掺；玄武岩纤维

每方用量/kg	3	5	7	9	11	1
抗压强度/MPa	95.6	98.1	96.4	97.4	96.6	96.7
抗折强度/MPa	13.1	14.1	14.4	15.1	15.7	15.2
流动度/mm	210	210	210	180	155	145

## 二、水胶比对UHPC强度的影响

水胶比	0.14	0.15	0.16
初始流动度 (mm)	220	235	260
1 小时 30min 后流动度 (mm)	205	210	235
抗压强度 (MPa)	185.6	176.3	169.6
抗折强度 (MPa)	35.9	32.4	28.8



# 目 录

概述

配制技术

力学性能

耐久性能

微观结构

工程应用

发展趋势

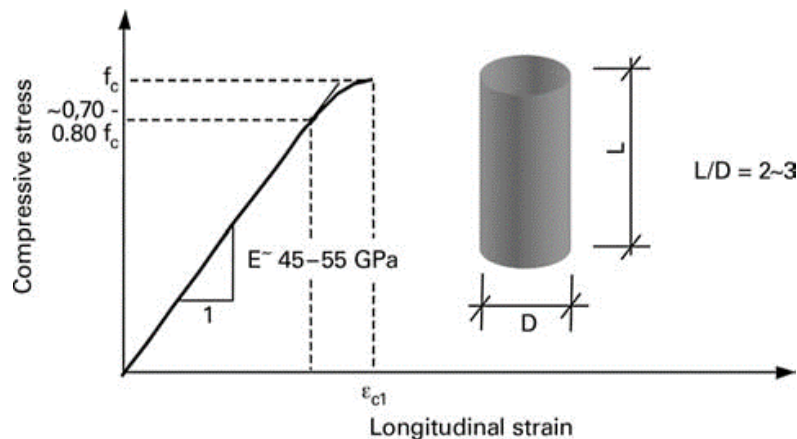
# 三、力学性能

## ■ 抗压强度

UHPC与普通强度混凝土和高强度混凝土相比，其特点是在单轴抗压测试中，相当长的时间里表现出一种本质上的**线弹性**，直到达到抗压强度前不久和破坏时形成微裂纹之前，弹性模量一般在45-55GPa之间。

达到强度时的应变取决于骨料级配，在最大粒径2mm的细颗粒混凝土应变为4.0-4.4‰，而在粗颗粒混凝土的数值为3.5‰。

超高强度是UHPC的基本特性之一，定义上UHPC抗压强度不低于100MPa，并存在尺寸效应，也有专家建议150MPa以上才称之为UHPC。

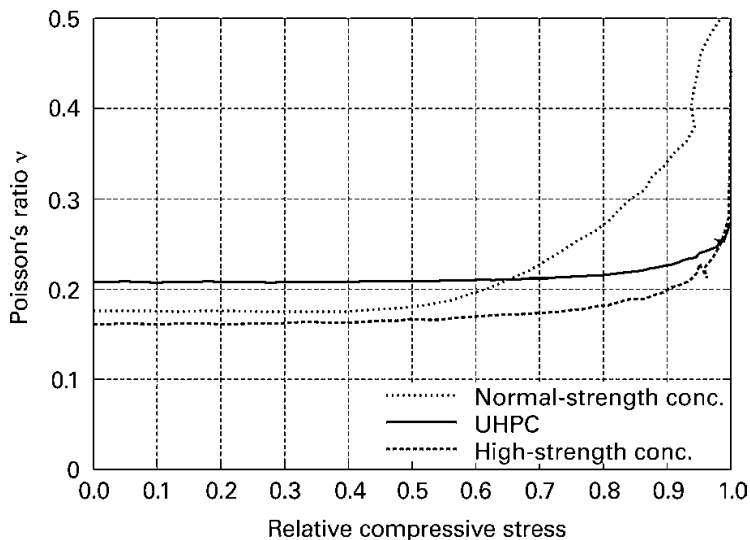


无纤维UHPC单轴抗压测试的  
应力-应变图

### 三、力学性能

#### 泊松比

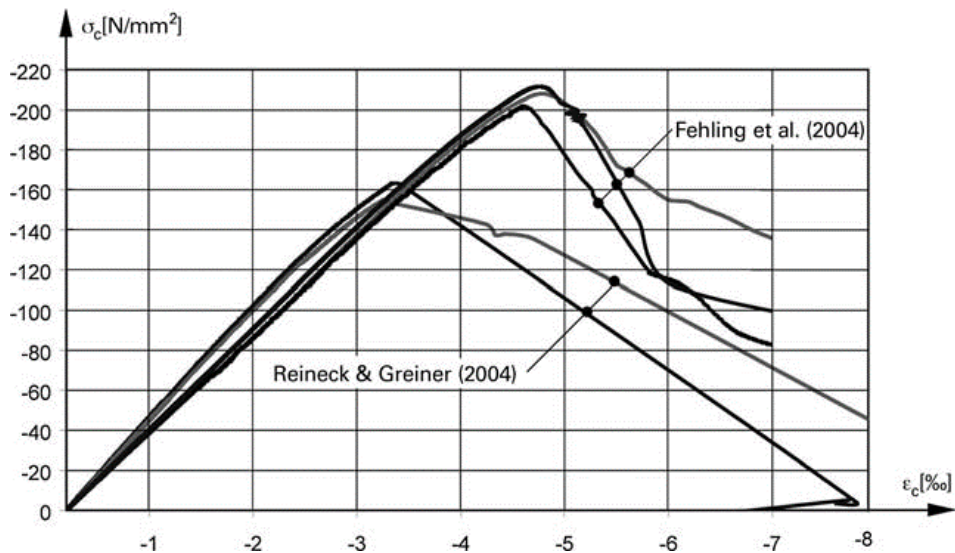
细颗粒UHPC弹性区域的泊松比 $\nu$ 在0.18-0.19之间，粗颗粒UHPC（玄武岩碎屑最大粒径5-8mm）的约为0.21，非常接近普通强度混凝土通常假定的0.2。由于微裂纹的形成，线弹性响应发生偏离的时间较晚，这反映在泊松比后面的增加。破坏后， $\nu$ 可假定为0.3。



泊松比 $\nu$ 随着压应力增加的发展

### 三、力学性能

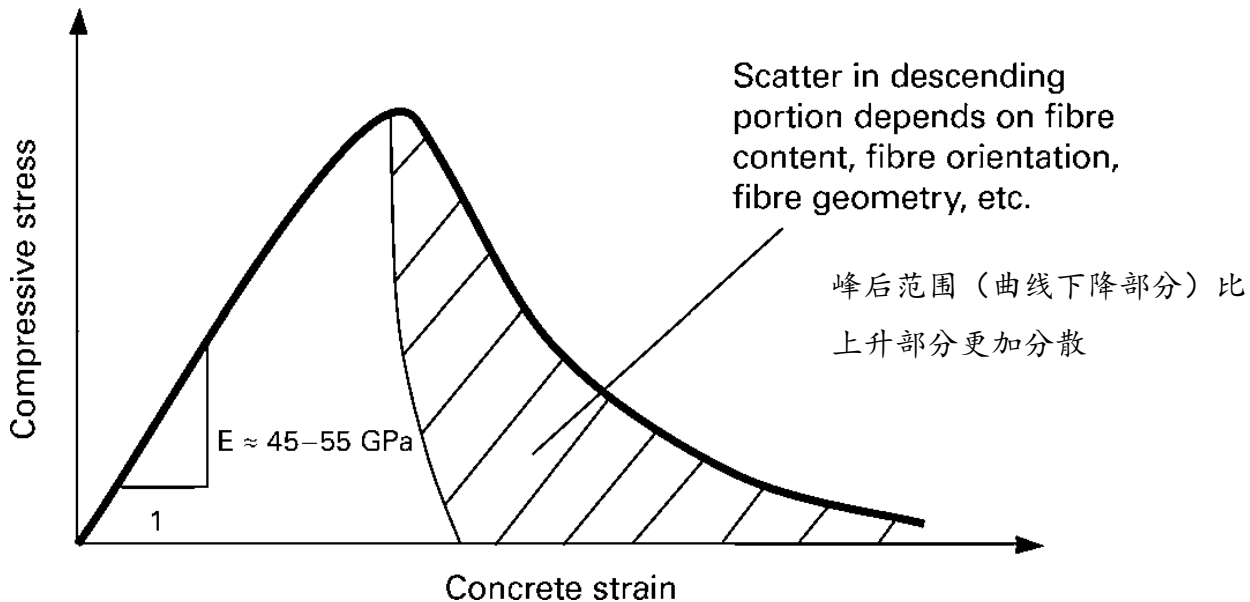
#### ■ 抗压强度



通过掺加纤维可显著提高和控制峰后性能，但对应力-应变曲线的上升阶段几乎没有影响。

### 三、力学性能

#### ■ 抗压强度

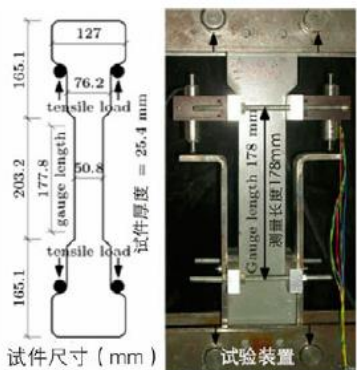


UHPC压应力-应变图的下降部分性能变化取决于纤维含量，纤维种类和纤维方向。

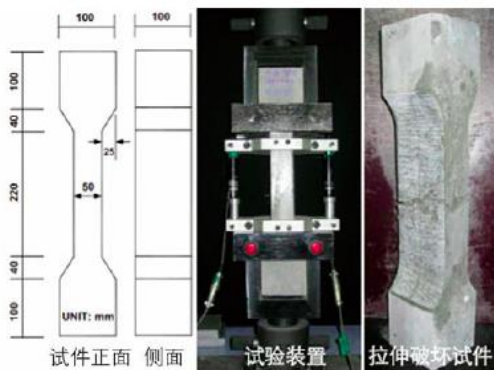
# 三、力学性能

## ■ 抗拉强度

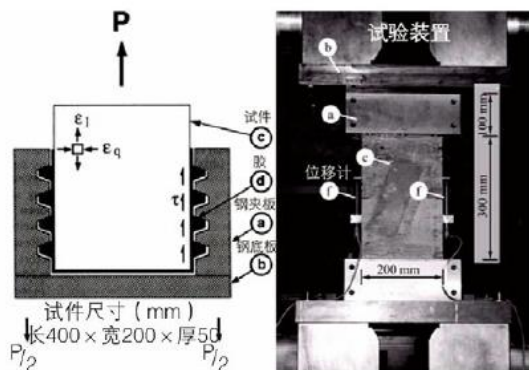
UHPC的“超高力学性能”更主要体现在超高抗拉强度（单轴抗拉和弯曲抗拉强度）和高韧性。目前还没有针对UHPC单轴抗拉试验的标准方法，无切口试件适用于确定抗拉强度，而有切口试件则适用于确定纤维增强UHPC的应力-开裂宽度的关系，后者作为脆性材料响应或材料软化峰后性能的特征。UHPC典型的抗拉强度值为7~11MPa。



(a) 美国试验<sup>[12]</sup>



(b) 韩国试验<sup>[13]</sup>



(c) 瑞士试验<sup>[14]</sup>

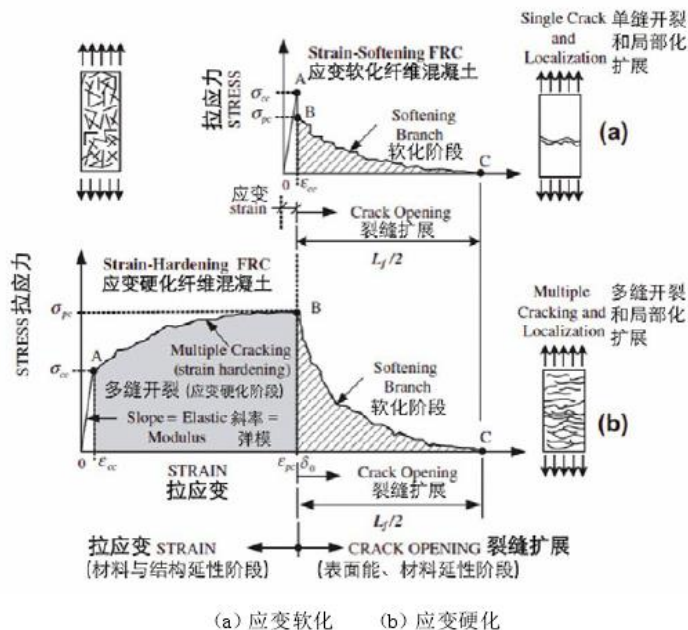
试验尺寸和试验装置

# 三、力学性能

## ■ 抗拉强度

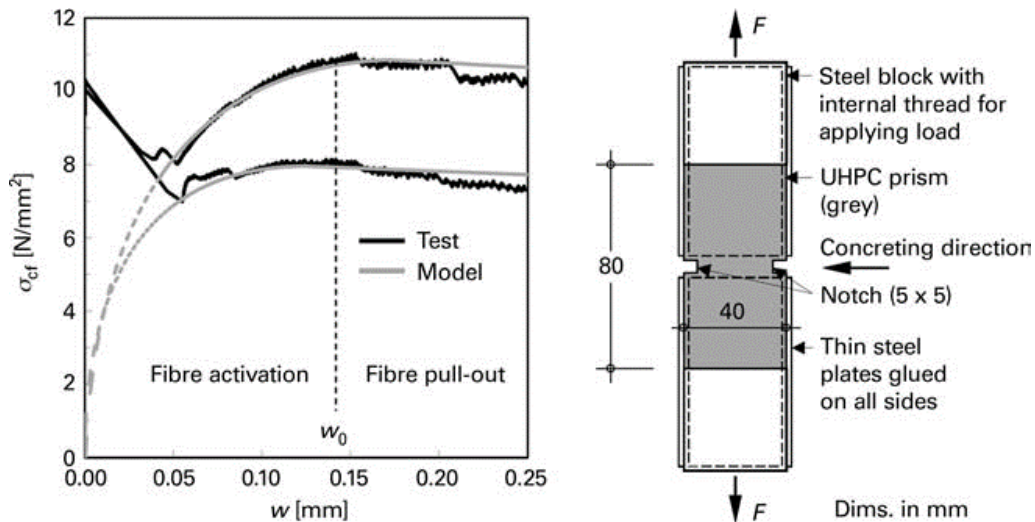
UHPC可以在相对低的纤维含量水平下实现拉伸“应变硬化”行为，而普通和高强纤维混凝土（FRC、HSFRC）无法实现拉伸“应变硬化”行为，但UHPC的变形能力低于ECC（高延性水泥基复合材料）。

纤维的加入一方面使抗拉强度更高，另一方面可通过更宽的裂缝传递应力，基体中第一条裂缝的产生会增加强度，即观察到应变硬化行为。



### 三、力学性能

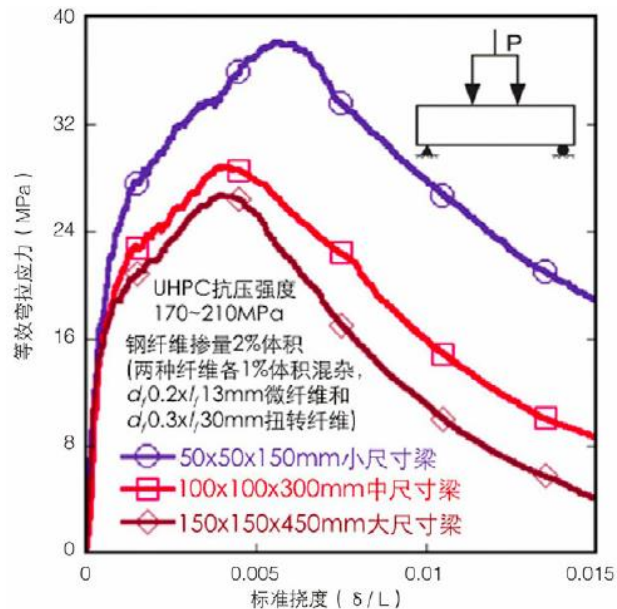
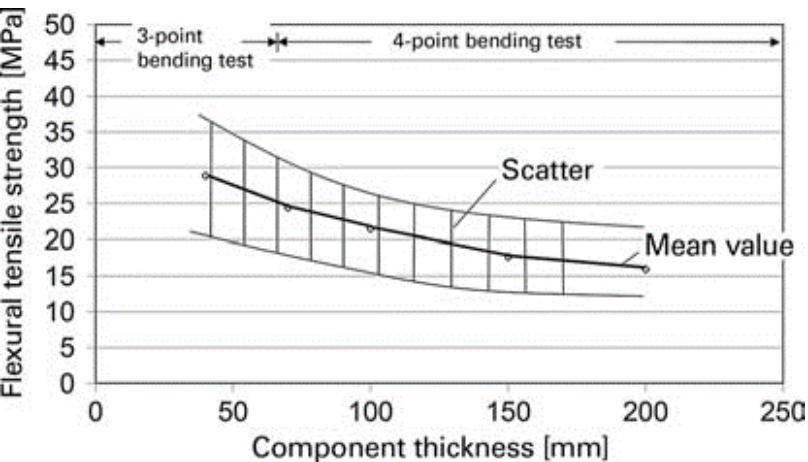
#### ■ 抗拉强度



