



湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

超高性能混凝土的研究和应用 及展望

湖南大学

黄政宇教授



1976-1926

HUNAN UNIVERSITY

超高性能混凝土的定义

- 一般认为是指各项性能明显优于通常的高性能混凝土的一类混凝土。其性能有下列特点：

- 优良的和易性

- 很高的强度（一般认为抗压强度在120 MPa（我国）或150~200 MPa（国外）以上，根据要求而定）

- 优异的耐久性

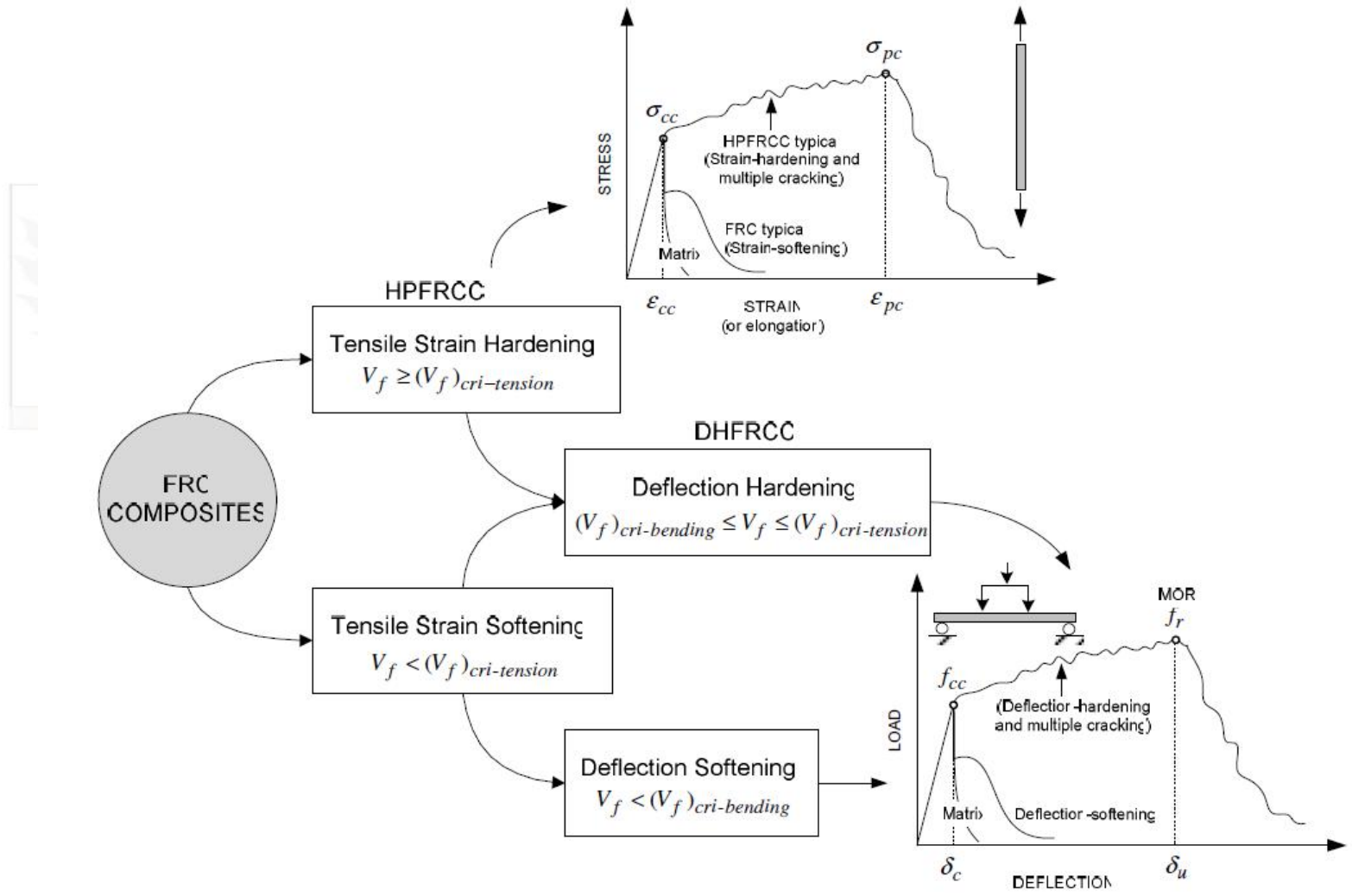
- 高的韧性(极限抗拉强度 $\geq 7\text{MPa}$)



法国规范 (NF P 18-470) 定义

- concrete characterized by a high compressive strength, greater than 130 MPa, beyond the scope of NF EN 206/CN:2014, high post-cracking tensile strength give ductile behaviour under tension and whose lack of brittleness makes it possible to design and produce structures and structure members without using reinforcing steel.

接受拉应力应变或受弯荷载挠度曲线分类





超高性能混凝土的组成特点

- 材料组成:

- 高强度水泥

- 超细掺合料

- 高性能外加剂

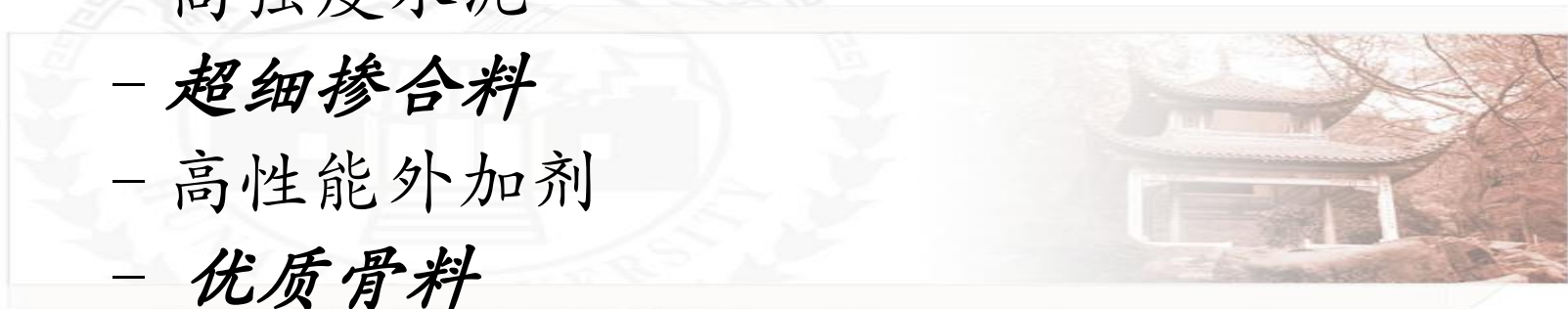
- 优质骨料

- 纤维

- 制备原理和配比参数特点:

- 最大堆积密度原理(减少孔隙率和大孔)

- 低水胶比 ($W/C < 0.25$ (0.22))




- 早在1947年, T.C.Pwoers采用冷压技术制得抗压强度达280MPa的水泥石。
- 1970s:
 - Yudenfreund et al. 采用W/C=0.2、真空搅拌和超细磨水泥, 制得了230 MPa的水泥石。
 - D.M Roy et al. 采用热压技术(压力达50MPa, 最高温度达250°C) 制得510 MPa的水泥石。
- 1980s:
 - 无宏观缺陷(MDF)水泥. 由Imperial Chemical Industries (ICI) 的Birchall et al. 研究, 采用塑料工业的加工方法制造, 制得抗压强度200MPa、抗弯强度150 MPa 的水泥; 首次制得高抗弯强度的水泥。
 - 均布超细致密体系 (Densified Systems containing homogeneously arranged ultra-fine Particles, DSP). 由H.H. Bache, 提出, 采用常规搅拌成型工艺, 并制得抗压强度为120~250 MPa的水泥。首次采用常规工艺制得120MPa以上的混凝土。
 - 在DSP发展成功后, 在DSP系统中掺入纤维, 生产混凝土, 并采用高配筋发展出了密实配筋复合材料 (Compact reinforced composite, CRC)
- 1990s:
 - 在DSP胶凝系统的基础上进一步发展了
 - 活性粉末混凝土 (Reactive powder concrete, RPC)
 - 特殊工业混凝土(Béton Spécial Industriel, BSI)
 - 超高性能纤维增强混凝土(Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete,UHPFRC)
- 2000s
 - 在RPC、BSI等超高性能混凝土的基础上进一步发展了具有专利和非专利的UHPC和UHPFRC材料。并开始大规模开展UHPC结构的研究和推广应用
 - 如从2005年开始, 德国开展了一个1200万欧元的UHPC研究项目[8], 该项目由32个子项目组成, 有20多个研究机构参与, 目的为制定全面的UHPC技术标准获取详尽的基本信息, 使UHPC成为可靠、常用、经济可行的材料。
- 2010s
 - 在材料方面进一步从纳米尺度理解了水泥的水化产物, 纳米材料开始在UHPC中应用。在工程结构方面, UHPC开始在土木工程中的各个领域 (桥梁、道路、水利、建筑、地下工程、军事工程) 推广应用, 2016年法国制订了UHPC的设计规范。

超高性能混凝土的发展历史

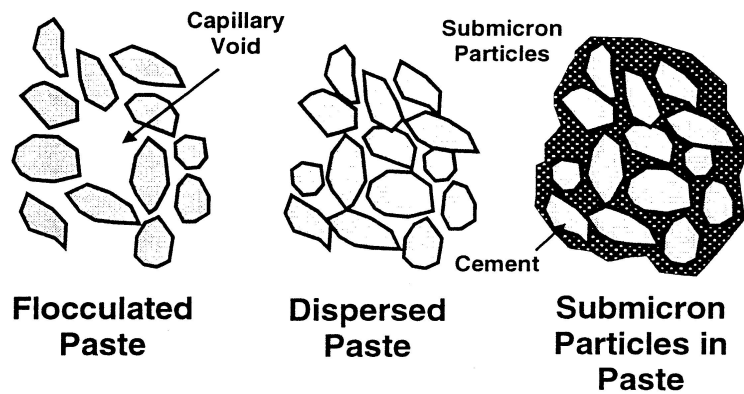


湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

A photograph of a traditional Chinese building with a tiled roof, set against a background of trees with autumn foliage. The image is partially obscured by a large, faint watermark of the Hunan University logo.

