

2011年6月9日

(独立行政法人)建筑研究所
中国抗震结构培训

钢筋混凝土结构框架的非线性解析

对发生弯曲异常的RC框架的解析

剪切破坏、粘结劈裂破坏、锚固破坏等
脆性破坏在设计阶段被排除

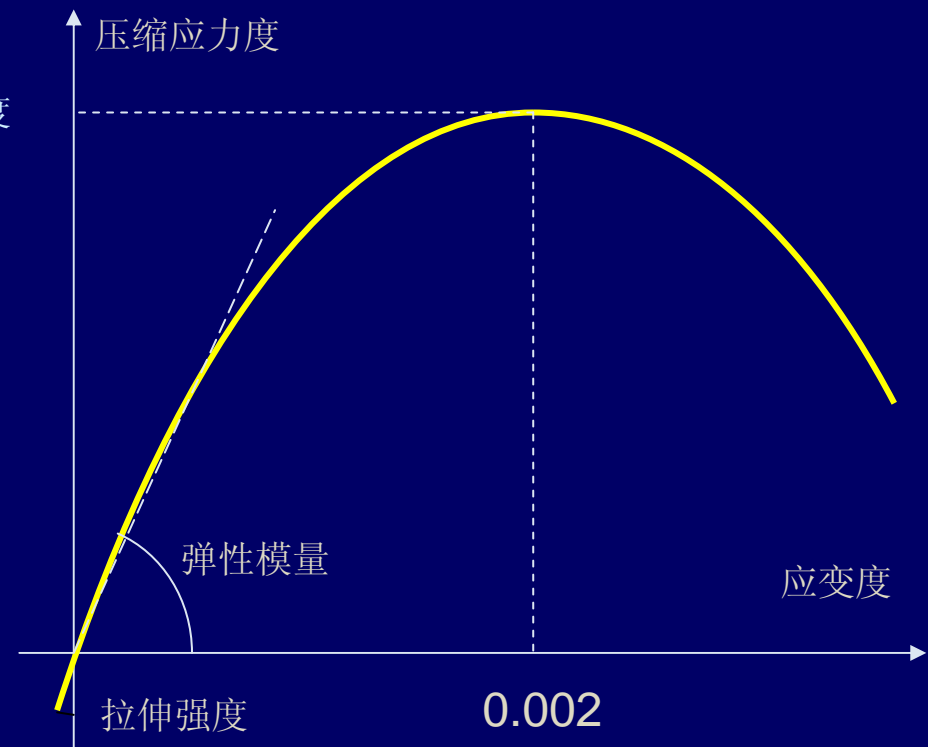
东京大学名誉教授
小谷俊介

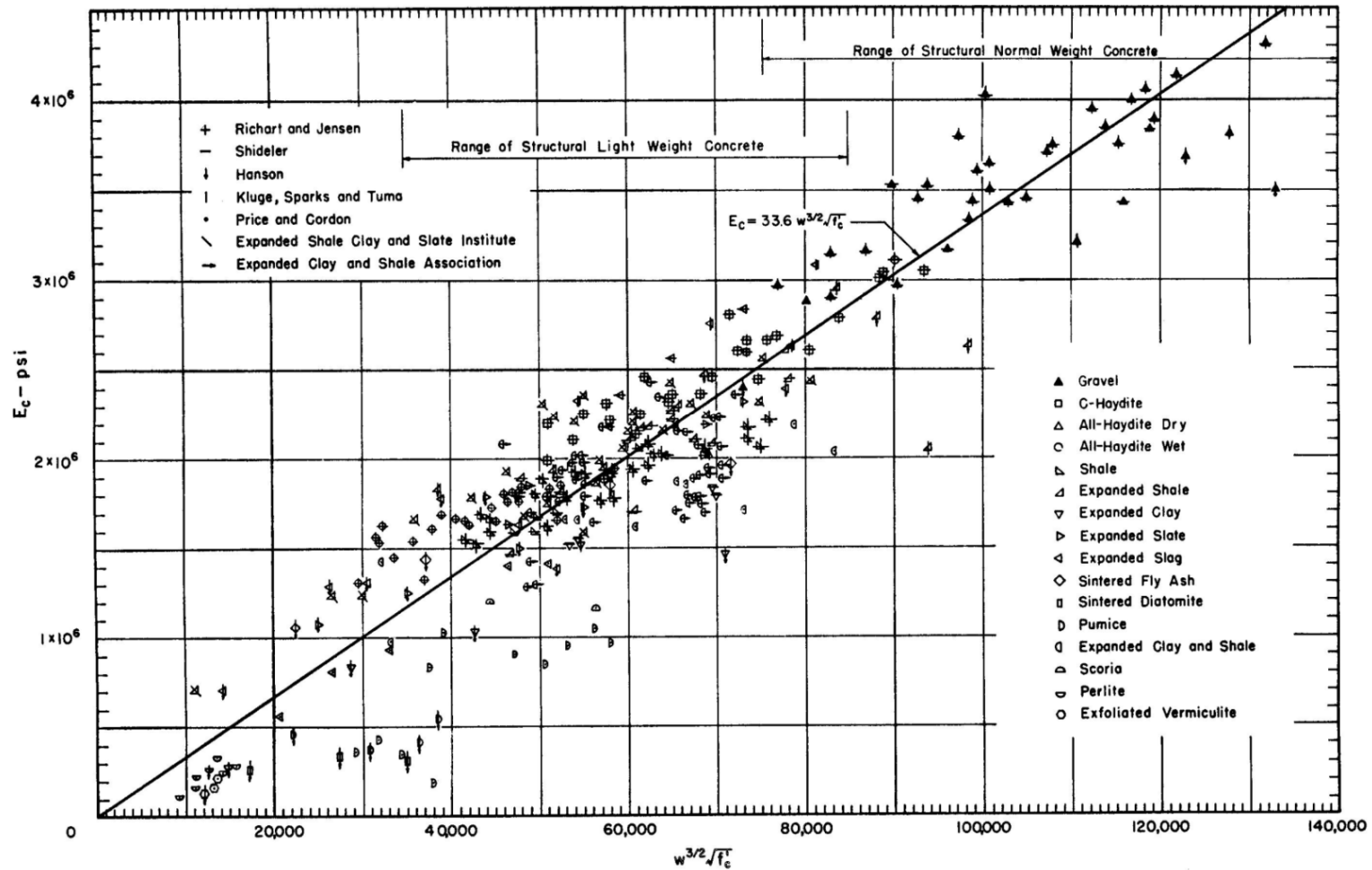
混凝土的应力度-应变度关系

影响因素

- (1) 混凝土的配制
- (2) 试验时的材龄,
- (3) 样本的固化方法,
- (4) 样本的形状和大小,
- (5) 载荷速度

压缩强度 20-60 MPa
弹性模量(割线刚度)
线性的范围
压缩强度时的应变度
拉伸强度

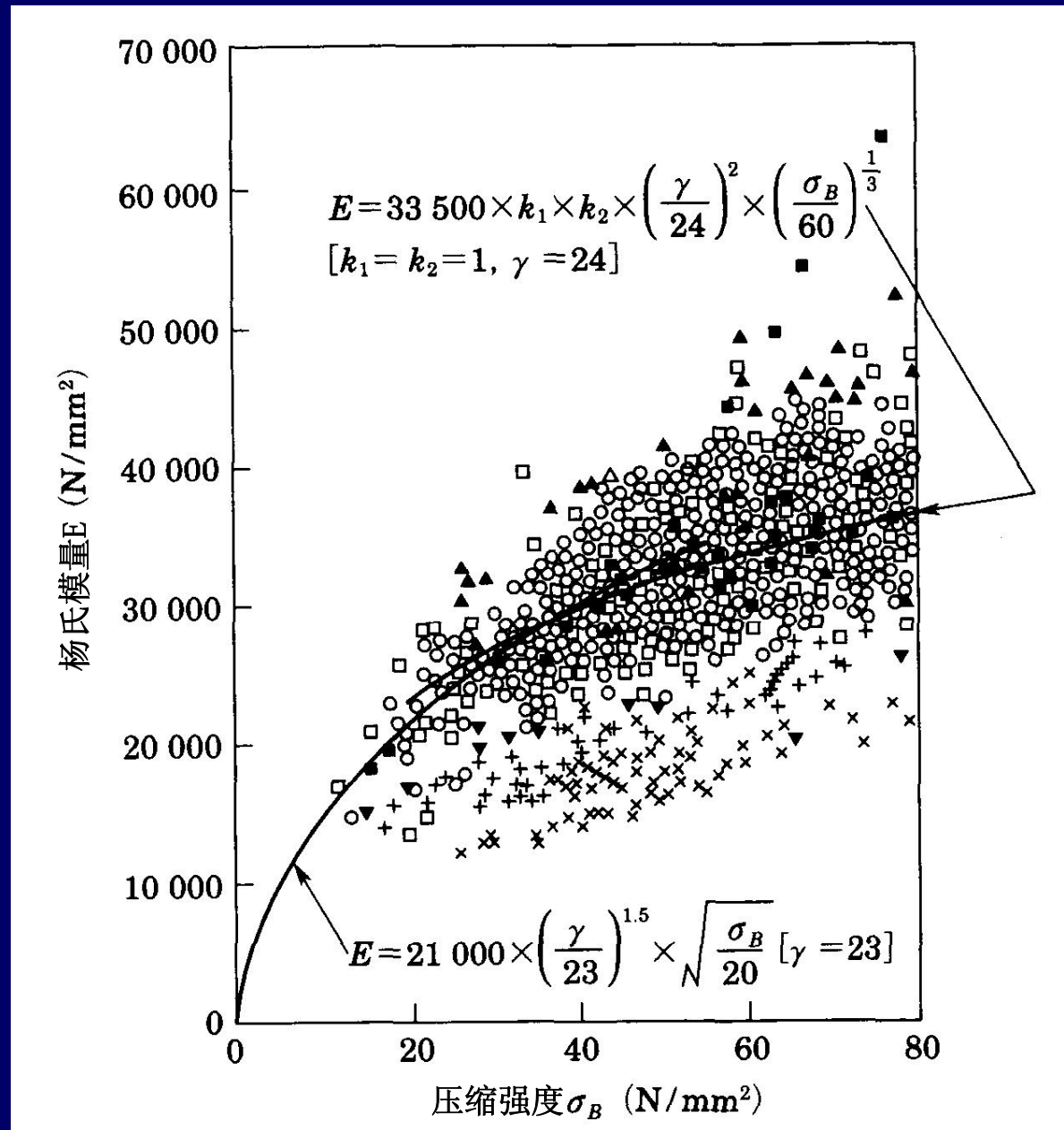




$$E_c = 1.35 \gamma^{1.5} \sigma_B^{1/2}$$

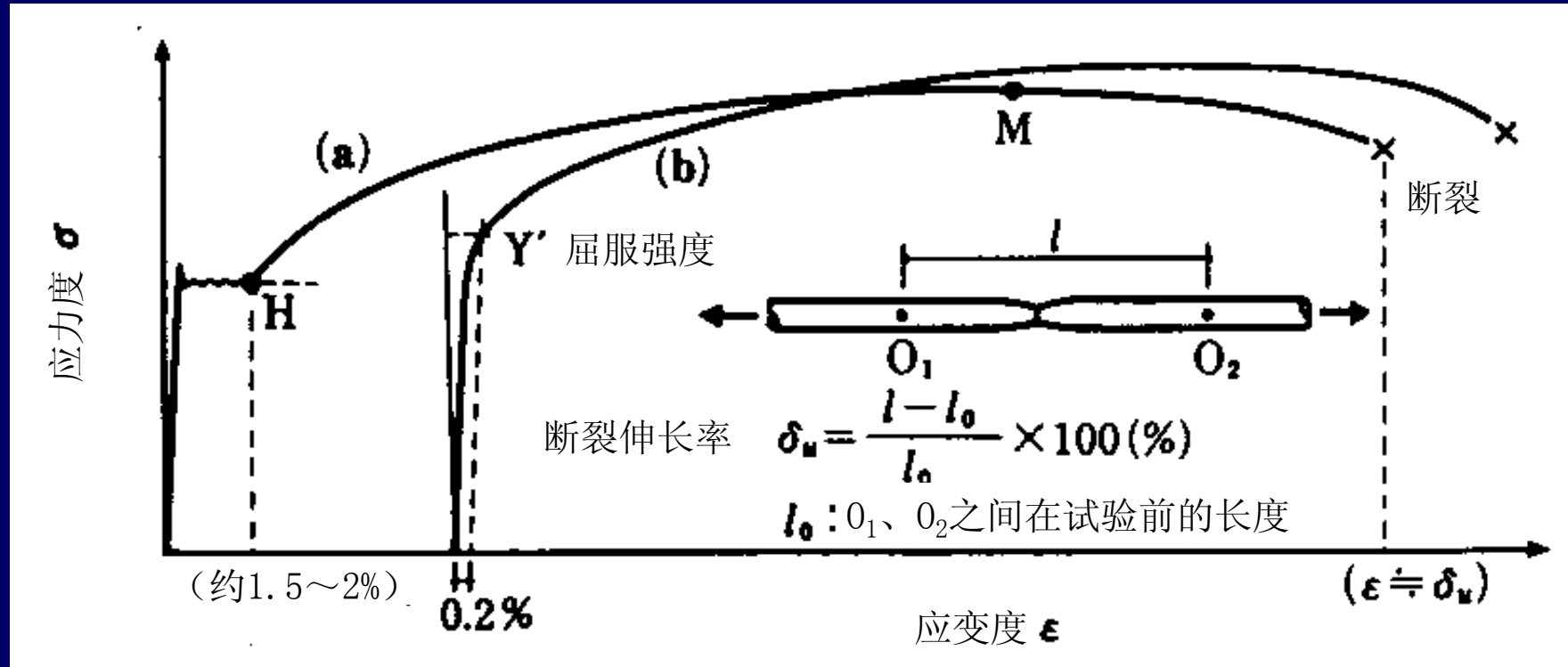
Pauw, A., "Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density," Journal, American Concrete Institute, No. 57, No. 6, December 1960, pp. 679-687.

建设省：建设省综合技术开发项目“钢筋混凝土结构建筑物的超轻量、超高层化技术的开发”报告书，1993年10月。



混凝土的弹性模量 (New RC报告书)

钢筋的材料特性



屈服点的定义

屈服点 295 – 490 MPa

高强度抗剪加固钢筋

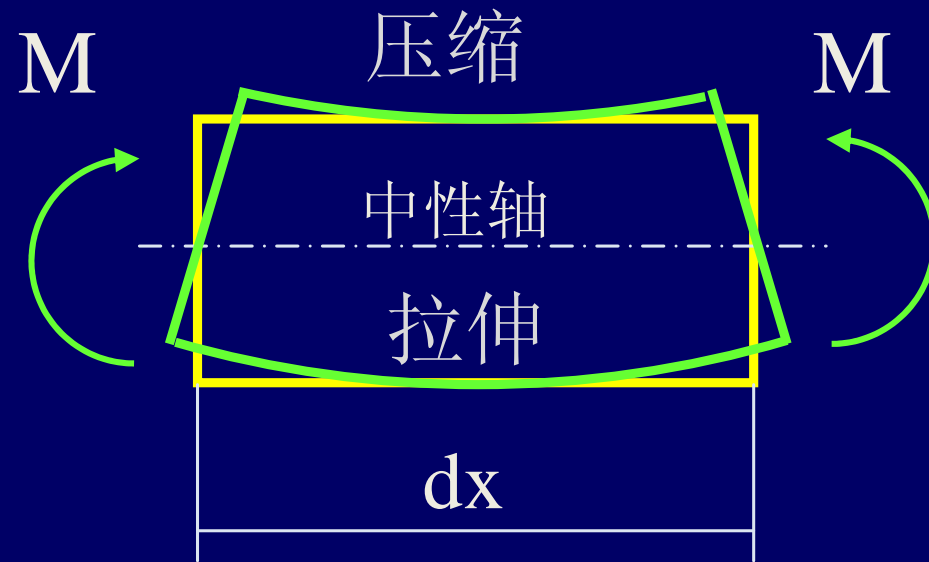
应变速度对屈服点的影响较大

混凝土的应力度-应变度之间关系的比较

钢筋混凝土截面的弯曲解析

保持平面的假设

变形前为平面的截面在变形后仍然保持平面



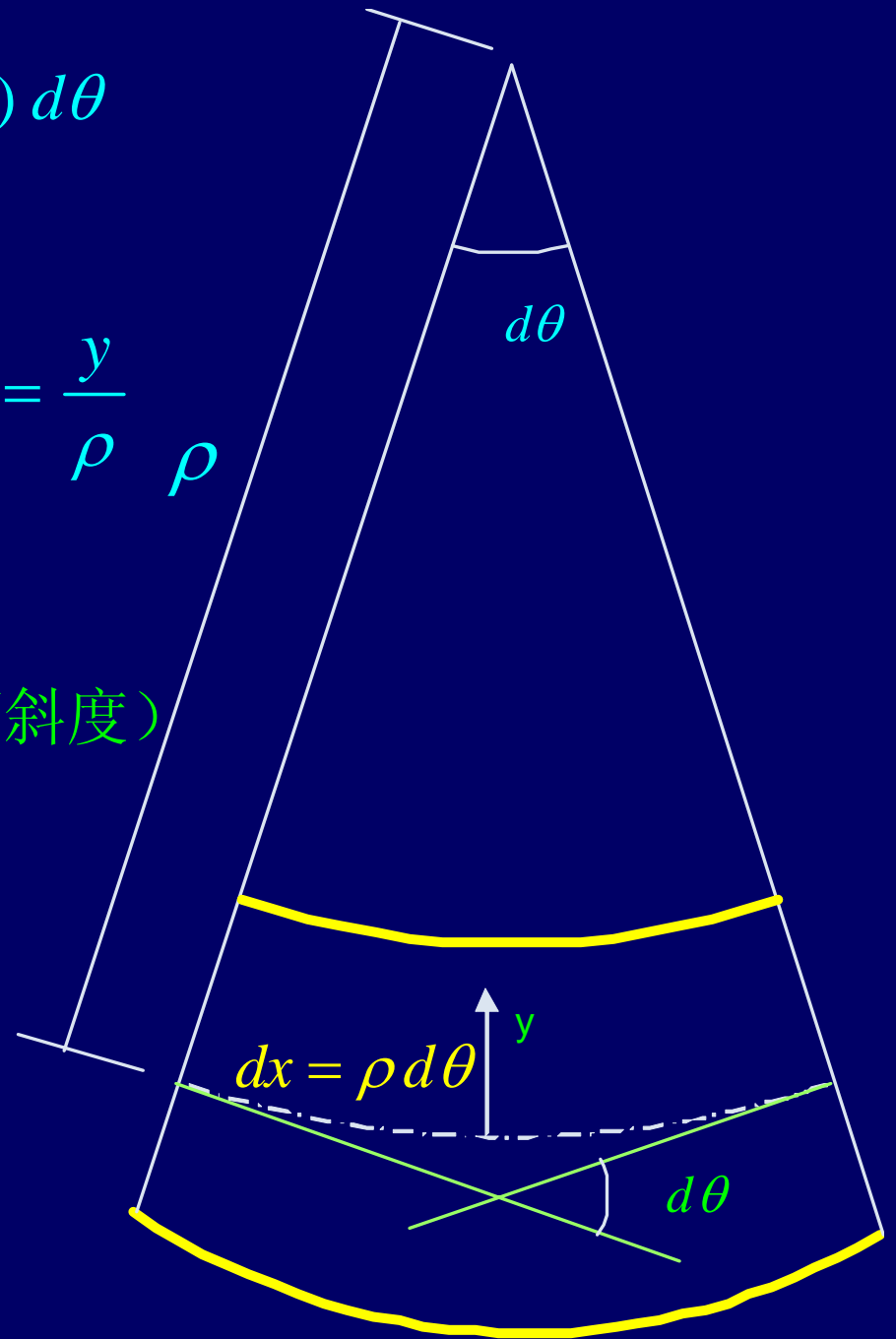
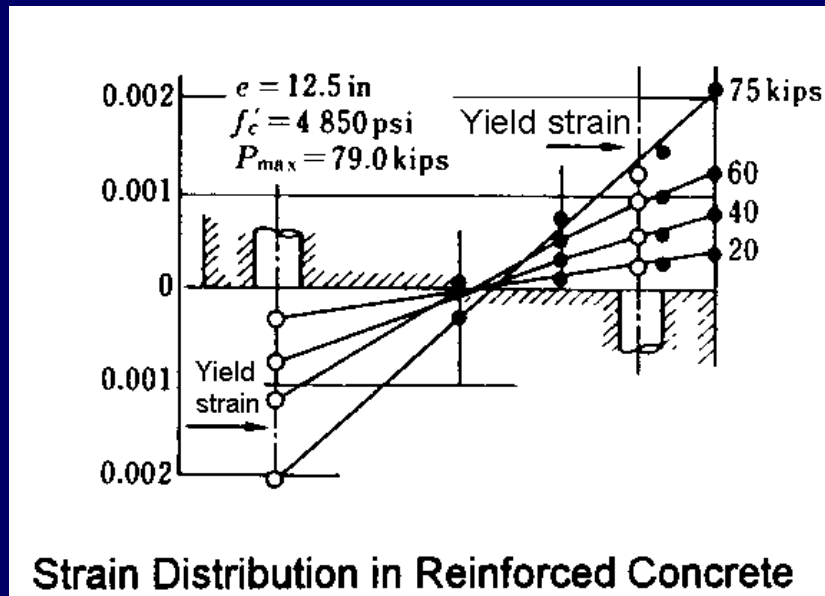
中性轴：既不受压又不受拉的面

