

## 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.

## 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

## 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

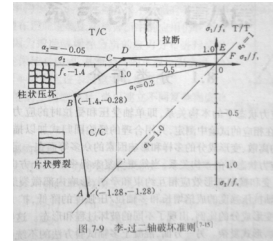
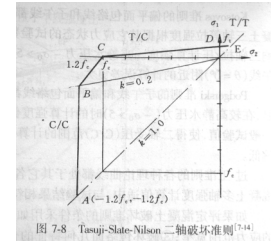
## 对程序的基本要求

- 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

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

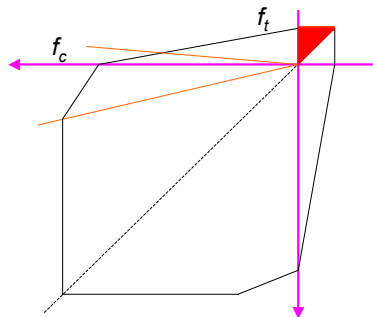
## 强度准则

- 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


 图 7-9 李-过二轴破坏准则<sup>[7-13]</sup>

 图 7-8 Tasuji-Slate-Nilson 二轴破坏准则<sup>[7-14]</sup>

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 强度准则(T/T)



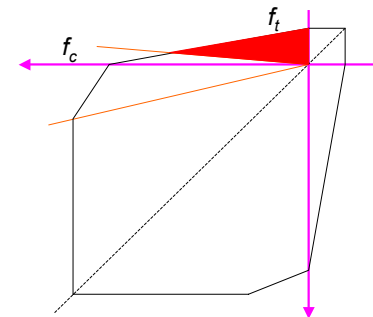
双拉状态

$\sigma_1 > 0$  且  $\sigma_2 > 0$

拉坏

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 强度准则(C/T)



拉压状态

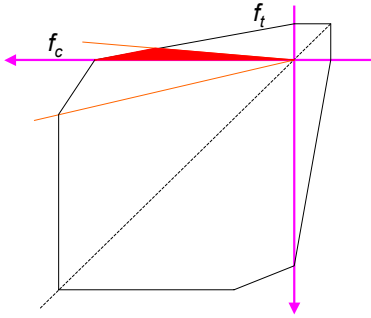
$\sigma_1 > 0$ ,  $\sigma_2 < 0$

$\sigma_1 / \sigma_2 < -0.05$

拉坏

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 强度准则(C/T)



拉压状态

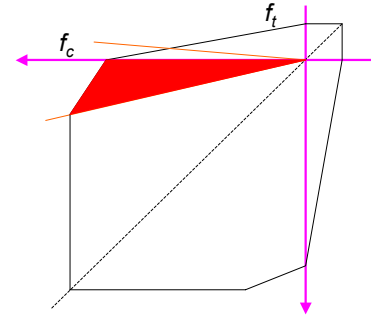
$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$$

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

柱状压坏

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 强度准则(C/C)



双压状态

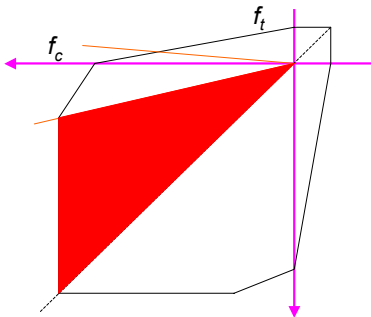
$$\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$$

$$\sigma_1 / \sigma_2 < 0.2$$

柱状压坏

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 强度准则(C/C)



双压状态

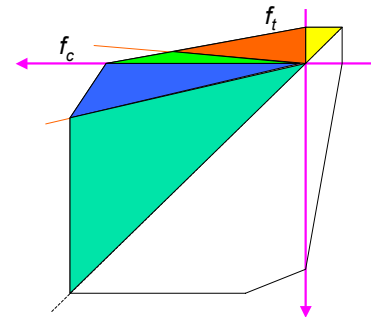
$$\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$$

$$\sigma_1 / \sigma_2 > 0.2$$

片状压坏

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 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。

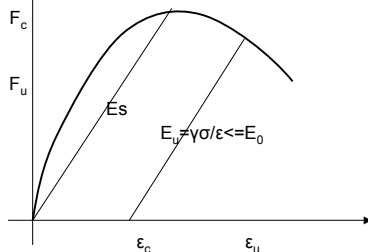
下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 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