基体破裂后，力值最初会下降（混凝土破裂应力，裂缝 $<50\mu\text{m}$ ），然后随着钢纤维的激活，强度上升。纤维承载能力完全激活后，裂缝宽度超过 $w_0$ 时会全部拔出（约为 $0.15\text{mm}$ ），同时纤维承载力下降。

# 三、力学性能

## ■ 抗弯强度

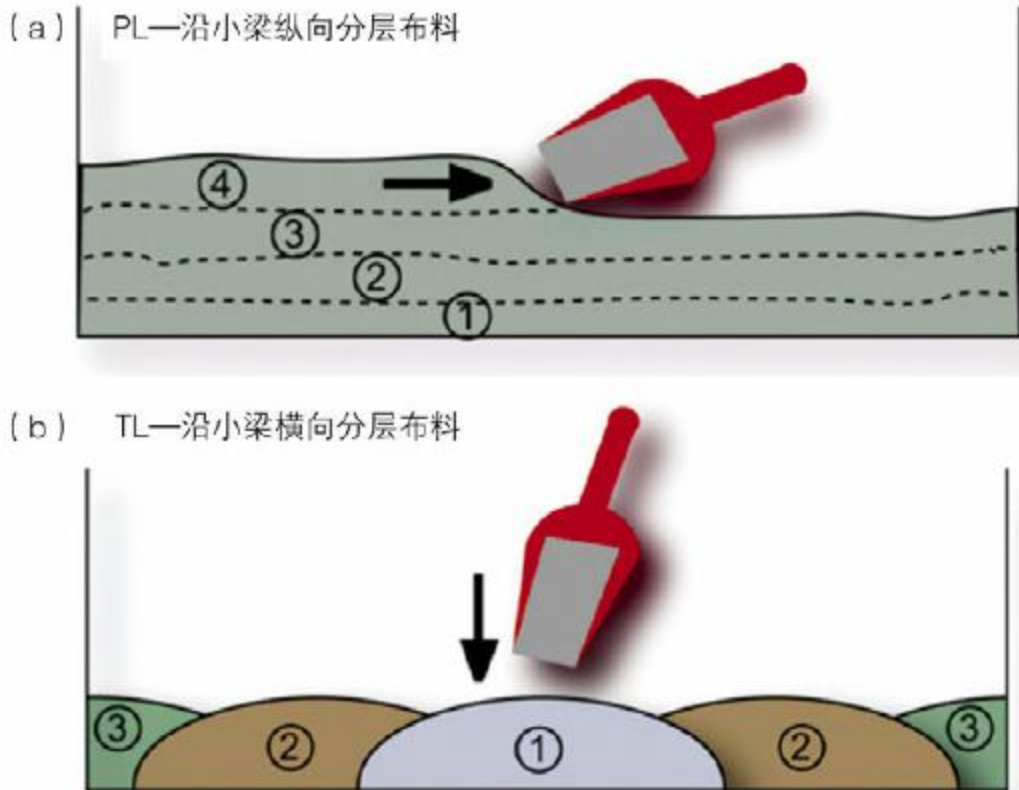


尺寸为 $160 \times 40 \times 40$ mm的棱柱体，抗弯强度能达到13-17MPa，然而同配比的 $700 \times 150 \times 150$ mm尺寸梁的值只能达到7-10MPa，存在巨大的**尺寸效应**。

# 三、力学性能

## ■ 抗拉强度

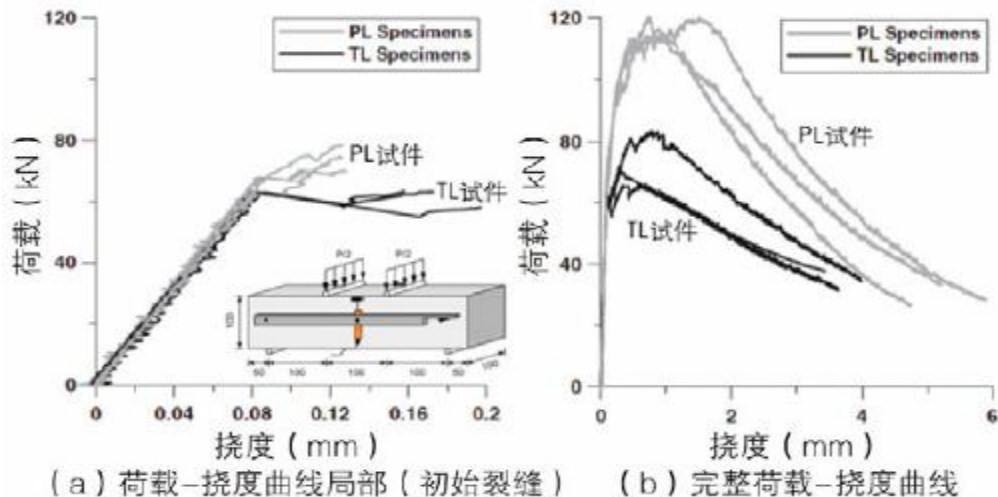
浇筑布料方式不同对纤维分布的方向性影响较大，纵向分层浇筑使钢纤维趋向于水平平面分布，有利于纤维提高小梁纵向抗拉强度。



# 三、力学性能

## ■ 抗拉强度

	初始裂缝弯曲抗拉强度		弯曲抗拉强度	
	平均值 (MPa)	标准偏差 (MPa)	平均值 (MPa)	标准偏差 (MPa)
无纤维	12.68	0.8	—	—
PL (纵向布料)	19.97	1.049	35.43	1.029
TL (横向布料)	18.93	0.085	21.99	2.683

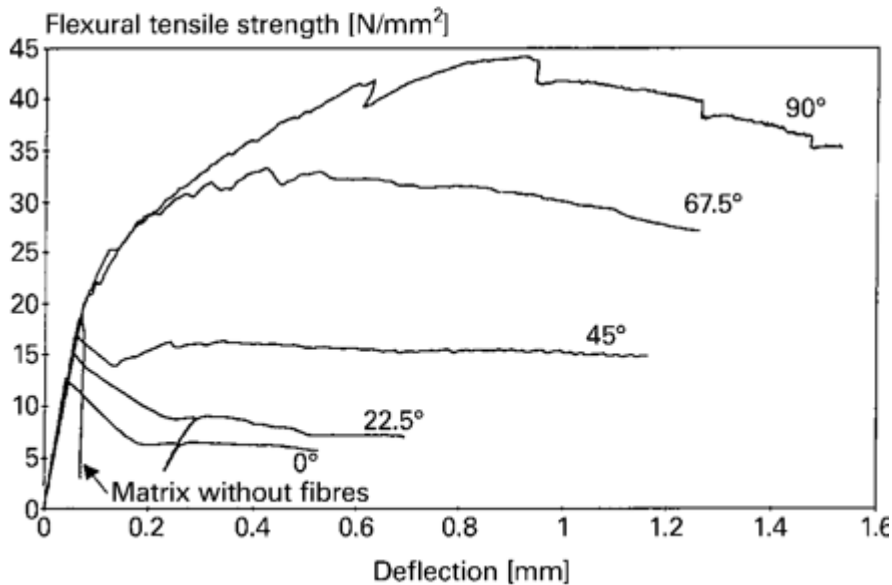
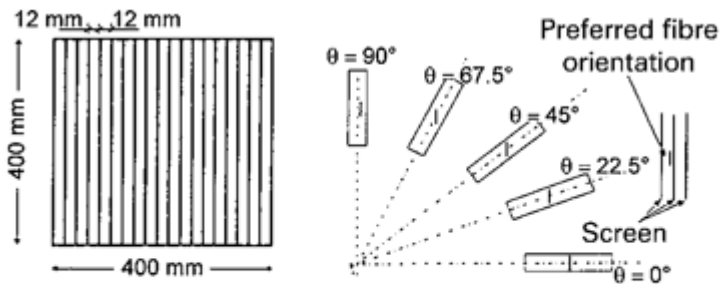


### 三、力学性能

#### ■ 抗拉强度

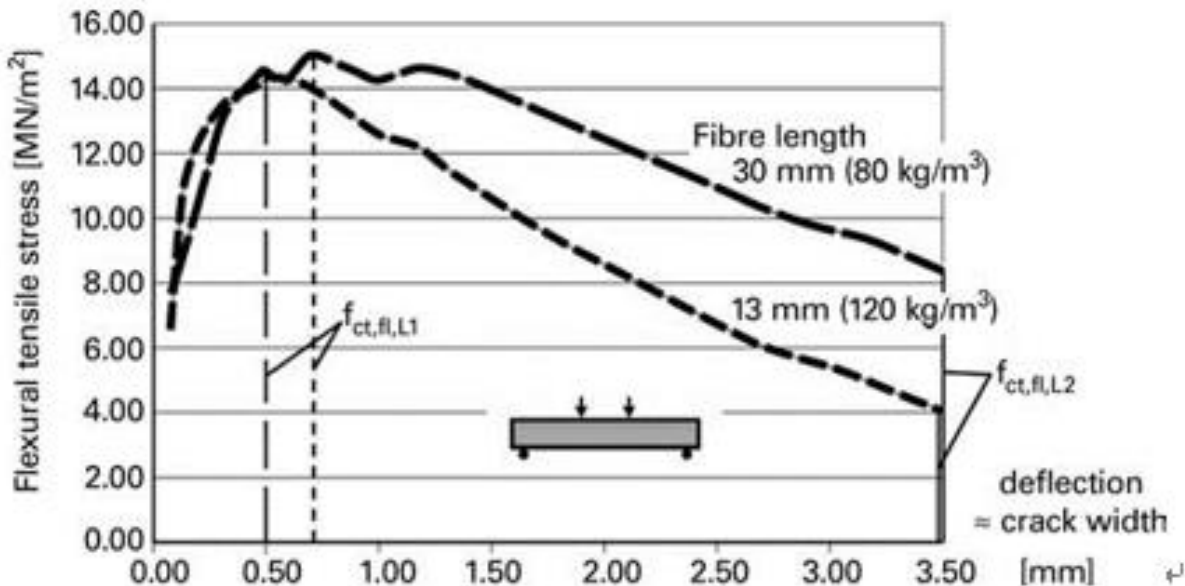
当 $\theta=90^\circ$  达到最大弯曲抗拉强度（几乎所有纤维与受拉方向相同）；

在 $\theta=0^\circ$  最不利的情况下（纤维垂直于受拉方向），纤维甚至起到了隔离混凝土基体的反作用，UHPC的抗弯强度甚至低于普通混凝土。



### 三、力学性能

#### ■ 抗拉强度

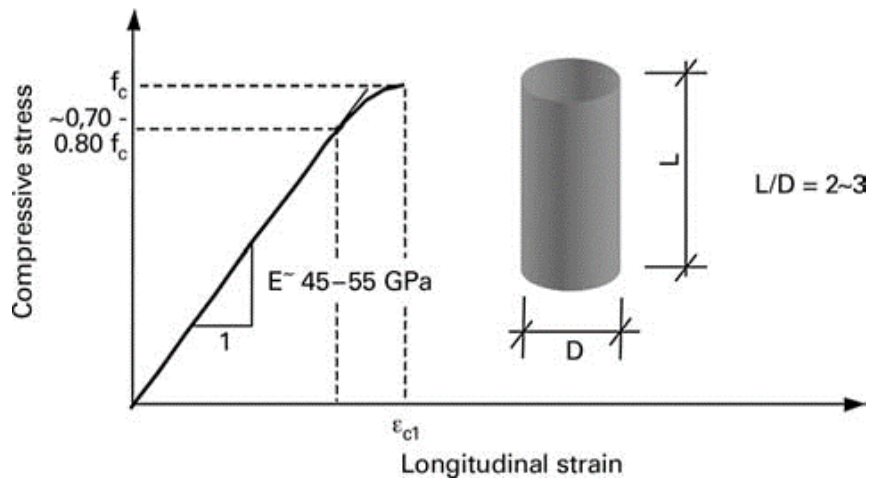


当变形（裂缝开展宽度）增加时，掺加短纤维的混凝土抗拉能力衰减速率更快

# 三、力学性能

## ■ 弹性模量

性能	普通混凝土	高性能混凝土	UHPC
弹性模量/GPa	30~40	30~40	30~60

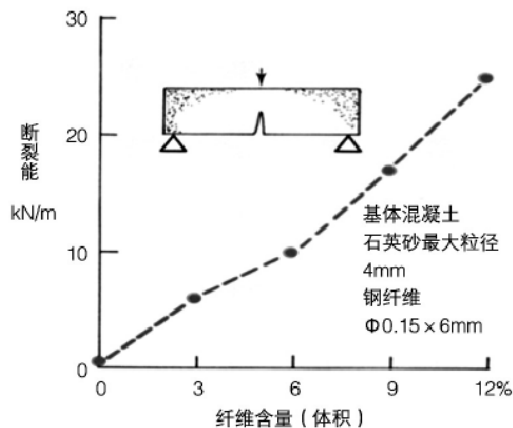


# 三、力学性能

## ■ 断裂能

材料种类	玻璃	陶瓷与岩石	普通混凝土	金属	UHPC	钢
断裂能 $J\cdot m^{-2}$	5	<100	120	>10000	30000	100000

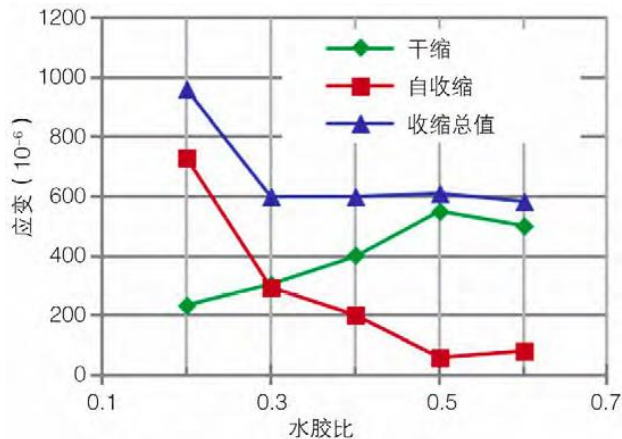
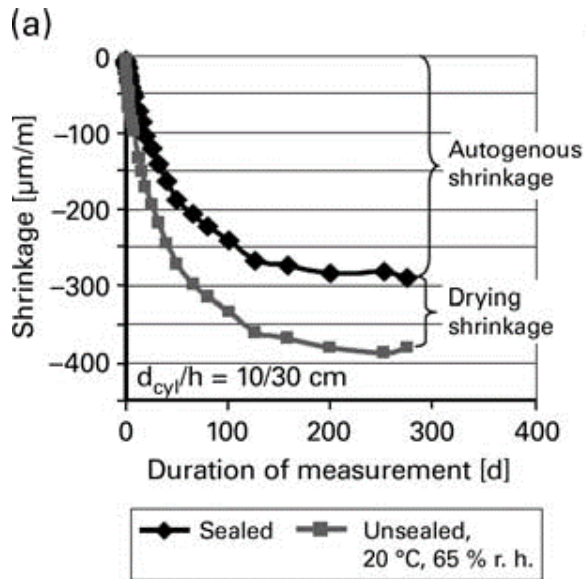
UHPC兼具高抗拉强度和高变形能力，因此UHPC的抗拉与抗弯断裂韧性大幅度超越FRC和HSFRC的断裂韧性，可以跨入韧性材料（即断裂能超过 $1000J/m^2$ ）的行列。



