

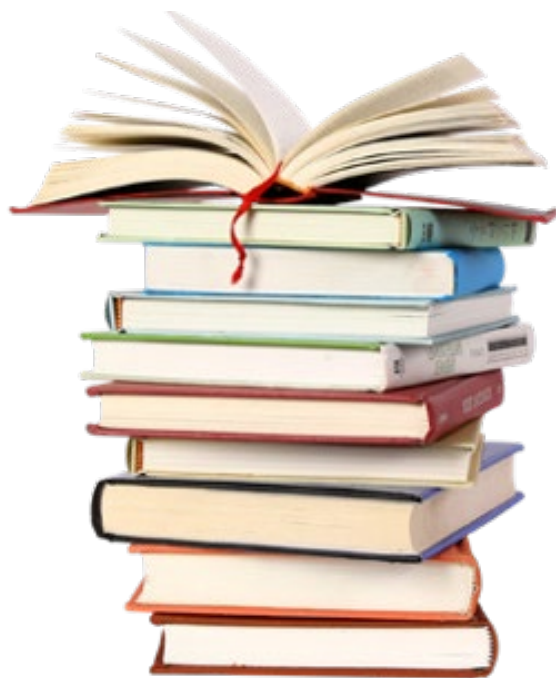


第二讲：混凝土结构材料

任晓丹

同济大学土木工程学院





材料与结构概述

混凝土

是以水泥为主要胶结材料，拌合一定比例的砂、石子和水，有时还加入少量的各种添加剂，经过搅拌、注模、振捣、养护等工序后，逐渐凝固硬化而成的人工混合材料，简称为砼(音tóng)，各组成材料的成分、性质和相互比例，以及制备和硬化过程中的各种条件 and 环境因素，都对混凝土的力学性能有不同程度的影响。

