

## 二维钢筋混凝土本构关系程序 RCFER2002

陆新征  
清华大学土木工程系  
Dec. 2002.

## RCFER2002 的主要参考文献和程序

- 主要参考文献：
  - 《钢筋混凝土结构非线性有限元分析》，江见鲸
  - 《钢筋混凝土原理》，过镇海
  - 《钢筋混凝土有限元与板壳极限分析》，沈、王、江
  - 《钢筋混凝土有限元分析》，康清梁
  - 《Finite Element Analysis of Reinforced Concrete》，Bazant
  - 《Finite Element Method for Nonlinear Problems》，Bathe

## RCFER2002 的主要参考文献和程序

- 主要参考程序：
  - RCFER，江见鲸
  - ADINA81 & ADINA84, Bathe
  - NONSAP，Bathe
  - RCNFEA，李传才

## RCFER2002程序基本资料

- Fortran 77+Fortran 90
- 双精度数值
- 总共约3500余行
- 9万余字符
- 60多个子程序

## 程序编制目的

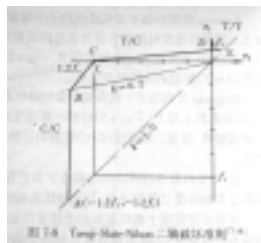
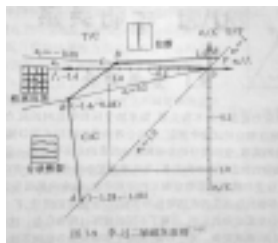
- 课程教学
  - 《钢筋混凝土结构》，《钢筋混凝土有限元》
- 科研应用
  - RCPEFG (Code by LU)
  - RCFER (Code by JIANG)
  - 混凝土构件有限元分析
  - 特殊条件下需对混凝土本构进行适当的调整

## 对程序的基本要求

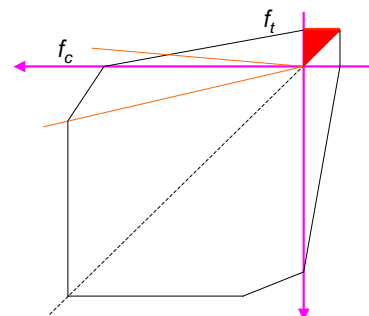
- 可以模拟混凝土在平面压、拉、剪等组合应力条件下的受力和变形情况
- 可以模拟混凝土开裂及裂面效应
- 可以利用MARC中的user subroutine嵌入MARC
- 可以较好的模拟加卸载及往复加载情况下混凝土的反应