UHPC断裂能与纤维含量的关系

## 四、耐久性能

### ■ 体积变形

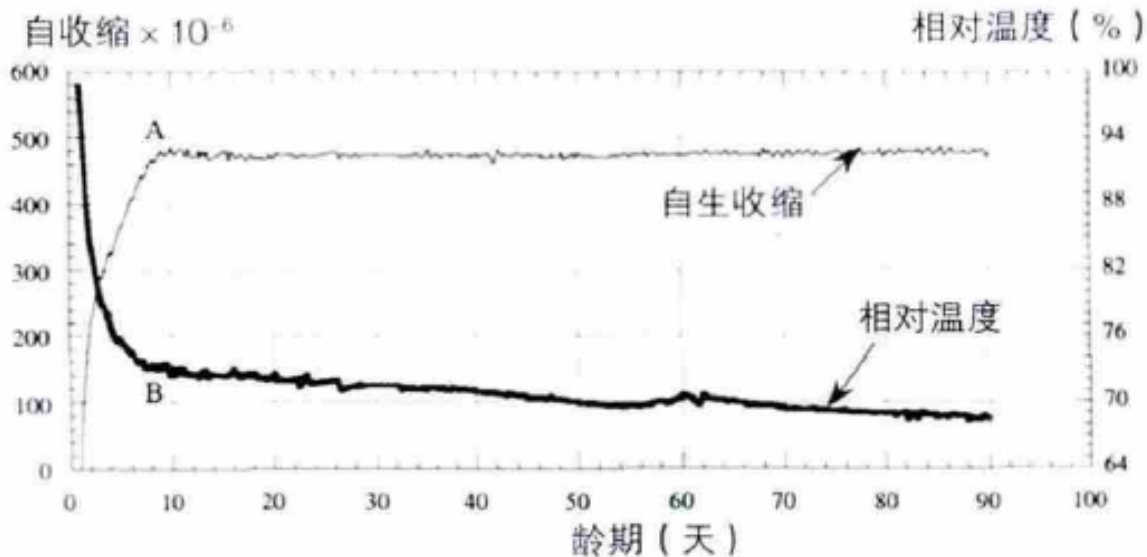


混凝土的收缩和水胶比的关系

UHPC的水胶比非常低，水化进行到一定程度导致内部干燥（自收缩），其密实的结构则有效阻止内部水分的损失，所以UHPC的干燥收缩较小。

## 四、耐久性能

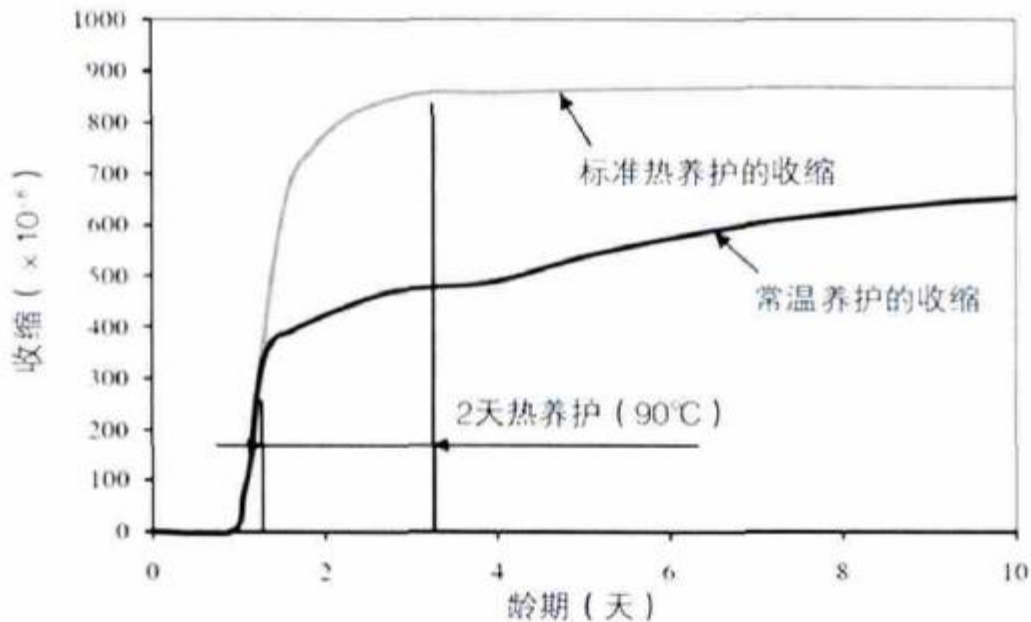
### ■ 体积变形



UHPC的自收缩与内部相对湿度变化历程

## 四、耐久性能

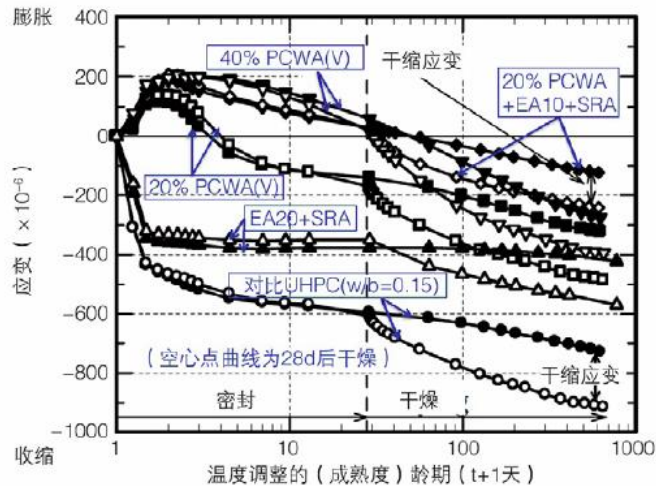
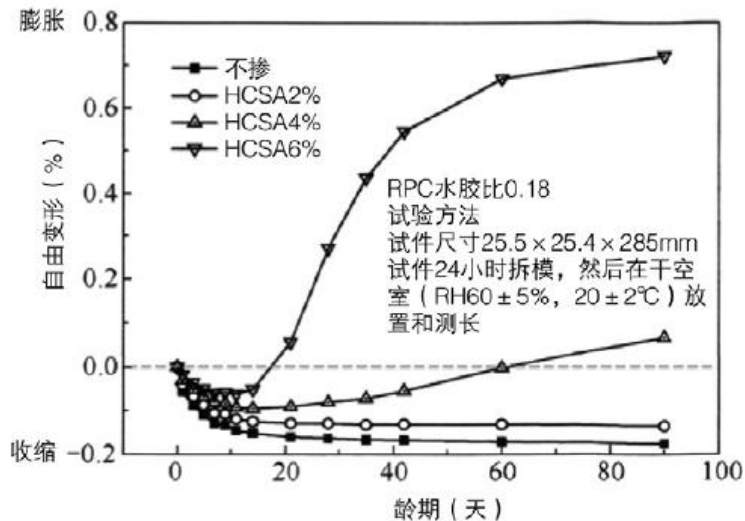
### ■ 体积变形



UHPC的收缩在经历热养护过程迅速完成，即经过热养护后体积稳定，几乎不再收缩。

## 四、耐久性能

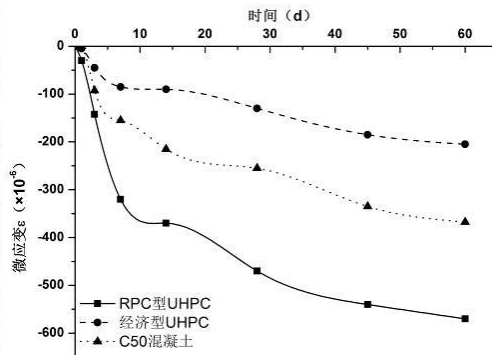
### ■ 体积变形



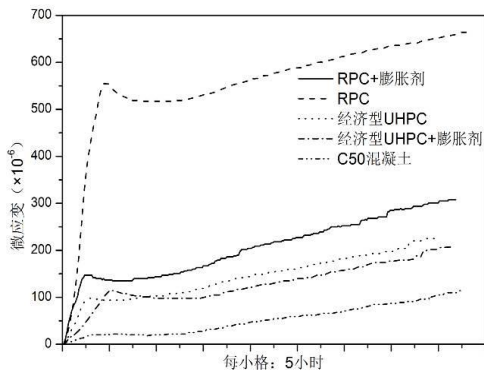
膨胀剂 (HCSA、EA)、减缩剂 (SRA) 和陶粒 (PCWA) 内养护, 减小UHPC的收缩, 取得较好效果。

# 四、耐久性能

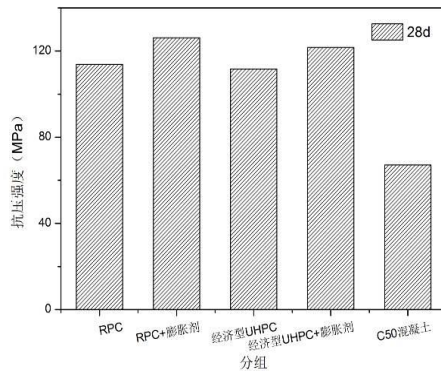
## ■ 体积变形



接触法测干燥收缩



非接触法测自收缩



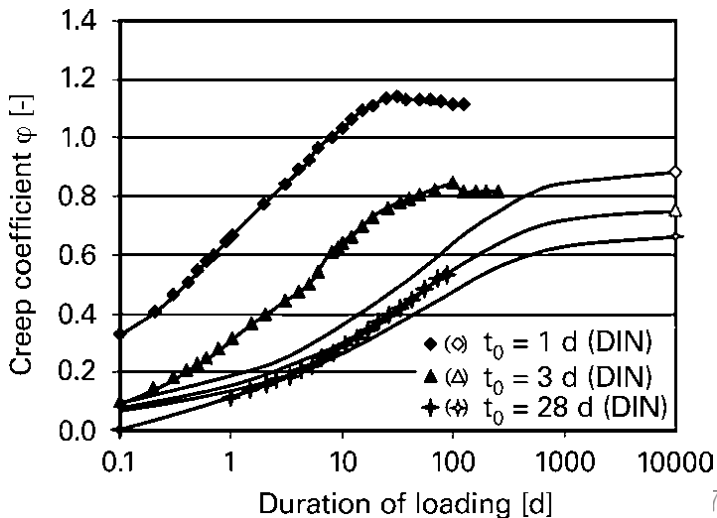
## 四、耐久性能

### ■ 徐变

与收缩相似，徐变经过预先热处理后显著减小。不经过热处理的UHPC的徐变值要比根据徐变理论预计的大得多。

UHPC的徐变值比高强度混凝土低很多，这可能是由于其致密的微观结构会阻碍毛细孔水传输的事实，另一方面可能是由于UHPC显著的自干燥效果。

不同龄期UHPC的徐变数据，并与  
DIN1045-1预测值对比

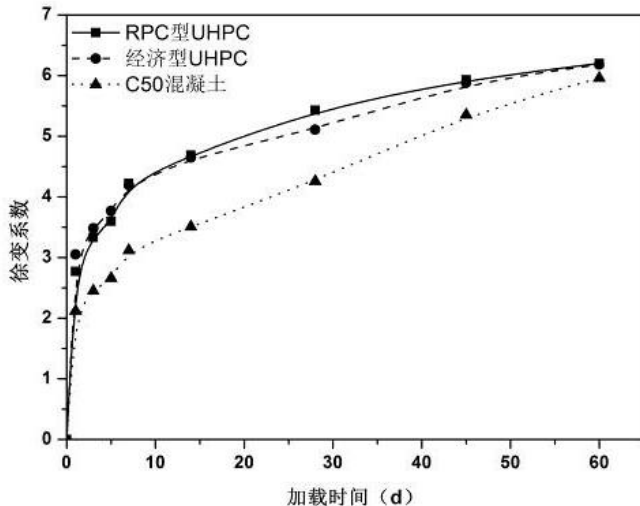


## 四、耐久性能

### ■ 体积变形



受压徐变法测徐变



徐变初步粗略估计，其数量级可以取值如下：

-无热处理的UHPC最终徐变系数： $\varphi=0.6\sim 1.4$

-热处理后的UHPC最终徐变系数（约70-90℃）： $\varphi=0.2\sim 0.4$

## 四、耐久性能

### ■ 抗冻

#### UHPC冻融质量损失率

组别	质量损失率w%				
	0次	75次	100次	150次	200次
不掺粗骨料 UHPC	0	0.03	0.05	0.06	0.08
掺加粗骨料 UHPC	0	0.03	0.05	0.11	0.11
C50混凝土	0	0.17	0.26	0.72	—

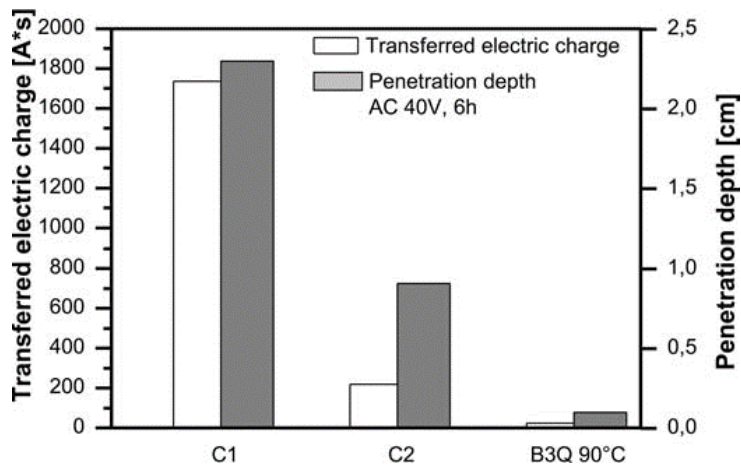
#### UHPC冻融动弹性模量变化

组别	相对动弹性模量P%				
	0次	75次	100次	150次	200次
不掺粗骨料 UHPC	100	99.7	99	98.8	98.6
掺加粗骨料 UHPC	100	99.4	99.1	98.7	97.9
C50混凝土	100	81.3	74.8	56.7	—

## 四、耐久性能

### ■ 抗侵蚀

由于UHPC有着非常致密的微观结构，对来自除冰盐或海洋环境下的氯离子抵抗能力明显高于普通强度混凝土。因此，带有UHPC保护层的混凝土为钢筋提供了更好的防锈保护。



普通强度混凝土（C2无疏水性）、粗粒度热养护UHPC的氯离子扩散深度（右）和传输电荷（左）（RCM法）

## 四、耐久性能

### ■ 抗侵蚀



UHPC三种混凝土抗离子渗透性能

组别	电通量 (C)	氯离子扩散系数 $\times 10^{-12}$
不掺粗骨料UHPC	115	0.13
掺加粗骨料UHPC	215	0.2
C50混凝土	1333	3.71

UHPC氯离子抗渗透性能远远优于普通C50混凝土

## 四、耐久性能

### ■ 抗碳化



RPC (0mm)



掺加粗骨料UHPC (0mm)



C50混凝土 (5mm)

UHPC的抗碳化性能要远远好于常规C50混凝土

# 目 录

概述

配制技术

力学性能

耐久性能

微观结构

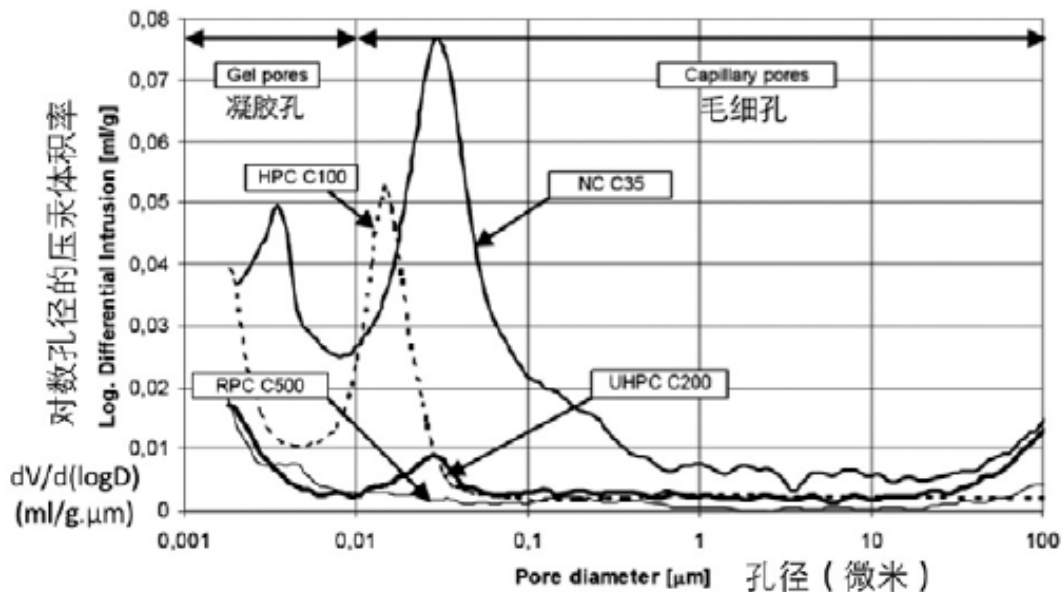
工程应用

发展趋势

## 五、微观结构

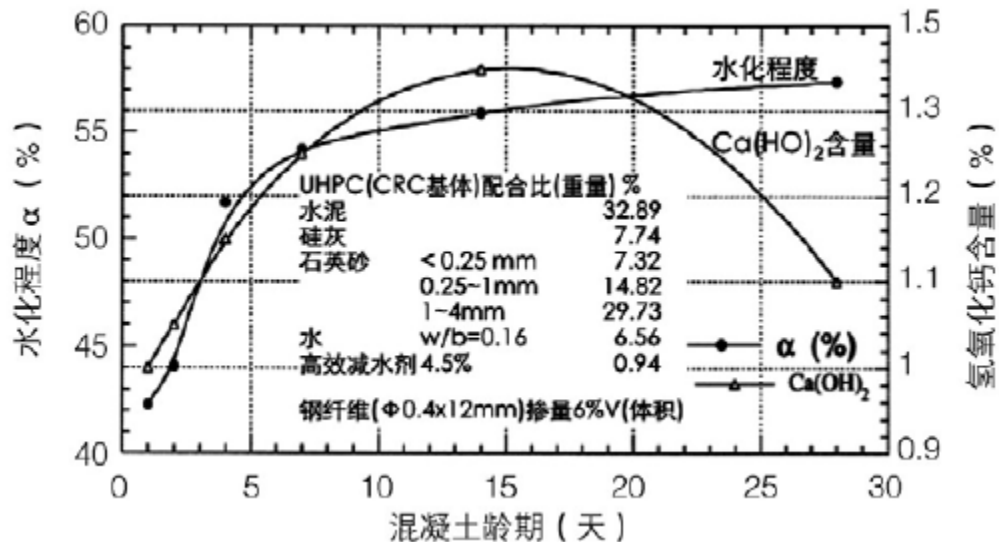
### ■ 微观结构

UHPC的总孔隙率大幅度降低，同时孔径被细化，即渗透性毛细孔所占比重也大幅度降低。对比UHPC C200与RPC C500可见，加压成型试件经250°C热养护，总孔隙率和毛细孔含量进一步降低。