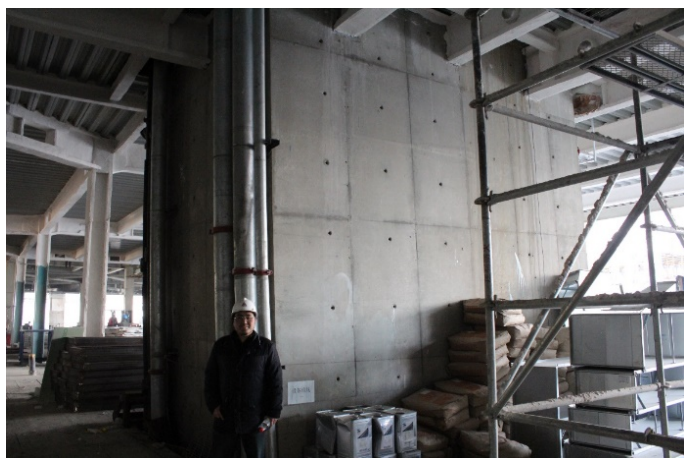


混凝土结构的应用

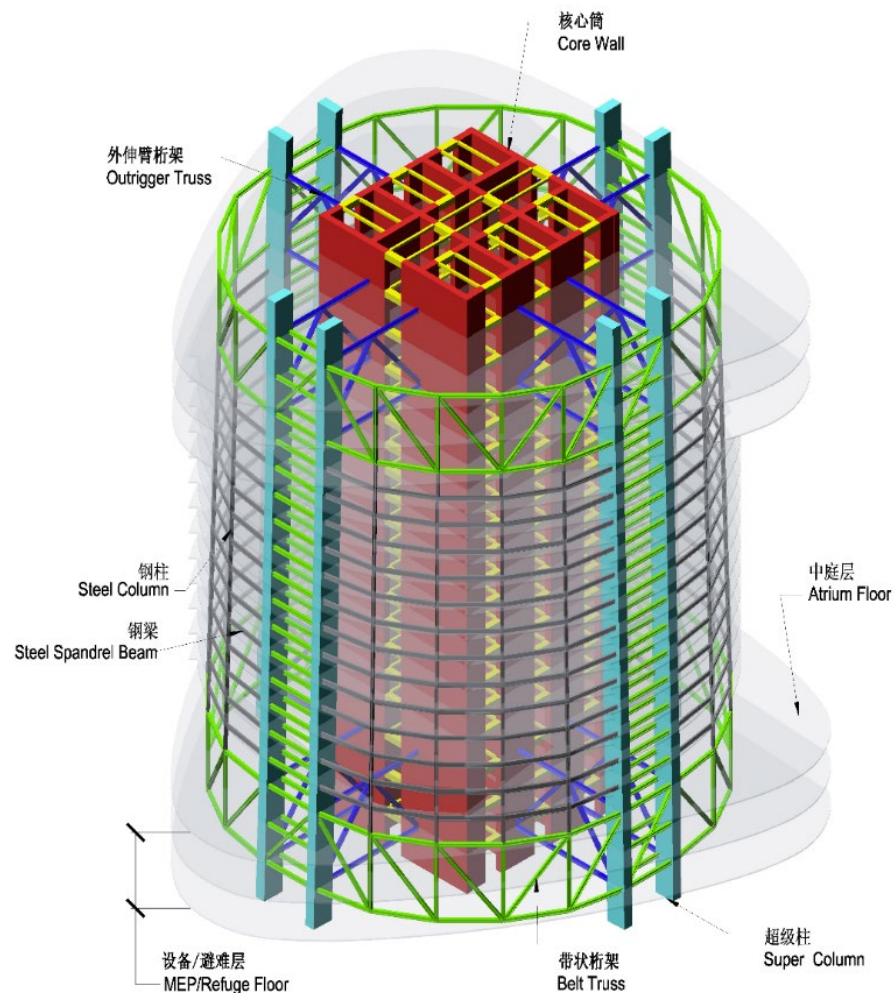


超高层建筑的主要抗侧力体系一般采用**混凝土结构或者组合结构**！

高层超高层建筑结构



巨型柱构件

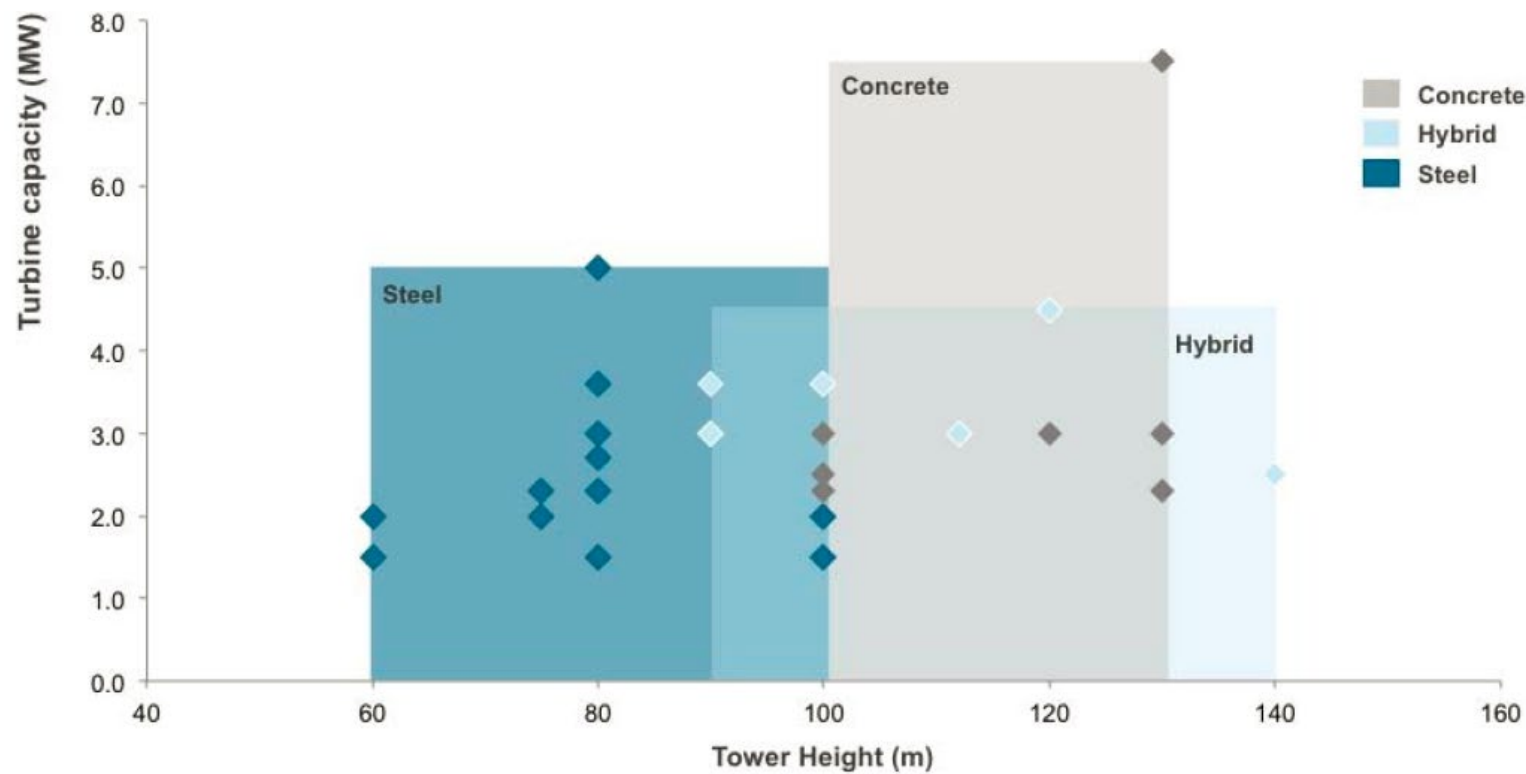


结构体系



超高层建筑

新能源结构



风力发电高塔的结构选型



混凝土风力发电高塔

混凝土空间结构



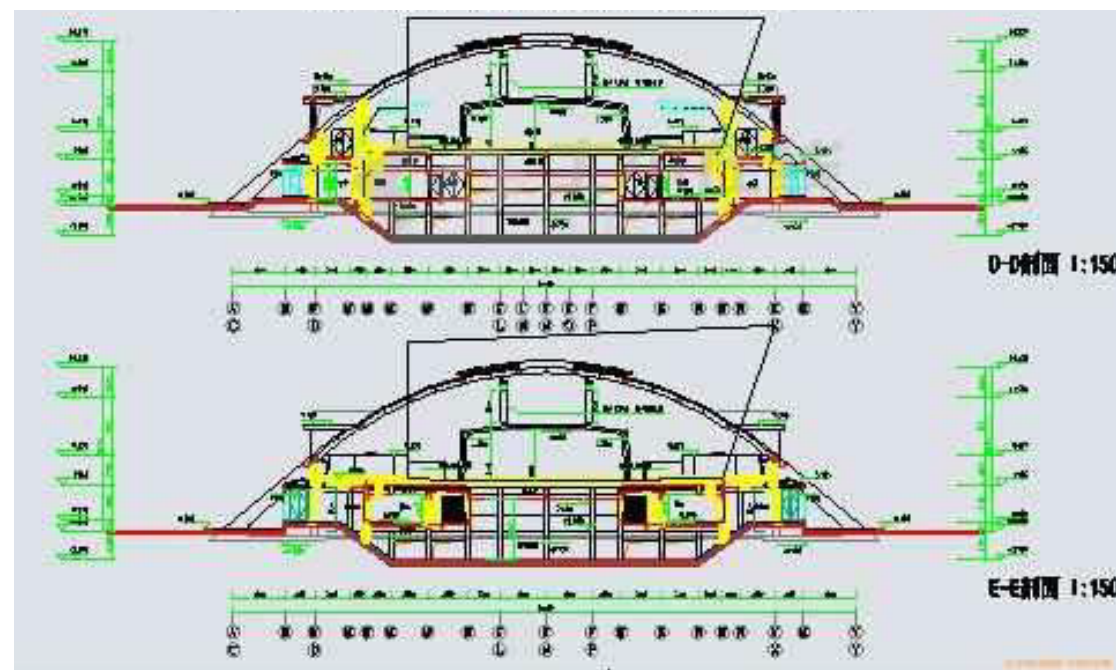
Designed by Arup



混凝土空间结构



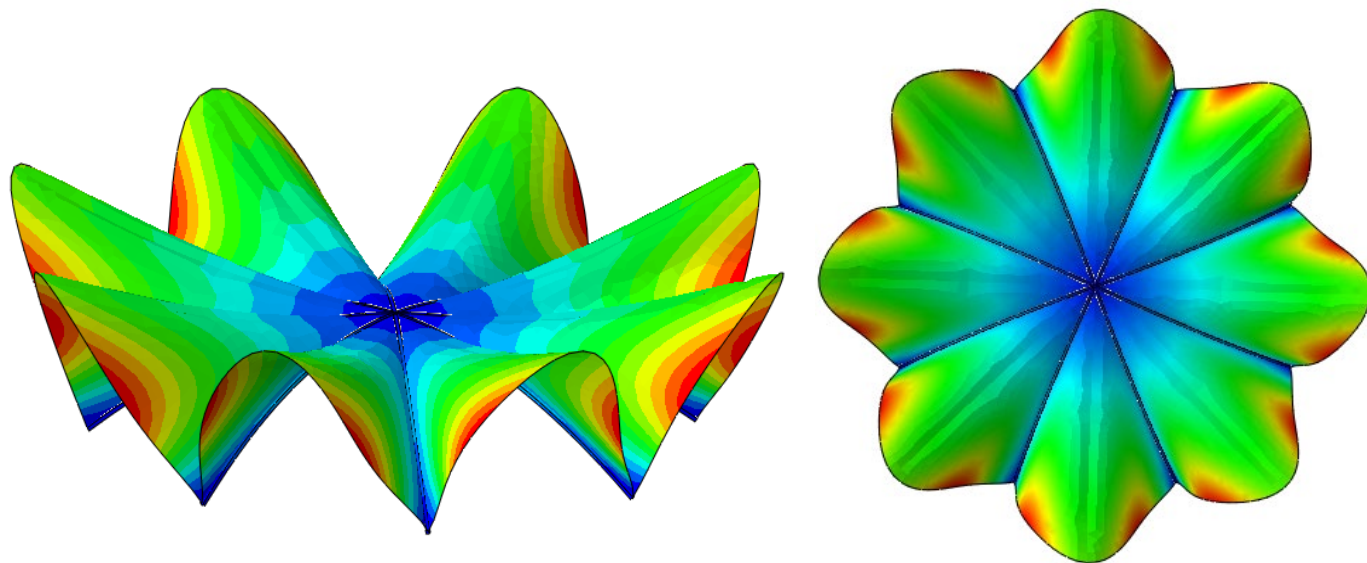
俞载道先生主持结构设计



混凝土空间结构



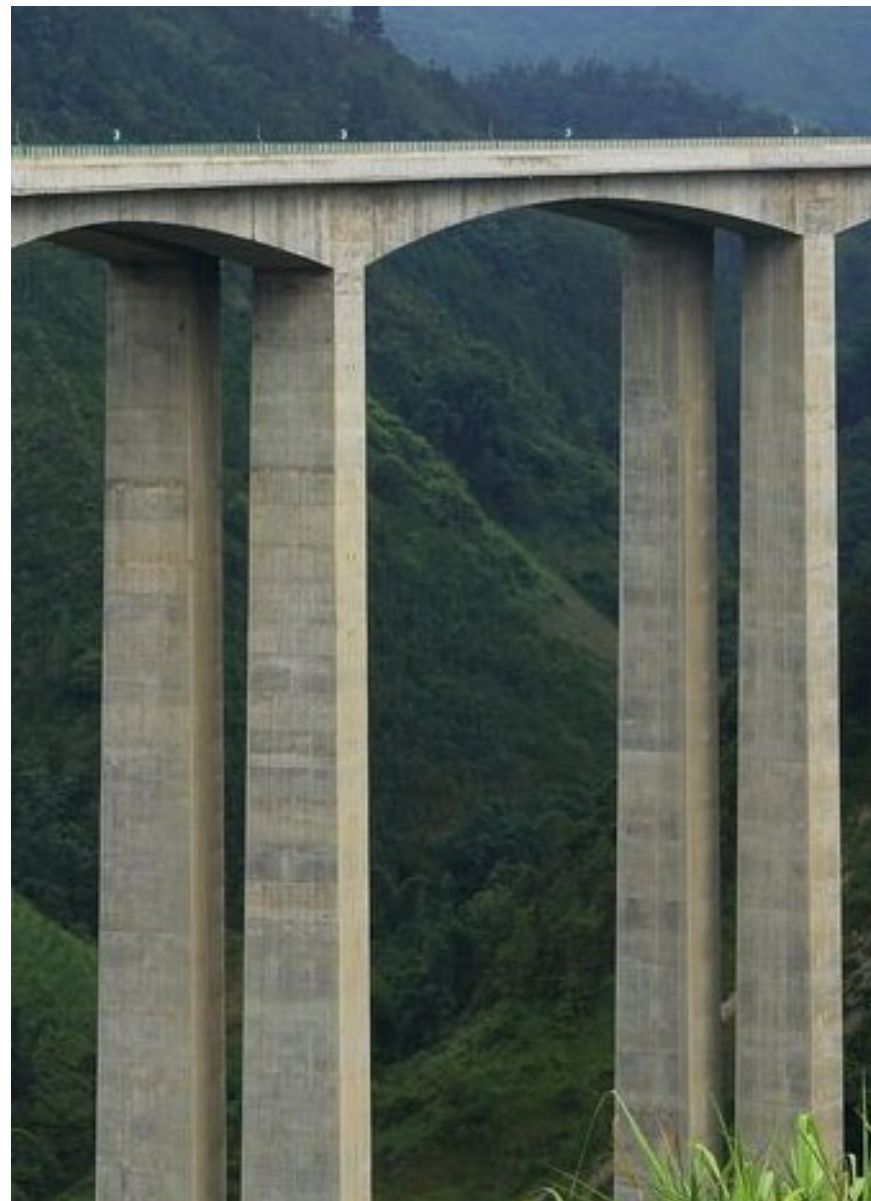
霍奇米洛克餐厅



交通工程

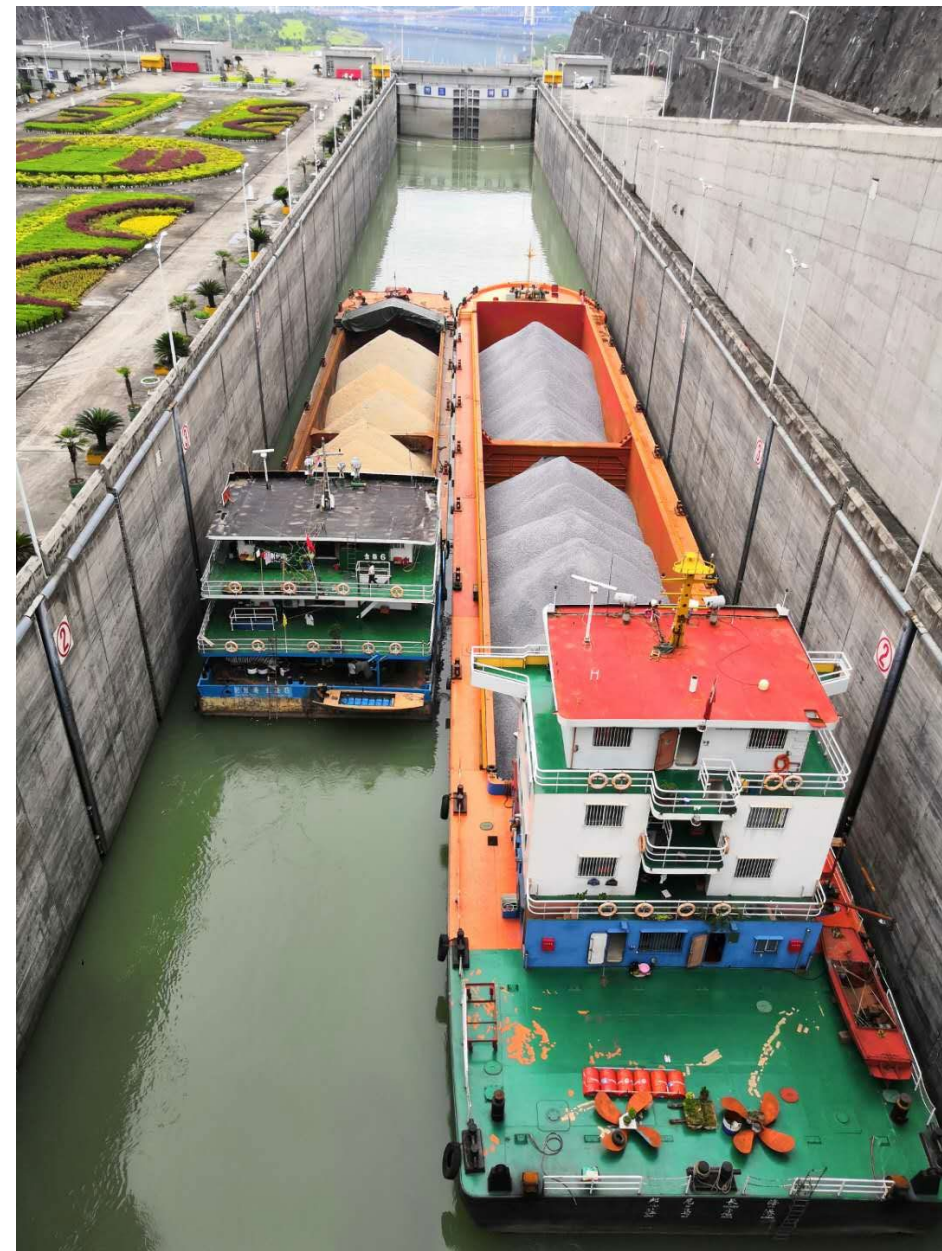
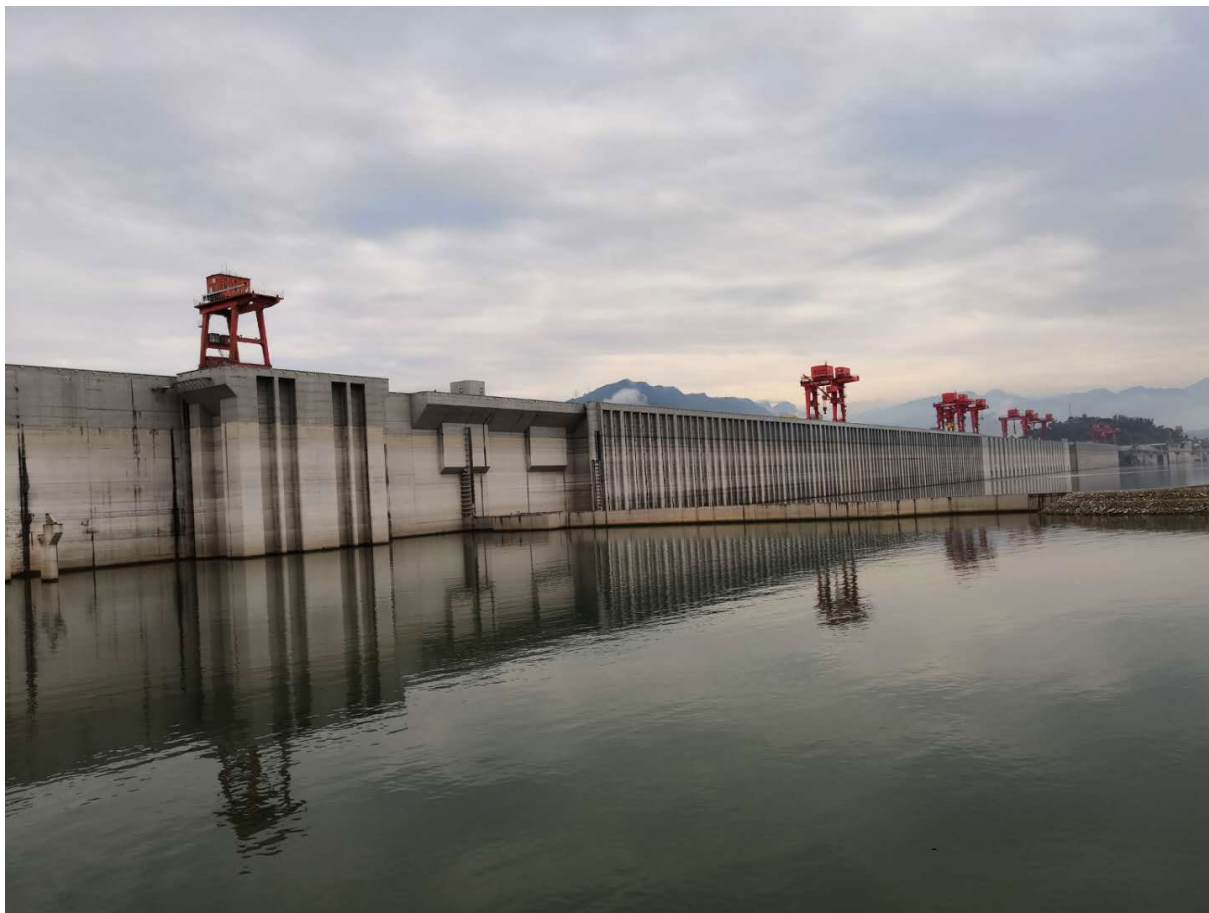


跨海大桥



亚洲第一高墩桥

大型水利工程



从材料到结构



火绳枪



燧发枪

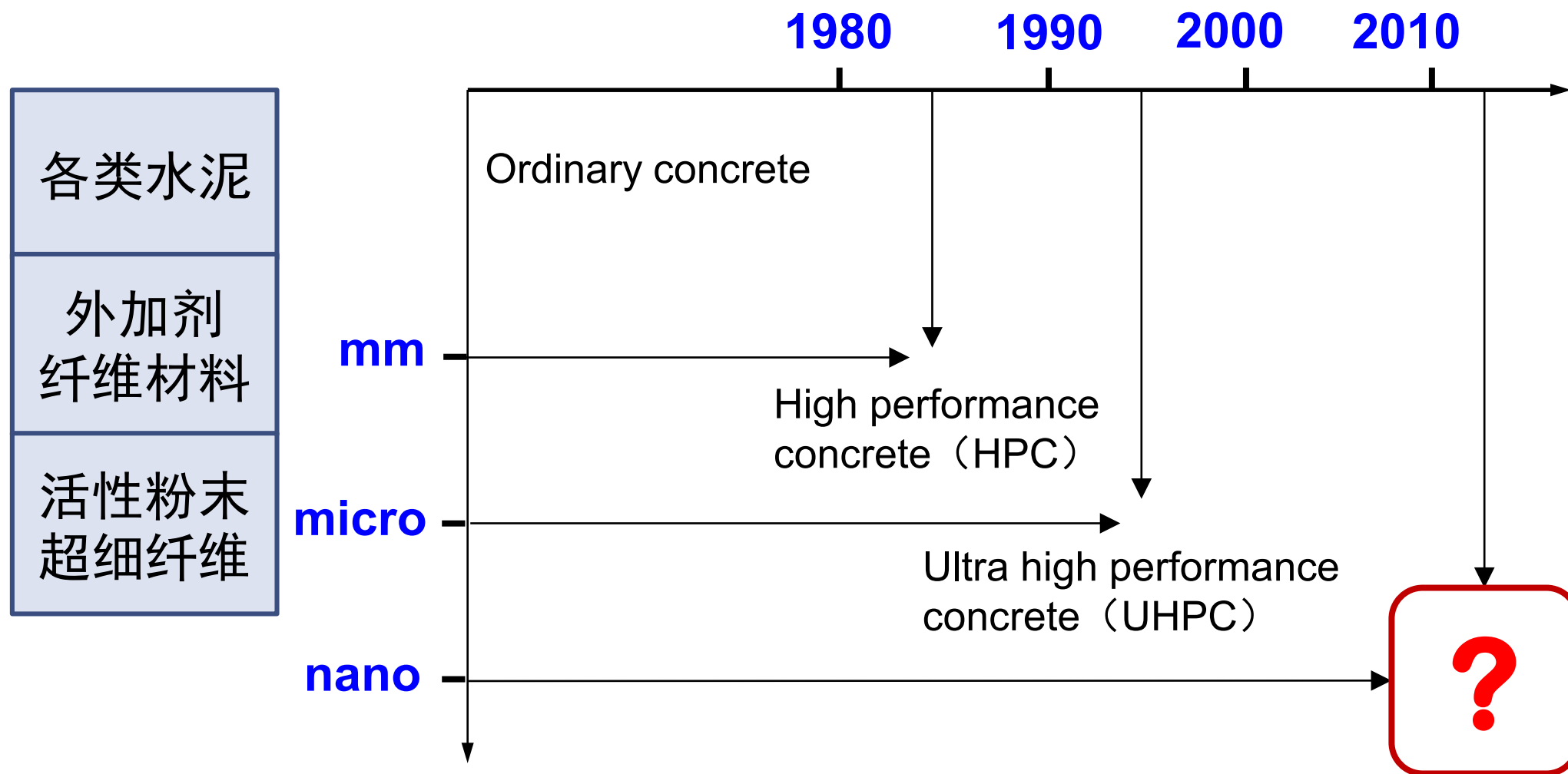


半自动步枪



自动步枪

混凝土材料的发展



高性能混凝土

HIGH PERFORMANCE CONCRETE, HPC

- 具有**高强度**、**高耐久性**、**高流动性**等多方面的优越性能。
- 是用水泥、砂、石原材料**外加减水剂**或同时外加粉煤灰、F矿粉、矿渣、硅粉等混合料，经常规工艺生产。
- **混凝土强度高可减小断面，减轻自重，提高空间利用率。**
- 美国将混凝土抗压强度等级为 C100及以上的混凝土定义为高强混凝土，在日本定义为C80及以上混凝土，在前苏联定义为C90及以上的混凝土，在挪威定义为C70及以上的混凝土。结合我国当前的混凝土材料研究和应用水平，行业内的专家一般认为抗压强度等级C60及以上的混凝土为高强混凝土。
- 高强混凝土的塑性不如普通强度混凝土，研制出塑性好的高强混凝土仍然是当今要研究的问题。



