

# 混凝土结构的算不准原理

曲哲 2005210096

**摘要：**本文通过概念性的宏观讨论，阐释了混凝土结构设计中的算不准原理，即混凝土结构的行为无法通过数学计算准确定量。本文从混凝土材料的特性出发，初步解释了这一原理的成因，进一步以此原理为基础，讨论了结构试验与数值计算在混凝土结构学科发展中的地位。通过讨论，希望引起工程设计人员对混凝土材料基本性能的反思。

**关键字：**混凝土，结构，试验，计算

本文有意模仿量子力学中著名的“测不准原理”的认识角度，但并不准备像海森堡证明“测不准原理”那样证明混凝土结构的“算不准原理”，而只是提出一种见解，以资工程设计及科研人员参考。

1927年海森堡提出的测不准原理表明，不可能同时准确地测量一对共轭物理量，例如位置和动量。这不是测量仪器本身的缺陷导致的，而是由物理量本身的性质决定的。再精确的测量仪器也无能为力，对机器的过分迷信有可能误导我们的思路。

从上个世纪开始，随着我们的计算能力的飞速发展，对计算的过分迷信以及对计算机的滥用，正在或多或少的误导着年轻的结构工程师。我想是时候跳出对计算的迷信，去认识我们的研究对象的基本属性。

## 一、阐述：从混凝土材料的强度说起

混凝土结构的算不准原理表明：不可能绝对准确地计算出混凝土结构的力学行为。

作为对这一原理的基本阐述，我们以最简单也是在混凝土结构与科研中必不可少的混凝土强度为例，来介绍以上算不准原理的基本论据。

混凝土强度是混凝土结构计算的基本参数，一般需要通过试验获得，并应用于计算。然而，以下诸多因素说明，混凝土强度是无法准确确定的。

首先混凝土强度就有好多种，常用的有抗压强度、轴拉强度、劈拉强度等。其次试件的形状又有好多种：立方体、棱柱体、圆柱体……目前美国 ACI 规范倾向于单一地使用圆柱体抗压强度  $f_c'$  作为各种受力条件下混凝土计算中的强度参数，我国规范则综合使用立方体抗压强度  $f_{cu}$  和抗拉强度  $f_t$ 。在哪种试件下定义的哪种强度能够代表混凝土的宏观力学性能？恐怕都不能完全胜任。

试件的尺寸也对强度有显著的影响，小试件强度高，大试件强度低，这就是通常意义下的尺寸效应<sup>[1]</sup>。各国规范中所谓的标准试件的尺寸也不统一，多大的尺寸最能反映结构中混凝土的强度？恐怕也难有定论。

试验细节也千差万别，例如为了减小加载板对试件两端的环箍效应，有人建议要垫一层钢刷，但很多试验好像都不愿意那么费事儿，这样测出来的强度准吗？再如以前我国规范中的劈拉试验用长方体的加载垫块，现在改用圆弧形了，哪个准？

由此看来，混凝土的强度实在难有准与不准之说，就混凝土强度本身而言，它的物理本质决定了它不可能被完全客观的确定，如果你希望获得它，就必须变革它，这时，它不再是完全客观的，而是加入了你的主观意识在里面，这与海森堡在希望准确地测量粒子的位置时遇到的问题类似，方法与对象不再是独立的，而是联系的了。

既然计算的基本参数都无法准确确定，又怎能希望准确地计算混凝土结构的力学行为呢。

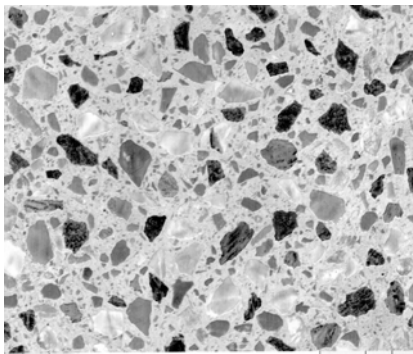
## 二、进一步阐述：结构中混凝土材料的基本属性

可不可以不通过“强度”这样一个模糊的宏观参数，直接计算混凝土结构的力学行为呢？确实有人在进行这样的尝试。1971年 Cundall 博士提出了离散元方法 (DEM)<sup>[2]</sup>，并在近期预言，20年内离散元将全面取代有限元在工程应用中的地位。离散元的基本思想是基于牛顿第二运动定律，通过定义模型中所有对象的界面接触行为来计算模型的力学反应。

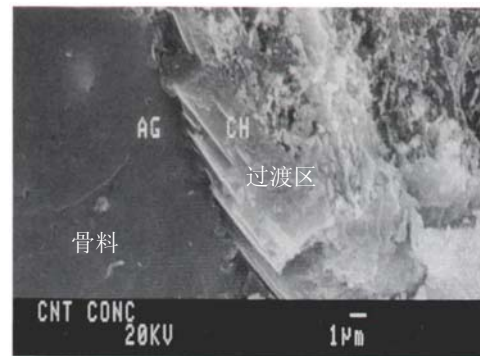
然而以下将要介绍的混凝土的基本属性<sup>[3]</sup>，决定了所有这些计算方法的尝试都无法克服算不准原理，无论它是否采用“强度”这一模糊的宏观参数。

### (1) 复杂性

众所周知，混凝土的微结构是非常复杂且非连续的，它主要由骨料相、胶体相和过渡区三相构成，而每一相本身又都具有复杂的多相结构，例如，花岗岩颗粒里除孔隙外，还不均匀地镶嵌着石英、长石和云母等矿物。各相的性能对混凝土整体的宏观性能都有较大的影响。