# 五、微观结构

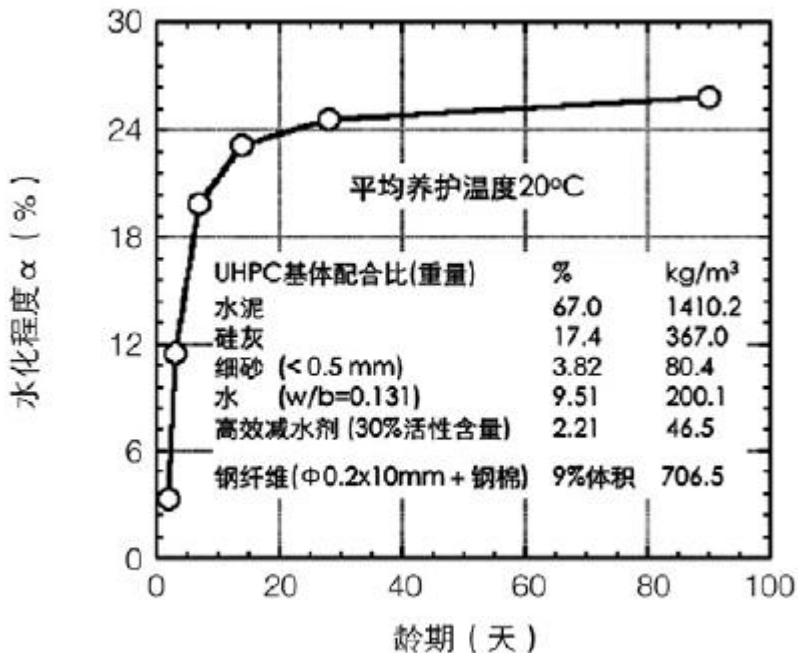
## ■ 微观结构



早期水化产生的Ca(OH)<sub>2</sub>量较大，14天达到高峰，此后硅灰的火山灰反应占主导，开始消耗降低Ca(OH)<sub>2</sub>量。

## 五、微观结构

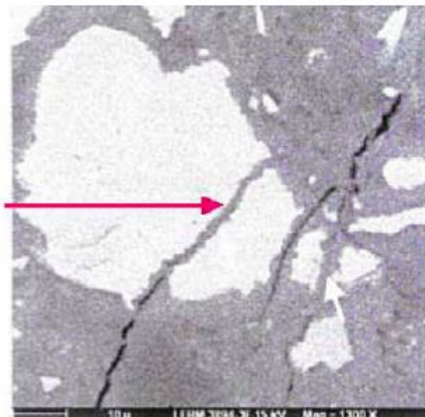
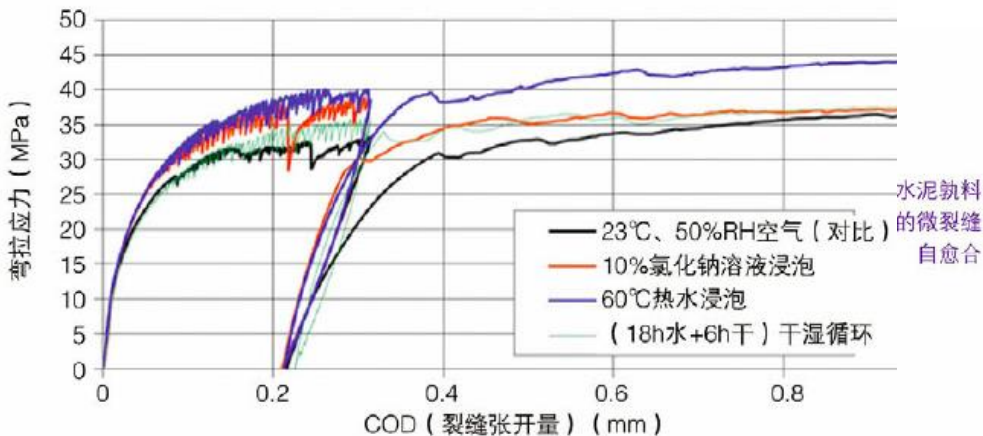
### ■ 微观结构



UHPC的3天和90天水化程度分别为12%和24%，可完成的最大水化为28%。

## 五、微观结构

### ■ 裂缝愈合性能

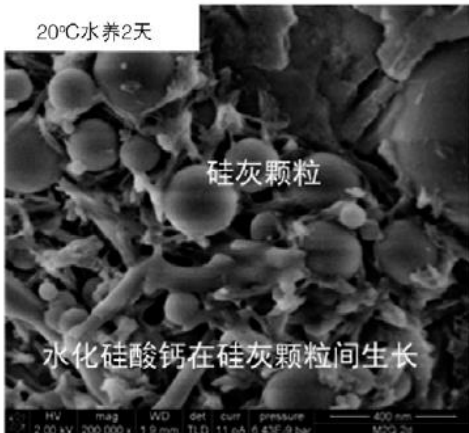


重新加载的抗弯性能没有受到影响，表现出很好的连续性，从重新加载的各条曲线斜率可以看出，热水、氯化钠溶液浸泡和经历干湿循环的试件，刚度（弹性模量）均高于在干燥空气（相对湿度50%）中存放试件。这种刚度的恢复，表明接触水的试件，裂缝有一定程度的“胶结”性愈合，提高了材料的连续性。

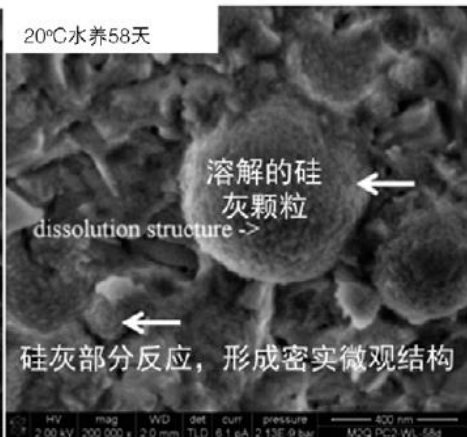
# 五、微观结构

## ■ 微观结构

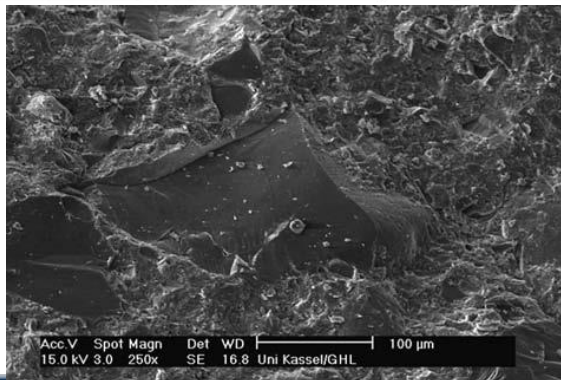
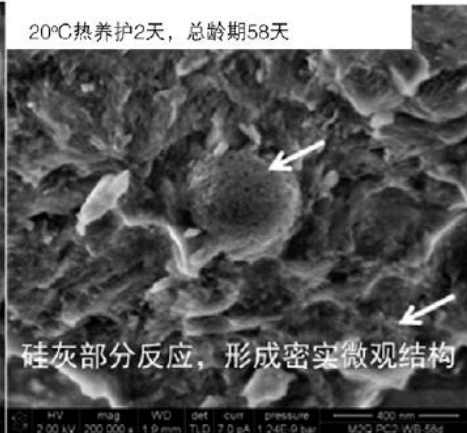
20°C水养2天



20°C水养58天



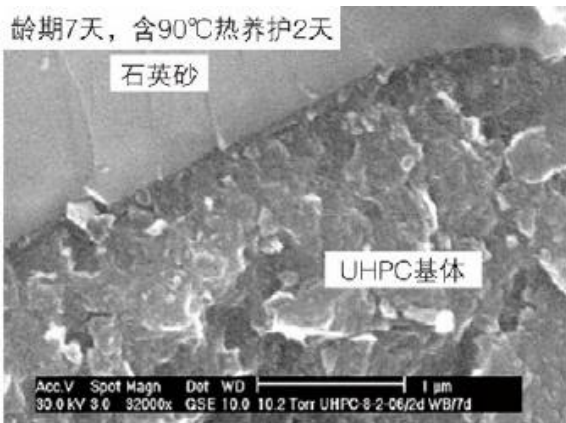
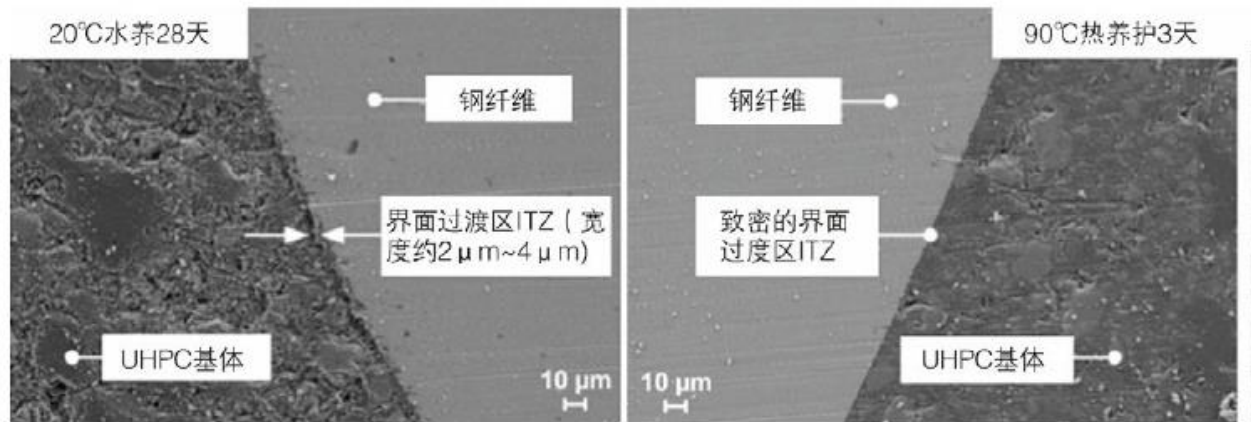
20°C热养护2天, 总龄期58天



可以直观地看到水泥水化产物生长与硅灰颗粒的火山灰反应溶解，逐步形成密实结构的过程。

# 五、微观结构

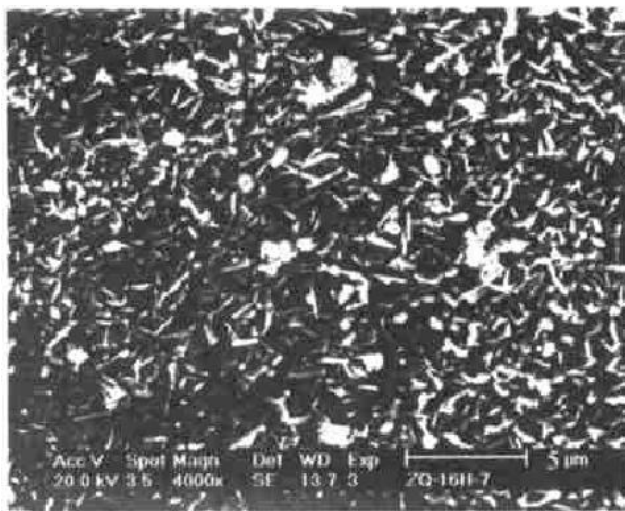
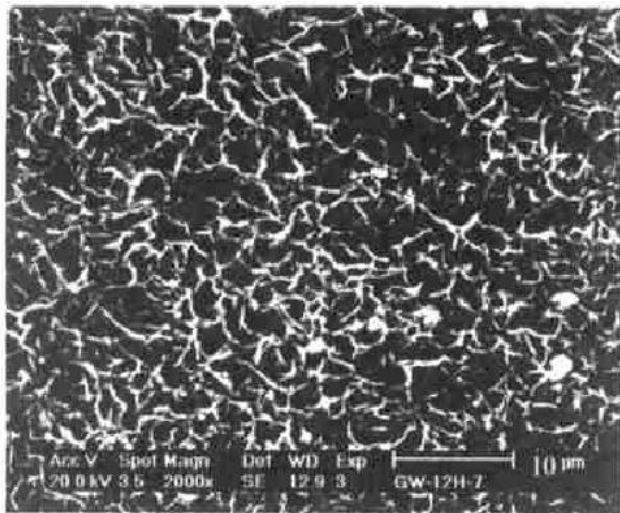
## ■ 微观结构



胶凝材料与骨料、纤维之间的界面过渡区 (ITZ) 密实度提高, 常温养护28天 UHPC的基体与钢纤维ITZ还清晰可见, 但宽度只有2 μm~4 μm, 热养护提高硅灰的火山灰反应程度, 界面的密实度与基体相似, ITZ 几乎无法辨别。

## 五、微观结构

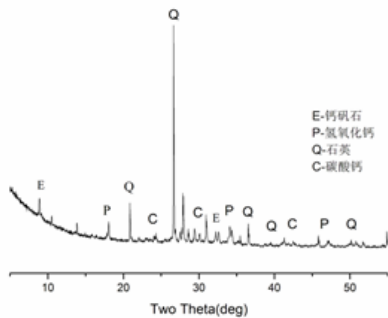
### ■ 微观结构



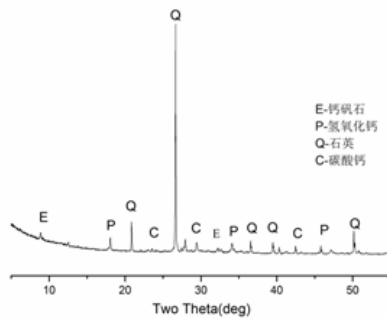
热水养护72 h的试样（左）的C-S-H水化物呈纺锤状，彼此独立、互不交联；而高温干热养护及蒸汽养护的试样（右）的水化物C-S-H是相互交错呈网络状和片状，这两种结构形式在受力性能上要优于前者，在很大程度上改善了微结构。

# 五、微观结构

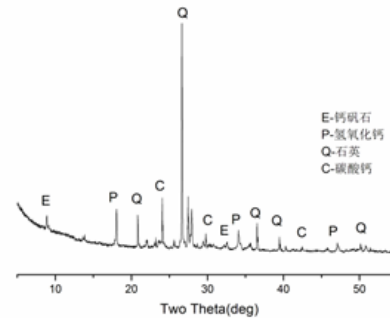
## ■ 微观结构



不掺粗骨料UHPC



掺加粗骨料UHPC

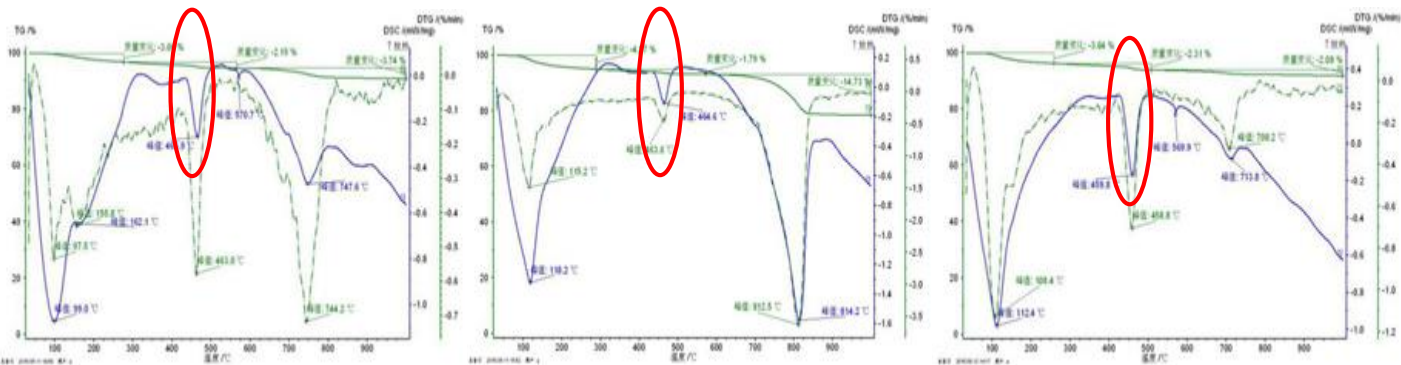


C50混凝土

UHPC矿物相主要包含钙矾石，氢氧化钙，石英和碳酸钙

# 五、微观结构

## ■ 微观结构



不掺粗骨料  
UHPC

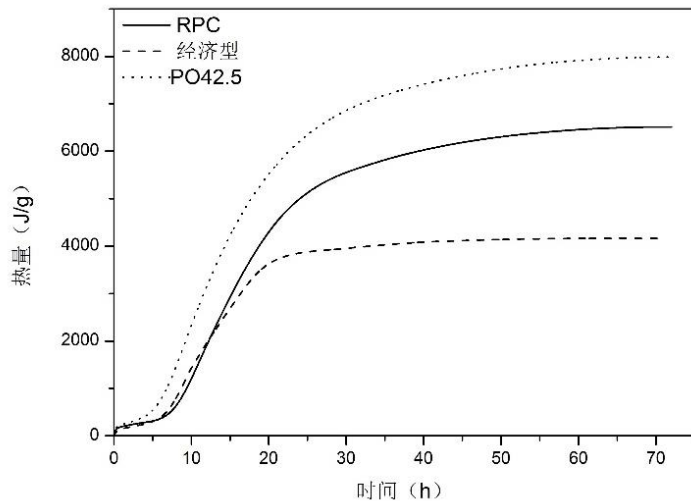
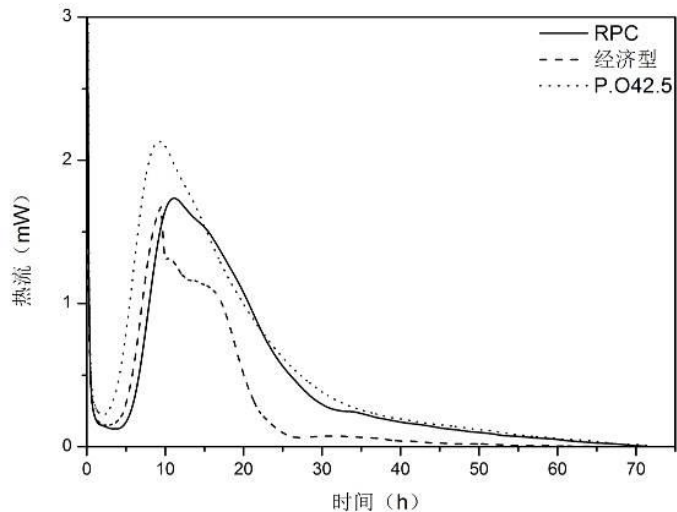
掺加粗骨料  
UHPC

