

基于 ABAQUS 平台的钢与混凝土 结构纤维模型软件(iFiberLUT) 用户文档

目 录

一、基于 ABAQUS 平台的钢与混凝土结构纤维模型软件(iFiberLUT)介绍	2
二、iFiberLUT 程序使用方法	4
1、材料模型的定义	4
2、纤维模型的定义	4
3、状态变量的输出	4
4、iFiberLUT 的调用	5
三、iFiberLUT 程序材料模型介绍	6
1、iConcrete01	6
2、iConcrete02	9
3、iConcrete03	11
4、iConcrete04	14
5、iConcrete05	16
6、iSteel01	19
7、iSteel02	20
8、iSteel03	21
9、iSteel04	23
10、iSteel05	24
四、参考文献	27

一、基于 ABAQUS 平台的钢与混凝土结构纤维模型软件(iFiberLUT)介绍

基于 ABAQUS 平台的钢与混凝土结构纤维模型软件，简称 iFiberLUT，是基于大型通用有限元软件 ABAQUS 提供的二次开发接口，将纤维模型移植到 ABAQUS 中。可用于钢结构、钢筋混凝土结构以及钢-混凝土组合结构的分析。iFiberLUT 包括纤维模型的前处理程序—ABAQUS 纤维离散生成器以及一系列材料单轴滞回本构模型，ABAQUS 纤维离散生成器界面如图 1.1 所示，所包含了 5 种混凝土模型，5 种钢材(筋)模型，如表 1.1 所示。

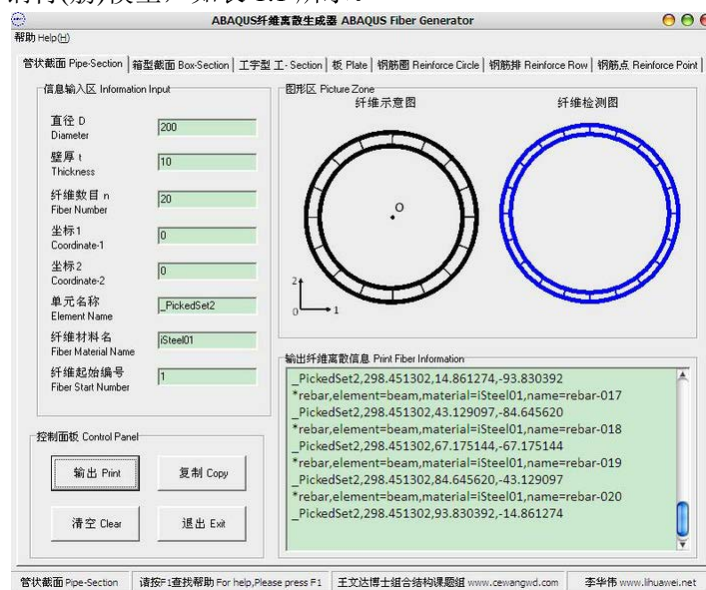


图 1.1 ABAQUS 纤维离散生成器界面

表 1.1 iFiberLUT 程序材料本构模型

材料模型	材料参数	状态变量	模型特征描述
iConcrete01	7	5	圆截面约束混凝土模型
iConcrete02	7	5	方、矩形截面约束混凝土模型
iConcrete03	7	7	混凝土结构设计规范(GB50010-2010)中普通混凝土模型
iConcrete04	4	3	不考虑受拉的普通混凝土模型，OpenSEES 的 Concrete01 模型
iConcrete05	7	6	考虑受拉的普通混凝土模型，OpenSEES 的 Concrete02 模型
iSteel01	3	1	双折线随动强化钢材模型
iSteel02	3	5	双折线最大点指向型钢材模型
iSteel03	6	8	考虑有无屈服平台、拉压不等强，考虑曲线再加载钢材模型
iSteel04	6	8	考虑有无屈服平台、拉压不等强，最大点指向型钢材模型
iSteel05	10	7	可考虑包辛格效应和等向硬化的钢材模型，OpenSEES 的 Steel02

iFiberLUT 软件已获得国家版权局计算机软件著作权登记证书，原登记名为 iFiber，为标识知识产权归属单位，现更名为 iFiberLUT，敬请使用者合理引用，尊重知识产权。



二、iFiberLUT 程序使用方法

1、材料模型的定义

材料模型定义时，材料名称必须以选择的材料模型名称(具体见表 1.1 所列)为前缀。比如在某一个分析模型中，采用 iConcrete01 为混凝土模型，iSteel01 为钢材模型，但在该分析模型中有不同强度的混凝土和钢材时，则需要区分，则可将材料模型分别命名为：iConcrete01-C30、iConcrete01-C40、iSteel01-345、iSteel01-400，只要保证“-”前为所需的材料名字即可！

在 User Material 中设置材料模型的材料参数，具体模型具体设置，各个材料模型的参数含义见第三节详细描述。

材料模型中的 Depvar 的个数必须保证与所选的材料模型的状态变量的个数一致(见表 1.1)。

2、纤维模型的定义

纤维模型定义时，需要在关键字中添加纤维信息。采用 iFiber 的前处理程序--ABAQUS 纤维离散生成器进行离散定义。

对于常见的结构截面，在程序中通过输入纤维的数目、纤维坐标信息以及纤维的材料属性等信息，可以实现钢结构、钢筋混凝土结构、钢-混凝土组合结构常见截面的纤维离散。

通过 CEA 中 Edit Keywords 界面或者.inp 文件，利用关键字*rebar 添加钢纤维，注意，在 Timoshenko 梁单元(B21、B22、B31、B32)中，还需要定义横向剪切刚度*Transverse Shear Stiffness，由于纤维模型不考虑剪切，因此剪切刚度给一个大值即可。ABAQUS 自带的梁单元可以修改积分点数目来控制截面的纤维数目。例如：

```
*Beam Section, elset=fiberset, material=iConcrete01, section=CIRC
88.0
0., 0., -1.                                #定义梁单元方向
9, 20                                       #修改 ABAQUS 自带梁的积分点数目
*Transverse Shear Stiffness                 #横向剪切刚度，给一个大值
1e+10, 1e+10
*rebar, element=beam, material=iSteel01, name=rebar-001 #添加钢纤维
fiberset, 100, -50.000000, 95.000000        #钢纤维的依附体名称，面积，坐标
*rebar, element=beam, material=iSteel01, name=rebar-002
fiberset, 100, 50.000000, 95.000000
.....
```

3、状态变量的输出

iFiberLUT 中状态变量主要作为过渡的存储变量，但是有些变量值具有分析意义，比如 iConcrete03 中的混凝土单轴受拉损伤演化参数和混凝土单轴受压损伤演化参数，通过这两个变量可以分析混凝土的损伤演化情况，因此需要输出状态变量的值。