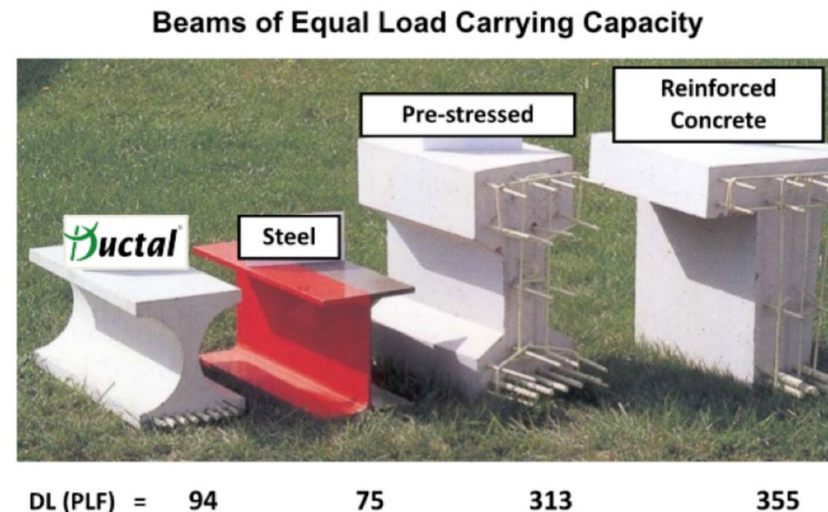
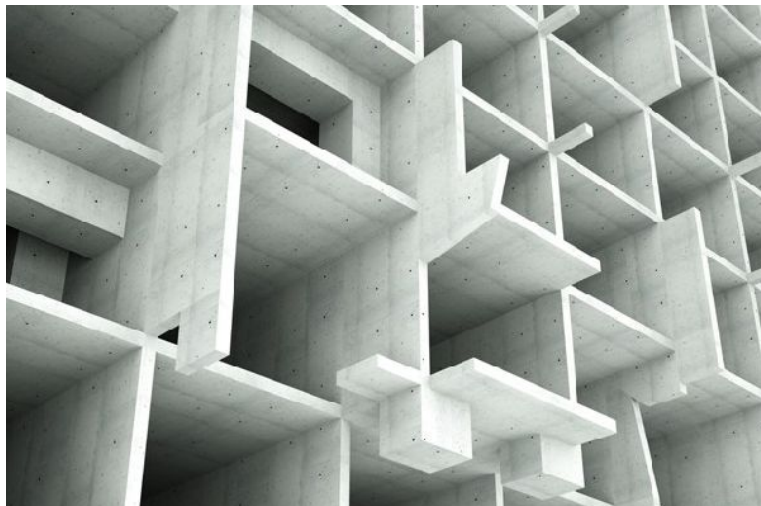
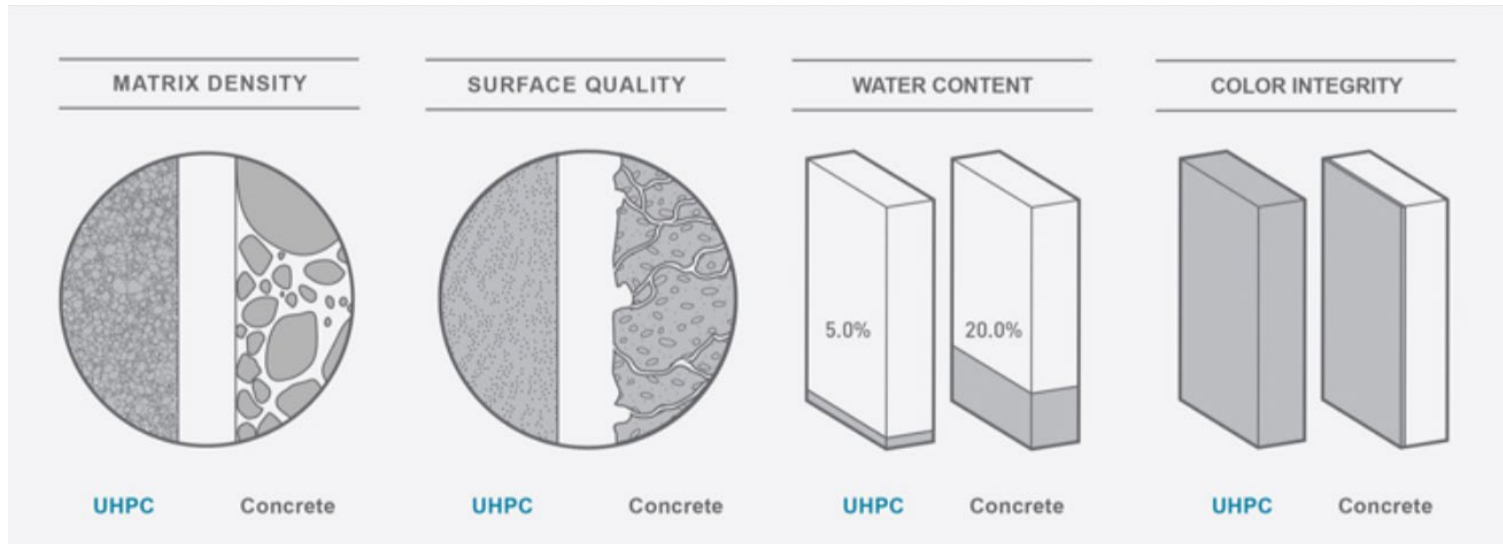
超高性能混凝土

ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, UHPC

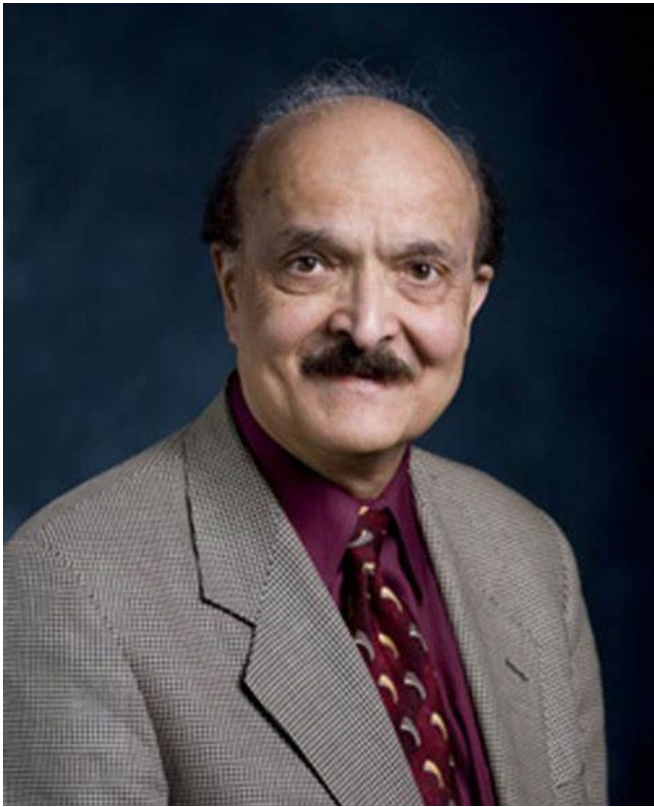
- 也称作**活性粉末混凝土**(RPC, Reactive Powder Concrete), 是过去三十年中最具创新性的水泥基工程材料, 实现工程材料性能的大跨越。
- “超高性能混凝土”包含两个方面‘超高’, 超高的耐久性和超高的力学性能。
- UHPC与普通混凝土或高性能混凝土不同的方面包括: **不使用粗骨料, 必须使用硅灰和纤维(钢纤维或复合有机纤维), 水泥用量较大, 水胶比很低。**
- **超高性能混凝土的设计理论是最大堆积密度理论(densified particle packing), 其组成材料不同粒径颗粒以最佳比例形成最紧密堆积, 即毫米级颗粒(骨料)堆积的间隙由微米级颗粒(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。**

超高性能混凝土

ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, UHPC



高性能混凝土和超高性能混凝土



Surendra P Shah（夏苏鲁），**美国西北大学教授**，著名混凝土材料科学与工程专家，美国国家工程院院士、印度国家工程院院士、中国工程院外籍院士。



Zdenek P Bazant，**美国西北大学教授**，著名混凝土结构与工程力学专家，美国国家科学院、工程院院士。。。



Ted B. Belytschko，**美国西北大学教授**，著名计算力学专家，美国科学院院士。

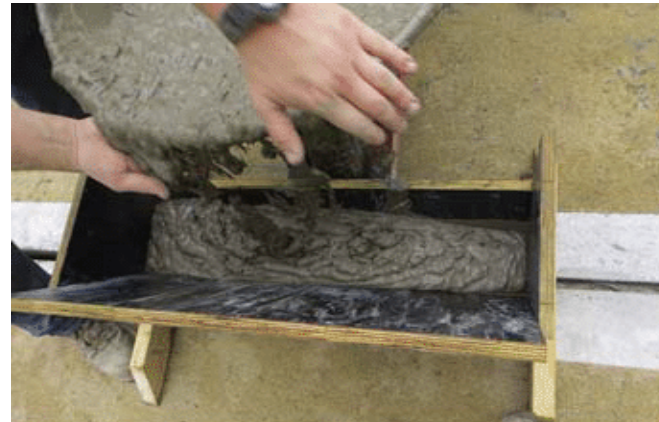
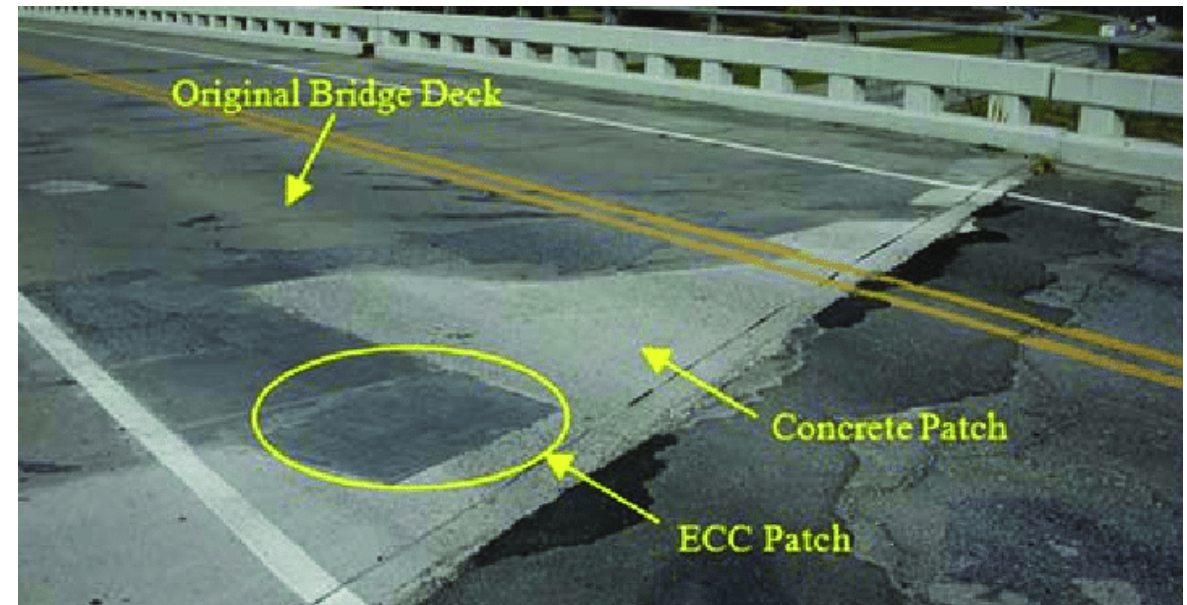
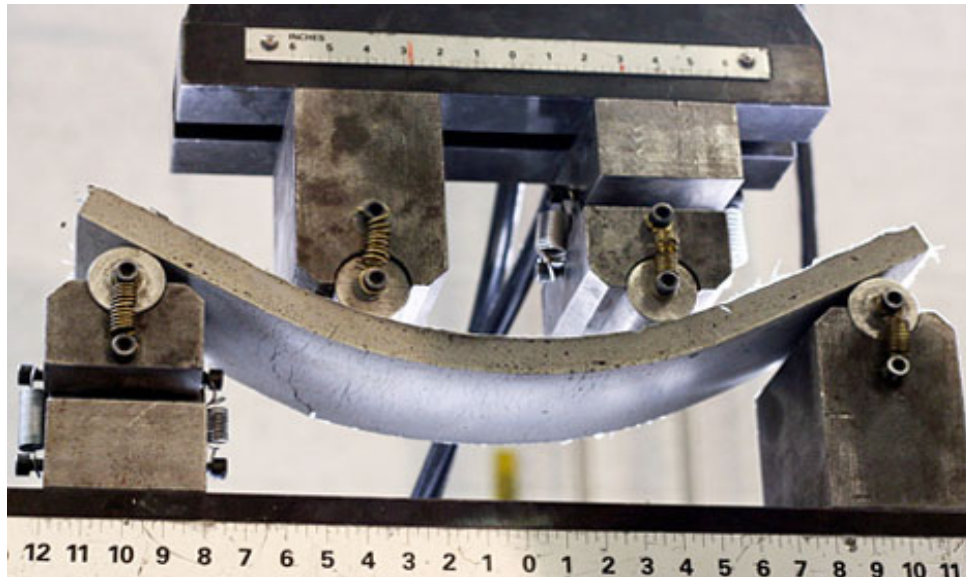
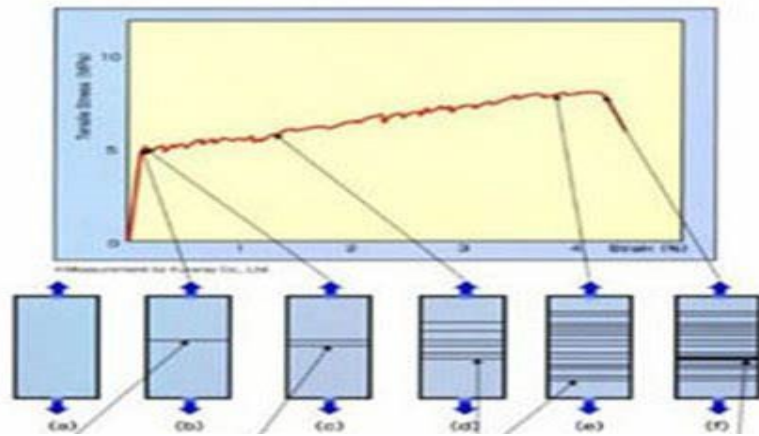
工程水泥基材料

ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE, ECC

- Engineered Cementitious Composites (ECC) are a special class of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) which are distinct for the tensile strain-hardening behavior and tensile ductility contrasting to the quasi-brittle nature of ordinary concrete and fiber reinforced concrete (FRC).
- 基于断裂力学、微观物理力学和统计学对配比进行了优化设计；
- 使用短纤维增强，且纤维含量不超过材料总体积的2.5%；
- 硬化后的复合材料具有明显的受拉应变硬化性质，在拉应力的作用下会产生细密的拉伸裂纹，极限拉应变可稳定达到3%以上。

工程水泥基材料

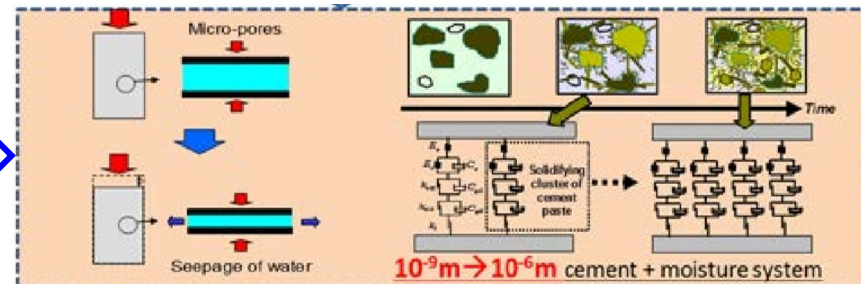
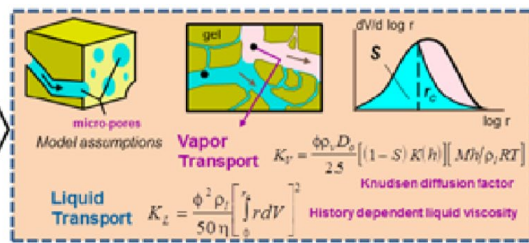
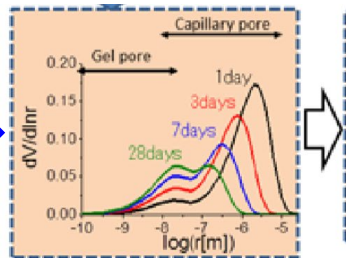
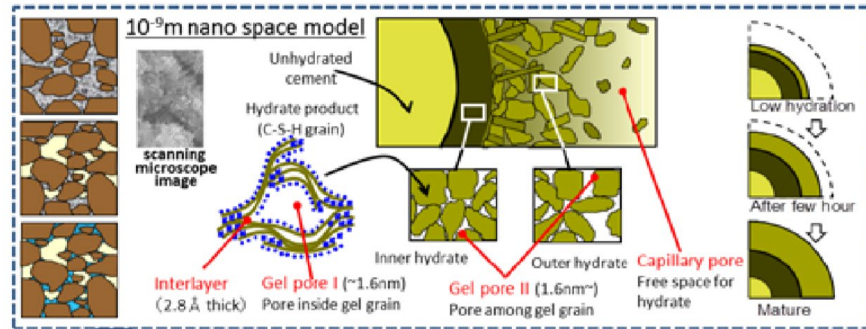
ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE, ECC



其它混凝土

- 再生混凝土
- 自密实混凝土
- 机敏混凝土
- 智能混凝土
- 聚合物混凝土
- 自愈合混凝土
- ○ ○ ○ ○ ○ ○

多尺度方法体系



$$G_i = \sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}(\epsilon_{kl}, P, \phi, S)}{\partial x_j} + f_i + \rho \ddot{u}_i = 0$$