## 强度准则

- 在李 - 过和Tasuji-Slate-Nilson二轴破坏准则上经过简化得到的强度准则



## 强度准则(T/T)

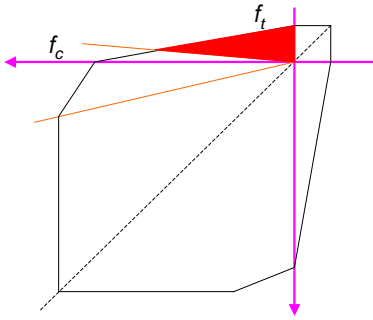


双拉状态

$\sigma_1 > 0$  且  $\sigma_2 > 0$

拉坏

## 强度准则(C/T)



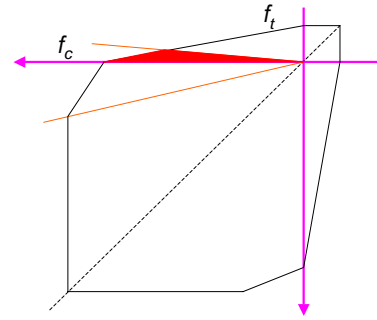
拉压状态

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$$

$$\sigma_1 / \sigma_2 < -0.05$$

拉坏

## 强度准则(C/T)



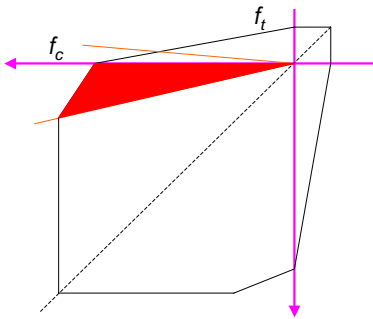
拉压状态

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$$

$$\sigma_1 / \sigma_2 > -0.05$$

柱状压坏

## 强度准则(C/C)



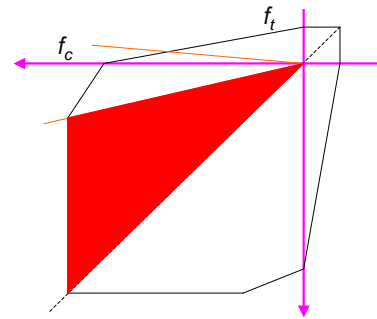
双压状态

$$\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$$

$$\sigma_1 / \sigma_2 < 0.2$$

柱状压坏

## 强度准则(C/C)



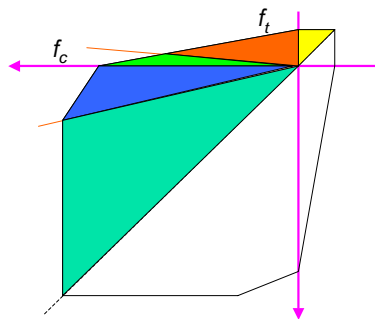
双压状态

$$\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$$

$$\sigma_1 / \sigma_2 > 0.2$$

片状压坏

## 强度准则汇总



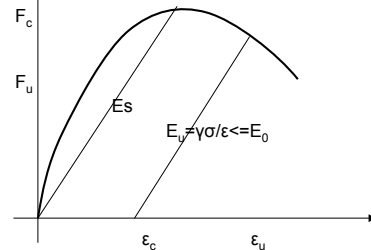
将混凝土的二轴破坏准则分成3种破坏形式，5种应力组合分区，使程序物理意义明确，计算结果清晰。

## 等效单轴应力应变关系

### ■ 受压单轴应力应变关系

- 采用Saenz公式

$$E_v = \frac{\left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^2\right] E_0}{\left[1 + \left(\frac{E_0}{E_s} - 2\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^2\right]^2}$$



## 等效单轴应力应变关系

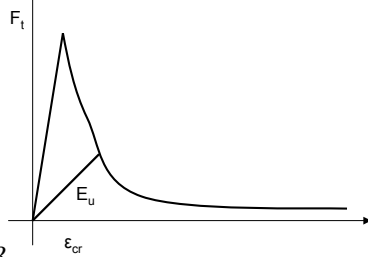
### ■ 受拉单轴应力应变关系

- 采用江见鲸公式

$$\sigma = f_t e^{-a(\varepsilon - \varepsilon_{cr})}$$

### ■ 剪力传递系数

$$\beta = (\beta_0 - \beta_1) e^{-a(\varepsilon - \varepsilon_{cr})} + \beta_1$$



## 加卸载关系

- 在破坏曲面以内，用应力空间来定义加载和卸载
- 在破坏曲面以外，用应变空间来定义加载和卸载
- 共使用了6个非线性指标E<sub>v</sub>(1~6)
  - 如果E<sub>v</sub>(i) ≤ E<sub>v</sub>max(i)，则处于卸载或卸载后再加载情况，使用卸载刚度\*
  - 如果E<sub>v</sub>(i) > E<sub>v</sub>max(i)，则处于骨架线加载情况，使用当时的加载刚度



## 裂缝的张开和闭合

- 当裂缝方向的应力 $\sigma < 0$ 时，我们认为此时裂缝受压闭合。
- 如果某条裂缝曾经闭合，则该条裂缝将不再能承受任何拉力。=>CrRelease(i)=1