国外几种典型 超高性能混凝土的特点

DSP的概念、组成和特点



- 组成和特点:

- 特种优质水泥
- 大量的硅灰
- 硅灰和水泥之间按最紧密原理搭配
- 优良的高性能减水剂品种和足够的掺量
- 极低的水胶比0.18 - 0.25
- 有效的搅拌

得到的高密实度超高强胶结体，再与粗、细骨料搭配就形成灌浆材料、砂浆和混凝土。

密实配筋复合材料 (CRC)的发展

- DSP基体强度很高, 配以高强骨料可制备出抗压强度达280MPa的混凝土, 但是, 在不加入纤维时, 基体很脆, 极限拉应变只有(0.2mm/mm), 在结构中的应用有限。因此, 需要提高基体和韧性和受拉极限变形能力, 从而导致CRC的发展。



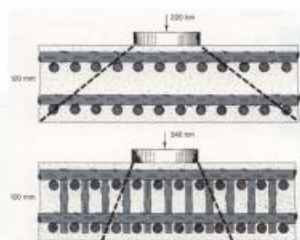
CRC的力学性能和特点

• 力学性能

- 抗压强度: 150-400 MPa
- 抗弯强度: 30-200 MPa
- 抗剪强度: 15-150MPa
- 弹性模量: 40-80 GPa
- 表观密度: 2600-3000 kg/m³

• 特点

- CRC是钢筋混凝土, 但与普通钢筋混凝土有区别, 承载能力更像结构钢。
- 设计原理、组成和生产与普通钢筋混凝土有区别。



CRC的原理和组成特点

• CRC的原理

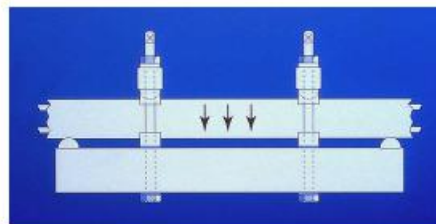
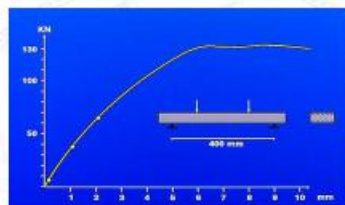
- 为增加基体的拉伸应变要加入高体积分数的细小高强、高刚度的纤维。
- 为了进一步增加基体的极限拉应变, 采用高配筋率, 使钢筋成为约束钢纤维混凝土的骨架, 保证在大拉伸应变时出现多端开裂。
- 为保证局部和整体的韧性, 除掺入钢纤维外, 还采用高强骨料。
- 为保证纤维增强基体的宏观和微观的均匀性, 在整个搅拌、浇筑和捣实过程中, 混凝土要保持足够的黏性。

• CRC的组成特点

- 骨料最大粒径为钢筋净距的 1/3, 水胶比 (w/b) 为0.13 - 0.18.
- 5 - 20% 主配筋 (high strength steel, traditional rebars, carbon, etc.).
- 5 - 10% 钢纤维.

密实配筋复合材料(CRC)的耐久性

- CRC基体的孔隙率只有1.54%, 其中, 约1.4%为毛细孔, 因而, 没有抗冻性问题, 碳化也极慢。
- 氯离子腐蚀试验也表明, CRC在严酷的条件下也表现出优秀的耐久性性能



密配筋复合材料(CRC)

- **活性粉末混凝土的配制原理:**

为提高水泥基材料的均质，它不含粗骨料
最大集料粒径为 $600\mu\text{m}$;

为达到高密实度，所采用粉体粒径按最紧密
堆积原理最佳化，颗粒为间断级配;

为改善为孔隙结构在成型后进行热养护;

为提水泥基材料的韧性，引入钢纤维;

为便于使用尽可能保持搅拌和浇筑与现有工
一致;

- **活性粉末混凝土的配制原理:**

为提高水泥基材料的均质，它不含粗骨料，
最大集料粒径为 $600\mu\text{m}$;

为达到高密实度，所采用粉体粒径按最紧密
堆积原理最佳化，颗粒为间断级配;

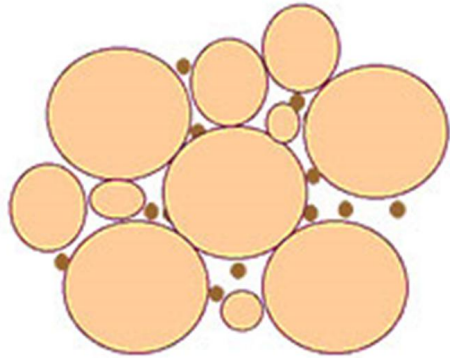
为改善为孔隙结构在成型后进行热养护;

为提水泥基材料的韧性，引入钢纤维;

为便于使用尽可能保持搅拌和浇筑与现有工艺
一致;

Conventional Methodology:

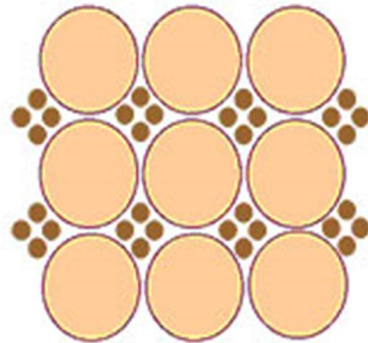
Well Graded Compactness



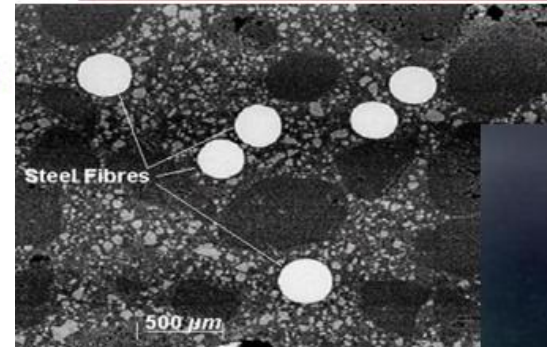
High shear & no place
for fibres!

Ductal Technology:

Modified Compact Grading



Improved Rheology
& defect free!



活性粉末混凝土(RPC)

• 特殊工业混凝土(BSI)

- 也是一种高强度、高延性的高性能纤维增强水泥混凝土，它由水泥、硅灰、粗、细骨料、细钢纤维（3%）、特制高效减水剂和水组成，可以自密实，具有高强和早强的特性，不需热养护也能获得很高的强度。

• 特殊工业混凝土(BSI)的性能

- 抗压强度（标准养护）：

- 2天 122 MPa

- 28天 199 MPa

- 抗弯强度：29 MPa； 抗拉强度：9.1 MPa

- 弹性模量：65 GPa；

- 表观密度：2800 kg/m³

超高性能混凝土的性能特点

性能指标	NC	HPC	SFRC	UHPC
抗压强度 (MPa)	20-50	60-100	20-60	170-230
抗折强度(MPa)	2-5	6-10	4-12	30-60
弹性模量(GPa)	30-40	30-40	30-40	40-60
断裂能(KJ/m ²)	0.12	0.14	0.19-1.0	20-40
氯离子扩散系数 (10 ⁻¹² m ² /s)	1.1	0.6	-	0.02
冻融剥落 (g/cm ²)	>1000	900	-	7
吸水特性 (kg/m ³)	2.7	0.4	-	0.2
磨耗系数	4.0	2.8	2.0	1.3

超高性能混凝土结构的特点

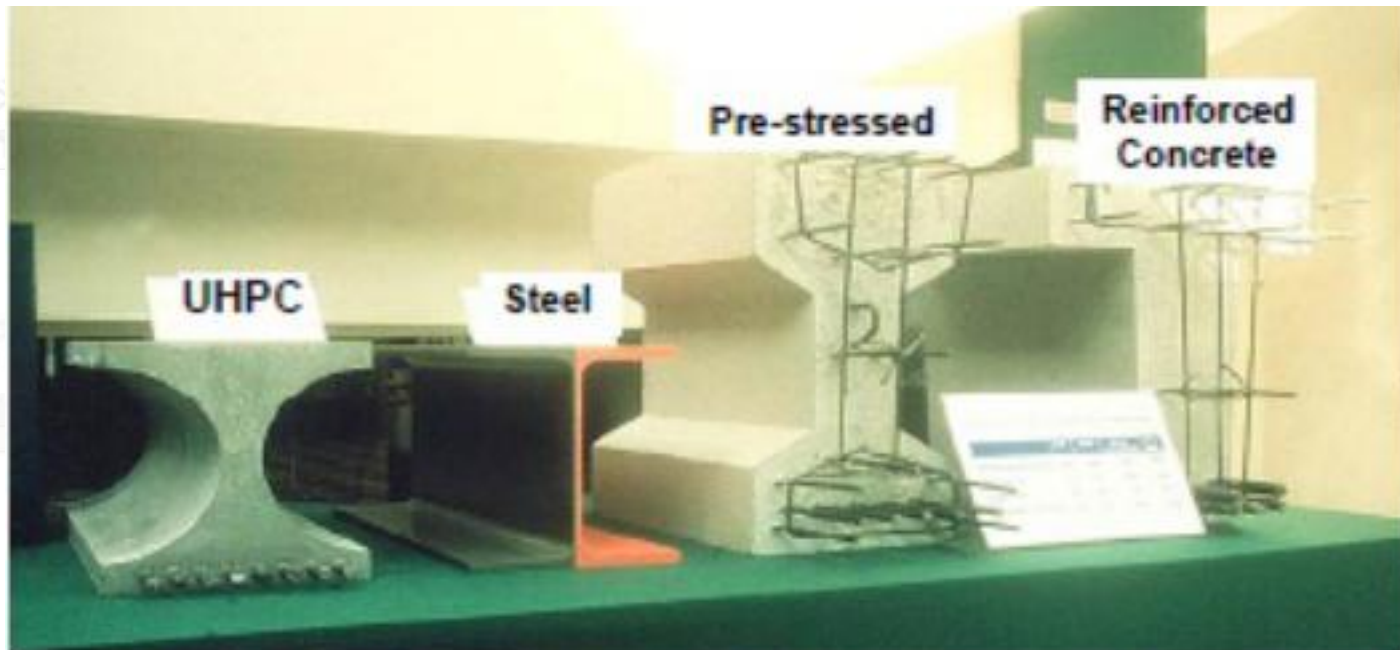
- 结构自重较小
- 设计自由度大
- 韧性好
- 耐久性高
- 符合可持续发展