C50混凝土

相比于普通混凝土，UHPC的二次水化反应消耗了更多氢氧化钙

# 五、微观结构

## ■ 微观结构



UHPC中掺入矿物掺合料可以显著的降低单位胶凝材料的水化热

# 目 录

概述

配制技术

力学性能

耐久性能

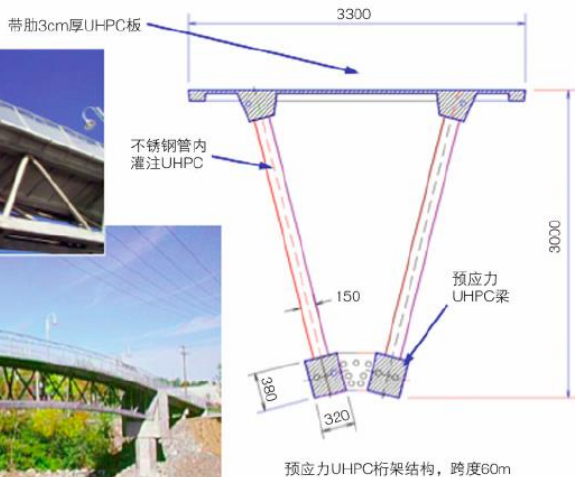
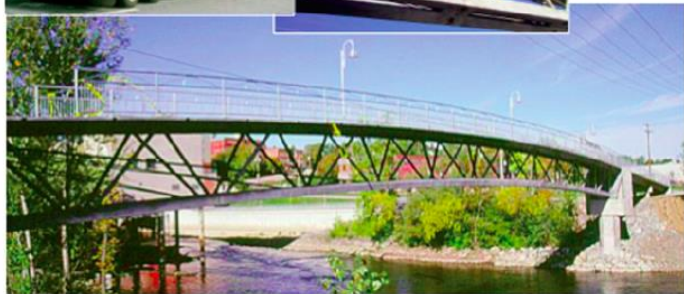
微观结构

工程应用

发展趋势

# 六、工程应用

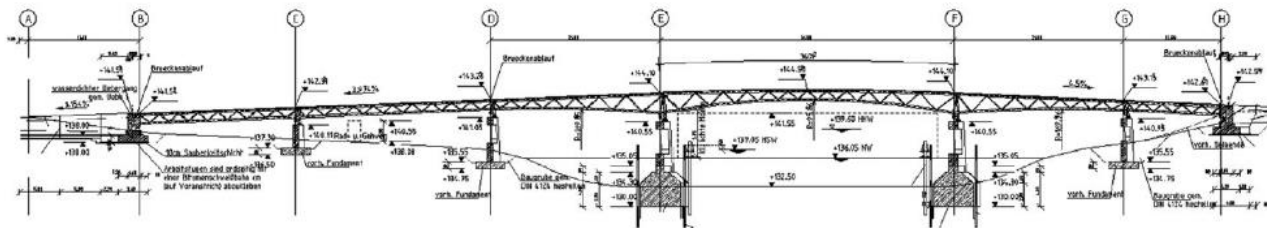
## ■ 国外应用



加拿大，**Sherbrooke footbridge**（1996），预制UHPC桁架桥，世界第一座UHPC大型结构。跨径60m，由6个长10m的小节段组成，上弦杆为带肋UHPC板，腹杆为UHPC填充不锈钢管，下弦杆由2根连续预应力UHPC梁组成（每根梁有2束体内预应力）。各预制节段由体外预应力钢束连接在一起（3×2预应力束），上下弦UHPC抗压强度200 MPa。

# 六、工程应用

## ■ 国外应用

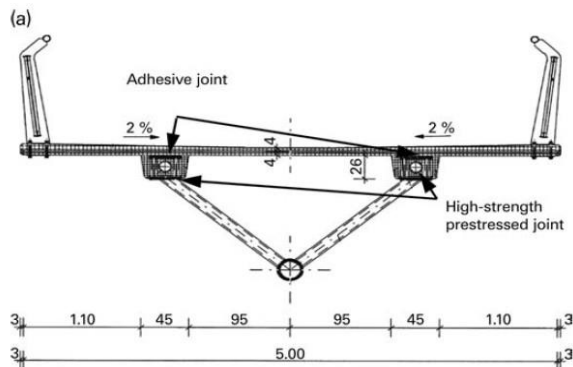


6跨，总长134m，最大跨径为36m；主梁采用变高的三角桁架型式，上弦杆为无粘结预应力UHPC构件，下弦杆和斜腹杆采用钢管，并通过摩擦型高强螺栓与上弦杆完成连接；

德国富尔达河桥

桥面板由5m宽的横向先张预应力UHPC预制板组成；

待桁架架设完成后，UHPC桥面板之间、以及与上弦杆均通过结构胶实现连接，而无任何机械连接接头。



## 六、工程应用

### ■ 国外应用

2跨（20.5m和22m），由高0.9m的预制先张预应力双T型梁拼装而成，梁由28d抗压强度210MPa，钢纤体积含量3%的自密实UHPC浇筑，常温饱和湿度养护，2天脱模；

常规强度混凝土设计方案需使用39t普通钢筋，17.4t预应力钢束；UHPC方案仅需4t普通钢筋和28t钢纤维，预应力钢束则为6t；

UHPC方案上部结构自重仅为328t（普通钢筋方案为975t）。



法国 Bourg-les-Valence OA4桥

## 六、工程应用

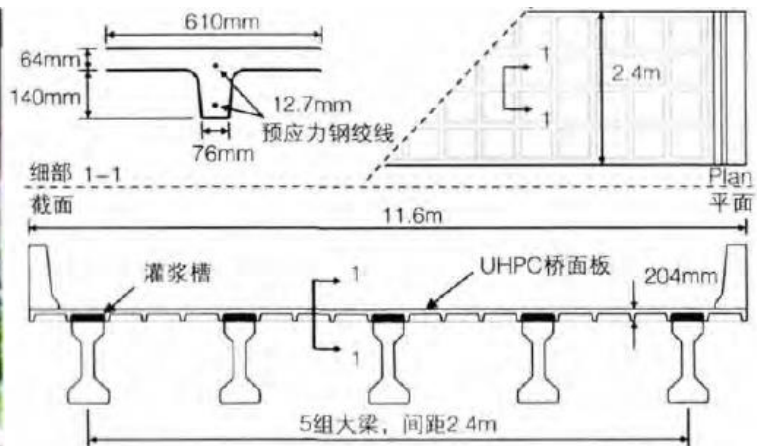
### ■ 国外应用



美国，**Wapello County Mars Hill Bridge**，单跨简支梁，美国第一座I型UHPC桥，梁内无抗剪箍筋，利用UHPC自身的高抗拉性能。

# 六、工程应用

## ■ 国外应用



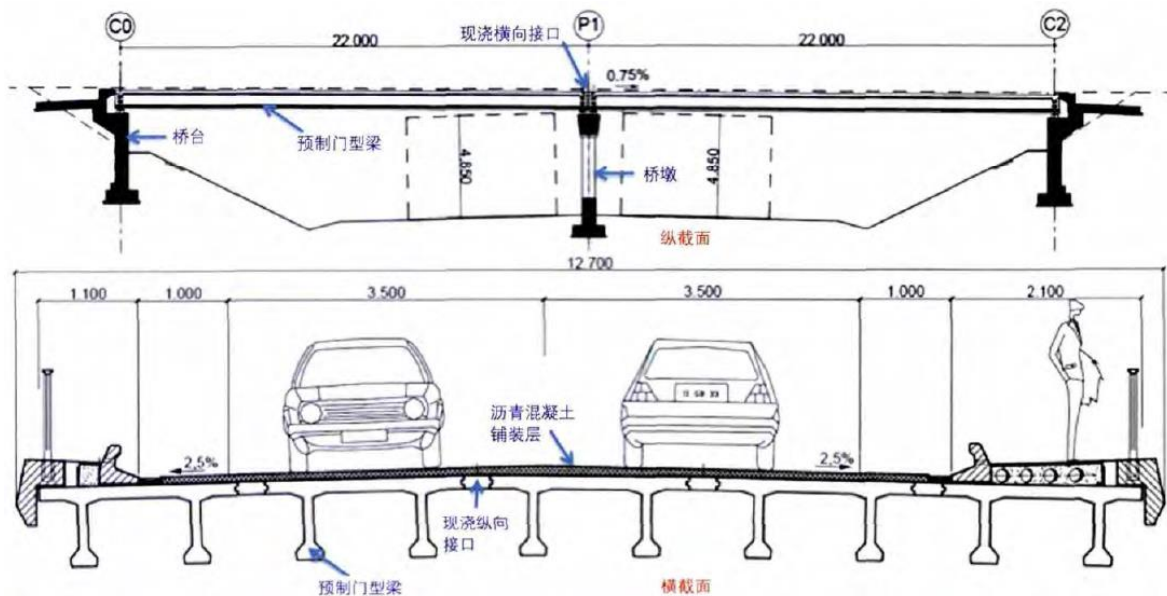
美国 Little Cedar Creek桥井字肋板结构桥面板

传统混凝土梁或钢梁上铺设预制UHPC井字肋板结构桥面板，桥面板与梁之间、桥面板相互间采用现场灌注UHPC连接，设置抗剪栓钉、钩、传力杆等保证连接的强度和可靠性，能有效解决化冰盐导致桥面板快速劣化的问题。



# 六、工程应用

## ■ 国外应用



双T型梁中有30束高强预应力钢绞线，不设被动钢筋，仅设置横向和纵向接口的连接钢筋；

接口用自密实UHPC现场灌注，刚性连接形成连续、无缝整体桥面板，上面直接铺设沥青混凝土铺装层。

# 六、工程应用

## ■ 国外应用

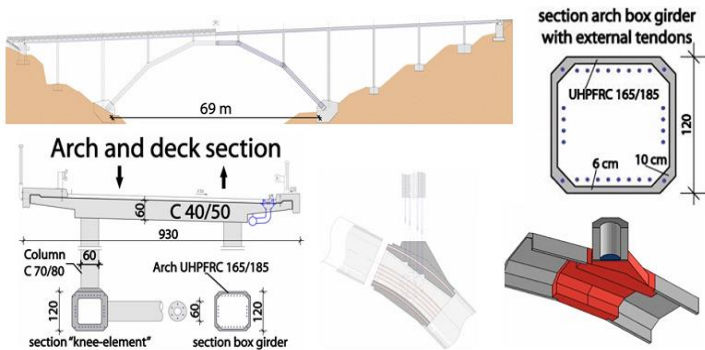
### 奥地利, Wild公路桥



长154m, 并列双桁架拱, 由预制正方形薄壁箱梁和接头现场组装而成, 拱内部安装体外后张预应力钢索施加预应力;

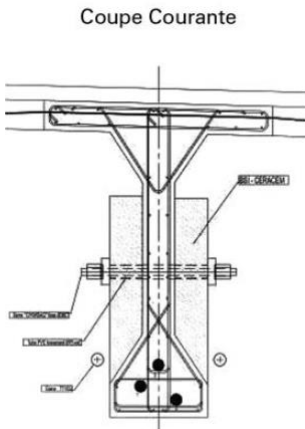
UHPC强度等级为C185, 构件成型2天脱模, 3天后进行90°C热养护, 使构件收缩快速完成;

是拱桥轻型化的一次尝试, 也是超大长细比预应力UHPC柱性能一项基础研究。



# 六、工程应用

## 国外应用

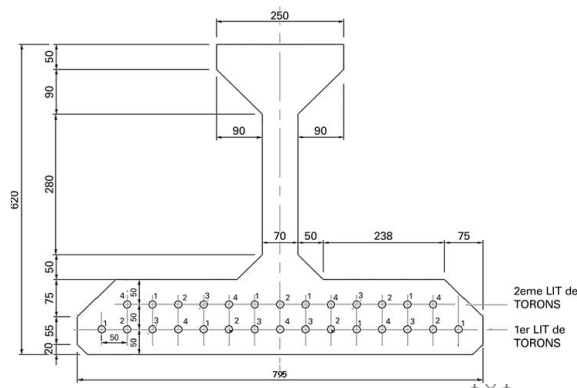


UHPC  
加强腹板

### 法国皮内尔公路桥

上部结构由C35/C45的混凝土桥面板和17个预应力UHPC梁组合而成；

纵向主梁UHPC的抗压强度为165MPa，配合比：  
2360kg CERACEM BFM-Millau预混料（水泥和骨料的干混料），45kg高效减水剂，195kg水，195kg钢纤维。



## 六、工程应用

### ■ 国外应用

UHPC箱型梁顶板宽4.4m（含翼板）、高度1.63m，工厂预制22个镶合成型（match-cast）箱梁节段，现场节段拼接，节段相互粘接，用6束体外预应力钢索张拉形成整体，然后整体吊装就位，梁总重量小于200吨。

厚度0.14m的箱梁顶板，既是桥面板也是路面板，不铺设防水层和沥青混凝土铺装层。在箱梁预制成型时，使用特殊纹理模板，使箱梁顶面直接浇筑形成UHPC粗糙纹理，作为车行路面，保证抗滑性能。

同样功能跨线桥，需要使用200方的C45混凝土，该桥的UHPC用量约方，施工周期缩短至少1个月，并且取消了中间桥墩、桥面防水和铺装层。



法国A51公路PS34桥



## 六、工程应用

### ■ 国外应用



#### 法国 Pont de la Chabotte 公路桥

由22个预制节段采用粘结剂和体外预应力连接而成；

UHPC节段高1.6m，腹板厚度120mm，匹配浇筑预制工艺；

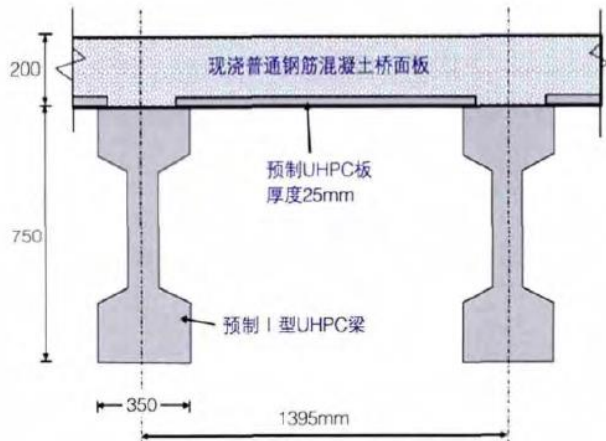
选用了BCV的两种产品，一种是28d抗压强度为130MPa（无热养护），  
另一种是150MPa（热养护）；

