高性能与超高性能混凝土新型制备技术

郝挺宇　博士，教高

中冶建筑研究总院有限公司
国家工业建构筑物质量安全监督检验中心

单位简介

- 中冶建筑研究总院有限公司（原冶金工业部建筑研究总院），成立于1955年。是我国土木工程和环境保护领域里的大型综合性科研机构（转制型企业）。
- 隶属于中国冶金科工集团有限公司（简称中冶集团），2016年与中国五矿集团合并，是大型央企之一。
- 五大主营业务板块：建筑服务业、工程承包、材料产业、环保产业、海外业务。

主 要 内 容

1 引言

2 高性能混凝土发展历程

3 超高性能混凝土

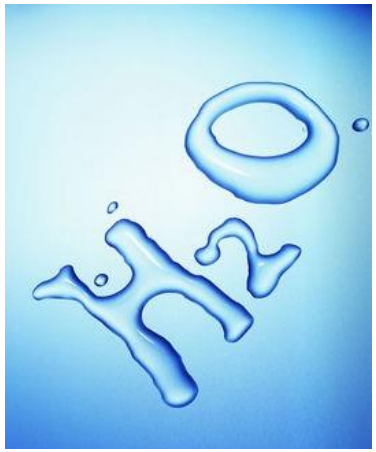
4 新型制备技术—振动搅拌

5 工程实例

6 结语与展望

1. 引言

混凝土组成（mass %）



水7%

外加剂<1%

胶凝材料14%

石子 43%

砂子 35%

国家大型水电工程

三峡大坝

锦屏水电站

广西红水河龙滩电站

云南小湾电站

巴基斯坦尼鲁姆-杰鲁姆水电站

国家重点铁路、公路工程

京沪高速铁路

京津高铁

连霍高速公路扩建

百靖高速公路

大型公共建筑

奥体中心体育场

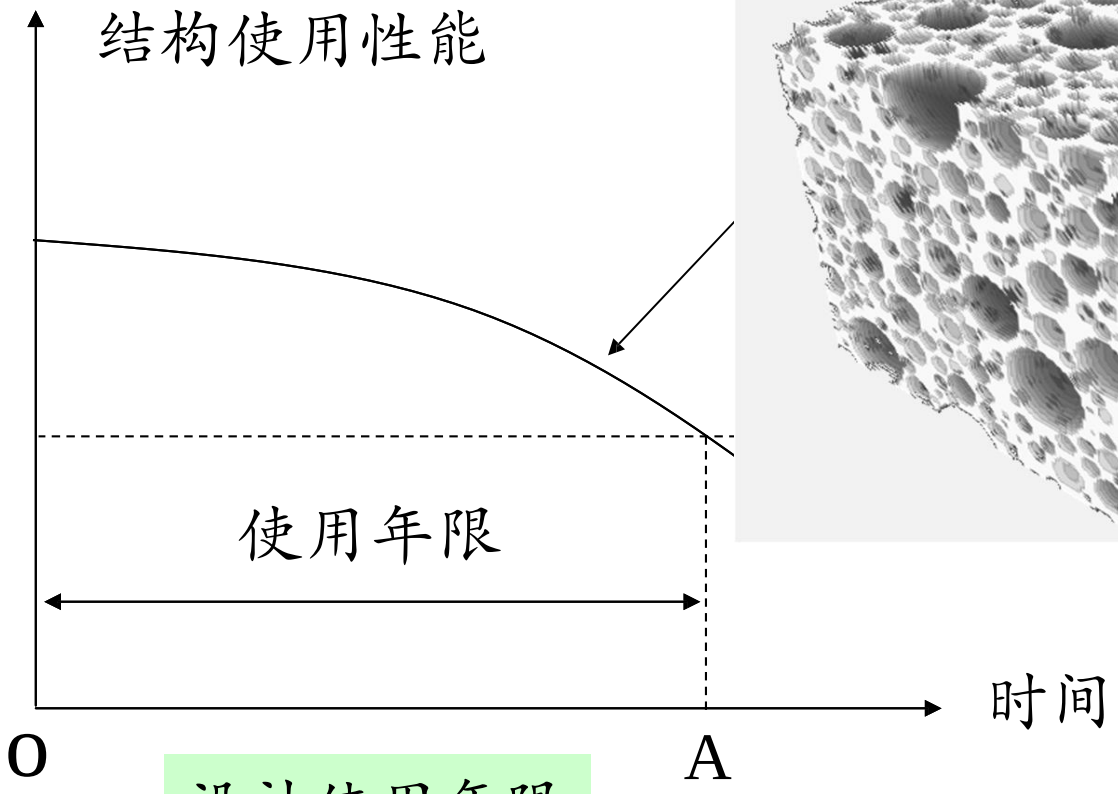
北京观光塔

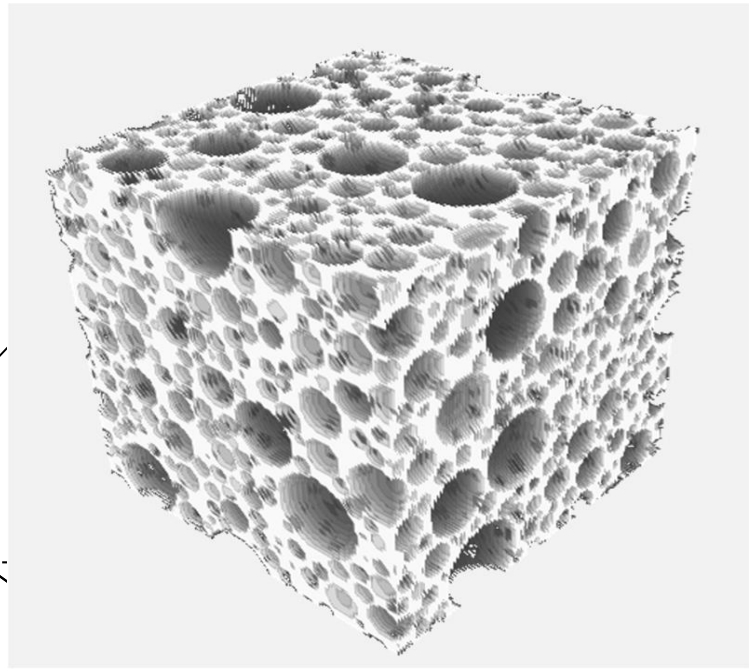
国家体育场－鸟巢

北京东方广场

2. 高性能混凝土发展历程

2.1 缘起—混凝土结构耐久性不足





基础设施——以混凝土桥梁为例

1、混凝土桥梁数目巨大

1989年统计，混凝土桥梁占全部桥梁的比例：

欧洲70%　美国52%　中国90%

2、耐久性－安全性－不修不行

美国维修桥梁花费：1986　5 亿美元

2001　83亿 美元

2007　94亿 美元

中国——同样损失惊人

- 建筑部门（包括桥梁、公路、建筑物）的年腐蚀损失高达1000亿元，占全部损失的20%

北京的第1座立交桥—西直门立交，1980.12月建成，1999年拆除，服役19年

2.2　定义、技术路线

1、定义

2、与高强混凝土的关系

3、耐久性理念

4、技术路线

混凝土高性能化

——定义及特征

美国ACI：符合特殊性能组合和匀质性要求的混凝土；

日本：高强、超高强与高流态混凝土；

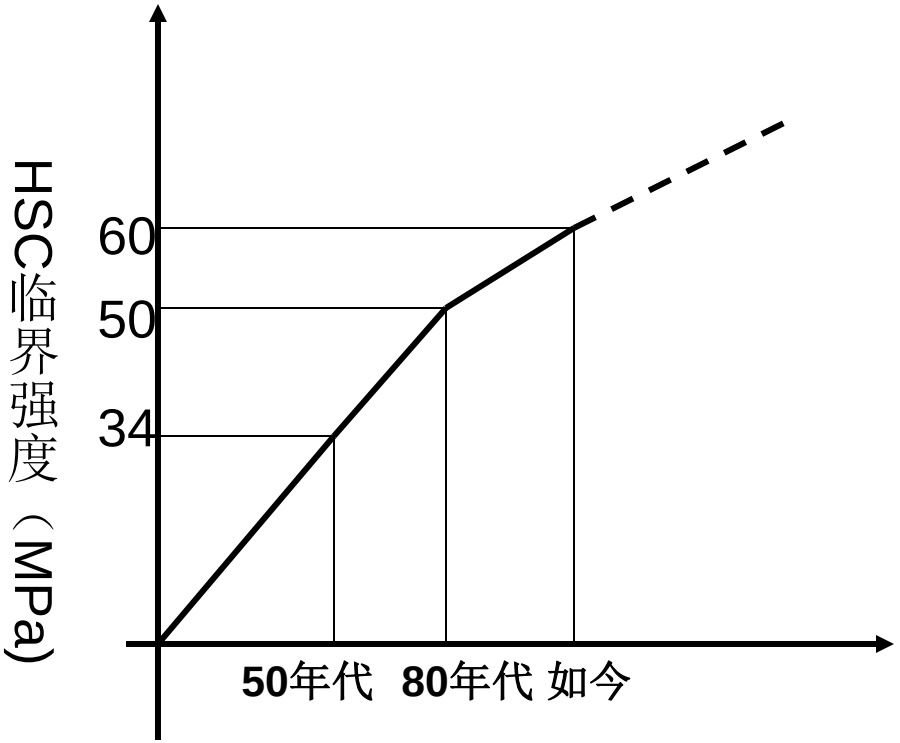
中国：采用常规材料和工艺生产，具有工程所要求的高耐久性、高工作性和高体积稳定性（2007）