HUNAN UNIVERSITY



结构自重较小



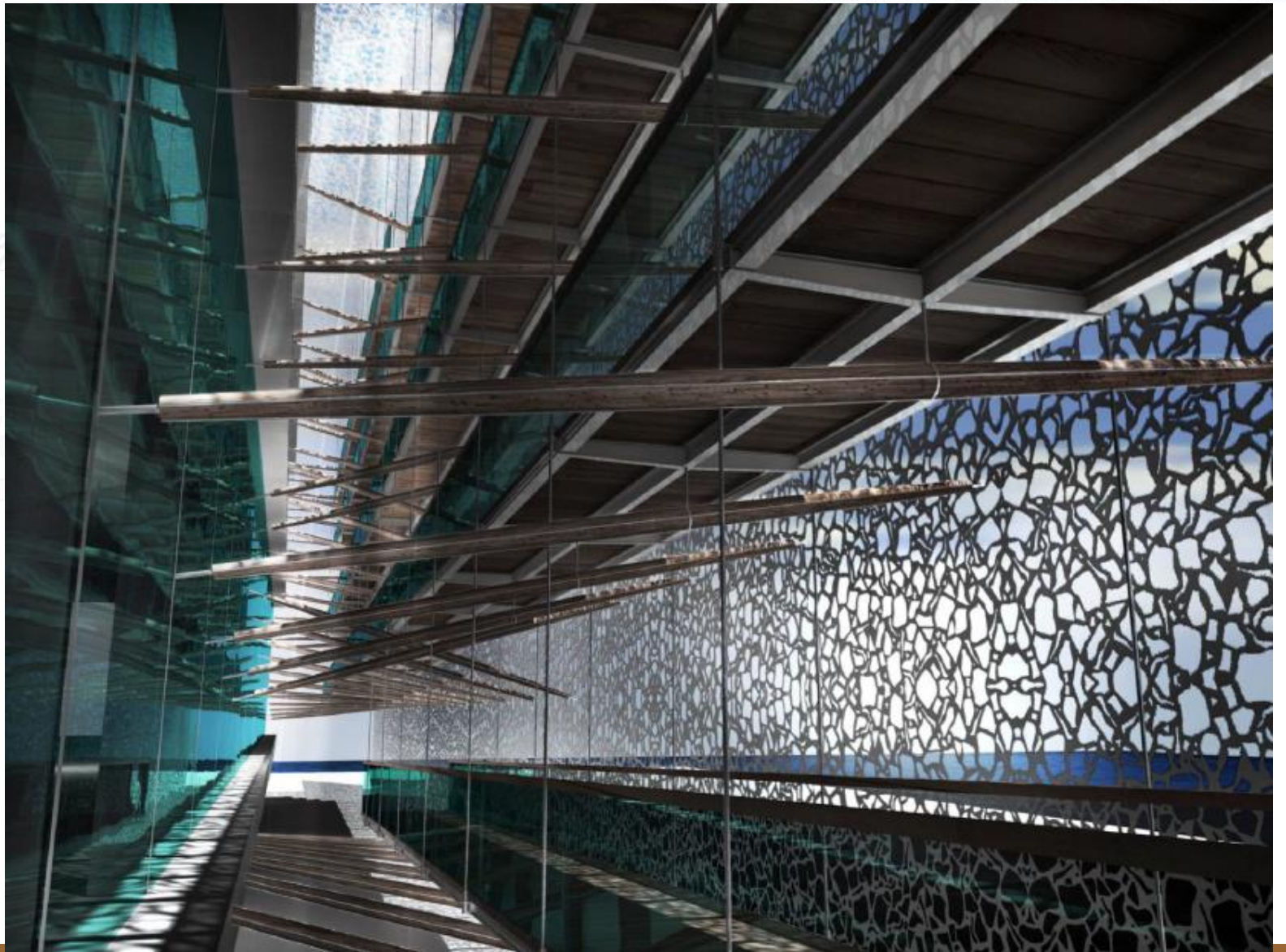
Mass Ratio to Steel for Equivalent Flexural Capacity Members

	Ductal	Steel	Pre-stressed	Reinforced
	1.3	1.0	4.2	4.7



设计自由度大





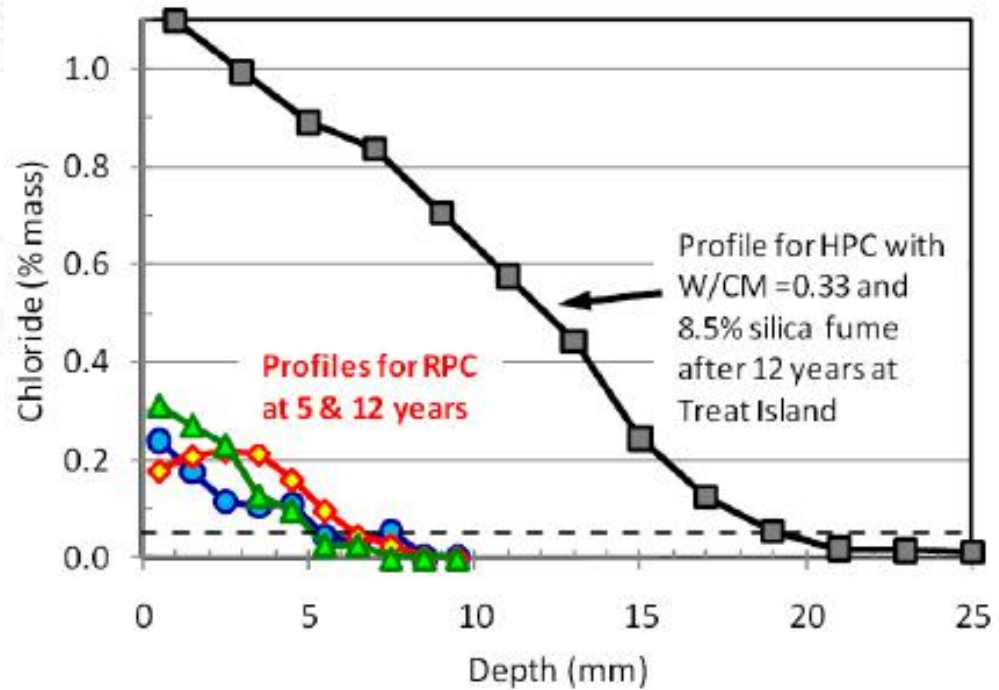


韧性好





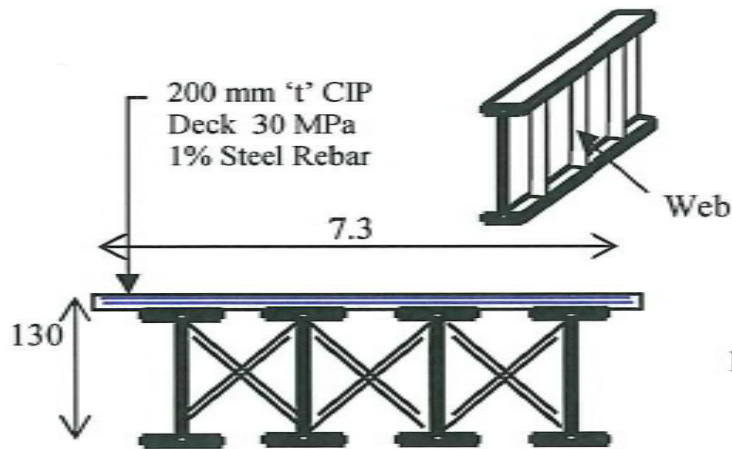
耐久性高



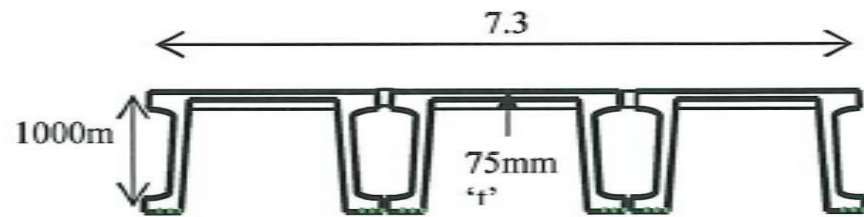


符合可持续发展

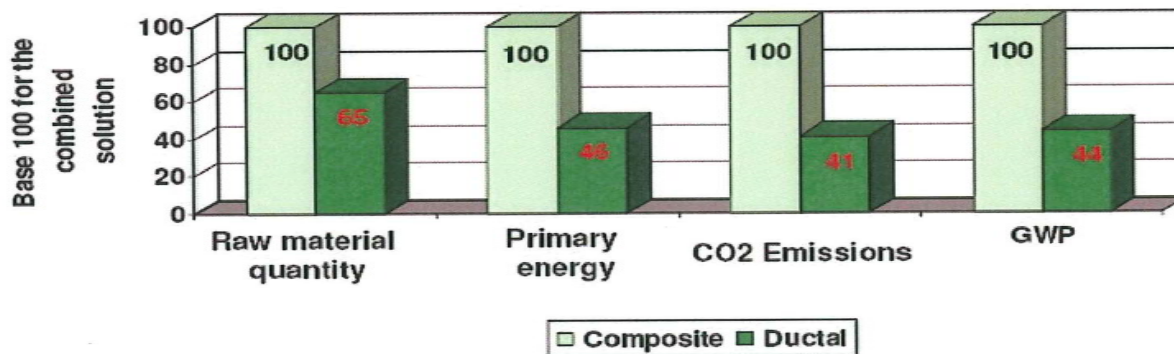
(钢混凝土组合桥梁与UHPC桥梁比较)