与采用C35/C45的混凝土结构比，混凝土用量仅为其40%；

现场施工时间减少了1/3。

## 六、工程应用

### ■ 国外应用



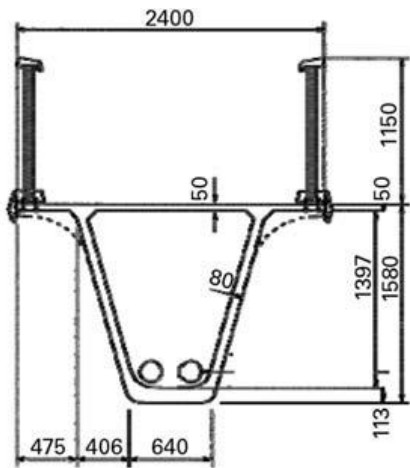
澳大利亚， **Shepherds Creek Road Bridge** ，跨径15m，桥宽21m，第一座I型UHPC梁公路桥。

在两个I型UHPC主梁之间，搭设25mm厚度的UHPC板作为永久模板，上面浇筑普通钢筋混凝土桥面板，UHPC板具有永久模板和保护上部结构两个功能。

## 六、工程应用

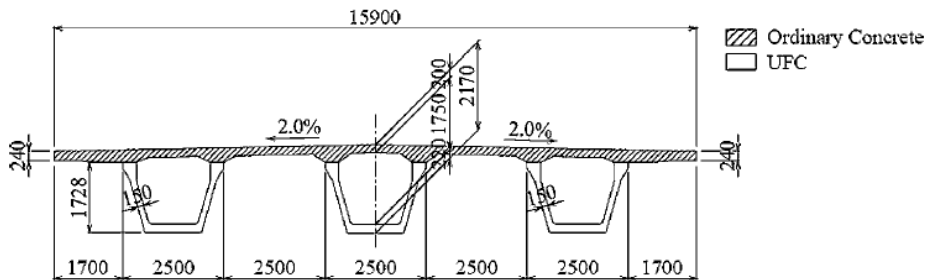
### ■ 国外应用

日本，**Sakata Mirai footbridge**，  
后张法预制箱梁，在临时支架上进行  
拼装施工，恒载仅约为普通预应力混  
凝土桥的1/5。



# 六、工程应用

## ■ 国外应用



### 东京机场GSE桥（2010）

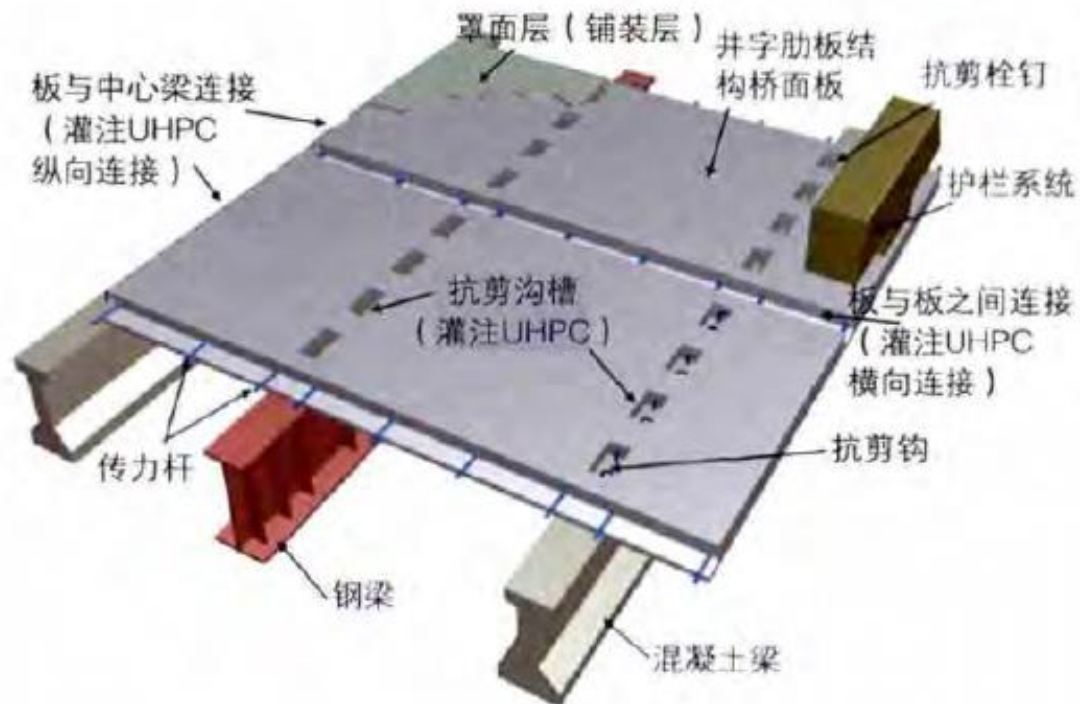
自密实UHPC抗压强度180MPa，水灰比接近限值0.24，钢纤维体积掺量2%，直径0.2mm，长15mm；

桥梁结构由三箱形截面组成，顶板采用传统的钢筋混凝土，腹板和底板采用UHPC，预应力筋布置在箱室内；

UHPC腹板与普通钢筋混凝土桥面板之间设有开孔UHPC板剪力连接件，由于桥面板悬臂较长，这些连接件也受到竖向拉拔力。

## 六、工程应用

### ■ 国外应用

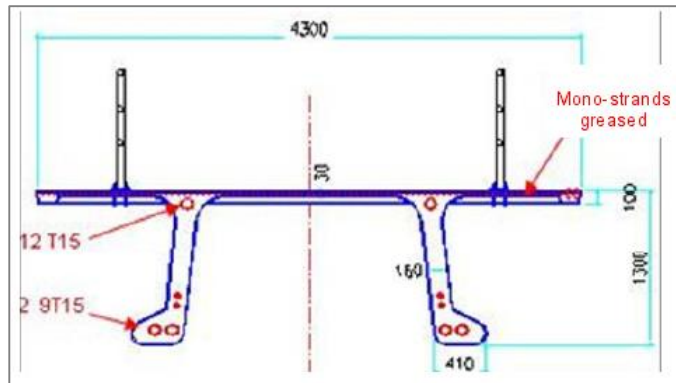


## 六、工程应用

### ■ 国外应用



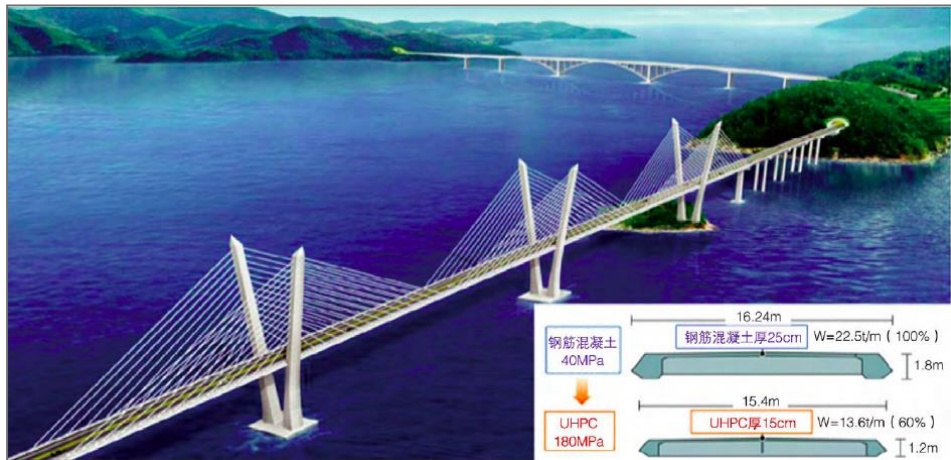
韩国首尔，Sunyudo (Peace) footbridge (2002)，120mUHPC拱桥，由6个后张法 $\pi$ 型和横向加劲肋组成的预制预应力节段组装。



## 六、工程应用

### ■ 国外应用

韩国建筑技术研究院（KICT）从2007年开始，开展了为期6年、总预算达1100万美元的UHPC研究项目—Super Bridge 200。研究的主要目标为：使斜拉桥的建造成本和保养维护成本分别降低20%，主要结构构件的工作寿命达200年。

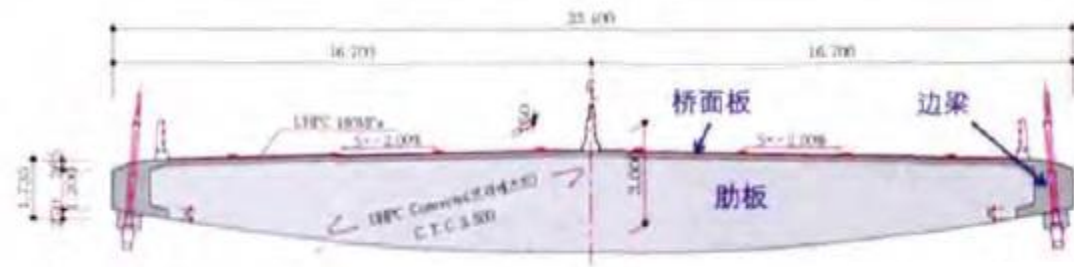


采用新型带肋钢纤维增强UHPC桥面板结构及边主梁形式，大桥于2011年设计完成。

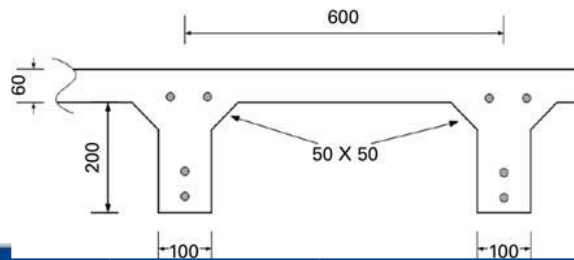
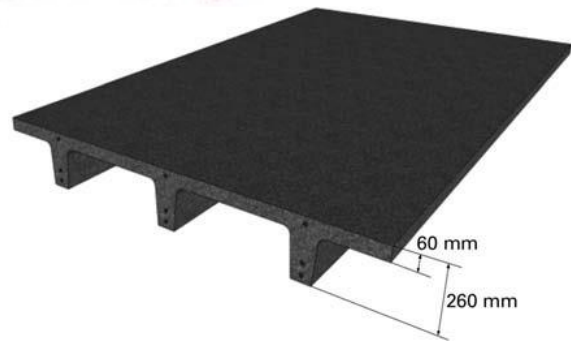
韩国Jobal斜拉桥效果图和UHPC梁板结构

## 六、工程应用

### ■ 国外应用



预应力肋纤维增强UHPC桥面板，板厚为60mm，肋与肋中心之间的间距为600mm，这种桥面板结构比传统混凝土桥面板轻50%。

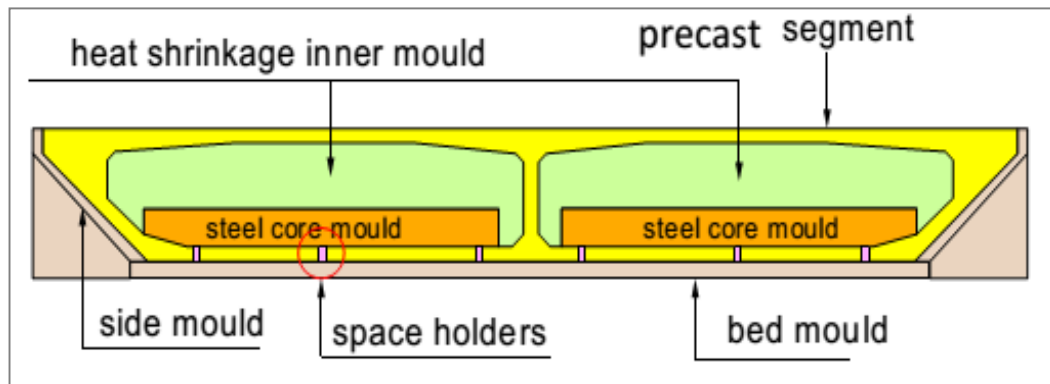


## 六、工程应用

### ■ 国外应用



生产和安装预制段

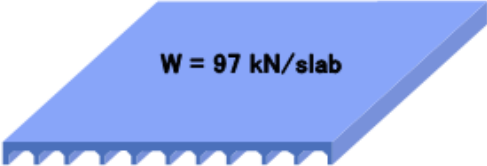
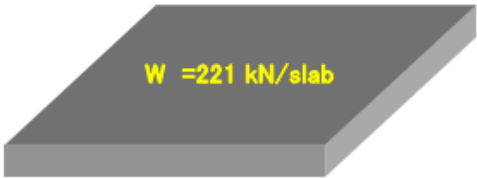


预制段干接缝

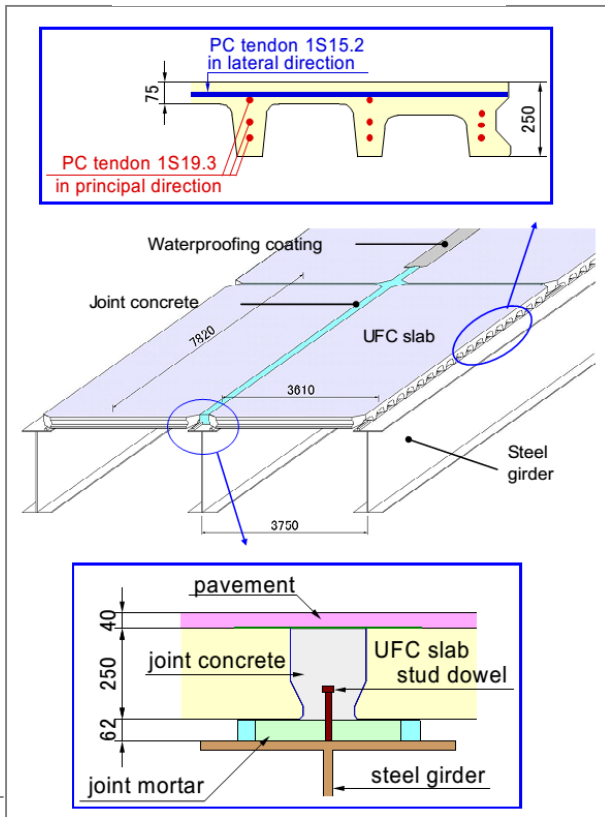
# 六、工程应用

## ■ 国外应用

### UHPFRC板、混凝土板的比较

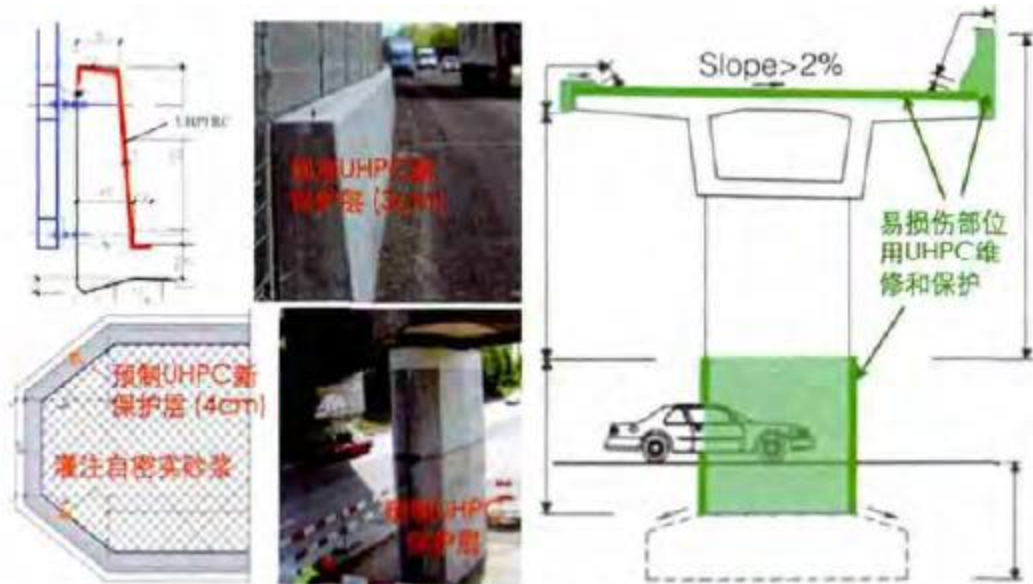
<b>UFC Slab</b>
 <b>W = 97 kN/slab</b>
Average thickness=135 mm
unit dead load=3.83 kN/m <sup>2</sup>
<b>Conventional Concrete Slab</b>
 <b>W =221 kN/slab</b>
Average thickness=320 mm
unit dead load=7.84 kN/m <sup>2</sup>