高性能混凝土

——JGJ/T 385-2015

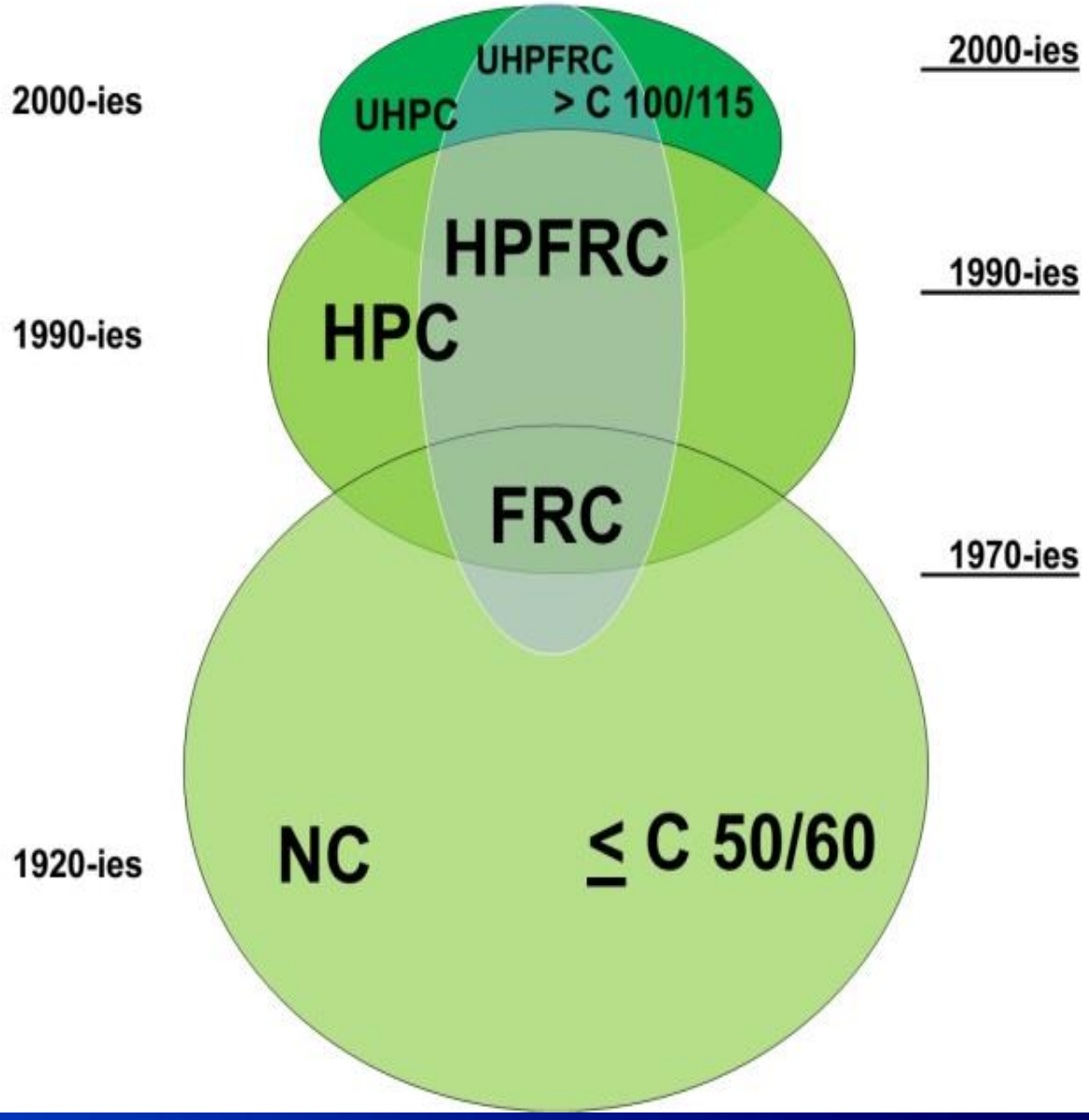
以建设工程设计、施工和使用对混凝土性能特定要求为总体目标，选用优质常规原材料、合理掺加外加剂和矿物掺合料，采用较低水胶比并优化配合比，通过预拌和绿色生产方式以及严格的施工措施，制成具有优异的拌和物性能、力学性能、耐久性能和长期性能的混凝土.