Structural Steel Section



Structure II-Shape Section of Ductal® Bridge





湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

各种超高性能混凝土 的应用



HUNAN UNIVERSITY



湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

在建筑工程中的应用



HUNAN UNIVERSITY



湖南大學

UNIVERSITY

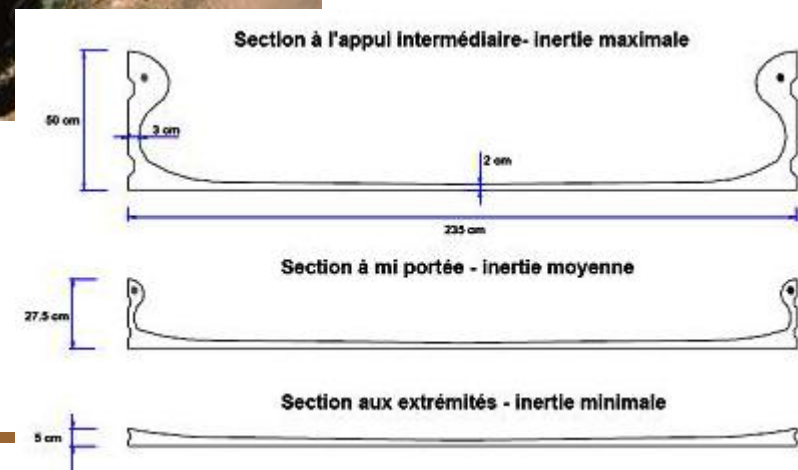
轻型阳台板



10:50 AM



轻型雨棚

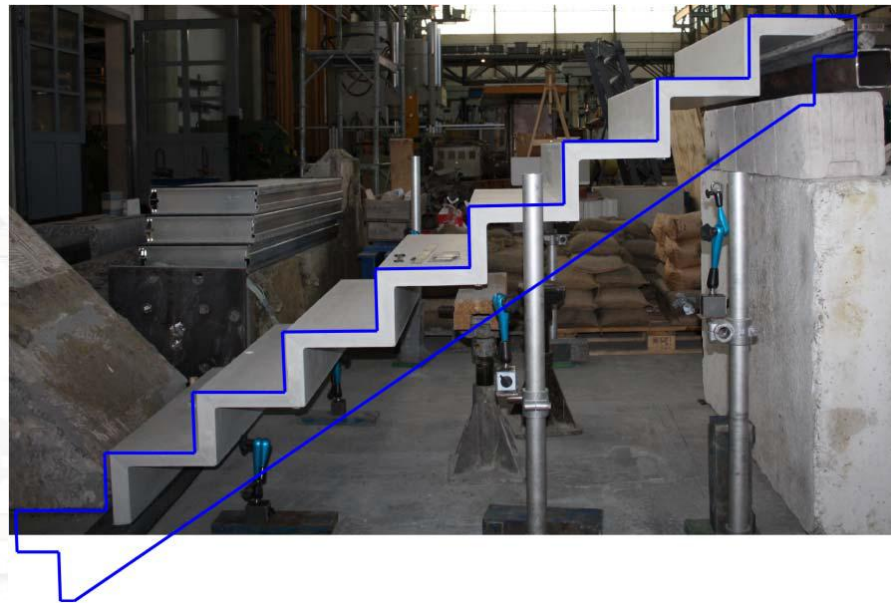




UHPC楼梯



楼梯板厚50mm



项目	普通楼梯	UHPC楼梯
混凝土体积 (m ³)	0.85	0.205
楼梯重量 (kg)	2125	515



湖南大學

HUNAN UNIVERSITY

轻型外墙板





湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

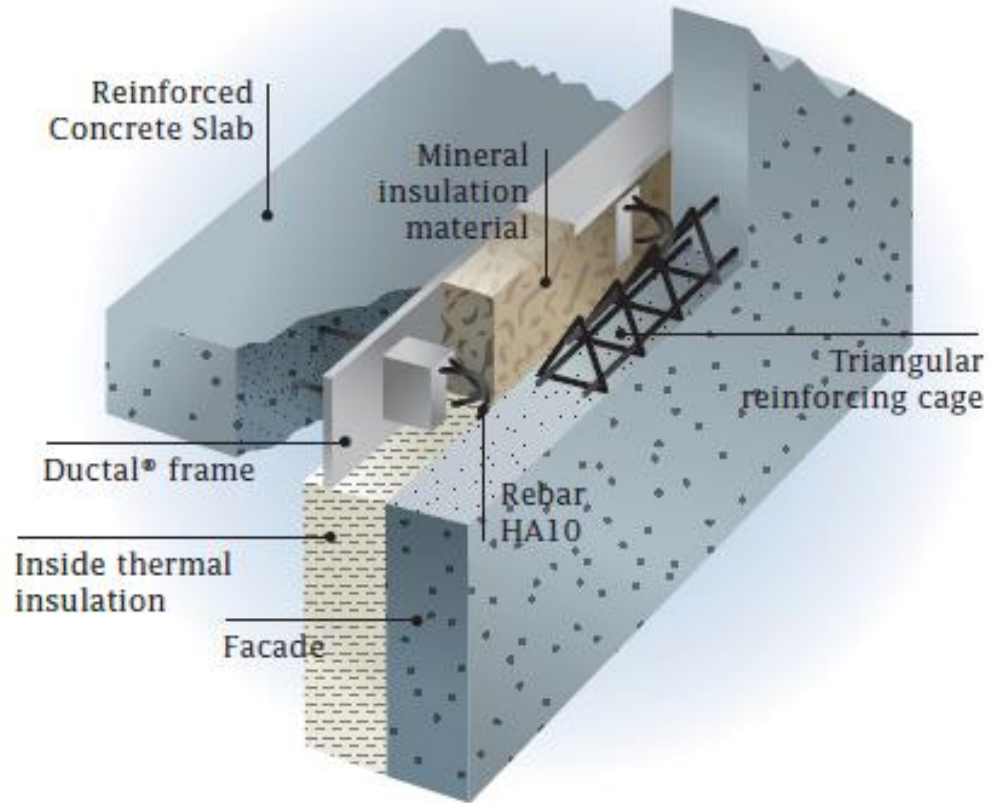
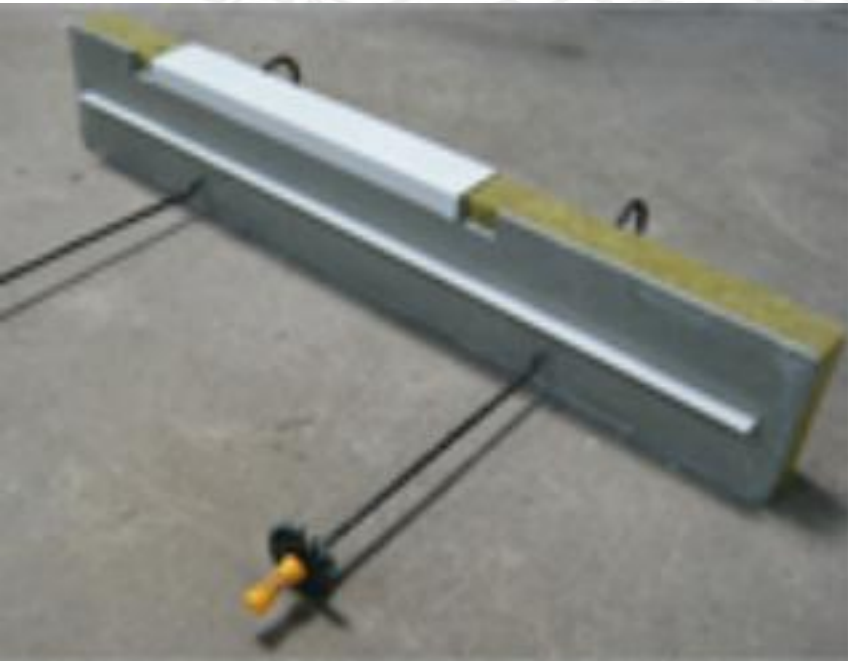


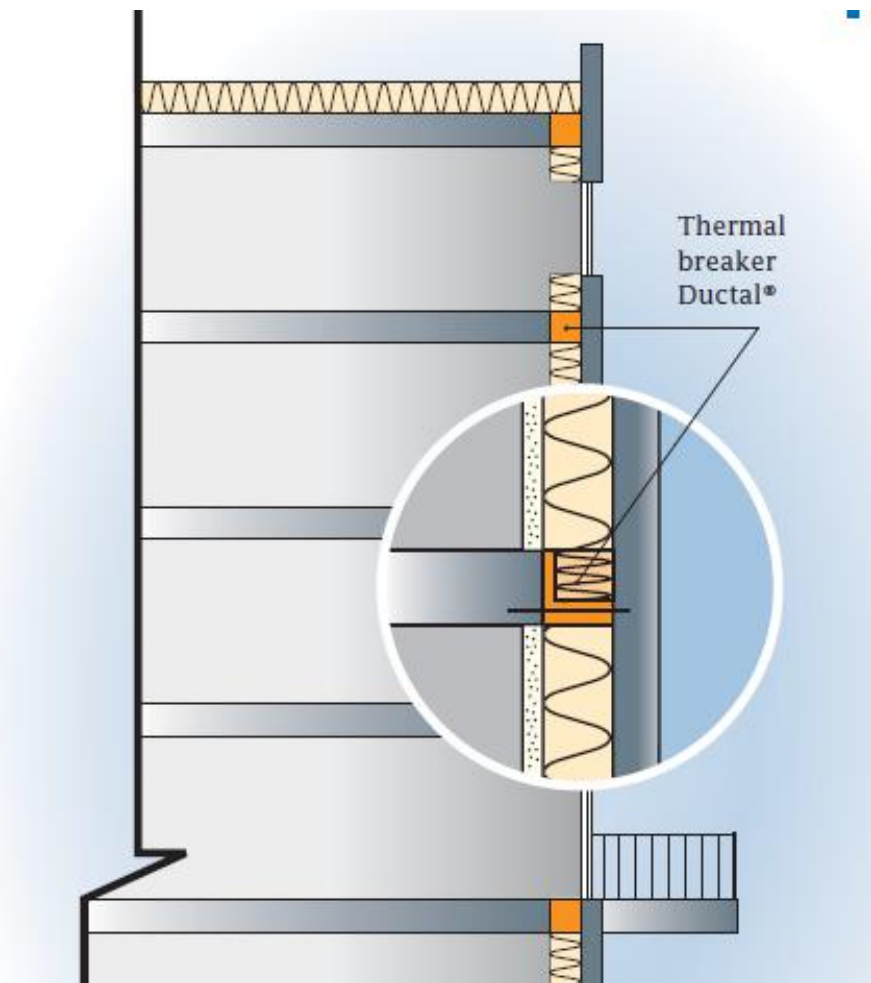
装配式房屋或结构的湿接缝





阳台热断桥构件





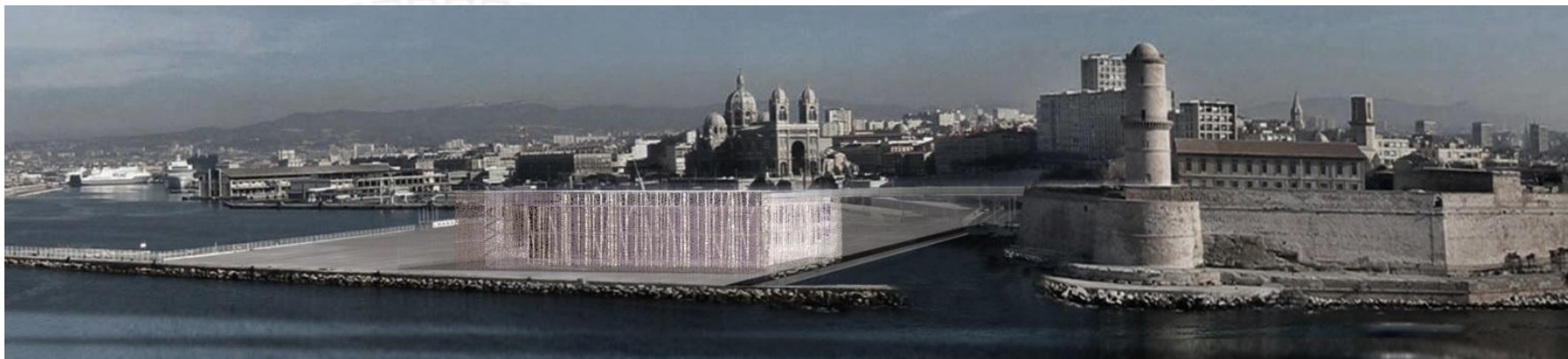
- 热阻:
 - 减少热损失70%
- 适应性:
 - 最大可用于6.5m悬挑的阳台
- 简单:
 - 各种建筑每种板厚一种构件
- 耐火:
 - 耐火极限超过2小时
- 使用方便:
 - 采用传统施工方式



建筑师里齐
奥蒂 (Rudy
Ricciotti) 设
计的首座采
用UHPC结构
的大型建筑
(巴黎的体
育馆和马赛
的博物馆)



MuCEM博物馆





建造中.....







湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

让布安体育馆





体育馆屋盖







建筑外墙幕墙 (1)





湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

建筑外墙幕墙 (2)



10:50 AM



建筑外墙幕墙 (3)





建筑外墙幕墙 (4)



RSITY



湖南大学

UNIVERSITY

建筑外墙幕墙 (4)



SITY



湖南大學

HUNAN UNIVERSITY

建筑外装饰





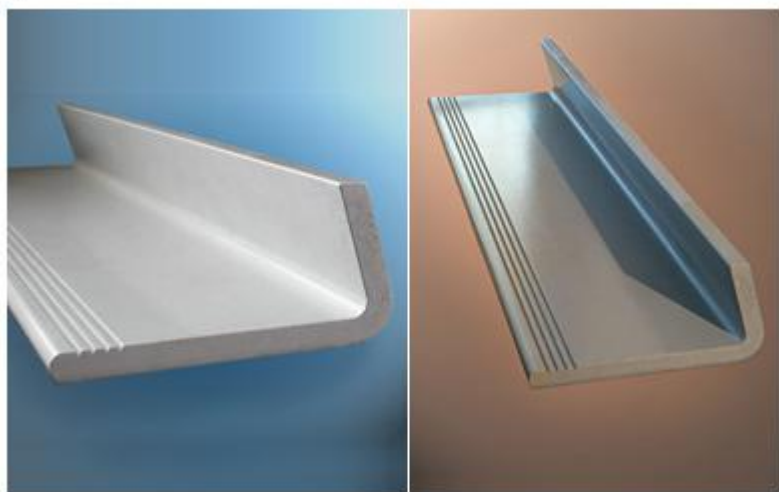
湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

城市景观



10:50 AM



10:50 AM

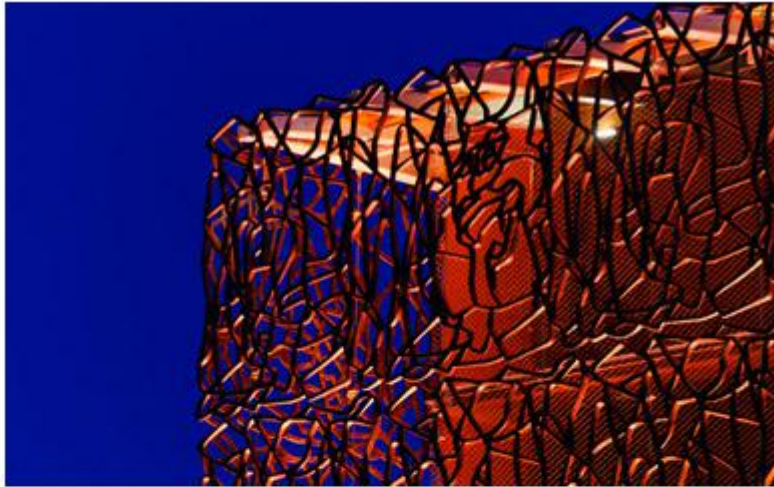
建筑装饰作品





湖南大學

UNIVERSITY





湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

在基础工程中的应用



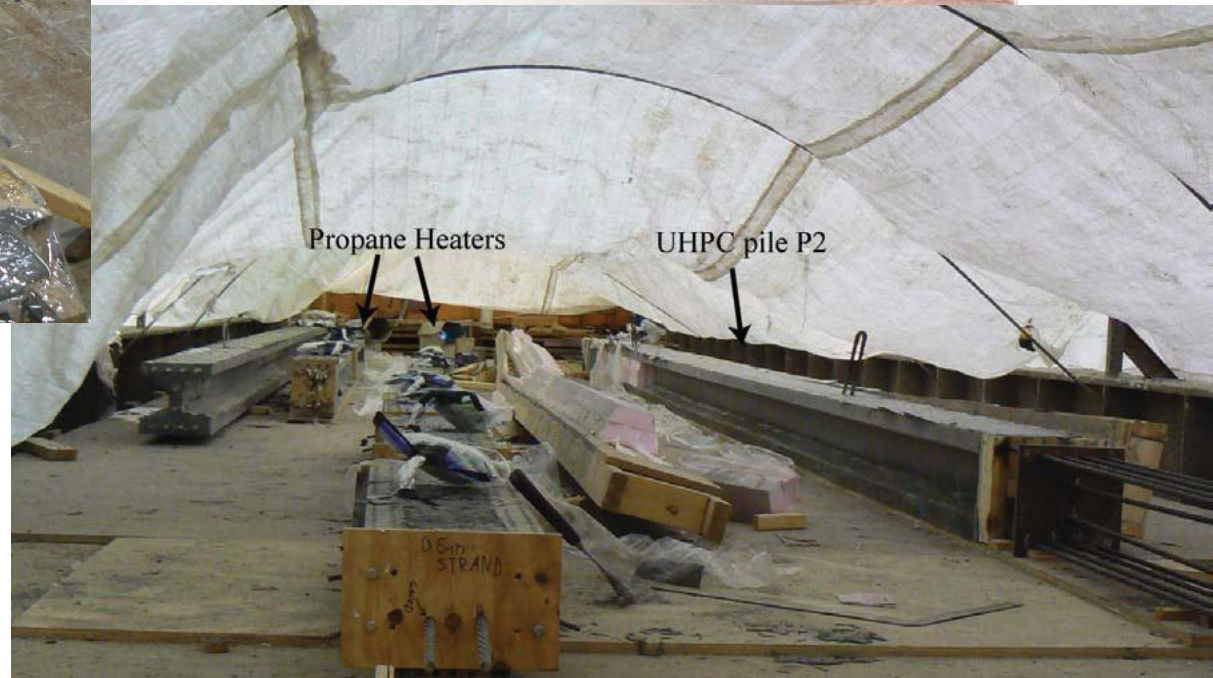
HUNAN UNIVERSITY



湖南大学

UNIVERSITY

预应力异形桩



10:50 AM



湖南大学

HUNAN UNIVERSITY



预应力混凝土板桩





10:50 AM

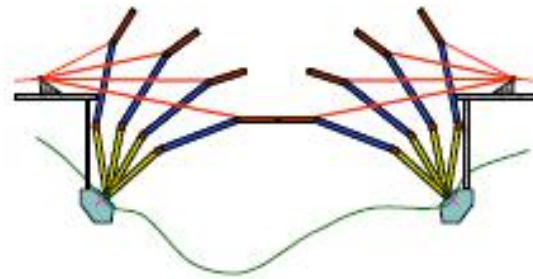


湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

在桥梁工程中的应用



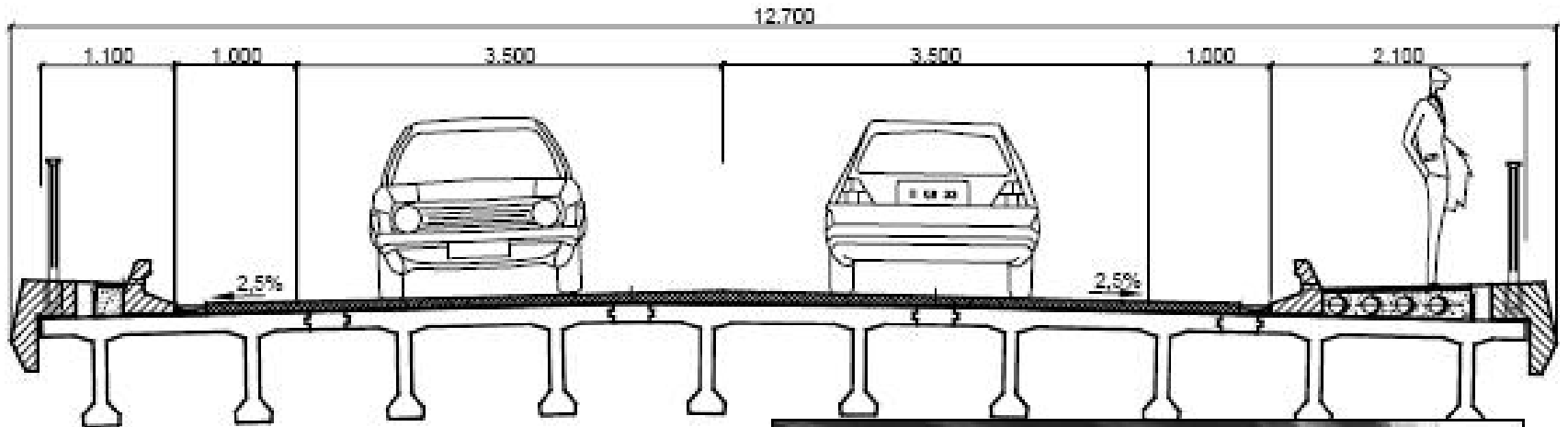
HUNAN UNIVERSITY







公路桥梁（法国）





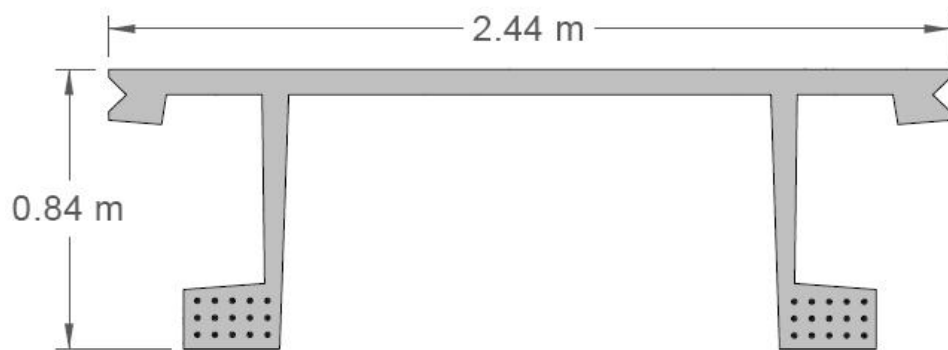
湖南大学

HUNAN UNIVERSITY



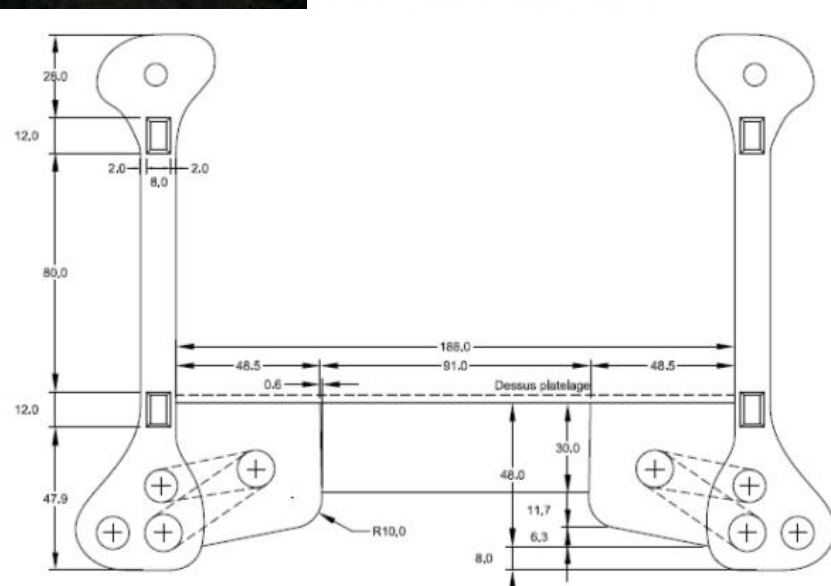
公路桥梁

(22m跨美国)