ABAQUS 中状态变量的输出在 Step 模块中的场变量输出(Field Output)定义中进行设置，在

State/Field/User/Time 的选项卡中勾选 SDV 即可。

4、iFiberLUT 的调用

在 Job 的 General 选项卡中的 User Subroutine File 一栏添加 iFiberLUT 的.obj 文件路径即可。

三、iFiberLUT 程序材料模型介绍

1、iConcrete01

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_c (根据 ACI Committee 318-05(2005)取值: $E_c=4700\sqrt{f'_c}$, 单位 MPa)
PROPS(2)	圆柱体抗压强度 f'_c (实测值)
PROPS(3)	受压峰值点应力 σ_0 (公式计算值)
PROPS(4)	受压峰值点应力对应的应变 ϵ_0 (公式计算值)
PROPS(5)	约束效应系数 ξ (公式计算值)
PROPS(6)	受拉峰值点应力 σ_{t0} (实测值或公式计算值)
PROPS(7)	受拉软化模量绝对值 E_{ts} ($0.1E_c$)

状态变量

SDV(1)	历史最大拉应变
SDV(2)	受拉卸载与再加载刚度
SDV(3)	历史最大压应变
SDV(4)	受压卸载残余应变
SDV(5)	受压卸载与再加载刚度

模型介绍

iConcrete01 模型可用于钢管混凝土结构中圆形截面的约束混凝土模型，该模型通过引入约束效应系数，合理的考虑了钢管对混凝土的约束效应。

1、受压骨架线

受压骨架线采用韩林海(2007)提出的适合圆形截面的钢管混凝土，其中考虑了约束效应，受压骨架线示意图如图 3.1 所示，公式如(1)式所示，式中 f'_c 为圆柱体抗压强度， ξ 为约束效应系数。

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1)$$

$$y = \begin{cases} 1 + q \cdot (x^{0.1\xi} - 1) & (\xi \geq 1.12) \\ \frac{x}{\beta \cdot (x-1)^2 + x} & (\xi < 1.12) \end{cases} \quad (x > 1) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } x &= \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}; \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \\ \sigma_0 &= \left[1 + (-0.054 \cdot \xi^2 + 0.4 \cdot \xi) \cdot \left(\frac{24}{f_c'} \right)^{0.45} \right] \cdot f_c' \\ \varepsilon_0 &= \varepsilon_{cc} + \left[1400 + 800 \cdot \left(\frac{f_c'}{24} - 1 \right) \right] \cdot \xi^{0.2} \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{cc} &= (1300 + 12.5 f_c') \times 10^{-6} \\ q &= \frac{\xi^{0.745}}{2 + \xi} \\ \beta &= (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} \times (f_c')^2 \times 3.51 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

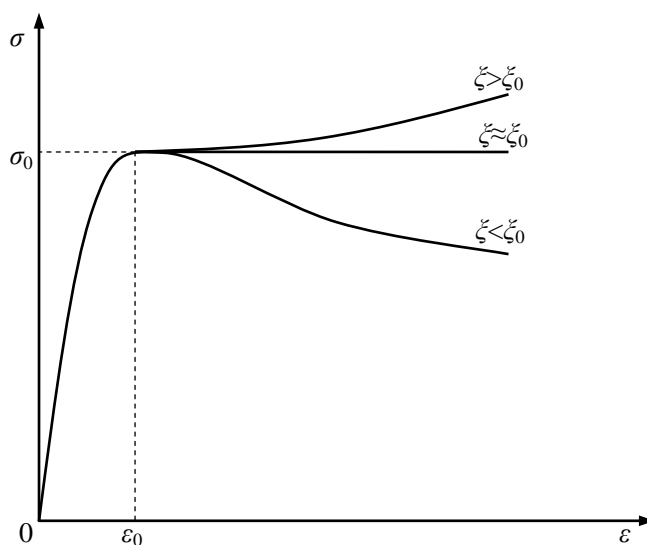


图 3.1 受压骨架线示意图

2、受压加卸载

受压加卸载以 Mander 等(1988)提出的加载和再卸载规则为原型，在不影响计算精度和刚度退化能力的情况下，为了便于编写程序，对 Mander 加卸载准则进行简化，在卸载和再加载部分采用直线，这与《混凝土结构设计规范(GB50010-2010)》中提到的加卸载准则一致。受压卸载的残余变形 ε_z 的计算式为：

$$\begin{cases} \varepsilon_{z,i} = \varepsilon_{cun,i} - \frac{(\varepsilon_{cun,i} + \varepsilon_{ca})\sigma_{cun,i}}{\sigma_{cun,i} + E_{c0}\varepsilon_{ca}} \\ \varepsilon_{ca} = \max\left(\frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_{c0} + \varepsilon_{cun,i}}, \frac{0.09\varepsilon_{cun,i}}{\varepsilon_{c0}}\right) \sqrt{\varepsilon_{c0}\varepsilon_{cun,i}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： E_{c0} 为混凝土初始弹性模量； ε_{c0} 为混凝土峰值应力对应的应变； $\sigma_{cun,i}$ 、 $\varepsilon_{cun,i}$ 分别为第 i 次卸载处的应力和应变； ε_{ca} 为计算过渡量。受压卸载至残余应变后，应力值保持为 0，直至进入受拉区。再加载时则按照卸载路径进行再加载，直至回到受压骨架线。受压加卸载示意图如图 3.2 所示。