线段的伸长 $\Delta_y = \rho d\theta - (\rho - y) d\theta$
 $= y d\theta$

线段的应变度 $\epsilon_y = \frac{\Delta_y}{dx} = \frac{y d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho}$
 $= y \phi$

ρ : 曲率半径

ϕ : 曲率 (截面应变度分布的倾斜度)

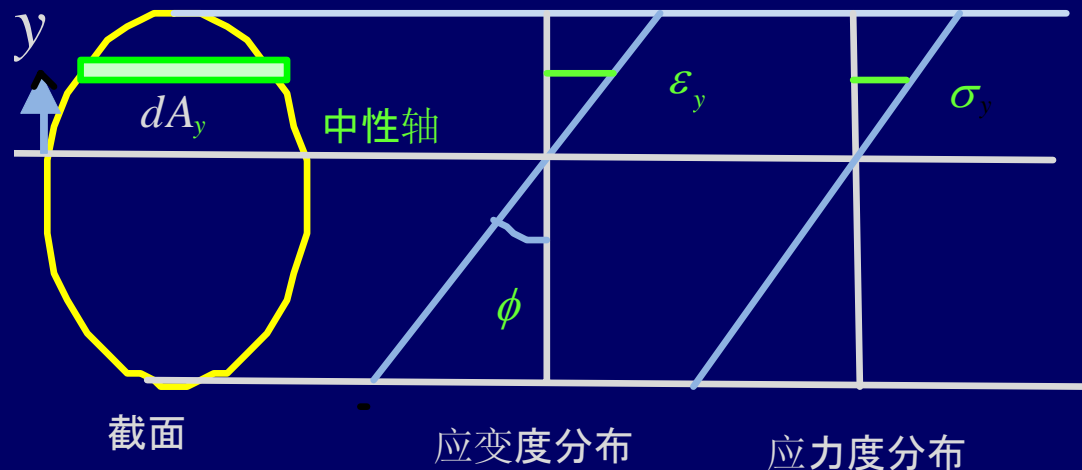


作用于截面上的轴向力

$$N = \int_{\text{总截面积}} \sigma_y dA_y$$

弯曲力矩

$$M = \int_{\text{总截面}} \sigma_y y dA$$



中性轴的位置(线性弹性)

$$N = \int_{\text{总截面积}} E \varepsilon_y dA_y = E \phi \int_{\text{总截面积}} y dA_y = 0.0$$

截面重心

截面二阶力矩

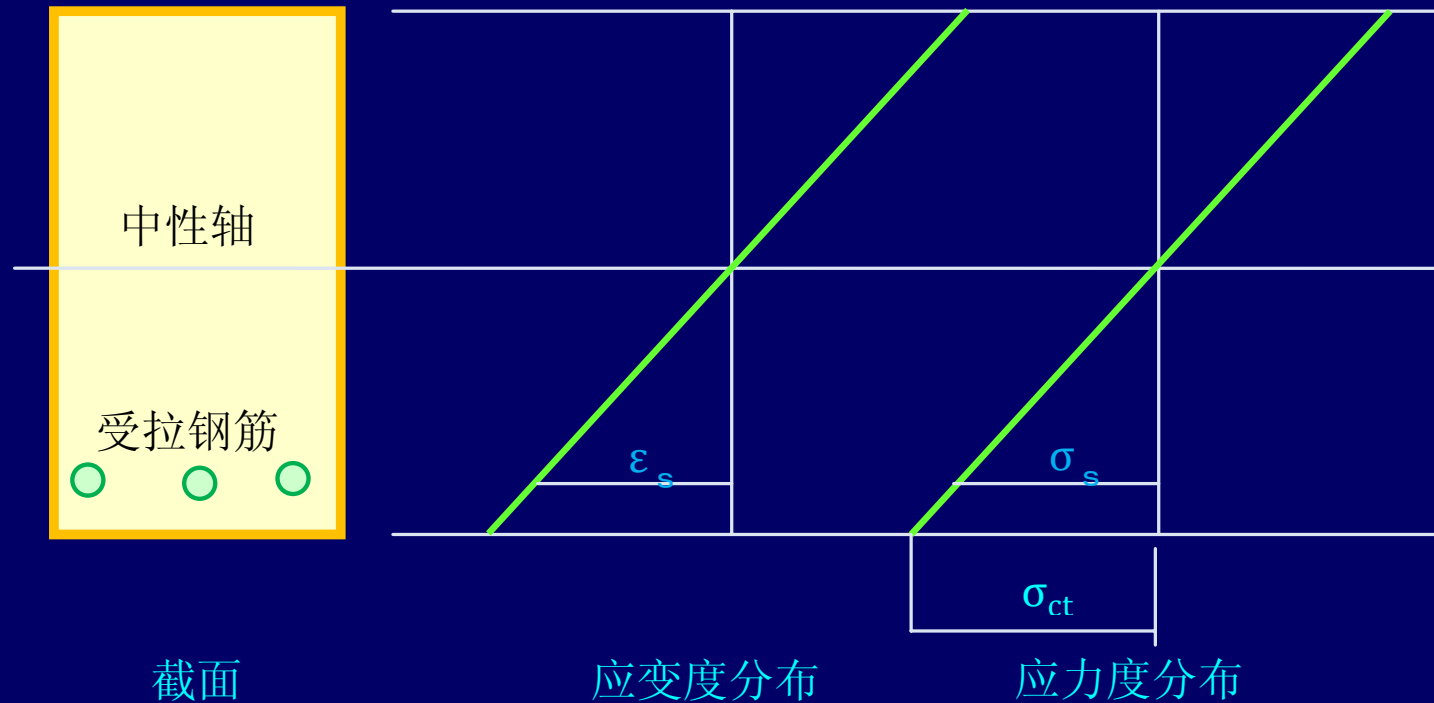
$$M = \int_{\text{总截面}} E y^2 \phi dA_y = E I \phi$$