## 程序基本变量表(1)

- SIG(3),EPS(3),dEPS(3),dSIG(3):  ${}^t\sigma_{ij}$ ,  ${}^t\varepsilon_{ij}$ ,  $d\sigma_{ij}$ ,  $d\varepsilon_{ij}$
- Stress(3),Strain(3)  ${}^{t+dt}\sigma_{ij}$ ,  ${}^{t+dt}\varepsilon_{ij}$
- E0,MU0,Fc,Ft,SIGMAU,EPSC,EPSU
  - E,  $\mu$ ,  $f_c$ ,  $f_t$ ,  $\sigma_u$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_u$
- N(3,3), T(3,3) 坐标转换矩阵
- D(3,3) 本构矩阵
- SIGP(3), EPSP(3)  ${}^t\sigma_i$ ,  ${}^t\varepsilon_i$  主应力，主应变

## 程序基本变量表(2)

- dSIGP(3), dEPSP(3)  $d\sigma_i$ ,  $d\varepsilon_i$  主应力，主应变增量
- dEPSP1(3) 等效主应变；主应变减去泊松比影响后得到的等效主应变
- Evv(6), Evmax(6) 非线性指标
- Epstate, AddLoad 混凝土状态指标
- Crack = -2双压破坏, -1单压破坏, 0无破坏, 1一条裂缝, 2 两条裂缝, 100 彻底破坏

## 程序基本变量表(3)

- ANGLE 裂缝角度
- ANG, Alpha, 主应力角度，主应力比
- A1,A2,Beta0,Beta1, 裂缝裂面参数
- Inc, Ncycle, 计算步，计算子步
- ITEM, 状态修正变量

## 函数列表(1)

- Con\_GetD(Lxz Con) : 总体控制函数, 根据当前 Crack 的值调用相应的下列函数
- Con\_Crack1(C) Crack== -2 双压破坏
- Con\_Crack2(C) Crack== -1 单压破坏
- Con\_Crack3(C) Crack== 0 无破坏
- Con\_Crack4(C) Crack== 1 一条裂缝
- Con\_Crack5(C) Crack== 2 两条裂缝
- Con\_Crack100(C) Crack== 100 完全破坏

## 函数列表(2)

- Con\_N2Crack01(C) 双压破坏, 受拉, 认为此时混凝土完全破坏
- Con\_N2Crack02(C) 双压破坏, 继续加载
- Con\_N2UnLoad(C) 双压破坏, 卸载

## 函数列表(3)

- Con\_N1Crack01(C) 单压破坏, 受拉, 认为此时混凝土完全破坏
- Con\_N1Crack02(C) 单压破坏, 继续加载
- Con\_N1UnLoad(C) 单压破坏, 卸载

## 函数列表(4)

- Con\_NoCrack01(C) 无裂缝, 处于双压状态, >0.2, 加, 加
- Con\_NoCrack02(C) 无裂缝, 处于双压状态, <0.2, 加, 加
- Con\_NoCrack03(C) 无裂缝, 处于拉压状态, <-0.05, 加, 加
- Con\_NoCrack04(C) 无裂缝, 处于拉压状态, >-0.05, 加, 加
- Con\_NoCrack05(C) 无裂缝, 处于双拉状态, 加, 加

## 函数列表(5)

- Con\_NoUnLoad01(C) 无裂缝，处于双压状态， $>0.2$ ，卸，卸
- Con\_NoUnLoad02(C) 无裂缝，处于双压状态， $<0.2$ ，卸，卸
- Con\_NoUnLoad03(C) 无裂缝，处于拉压状态， $<-0.05$ ，卸，卸
- Con\_NoUnLoad04(C) 无裂缝，处于拉压状态， $>-0.05$ ，卸，卸
- Con\_NoUnLoad05(C) 无裂缝，处于双拉状态，卸，卸