与高强混凝土的关系

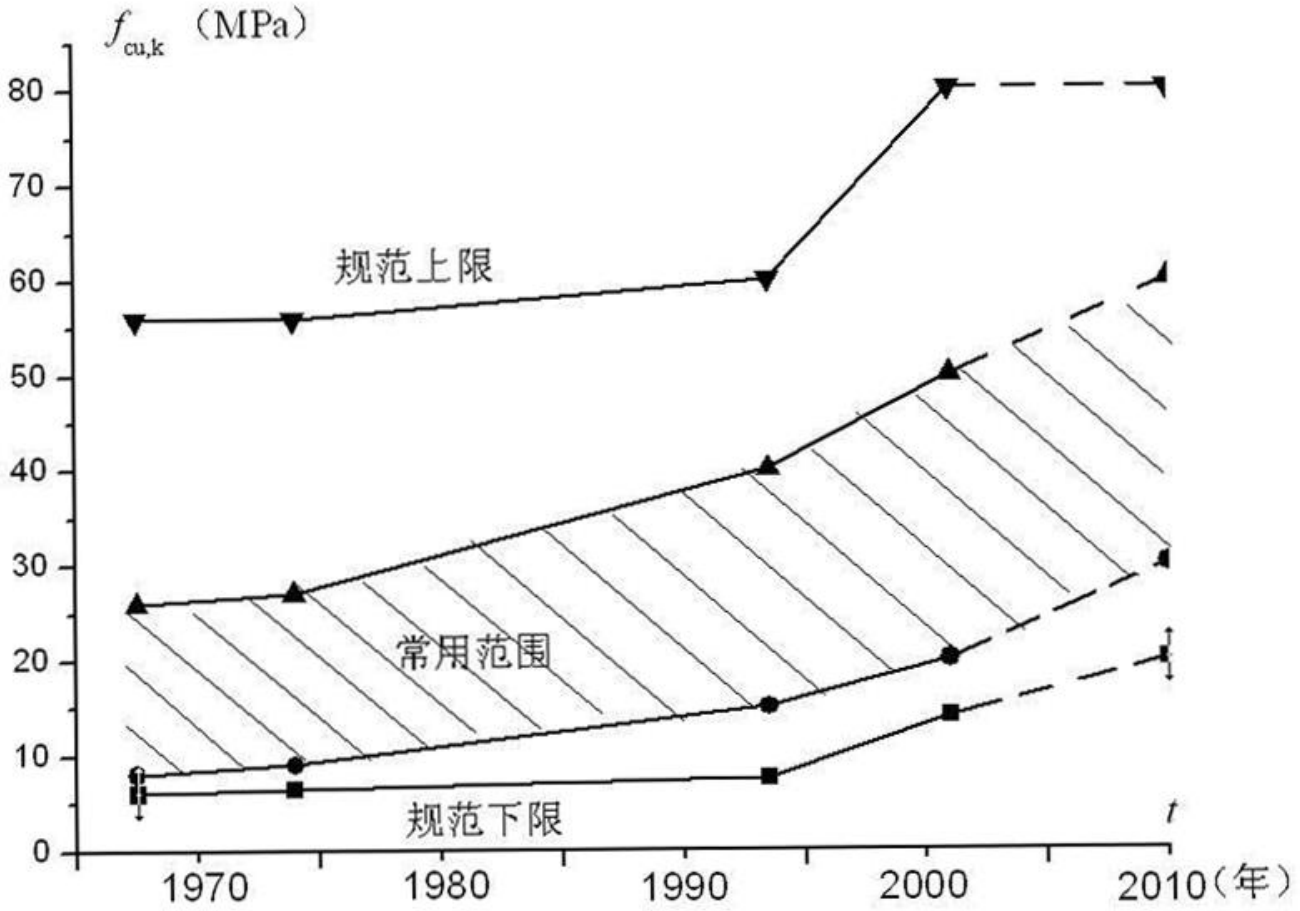


HSC定义具有不确定性，随技术革新而变化

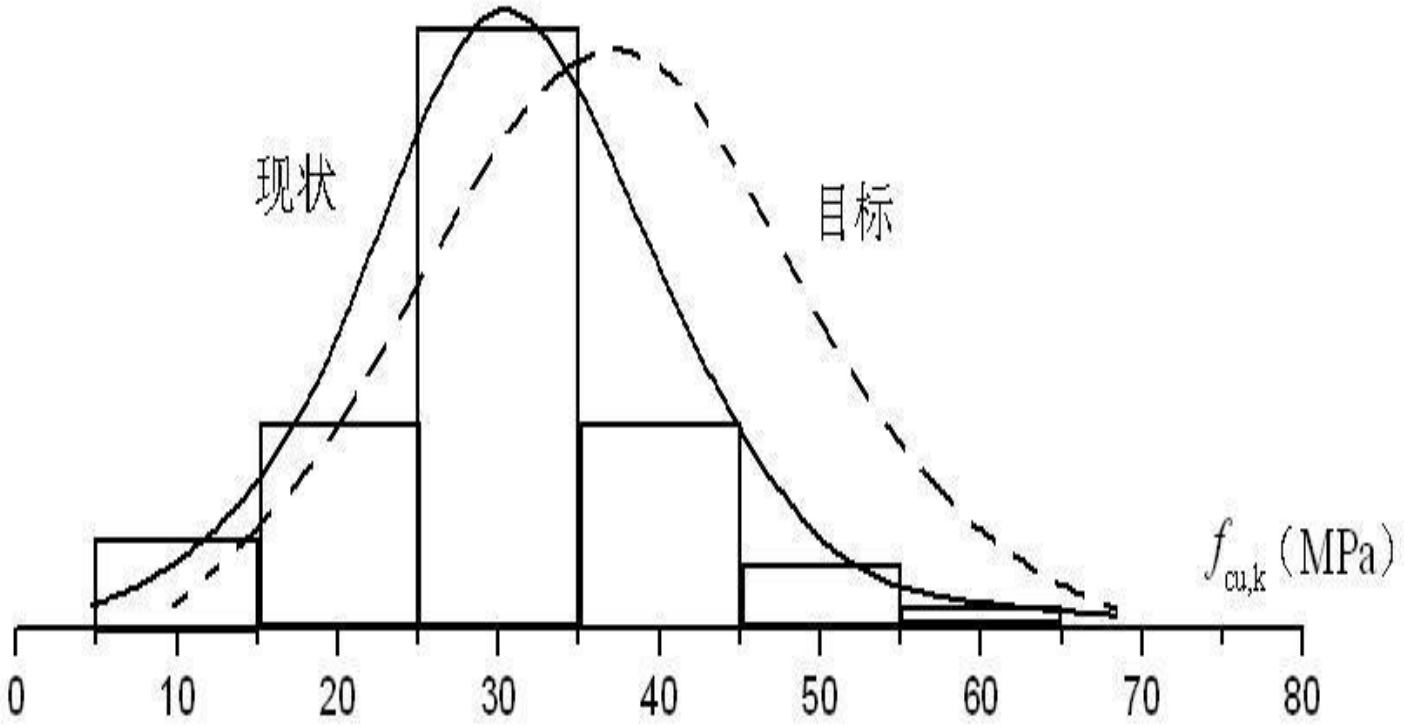
- 日
  土
- 欧


2000-ies
UHPFRC
UHPC
> C 100/115
2000-ies
HPFRC
HPC
1990-ies
1990-ies
FRC
1970-ies
NC
≤ C 50/60
1920-ies

混凝
发展



我国设计规范中混凝土强度变化情况

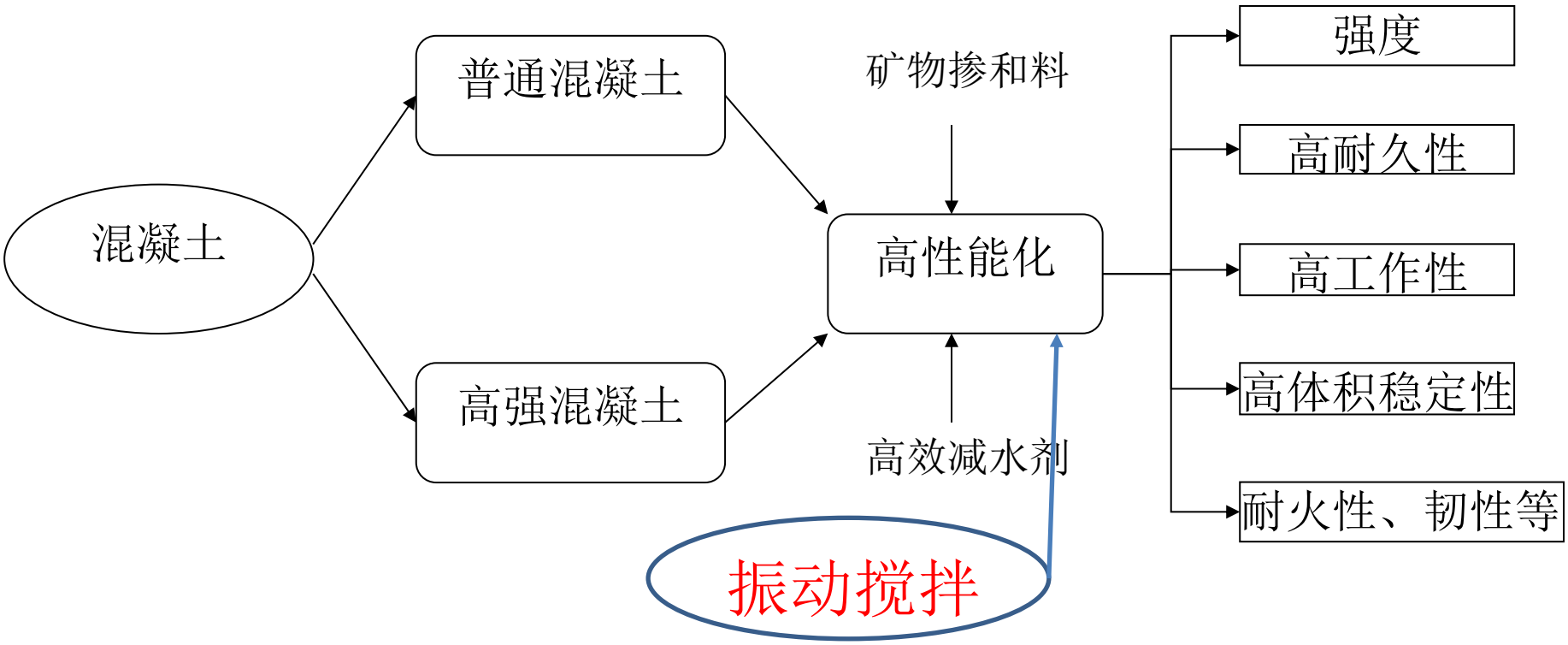


结构混凝土设计强度逐渐提高

耐久性—核心理念！

- ◆以耐久性为原则，延长结构物使用寿命，符合可持续发展要求；
- ◆配置HPC时，水泥熟料用量少，减少碳排放；
- ◆解决钢筋混凝土结构的耐久性不足问题，减少结构维修，提高安全性

混凝土高性能化的技术路线



3. 超高性能混凝土

- 随着我国基础工程的大规模兴建和城市化的高速推进，为解决大跨、薄壁、高耐久、长寿命结构的实施，超高性能水泥基复合材料的发展已是迫切急需；
- 为节省资源、节约能源、保护生态环境、优化材料性能，超高性能水泥基复合材料走生态化与环保型已是社会可持续发展的重中之重

- RPC（Reactive Powder Concrete）活性粉末混凝土是90年代发展起来的新材料，其组成材料主要是水泥、超磨细石英粉和大掺量硅灰、高效减水剂，不用粗集料，细集料为磨细石英砂（粒径为0.6mm）。

RPC与普通混凝土的对比

普通混凝土板
(Length:60cm;Thickness:3cm)

超高性能混凝土板
(With the same size)

Seonyugyo Bridge (仙遊橋)