$$I = \int_{\text{总截面}} y^2 dA_y$$

截面二阶力矩

钢筋混凝土截面的异常

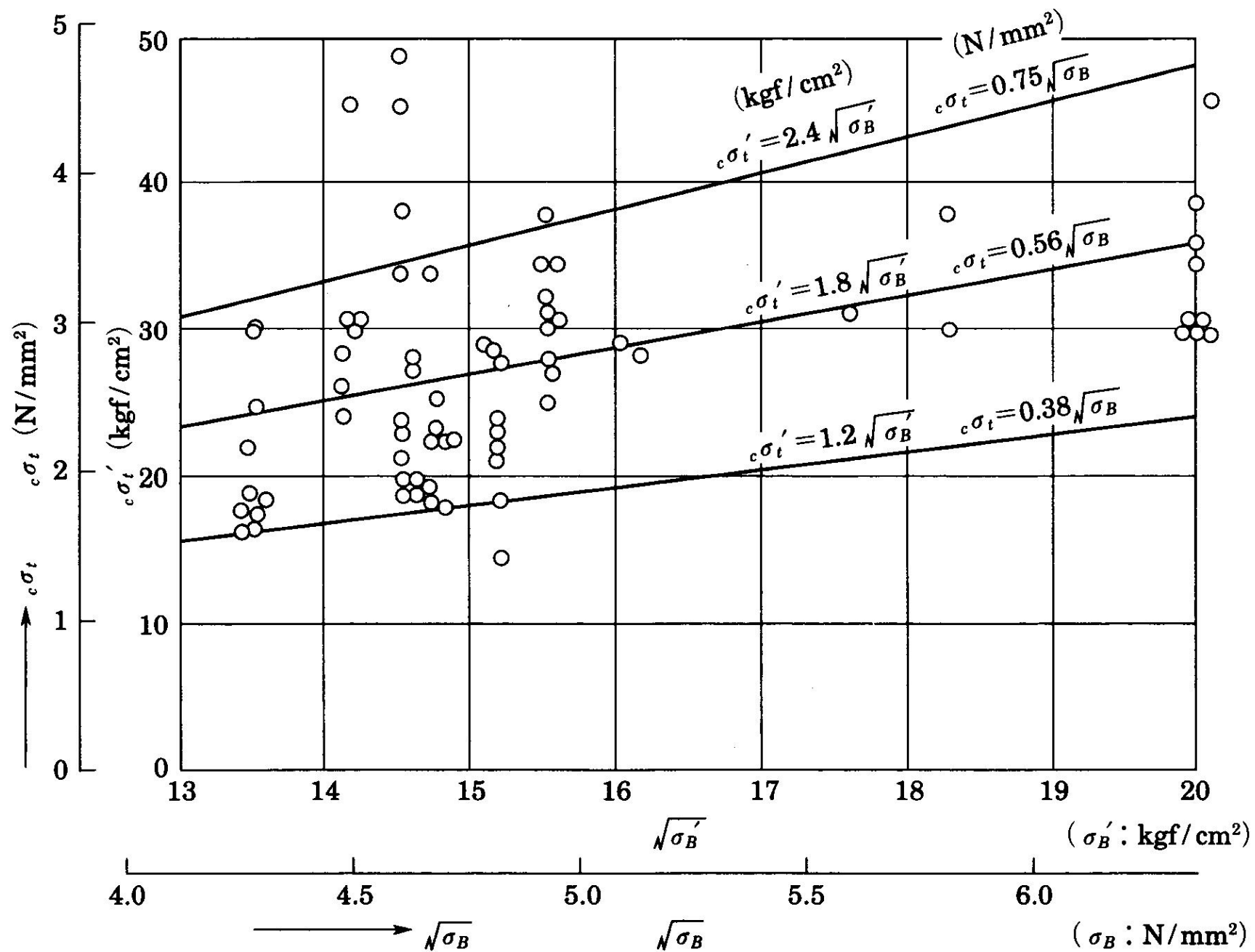
弯曲裂缝力矩



菅野的实验式

$$M_{cr} = 0.56 \sigma_B^{1/2} Z_e + ND/6$$

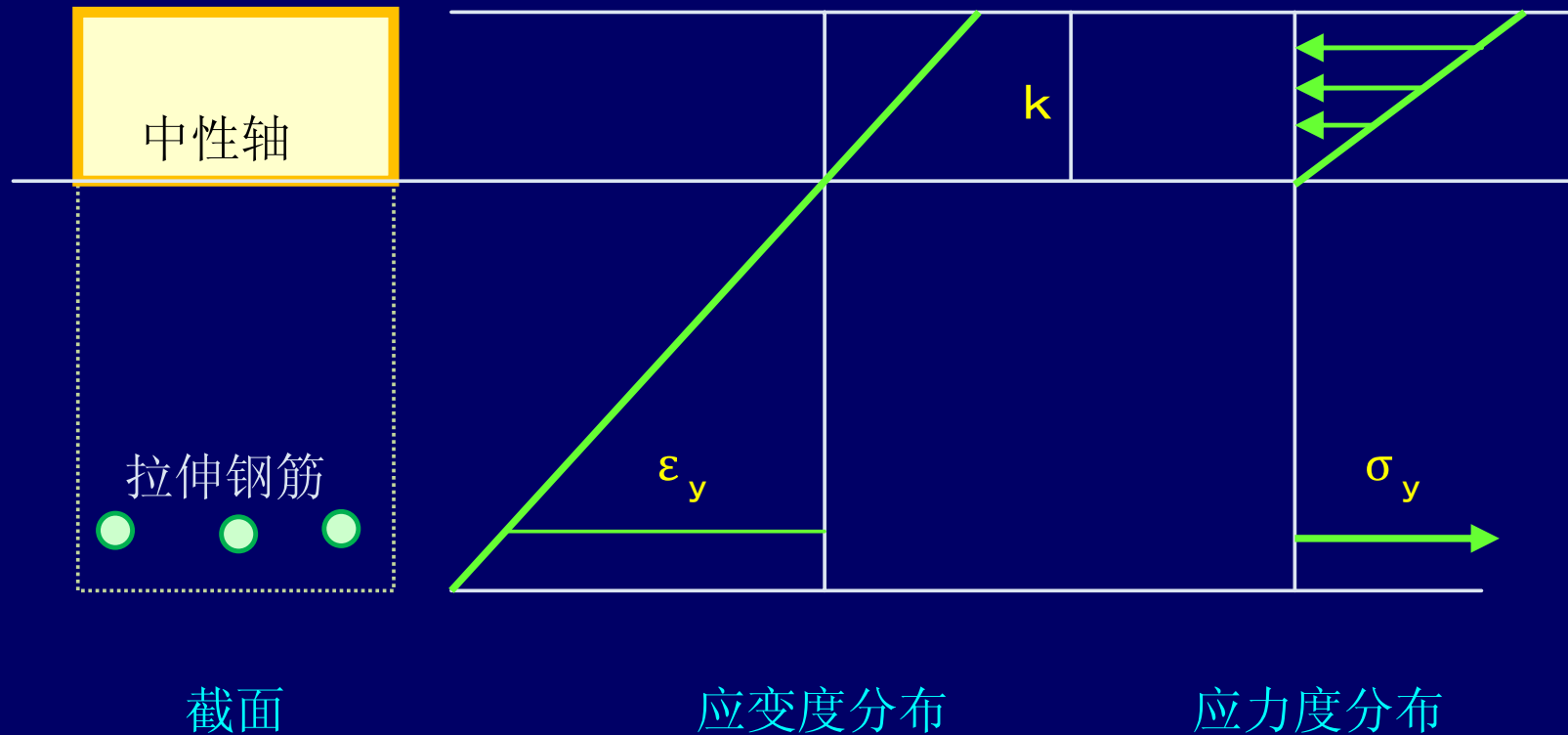
混凝土的干燥收缩
截面内的应变度梯度
对混凝土拉伸强度的评估
在实验时发现裂缝



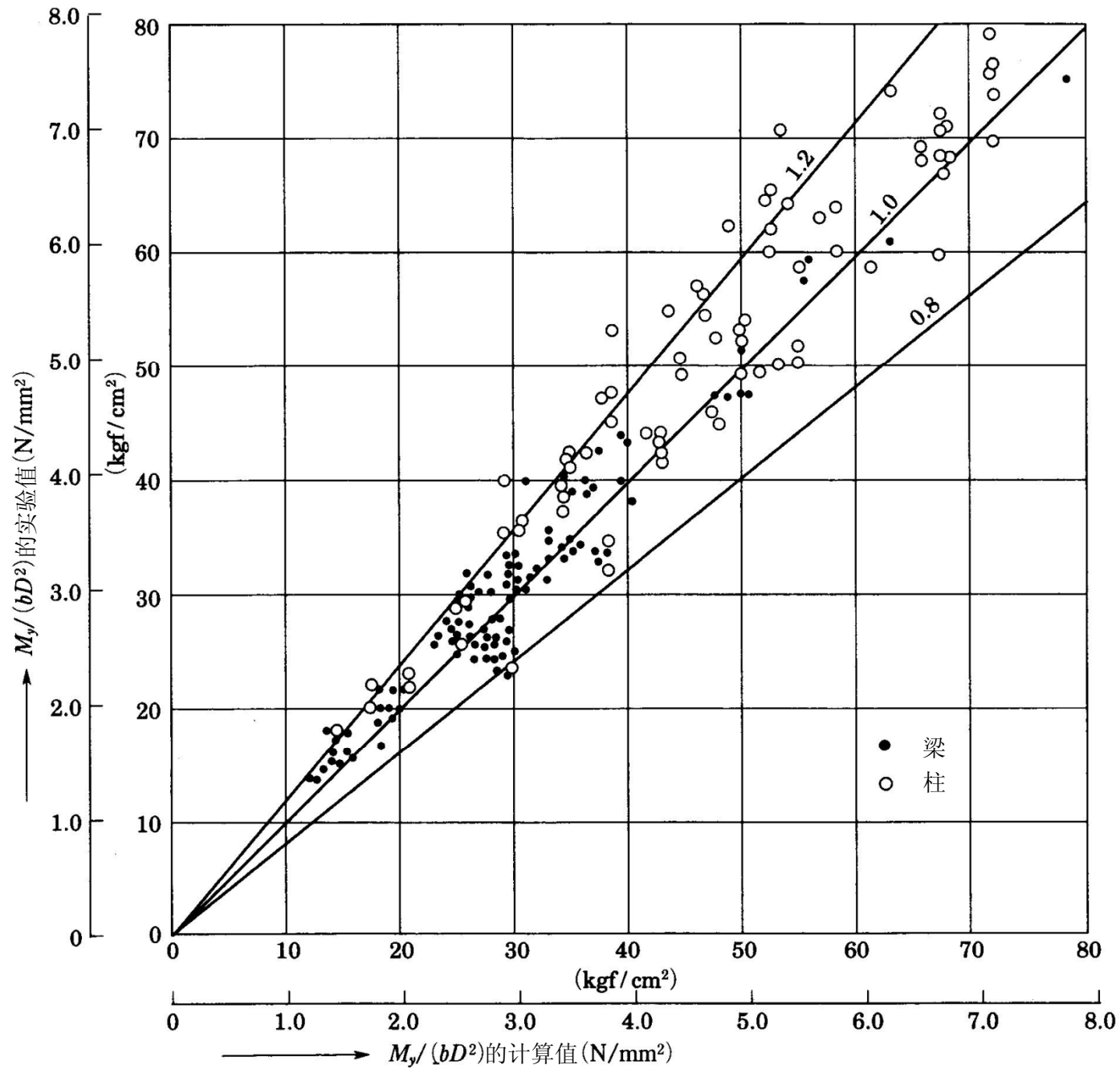
解说图8.11 梁发生弯曲裂缝时的混凝土拉伸应力

钢筋混凝土截面的异常

弯曲屈服力矩（拉伸钢筋发生屈服）



$$M_y = a_t \sigma_y (0.875 d)$$



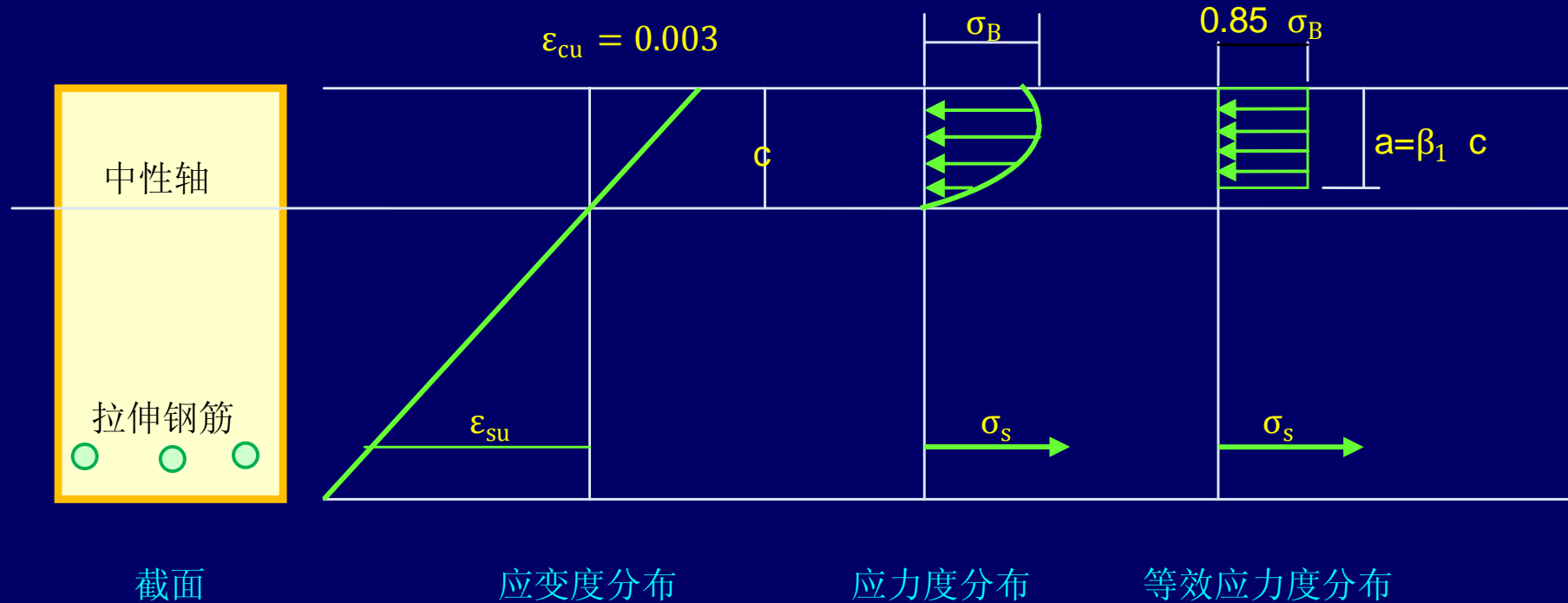
解说图8.13 屈服弯曲力矩的计算值与实验值

钢筋混凝土截面的异常

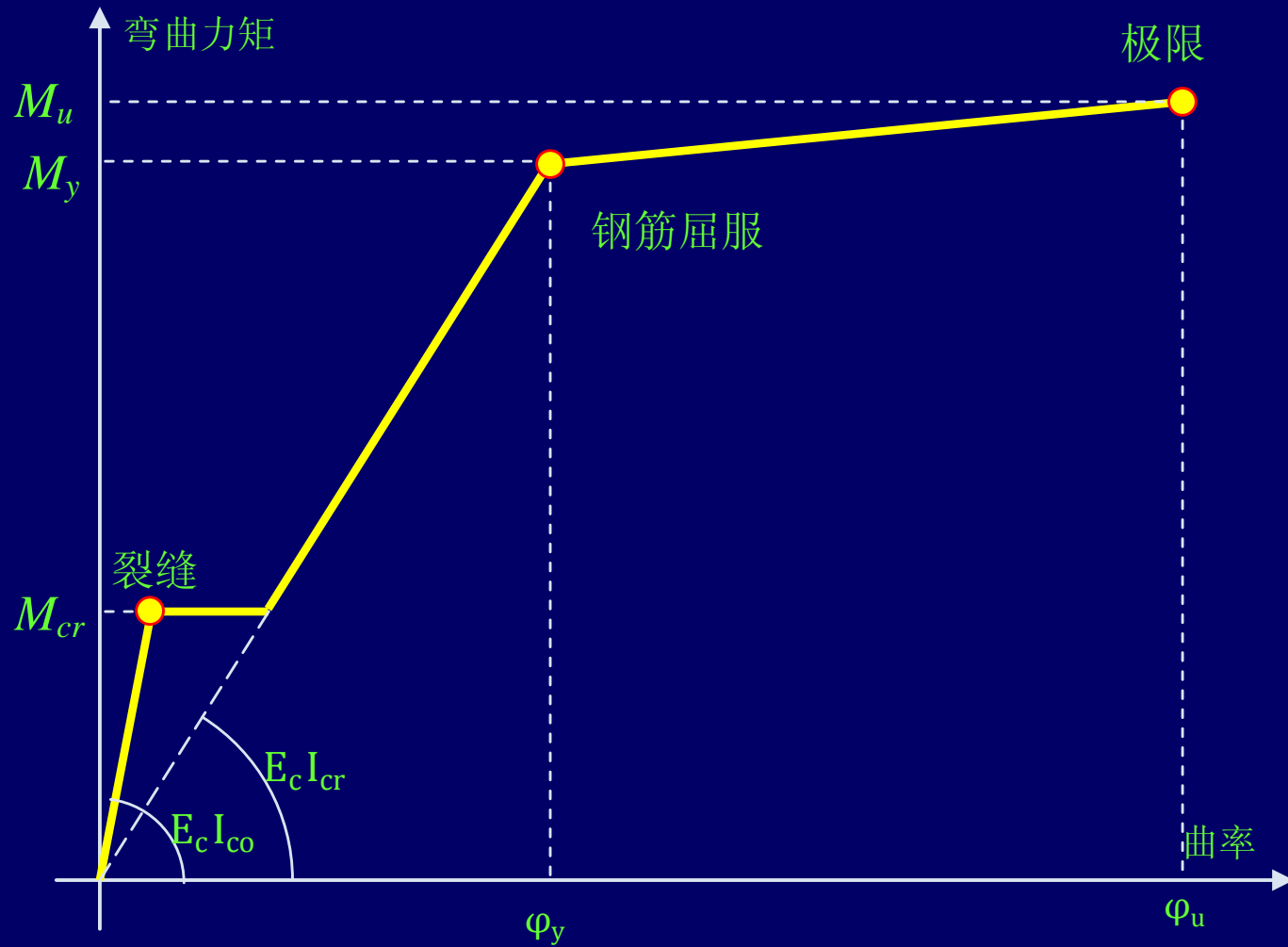
弯曲极限力矩

压缩混凝土的极限应变度（约束筋的效果）

ACI的等效矩形应力图块



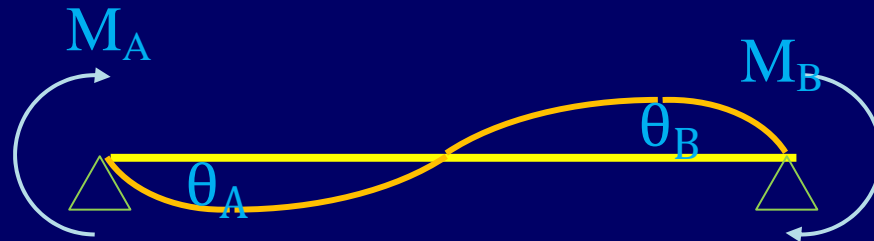
截面的力矩与曲率关系



混凝土的弹性刚度
极限时的混凝土应变度

钢筋混凝土构件的荷载与变形的计算

根据截面的力矩与曲率的关系，
对构件的变形进行计算(单位荷载法)



用在存在力矩 M_0 及想求得变形的方向上乘以单位荷载时的力矩 M_u 的积除以弯曲刚度 EI ，再对结构物进行积分

$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \frac{M_0 M_u}{EI} ds$$

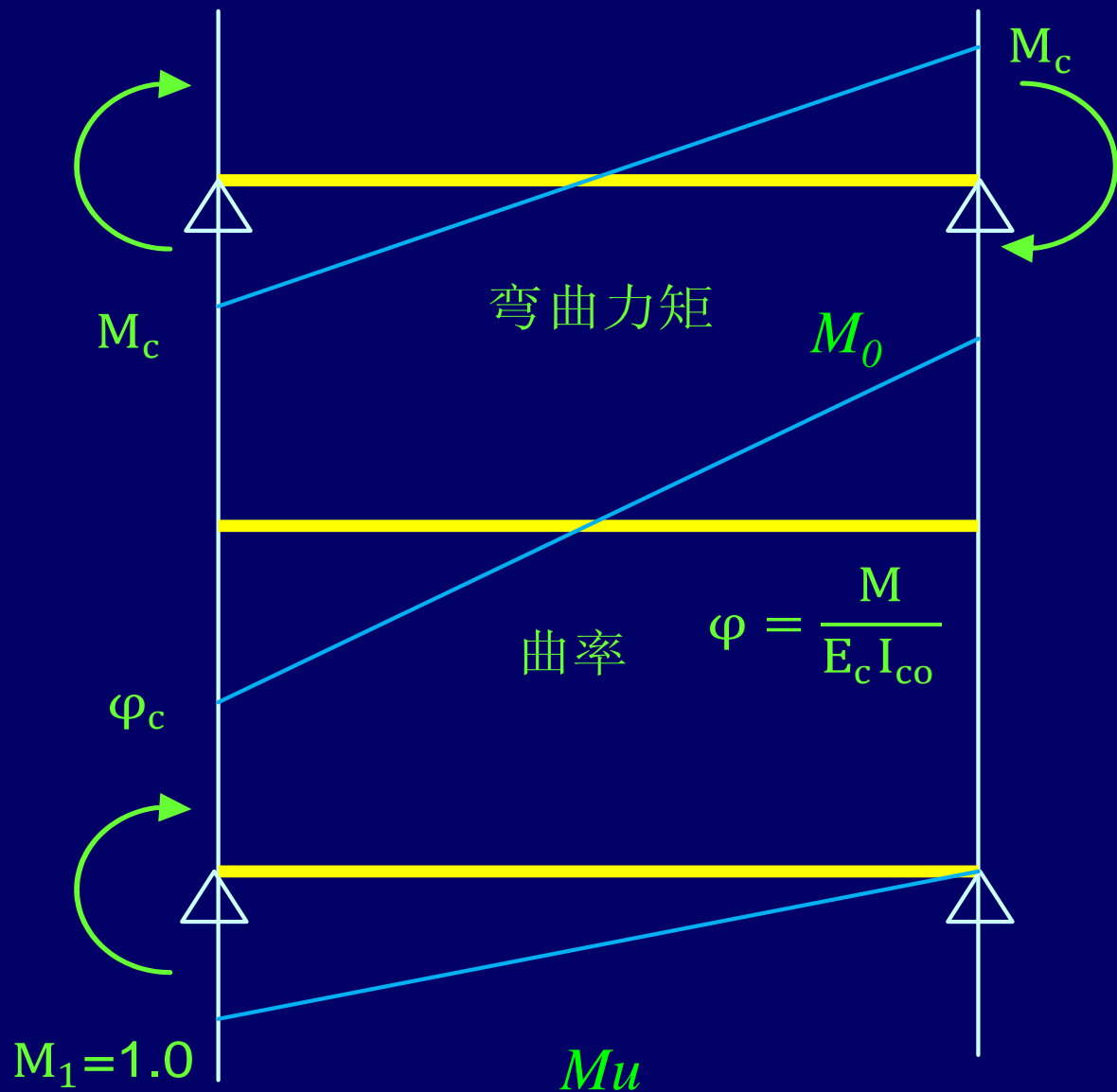
$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \phi_0 \cdot M_u ds$$

弯曲裂缝的构件端旋转角

单位荷载法
(虚功原理)

$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \frac{M_0 M_u}{EI} ds$$

$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \phi_0 \cdot M_u ds$$

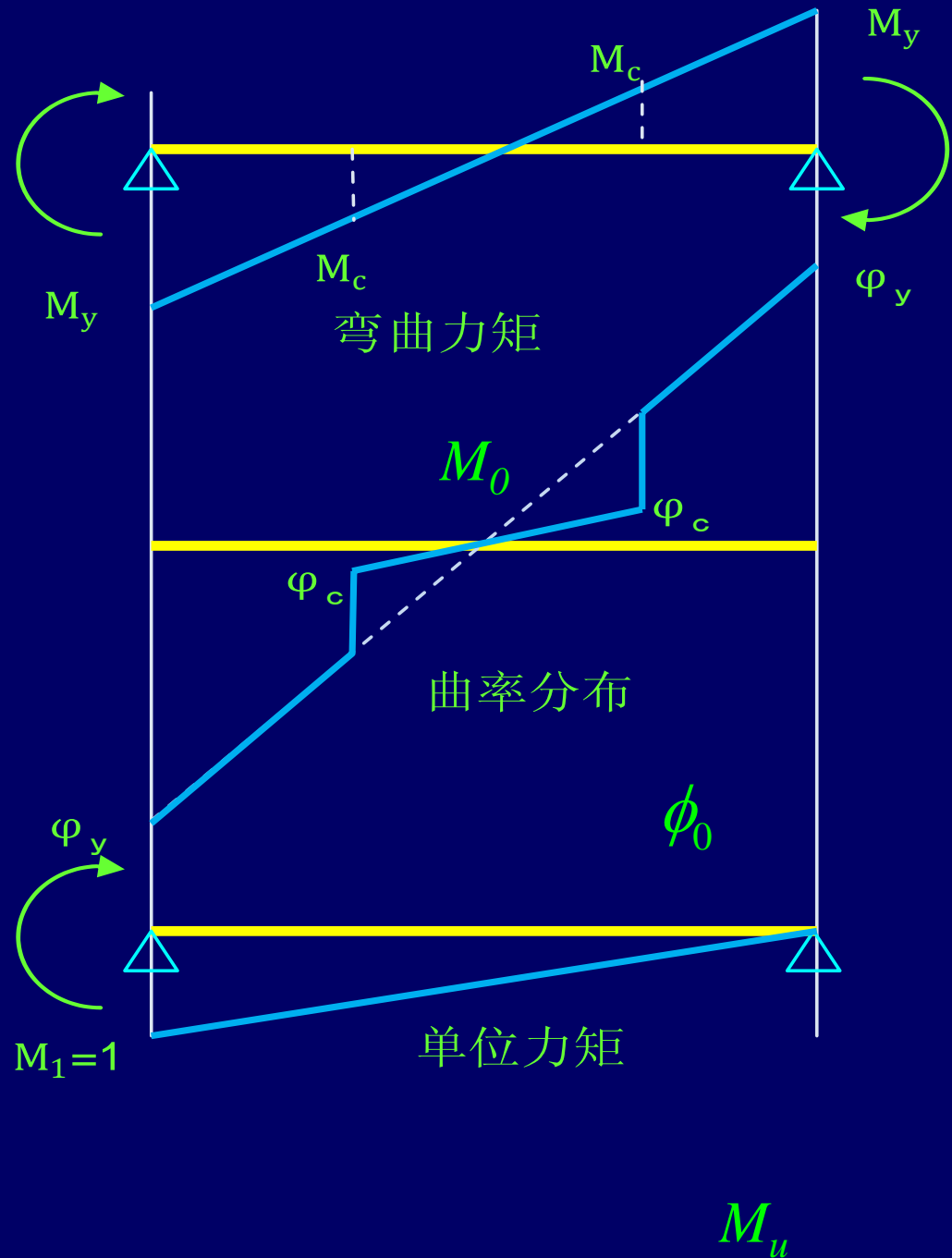


弯曲屈服构件端旋转角

单位荷载法
(虚功原理)

$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \frac{M_0 M_u}{EI} ds$$

$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \phi_0 \cdot M_u ds$$

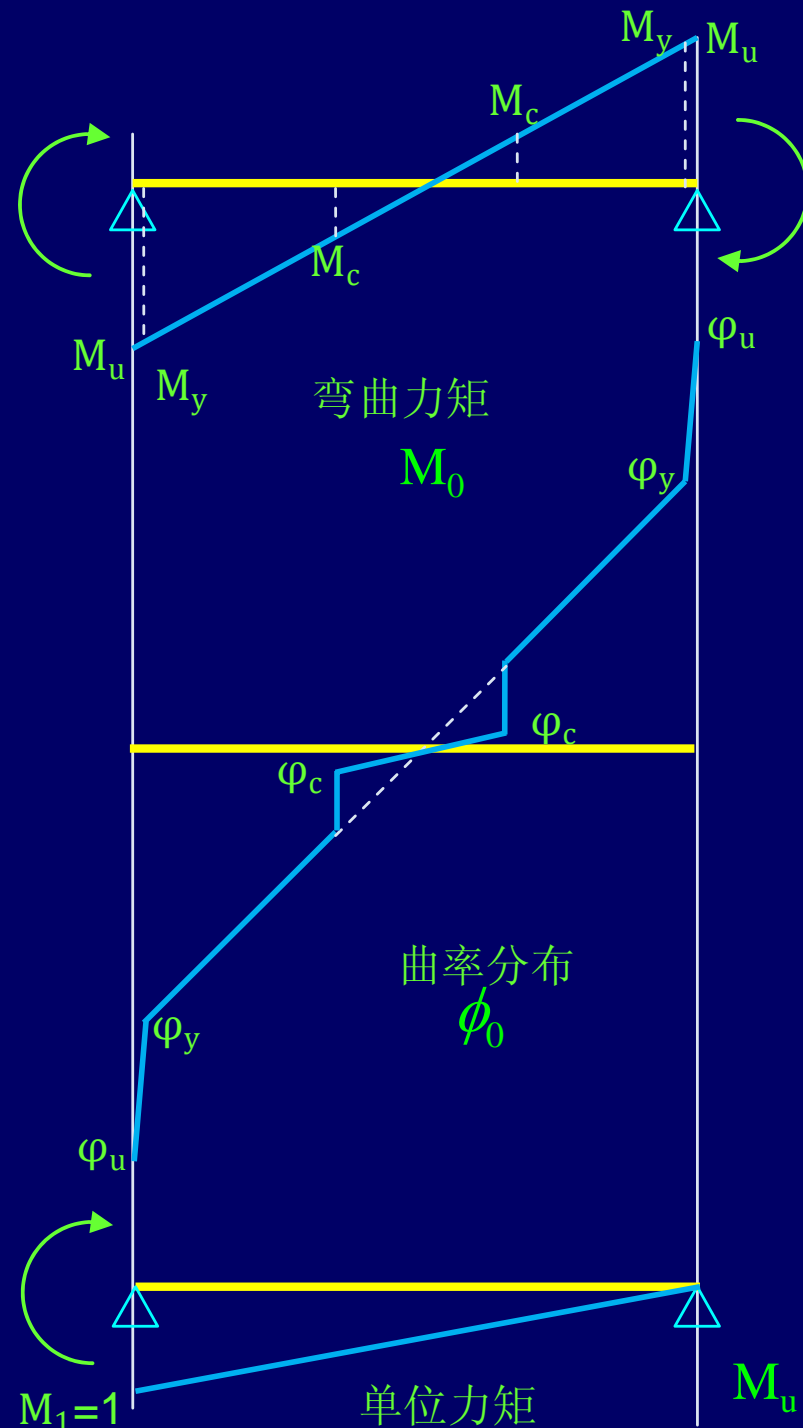


极限构件端旋转角

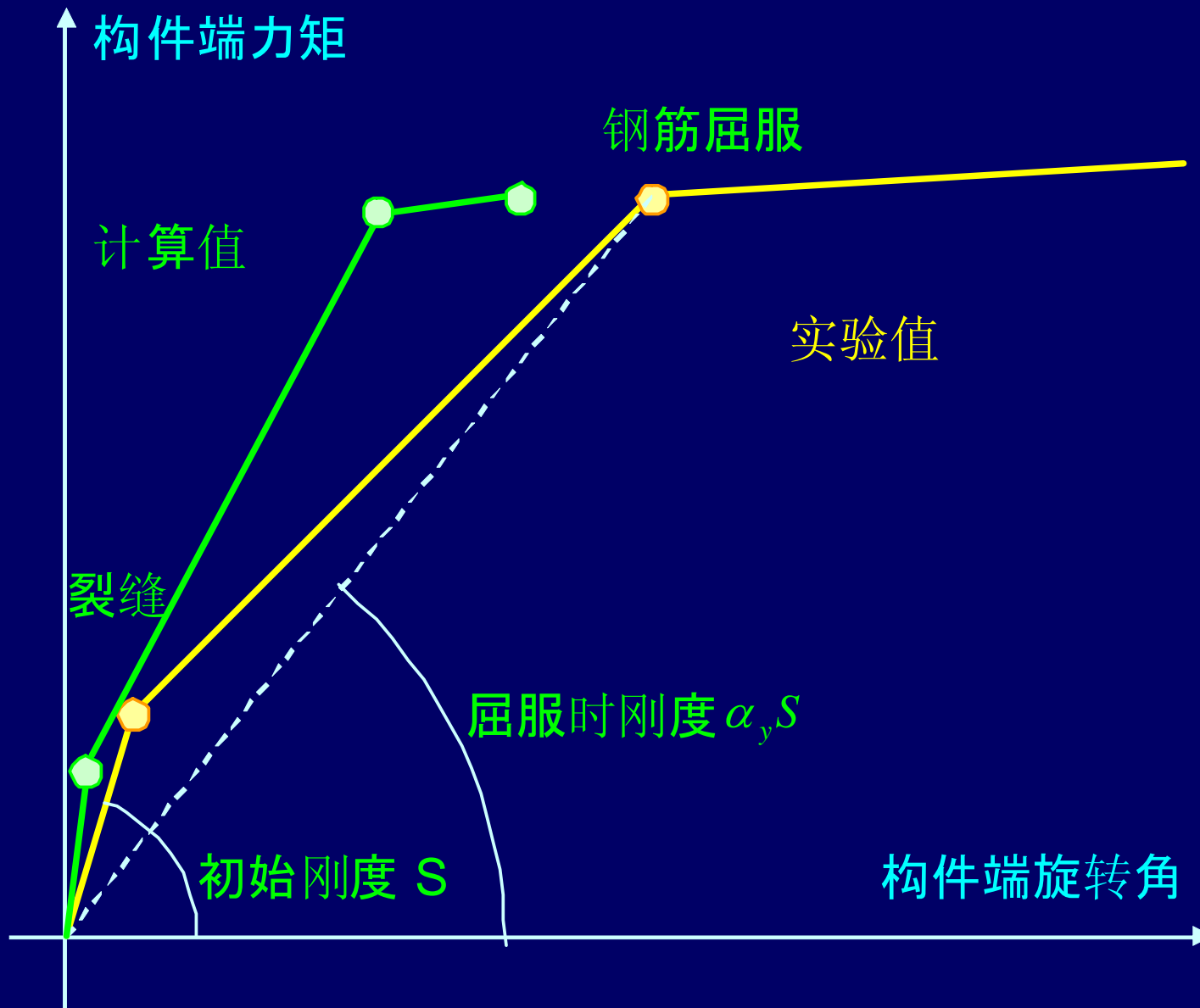
单位荷载法
(虚功原理)

