

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

钢筋混凝土有限元——绪论

江见鲸 陆新征
清华大学土木工程系

2005

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

课程历史

- 清华大学土木工程系开设《钢筋混凝土有限元》课程已经有10多年历史；
- 陆续出版了《钢筋混凝土结构非线性有限元分析》、《钢筋混凝土有限元与板壳极限分析》、《混凝土结构有限元》等教材和专著；
- 课程教学与学术科研有着良好互动，在教学过程中我们也在不断学习、提高自身。

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

研究生课程开设目的

- 研究生是否需要讲课？
 - 传授知识（次要）
 - 培养自学、创造能力（主要）
 - “授人以鱼，不如授人以渔”

优秀的学位论文

老师的知识

学生的知识

(范立雄 2004)

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

研究生课程教学的内容

- 概念
 - 对关键问题的基本认识
- 范例
 - 对基本过程的了解
- 方法和手段
 - 做研究的基本规律

- 非线性
- 本构方程
- 破坏准则
- 断裂能
- 求解非线性指标
- 编制简单本构方程
- 有限元软件操作
- 阅读文献
- 寻找研究热点
- 比较、分析

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

本课程开设目的

- 线性分析 ⇨ 非线性分析
- 杆系结构 ⇨ 实体、板壳结构
- 基于规范设计 ⇨ 基于分析设计

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

线性和非线性

- 线性计算
- 非线性计算

强度较低

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

非线性带来的影响

- 叠加原理不适用，荷载、变形，内力不再能简单叠加；
- 材料行为更加复杂，参数更多，标定更难；
- 结构方程组不再是线性方程，而是非线性方程，需要迭代求解；

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

杆系结构和实体结构

- 杆系结构
- 实体结构

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

带来的影响

- 一维应力应变行为向二维或三维应力应变行为转化，需要定义在更复杂应力空间的应力应变关系，强度关系等；
- 需要新的数学和力学工具来计算空间应力、应变；
 - 结构力学-> 弹性力学.....
 - 标量-> 张量.....

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

基于规范设计和基于分析设计

- 规范设计**
 - 偏于安全的下限解
 - 极限状态
 - 简单、常见受力状态
- 分析设计**
 - 各种不同安全水平
 - 受力全过程
 - 复杂、特殊受力状态

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

课程教材及讲义

- 《混凝土结构有限元》：江见鲸等，清华大学出版社，月底即将出版
- 《钢筋混凝土非线性有限元分析》：江见鲸，陕西科技出版社，1994
- 《钢筋混凝土有限元与板壳极限分析》：沈聚敏等，清华大学出版社，1993
- 《钢筋混凝土原理和分析》：过镇海等，清华大学出版社，2003
- 《混凝土结构工程学》：江见鲸，中国建筑工业出版社，1998

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

课程教材及讲义

- 《混凝土结构的计算机仿真》：顾祥林等，同济大学出版社，2002
- 《钢筋混凝土非线性有限元法原理与应用》：董毓利，中国水利水电出版社，2002
- 《钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用》：吕西林等，同济大学出版社，1997
- 《钢筋混凝土有限元分析》：康清梁，中国水利水电出版社，1996
- 《钢筋混凝土有限元分析：技术现状报告》：周氏译，河海大学出版社，1988
- 《钢筋混凝土非线性分析》：朱伯龙，同济大学出版社，1985

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

课程教材及讲义

- 《Plasticity in reinforced concrete》：Chen W.F., McGraw-Hill
- 《土木工程材料的本构方程》：Chen W. F., 余天庆等译
- 《连续体和结构的非线性有限元》：Belytschko T, et al. 庄茁译
- 《Manual of numerical methods in concrete》：Bangash M. Y. H., London: Thomas Telford Ltd.

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

网络资源

- 教学网页
 - <http://www.luxinzheng.net>
- 其他
 - <http://www.simwe.com>
 - <http://okok.org>
 - <http://www.aoxue.org>

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

混凝土有限元分析的作用

- 深化对结构力学行为的理解
 - 试验无法对结构各点的变形、内力加以监测，数值模型可以得到完备的信息；
- 减轻试验工作量
 - 试验中的大量参数讨论工作可以交给数值模型来进行
- 完成部分无法进行的试验
 - 破坏、倒塌、爆炸等等……

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

加深对结构力学行为的理解

- 例子：FRP-混凝土界面微裂缝

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

减轻试验工作量

- 例子：均布荷载和集中荷载对FRP抗弯加固混凝土梁效果

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

完成部分无法进行的试验

- 例子：炸弹冲击掩体

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

钢筋混凝土有限元分析的发展

- 1967年，第一篇混凝土有限元论文发表；
- 1970年，弥散裂缝模型提出使得混凝土有限元分析变得简单易行；
- NONSAP等程序将混凝土有限元分析集成到通用有限元程序中；
- 组合式钢筋混凝土模型和整体式钢筋混凝土模型使得实际混凝土结构建模大为简便；
- CEB-FIP MC90等开始将有限元分析引入规范；
- 中国《混凝土结构设计规范》GB50010-2002在附录中加入相关模型；