国家重点研发计划“水泥基高性能结构材料关键技术研究与应用”项目启动暨实施方案论证会

2.2 课题任务与分工接口

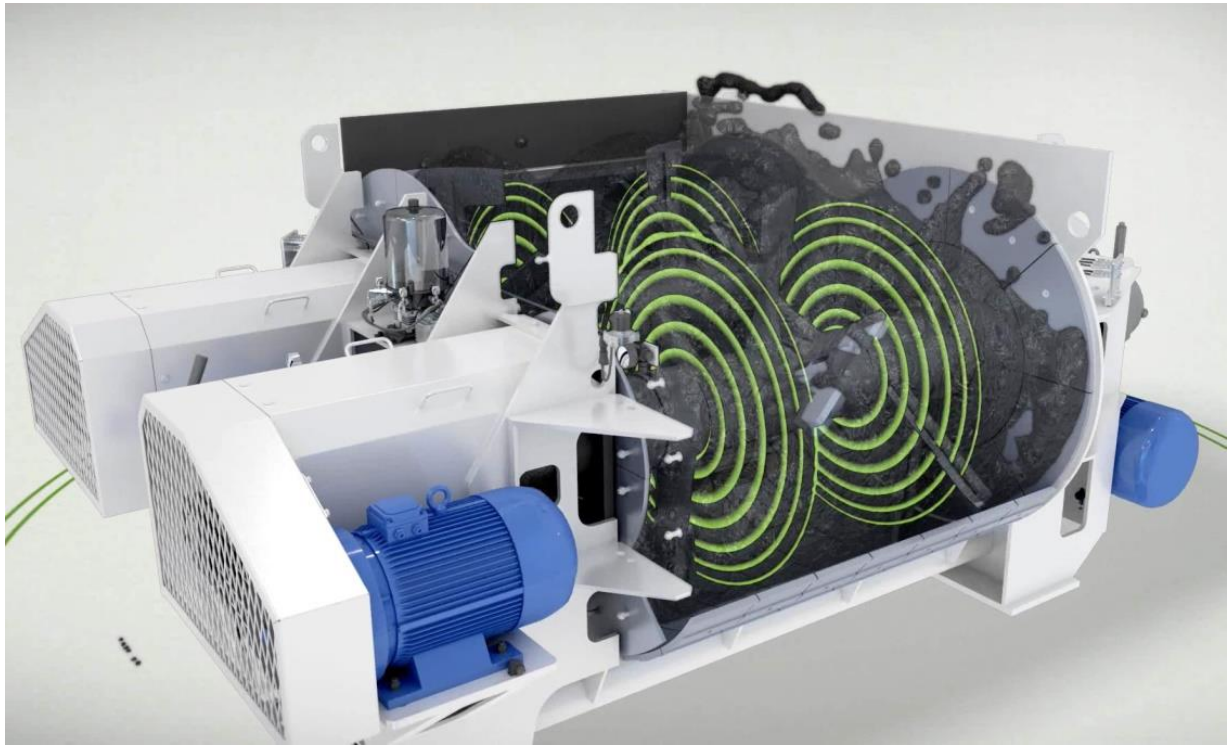
4. 新型制备技术—振动搅拌

4.1 原理

4.2 优势

4.3 方向

4.1 振动搅拌原理



振动搅拌 == 宏观对流运动 + 微观扩散运动

拌匀

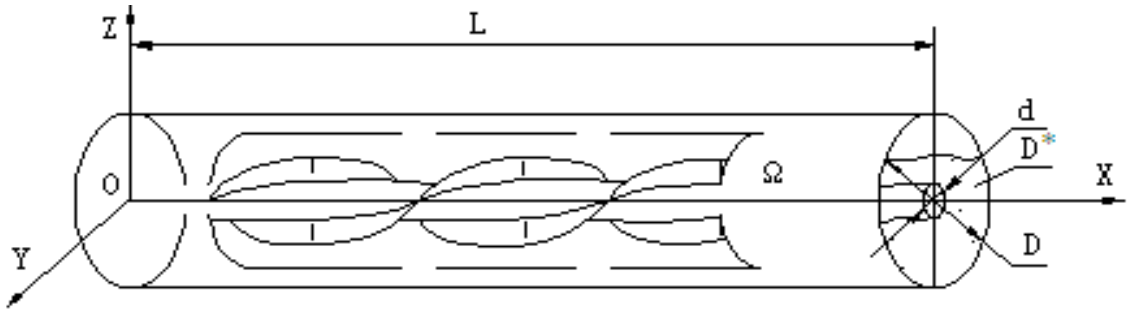
拌透

History of vibration mixing

1931 1992 2009 2012 2016

1931 poor micro uniformity was found in Russia and Germany
1972 lab test of outside vibrator plus mixer
1992 Prof. FENG Z.X start his investigation in Chang An Univ.
2009 Xian DETONG was founded to promote the innovation
2012 The 1st inside vibration mixer was invented by DETONG
2014 Vibration mixer for cement stabilized crushed stone
2015 Fast spread of vibration mixing for highway base
2016 application of vibration mixer for premixed concrete

冯忠绪教授提出的搅拌模型



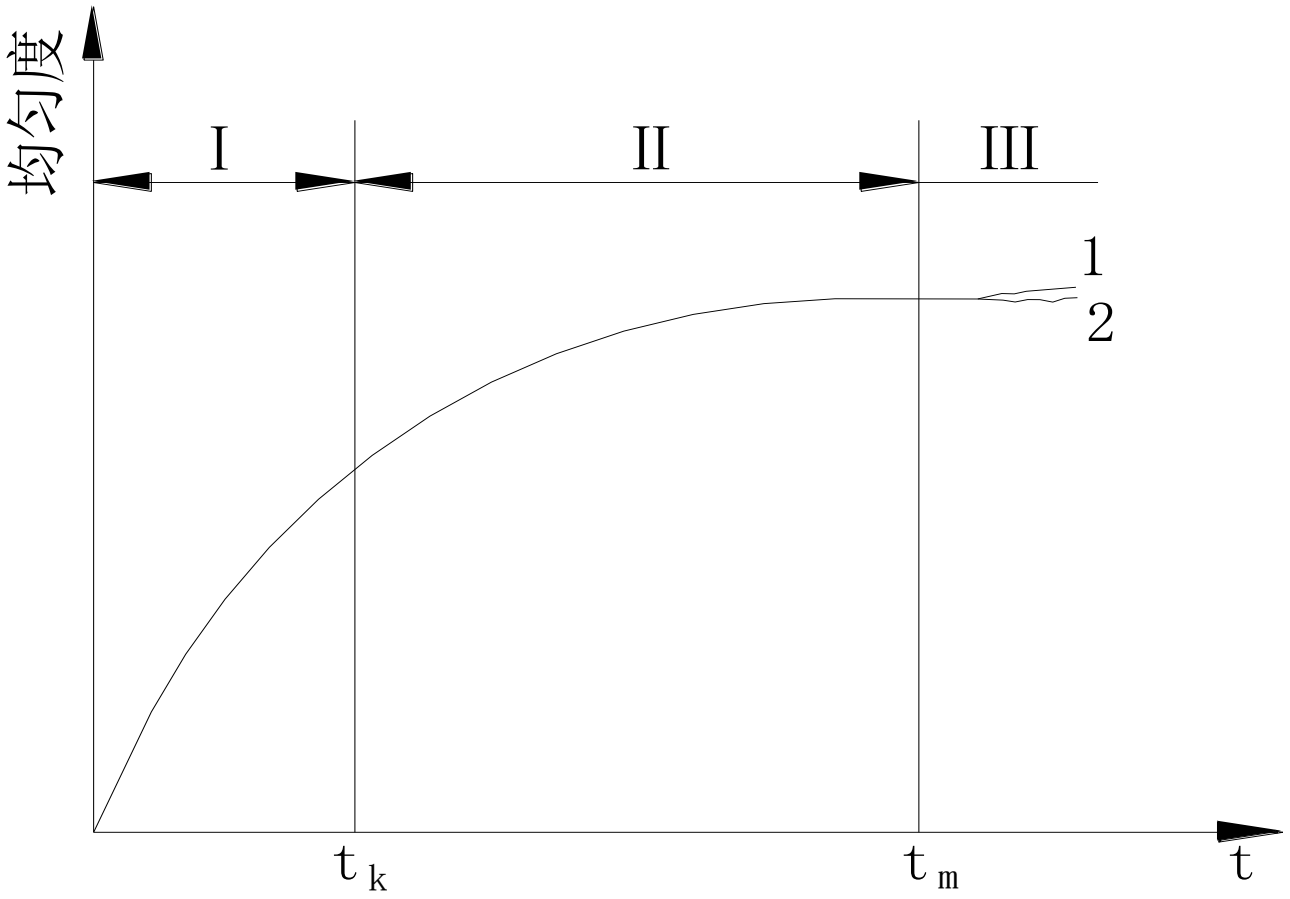
$$\frac{\partial W}{\partial t} = -v\frac{\partial W}{\partial x} + b_{11}\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + b_{\perp}\left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}\right)$$

The expression of mixing uniformity

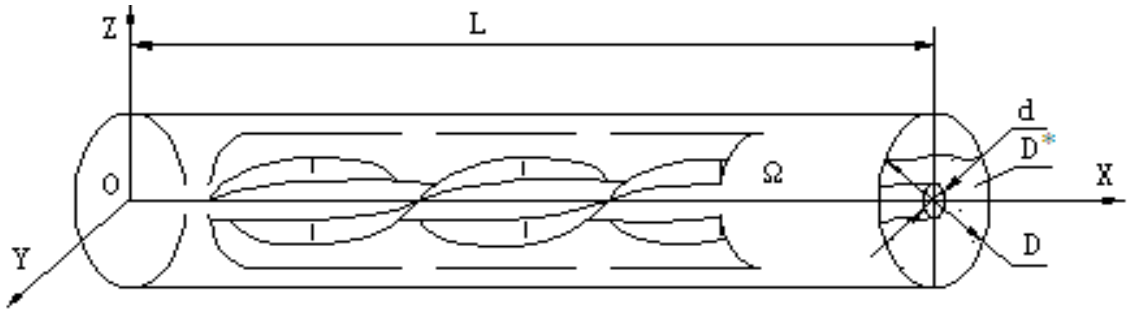
$$V_t = V_0 e^{-t\alpha_{n,k,l}}$$

V_0—the initial homogeneity coefficient;
V_t —homogeneity coefficient at the end of mixing;
t —mixing time;
$\alpha_{n,\ k,\ l}$---the minimum value of mix speed coefficient