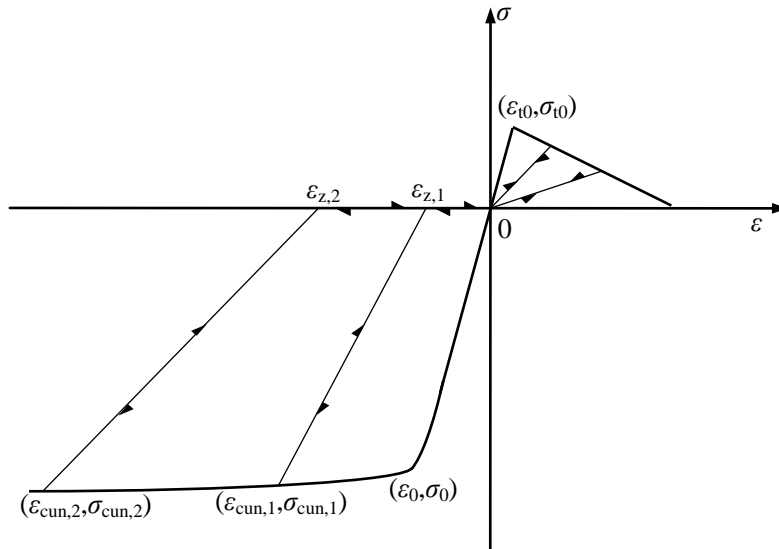


图 3.2 受拉受压加卸载示意图

3、受拉骨架线

受拉骨架线采用双折线模型，如图 3.3 所示，受拉开裂应力采用沈聚敏等(1993)提出的计算式：

$$\sigma_{t0} = 0.26 \cdot (1.25 f_c')^{2/3} \quad (3)$$

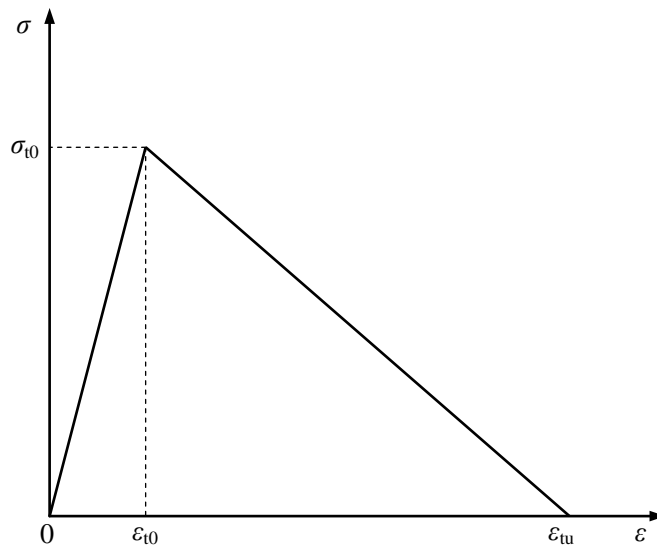


图 3.3 受拉骨架线示意图

4、受拉加卸载

受拉卸载准则采用原点指向型，再加载是按照卸载路径回到受拉骨架曲线。受拉加卸载示意图如图 3.2 所示。

2、iConcrete02

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_c (根据 ACI Committee318-05(2005)取值: $E_c=4700\sqrt{f_c'}$, 单位 MPa)
PROPS(2)	圆柱体抗压强度 f_c' (实测值)
PROPS(3)	受压峰值点应力 σ_0 (公式计算值)
PROPS(4)	受压峰值点应力对应的应变 ϵ_0 (公式计算值)
PROPS(5)	约束效应系数 ζ (公式计算值)
PROPS(6)	受拉峰值点应力 σ_{t0} (实测值或公式计算值)
PROPS(7)	受拉软化模量绝对值 E_{ts} ($0.1E_c$)

状态变量

SDV(1)	历史最大拉应变
SDV(2)	受拉卸载与再加载刚度
SDV(3)	历史最大压应变
SDV(4)	受压卸载残余应变
SDV(5)	受压卸载与再加载刚度

模型介绍

iConcrete02 模型可用于钢管混凝土结构中方、矩形截面的约束混凝土模型, 该模型通过引入约束效应系数, 合理的考虑了钢管对混凝土的约束效应。

1、受压骨架线

受压骨架线采用韩林海(2007)提出的适合方、矩形截面的钢管混凝土, 其中考虑了约束效应, 受压骨架线与 iConcrete01 模型相似, 示意图如图 3.1 所示, 公式如(4)式所示, 式中 f_c' 为圆柱体抗压强度, ζ 为约束效应系数。

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta \cdot (x-1)^n + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{式中: } x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}; \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \\
 & \sigma_0 = \left[1 + (-0.0135 \cdot \xi^2 + 0.1 \cdot \xi) \cdot \left(\frac{24}{f_c'} \right)^{0.45} \right] \cdot f_c' \\
 & \varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + \left[1330 + 760 \cdot \left(\frac{f_c'}{24} - 1 \right) \right] \cdot \xi^{0.2} \times 10^{-6} \\
 & \varepsilon_{cc} = (1300 + 12.5 f_c') \times 10^{-6} \\
 & \eta = 1.6 + 1.5/x \\
 & \beta = \begin{cases} \frac{(f_c')}{1.35\sqrt{1+\xi}} & (\xi \leq 3.0) \\ \frac{(f_c')}{1.35\sqrt{1+\xi} \cdot (\xi-2)^2} & (\xi > 3.0) \end{cases}
 \end{aligned}$$

2、受压加卸载

受压加卸载与 iConcrete01 相同，示意图如图 3.2 所示。

3、受拉骨架线

受拉骨架线与 iConcrete01 相同，示意图如图 3.3 所示。

4、受拉加卸载

受拉加卸载与 iConcrete01 相同，示意图如图 3.2 所示。

3、iConcrete03

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_c (实测值)
PROPS(2)	受压峰值点应力 $f_{c,r}$ (实测值)
PROPS(3)	受压峰值点应力对应的应变 $\varepsilon_{c,r}$ (根据受压峰值应力对应查表 1)
PROPS(4)	受压应力-应变曲线下降段参数值 α_c (根据受压峰值应力对应查表 1)
PROPS(5)	受拉峰值点应力 $f_{t,r}$ (实测值)
PROPS(6)	受拉峰值点应力对应的应变 $\varepsilon_{t,r}$ (根据受拉峰值应力对应查表 2)
PROPS(7)	受拉应力-应变曲线下降段参数值 α_t (根据峰受拉值应力对应查表 2)

状态变量

SDV(1)	历史最大拉应变
SDV(2)	受拉卸载与再加载刚度
SDV(3)	历史最大压应变
SDV(4)	受压卸载残余应变
SDV(5)	受压卸载与再加载刚度
SDV(6)	混凝土单轴受拉损伤演化参数
SDV(7)	混凝土单轴受压损伤演化参数

模型介绍

iConcrete03 模型可用于普通混凝土模型，采用《混凝土结构设计规范(GB50010-2010)》中混凝土本构模型。

1、受压骨架线

受压骨架线计算公式如式(5)所示，示意图如图 3.4 所示。

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (5)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases}$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}}$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}$$

式中： α_c —混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值，按表 3.1 取用；

$f_{c,r}$ —混凝土单轴抗压强度代表值，其值可根据实际结构分析的需要分别取 f_c 、 f_{ck} 或 f_{cm} ；

$\varepsilon_{c,r}$ —与单轴抗压强度 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变；

d_c —混凝土单轴受压损伤演化参数。

表 3.1 混凝土单轴受压应力-应变曲线的参数取值

$f_{c,r}(N/mm^2)$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
$\varepsilon_{c,r}(10^{-6})$	1470	1560	1640	1720	1790	1850	1920	1980	2030	2080	2130	2190	2240
α_c	0.74	1.06	1.36	1.65	1.94	2.21	2.48	2.74	3.00	3.25	3.50	3.75	3.99

2、受压加卸载

受压卸载的残余变形 ε_z 的计算公式如(2)式所示，示意图如图 3.4 所示。iConcrete03 的受压加卸载与 iConcrete01 的不同之处：iConcrete03 卸载至受压残余应变点时，会直接进入受拉区，不再沿应变轴卸载直至 0。

3、受拉骨架线

受拉骨架线计算公式如式(6)所示，示意图如图 3.4 所示。

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad (6)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2x^5) & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases}$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}$$

式中： α_t —混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值，按表 3.2 取用；

$f_{t,r}$ —混凝土单轴抗拉强度代表值，其值可根据实际结构分析的需要分别取 f_t 、 f_{tk} 或 f_{tm} ；

$\varepsilon_{t,r}$ —与单轴抗压强度 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值压应变；

d_t —混凝土单轴受拉损伤演化参数。

表 3.2 混凝土单轴受拉应力-应变曲线的参数取值

$f_{t,r}(N/mm^2)$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_{t,r}(10^{-6})$	65	81	95	107	118	128	137
α_t	0.31	0.70	1.25	1.95	2.81	3.82	5.00

4、受拉加卸载

受拉卸载指向原点，或者上次受压卸载的受压残余应变点；再加载时则从受压残余应变点开始，按上次受拉卸载刚度进行再加载，直至到达前一次卸载的应力值，之后按受拉骨架线加载。示意图如图 3.4 所示。关于该受拉加卸载模型具体可见 iConcrete05 受拉模型描述。