轻型桥梁





桥梁预制构件





正交异性钢桥面板加固和修复



荷兰的Caland桥 (2003)



湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

预制桥面板





钢-UHPC组合桥梁



湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

其他土木工程中的应用



HUNAN UNIVERSITY



轻型屋面（法国）





湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

法国东部高铁的电缆槽



UNIVERSITY



防护工程



10:50 AM



加固工程





Pilot project – Rehabilitation and widening of a bridge (October / November 2004)

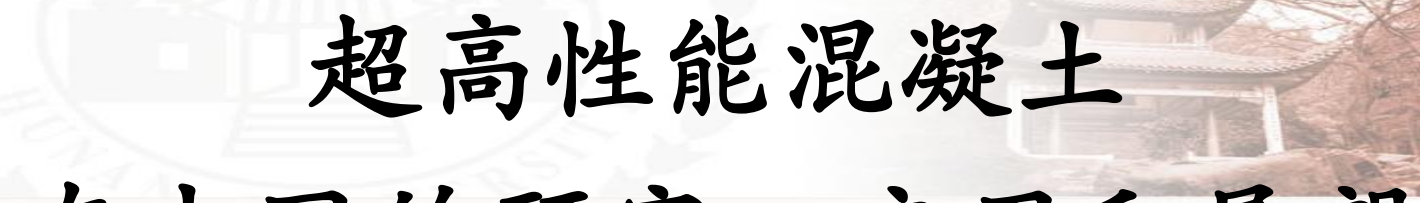


Pont sur la Morge près de Sion VS (1950)



Objective – Increase in efficiency :

- simplification of construction procedures leading to gain in time
- improvement of the durability (→ “minimal maintenance”)
- reduction in costs for construction and maintenance

A background image showing a traditional Chinese building with a tiled roof, surrounded by trees with autumn foliage. The image is overlaid with a semi-transparent watermark of the Hunan University logo.

超高性能混凝土 在中国的研究、应用和展望



超高性能混凝土的研究

- 开展超高性能混凝土材料研究的大学

- 清华大学

- 湖南大学

- 北京交通大学

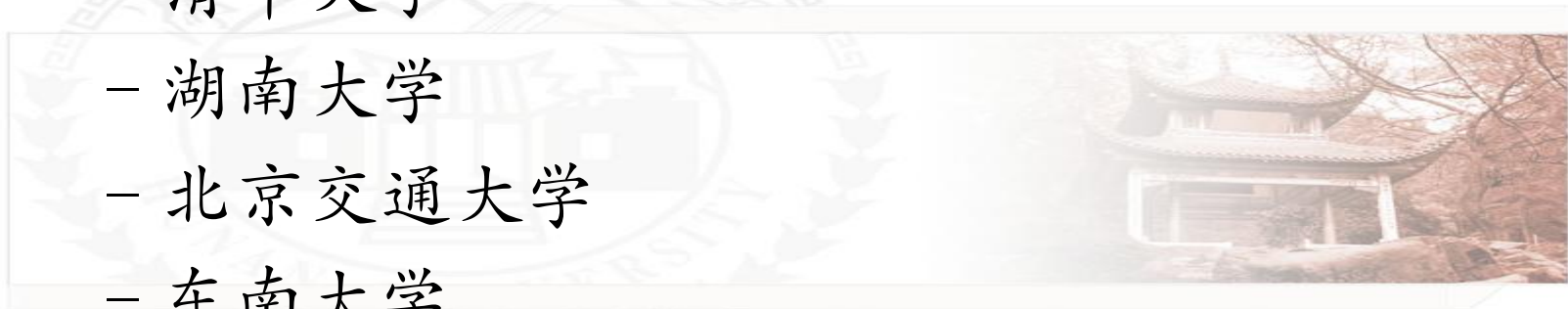
- 东南大学

- 解放军理工大学

- 中南大学

- 福州大学

- 北京建筑大学、同济大学、华南理工大学、西南科技大学等二十多家大学。



HUNAN UNIVERSITY

超高性能混凝土的研究

- 材料层面上：
 - 研究了超高性能混凝土的组成和配比设计、力学性能、耐久性能、养护方法对性能的影响等；
- 结构受力层面上：
 - 研究了超高性能混凝土简支梁、板肋、钢-超高性能混凝土组合桥面板、岩锚体系、剪力墙、柱节点、管桩等多种工程构件的力学性能；

超高性能混凝土的应用研究

- 在建筑工程方面：

- 超高性能混凝土的工业厂房的梁、柱、板
- 双向肋板
- 柱节点结构
- 预应力锚固构件（锚垫板、偏向器等）；
- 楼梯、围墙板
- 预制保温墙板
-

超高性能混凝土的应用研究

- 在桥梁工程方面：
 - 铁路桥梁中的简支梁桥，如迁曹铁路和蓟港铁路的低高度T形梁；
 - 钢-超高性能混凝土组合桥面结构，如广东马房桥、佛陈大桥、北京通惠河桥和天津海河大桥等；
 - 用于大跨径桥梁的岩锚体系，如矮寨桥；
 - 用于大跨径连续箱梁桥；
 - 用于大跨径拱桥；
 - 用作铁路人行道板、高铁步道板、梁垫板等附属构件；



湖南大学 HUNAN UNIVERSITY

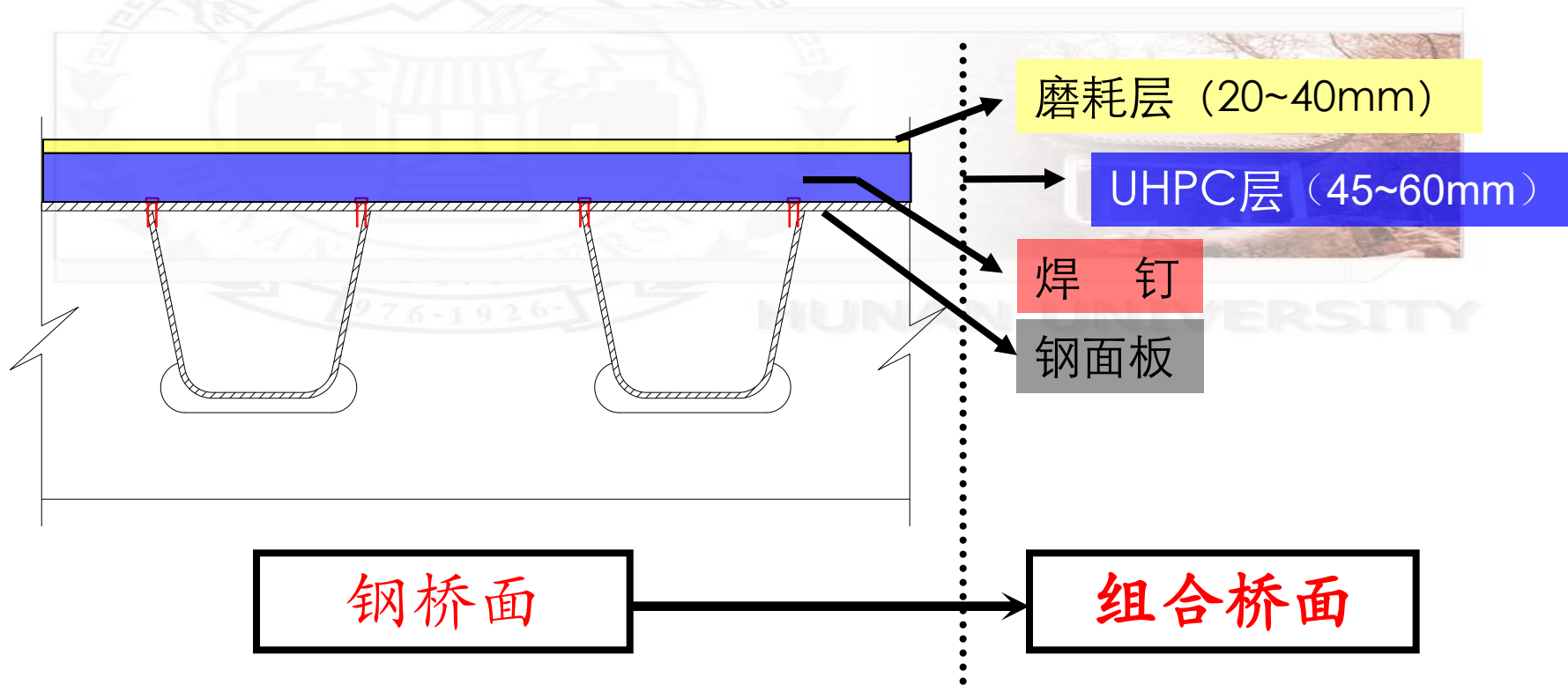
超高性能轻型组合桥面



HUNAN UNIVERSITY

超高性能轻型组合桥面的结构

同时解决钢桥面疲劳裂纹和铺装易损坏问题



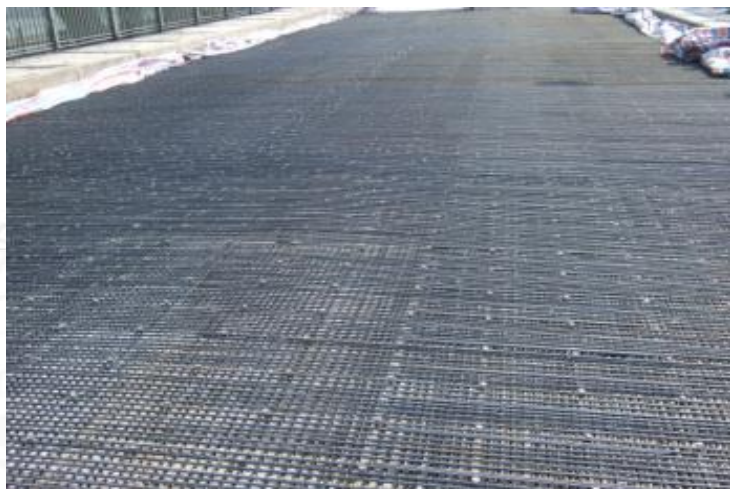
广东马房大桥的应用

- 在足尺模型试验的基础上，2011年11月-12月，完成了马房大桥第11跨正交异性钢桥面-薄层超韧性混凝土组合桥面结构施工。
- 主要施工工序为：
 - 清除原沥青混凝土铺装层→钢桥面喷砂除锈→焊接栓钉→钢桥面防腐涂装→施工环氧树脂粘结层→绑扎钢筋网→浇注超韧性混凝土→混凝土层高温蒸汽养护→混凝土层表面刻槽→施工沥青混凝土磨耗层→竣工通车。



施工主要工序

绑扎钢筋网



浇注成型混凝土



高温蒸汽养护



养护完成



湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

完成的新型组合桥面



10:50 AM

马房大桥的检测 results

- 中国铁道科学研究院实桥检测结果表明：
- 与原沥青混凝土铺装状态相比，采用新型组合桥面结构后钢桥面纵肋、面板中的应力及局部挠度明显下降，其中：
 - 纵肋构件纵桥向应力下降明显且均匀，应力降低幅度达80%；
 - 面板横向应力下降明显且均匀，平均应力降低幅度达92%；
 - 纵肋及面板的局部下挠降幅较为均匀，平均下降幅度为81%。