(a) 混凝土多相组成的微结构



(b) 混凝土骨料界面薄弱层

图 1：混凝土复杂的微结构

图 1 直观的显示了混凝土的多相结构及其复杂性。混凝土微结构的复杂性，决定了面向微观的计算模型是不可能建立并付诸实用的。即如上述的离散元，也不可能绝对模拟骨料与胶体之间的接触，而只能通过模糊的宏观力学行为加以定义，这可能比上节中提到的混凝土强度更加难以确定。

混凝土微结构的这种复杂性带来的另一个问题是，混凝土性能会有严重的地区差异。不同产地的骨料、砂、水等原料，可能制备出性能差异不小的混凝土，与金属材料相比，这种差异完全可以影响计算。

### (2) 生长性

混凝土材料区别于金属等其它常用材料的另一个重要重点是，在材料服役的很长时间内，材料的微结构在不断的生长，材料的性能在不断的变化，而这种生长不是可以严格预测的，而是与材料所处环境的温度、湿度等等因素有关。这说明，混凝土材料的性能不是时间的确定函数。



图 2：水泥浆扫描电镜照片（7 天龄期）

水泥浆体是混凝土中重要的胶凝材料，它本身不是均匀连续的，图 2 显示了它的复杂的微结构，并且随着水泥的不断水化，这一微结构在不断的生长。图 3 显示了水泥的水化过程，图中只显示了较短的时间范围内水泥的水化过程，实际上在结构使用生命中的很长时间内，水泥的水化都在发生，水泥浆的微结构也在改变，水泥浆体与骨料的界面也在改变。

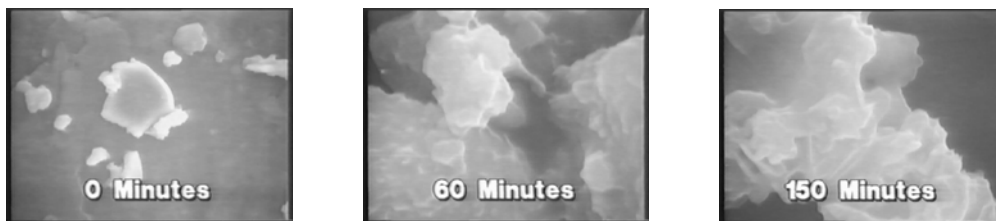


图 3：水泥的水化过程

收缩与徐变就是混凝土性能对时间依赖性的突出表现。混凝土不是静止的，而且其性能关于时间的变化是无法准确确定的，希望准确计算混凝土结构力学行为是不可能的。

### （3）随机性

对于现浇混凝土结构，更多的随机性被引入了结构性能中，混凝土材料对施工过程的依赖性足以影响它的宏观性能，这在计算模型中是不可能得到准确的反映的。



图 4：现场浇筑混凝土

由此可见，混凝土材料具有复杂性、生长性和随机性，混凝土材料的这些基本属性决定了混凝土结构计算这个问题的基本属性，再完善的计算模型也无法考虑到影响混凝土结构性能的所有因素，对计算的迷信往往会使人忘却问题的基本属性。

#### 四、应用：“算不准”不等于“不准算”

算不准原理并无意全盘否定对混凝土结构力学行为的计算分析，而是提醒工程和科研人员，应该把握问题的基本属性，正确利用计算分析的工具及其结果。

一方面，计算模拟是探索工程问题的力学本质的有力工具。

天气预报是我们天天接触的。它正是计算模拟力量的展示。以前计算能力差，气象工作者只能凭经验来预测天气，准确性比较没有保障。现在计算力量强了，可以分析大气云层的变化，预测其走势，现在的天气预报就比以前准多了。在正确理解天气变化的规律与机理的基础上，合理的建立计算模型，便可以相对准确的预测短期内的天气变化的大概趋势。混凝土结构的计算模拟也是如此。只有在正确理解混凝土结构的受力机理的基础上建立的计算模型，才有可能相对准确的预测某些混凝土结构的力学行为。

通过将计算结果与实际结果对比，寻找计算模型的不足，改善计算模型，在一定范围内有助于认清对问题起关键作用的影响因素。同时，通过正确的计算模型，在一定范围内得到的计算结果，可以作为试验手段的一种补充。



图 5：外贴 FRP 下混凝土裂缝的发展过程<sup>[4]</sup>

图 5 所示为陆新征（2004）<sup>[4]</sup>利用有限元方法模拟的混凝土在外贴 FRP 的单拉作用下界面裂缝的发展过程，而这一变化过程在现有的试验技术条件下是很难得到的。可见，如果利用得当，计算模拟工具的作用是巨大的。

另一方面，计算结果是理想的、狭隘的。

对于结构工程专业，计算模型的物理本质就是一个理想化的物理模型，进而用数学工具求解。这个模型必然不可能包罗万象，而只能把握要点。所以一切计算结果都具有其局限性。不能把有限的几次“准确的”计算模拟绝对化。

所以，“算不准”是普遍的、绝对的，同时计算模拟的工具是强大的。关键在于正确的利用计算工具，评价计算结果。

#### 五、参考文献

- [1] Z. P. Bazant, *Scaling of Structural Strength*. Hermes Penton Science, London, 2002
- [2] 江见鲸等：混凝土结构有限元分析，清华大学出版社，2005
- [3] P. K. Mehta & Paulo J. M. Monteiro, *CONCRETE: Microstructure, Properties, and Materials*, 1993.
- [4] Lu, X. Z., *Studies on FRP-concrete interface*. PhD Thesis, Tsinghua University, Beijing,