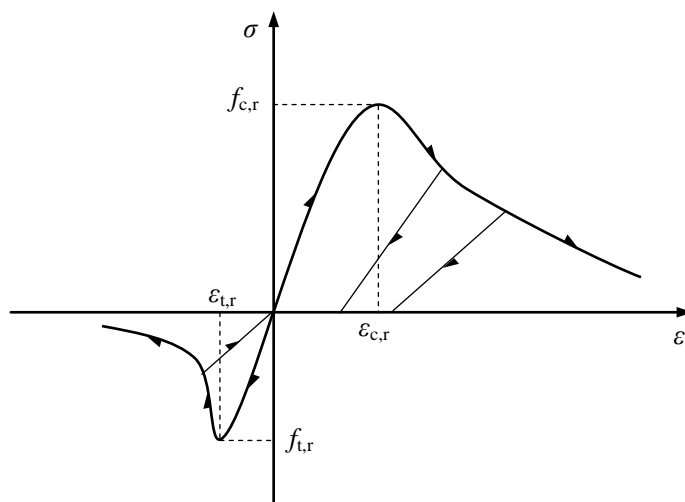


图 3.4 iConcrete03 模型示意图

4、iConcrete04

材料参数

PROPS(1)	受压峰值点应力 σ_0 (实测值)
PROPS(2)	受压峰值点应力对应的应变 ε_0 (实测值或公式计算值)
PROPS(3)	受压极限应力 σ_u (实测值或受压下降段斜率确定或 $0.2\sigma_0$)
PROPS(4)	受压极限应力对应的应变 ε_u (实测值或受压下降段斜率确定或公式计算值)

状态变量

SDV(1)	历史最大压应变
SDV(2)	受压卸载残余应变
SDV(3)	受压卸载与再加载刚度

模型描述

iConcrete04 模型可用于普通混凝土模型，该模型不考虑混凝土受拉，通过提高应力峰值以及其对应的应变，可以考虑箍筋对混凝土的约束效应。

1、受压骨架线

受压骨架线采用由 Scott(1982)修正的 Kent-Park 模型(1971)，公式如(7)式所示，示意图如图 3.5 所示。

$$\sigma = \begin{cases} Kf'_c \left[2\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 \right] & (\varepsilon \leq \varepsilon_0) \\ Kf'_c [1 - Z(\varepsilon - \varepsilon_0)] & (\varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_u) \\ 0.2Kf'_c & (\varepsilon > \varepsilon_u) \end{cases} \quad (7)$$

式中：

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= Kf'_c \\ \varepsilon_0 &= 0.002K \\ K &= 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \\ Z &= \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002K} \\ \varepsilon_u &= 0.004 + 0.9\rho_s \left(\frac{f_{yh}}{300}\right) \quad \text{or} \quad \varepsilon_u = \varepsilon_0 + \frac{0.8}{Z} \end{aligned}$$

式中： K ：约束增强系数； Z ：软化斜率系数； f'_c ：圆柱体轴心抗压强度； f_{yh} ：箍筋屈服强度； ρ_s ：体积配箍率； h' ：箍筋肢距； s_h ：箍筋间距。

2、受压加卸载

受压加卸载采用由 Karsan 和 Jirsa (1969)根据 Sinha (1964)钢筋混凝土材料的滞回性能试验数据提出的加卸载准则，该准则按照直线卸载至残余应变点，之后保持应力为 0，沿应变轴继续卸载；

再加载时则按照卸载路径返回受压骨架线。公式如(8)式所示，示意图如图 3.6 所示。

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} &= 0.145 \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \right)^2 + 0.13 \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \right) & \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \right) < 2 \\ \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} &= 0.707 \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} - 2 \right) + 0.834 & \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \right) \geq 2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中： ε_p ：卸载残余应变； ε_r ：卸载点应变

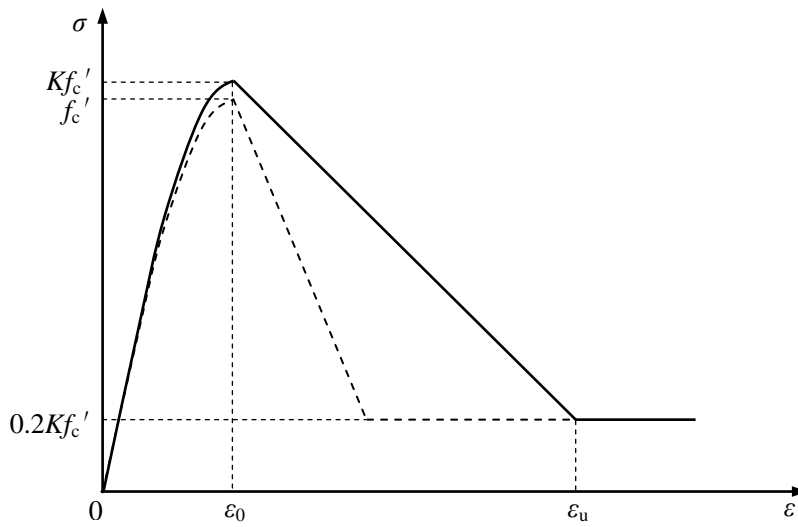


图 3.5 iConcrete04 受压骨架线示意图

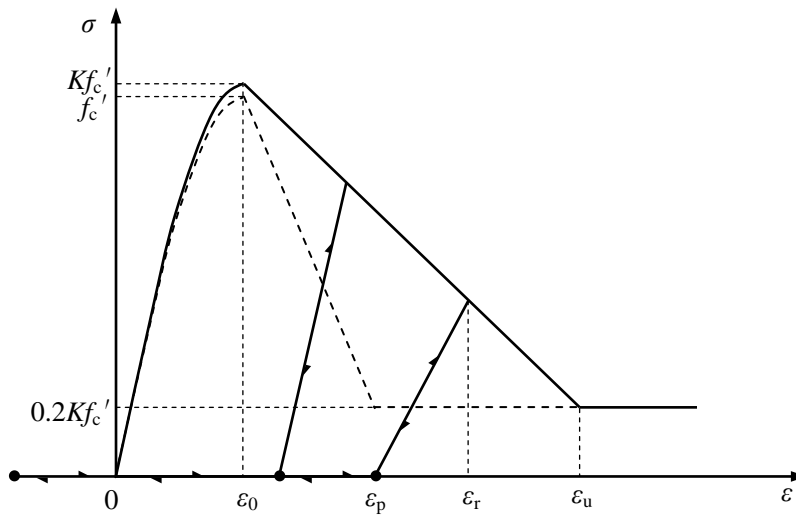


图 3.6 iConcrete04 受压加卸载示意图

5、iConcrete05

材料参数

PROPS(1)	受压峰值点应力 σ_0 (实测值)
PROPS(2)	受压峰值点应力对应的应变 ε_0 (实测值或公式计算值)
PROPS(3)	受压极限应力 σ_u (实测值或受压下降段斜率确定或 $0.2\sigma_0$)
PROPS(4)	受压极限应力对应的应变 ε_u (实测值或受压下降段斜率确定或公式计算值)
PROPS(5)	受压极限压应变起点再加载刚度 E_{20} 与初始弹性模量 E_c 比值 λ (实测值或 0.2)
PROPS(6)	受拉峰值点应力 σ_{t0} (实测值)
PROPS(7)	受拉软化模量绝对值 E_{ts} ($0.1E_c$)