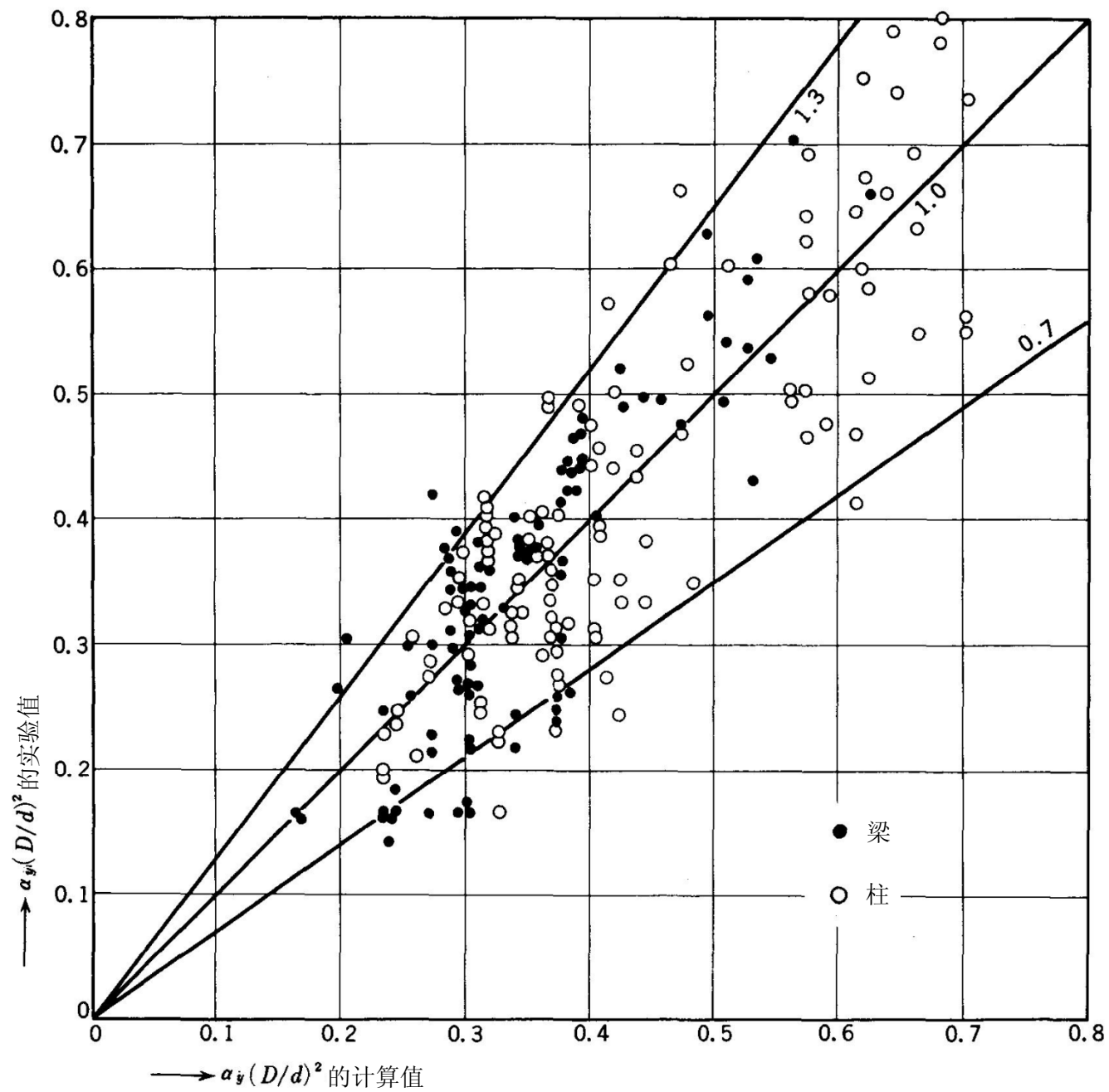
$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \frac{M_0 M_u}{EI} ds$$

$$\Delta = \int_{\text{结构物}} \phi_0 \cdot M_u ds$$



根据弯曲理论的计算值与实验值的比较

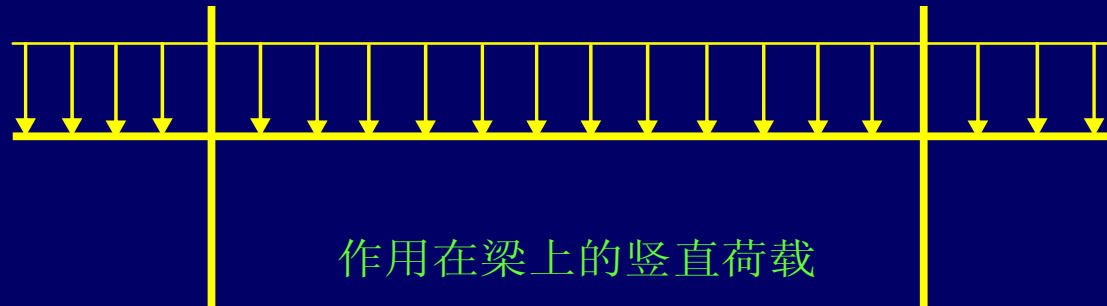




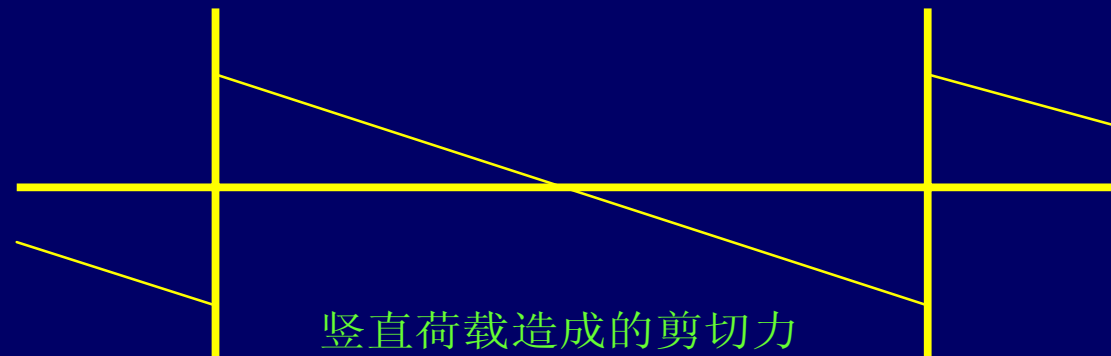
解说图8.14 屈服时的刚度下降率 α_y

竖直荷载与受到地震力的构件的弯曲应力

竖直荷载

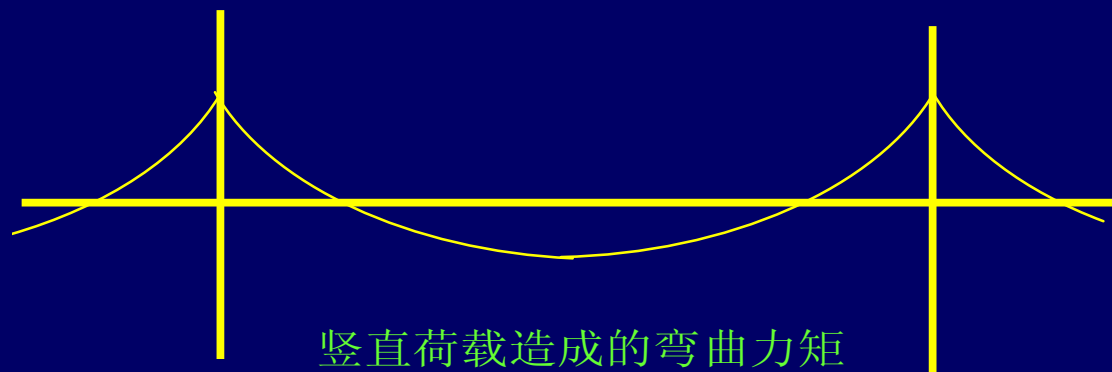


无限连续的框架



构件端力矩根据约束条件确定

力矩分布形状一定



地震力



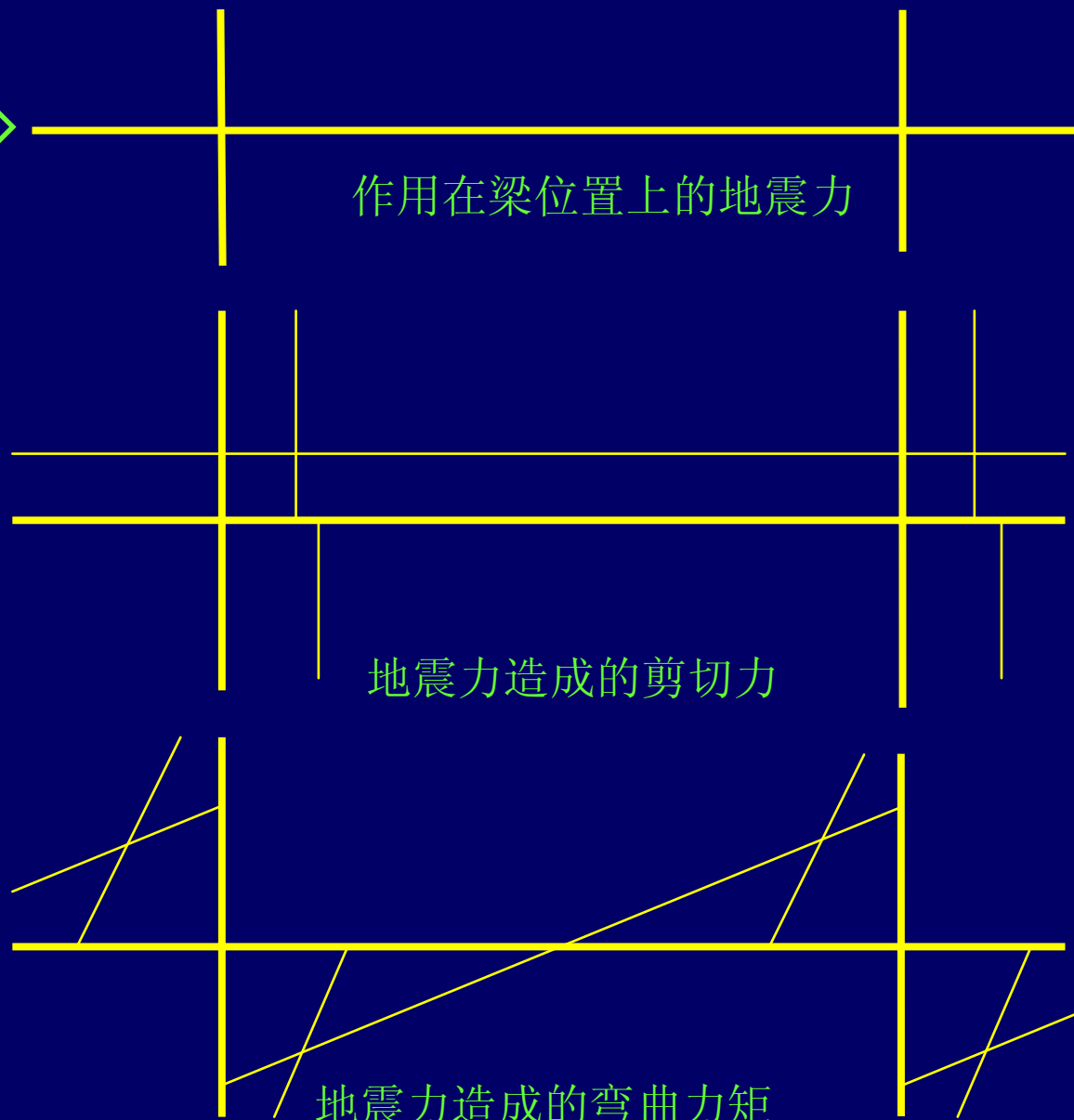
作用在梁位置上的地震力

构件剪切力一定

地震力造成的剪切力

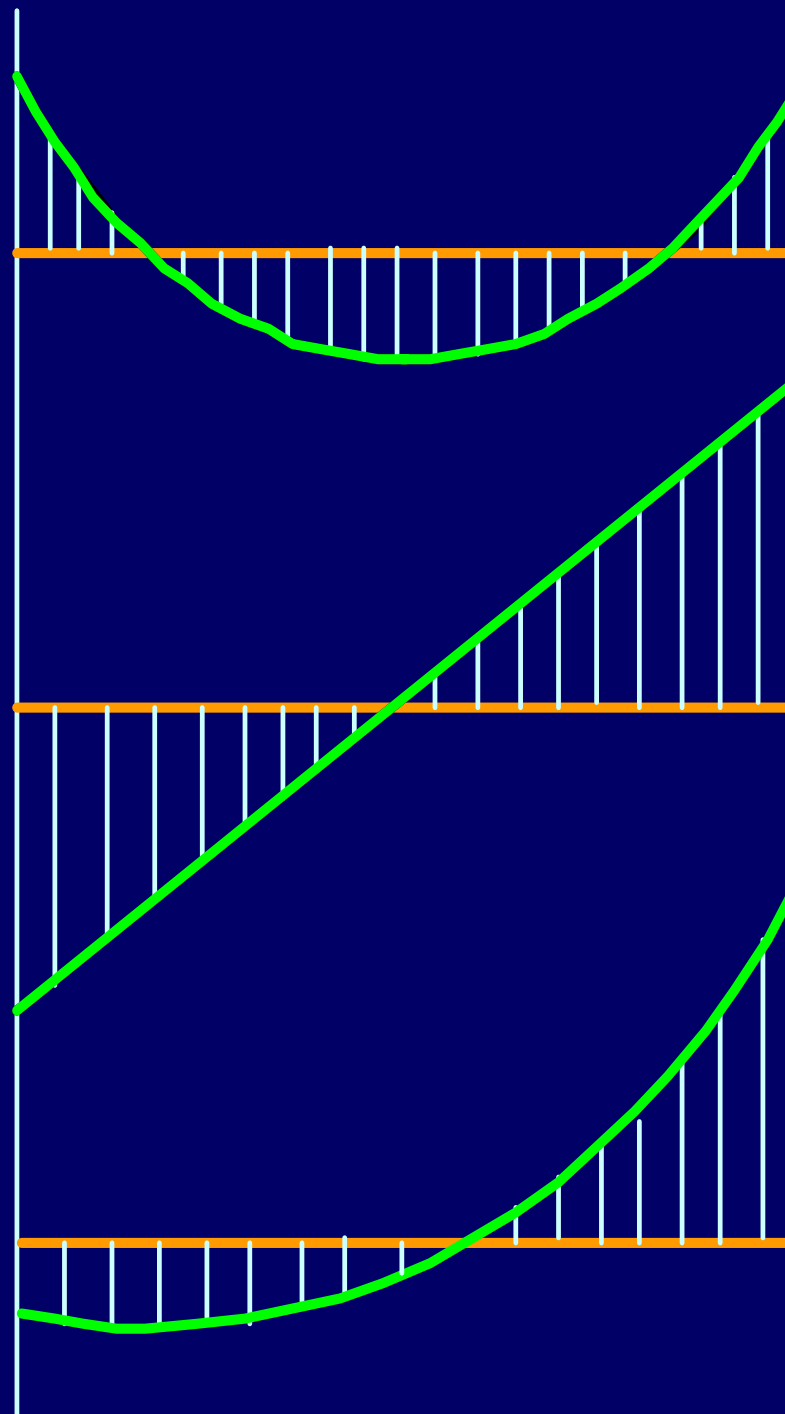
弯曲力矩

地震力造成的弯曲力矩



竖直荷载及地震力造成的应力

需要进行非线性地震反应解析的，是高地震区。



竖直荷载造成的
弯曲力矩

地震力造成的弯
曲力矩

竖直荷载及地震力
造成的弯曲力矩

钢筋混凝土的非线性解析的特色

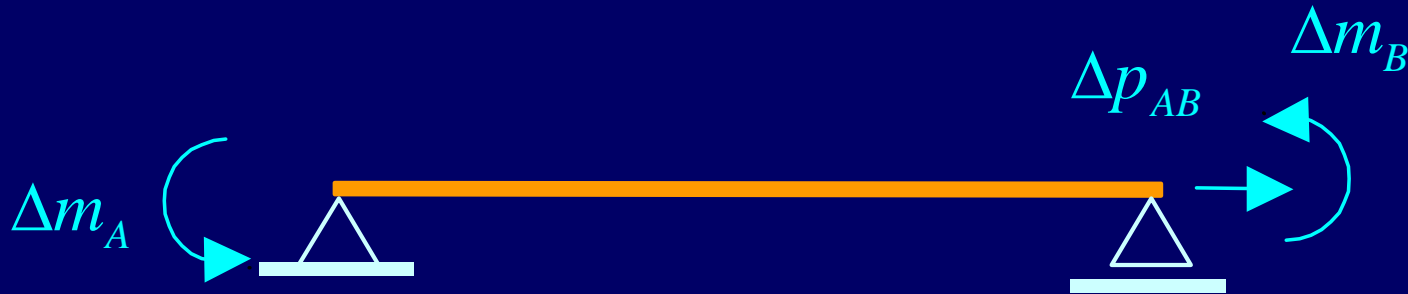
构件内的损伤分布



竖直荷载与地震力所造成的梁构件的应力
应用了地震时应力的实验所造成的损伤分布
损伤并不集中在构件端部

构件的刚度矩阵

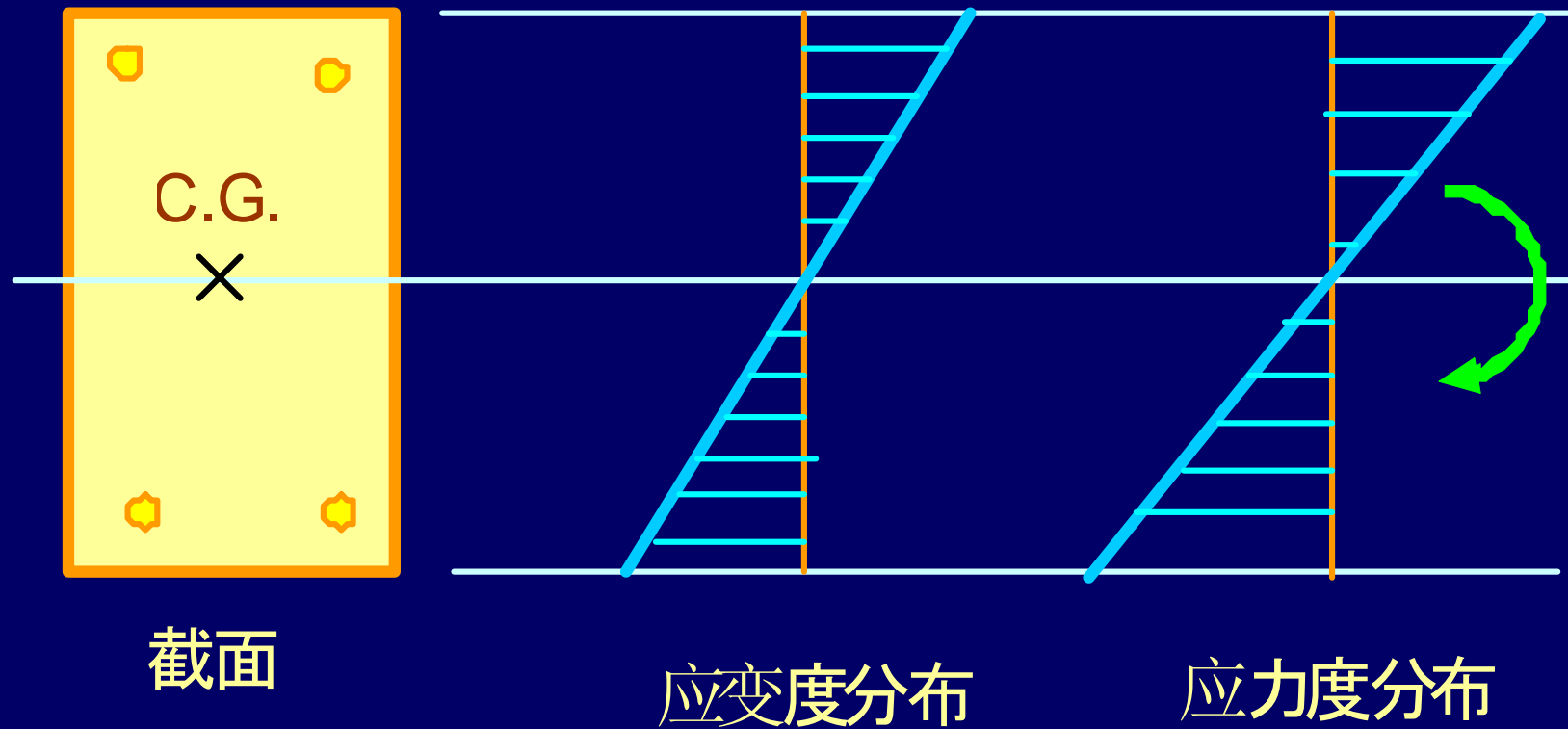
$$\begin{Bmatrix} \Delta p_{AB} \\ \Delta m_A \\ \Delta m_B \end{Bmatrix}_i = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} \Delta e_{AB} \\ \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \end{Bmatrix}_i$$