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


 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 等效单轴应力应变关系

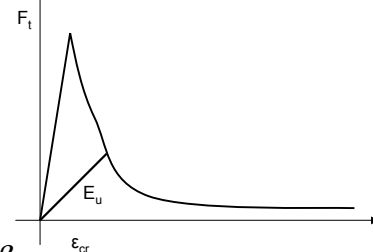
### ■ 受拉单轴应力应变关系

#### ■ 采用江见鲸公式

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

#### ■ 剪力传递系数

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


 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 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>vw</sub>(1~6)
  - 如果E<sub>vw</sub>(i) ≤ E<sub>vmax</sub>(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>vw</sub>(i) > E<sub>vmax</sub>(i)，则处于骨架线加载情况，使用当时的加载刚度

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 非线性指标

- E<sub>vw</sub>(1): 双压破坏的非线性指标
- E<sub>vw</sub>(2): 单压破坏的非线性指标
- E<sub>vw</sub>(3): 未出现破坏时的非线性指标
- E<sub>vw</sub>(4): 有一条裂缝时，对应该裂缝的非线性指标
- E<sub>vw</sub>(5): 有两条裂缝时，对应与第一条裂缝的非线性指标
- E<sub>vw</sub>(6): 有两条裂缝时，对应与第二条裂缝的非线性指标

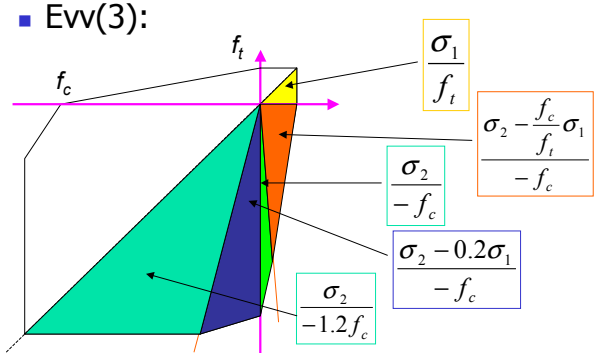
 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 非线性指标的规一化

- Ewv(1):  $(1.2\varepsilon_c + d\varepsilon_2^*) / \varepsilon_c$   
 $d\varepsilon_2^* = (d\varepsilon_2 - 0.2d\varepsilon_1) / 0.96$
- Ewv(2)  $(\varepsilon_c + d\varepsilon_2) / \varepsilon_c$

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 非线性指标的规一化


 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 非线性指标的规一化

- Ewv(4):  $1 + d\varepsilon_1^* E_0 / f_t$
- Ewv(5)  $1 + d\varepsilon_1^* E_0 / f_t$
- Ewv(6)  $1 + d\varepsilon_2^* E_0 / f_t$

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 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。  $\Rightarrow CrRelease(i) = 1$

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 程序基本变量表(1)

- SIG(3),EPS(3),dEPS(3),dSIG(3):  $t_{\sigma_{ij}}, t_{\epsilon_{ij}}, d\sigma_{ij}, d\epsilon_{ij}$
- Stress(3),Strain(3)  $t+dt_{\sigma_{ij}}, t+dt_{\epsilon_{ij}}$
- E0,MU0,Fc,Ft,SIGMAU,EPSC,EPSU
  - E,  $\mu, f_c, f_t, \sigma_{cr}, \epsilon_c, \epsilon_u$
- N(3,3), T(3,3) 坐标转换矩阵
- D(3,3) 本构矩阵
- SIGP(3), EPSP(3)  $t_{\sigma_i}, t_{\epsilon_i}$  主应力, 主应变

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 程序基本变量表(2)

- dSIGP(3), dEPSP(3)  $d\sigma_i, d\epsilon_i$  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

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 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

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 对ITEM(状态修正变量)的说明

- 在应力空间中加卸载的判断是  $\frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma$
- 从有限元位移法迭代中只能得到  $d\epsilon$
- 只有通过  $d\sigma = D d\epsilon$  得到  $d\sigma$ , 而  $D$  矩阵的取值又依赖于加卸载的判别, 是个相互依赖的问题
- 因此必须迭代计算。先由第  $i-1$  步的  $D$  估算出  $i$  步的  $d\sigma$ , 再由  $d\sigma$  和  $d\epsilon$  得到第  $i$  步的  $D$ , 再重新计算  $d\sigma$
- ITEM 就是实现上述过程的变量