The mixing curve



The model of mixing



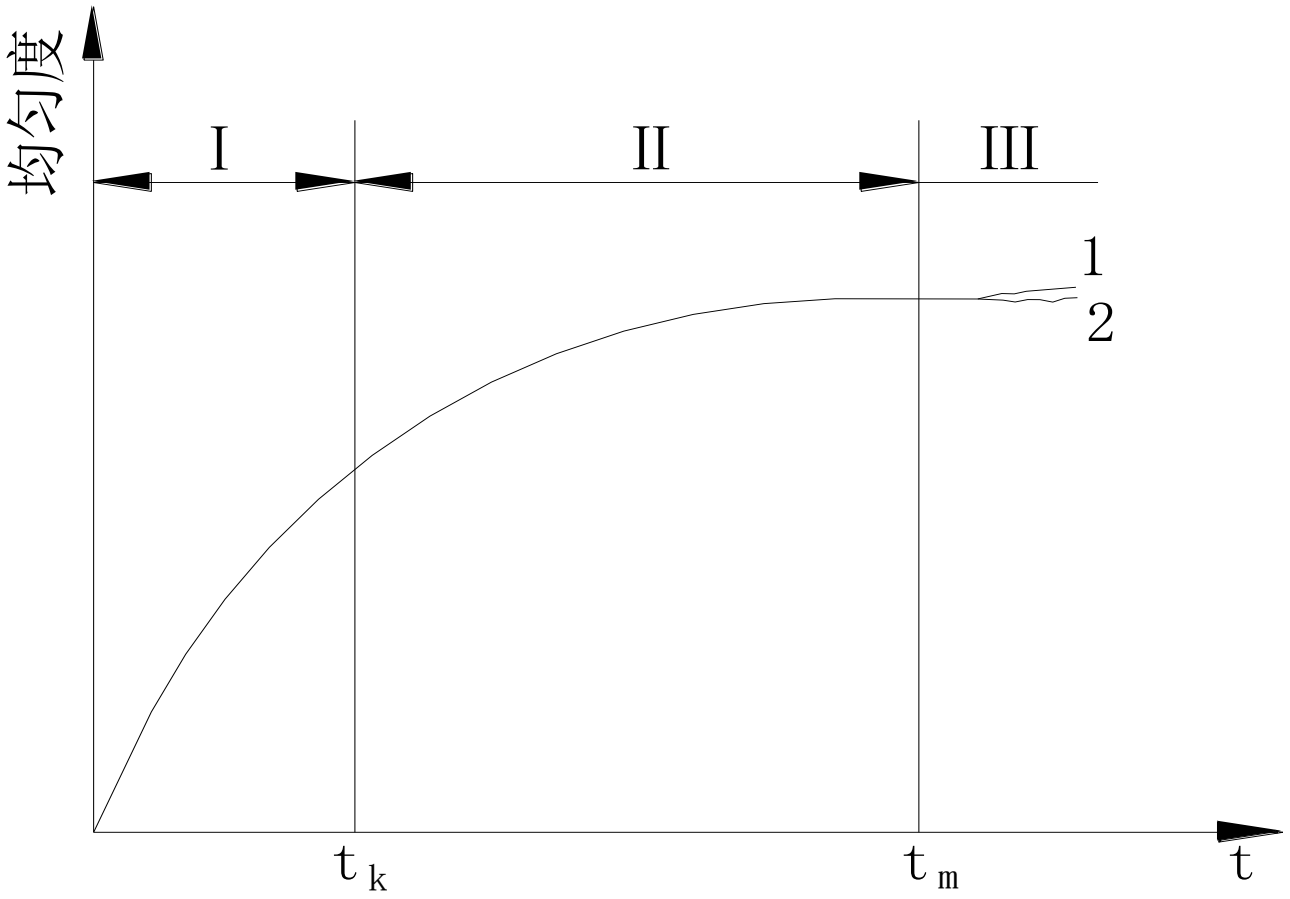
$$\frac{\partial W}{\partial t} = -v\frac{\partial W}{\partial x} + b_{11}\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + b_{\perp}\left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}\right)$$

The expression of mixing uniformity

$$V_t = V_0 e^{-t\alpha_{n,k,l}}$$

V_0—the initial homogeneity coefficient;
V_t —homogeneity coefficient at the end of mixing;
t —mixing time;
$\alpha_{n,\ k,\ l}$---the minimum value of mix speed coefficient

The mixing curve



4.2 振动搅拌优势

1. 振动搅拌机比普通搅拌机搅拌频率高，同时搅拌装置每分钟又释放1500次以上振动弹力波;

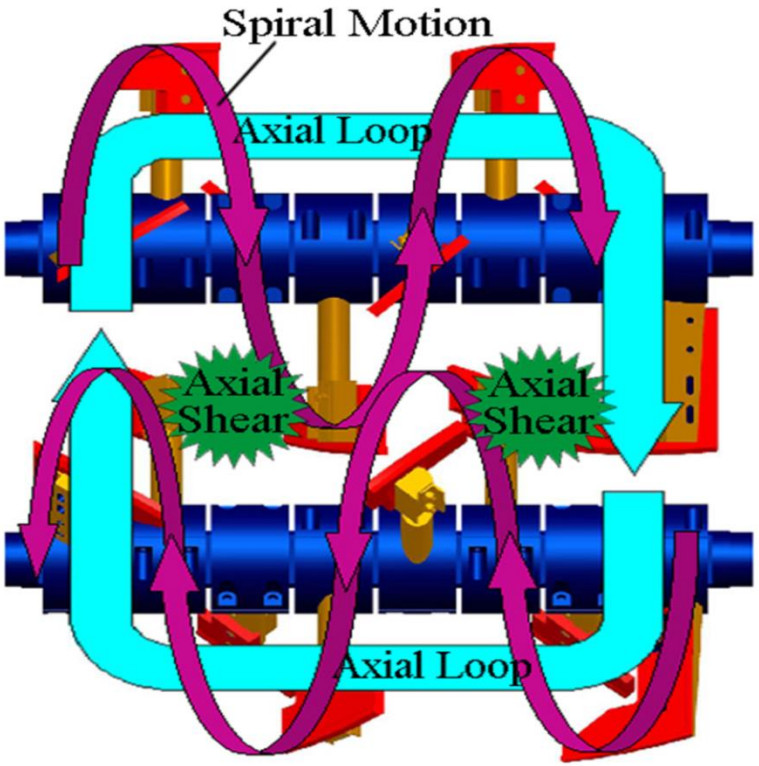
2. 搅拌装置每次对混合料撞击能量达到静力搅拌机至少10倍以上;

传统搅拌（静力）技术的缺陷

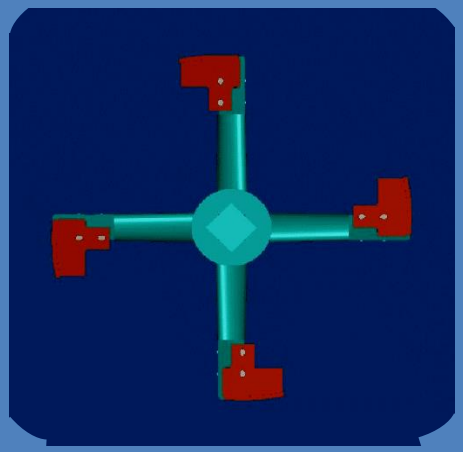
传统搅拌机的搅拌运动方式：

- 周向运动
- 轴向运动
- 径向运动

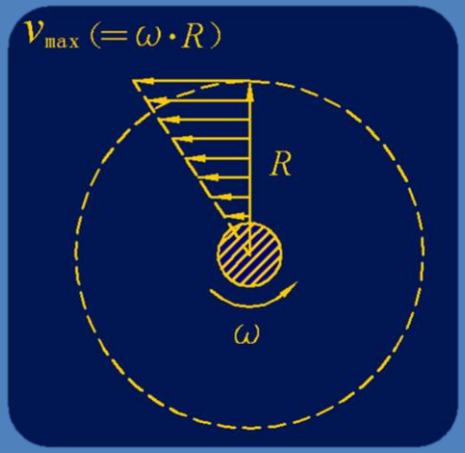
以上三种运动的复合作用满足宏观均匀性的要求，却不能让细微尺寸的“粘结料团粒”充分弥散。