### UHPFRC板的结构



## 六、工程应用

### ■ 国外应用

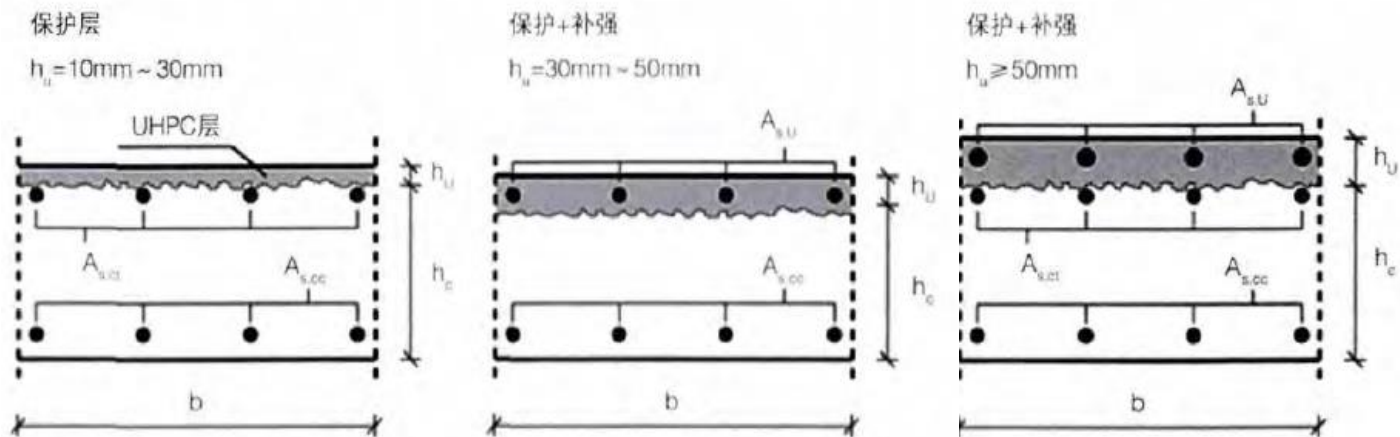


结构维修加固

用高压水刀清除旧结构上损伤、已经劣化或被腐蚀性介质污染的混凝土层，去除和更换锈蚀的钢筋，然后在旧结构上现浇铺设UHPC保护层或补强层、增强层，或在结构外围安装预制的UHPC保护加固层。

## 六、工程应用

### ■ 国外应用



表面层损伤劣化混凝土结构的UHPC维修办法

## 六、工程应用

### ■ 国外应用



日本，东京湾羽田机场扩建工程，顶面为预应力UHPC板

利用UHPC的超高强度大幅度降低结构重量，重量减小56%，因此降低了桩基础的建设成本；

保证混凝土结构在高腐蚀性环境的耐久性，减小使用期的维护维修费用。

## 六、工程应用

### ■ 国外应用

用UHPC制造的建筑结构、功能或装饰构件，轻巧美观，坚固耐久，彻底改变了混凝土构件“粗、厚、笨、重”的面貌。

薄壳结构



## 六、工程应用

### ■ 国外应用

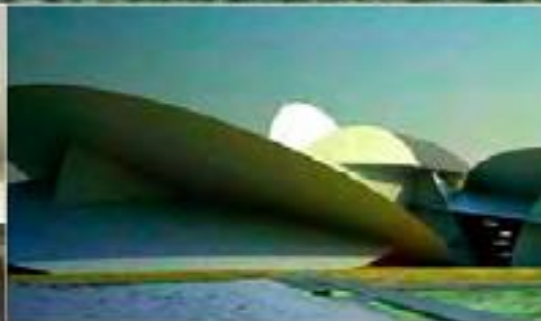
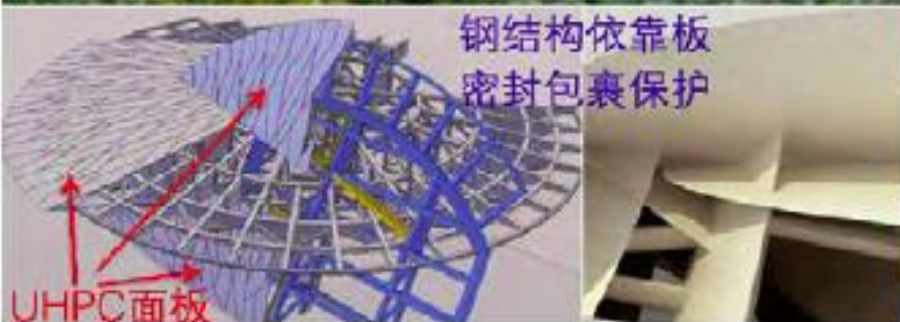


轻薄构件

## 六、工程应用

### ■ 国外应用

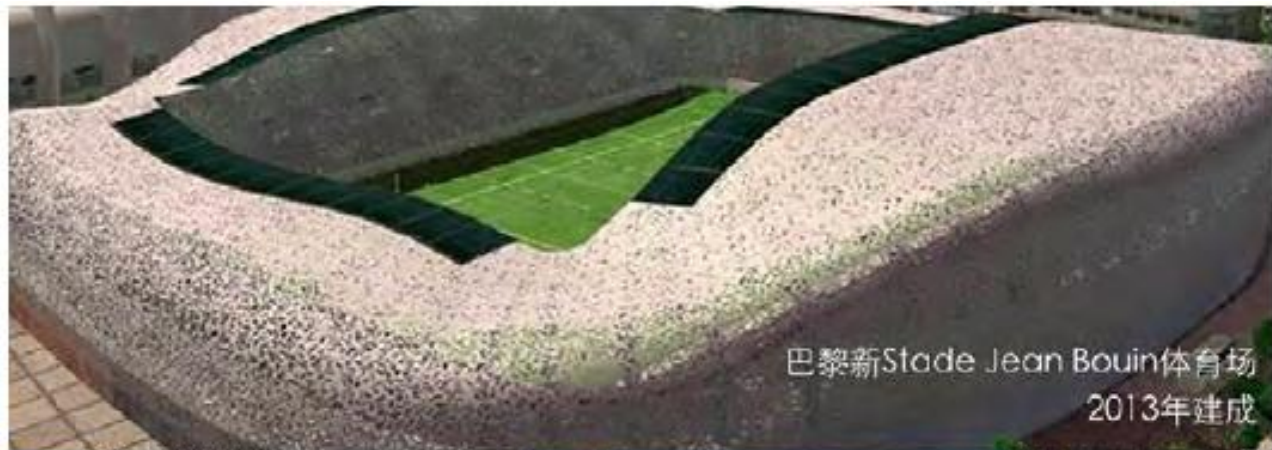
石膏花造型的卡塔尔国家博物馆（QNM）



建筑面板

## 六、工程应用

### ■ 国外应用



建筑维护和屋面结构

# 六、工程应用

## ■ 国外应用



承重结构和维护幕墙

# 六、工程应用

## ■ 国外应用

### 打入式桩

打入就位后，UHPC桩桩头状态完好，钢桩头部则有变形；

打入后UHPC桩内埋设的应变计八成多还能工作，显示内部应变在打桩前后几乎没有变化，并且UHPC桩内的残留应力很小；

承载力测试显示，UHPC桩的轴向承载能力比同外形尺寸钢桩高86%，这可能因为UHPC桩的截面尺寸较大，提高了桩端的承载力；

这意味，对于同样的桩基础，使用UHPC桩，需要桩的数量可以减少，可能能够降低桩基础整体的造价。



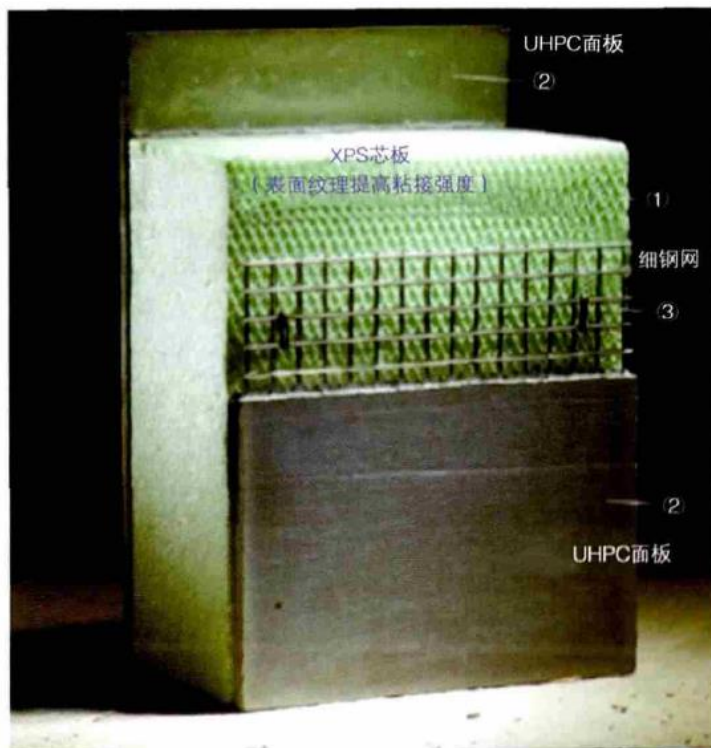
## 六、工程应用

### ■ 国外应用

#### “三明治”保温墙板

UHPC薄板作为面板、挤塑聚苯乙烯泡沫板（XPS）作为保温芯层，三层构成的“三明治”保温墙板；

UHPC超高强度和韧性有助于降低面板重量，XPS则是高效隔热材料。



## 六、工程应用

### ■ 国内应用

长沙北辰三角洲横四路跨街天桥，国内首座UHPC桥梁，国际首座全预制拼装工艺UHPC车行箱梁桥；

36.8m主跨一跨过街，重量较两跨过街的普通混凝土结构方案减轻近1/3；



## 六、工程应用

### ■ 国内应用

上部结构采用R150单箱三室鱼腹式节段预制拼装预应力UHPC连续箱梁，箱梁顶宽6.5m，底宽3.0m，中心高1.35m，主跨跨高比约为28，底板厚8cm、顶板厚10cm；

下部结构采用R100UHPC双向曲线花瓶式整体预制桥墩，截面最小尺寸60cm；

预制主梁内设置10束通长 $\Phi$ S15.2低松弛钢绞线预应力束，孔道采用抗压强度100MPa的DSP灌浆；

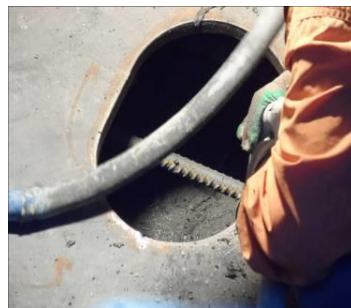
箱梁采用短线预制、长线拼装工艺架设，2个5.4m高的桥墩均为整墩预制吊装。



## 六、工程应用

### ■ 国内应用

怒江二桥，施工控制提出采用斜拉索一次张拉到位的工艺，而为保证钢混结合段受力满足要求，需提高结合段混凝土强度，因此，提出将内腔C55混凝土换成强度可达100MPa的UHPC。抗压强度132.7MPa（沸水48h养护）、115.9MPa（标养32d）、100.9MPa（现场养护32d）。



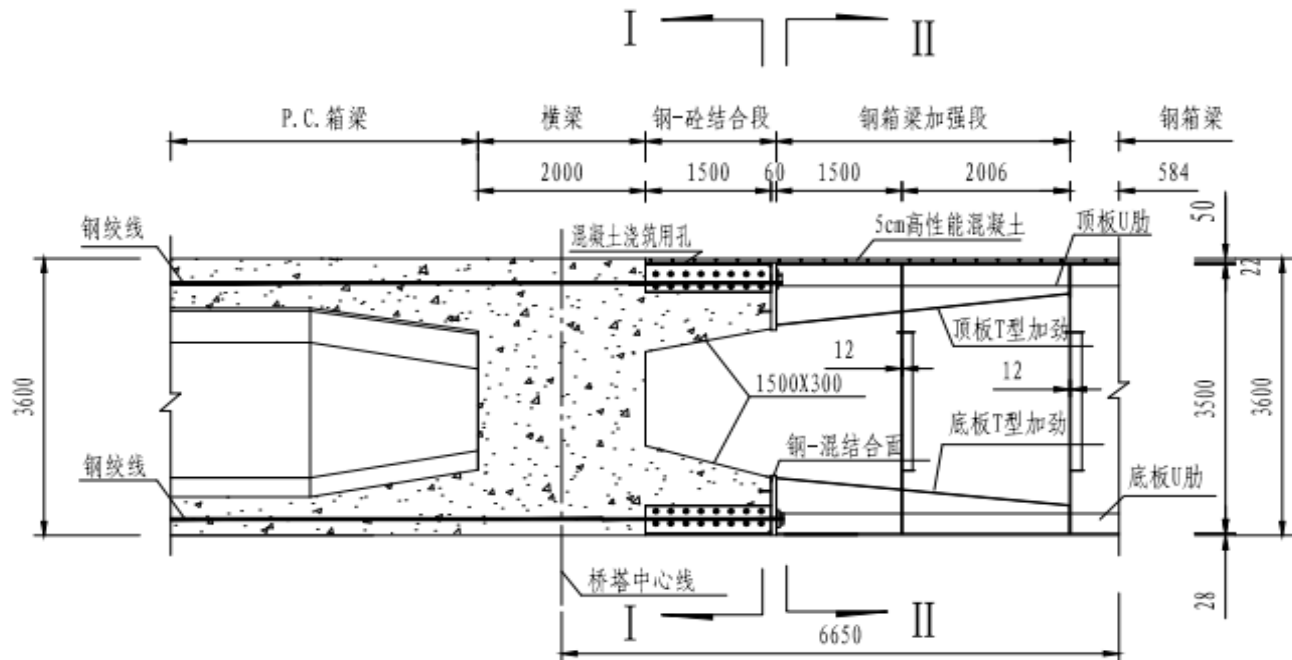
泵送浇筑UHPC，总浇筑方量为90m<sup>3</sup>

# 六、工程应用

## 国内应用

### 立面图

(1:100)



## 六、工程应用

### 国内应用

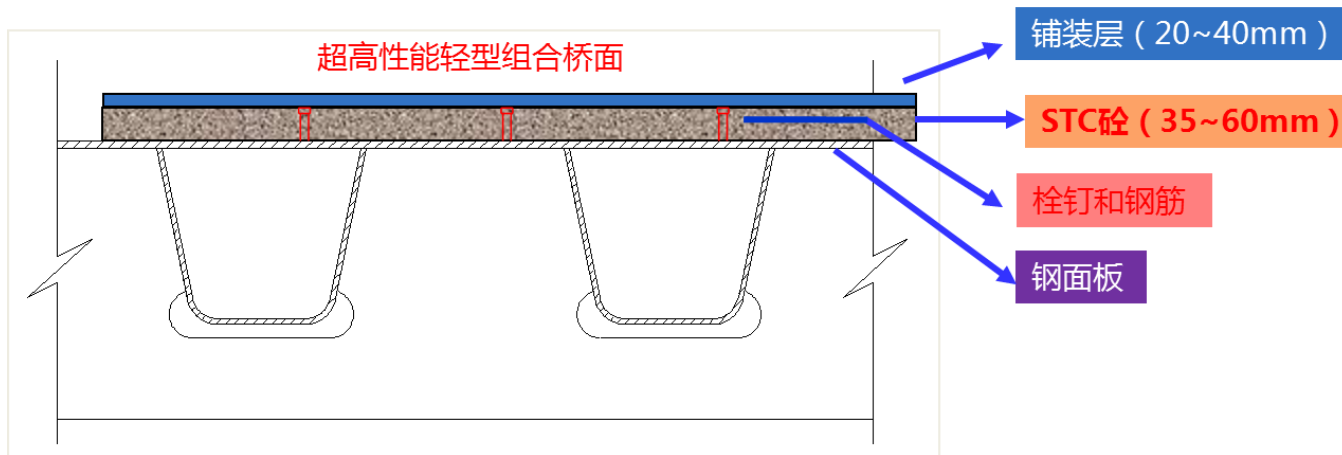


株洲市枫溪大桥—主跨300 m的双塔单跨自锚式悬索桥

主梁采用超高性能轻型组合加劲梁，超高性能轻型组合加劲梁的构造为：在传统的钢箱梁上设置约50 mm厚的薄层超韧性混凝土层，即将钢梁转化为钢-超韧性混凝土组合梁，然后在其上铺设20~30mm厚沥青混凝土磨耗层；混凝土层与钢梁之间可通过栓钉连接。

## 六、工程应用

### 国内应用

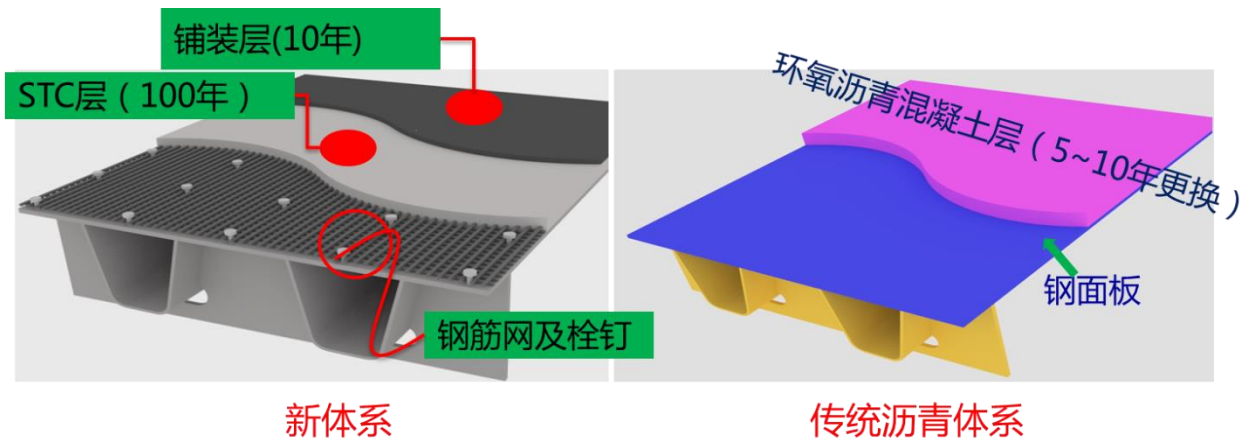


**超高性能**—专用的超高韧性混凝土UHPC (Super Toughness Concrete)

**轻型组合**—UHPC层厚度较薄，与钢桥面组合后自重轻

## 六、工程应用

### 国内应用



有效提高了桥面刚度，大幅降低钢桥面应力，延长正交异性钢桥面抗疲劳寿命3倍以上；

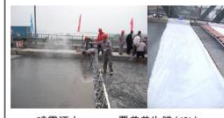
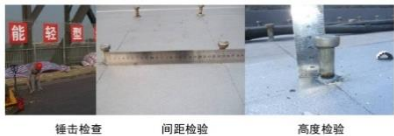
基本消除了钢桥面铺装的难题。