基于高性能材料的大型岩锚体系



HUNAN UNIVERSITY



背景:

➤ 矮寨特大悬索桥地锚吊

杆

➤ 吊杆下设置大型岩锚体

系

目的:

➤ 缩减工程量

➤ 大幅提高耐久性



体系组成:

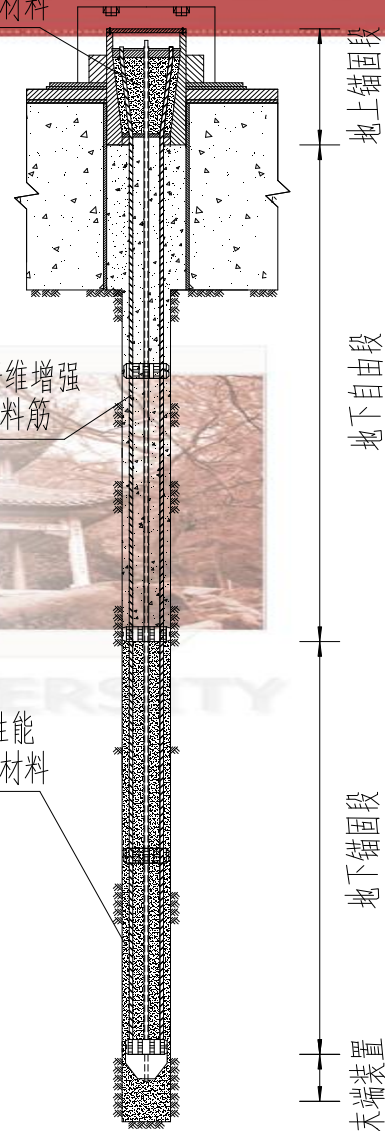
- 锚杆材料 - CFRP 筋
- 两端锚固介质 - RPC、DSP



超高性能
水泥基材料

碳纤维增强
塑料筋

超高性能
水泥基材料

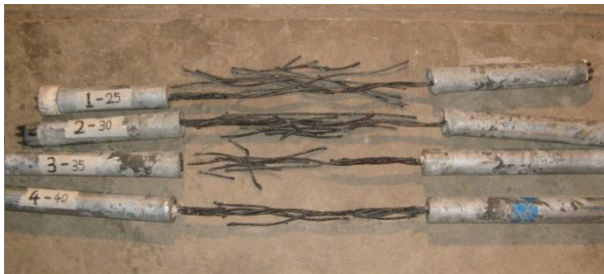


材性研究:

- 碳纤维锚杆
- 超高性能水泥基灌浆料

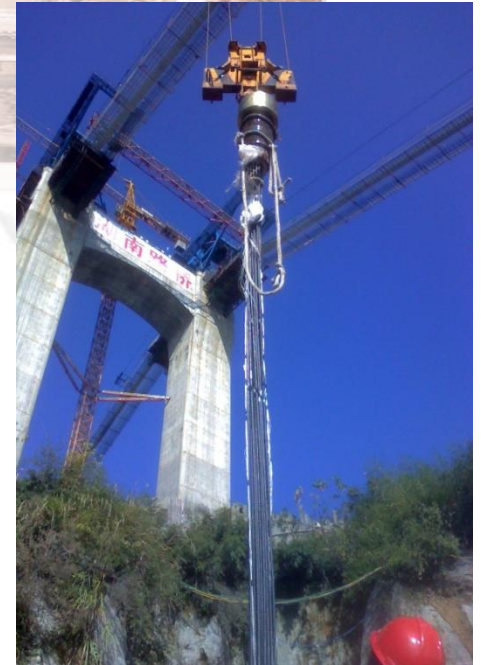
锚固体系研究:

- 碳纤维筋锚固方式
- 岩锚地上端群锚体系
- 岩锚地下段复合锚固



高性能岩锚体系力学性能研究:

- 短期受力性能
- 长期受力性能
- 高性能岩锚体系设计方法, 施工及检测评定技术





基于UHPC灌注的混合梁斜拉桥 钢-混结合段



• 云南六库怒江二桥

175m+81m 混合梁斜拉桥

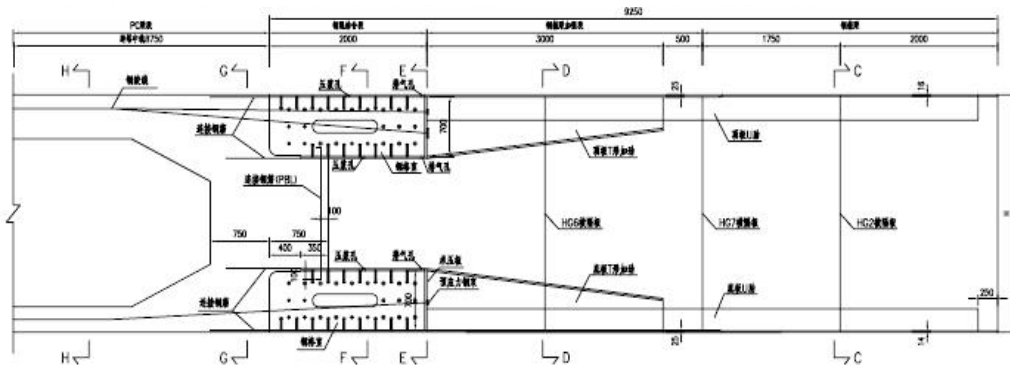
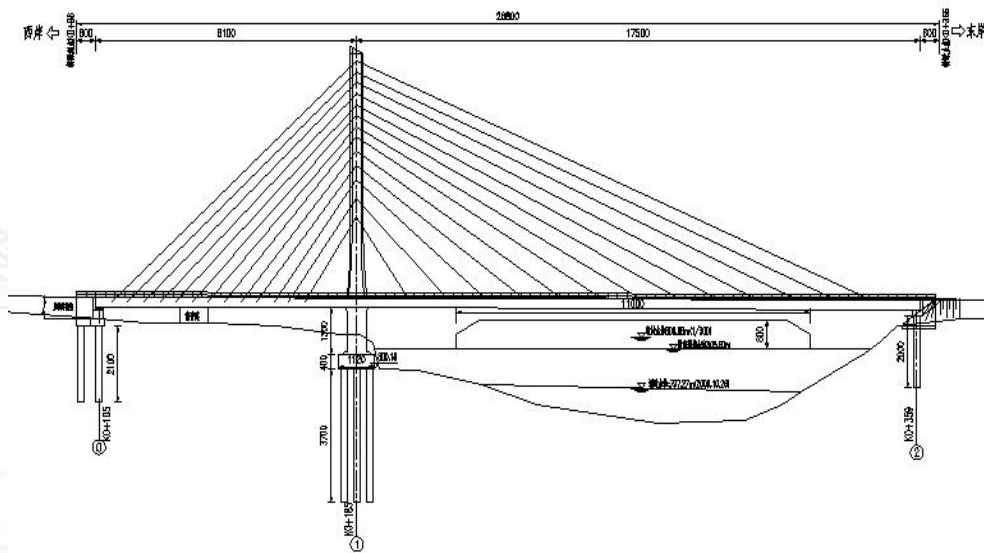
➤、独塔、宽箱、单索面

，桥面宽度32米。

➤ 主梁钢-混结合段长2米

，后承压板有格室构造，

格室内填充R P C灌注料





湖南大學 HUNAN UNIVERSITY



HUNAN UNIVERSITY

10:50 AM

现状:

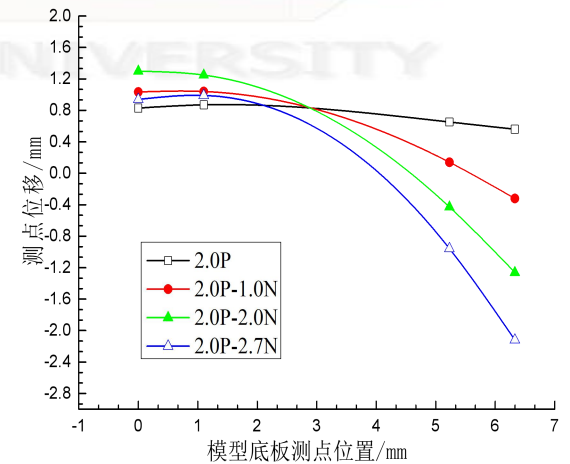
- 采用普通混凝土灌注料的钢-混结合段开裂、“脱空”现象较严重
- 压弯剪扭复合作用下钢-混结合段受力性能的研究未见文献报道

主要研究内容:

- 基于R P C灌注的钢-混结合段的合理构造形式
- 压弯剪扭复合作用下钢-混结合段的受力性能和传力机理。

节段模型试验

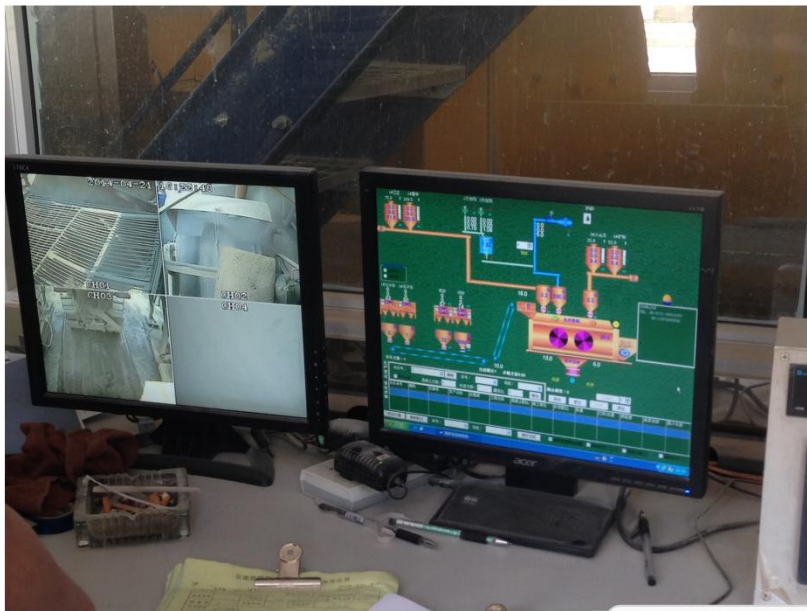
- 模型参数：全断面1:3缩尺、结合段灌注UHPC，Q345C钢材
- 试验参数：压、弯、扭复合作用