状态变量

SDV(1)	历史最大压应变
SDV(2)	历史最大压应力
SDV(3)	受压卸载残余应变
SDV(4)	受压卸载与再加载刚度
SDV(5)	历史最大拉应变
SDV(6)	受拉卸载与再加载刚度

模型描述

iConcrete05 模型可用于普通混凝土模型，该模型考虑混凝土双折线受拉，通过提高应力峰值以及其对应的应变，可以考虑箍筋对混凝土的约束效应。

1、受压骨架线

受压骨架线与 iConcrete04 相同，采用由 Scott (1982)修正的 Kent-Park 模型(1971)，公式如(7)式所示，示意图如图 3.5 所示。

2、受压加卸载

受压加卸载采用 Yassin (1994)提出的加卸载准则，公式如(9)式所示，示意图如图 3.7 所示。

该加卸载规则规定，所有卸载点的再加载路径都相交于 R 点(ε_r, σ_r)。 R 点根据原点的切线刚度 E_c 和极限应力起点(B 点)的再加载刚度 E_{20} 确定。 R 点确定之后，由受压卸载点和 R 点连线可确定受压残余应变点，该连线的刚度为再加载刚度 E_r 。

受压卸载时，先按照初始卸载刚度 E_c 进行卸载(直线 DE 所示)，直至与经过残余应变点且再卸载刚度为 $0.5E_r$ 的卸载路径相交时(点 E 所示)，转为再卸载刚度 $0.5E_r$ 卸载路径(直线 EH 所示)。

受压再加载时，按照再加载刚度 E_r 进行再加载(直线 HD 所示)；如果在卸载过程中出现再加载，则先按照原点切线刚度 E_c 进行再加载(直线 FG 所示)，直至与再加载刚度 E_r 所在路径相交(点 G 所示)，转为再加载刚度 E_r 路径进行再加载(直线 GD 所示)。

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{0.2Kf'_c - E_{20}\varepsilon_{20}}{E_c - E_{20}} \\ \sigma_r &= E_c \varepsilon_r \\ E_c &= \frac{2Kf'_c}{\varepsilon_0} \end{aligned} \quad (9)$$

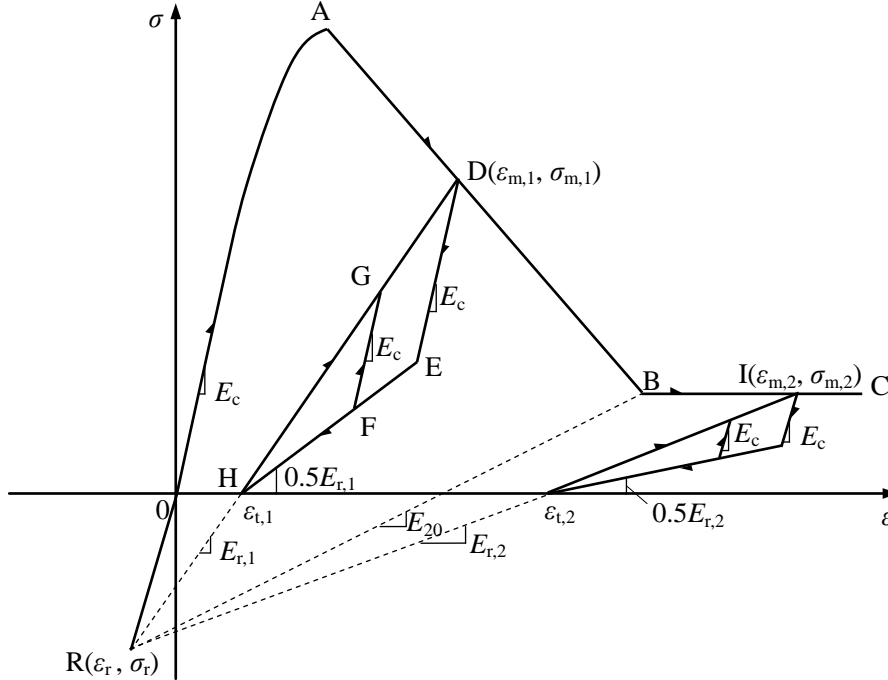


图 3.7 iConcrete05 受压加卸载示意图

3、受拉骨架线

受拉骨架线采用双折线模型，受拉峰值点可根据试验实测得出，也可根据公式(3)计算。

4、受拉加卸载

受拉加卸载采用 Yassin (1994)提出的加卸载准则，公式如(10)式所示，示意图如图 3.8 所示。

受拉卸载时指向原点，或者上一次受压残余应变点(图中 J、J' 点所示)。

受拉再加载时，按前一次受拉卸载的刚度进行再加载，直至到达前一次卸载的应力值，之后按受拉骨架线加载。

当受拉应力降为 0 以后(图中 M、M' 点所示)，混凝土的受拉能力则一直为 0。

$$\begin{aligned} \varepsilon_n &= \varepsilon_t + \Delta\varepsilon_t \\ \sigma_n &= \sigma_{t0} \left(1 + \frac{E_{ts}}{E_c} \right) - E_{ts} \Delta\varepsilon_t \\ \varepsilon_u &= \varepsilon_t + \sigma_{t0} \left(\frac{1}{E_{ts}} + \frac{1}{E_c} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

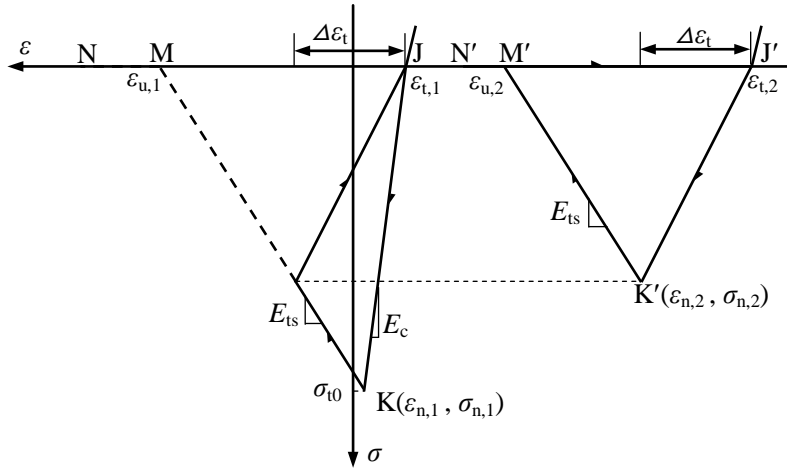


图 3.8 iConcrete05 受拉加卸载示意图

6、iSteel01

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_s (实测值)
PROPS(2)	屈服强度 f_y (实测值)
PROPS(3)	塑性段刚度系数 α (实测值或钢材 0.01、钢筋 0.005)