用通过截面重心的一根盘条表示构件

轴向力与弯曲力矩的相互作用

构件截面重心：弹性时的中性轴



线性弹性时，在截面重心位置没有轴向变形



用通过截面重心的直线构件对构件进行建模

线性弹性构件的刚度矩阵

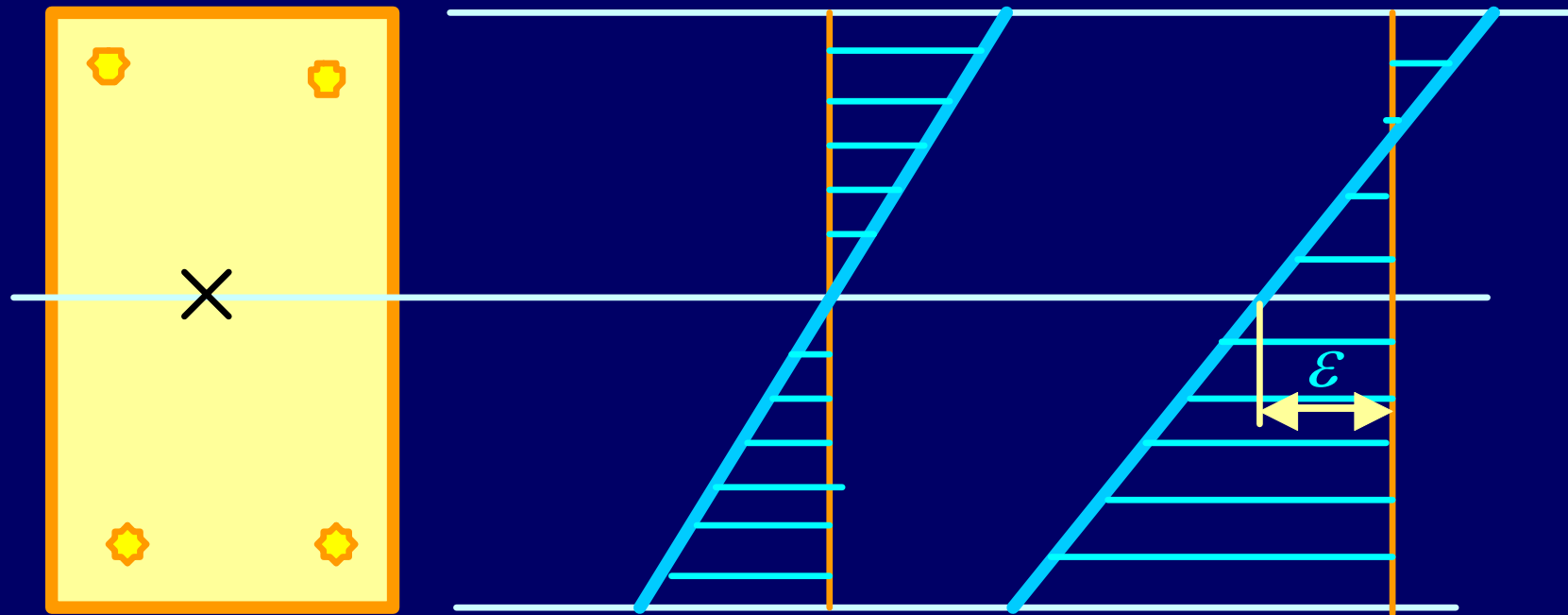
$$\begin{Bmatrix} p_{AB} \\ m_A \\ m_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4EI}{L} & \frac{2EI}{L} \\ 0 & \frac{2EI}{L} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}_{AB} \begin{Bmatrix} e_{AB} \\ \theta_A \\ \theta_B \end{Bmatrix}$$

轴向变形与构件端力矩是独立的



轴向力与弯曲的相互作用

弯曲裂缝后的中性轴的移动



截面

发生裂缝前的
应变度分布

发生弯曲裂缝后的
应变度分布

由于弯曲力矩而发生轴向变形

发生弯曲裂缝后，在中性轴上也会产生轴向变形

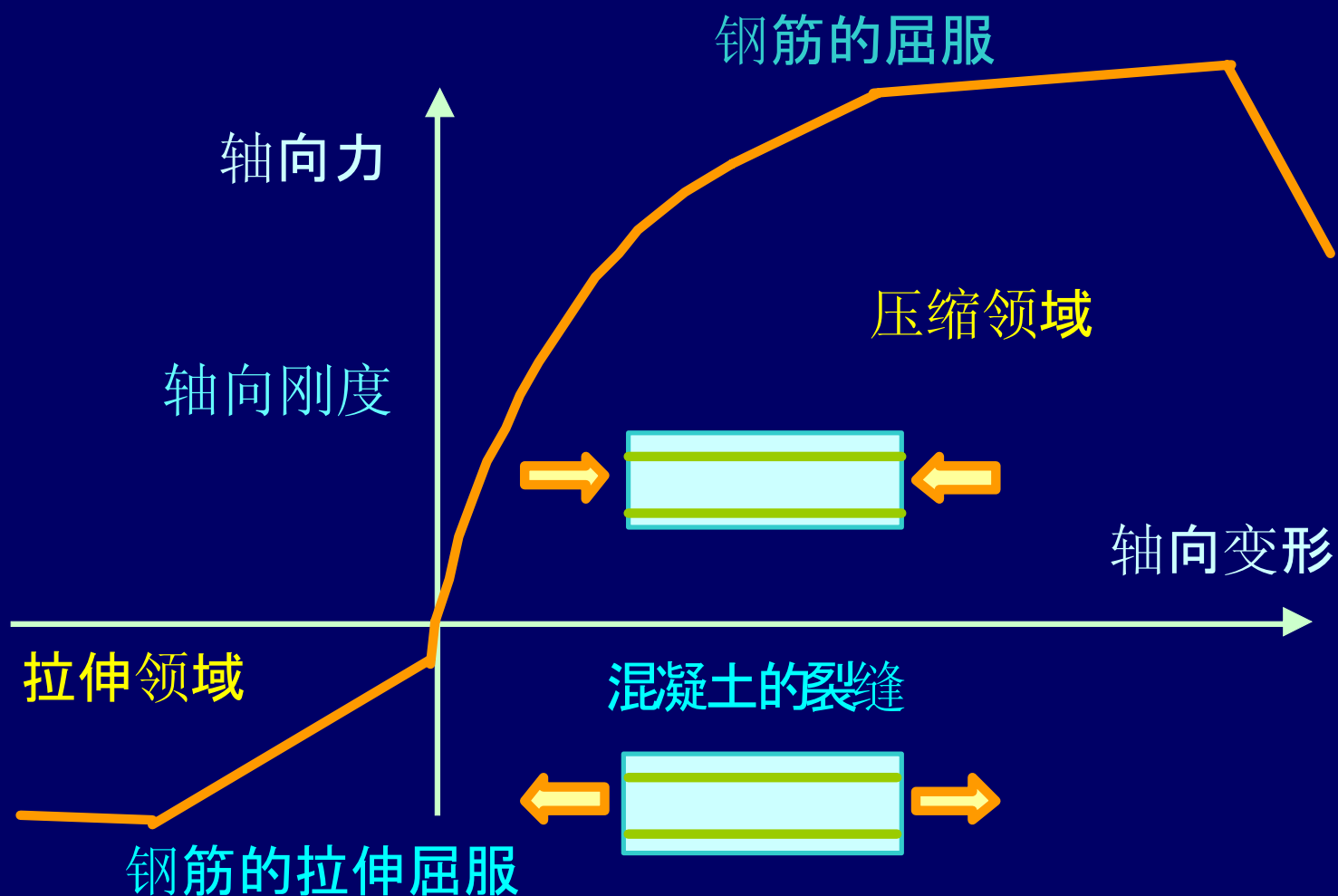
$$\begin{Bmatrix} \Delta p_{AB} \\ \Delta m_A \\ \Delta m_B \end{Bmatrix}_i = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} \Delta e_{AB} \\ \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \end{Bmatrix}_i$$



由于弯曲力矩而产生裂缝的话，将会产生轴向变形。

为了简化，忽略轴向力与弯曲的相互作用

$$p_{AB} = p_{AB}(e_{AB})$$

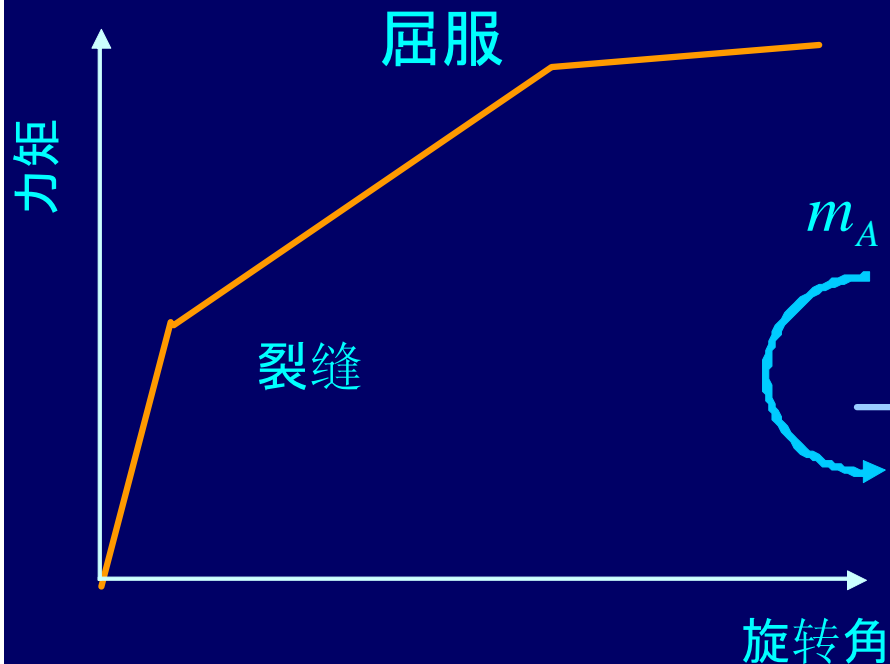


构件两端的弯曲与旋转角的相互作用

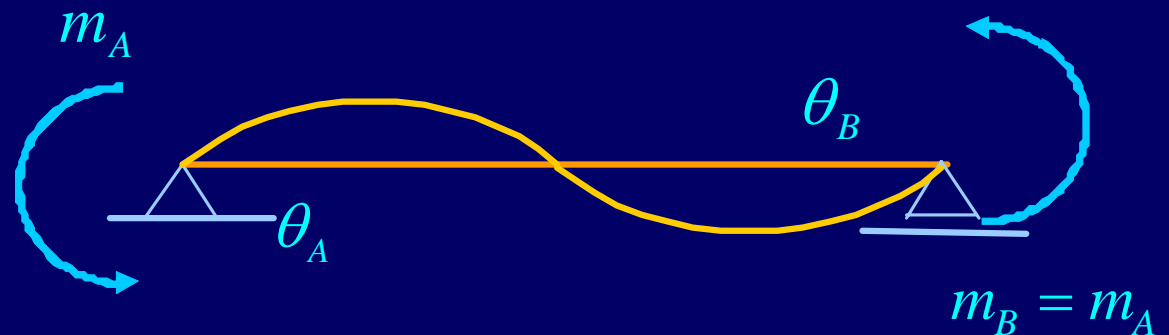
$$\begin{Bmatrix} \Delta m_A \\ \Delta m_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{22} & k_{23} \\ k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} m_A \\ m_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m(\theta_A, \theta_B) \\ m(\theta_A, \theta_B) \end{Bmatrix}$$

构件端力矩-旋转角关系

$$k_{23} = k_{32} \quad \text{矩阵的对称性}$$



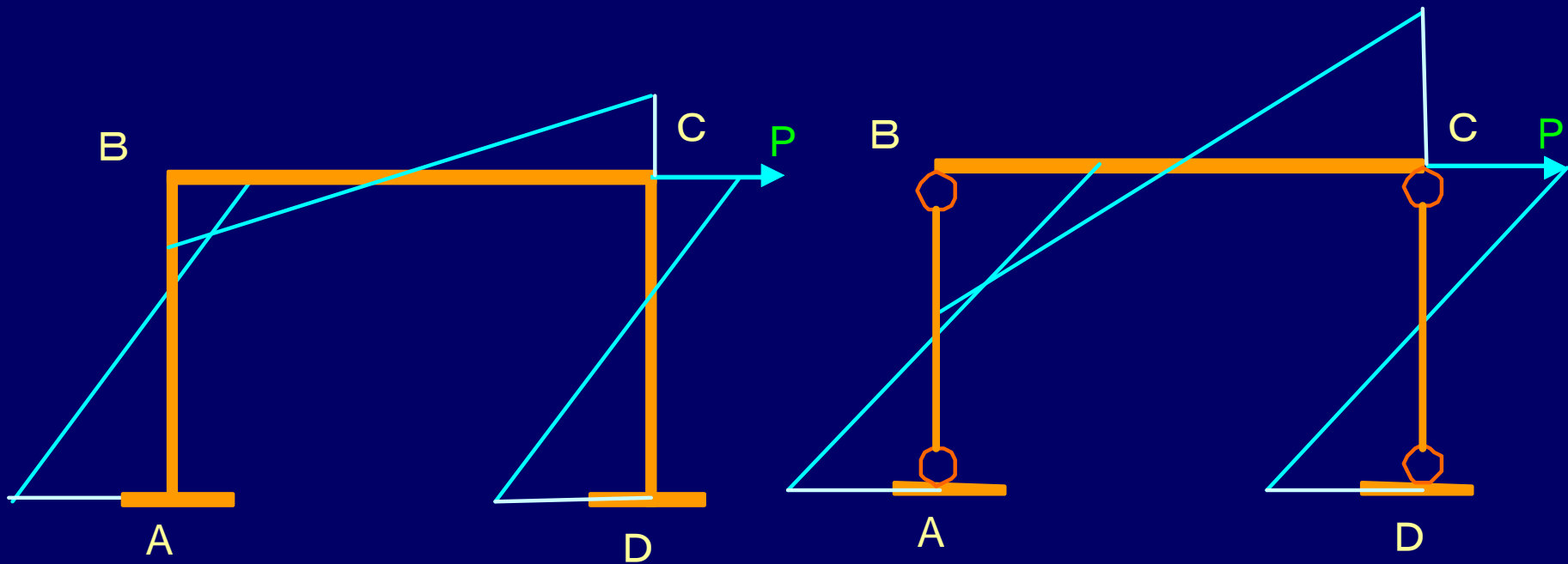
没有进行改变构件端力矩大小的实验 (逆对称弯曲实验)