工程施工





UHPC大分量搅拌



搅拌成形的UHPC



混凝土泵车施工

10:50 AM



结合段UHPC灌注



养护后的UHPC



全预制拼装UHPC桥梁 长沙横四路跨线桥





长沙横四路跨街天桥（两跨连续27.6+36.8+6.4m悬臂）

- 总长70.8m，两跨连续（27.6+36.8）+6.4m悬臂，最大跨径36.8m，设计荷载：城—B
- 上部结构采用预应力超高性能UHPC鱼腹式单箱三室连续箱梁，顶宽6.6m，底宽3.0m，箱梁中心高1.35m，顶板厚10cm，底板厚8cm，竖腹板厚18cm，采用节段预制现场预应力拼装施工；UHPC强度等级：150MPa
- 下部结构采用预制UHPC双向曲线花瓶式桥墩，RPC强度等级：100MPa



RSITY



RSITY







湖南大学 UNIVERSITY



10:50 AM



超高性能混凝土的应用研究

- 在防护、军事工程方面

- 南京空军设计室与上海地铁公司合作，开展超高性能混凝土在地铁人防工程中的应用研究，并已制订了人防工程用超高性能混凝土防护门的地方标准
- 解放军理工大学、东南大学等研究了超高性能混凝土的抗冲击、抗侵彻及抗爆炸等性能，以满足在军事、防护等方面的应用需求；

超高性能混凝土的应用研究

- 在市政、电力、地铁、高铁等方面，

- 井盖结构
- 电缆沟槽、盖板
- 轻型电杆、重载电杆
- 地铁疏散平台
- 地铁吸声板
- 隔声板和构件
-



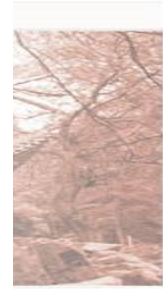
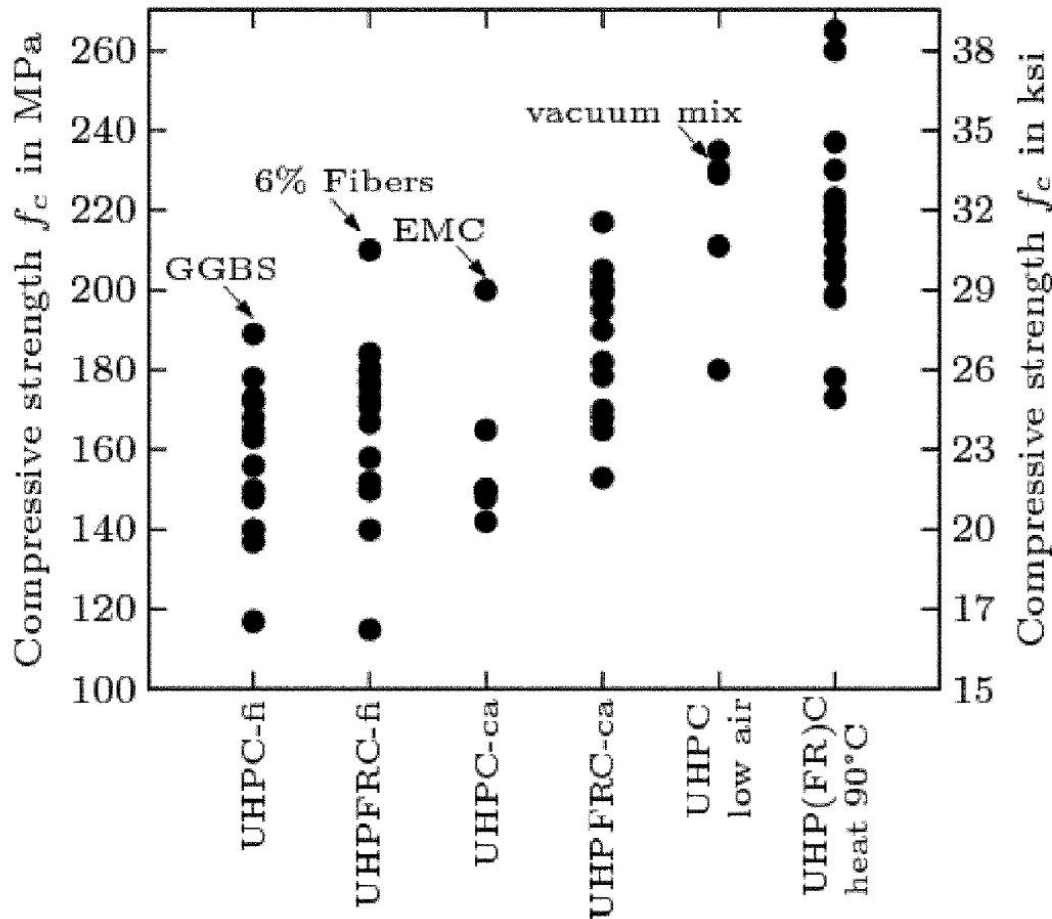
HUNAN UNIVERSITY

超高性能混凝土应用的前景

- 在我国也已研究了近二十年，目前在高铁、国防工程和个别特殊工程已有应用，但在大型结构工程中还应用不多；与国外相比，无论是研究的深度和广度，还是工程应用情况，还有较大的差距。
- 超高性能混凝土的配制受众多因素影响，制备技术还是一种高技术，需要专业人员优选材料和配比，目前，在国外基本是以干混料供应。
- 超高性能混凝土的配制原理已经公开，在专利上已无多少保护，从知识产权上有待开发和拓展的是应用超高性能混凝土的结构体系。

超高性能混凝土应用中的问题

一、原材料和配比的影响因素多



二、价格较高，对其优势认识不足：

超高性能混凝土的价格在每立方几千到万多元不等是普通混凝土的几十倍，与普通混凝土比很昂贵；但是，与钢结构相比，每吨在几千元（2000~5000元）左右，比钢结构要便宜，而某些结构性能与钢结构相当或优于钢结构性能，需要开发其用途（从结构形式到应用领域）。也需要开展降低成本的研究。



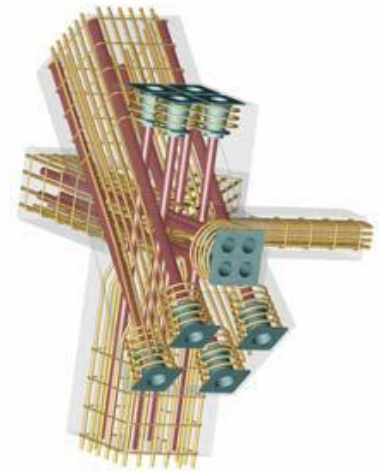
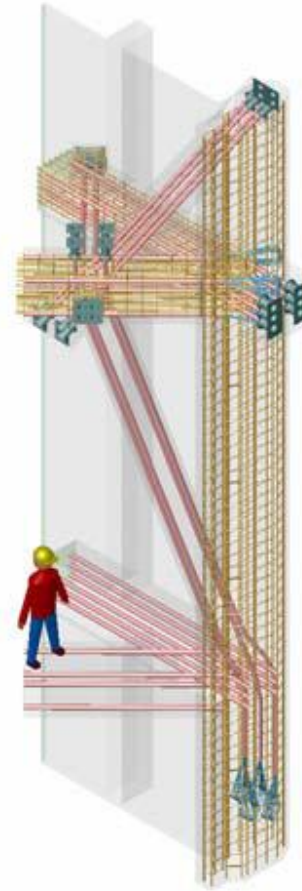
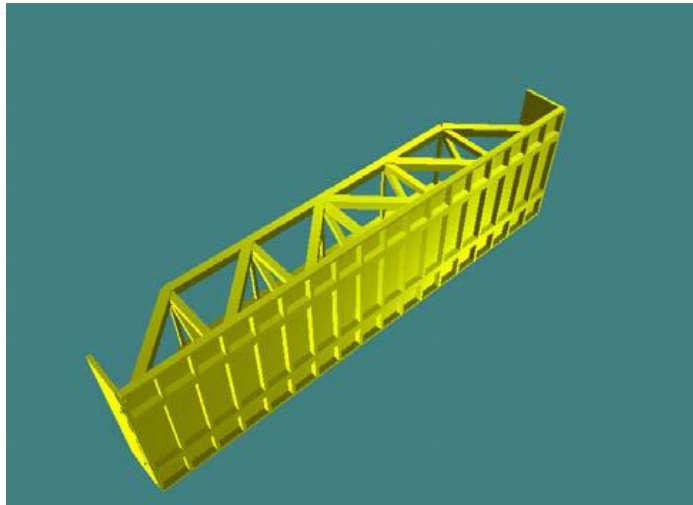
铸钢（6个月）→CRC(15~20年)



保险柜、ATM机



海洋中的闸门





三、相关的设计和施工规范缺乏：

虽然超高性能混凝土已有众多的工程应用，但相关设计和施工规范还很少，仅只在法国、澳大利亚和日本少数国家有相关的设计规范或指南，施工规范或指南就更少；阻碍了工程中的推广应用。

我国超高性能混凝土应用的不足和优势

一、原材料和性能与国际最高水平仍有差距：

水泥：

适合超高性能混凝土制备的品种不多且难得

外加剂：

没有超高性能专用系列外加剂生产

纤维：

新型扭转型高强纤维还没有生产

二、研究的深度和广度还不足

在材料层次上：

1. 原材料的选择原则总结不够
2. 复合矿物掺合料作用机理只注意了颗粒级配影响,对颗粒活性和表面能的影响缺乏研究
3. 对超高性能混凝土的生产工艺、质量控制研究不多
4. 超高性能混凝土的品种不够丰富

在结构和生产层次上：

1. 还没有形成具有共识的材料本构关系
2. 没有形成统一的结构设计标准规范
3. 目前的研究没有形成系统、有组织的研究
4. 完善的质量控制体系还在形成过程之中

三、对超高性能混凝土的性能优势认识不足

— 超高性能混凝土的推广应用领域不多：

可应用领域包括土木工程、机械工程的机床床身、耐磨管道内衬、电瓷封装材料、ATM机的防盗板等

从土木工程的建筑、桥梁、道路、水利、电力、防护等工程用作结构材料，到装饰混凝土、装饰外挂板材、无机石英石等用作装饰材料。

— 成功商业化的品牌不多

国外有DENSIT[®]、DUCTAL[®]、BSI[®]、TAKTL[®]等。

国内等为数不多的中小企业。



四、我国超高性能混凝土的应用优势：

- 基建规模大，部分工程所处环境严酷，需求大；
- 已制定了活性粉末混凝土产品国家标准，在一些工程已有成功应用，并已制定或正在制定地方标准。
- 已有一些成功应用领域，并解决了一些工程难题：如高铁的电缆槽盖板、钢-超高性能混凝土组合桥面结构、人防防护门等。
- 与国外比部分原材料丰富、价格较低。如北美超高性能混凝土的价格在2500~3500美元/m³，而我国大约为其一半以下。



结 语

超高性能混凝土作为一类新型混凝土有着其特有的性能，不同于一般的普通混凝土和高性能混凝土，只要充分认识其材料特性，根据工程疑难问题，发挥优势，寻找适当的应用领域，一定能够在我国得到较快的推广应用；**适宜的性价比**是推广应用的前提，**优良的品质**是推广应用的保证。