状态变量

SDV(1)	弹塑性标志(0: 弹性段, 1: 塑性段)
--------	-----------------------

模型描述

iSteel01 模型为双折线随动强化模型，如图 3.9 所示。

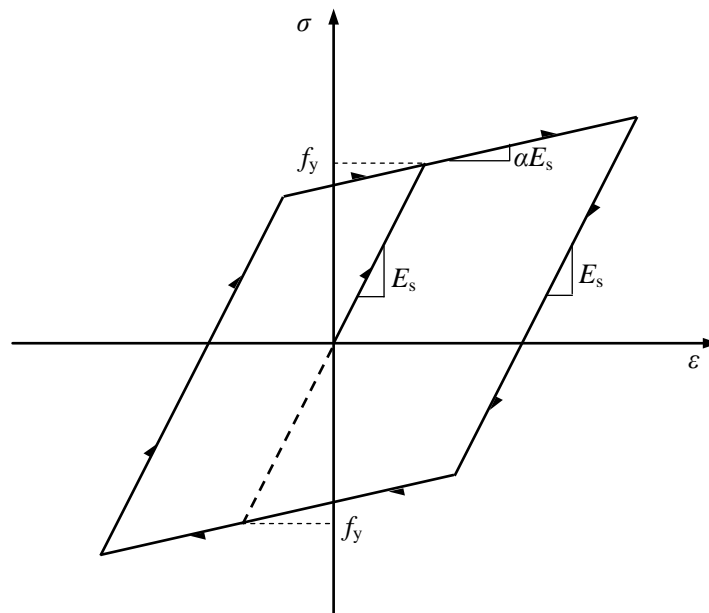


图 3.9 iSteel01 本构模型示意图

7、iSteel02

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_s (实测值)
PROPS(2)	屈服强度 f_y (实测值)
PROPS(3)	塑性段刚度系数 α (实测值或钢材 0.01、钢筋 0.005)

状态变量

SDV(1)	历史最大拉应变
SDV(2)	历史最大压应变
SDV(3)	受压再加载路径的起点变形
SDV(4)	受拉再加载路径的起点变形
SDV(5)	弹塑性标志(0: 弹性段, 1: 塑性段)

模型描述

iSteel02 模型为钢材最大点指向型双折线强化模型, 该模型是以 Clough (1966) 提出的最大点指向型恢复力模型为原型, 卸载时按照弹性模量卸载至应力为 0 处, 再加载则指向历史最大应变点, 如图 3.10 所示。该模型可以较好的反映滞回曲线的捏缩效应。

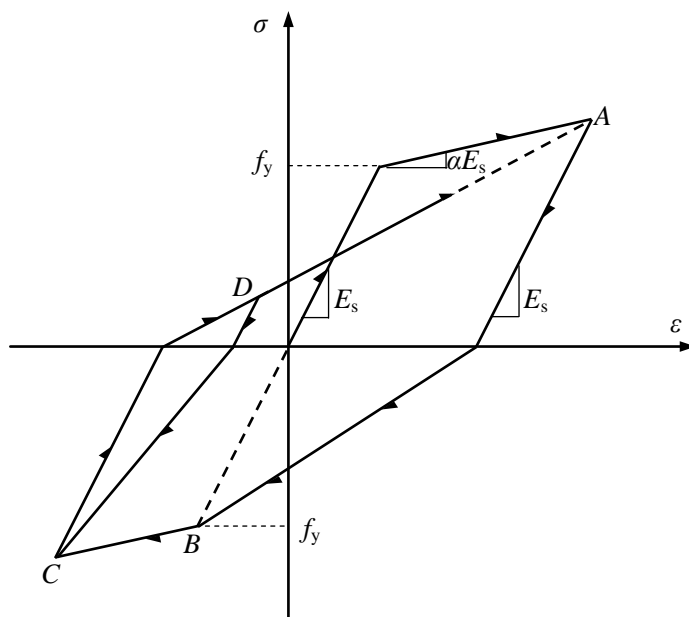


图 3.10 iSteel02 本构模型示意图

8、iSteel03

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_s (实测值)
PROPS(2)	抗拉屈服强度 f_y (实测值)
PROPS(3)	强化段起点应变与屈服应变的比值 k_1 (实测值或钢材 10、钢筋 4；取 1 时可不考虑屈服平台)
PROPS(4)	峰值应力对应的应变与屈服应变比值 k_2 (实测值或钢材 100、钢筋 25)
PROPS(5)	峰值应力与屈服强度比值 k_3 (实测值或钢材 1.6、钢筋 1.3)
PROPS(6)	抗拉屈服强度与抗压屈服强度比值 k_4 (根据具体拉压屈服强度设定)

状态变量

SDV(1)	历史最大拉应变
SDV(2)	历史最大拉应力
SDV(3)	历史最大压应变
SDV(4)	历史最大压应力
SDV(5)	受压再加载路径的起点变形
SDV(6)	受拉再加载路径的起点变形
SDV(7)	弹塑性标志(0: 弹性段, 1: 塑性段)
SDV(8)	拉压的应力下降为 0 标志(0: 应力未降至 0, 1: 应力降至 0)

模型描述

iSteel03 模型采用汪训流等(2007)提出了一种钢筋的本构模型，该模型结合了 Esmacily 和 Xiao(2005)骨架线模型与 Légeron 等(2005)提出的加卸载滞回模型，可用来模拟有无屈服平台以及拉压不等强的钢筋或钢材模型。

骨架线引入参数 k_1 、 k_2 、 k_3 控制加载骨架线的形状，通过引入参数 k_4 ，可用于模拟拉压不等强的高强钢丝或钢绞线。以受拉段为例如图 3.11 所示，骨架线表达式为：

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ f_y & (\varepsilon_y < \varepsilon \leq k_1 \varepsilon_y) \\ k_3 f_y + \frac{E_s(1-k_3)}{\varepsilon_y(k_2-k_1)^2} (\varepsilon - k_2 \varepsilon_y)^2 & (\varepsilon > k_1 \varepsilon_y) \end{cases} \quad (11)$$

式中： E_s 为钢材的弹性模量； f_y 和 ε_y 分别为钢材的屈服强度和屈服应变； k_1 为钢材的强化段起点应变与屈服应变的比值， k_2 为钢材峰值应变与屈服应变比值， k_3 为钢材峰值应力与屈服强度比值， k_4 为抗拉屈服强度与抗压屈服强度比值。 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 可根据具体的钢材材性试验结果取值，当 k_1 取为 1 时，可用来模拟无屈服平台的钢材或钢筋。

加卸载模型如图 3.12 所示，卸载时按钢材弹性模量直线卸载，在再加载路径上合理考虑钢材的包辛格效应，采用曲线的再加载方式，再加载路径曲线表达式为：

$$\sigma = [E_s(\varepsilon - \varepsilon_{a,i}) + \sigma_{a,i}] - [E_s(\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i}) - (\sigma_{b,i} - \sigma_{a,i})] \left[\frac{\varepsilon - \varepsilon_{a,i}}{\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i}} \right]^p \quad (12)$$

$$p = \frac{(E_s - E_h)(\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i})}{E_s(\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i}) - (\sigma_{b,i} - \sigma_{a,i})}$$

式中： E_s 为钢材弹性模量， E_h 为等效强化直线的斜率； $\sigma_{\text{sun},i}$ 、 $\varepsilon_{\text{sun},i}$ 分别为第 i 次卸载处的应力和应变； $\sigma_{a,i}$ 、 $\varepsilon_{a,i}$ 为第 i 次反向加载点处的应力和应变。