现有搅拌设备的不足之处



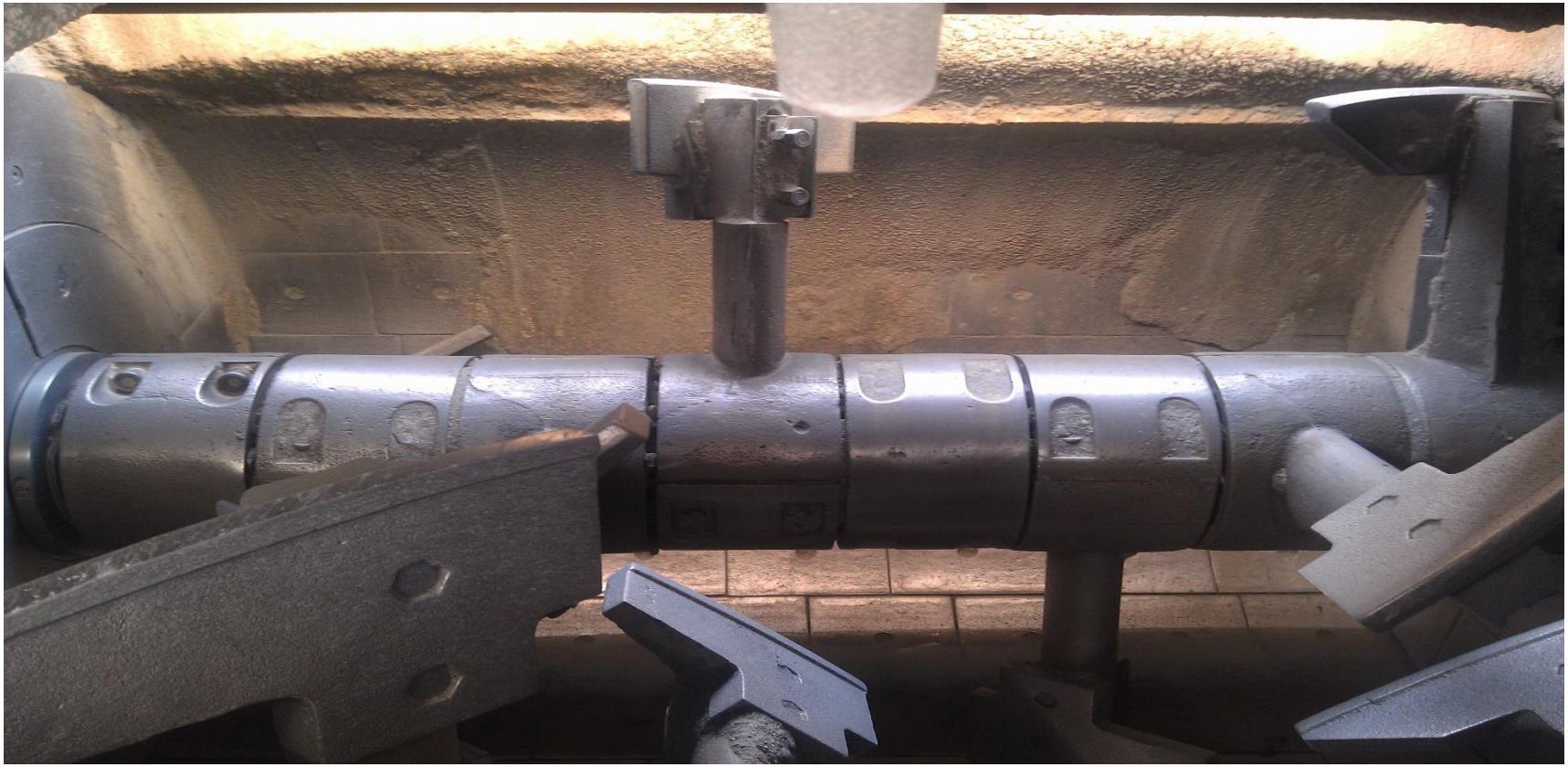
搅拌速度受限，
搅拌时间较长



存在速度梯度
和搅拌低效区

微观匀质性较差，
界面联结强度较低

“裹覆式”对流只能保证宏观均匀



振动搅拌机的不抱轴与自清洁功能

解决了普通搅拌机的水泥浆抱轴难题，杜绝了人工清理的安全隐患。

4.3 两大应用方向—

普通混凝土高性能化

超高性能混凝土制备

4.3.1——普通混凝土高性能化

	目前使用的搅拌设备	振动搅拌设备
拌合物均匀性	满足	满足，离差系数小
界面与强度	界面粘结强度弱，混凝土强度满足设计值	界面粘结强度增强，混凝土强度提高
水泥利用率	10%-30%的水泥颗粒没有充分弥散	水泥颗粒充分弥散，节约水泥
含气量与孔分布	含气量1.8%左右，内部孔隙较大	混凝土的总孔隙率和孔结构分布改善
混凝土的工作性	满足要求	更易于施工，密实性好，不泌水

勿要忘记我们的出发点

我们的目标

配出实验室最好的混凝土×

↓

施工中的混凝土

↓

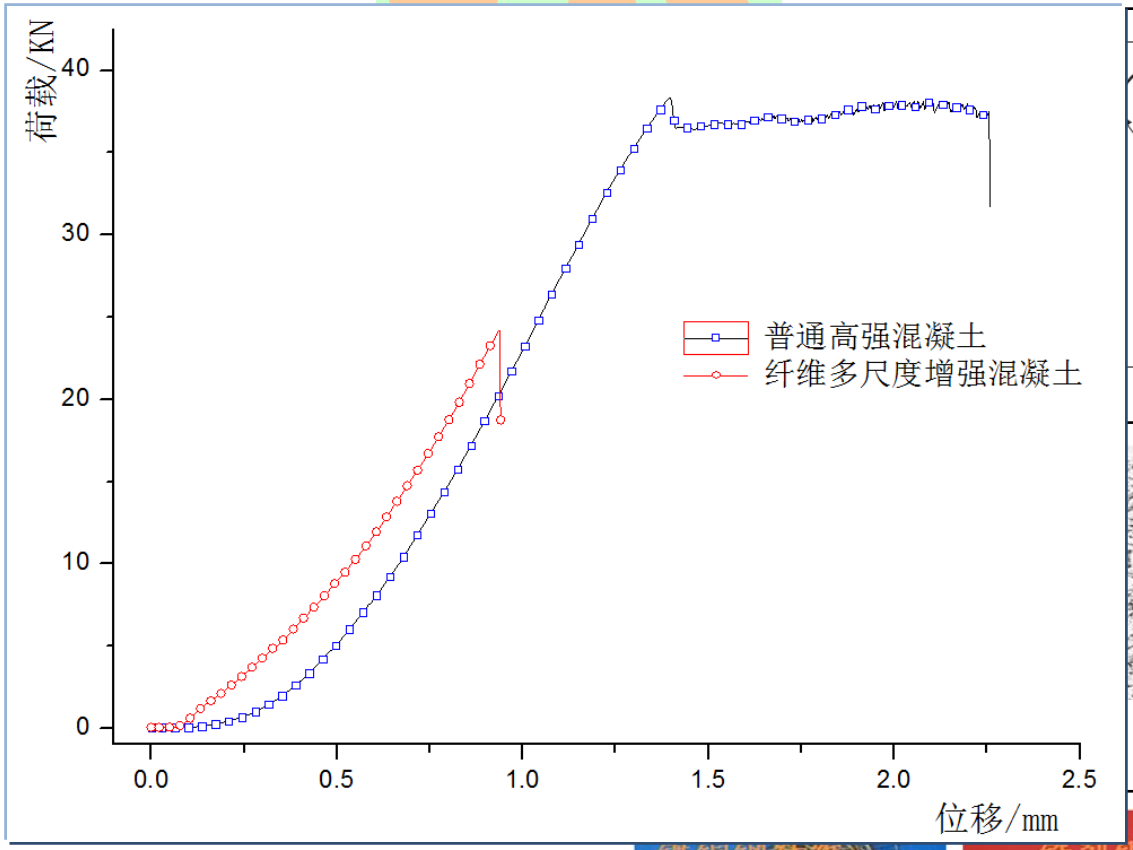
结构物中的硬化混凝土

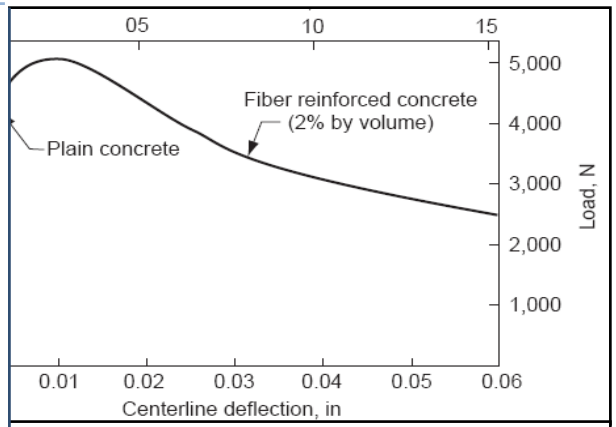
4.3.2 超高性能混凝土制备

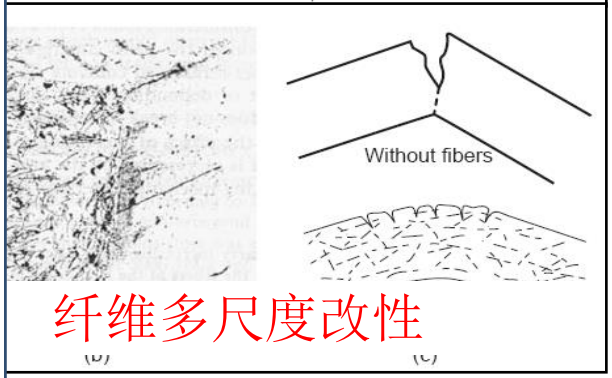
混凝土如何高强、高性能？

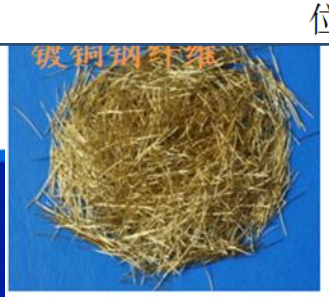
1. 降低水胶比，最低到了0.1
2. 加入掺和料，最常用：粉煤灰、矿渣粉、硅灰
3. 加入纤维：钢纤维、有机纤维、混杂纤维

核心问题：如何搅拌均匀？尤其是少量物质均匀分散到混凝土这个复杂集体中


荷载/KN
40
30
20
10
0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
位移/mm
普通高强混凝土
纤维多尺度增强混凝土


05
10
15
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
Load, N
Fiber reinforced concrete
(2% by volume)
Plain concrete
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
Centerline deflection, in


Without fibers
纤维多尺度改性


镀铜钢纤维

铣削钢纤维
zhengzhou Yuqian Steel Fiber Co.,Ltd

非晶纤维

非晶纤维

200MPa超高性能混凝土π梁

- 美国联邦公路管理局试验

原材料		RPC-4	RPC-5
水胶比		0.19	0.19
水泥（kg）		706	706
掺合料(kg)		160	160
石英砂（kg）	0.63～1.25mm	429	——
	0.315～0.63mm	600	780
	0.16～0.315mm	171	420
钢纤维（kg）		160	160
高性能减水剂1（kg）		68	68
水（kg）		126	126
坍落度（mm）		165	140
粘度		一般	较大
抗压强度（MPa）	3d	134.5	126.2
	7d	139.1	129.0
	28d	141.2	129.2