钢筋混凝土的构件模型

表达构件内的损伤分布的模型

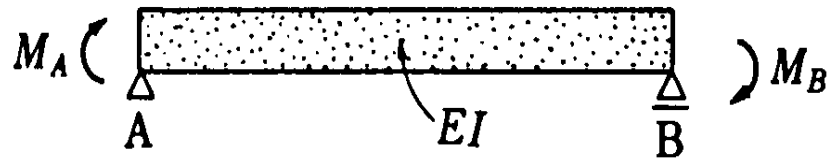
完全弹塑性铰链模型



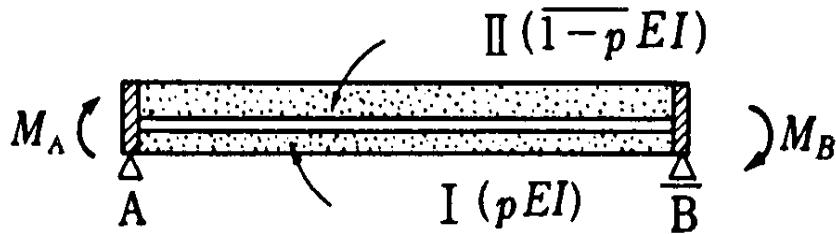
弹性反应

屈服后的铰链

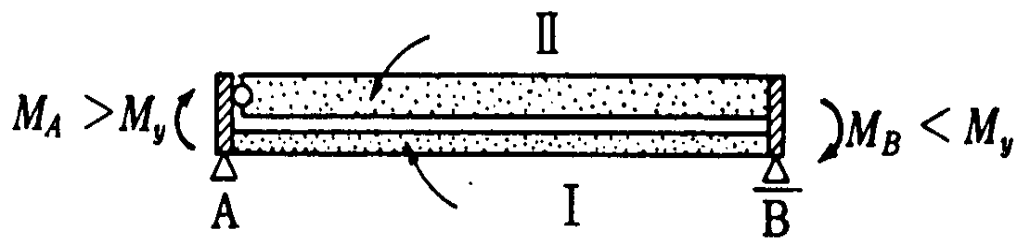
分割梁模型



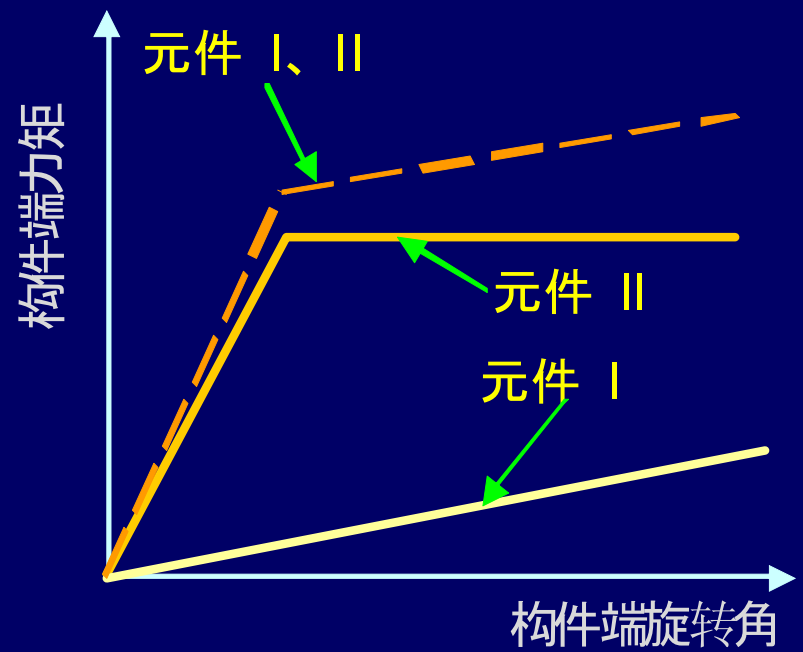
(a) 构件



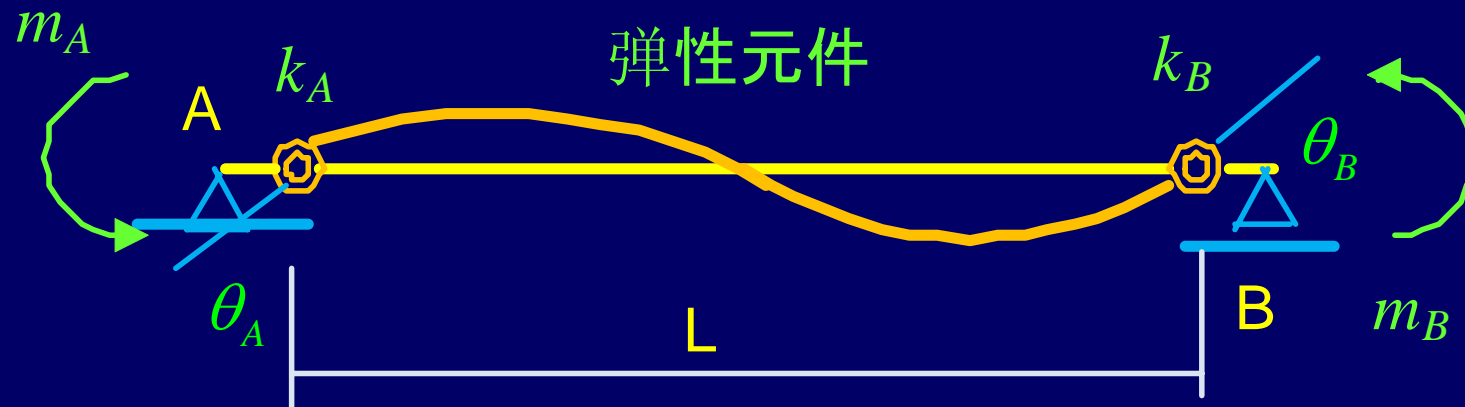
(b) 构件分割



(c) 左端屈服

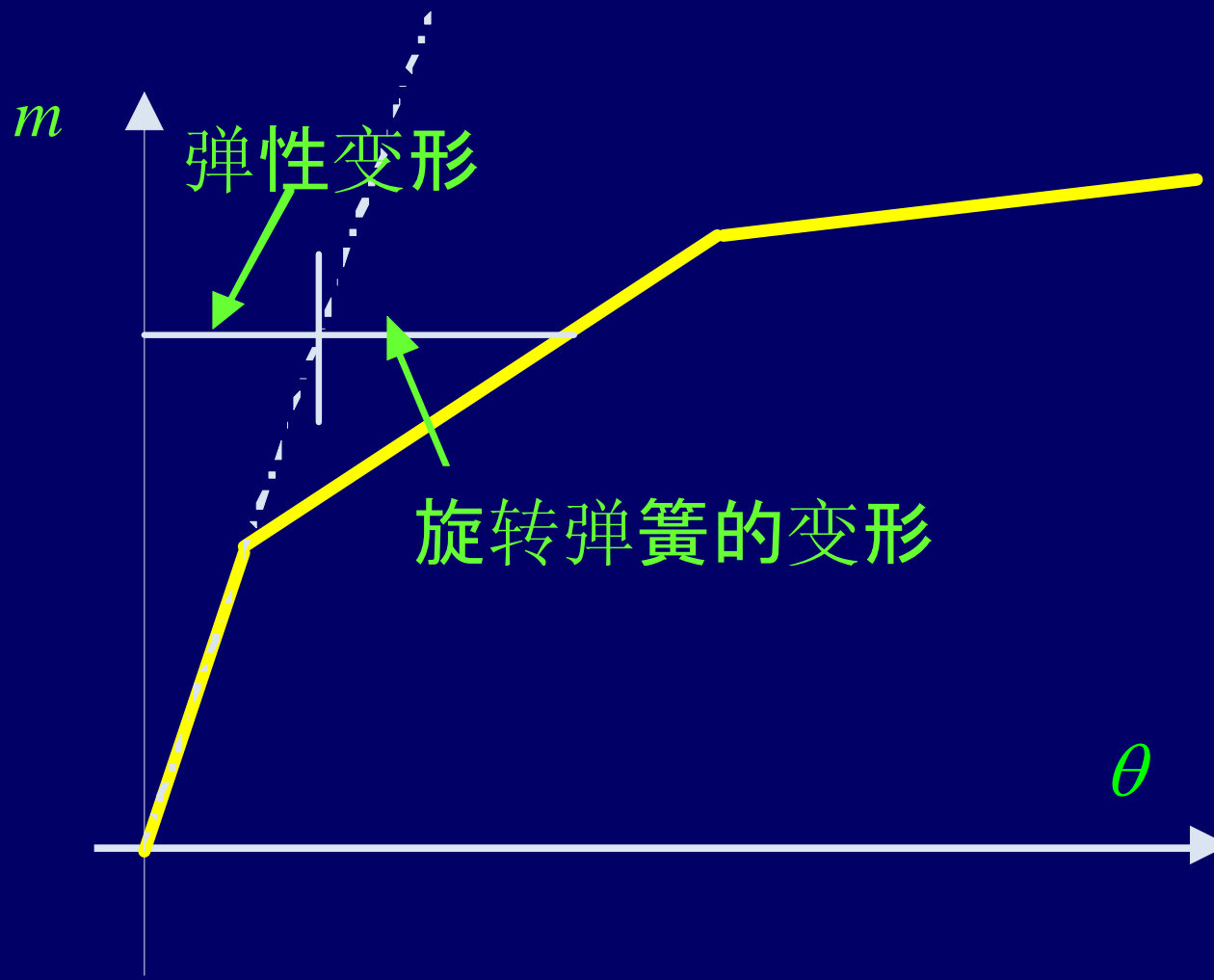


材端刚塑性旋转弹簧模型



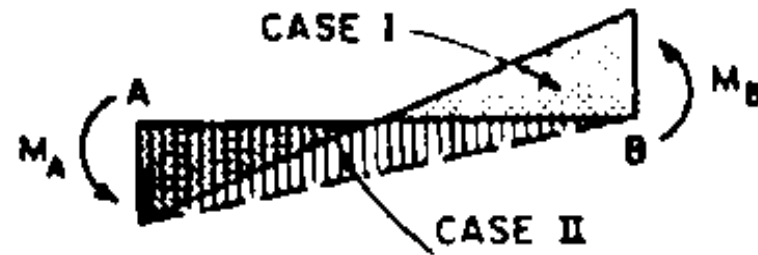
材端钢塑性旋转弹簧模型

材端刚塑性旋转弹簧模型

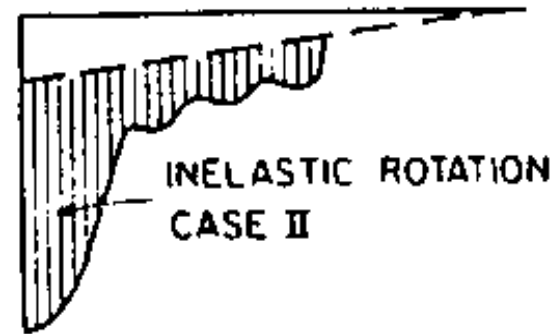
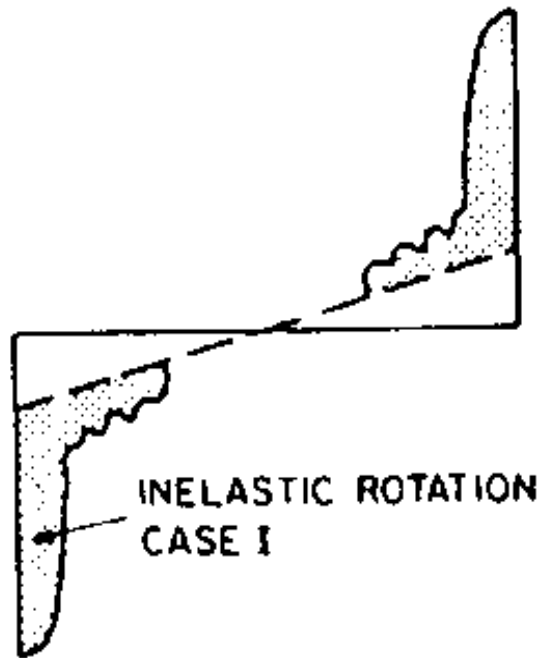


构件端弯曲力矩-旋转角关系

材端刚塑性旋转弹簧模型

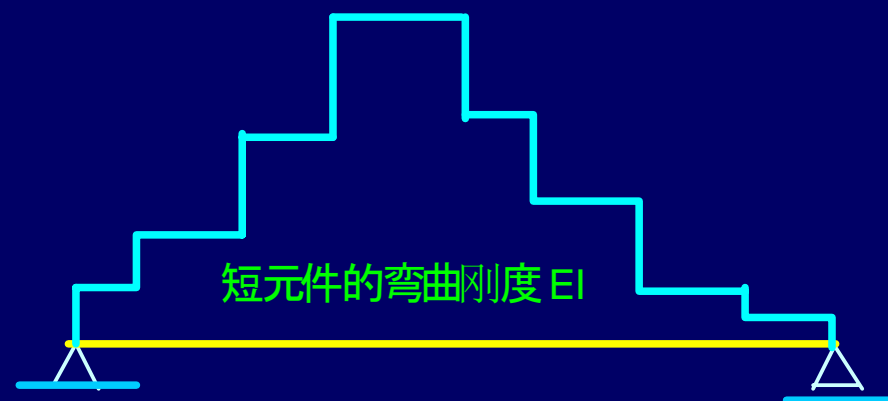
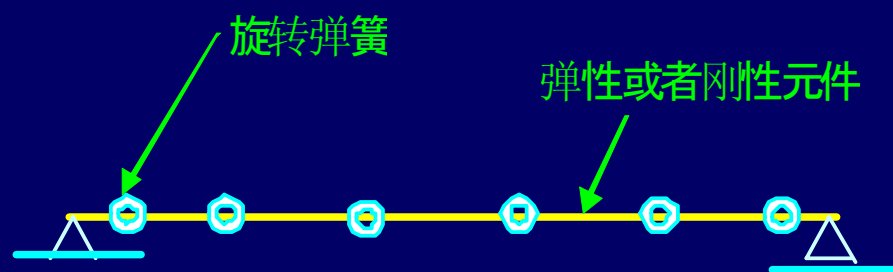


(a)



(b)