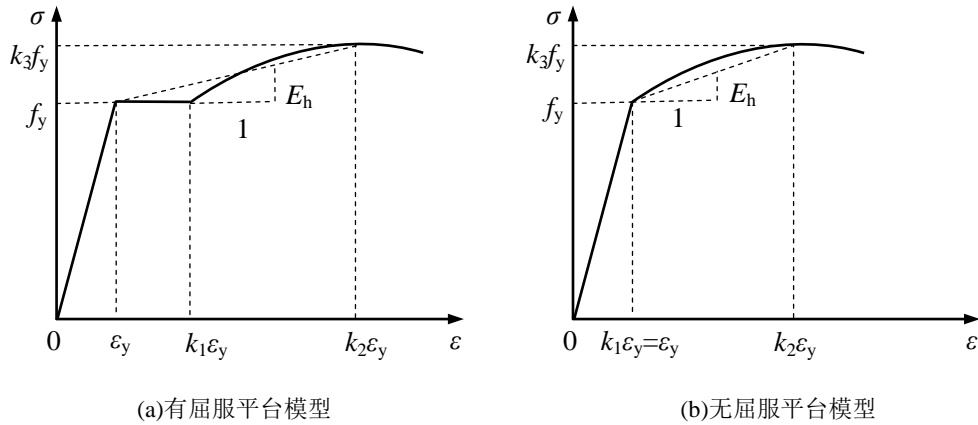


图 3.11 iSteel03 骨架线示意图

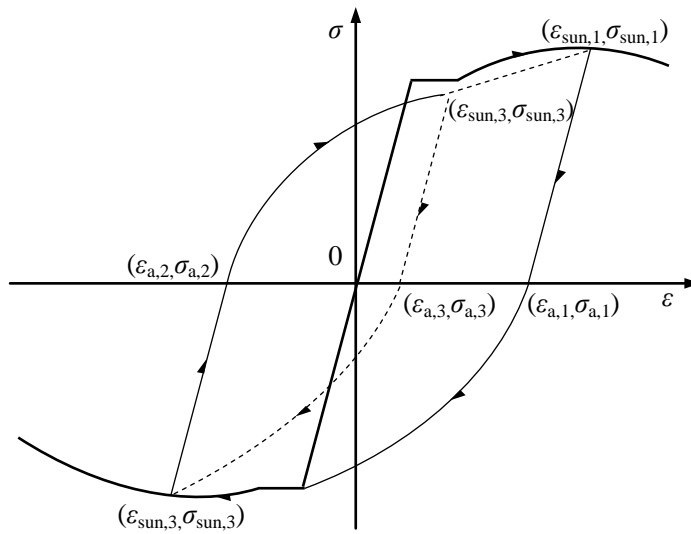


图 3.12 iSteel03 本构模型示意图

9、iSteel04

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_s (实测值)
PROPS(2)	抗拉屈服强度 f_y (实测值)
PROPS(3)	强化段起点应变与屈服应变的比值 k_1 (实测值或钢材 10、钢筋 4；取 1 时可不考虑屈服平台)
PROPS(4)	峰值应力对应的应变与屈服应变比值 k_2 (实测值或钢材 100、钢筋 25)
PROPS(5)	峰值应力与屈服强度比值 k_3 (实测值或钢材 1.6、钢筋 1.3)
PROPS(6)	抗拉屈服强度与抗压屈服强度比值 k_4 (根据具体拉压屈服强度设定)

状态变量

SDV(1)	历史最大拉应变
SDV(2)	历史最大拉应力
SDV(3)	历史最大压应变
SDV(4)	历史最大压应力
SDV(5)	受压再加载路径的起点变形
SDV(6)	受拉再加载路径的起点变形
SDV(7)	弹塑性标志(0: 弹性段, 1: 塑性段)
SDV(8)	拉压的应力下降为 0 标志(0: 应力未降至 0, 1: 应力降至 0)

模型描述

iSteel04 模型集合了 iSteel03 的骨架线和 iSteel02 的加卸载准则。骨架线采用 Esmacily 和 Xiao(2005)骨架线模型，加卸载滞回模型则采用 Clough (1966)提出的最大点指向型模型。该模型通过调整材料模型参数，可使骨架线与钢材试验测试曲线相近，而且加卸载可较好的反映滞回曲线的捏缩效应。本构模型示意图如图 3.13 所示。

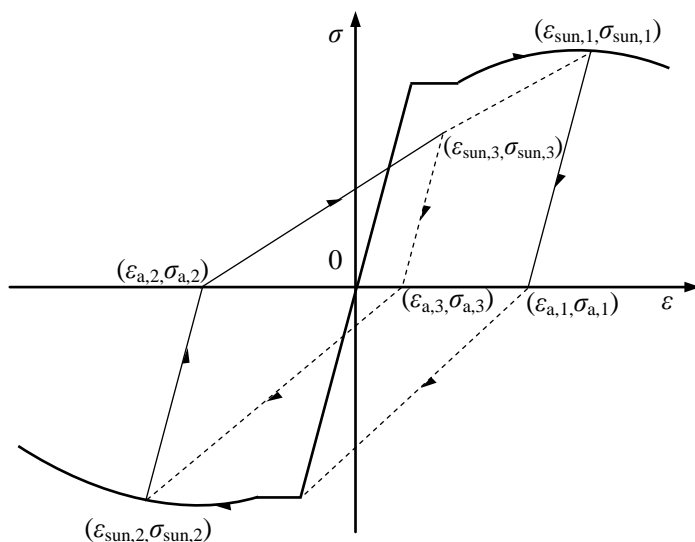


图 3.13 iSteel04 本构模型示意图

10、iSteel05

材料参数

PROPS(1)	弹性模量 E_s (实测值)
PROPS(2)	抗拉屈服强度 f_y (实测值)
PROPS(3)	塑性段刚度系数 α (实测值或钢材 0.01、钢筋 0.005)
PROPS(4)	弹性段和塑性段之间的过渡曲率参数 R_0 (10~20 之间)
PROPS(5)	往复加载时卸载段和再加载段之间的过渡曲率退化系数 R_1 (18.5)
PROPS(6)	往复加载时卸载段和再加载段之间的过渡曲率退化系数 R_2 (0.0015 或 0.15)
PROPS(7)	受压等向硬化参数 a_1 (实测值或 $a_2 f_y / E_s$, 当不考虑等向硬化时取 0)
PROPS(8)	受压等向硬化参数 a_2 (实测值或 2, 注意该值不能取 0)
PROPS(9)	受拉等向硬化参数 a_3 (实测值或 $a_4 f_y / E_s$, 当不考虑等向硬化时取 0)
PROPS(10)	受拉等向硬化参数 a_4 (实测值或 2, 注意该值不能取 0)

状态变量

SDV(1)	历史最大拉应变
SDV(2)	历史最大压应变
SDV(3)	受拉卸载点应变
SDV(4)	受拉卸载点应力
SDV(5)	受压卸载点应变
SDV(6)	受压卸载点应力
SDV(7)	拉压加载标志(1: 受拉加载, -1: 受压加载)

模型描述

iSteel05 模型采用 Menegotto 和 Pinto (1973)提出的本构模型,该模型经过 Filippou 等(1983)修正,可分别考虑受拉和受压各向同性硬化影响。计算公式如式(13)所示,本构模型示意图如图 3.14 所示。