搅拌困难

- 钢纤维成球

使用传统搅拌机

（1）投料顺序按石英砂、钢纤维预拌，其时间不得短于2分钟，再加水泥、专用复合掺和料搅拌1-2分钟，最后加入水、外加剂搅拌4分钟以上，总搅拌时间控制在7min以上；

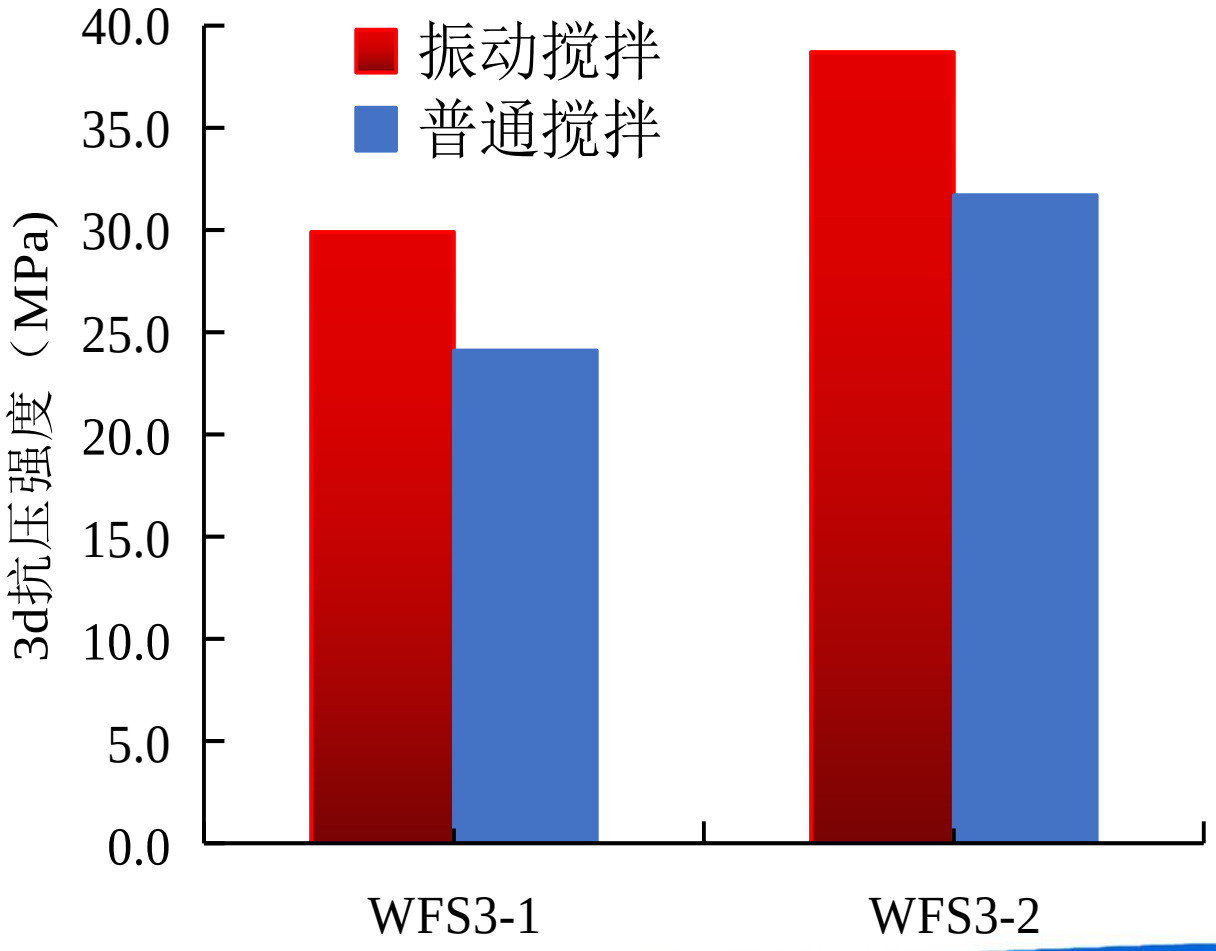
（2）每次的搅拌方数减少为0.8方；

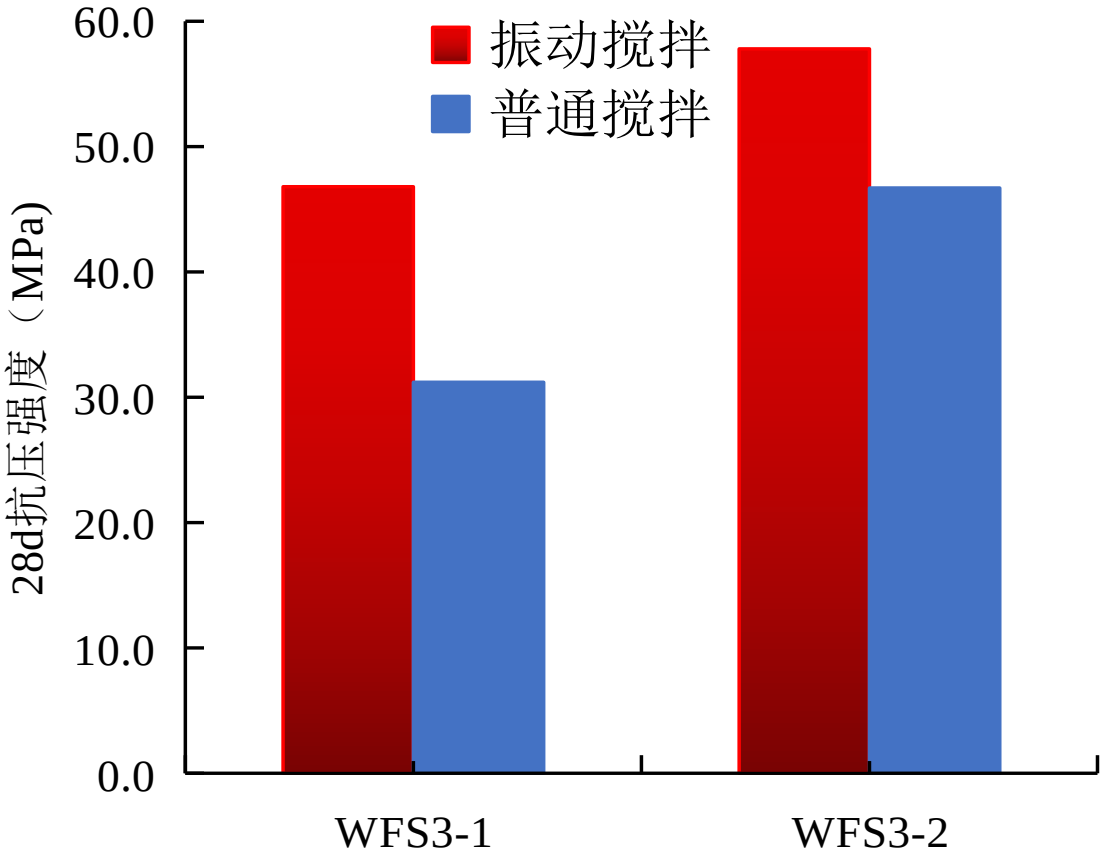
（3）将钢纤维均匀下料或先倒在一平板上，使其散开，再下料

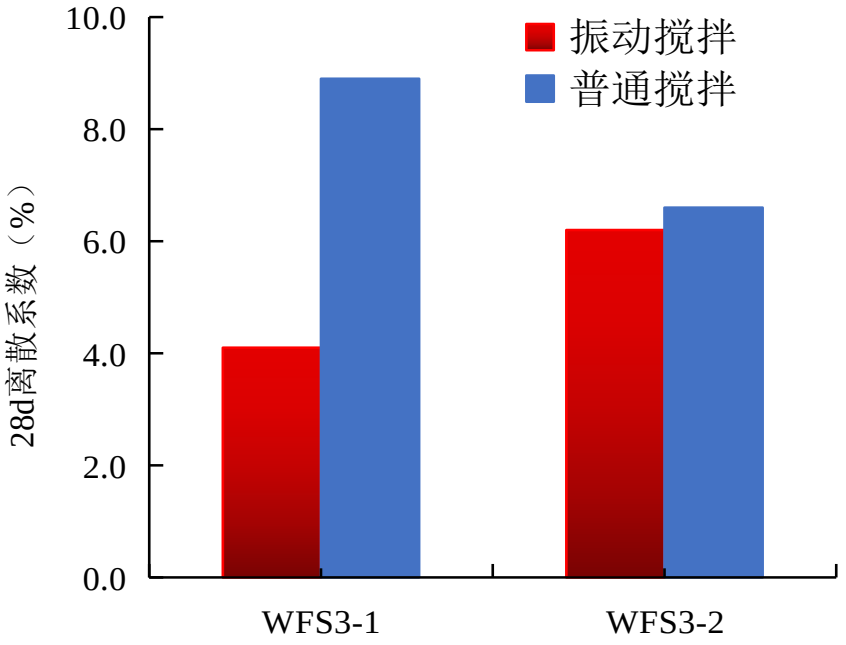
振动搅拌制备效果

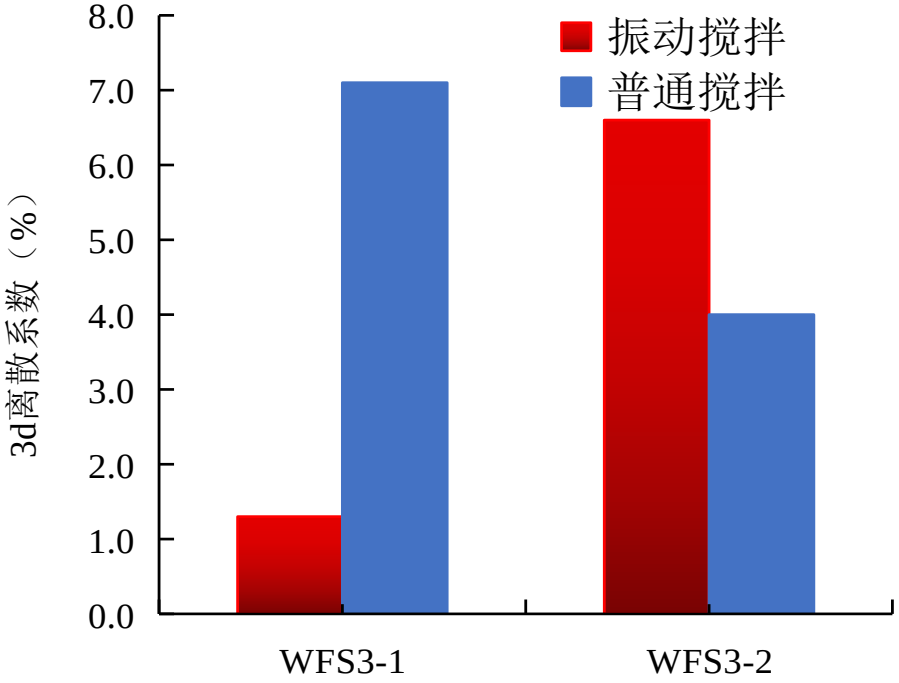
5. 工程实例

某高速公路现场试验

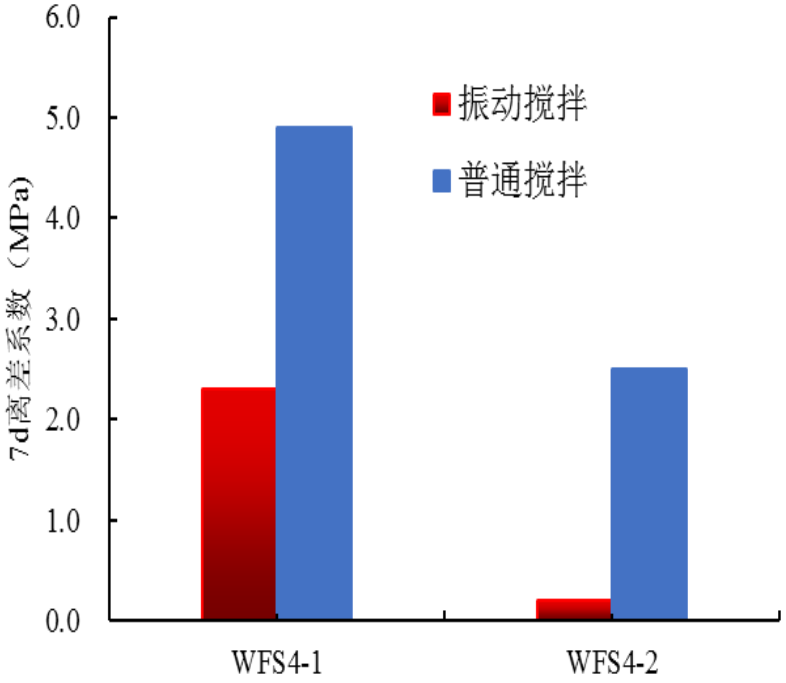

40.0
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
3d抗压强度（MPa）
振动搅拌
普通搅拌
WFS3-1
WFS3-2

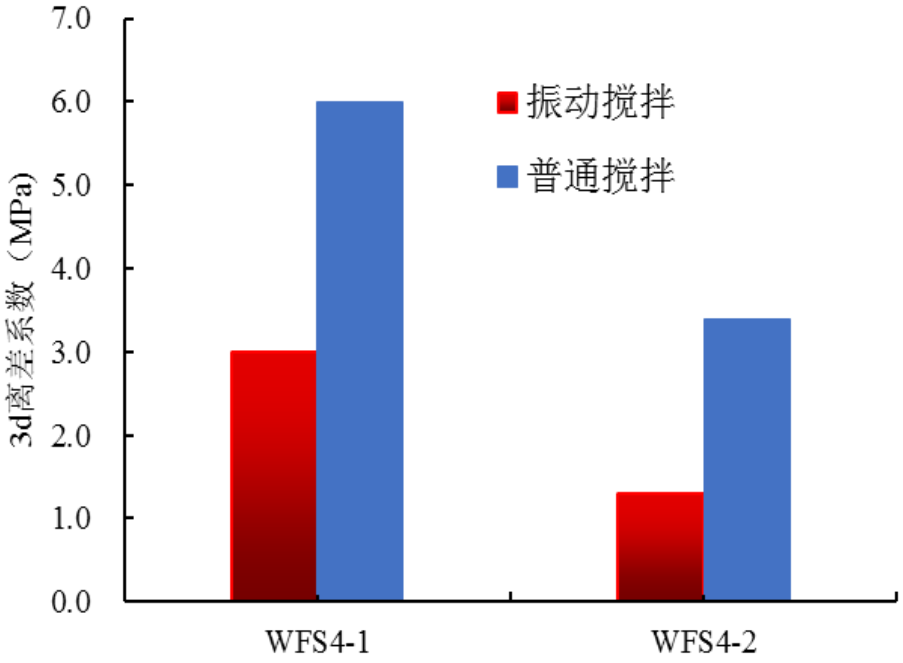

60.0
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
28d抗压强度（MPa）
振动搅拌
普通搅拌
WFS3-1
WFS3-2


10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
28d离散系数（%）
振动搅拌
普通搅拌
WFS3-1
WFS3-2


8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
3d离散系数（%）
振动搅拌
普通搅拌
WFS3-1
WFS3-2

C30混凝土


6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
7d离差系数（MPa）
振动搅拌
普通搅拌
WFS4-1
WFS4-2