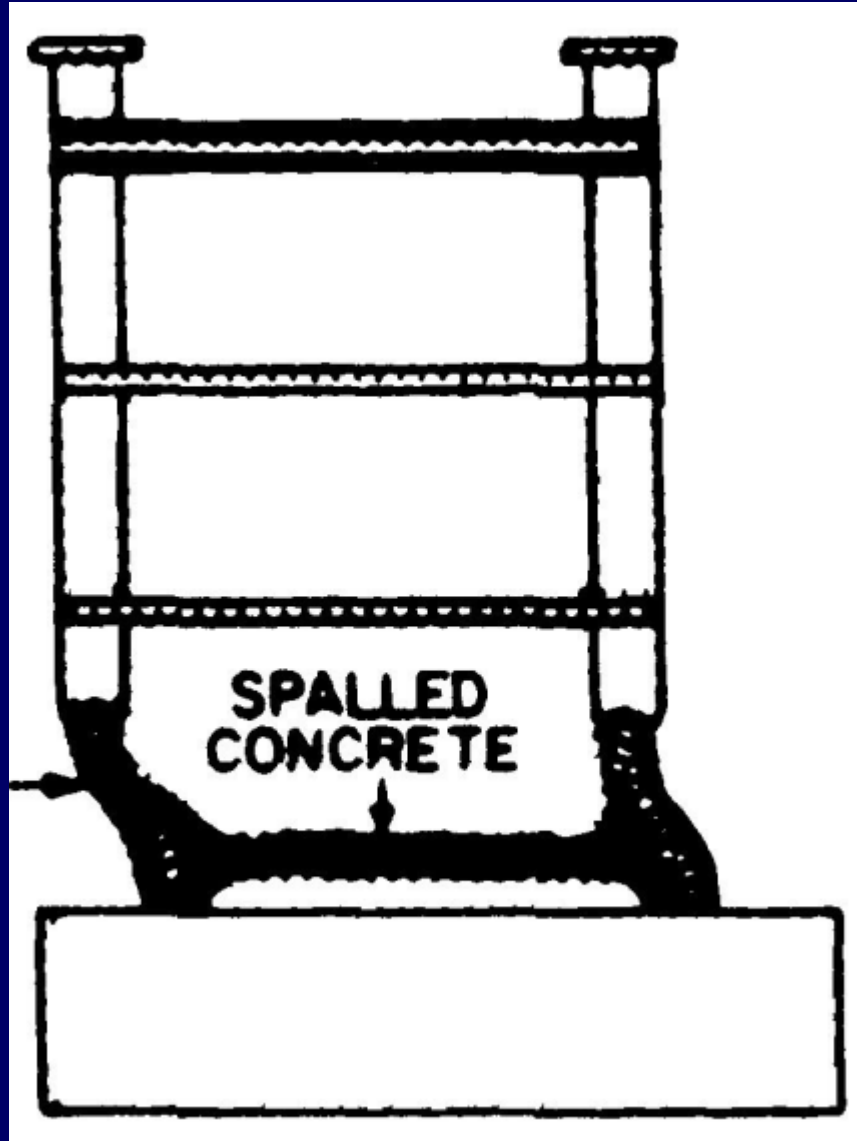
将构件在长度方向上进行分割的模型



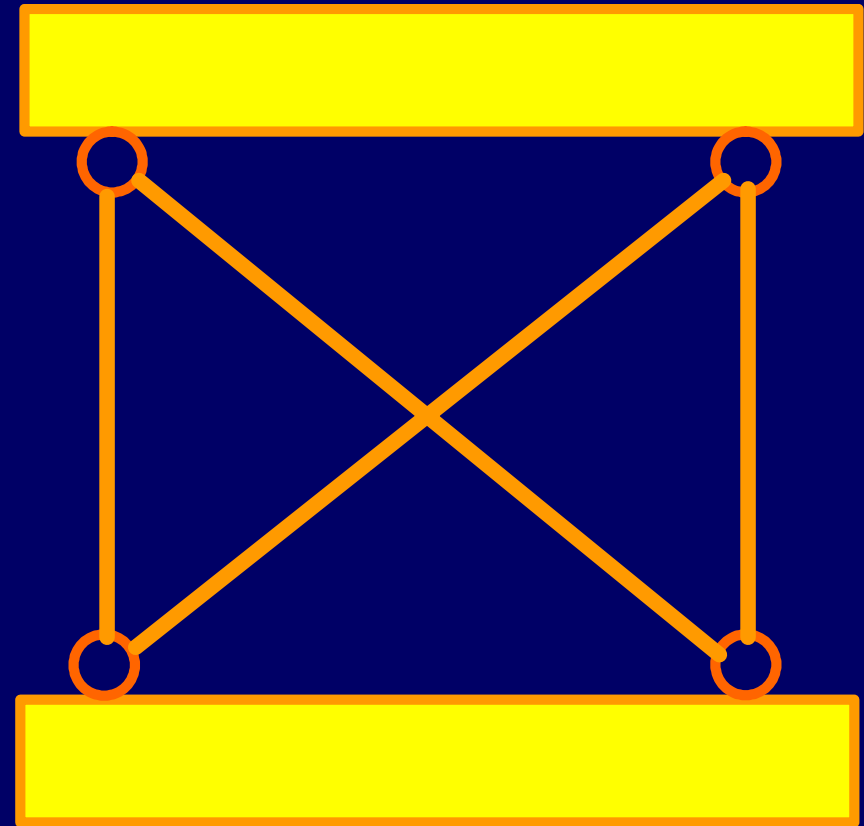
连层抗震墙模型



连层抗震墙模型

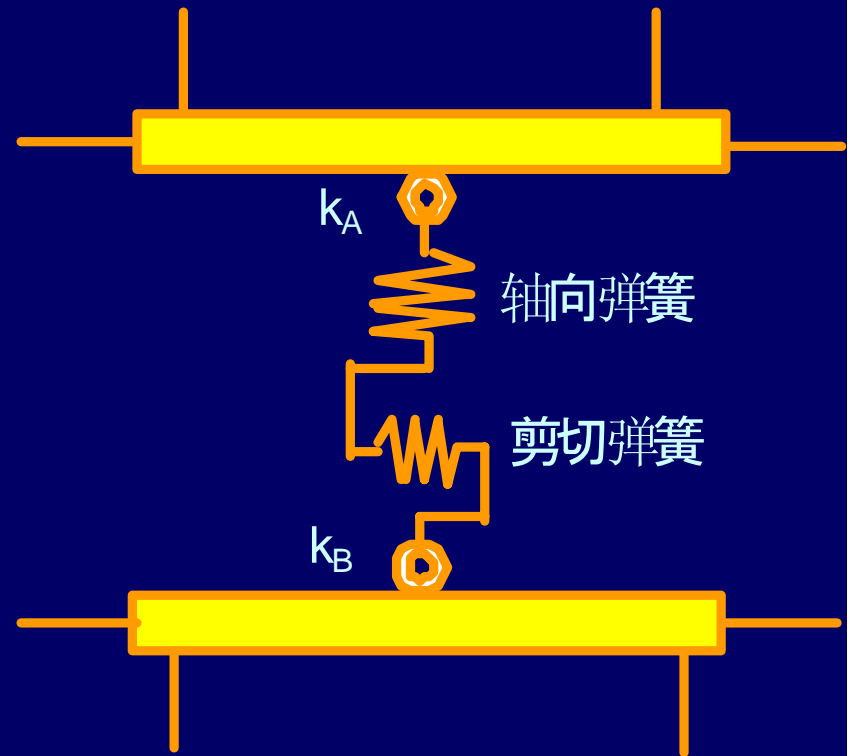


剪切变形的对角撑模型



连层抗震墙模型

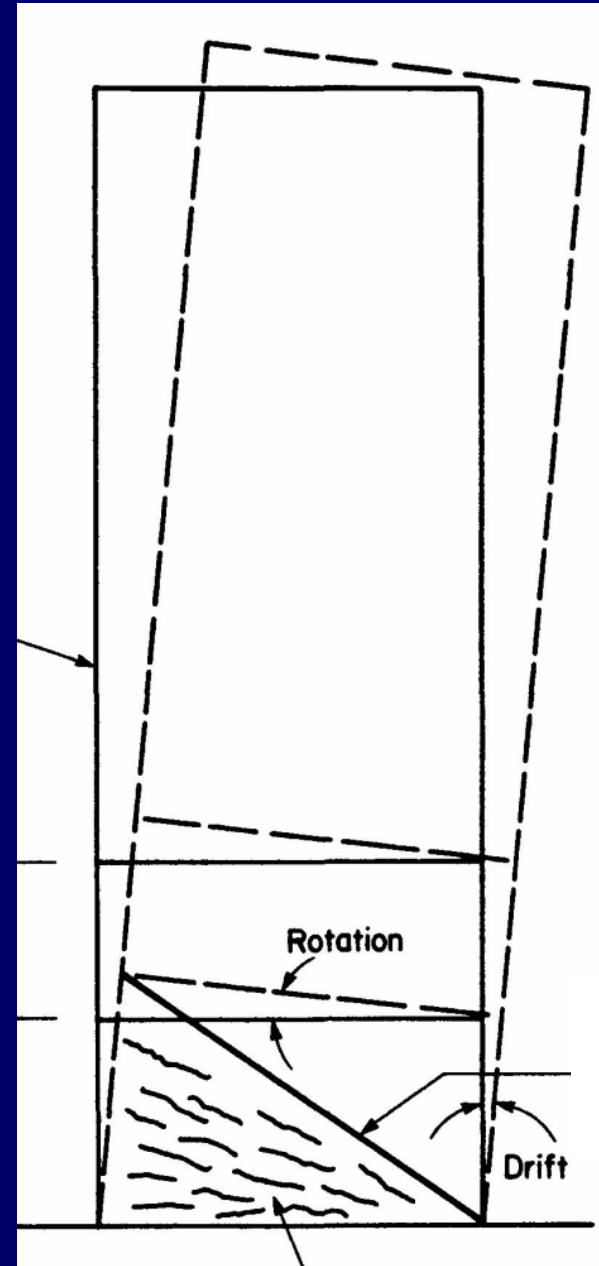
通过墙截面中央的柱模型



连层抗震墙模型

细长抗震墙变形

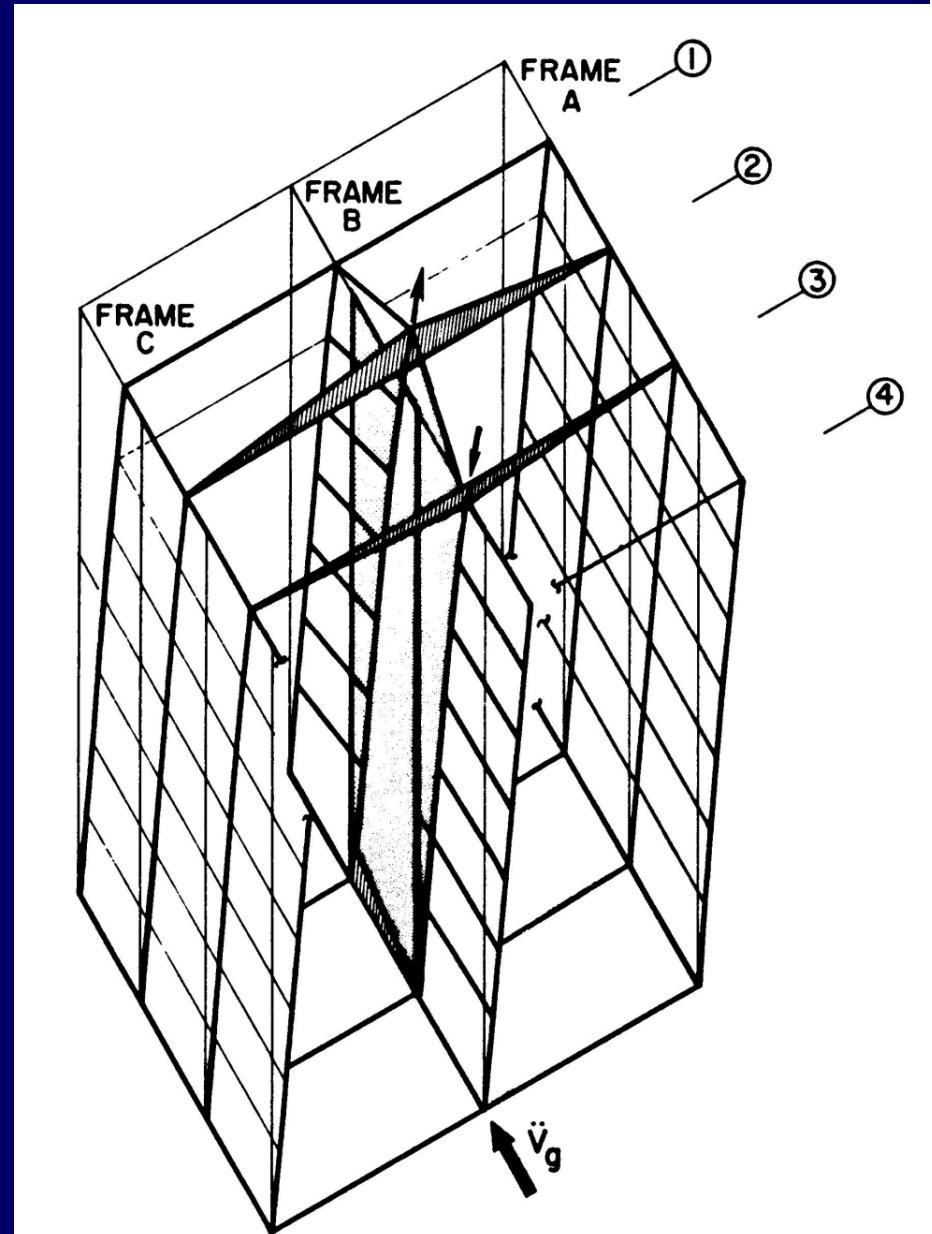
中性轴出现移动，拉伸侧出现较大伸长变形



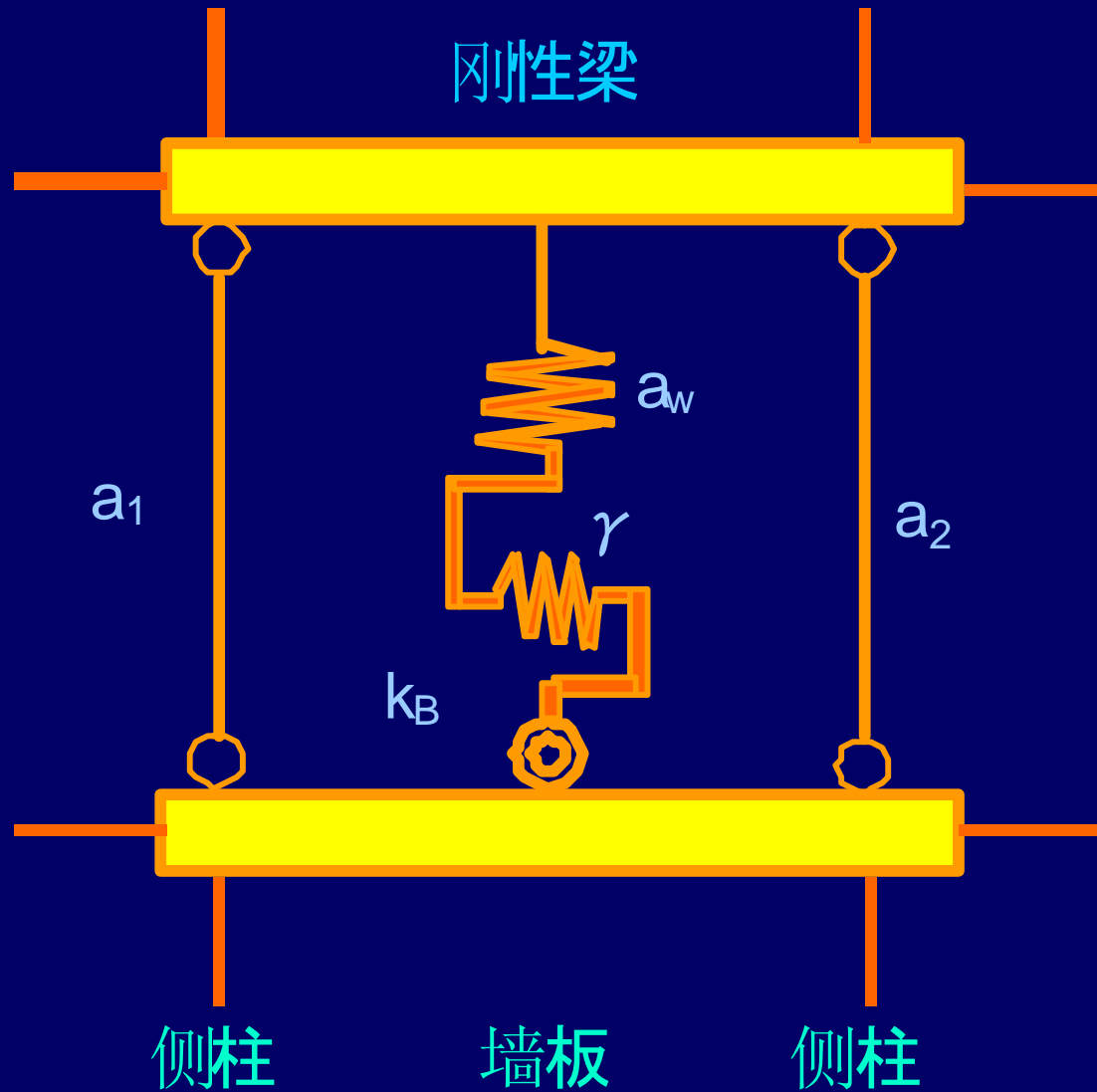
连层抗震墙模型

抗震墙的三维效果

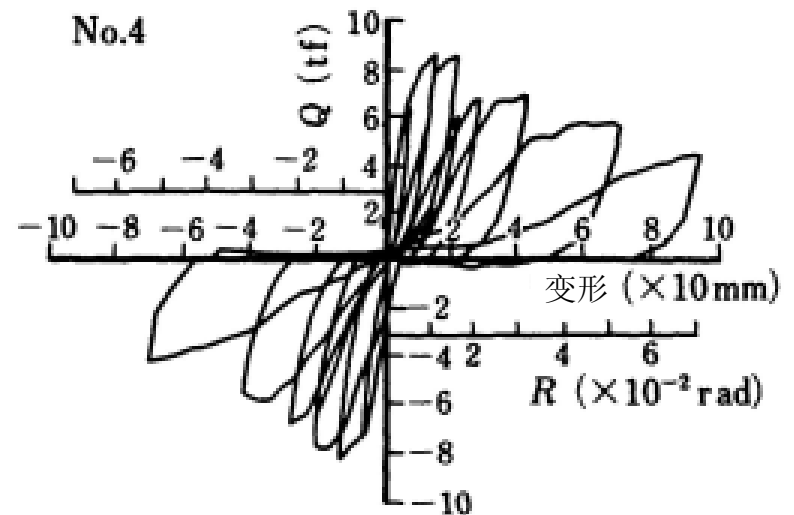
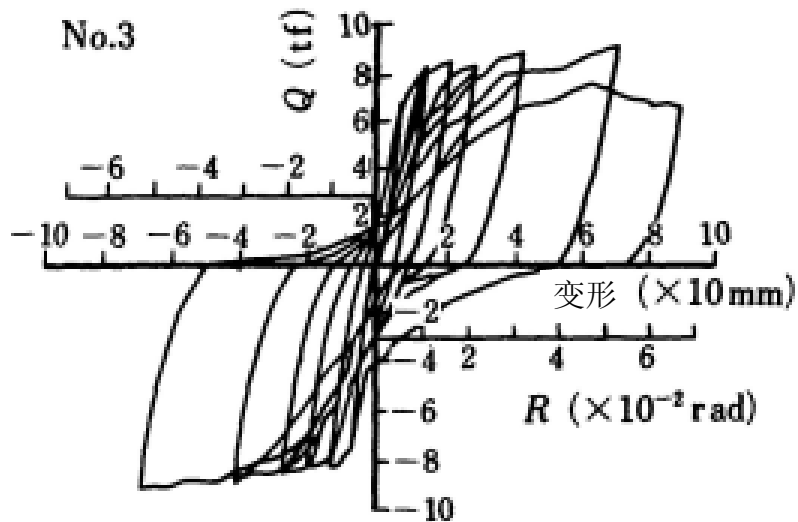
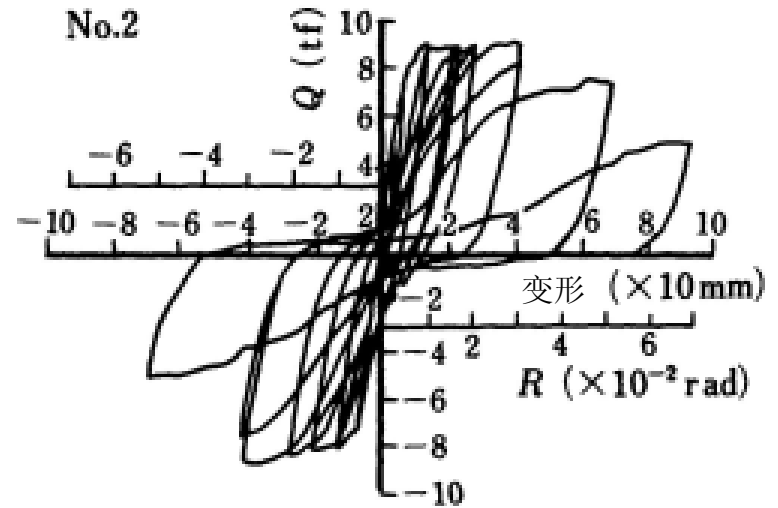
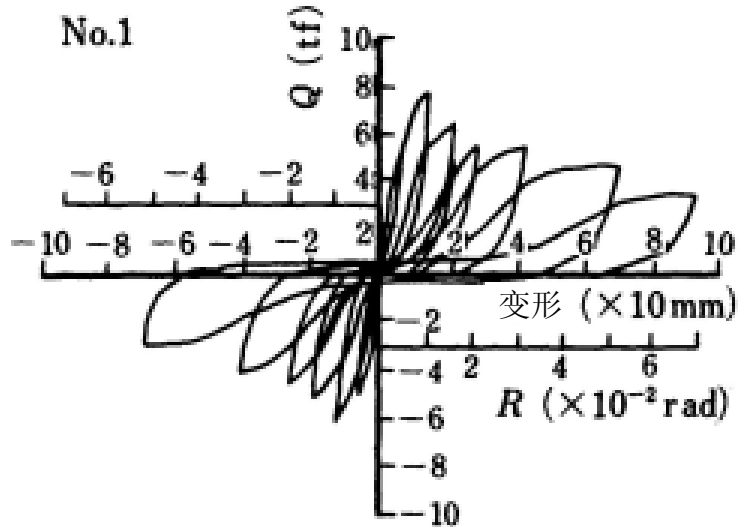
拉伸侧的向上位移使得与其垂直方向上的梁出现较大的变形。



墙谷泽 Model

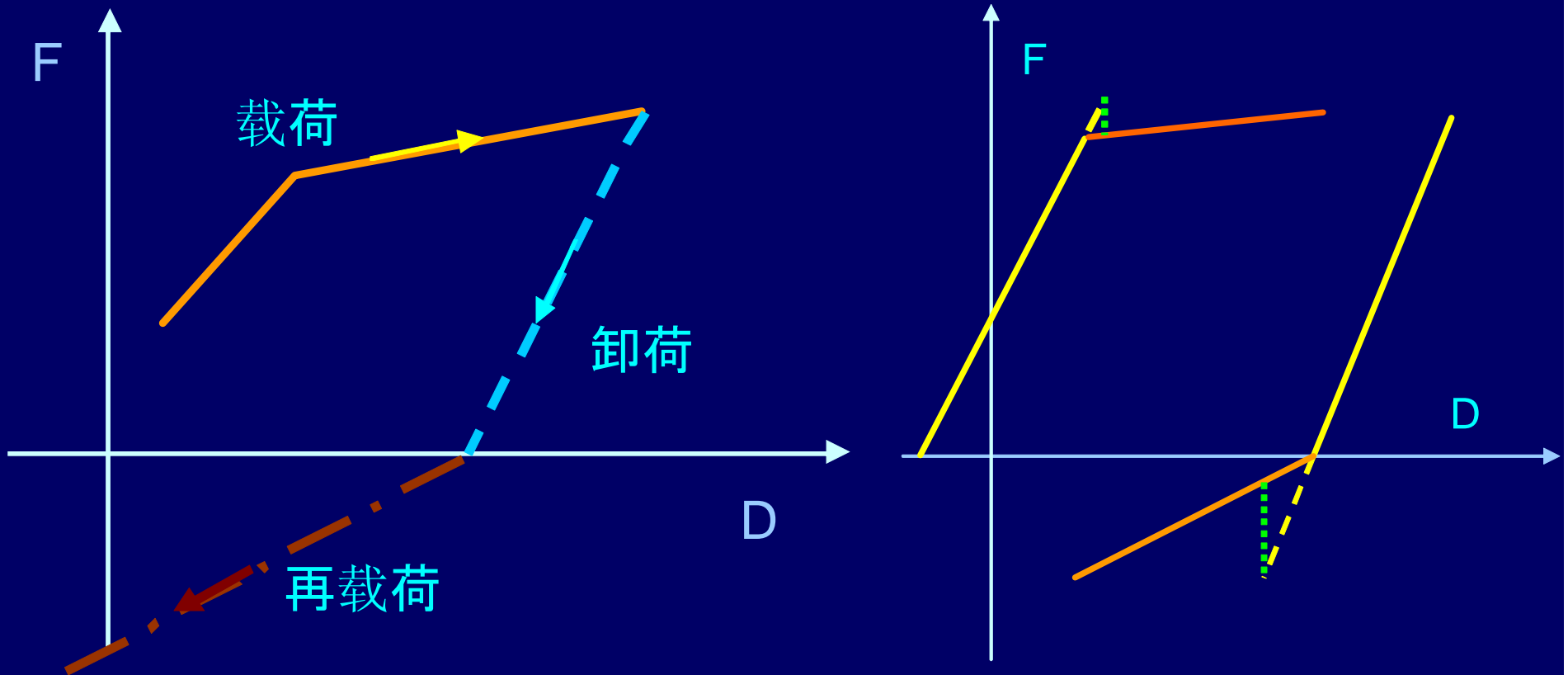


钢筋混凝土构件的荷载-变形关系

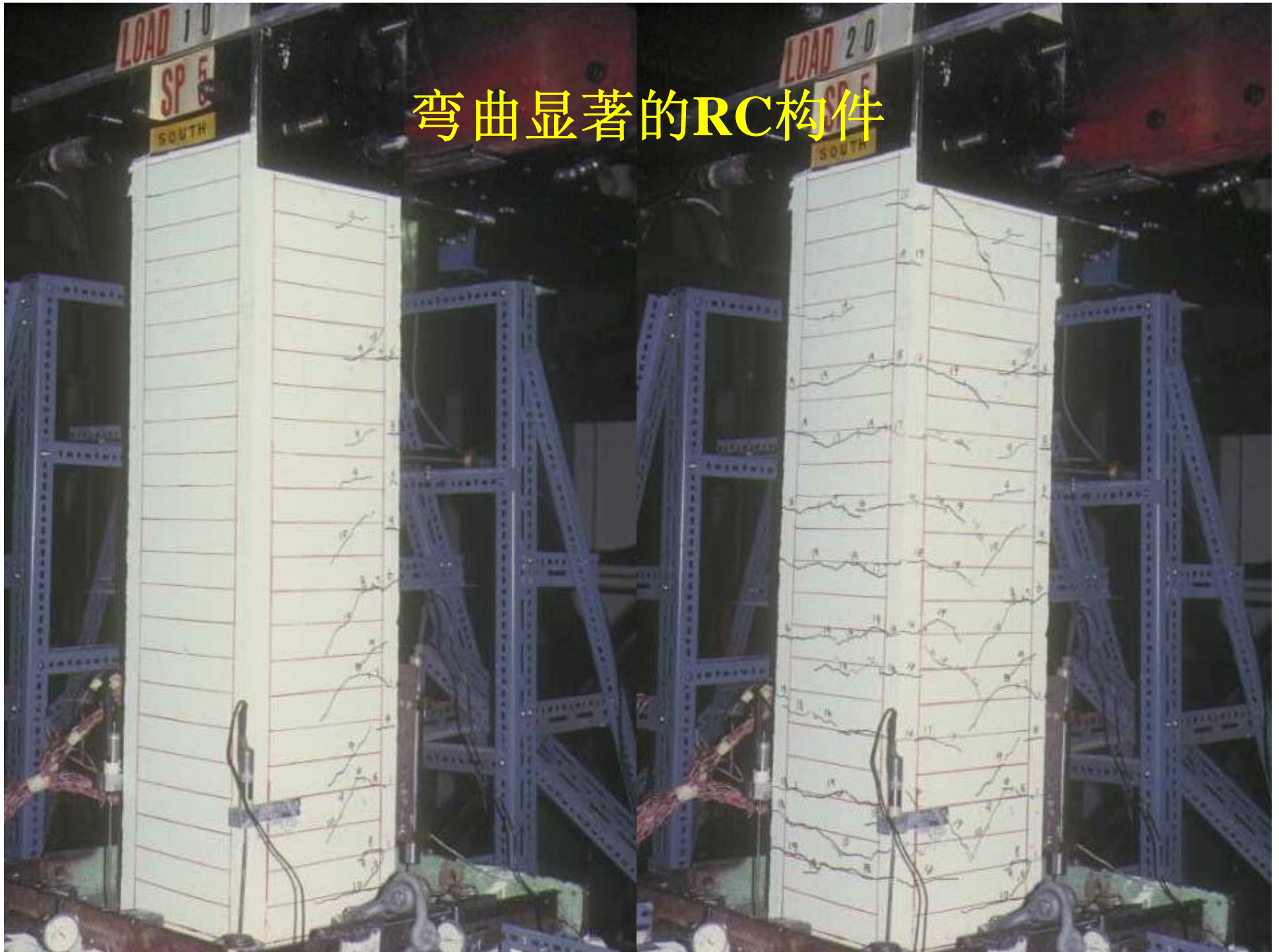


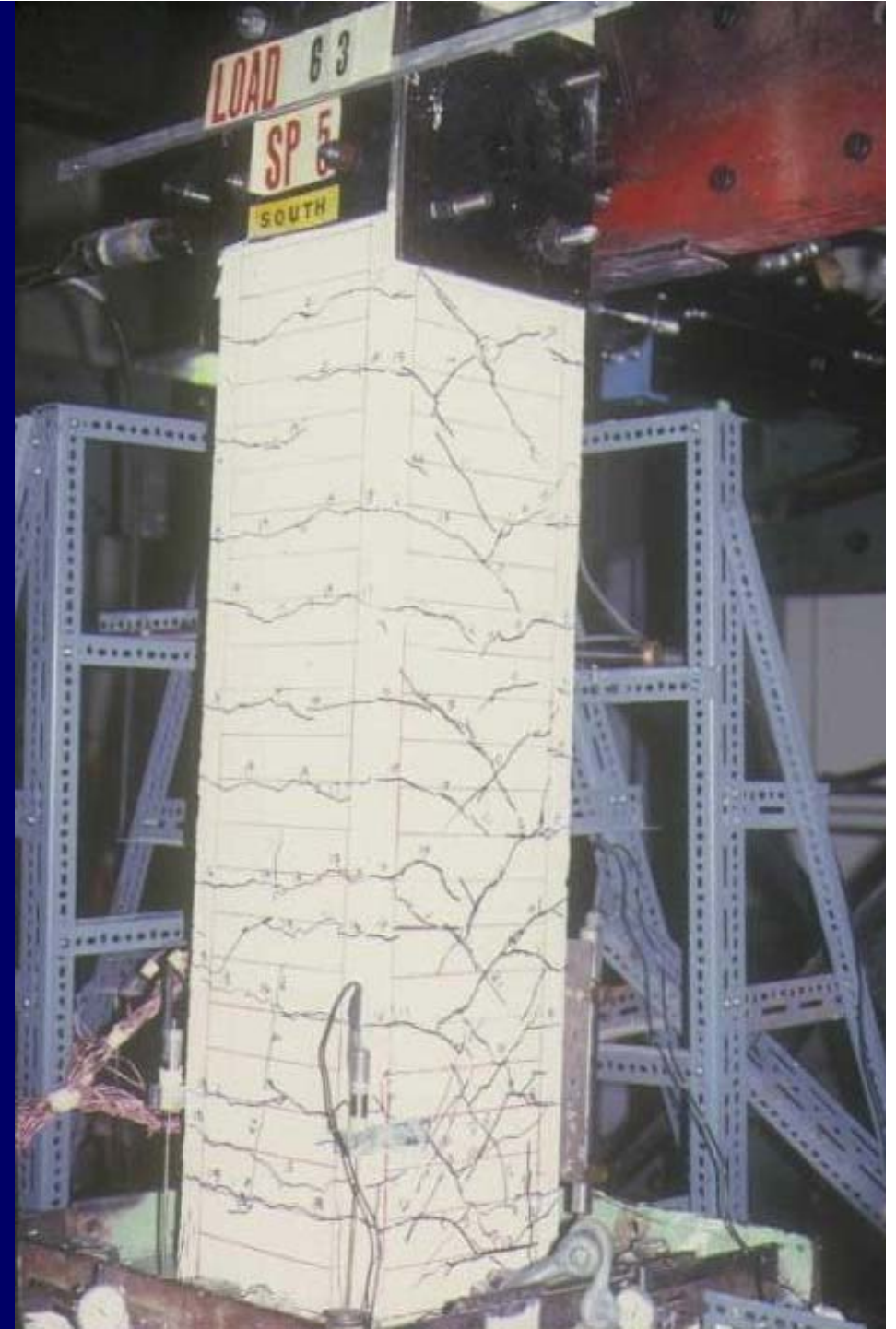
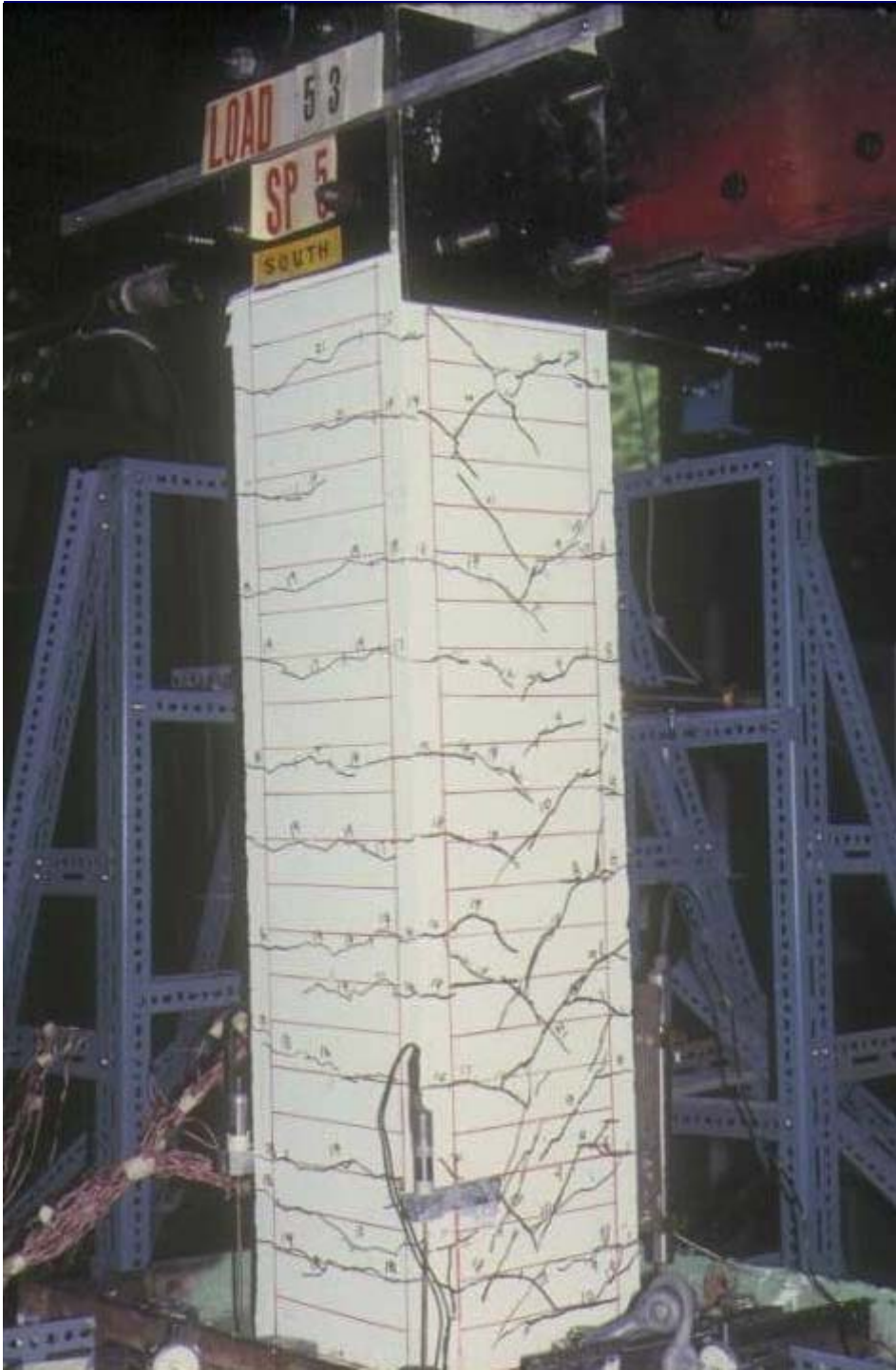
滞后模型的必要条件