骨架线是以双折线为原型,在弹性段和塑性段之间采用圆弧过渡,骨架线只是在第一次加载时使用,当出现卸载后,再加载时是根据过渡曲线路径确定。

卸载与再加载路径为两条渐进线间的过渡曲线,这两条渐进线分别是过卸载点且按弹性模量为斜率的直线(直线 AB 所示)和塑性段延伸出来的直线(直线 BC 所示),这样的过渡曲线可考虑包辛格效应,调整参数 R 的大小可以控制包辛格效应的大小,当 R 越大时,过渡曲线的转动半径越小;调整两条渐近线交点的位置可考虑各向同性硬化效应,当不考虑各向同性硬化时,通过设置参数 $a_1=a_3=0$ 即可。

Menegotto 和 Pinto (1973)通过试验建议: $R_0=20$; $R_1=18.5$; $R_2=0.15$ (或 0.0015)。图 3.15 为在往复荷载作用下, $R_0=20$, $R_1=18.5$, R_2 为分别取为 0.15 和 0.0015 的 iSteel05 钢材模型的应力应变图。从图中可看出: R_2 越大,曲线的过渡段越缓。

$$\begin{aligned}\sigma^* &= b\varepsilon^* + \frac{(1-b)\varepsilon^*}{(1+\varepsilon^{*R})^{1/R}} \\ \varepsilon^* &= \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \\ \sigma^* &= \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} \\ R &= R_0 - \frac{R_1\xi}{R_2 + \xi} \\ \xi &= \left| \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_0}{\varepsilon_y} \right|\end{aligned}\quad (13)$$

其中对于应变增量为负值时：

$$\begin{aligned}\Delta^N &= 1 + a_1 \left(\frac{\varepsilon^{\max} - \varepsilon^{\min}}{2a_2\varepsilon_y} \right)^{0.8} \\ \varepsilon_0 &= \frac{-\sigma_y\Delta^N + \alpha E_s \varepsilon_y \Delta^N - \sigma_r + E_s \varepsilon_r}{E_s - \alpha E_s} \\ \sigma_0 &= -\sigma_y\Delta^N + \alpha E_s (\varepsilon_0 + \varepsilon_y \Delta^N)\end{aligned}$$

对于应变增量为正值时：

$$\begin{aligned}\Delta^P &= 1 + a_3 \left(\frac{\varepsilon^{\max} - \varepsilon^{\min}}{2a_4\varepsilon_y} \right)^{0.8} \\ \varepsilon_0 &= \frac{\sigma_y\Delta^P - \alpha E_s \varepsilon_y \Delta^P - \sigma_r + E_s \varepsilon_r}{E_s - \alpha E_s} \\ \sigma_0 &= \sigma_y\Delta^P + \alpha E_s (\varepsilon_0 - \varepsilon_y \Delta^P)\end{aligned}$$

σ_0 、 ε_0 分别是两条渐近线交点（B 或 D）处的应力和应变；

σ_r 、 ε_r 分别是应变反转点（A 或 C）处的应力和应变；

R 是曲线过渡参数； R_0 是弹性段和塑性段之间的初始过渡参数；

ε_y 为屈服应变；

ε_m 为历史最大或最小的卸载应变。

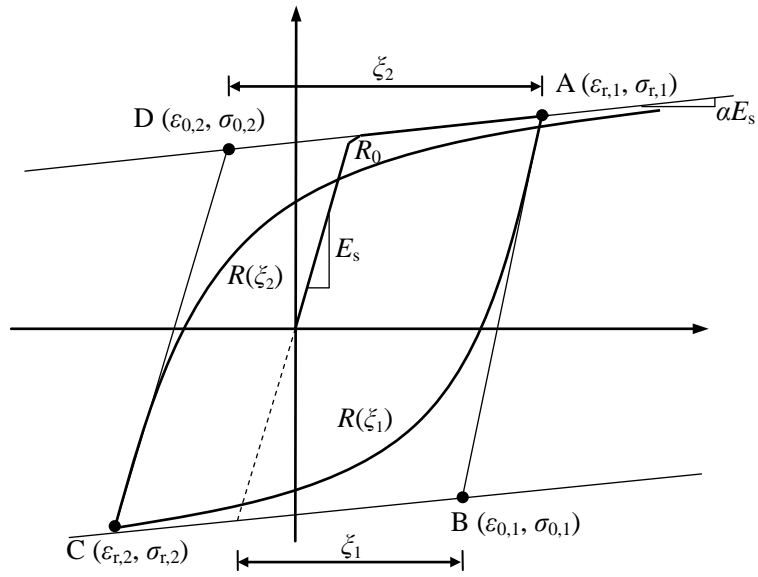


图 3.14 iSteel05 本构模型示意图

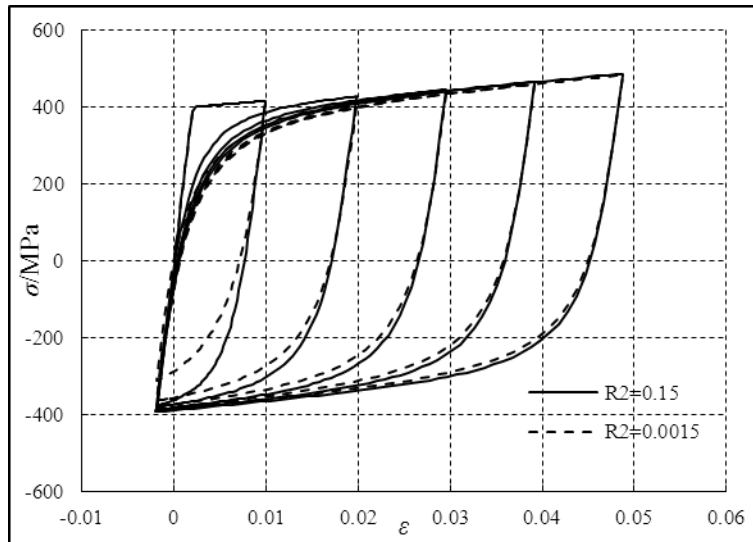


图 3.15 iSteel05 模型 R_2 影响对比图

四、参考文献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [3] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 76-81.
- [4] 中华人民共和国标准 GB50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] Clough R W, Johnston S B. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements [C]//Proceedings of Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Japan, 1966.
- [6] Esmaeily A, Xiao Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads: analysis [J].ACI Structure Journal, 2005, 102(5): 736-744.
- [7] Filippou F C, Popov E P, and Bertero V V. Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints [R]. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, USA, 1983.
- [8] Karsan I D, Jirsa J O. Behavior of concrete under compressive loadings [J]. Journal of the Structural, ASCE, Division, 1969, 95(12):2543-2563.
- [9] Kent D C, Park R. Flexural Members with Confined Concrete [J].Journal of the structure Structural Division, ASCE, 1971, 97(ST7): 1969-1990.
- [10] Légeron F, Paultre P, Mazar J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131(6): 946-954.
- [11] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [12] Menegotto M, Pinto P E. Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]//Proceeding, Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, 1973: 15-22.
- [13] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates [J].ACI Structure Journal, 1982, 79(1): 13-27.
- [14] Sinha B P, K H Gerstle, Tulin L G. Stress-strain relations for concrete under cyclic loading [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1964, 61(2):195-211.
- [15] Yassin M H M. Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads [D], University of California. Berkeley, California, USA, 1994.