# 六、工程应用

## 国内应用

### 轻型组合结构桥面施工包

- 桥面预处理
- 栓钉焊接
- 防腐层涂装
- 钢筋网安装
- UHPC浇筑
- UHPC湿接缝浇筑
- UHPC养护
- UHPC表面抗滑移构造设置
- 面层铺筑



## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**梁面清理：**利用氧割设备、铁砂布、手磨机、高压风机、高压水枪等设备和工具清理UHPC砼范围钢梁面上的浮锈、浮渣，对桥面进行冲洗。在施工过程中仔细检查，确保梁面平整、洁净。

## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**栓钉定位、焊接：**按照设计图纸，用墨线示出栓钉在梁面板位置，注意栓钉布置应错开U肋、横隔板的腹板和钢箱梁焊缝位置。栓钉焊接采用螺柱焊机焊接工艺。

## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**防腐层涂装：** UHPC 砼钢箱梁面四周 50cm 范围的防腐采用环氧富锌涂层，喷涂作业采用高压无气喷涂法，局部补涂可采用刷涂法。

## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**钢筋网安装：**钢筋网按设计尺寸绑扎、铺设，通过准确放样、标记控制钢筋位置、间距；通过在钢筋网下设置短钢筋头支垫控制钢筋网底、顶面保护层距离。

## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**横向钢筋与路缘石的连接：**UHPC砼横向钢筋与路缘石侧面U型钢筋焊接相连，钢筋间采用平面搭接焊接方式。U型钢筋与钢结构面之间采用双面满焊方式。

## 六、工程应用

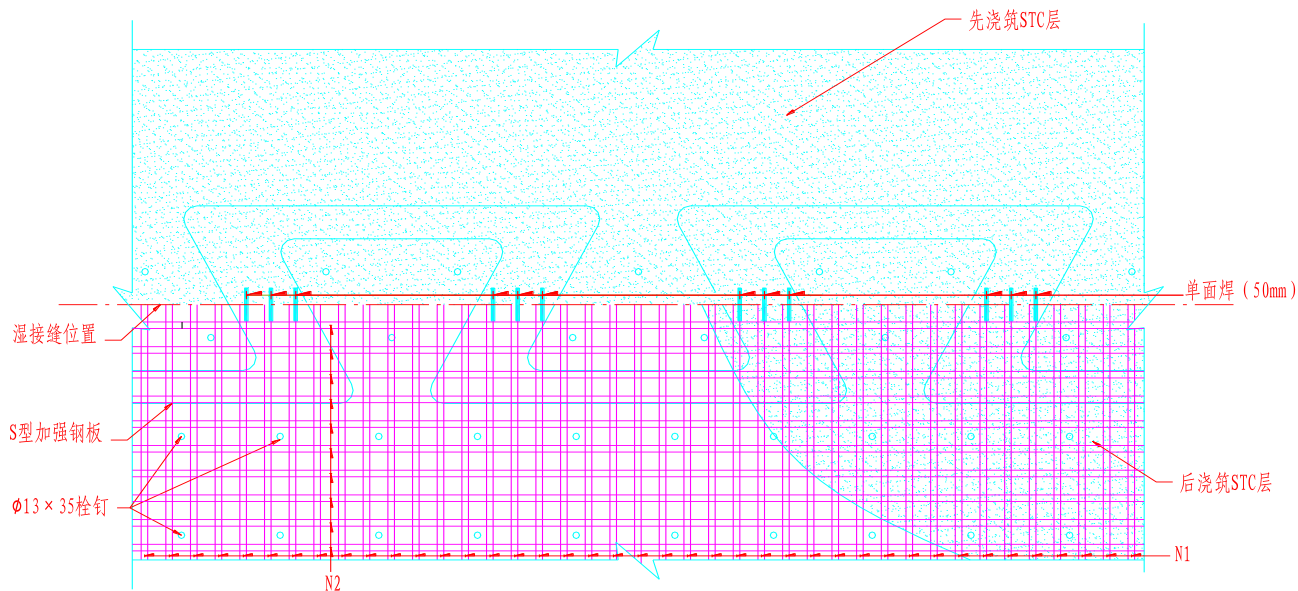
### ■ 国内应用



**纵向钢筋与两端混凝土梁端面的连接：**纵向钢筋与混凝土梁端面上的预埋钢筋或所植钢筋间采用平面搭接焊接方式。纵向钢筋可在设计位置作适当调整，应能使其和预埋钢筋贴合平顺，方便搭接焊接。

## 六、工程应用

### 国内应用



**施工缝处理：**每次UHPC砼施工须进行施工缝处S型钢板焊接、挡模设置、钢筋接头预留等工作，及对已浇筑UHPC的相邻UHPC砼施工缝接头进行拆模和凿毛施工。

## 六、工程应用

### 国内应用



**施工缝处理：**凿毛应从接缝断面开始，凿毛垂直于竖直接缝面向内的宽度符合设计图要求。接缝凿毛面应有大量钢纤维裸露在外，并无遗留松散残渣和屑末。在UHPC浇筑前，应对凿毛面洒水湿润，但不积水。

# 六、工程应用

## 国内应用



## 浇筑设备布置



## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**UHPC配制：**分为干混料和水两部分，干混料委托专业厂家配制、生产，搅拌采用高速搅拌机。

## 六、工程应用

### ■ 国内应用



## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**UHPC输送：**搅拌后的UHPC由地泵通过泵管泵送至泵送车内，再由泵车将UHPC送入智能布料机料斗内。

## 六、工程应用

### 国内应用



**UHPC摊铺：** 摊铺前，应对摊铺表面及各接头面进行洒水润湿，但不能有积水。布料的松铺系数应根据UHPC坍落度和梁面横坡大小确定。UHPC的坍落度应控制在180mm-250mm范围，松铺系数为1.1-1.2范围。



## 六、工程应用

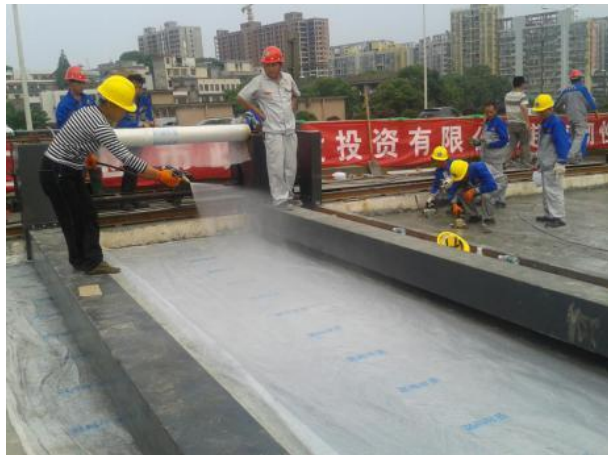
### ■ 国内应用



**振动和整平：**使用高频整平机对UHPC进行振捣和整平，UHPC砼厚度通过调整振动整平梁上下位置进行设定和控制。

## 六、工程应用

### 国内应用



**保湿养护：**养护方式为喷洒水、覆盖节水保湿养护膜，养护过程保证混凝土表面充分湿润但不积水。养护工作在振动整平及局部调整完成后进行，其工作过程是：高压水枪喷射-保湿膜覆盖-喷洒水保湿。

## 六、工程应用

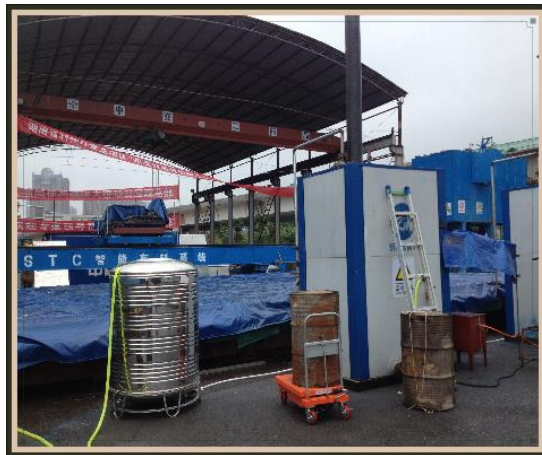
### 国内应用



**高温蒸汽养护：**UHPC终凝后（摊铺后48h），揭除节水保湿膜，搭设蒸汽养护保温棚。蒸汽由4台蒸汽锅炉提供。蒸汽通过蒸汽管道进入保温棚，在保温棚内的管道均匀布置在UHPC面上，保证供汽均匀。

## 六、工程应用

### 国内应用



养护期间温度控制按要求进行。升温阶段：升温6-8h，以10~15℃/h的升温速度升温至90℃；恒温阶段：保持90℃的温度48h；降温阶段：以不大于10℃/h的降温速度降温至常温。

## 六、工程应用

### ■ 国内应用



**表面抗滑移构造设置：** UHPC砼表面刻槽在每次施工的高温蒸养完成后进行。表面刻槽可加强UHPC砼与面层的粘结效果。表面刻槽工作采用刻槽机进行。

# 目 录

概述

配制技术

力学性能

耐久性能

微观结构

工程应用

发展趋势

# 七、发展趋势

## UHPC作为工程材料的优势

### 与高强/高性能混凝土性能对比

从比强度、比刚度和可以建造的轻质高强结构结构比较，UHPC应该纳入“轻质高强”材料；UHPC的结构寿命是HPC的2倍以上。

### 与钢结构比较

在比强度和比刚度方面，钢筋增强UHPC梁达到了钢梁的水平，在耐久性和耐火性方面具有明显优势。其独特性能如抗爆、抗冲击、耐磨等性能，超越了其他所有工程材料。

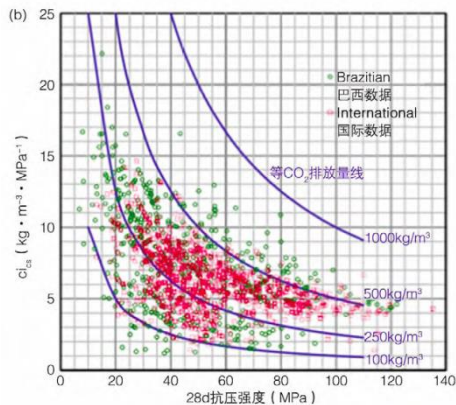
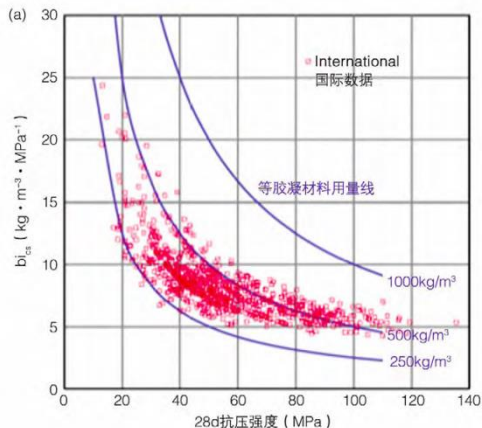


每7年涂刷一遍防锈漆，400万欧元，相当于RMB500万/年

# 七、发展趋势

## UHPC与可持续发展

用胶凝材料浓度和碳浓度指标评价，UHPC有利于提高水泥的使用效率，减小碳排放，属于环境友好型材料。



胶凝材料浓度指数=胶凝材料用量/混凝土达到的性能；

碳浓度指标=碳排放量/混凝土达到的性能

**UHPC节材、减排、节能性能明显**

## 七、发展趋势

### UHPC应用成本问题

成本构成中，纤维所占成本最大，达到一半以上；基材需要优质材料，成本也较高。提高纤维增强增韧效率是降本关键。

UHPC应用到充分发挥性能优势和体现价值的场合，“好钢用到刀刃上”。

韩国研究使用UHPC制造斜拉桥梁板，预期使桥梁整体造价降低20%以上，同时实现超长的使用寿命。

UHPC作为抗冲击耐磨材料，在水利水电、路面等应用，可以大幅度提高使用寿命，减少维修频率，节省费用。

## 七、发展趋势

同等承载力条件下几种混凝土所用材料对比

材料生产能耗和温室气体排放基础数据(来源加拿大Athena SMD)							
材料	密度 kg/m <sup>3</sup>	生产能耗 GJ/m <sup>3</sup>	一次能源 GJ/m <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> 总量 kg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> 总量 kg/m <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> 总量 kg/m <sup>3</sup>	全球变暖潜能GWP kg CO <sub>2</sub> EQ/m <sup>3</sup>
C30混凝土	2324	1.999	2.039	370.8	2.07	0.15	690.8
C60混凝土	2386	2.387	2.442	393.4	2.27	0.17	744.6
预应力钢筋	7800		84.94	17,123	55.38	30.65	27,361
钢筋	7800		84.94	17,123	55.38	30.65	27,361
结构钢材	7800		84.94	17,123	55.38	30.65	27,361
UHPC (Ductal)	2500		6.62	1,138	5.68	0.97	2,051

材料品种	30MPa引气混凝土	60MPa级HPC	UHPC
等效体积/m <sup>3</sup>	126	100	33
水泥用量/t	44	40	23
CO <sub>2</sub> 排放量/t	44	40	23
集料用量/t	230	170	60

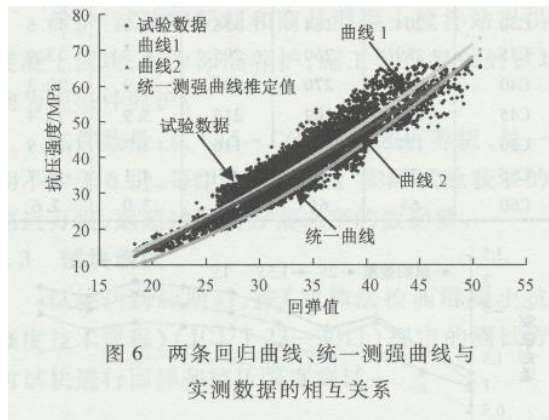
UHPC节材、节能和减排作用显著

# 附、混凝土问题探讨

## 1、回弹法检测混凝土强度问题

工程实例：结构实验楼柱子，C30，PO42.5水泥，粉煤灰掺量30%。28d碳化深度10mm，检测强度25.6~35.8MPa。

- (1) 混凝土表层质量
- (2) 碳化问题



# 附、混凝土问题探讨

## 2、混凝土强度问题

### 2.1 水泥颗粒粒径影响

日本小樽港试验数据。始建于1897年的小樽港，在建设初期制作了6万多个试件，放在海水中、大气中、淡水中分别进行长期耐久性试验，试验结果表明，三者的长期强度发展趋势是基本一致的，其中，试件在自然的大气环境中存放30~40年强度达到最高，大约提高100%，然后逐年下降，存放95年，强度从最高点下降约40%，但仍高于28天强度20%，也就是说，早期的混凝土寿命在百年以上，而当年所用水泥的颗粒粒径是200um方孔筛筛余量小于10%，其平均粒径远远大于目前国内标准使用的80um方孔筛筛余量小于10%的水泥平均粒径。

日本海洋工程研究所试验结果表明，在海洋气候环境条件下，对于比表面积下限在250m<sup>2</sup>的水泥，混凝土自然存放5年抗压强度达到最高，增长约40%，然后逐年下降，至10年甚至低于原来的28天强度。

# 附、混凝土问题探讨

## 2、混凝土强度问题

### 2.2水泥用量/掺合料最大掺量

依据国家水泥标准，普通硅酸盐水泥中的混合材参量必须控制在20%以内，据国家建材部门前期的调查资料介绍，除部分水泥大型企业外，大多数水泥中小企业混合材参量均超标，最高参量甚至高达47%，而当前的施工验收规范对此又没有提出强制性检测要求。

现有的规范标准须增加胶凝材料组合的安定性检测,只有这样，才能最终确保混凝土具有良好的体积稳定性。

路面混凝土的耐磨性

劣质粉煤灰问题



# 附、混凝土问题探讨

## 3、混凝土膨胀剂

膨胀剂类型：CaO型、钙矾石型、MgO型和复合型  
适用范围及注意事项。