 下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil函数列表(4)

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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

函数列表(5)

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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil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,  $\alpha > 0.2$ , 卸, 卸
- Con\_P1UnLoad02(C) 一条裂缝, 闭合, 处于双压状态,  $\alpha < 0.2$ , 卸, 卸
- Con\_P1UnLoad03(C) 一条裂缝, 闭合, 处于拉压状态,  $\alpha < -0.05$ , 卸, 卸
- Con\_P1UnLoad04(C) 一条裂缝, 闭合, 处于拉压状态,  $\alpha > -0.05$ , 卸, 卸
- Con\_P1UnLoad05(C) 一条裂缝, 闭合, 处于双拉状态, 卸, 卸

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil



## 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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 函数列表(10)

- 两条裂缝都张开，本程序假设在两条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

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 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)
- 问题: hyperelastic针对的是超弹性材料，材料的属性只和当前应力应变状况有关，和应力历史无关，不符合混凝土的特点

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

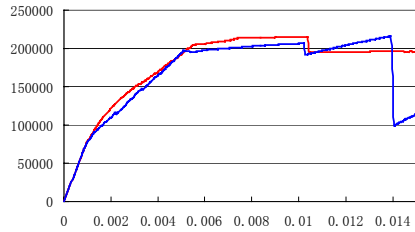
## 与MARC的衔接

- 利用Fortran 90中的模块(module)功能，在内存中申请一个模块，用于存放混凝土材料的应力历史
- 后处理: 裂缝、荷载状态的显示
- 使用MARC的PLOTV子程序

下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 算例1

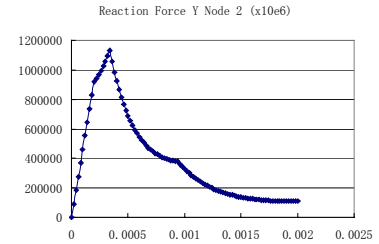
- 单筋界限配筋混凝土悬臂梁
- 比较MARC和RCFER2002的计算结果



下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 算例2

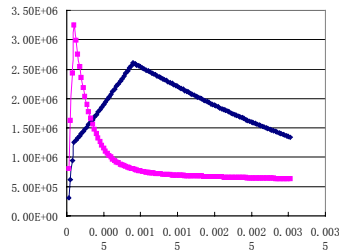
- 4节点等参元纯剪受力



下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 算例3

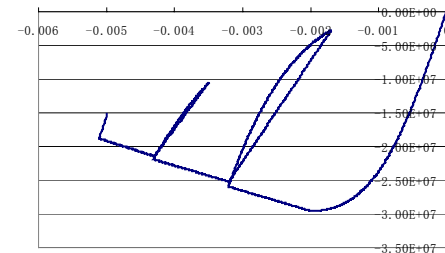
- 拉剪复合受力分析



下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 算例4

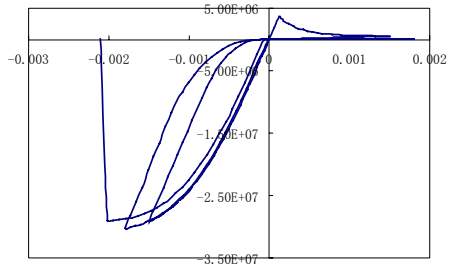
- 单轴受压往复加载



下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 算例5

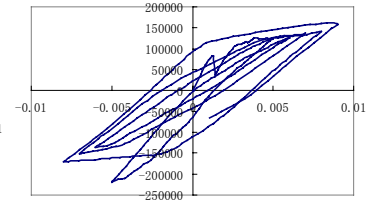
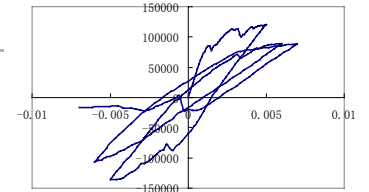
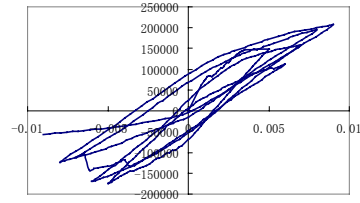
### ■ 单轴往复拉压加载



下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil

## 算例6

### ■ 悬臂梁往复加载



下载地址: <http://luxinzheng.51.net/download.htm> 解压密码: thucivil