## 函数列表(6)

- 一条裂缝，闭合，和无裂缝情况一样
- Con\_P1Crack01(C) 一条裂缝，闭合，压，压 $>0.2$ ，加，加
- Con\_P1Crack02(C) 一条裂缝，闭合，压，压 $<0.2$ ，加，加
- Con\_P1Crack03(C) 一条裂缝，闭合，拉，压 $<-0.05$ ，加，加
- Con\_P1Crack04(C) 一条裂缝，闭合，拉，压 $>-0.05$ ，加，加
- Con\_P1Crack05(C) 一条裂缝，闭合，拉，拉，加，加
- Con\_P1UnLoad01(C) 一条裂缝，闭合，处于双压状态， $>0.2$ ，卸，卸
- Con\_P1UnLoad02(C) 一条裂缝，闭合，处于双压状态， $<0.2$ ，卸，卸
- Con\_P1UnLoad03(C) 一条裂缝，闭合，处于拉压状态， $<-0.05$ ，卸，卸
- Con\_P1UnLoad04(C) 一条裂缝，闭合，处于拉压状态， $>-0.05$ ，卸，卸
- Con\_P1UnLoad05(C) 一条裂缝，闭合，处于双拉状态，卸，卸

## 函数列表(7)

- 一条裂缝，张开，如果垂直裂缝方向出现压坏，则认为混凝土彻底破坏，如果垂直裂缝方向出现新裂缝，则变为两条裂缝情况。
- Con\_P1Crack06(C) 一条裂缝，张开，拉，压，加，加
- Con\_P1Crack07(C) 一条裂缝，张开，拉，压，加，卸
- Con\_P1Crack08(C) 一条裂缝，张开，拉，压，卸，加
- Con\_P1Crack09(C) 一条裂缝，张开，拉，压，卸，卸
- Con\_P1Crack10(C) 一条裂缝，张开，拉，拉，加，加
- Con\_P1Crack11(C) 一条裂缝，张开，拉，拉，加，卸
- Con\_P1Crack12(C) 一条裂缝，张开，拉，拉，卸，加
- Con\_P1Crack13(C) 一条裂缝，张开，拉，拉，卸，卸

## 函数列表(8)

- 两条裂缝都闭合，视为无裂缝情况
- Con\_P2Crack01(C) 两条裂缝，都闭合，压，压 $>0.2$ ，加，加
- Con\_P2Crack02(C) 两条裂缝，都闭合，压，压 $<0.2$ ，加，加
- Con\_P2Crack03(C) 两条裂缝，都闭合，拉，压 $<-0.05$ ，加，加
- Con\_P2Crack04(C) 两条裂缝，都闭合，拉，压 $>-0.05$ ，加，加
- Con\_P2Crack05(C) 两条裂缝，都闭合，拉，拉，加，加



## 函数列表(9)

- 两条裂缝有一条闭合，视作单裂缝情况
- Con\_P2Crack06(C) 两条裂缝，1闭合，2张开，压，拉，卸，卸
- Con\_P2Crack07(C) 两条裂缝，1闭合，2张开，压，拉，卸，加
- Con\_P2Crack08(C) 两条裂缝，1闭合，2张开，压，拉，加，卸
- Con\_P2Crack09(C) 两条裂缝，1闭合，2张开，压，拉，加，加
- Con\_P2Crack10(C) 两条裂缝，1张开，2闭合，压，拉，卸，卸
- Con\_P2Crack11(C) 两条裂缝，1张开，2闭合，压，拉，卸，加
- Con\_P2Crack12(C) 两条裂缝，1张开，2闭合，压，拉，加，卸
- Con\_P2Crack13(C) 两条裂缝，1张开，2闭合，压，拉，加，加

## 函数列表(10)

- 两条裂缝都张开，本程序假设在两条了裂缝都张开的情况下构件仍然能够承担剪力，即 $\beta = \min(\beta_{crack1}, \beta_{crack2})$
- Con\_P2Crack14(C) 两条裂缝，都张开，拉，拉，加，加
- Con\_P2Crack15(C) 两条裂缝，都张开，拉，拉，卸，加
- Con\_P2Crack16(C) 两条裂缝，都张开，拉，拉，加，卸
- Con\_P2Crack17(C) 两条裂缝，都张开，拉，拉，卸，卸