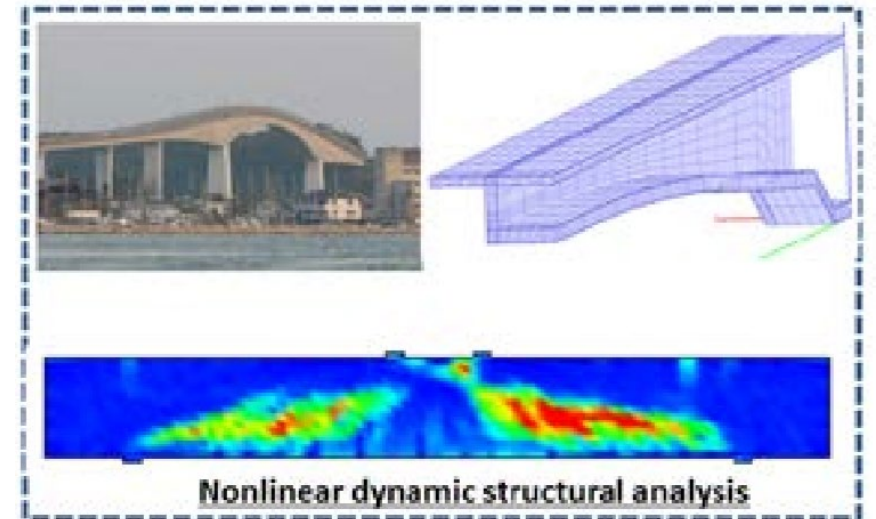
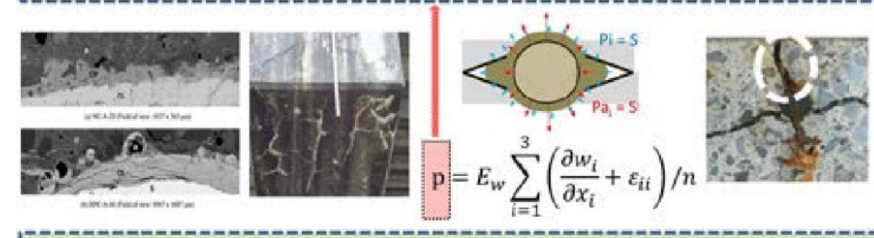
10⁻⁶m → 10⁻³m stress gradient gravity acceleration term

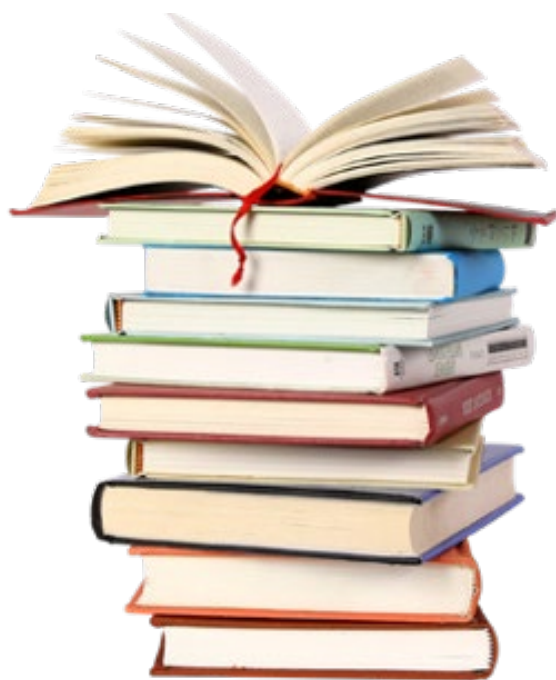
$$\iiint G_i(x, y, z) \cdot W_1(x, y, z) dv = 0 \Rightarrow \iint B^T \bar{\sigma} dv = F$$

$$\iiint G_i(x, y, z) \cdot W_2(x, y, z) dv = 0$$

$$\iiint G_i(x, y, z) \cdot W_k(x, y, z) dv = 0$$

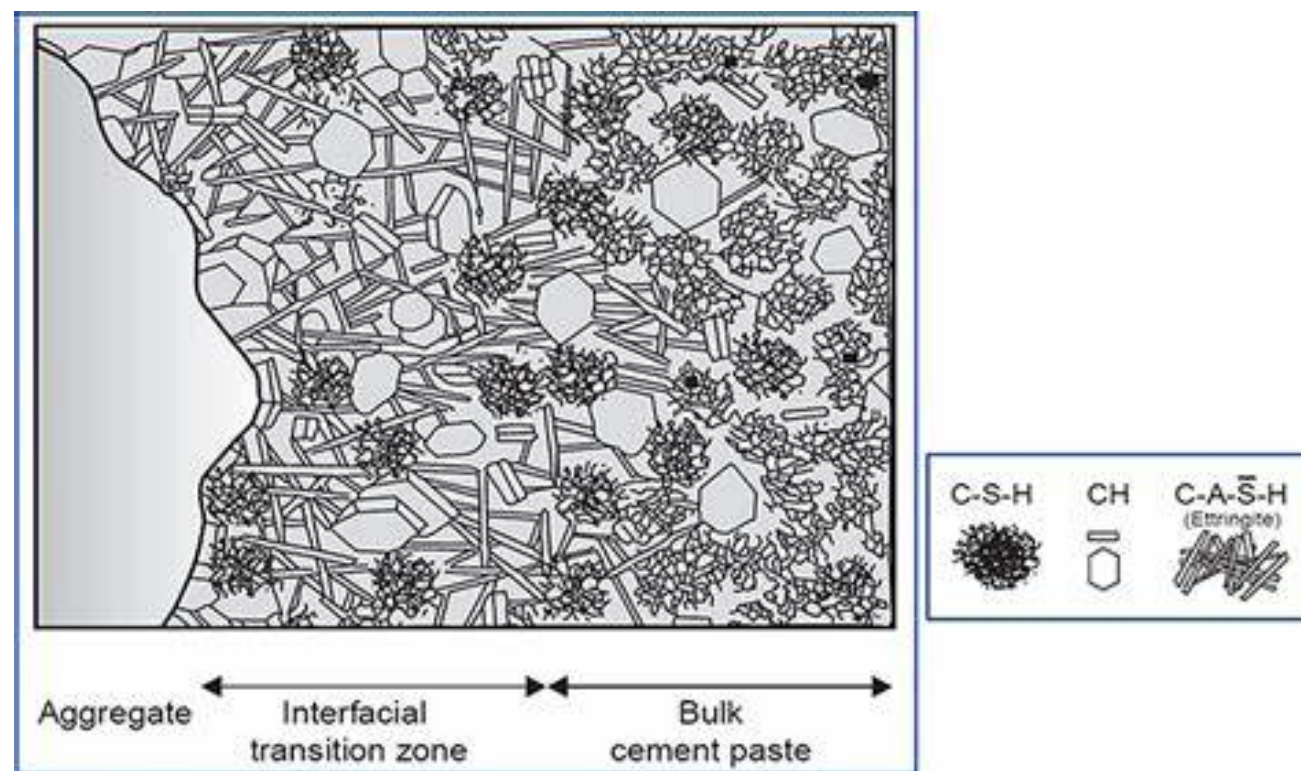
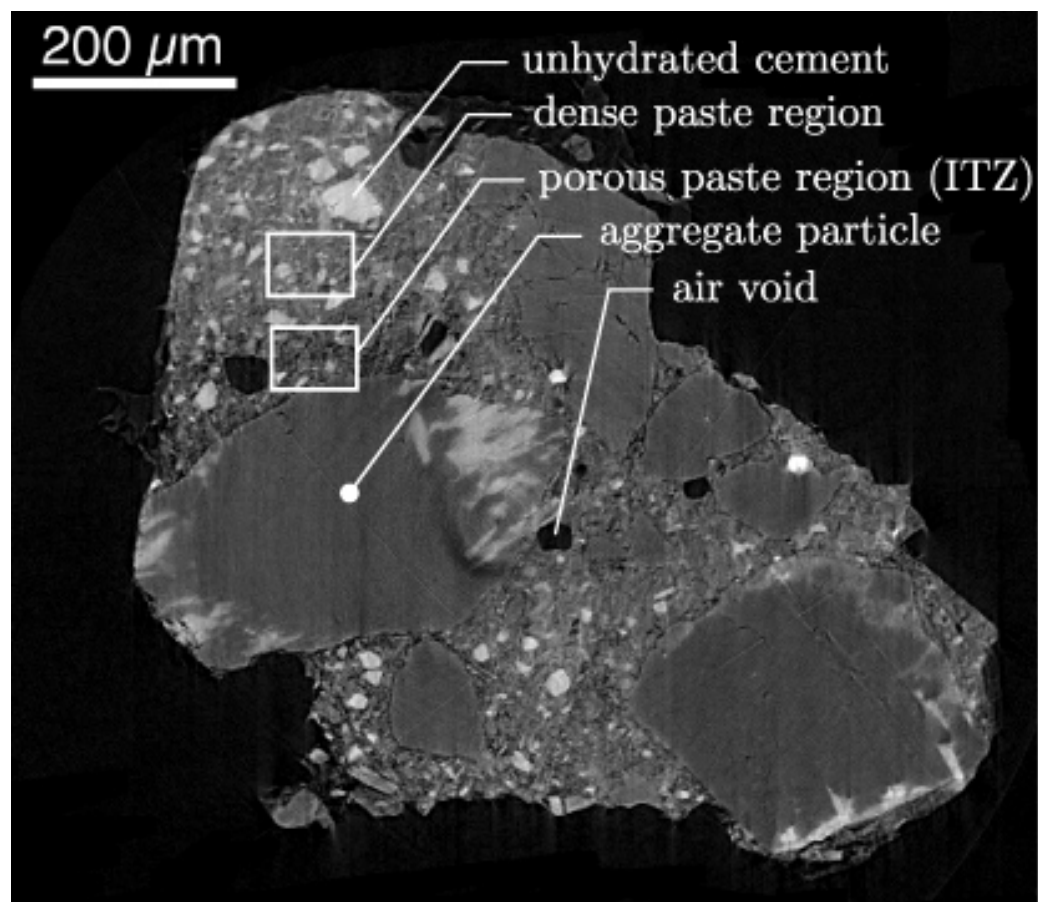
10⁻³ → 10⁻⁰m scale integral over the structural element with crack stress transfer





混凝土材料力学行为

混凝土材料细观结构



三相结构：骨料、水泥浆、界面过渡区

混凝土材料的主要特点

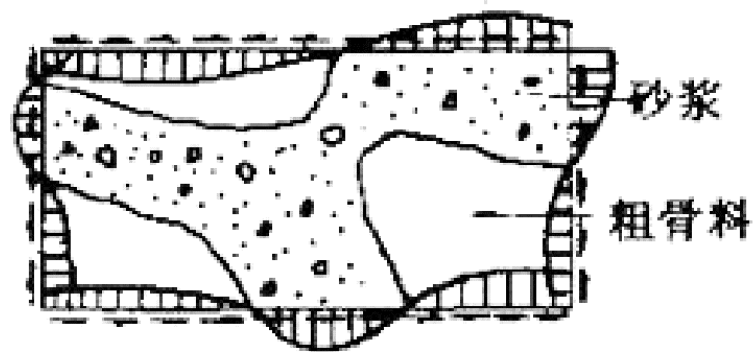
➤ 具有非匀质性的多相复合材料

- 混凝土的粗骨料和水泥砂浆的随机分布及两者的物理和力学性能的差异是造成砼非匀质、不等向性的主要原因。
- 混凝土材料的非匀质、不等向性的严重程度主要取决于原材料的均匀性和稳定性，制作过程的施工操作和管理的精细程度，并对材料性能指标（绝对值和离散性）有着显著影响。

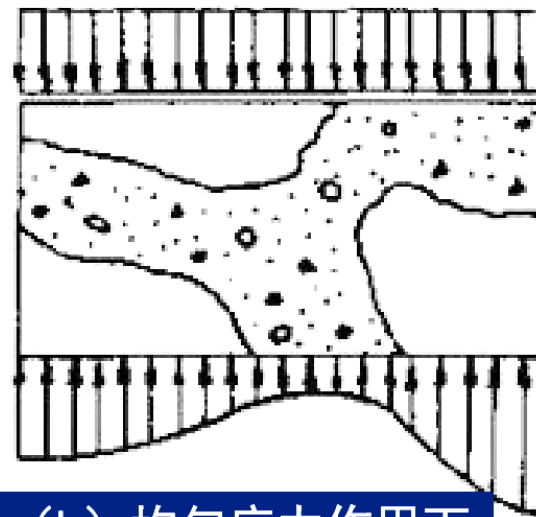
混凝土材料的主要特点

➤ 复杂的微观内应力、变形和裂缝状态

- 混凝土在受载前已存在复杂的应力、应变和裂缝；
- 粗骨料和水泥砂浆的收缩变形不同；
- 粗骨料和水泥砂浆的热工性能不同；
- 混凝土内部的初始气孔和缝隙尖端处局部应力集中。



(a) 收缩和温度差引起



(b) 均匀应力作用下

混凝土材料的主要特点

➤ 复杂多元的变形组成

- **骨料的弹性变形和脆性破碎**：占混凝土体积大部分的石子和砂，其强度和弹性模量均比其组成的混凝土高出很多。对于中低强度混凝土，即使混凝土达到极限强度值，骨料并不破碎，对于高强混凝土骨料会发生脆性破碎。
- **水泥凝胶体的黏性流动**：水泥水化后生成的凝胶体，在应力作用下，除产生即时变形外，还将随时间的延续，发生缓慢的粘性流动，卸载后变形不可恢复，出现残余变形。
- **微裂缝的形成和扩展**：裂缝存在于粗骨料的界面和砂浆的内部，在拉力作用下，其形成和发展使受拉变形迅速增长，在压力作用下，发生纵向劈裂，卸载后大部分变形不可恢复。

混凝土材料的主要特点

➤ 应力状态和途径对力学性能的影响

- **拉、压应力作用下力学行为迥异**：混凝土的单轴抗拉和抗压的强度比值约为1:10，相应的峰值应变之比约为1:20，两者的破坏形态也有根本的区别。
- **不同的多轴应力组合作用下**，强度、变形和破坏形态有很大的差异。
- **横向约束作用**对强度和变形性能有着很大的影响。
- **荷载（应力）的重复加载和反复作用**，混凝土将产生不同程度的变形滞后、刚度退化和残余变形等现象。

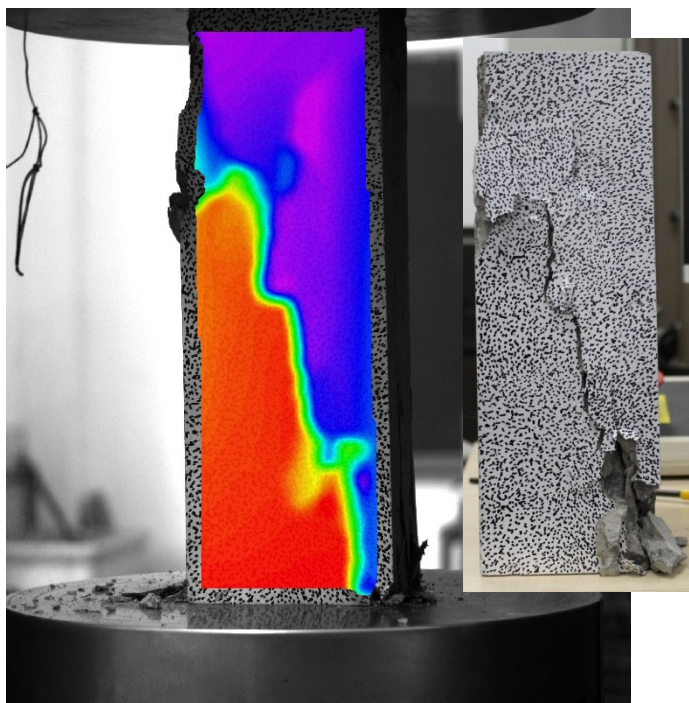
混凝土材料的主要特点

➤ 时间和环境条件对力学性能的影响

- 混凝土随水泥水化作用的发展而渐趋**成熟**，强度逐渐提高。
- 混凝土在应力的持续作用下，因水泥凝胶体的黏性流动和内部微裂缝的开展而产生的**徐变**与时俱增，使混凝土材料和构件的变形增大。
- 混凝土周围的环境（**温度、湿度、碳化等**）既影响其成熟度的发展过程，又与混凝土材料发生物理和化学作用，对其产生有利或不利的影晌。