7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
3d离差系数（MPa）
振动搅拌
普通搅拌
WFS4-1
WFS4-2

C55混凝土

对C30混凝土

- 在振动搅拌条件下混凝土3d、7d、28d平均抗压强度分别提高4.38~10.86%，8.36~13.15%和6.33~8.36%。
- 振动搅拌与普通强制搅拌相比，其3d、7d、28d抗压强度离差系数分别降低44.0~69.2%，40.0~80.0%和13.6~63.9%。

C50混凝土均匀性也显著提高

- 与普通搅拌相比，在振动搅拌条件下混凝土 3d、7d平均抗压强度分别提高1.3~9.5%和1.9~9.9%。
- 振动搅拌与普通强制搅拌相比，其3d、7d抗压强度离差系数分别降低50%，53.1%。

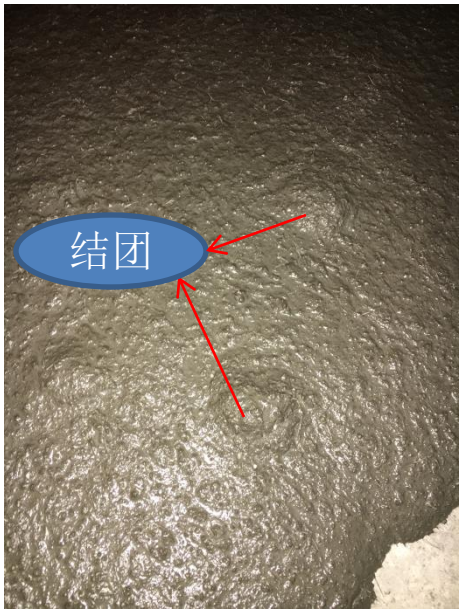
UHPC实例：广东清远北江四桥

同类中断面世界最宽-清远北江四桥

超高性能混凝土铺面设计寿命100年

上海某公司UHPC工程应用

振动搅拌UHPC



普通搅拌UHPC

上海复培UHPC试验					
试验时间	搅拌机类型/L	搅拌时间/min	搅拌转速/r/min	7d抗压强度/MPa	28d抗压强度/MPa
2018.8.6	60	6	56	98.8	132.9
2018.8.6	60	9	56	100.1	135
2018.8.7	60	12	56	108.1	136.6

普通搅拌下，UHPC的搅拌时间在10分钟以上；振动搅拌下，搅拌时间从12分钟降到6分钟，试件强度降低幅度不大

南通市中央创新区桥梁工程
上承式钢拱桥桥面板预制

6. 结语与展望

1. 高性能混凝土以提升耐久性为核心，是现在及未来长期国家大力推广的土木工程基本材料；
2. 振动搅拌技术出现及发展对普通混凝土高性能化具有重要意义；
3. 在超高强混凝土、超高韧性混凝土等传统搅拌难以胜任的方面，振动搅拌技术应用潜力巨大。

4. 混凝土生产环节复杂，仅在搅拌工序做好远远不够，需要其它环节协同，才能最大限度发挥振动搅拌的优势，制备出真正的高性能、超高性能混凝土结构！