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

钢筋混凝土有限元分析的难点

- 材料成分、结构复杂，离散性大
 - 混凝土是由水泥砂浆和骨料组成的复杂化学物质，成分复杂，原料多采用当地材料，离散度极大；
 - 混凝土内部除了骨料和砂浆，还有大量的细微裂缝、杂质，结构复杂，都会显著影响混凝土的力学行为；
- 现场操作多，受环境影响大，受实际操作人员水平影响大；
- 钢筋和混凝土力学行为差异显著，共同工作机理复杂；

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

钢筋混凝土有限元分析的难点

- 材料力学行为复杂
 - 拉压强度不等，易开裂，往往需要带裂缝工作，非线性行为突出；
 - 应力应变关系复杂，无论是试验还是理论都很难对混凝土的非线性行为给出一个完美的描述；
 - 实际工程对材料强度发挥得比较充分，对分析精度的要求较高；

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

钢筋混凝土有限元分析的难点

- 数值方法无法解决的难题
 - 连续体力学和混凝土开裂之间的矛盾；
 - 确定性分析和混凝土高离散性之间的矛盾；
 - 分段线性化数值方法和混凝土高度非线性之间的矛盾；
 - 均匀模型和混凝土复杂组分之间的矛盾；

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

混凝土有限元分析中的“怪圈”

```

    graph TD
      A[复杂的力学行为] --> B[复杂的力学模型]
      B --> C[复杂的参数标定]
      C --> D[复杂的实验技术]
      D --> E[复杂的试验结果]
      E --> A
    
```

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

发展动态

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

试验技术的发展

- 新的试验设备
 - 高地位的压力机
 - 刚度大精度高的三轴试验机
 - 高温、低温、高应变率
- 新的测量工具
 - 光纤测量
 - 压电传感器
 - 声发射技术

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

数学、力学的进步

- 新的力学工具
 - 线弹性-非线性弹性-弹塑性-断裂-损伤.....
 - 有限元-离散元-刚体弹簧元-无网格.....
- 新的数学工具
 - 更快的方程求解器
 - 更稳定的非线性分析方法
 - 更简便的概率可靠度分析方法
 - 人工神经网络、遗传算法等

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

材料技术的进步

- 新的混凝土材料
 - 新型外加剂
 - 新型胶结材料 (ECC, RPC)
 - 新型骨料 (轻质, 抗辐射)
- 新的加筋材料
 - FRP
 - 新型纤维

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

计算机技术的进步

- 计算能力的提高
 - 存储空间 (宏观走向微观)
 - 计算速度 (隐式、显式)
- 计算机几何图形学的发展
 - 建模技术 (钢筋配置)
 - 网格划分技术 (追踪裂缝发展)
 - 后处理技术 (空间应力场显示)



清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

新的结构形式和应用领域

- 薄壳结构
- 核反应堆外壳 (三维应力)
- 超高坝 (水压对裂缝作用)
- 超长超高结构 (徐变)



清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

如何应用

- 区分不同的结构问题, 采取不同的研究方法
- 混凝土力学模型研究。
 - 吸取最新混凝土有限元研究成果, 提出新的模型;
- 复杂应力混凝土分析。
 - 比较、选取最适当的混凝土力学模型加以分析;
 - 不同混凝土模型各有侧重, 针对不同问题有各自最好的解决方法;
- 一般结构计算。
 - 选取比较简单可靠的混凝土有限元模型;
 - 参数简单, 易于标定;
 - 应用广泛, 大量例题;

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

小结

- 混凝土有限元既是一个方兴未艾的研究课题, 又是一个应用广泛的研究工具;
- 对混凝土本身力学行为, 有限元技术, 非线性技术的介绍和入门教学;

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

教学计划及评分标准

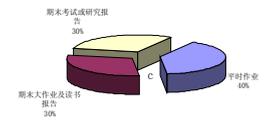
- 课堂讲授引导, 课下自学为主
- 14周讲课, 1周复习, 1周考试

■ 应力应变分析	■ 非线性分析方法
■ 混凝土强度准则	■ 钢筋混凝土杆系分析
■ 混凝土本构关系	■ 其他数值方法
■ 钢筋混凝土有限元模型	■ 常用有限元程序
■ 混凝土断裂与损伤	

清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

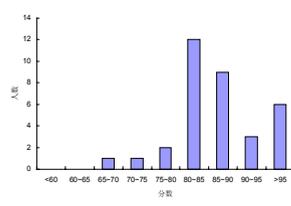
教学计划及评分标准

- 评分标准
 - 平时作业 40分
 - 期末大作业及读书报告 30分
 - 期末考试或研究报告 30分



清华大学研究生课程——《钢筋混凝土有限元》

去年的评分结果



分数	人数
<60	0
60-65	0
65-70	1
70-75	1
75-80	2
80-85	12
85-90	9
90-95	3
>95	6