混凝土材料力学性能

➤ 单轴受压



棱柱体单轴受压实验

圆柱体抗压强度

一般以直径6in(约152mm)、高12in为标准试件；
圆柱体抗压强度与立方体抗压强度的关系：

$$f_c' = 0.79 f_{cu}$$

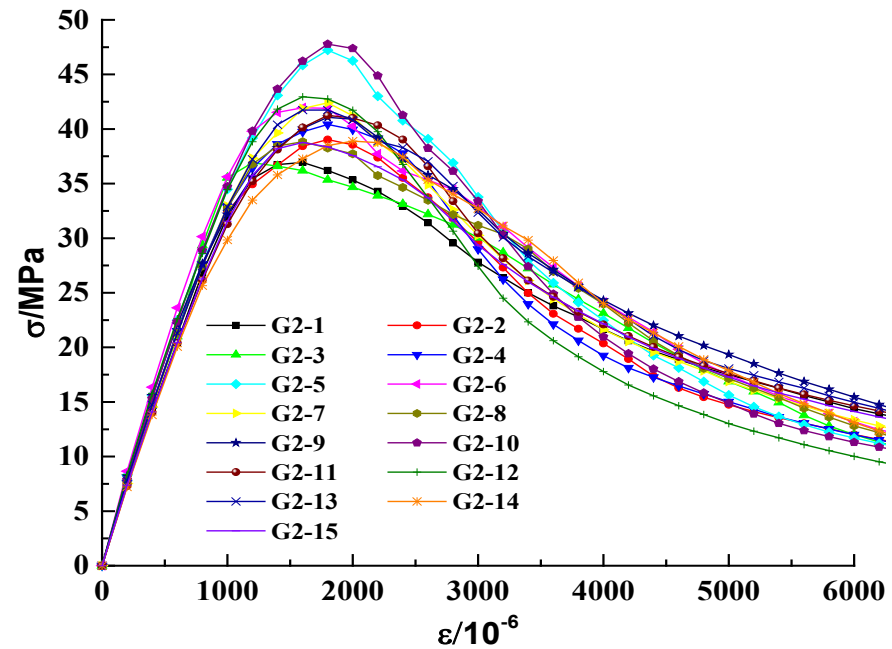
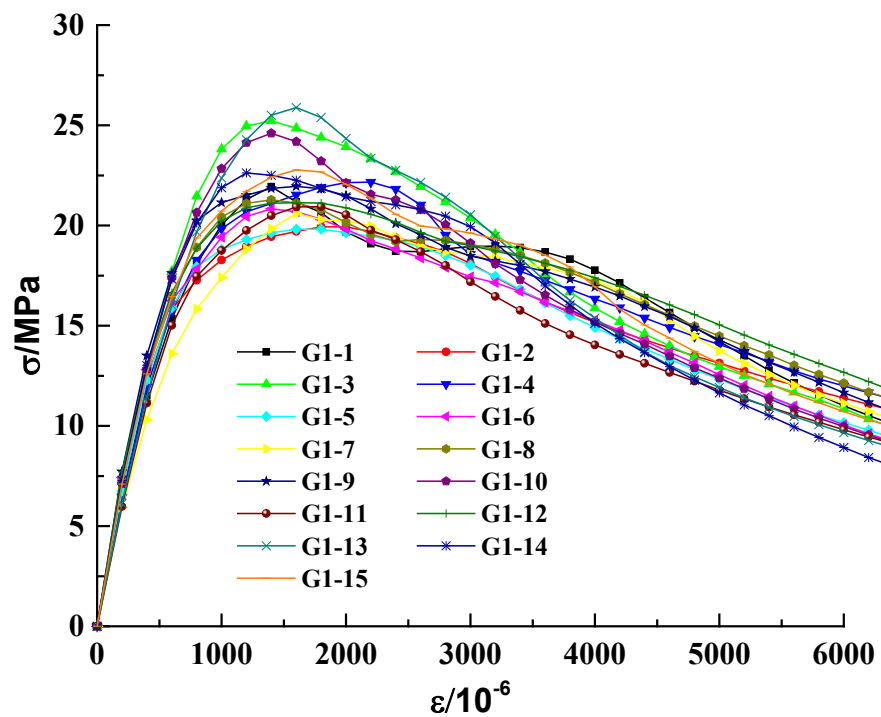
棱柱体抗压强度

标准试件尺寸：150mmX150mmX300mm；
棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的关系：

$$f_c = 0.88 \alpha_1 \alpha_2 f_{cu}$$

混凝土材料力学性能

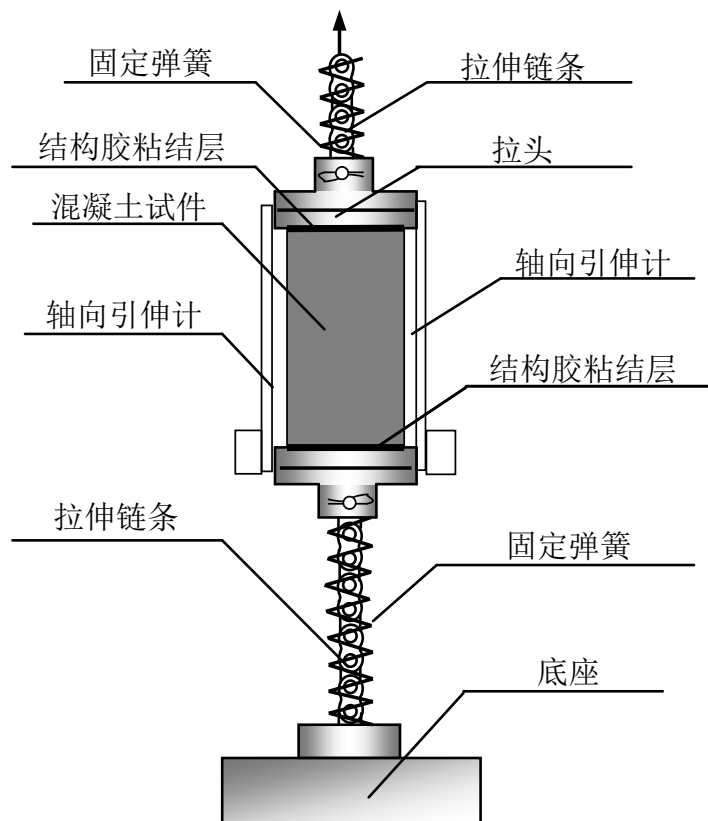
➤ 单轴受压



单轴受压应力应变全曲线

混凝土材料力学性能

► 单轴受拉



单轴拉伸加载示意图

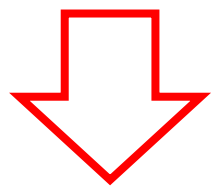


单轴拉伸试件破坏形态

混凝土材料力学性能

➤ 单轴受拉

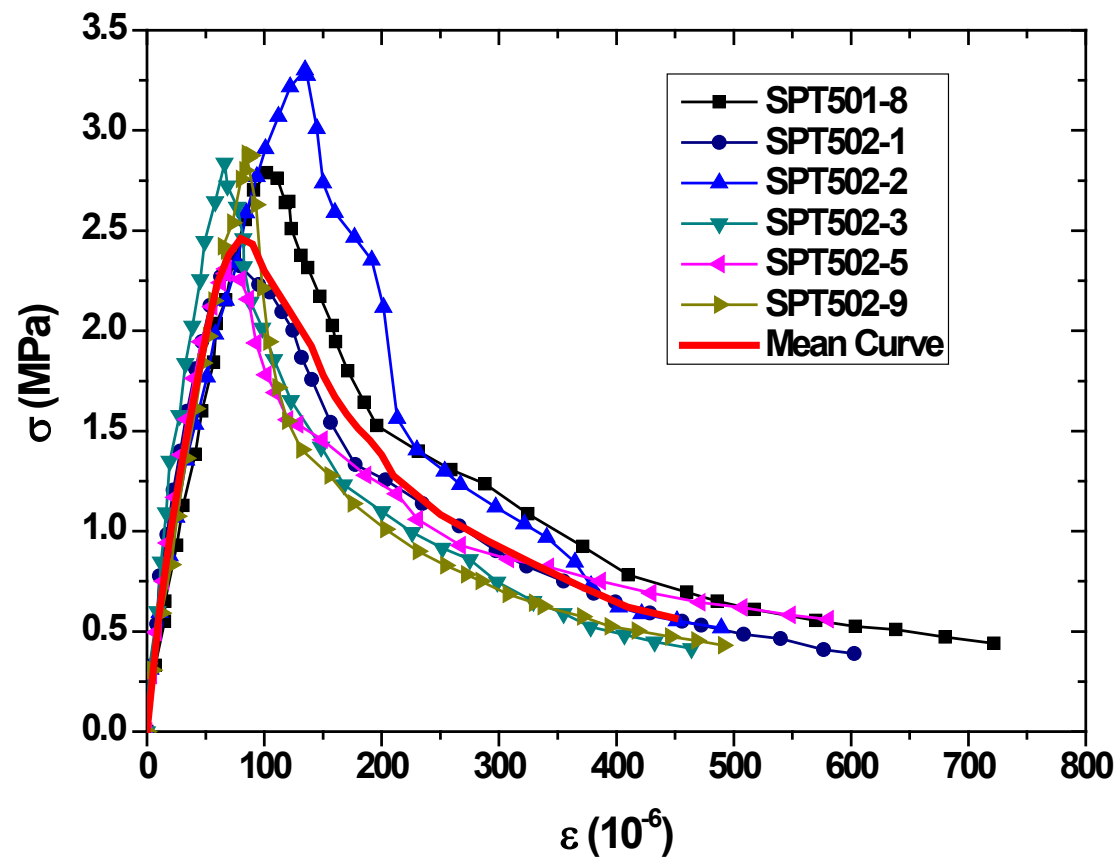
一般形式: $f_t = k f_{c,r}^\alpha$



我国规范: $f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55}$

ACI: $f_t = k \sqrt{f'_c}$

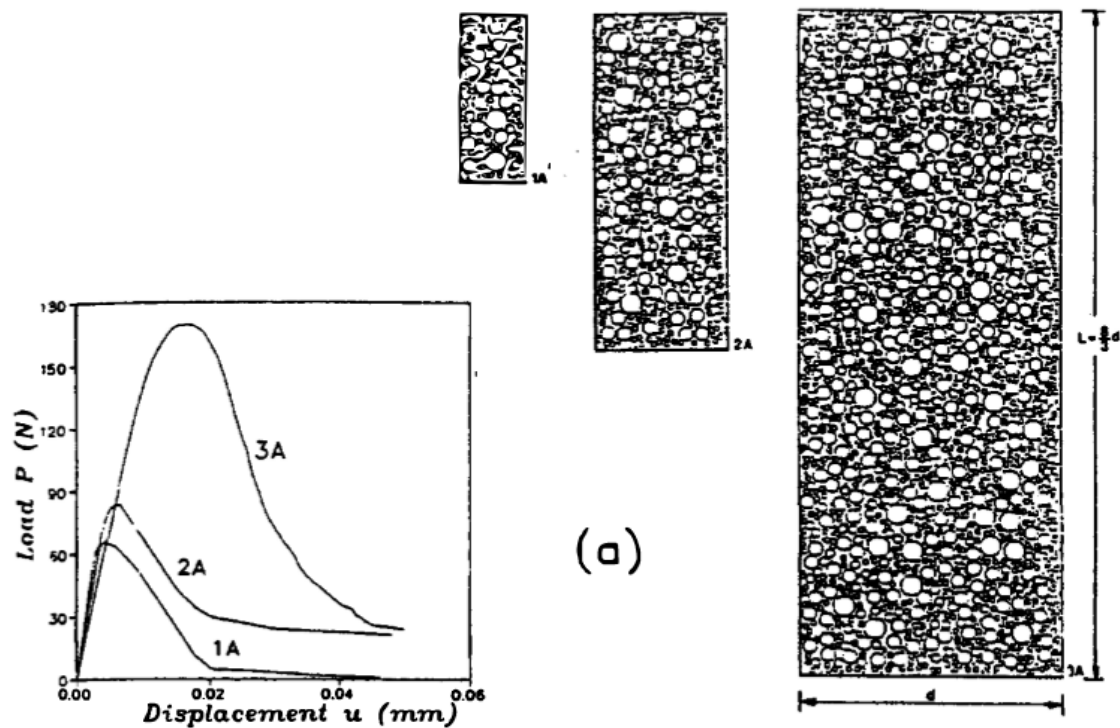
强度换算



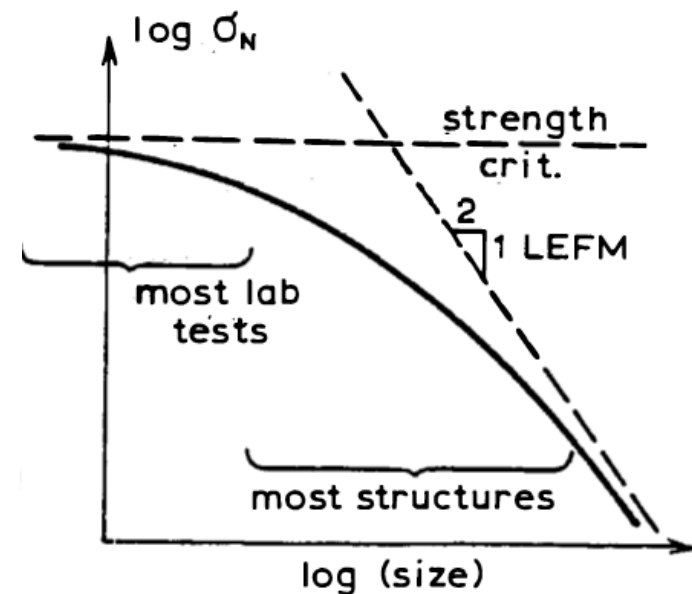
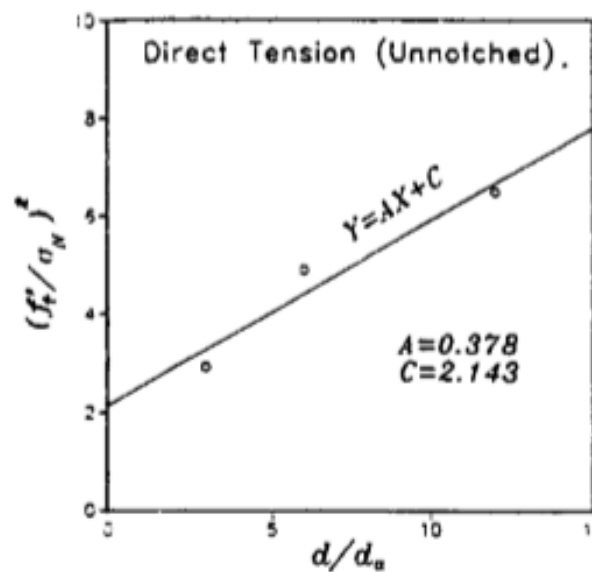
单轴受拉应力应变全曲线