## 与MARC的衔接

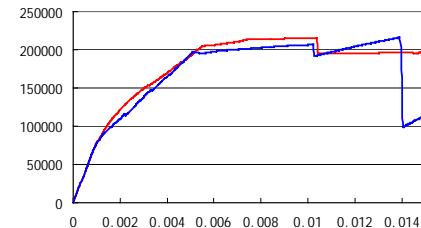
- 使用MARC的user subroutine中的hyperelastic材料模型

SUBROUTINE HYPELA (D,G,E,DE,S,TEMP,DTEMP,NGENS,N,NN,KC,  
MATS,NDI,NSHEAR)

- 后处理：裂缝、荷载状态的显示
- 使用MARC的PLOTV子程序

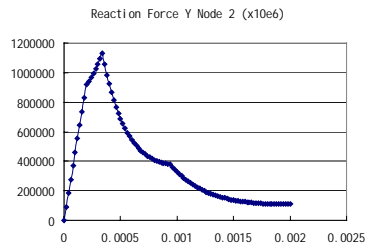
## 算例1

- 单筋界限配筋混凝土悬臂梁
- 比较MARC和RCFER2002的计算结果



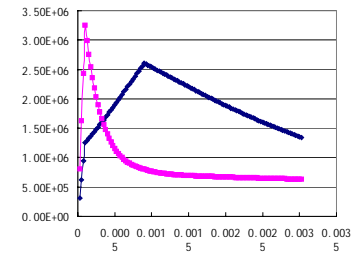
## 算例2

### ■ 4节点等参元纯剪受力



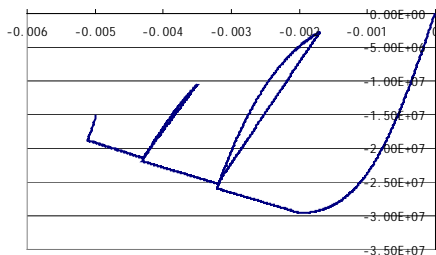
## 算例3

### ■ 拉剪复合受力分析



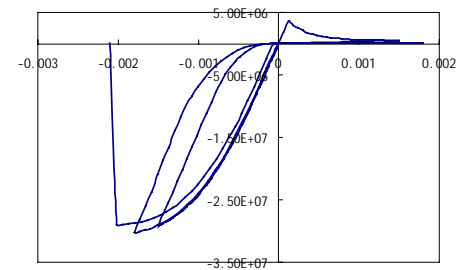
## 算例4

### ■ 单轴受压往复加载



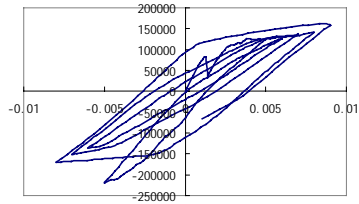
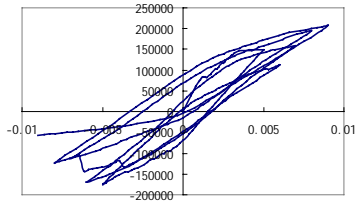
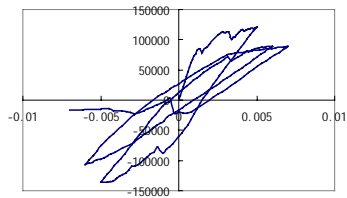
## 算例5

### ■ 单轴往复拉压加载



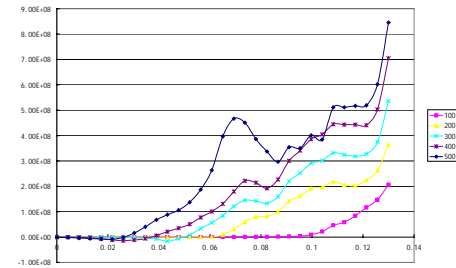
## 算例6

### ■ 悬臂梁往复加载



## 算例7

### ■ 面内剪切试验



## 主要改进方向

- 目前往复加载表现还不够稳定，有时计算结果不理想；
- 程序集中编写时间只有大约1周左右，还存在很多的bug，需要调试；
- 增加程序的结构性，逻辑性，可扩充性；
- 尝试向三维发展

谢谢！