混凝土材料力学性能

➤ 单轴受拉

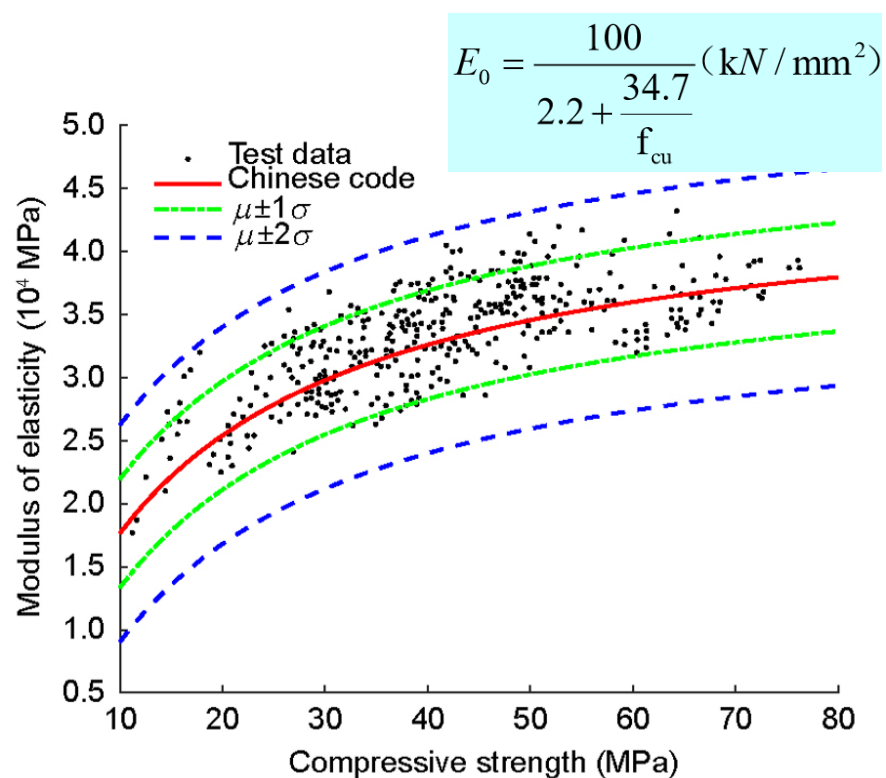


一般认为：在受拉应力控制的集中裂纹破坏模式下，宜引入（伪脆性）断裂力学观念进行分析与研究。

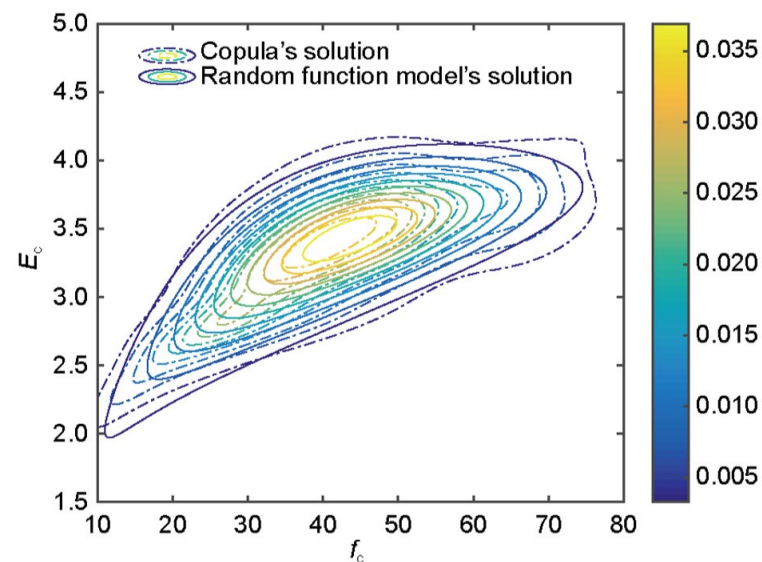


混凝土材料力学性能

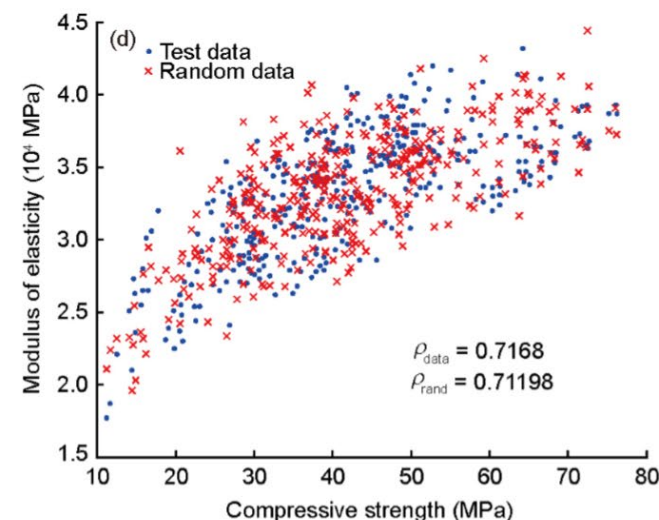
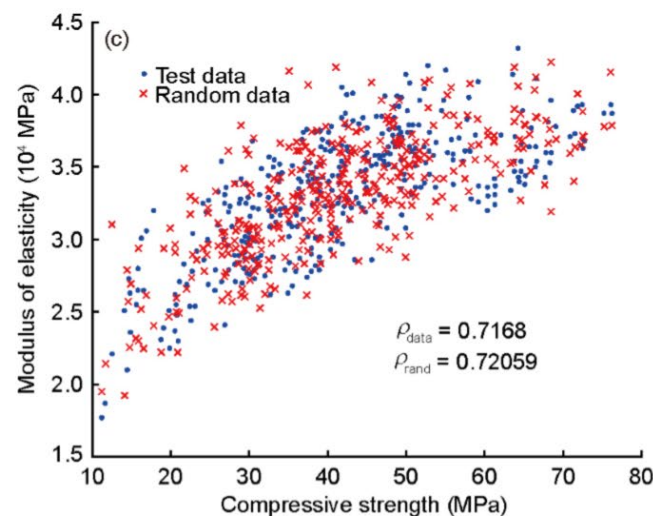
➤ 弹性模量



实验数据与规范模型



随机函数解与Coupla函数解



基于随机函数生成样本

混凝土材料力学性能

➤ 抗剪强度

德国学者公式

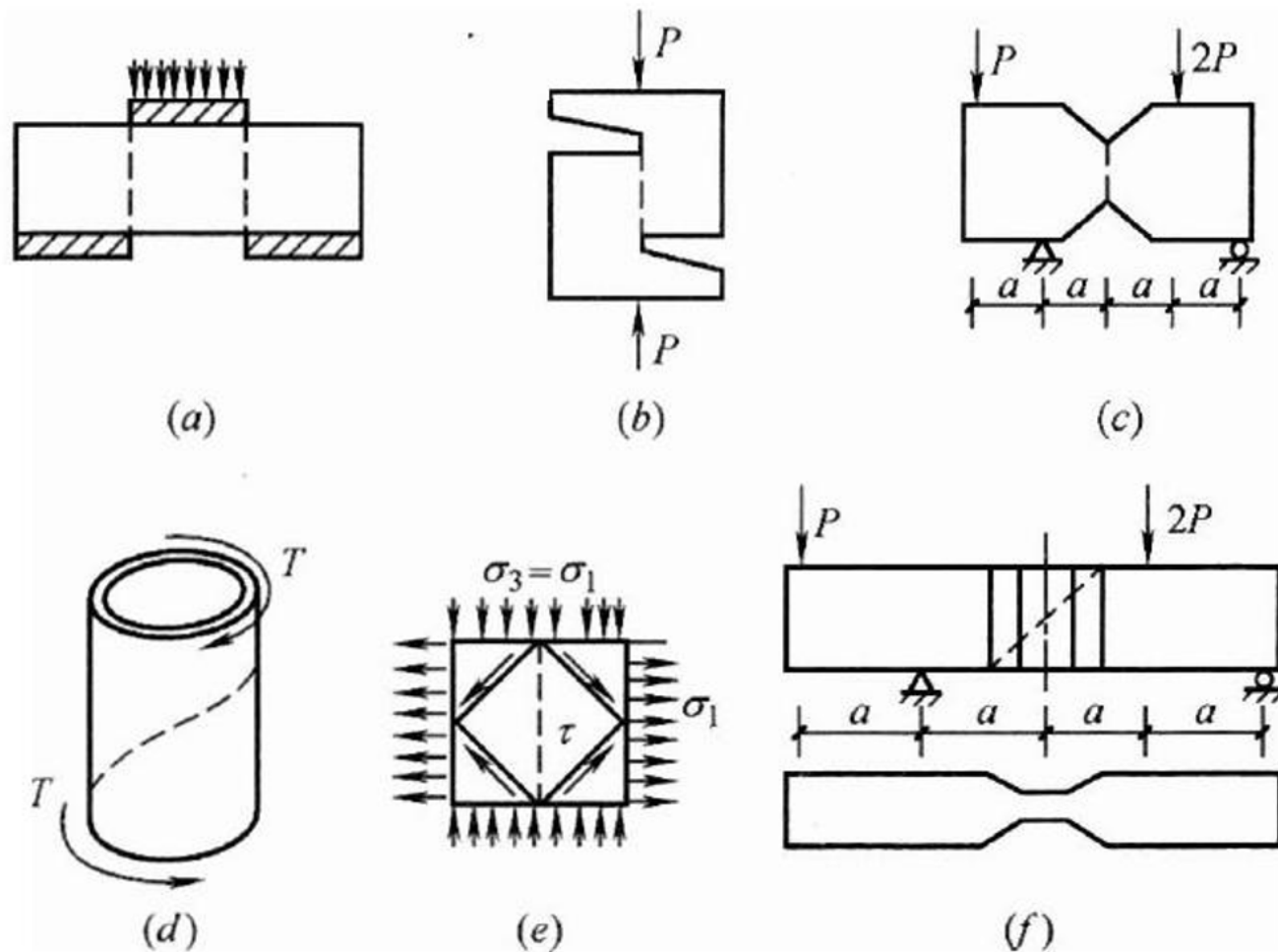
理论公式: $\tau_p = \sqrt{f_c f_t}$

实验修正: $\tau_p = 0.5\sqrt{f_c f_t}$

清华大学公式:

$$\begin{cases} \tau_p = 0.38 f_{cu}^{0.57} \\ \tau_p = (1.04 \sim 1.13) f_t \end{cases}$$

对于素混凝土抗剪（剪切或者冲切）分析与研究，也宜考虑断裂力学观念和理论。



各类直接剪切试验

混凝土材料力学性能

➤ 双轴强度

Kupfer (1969) 经典试验论文

Behavior of concrete under biaxial stresses

H Kupfer, HK Hilsdorf, H Rusch - Journal Proceedings, 1969 - concrete.org

Experimental studies into the biaxial strength of concrete are reviewed and technical difficulties encountered in the development of a suitable test setup are discussed. A new testing apparatus is described which allows testing of concrete specimens under various ..

☆ 被引用次数: 2189 相关文章 所有 6 个版本

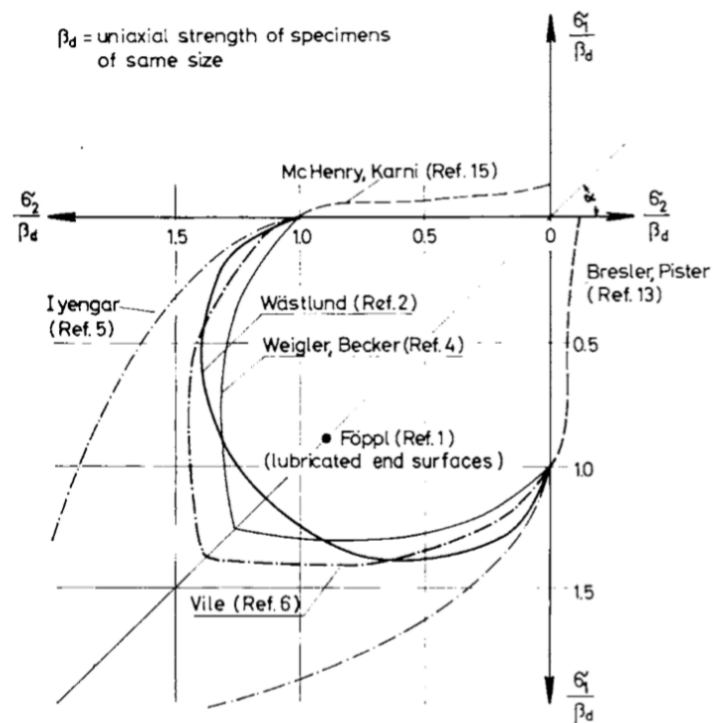


Fig. 1—Biaxial strength of concrete—review of previous investigations

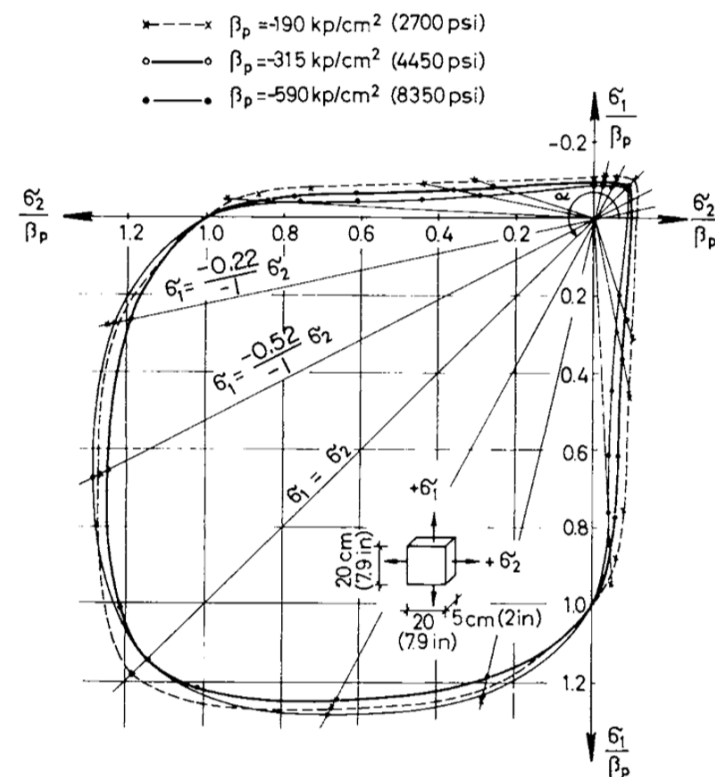
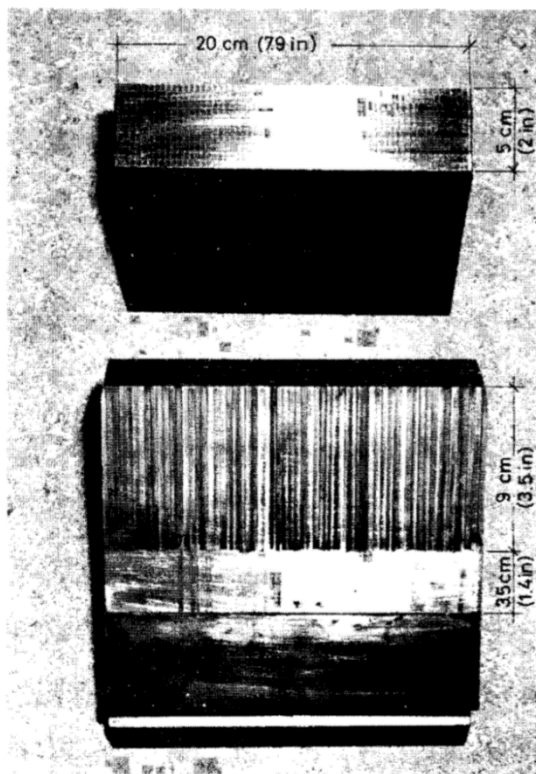
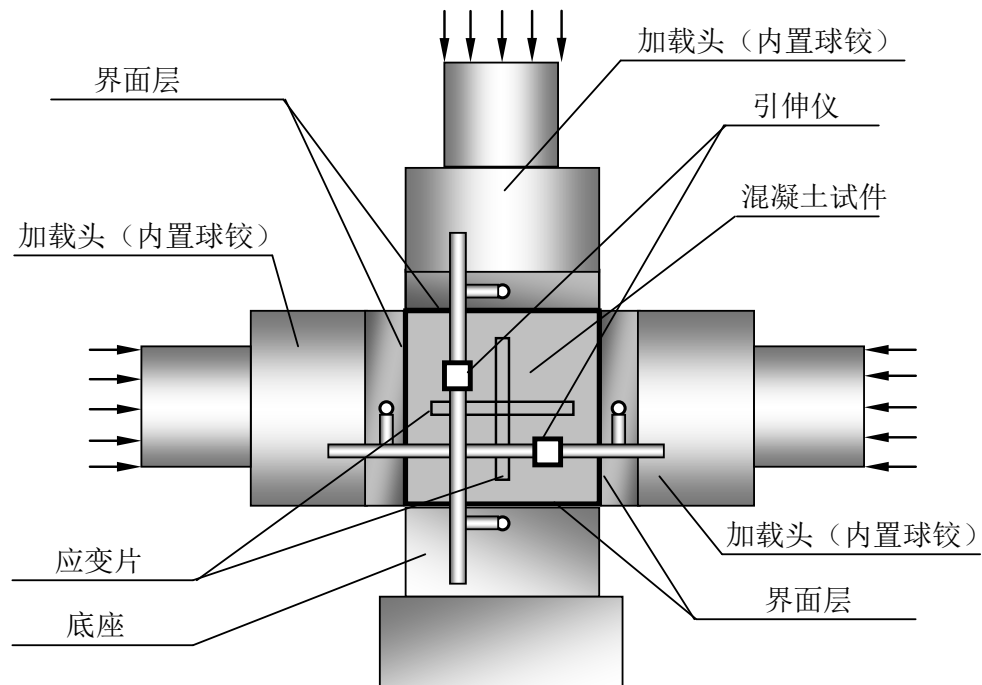


Fig. 6—Biaxial strength of concrete; results of experimental investigation

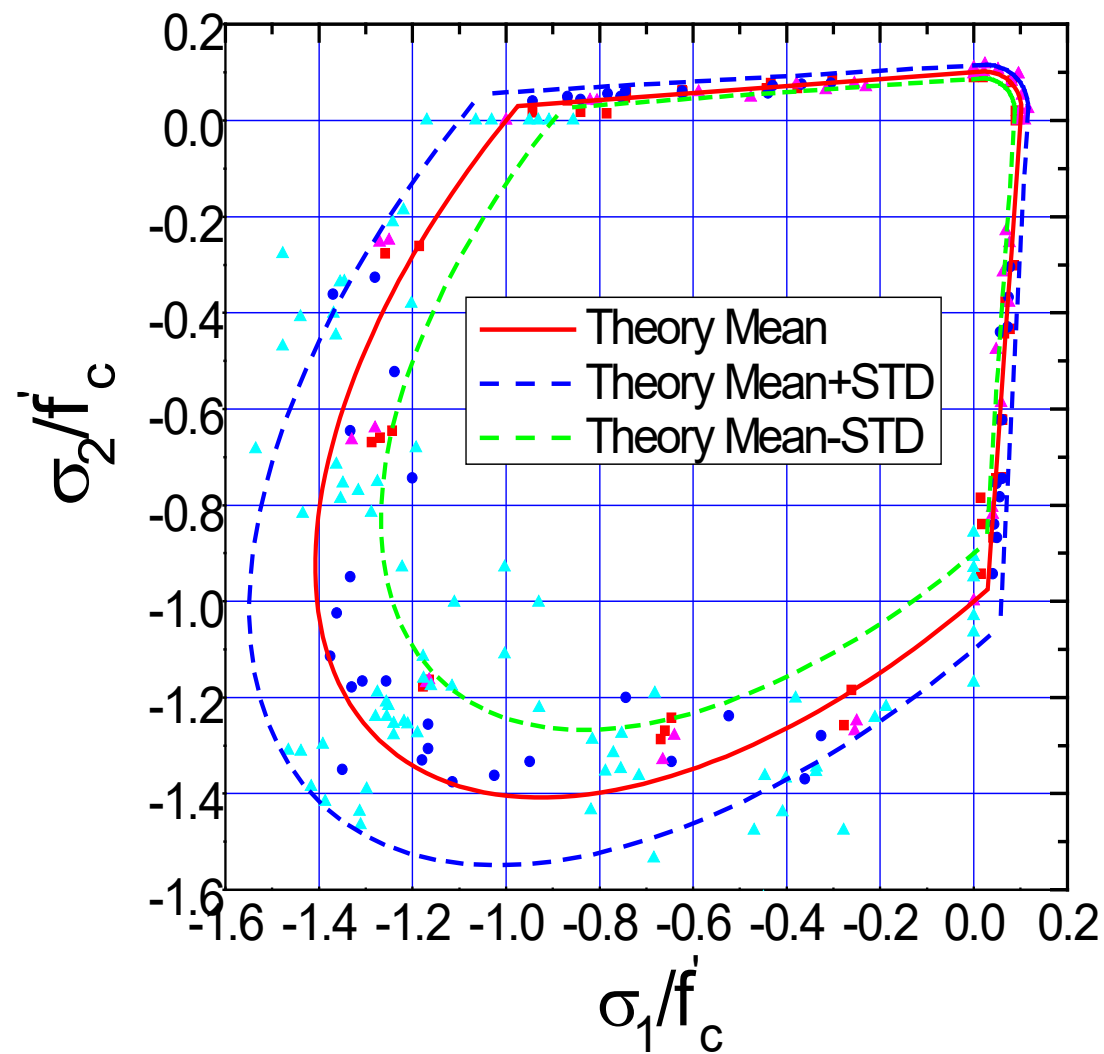
双轴强度包络图

混凝土材料力学性能

➤ 双轴强度



双轴受力试验



双轴强度包络图

by 任晓丹等@TJU

混凝土材料力学性能

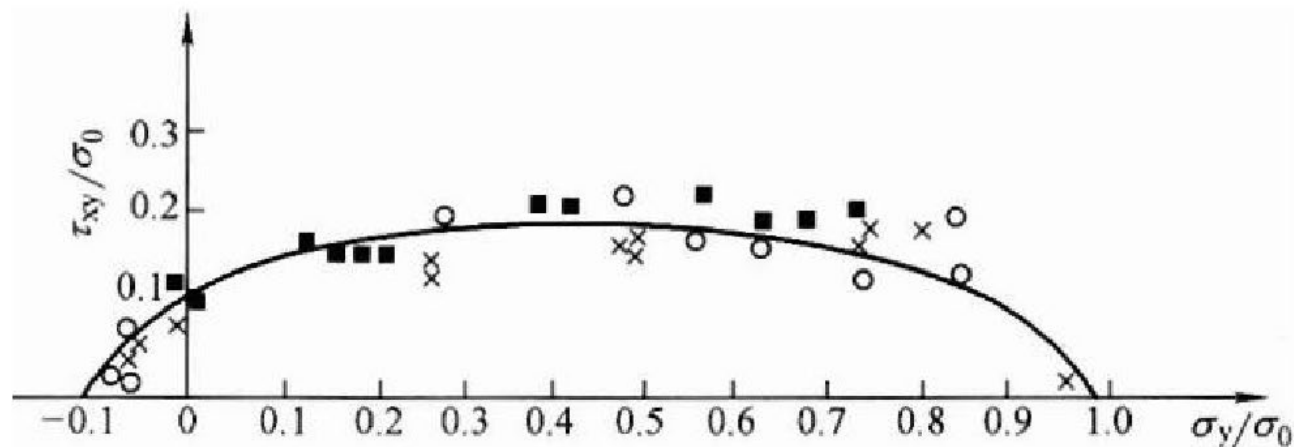
➤ 压/拉-剪切强度

岡岛达雄公式：

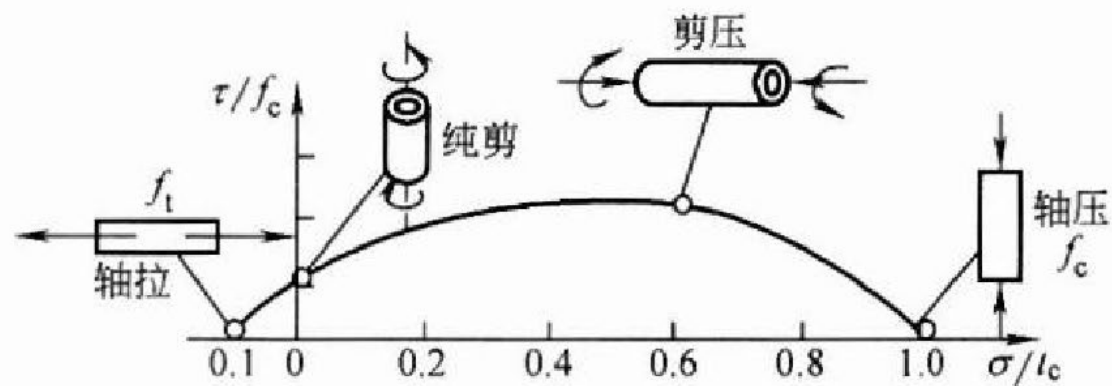
$$\frac{\tau}{f_c} = \sqrt{0.00981 + 0.112 \frac{\sigma}{f_c} - 0.122 \left(\frac{\sigma}{f_c} \right)^2}$$

Brestler公式：

$$\frac{\tau}{f_c} = 0.1 \sqrt{0.89 + 8.9 \frac{\sigma}{f_c} - 10.8 \left(\frac{\sigma}{f_c} \right)^2}$$



(a)



(b)

强度包络图

混凝土材料力学性能

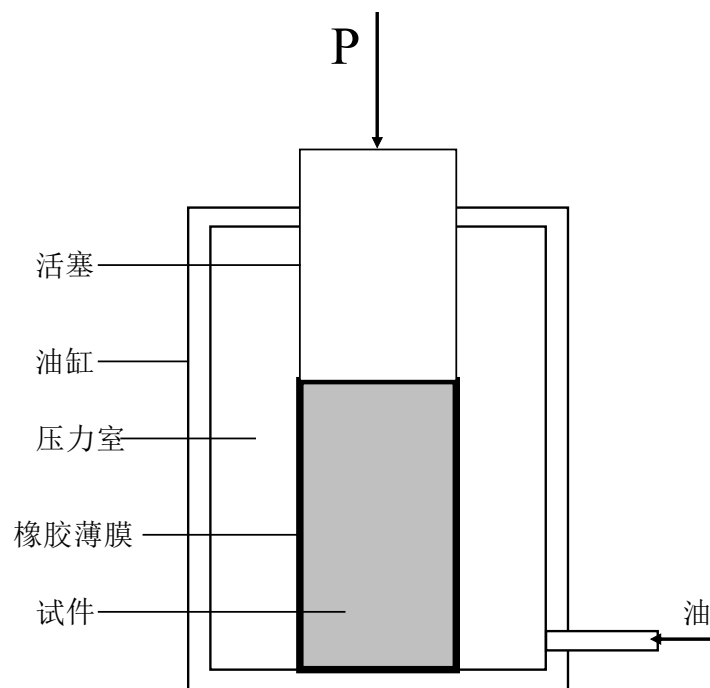
➤ 三轴强度

有侧向约束时的抗压强度

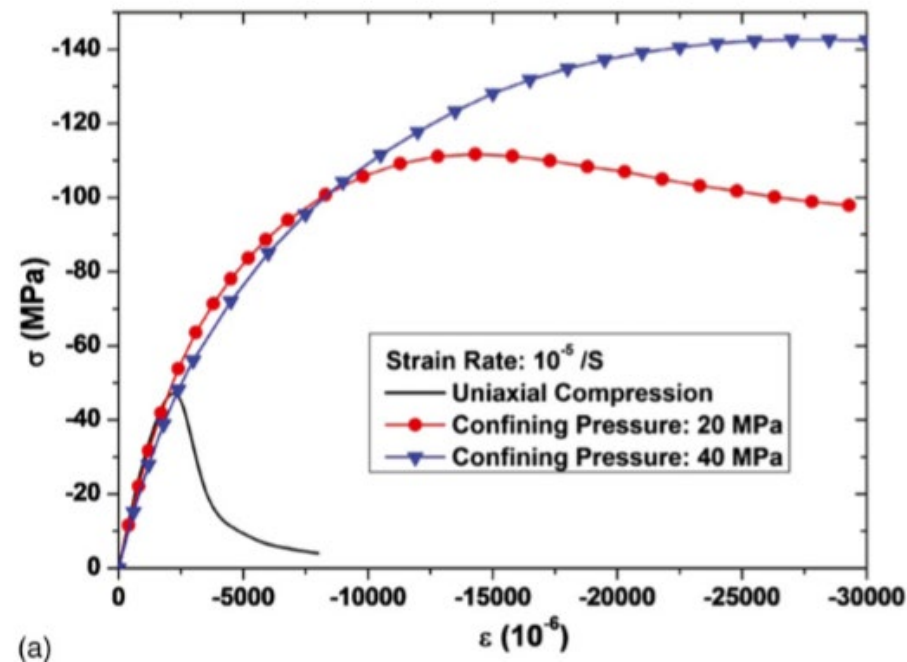
$$f_{cc}' = f_c' + 4.1 f_L$$

无侧向约束时圆柱体的单轴抗压强度

侧向约束应力



伪三轴试验



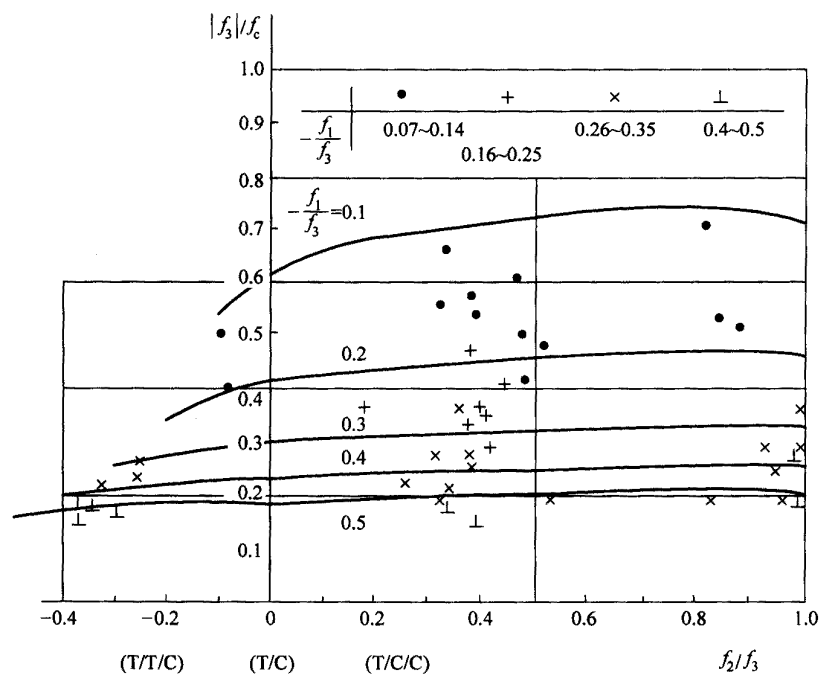
约束强度提高

混凝土材料力学性能

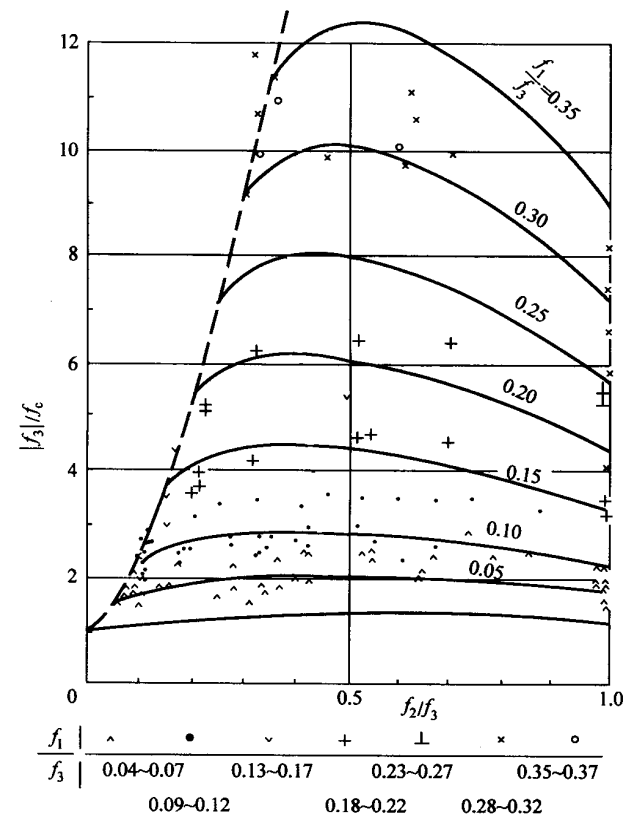
➤ 三轴强度



真三轴试验机



三轴拉-压强度



三轴受压强度

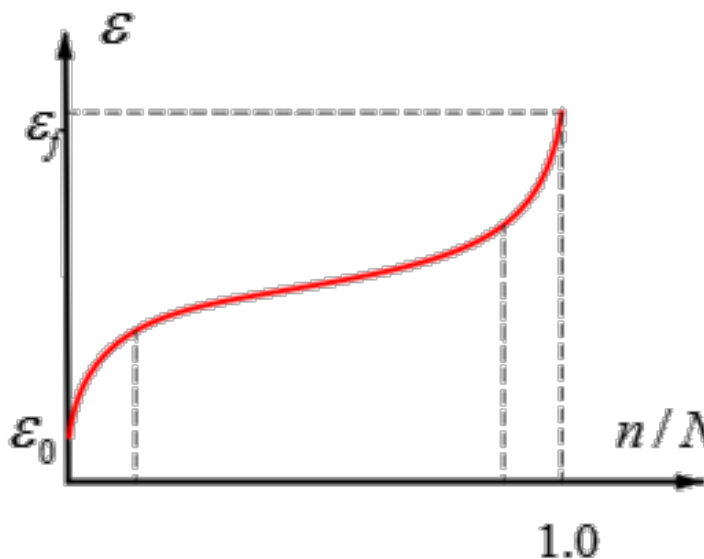
混凝土材料力学性能

➤ 疲劳性能

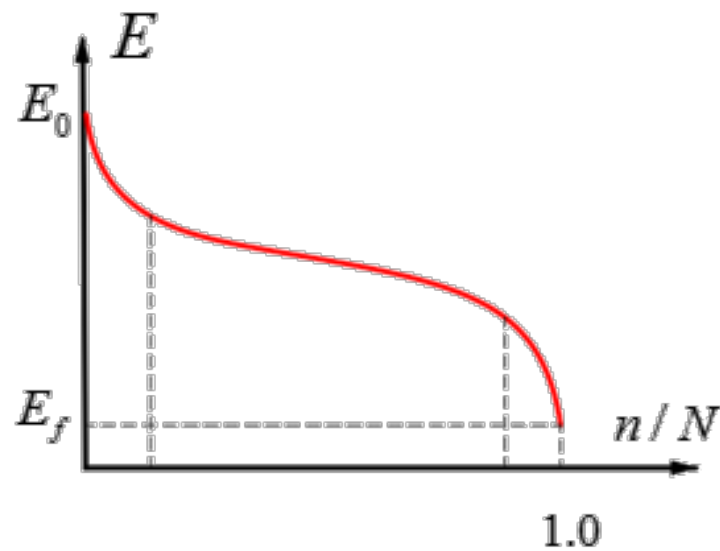
- 通常把能使试件承受200万次(或以上)循环荷载时发生破坏的压应力值称为混凝土的疲劳抗压强度。

疲劳行为对数律:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_c} = 1 - \beta \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \right) \log N$$



疲劳变形



刚度退化

混凝土材料力学性能

➤ 收缩

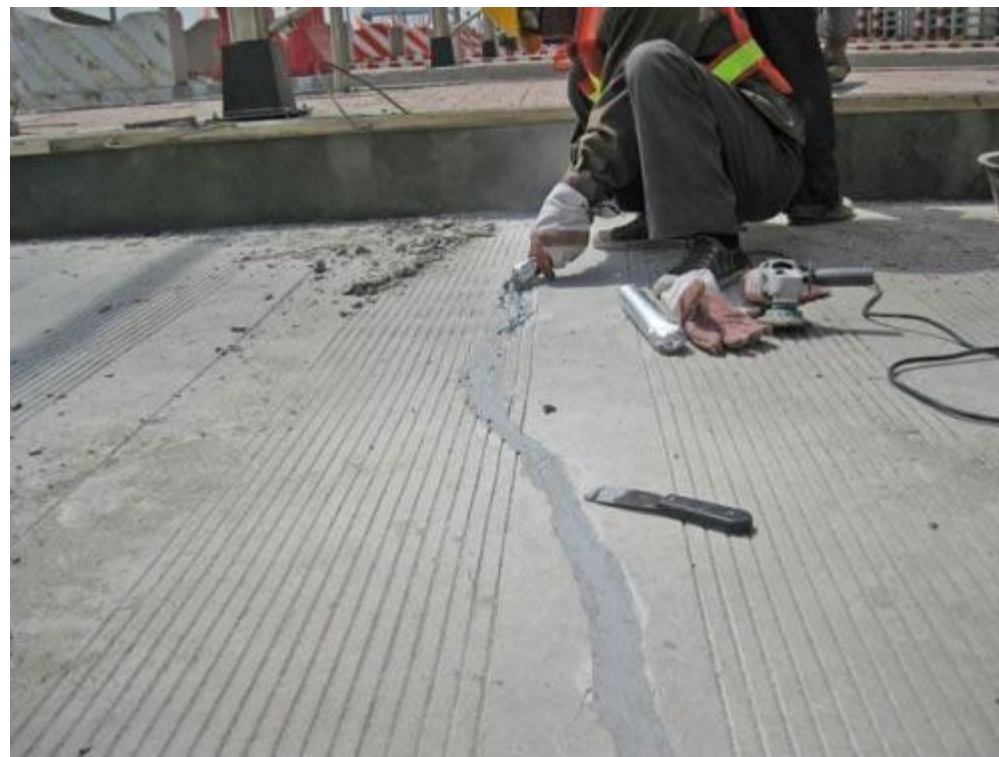
- **化学收缩(自身收缩)**: 水泥水化产物的体积小于反应前物质的总体积而导致的混凝土收缩称为化学收缩, 为不可逆变形, 属于混凝土自身的收缩。
- **干燥收缩**: 混凝土在干燥环境中, 其内部吸附的水分蒸发而引起凝胶体收缩或者毛细管内水分蒸发导致毛细管压力增大而出现的收缩。
- **变化规律**: 混凝土收缩变形随时间而加大, 在结硬初期发展较快, 一年左右渐趋稳定, 其值可达 $(2\sim5)\times 10^{-4}$, 一般可取常数 3×10^{-4} , 在钢筋混凝土构件中, 其收缩值可为素混凝土的一半。
- **影响因素**: 水泥品种、水泥用量、水灰比、骨料性质、外部环境、施工质量、体表比

混凝土材料力学性能

➤ 收缩



楼面因混凝土收缩开裂



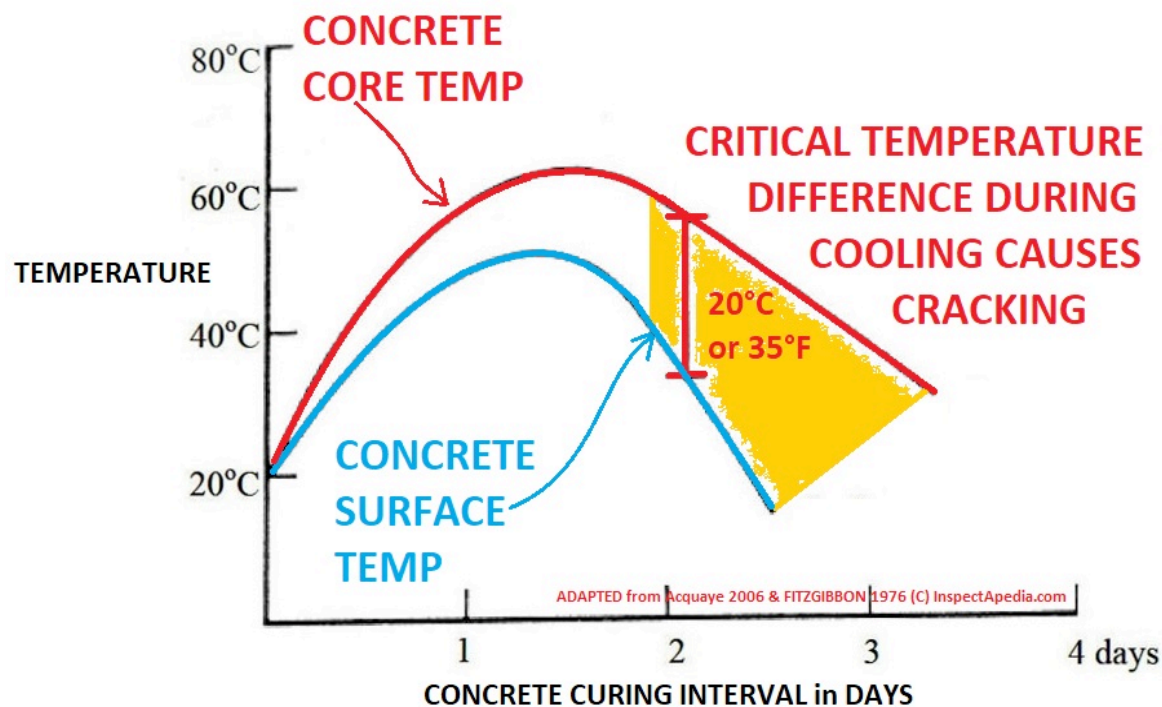
路面因混凝土收缩开裂

混凝土材料力学性能

➤ 温度变形

- 热胀冷缩：热膨胀系数为 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
- 混凝土水化过程中，开始时温度升高，后降低，直至与环境温度一致。
- 温升速度和峰值速度、散热速率和散热量以及降温速率受混凝土组成、结构尺寸以及环境条件等的影响。
- 大体积混凝土：混凝土内外温差过大引起开裂

CONCRETE CRACK FORMATION vs CORE TEMPERATURE Δ



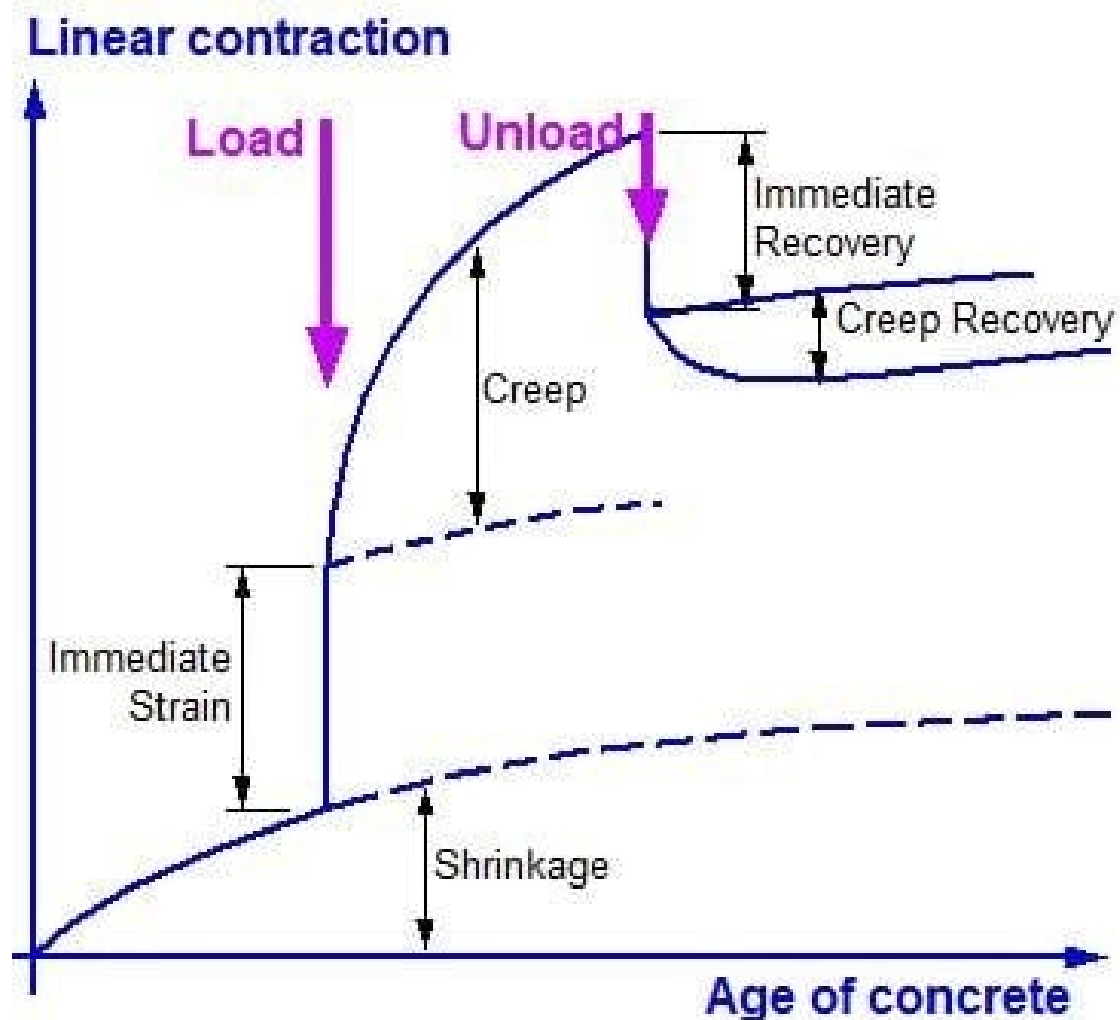
混凝土材料力学性能

徐变

- **徐变现象的定义**：混凝土在荷载的持续作用下发生随时间而增加的变形。
- **(应力)松弛**：在荷载的持续作用下，保持变形不变，混凝土的应力随时间的延长而逐渐减小。
- **产生徐变的机理**：水泥凝胶体在长期荷载作用下发生塑性流动或滑移，吸附在凝胶粒子上的吸附水因荷载 应力向毛细管渗出，以及骨料界面和砂浆内部微裂缝发展。
- **徐变对结构的影响**：加大结构的变形；在预应力混凝土结构中预应力损失；降低混凝土的长期抗压强度 (20%)；截面应力重分布，减少应力集中；降低温度应力，减少收缩裂缝。

混凝土材料力学性能

徐变

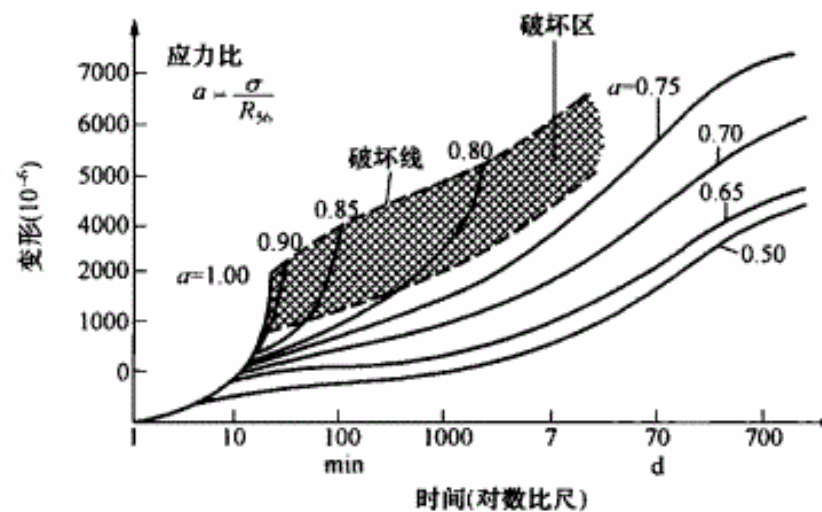
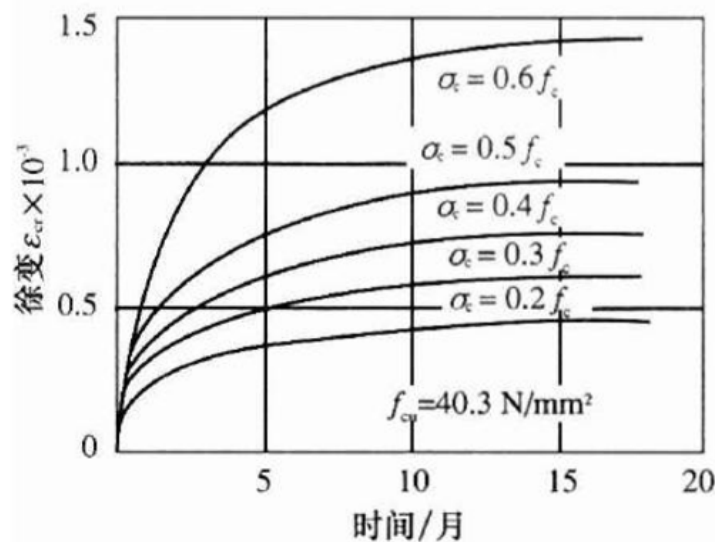


混凝土材料力学性能

徐变

- 徐变与应力水平：

- (1) 线性徐变， $\sigma_c \leq 0.5f_c$ ：徐变与应力基本成正比
- (2) 非线性徐变， $0.5f_c < \sigma_c \leq 0.8f_c$ ：徐变增长速率比应力增长速率快
- (3) 非稳定徐变， $\sigma_c > 0.8f_c$ ：非线性徐变急剧增长而不收敛



混凝土材料力学性能

徐变

- **加载时的龄期：**龄期越小，成熟度越差，起始应变和徐变越大。
- **原材料和配合比：**水泥用量大，水灰比越大，徐变越大；骨料多，弹模大，徐变小；使用普通硅酸盐水泥比早强快硬水泥的徐变大。
- **制作和养护条件：**振捣密实，养护条件好，徐变小。
- **使用期的环境条件：**湿度大，徐变小；在 20°C 至 70°C ，徐变随温度升高而增大，在 71°C 至 96°C ，徐变随温度升高而降低。
- **构件的形状和尺寸：**体表比大，徐变小。

混凝土材料力学性能

徐变

- **计算理论：**线性徐变理论为主
- **徐变系数：**徐变变形与初始变形(弹性变形)之比 $\varphi(t, t_0)$
- **徐变度：**振单位应力作用下(1N/mm²)下的徐变值 $C(t, t_0)$

ACI规范

$$\varepsilon^{creep}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \varepsilon^e$$

$$\varphi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^a}{b + (t - t_0)^a} \varphi_\infty$$

CEB-FIP模式规范1990

$$\varepsilon^{creep}(t, t_0) = \frac{\sigma(\tau)}{E_c} \varphi(t, t_0)$$

$$\varphi(t, t_0) = \beta(f_c) \beta(t_0) \beta_c(t - t_0) \varphi_{RH}$$



感谢各位同学!

任晓丹

rxdtj@tongji.edu.cn

www.renxiaodan.com

同济大学土木工程学院