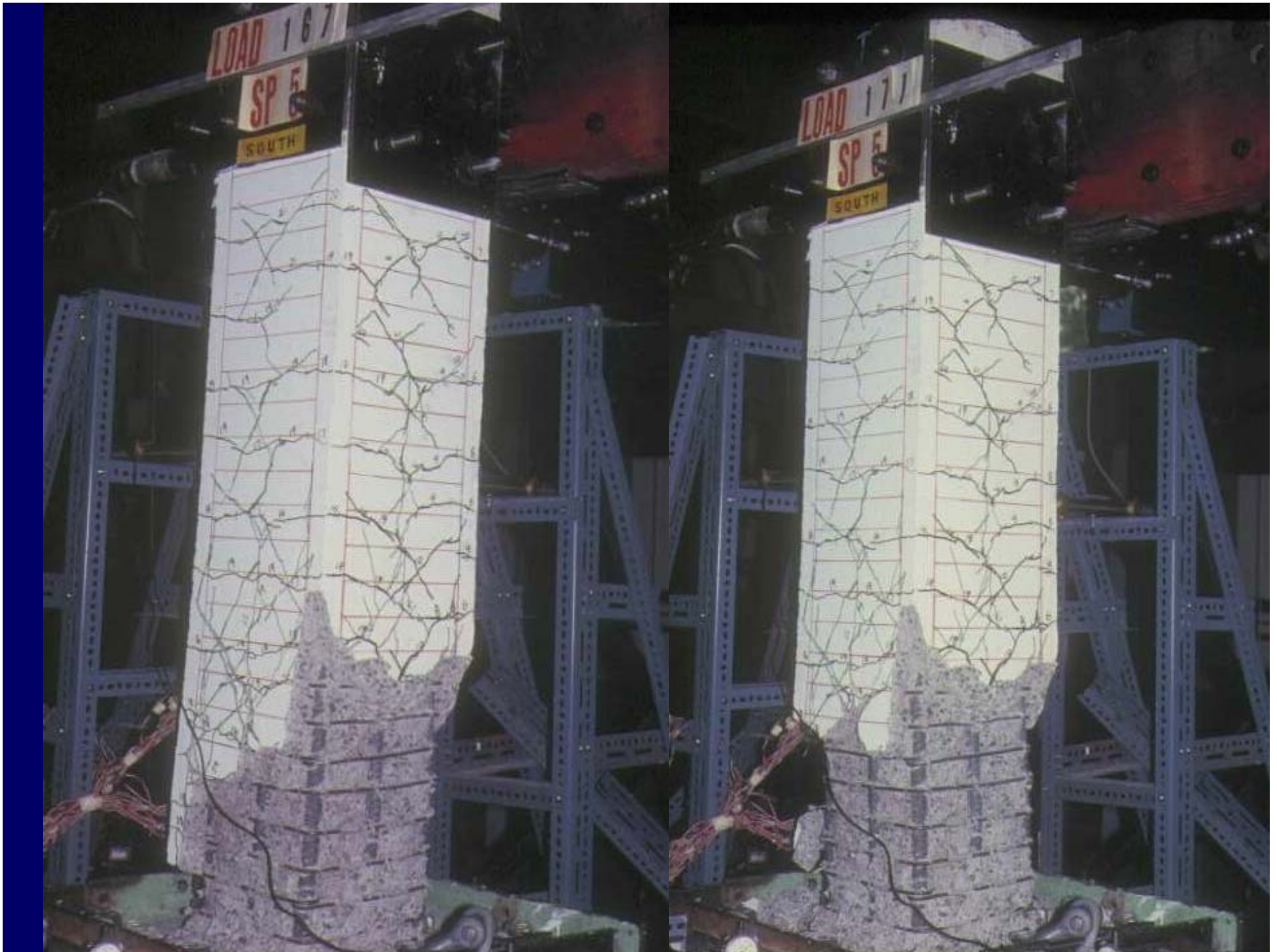
- 与所有的荷载滞后相对应
- 给予相对于位移的屈服强度
- 在低应力下的刚度变化 (overshooting)



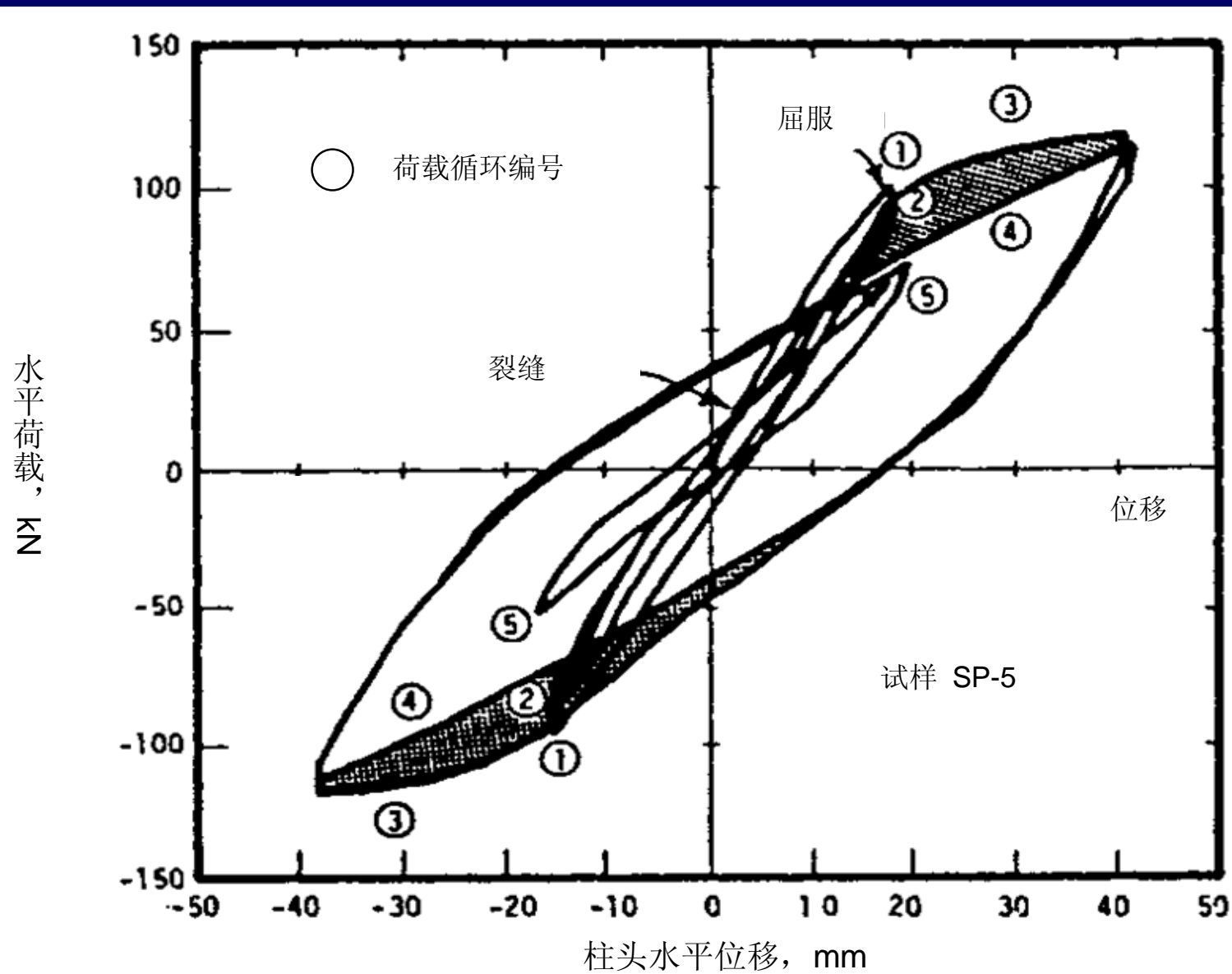
弯曲显著的RC构件



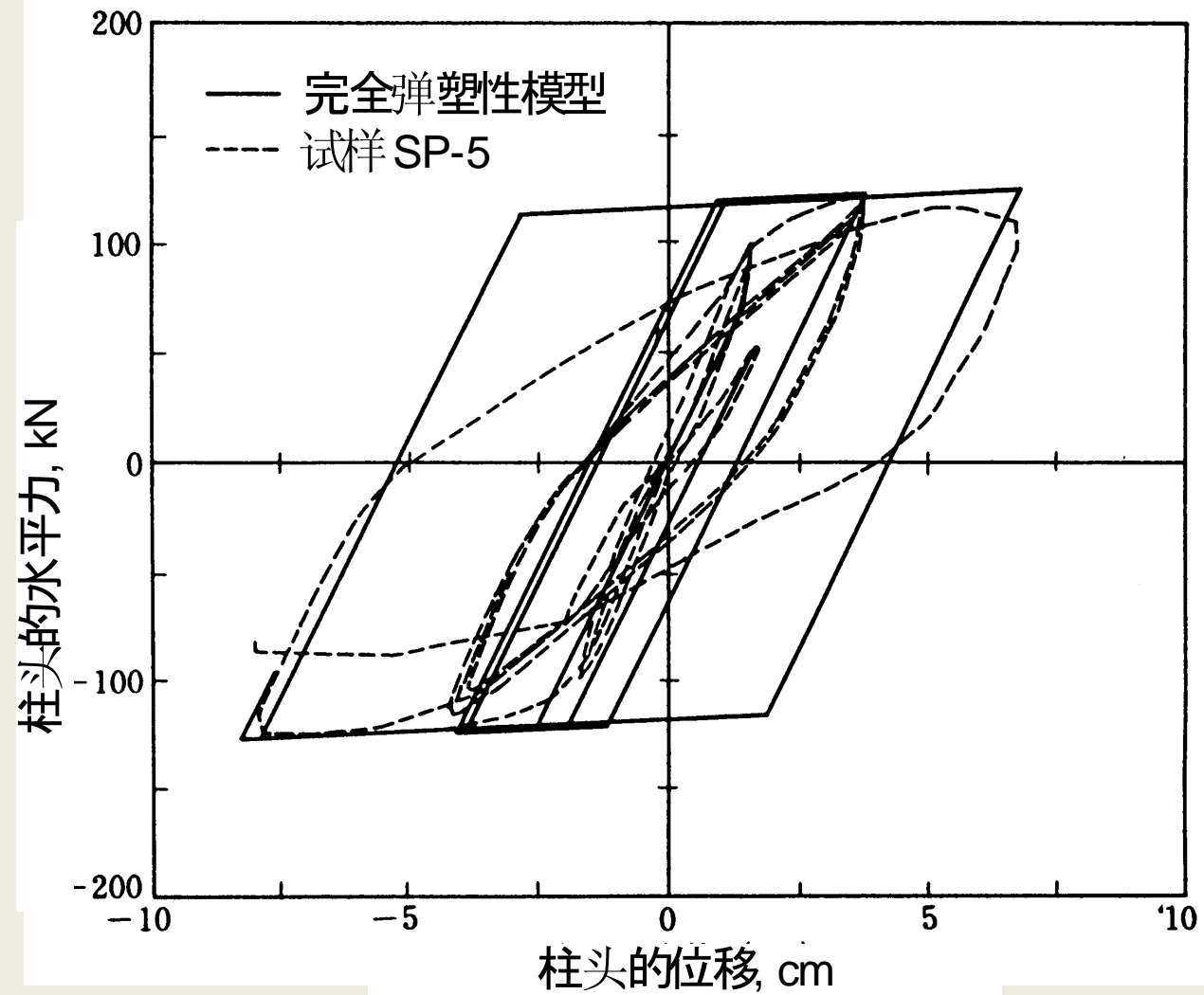




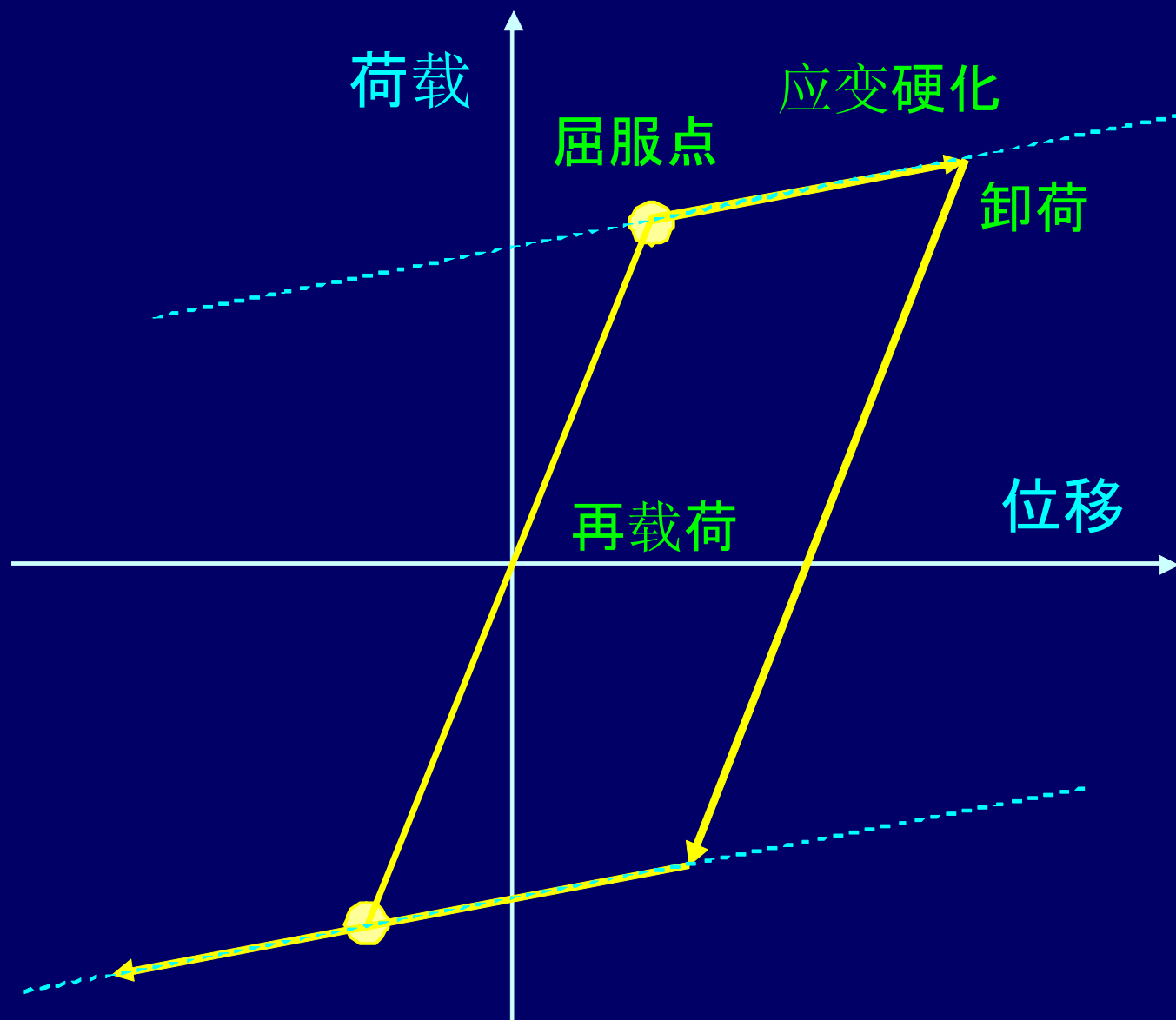
钢筋混凝土结构构件的滞后模型



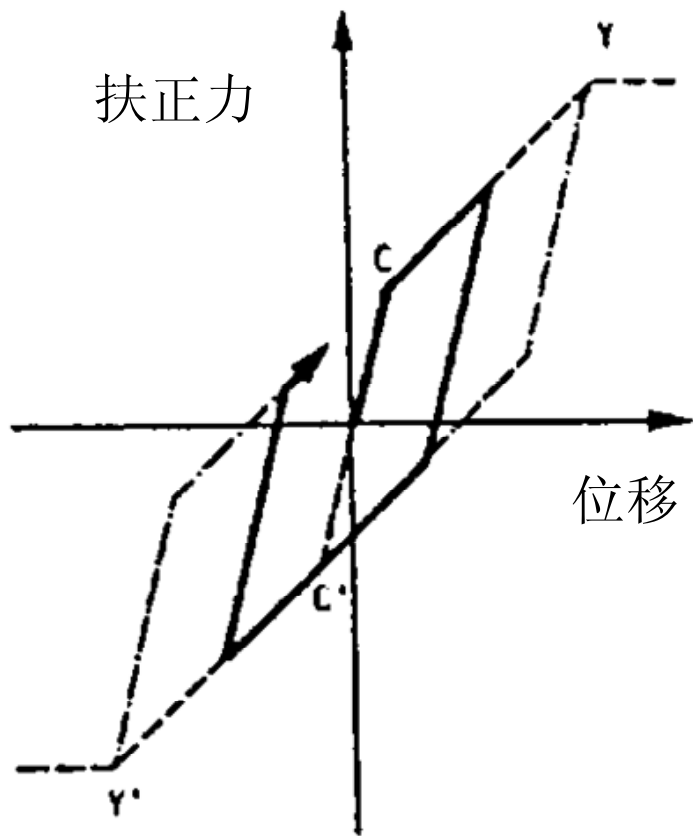
完全弹塑性模型



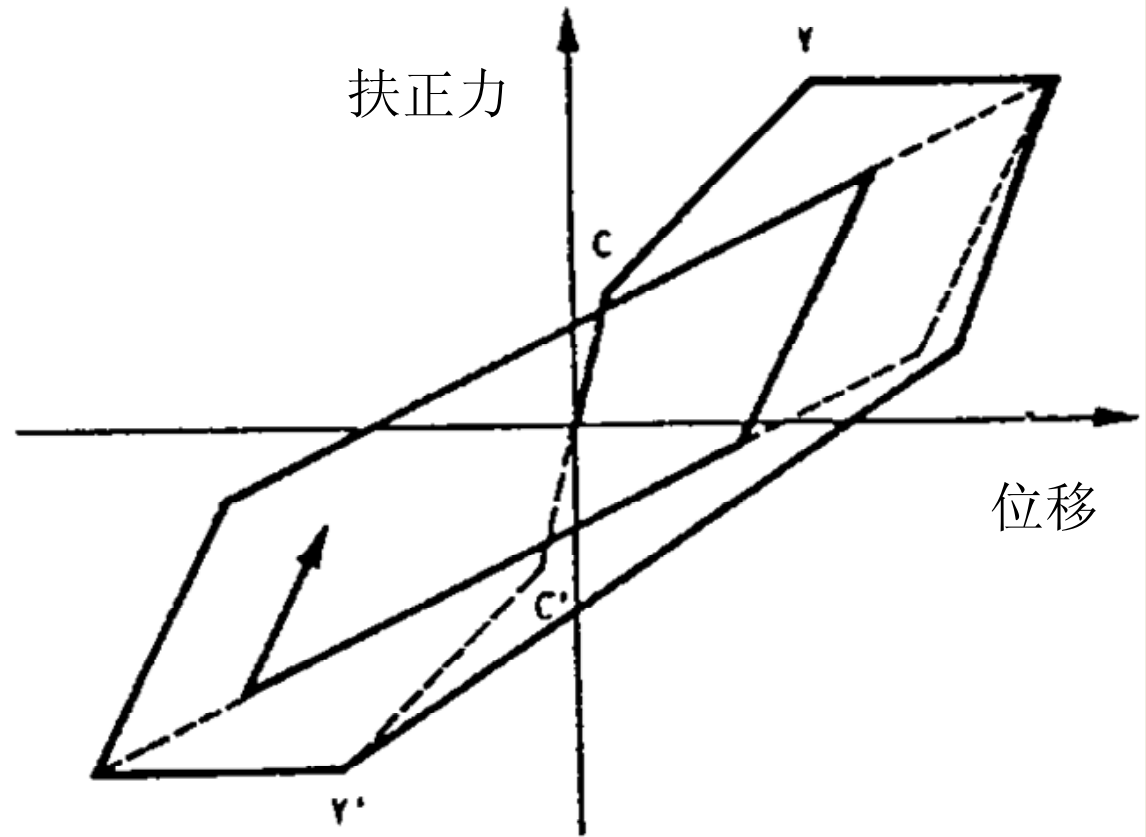
Bilinear Model



刚度下降型三线性模型

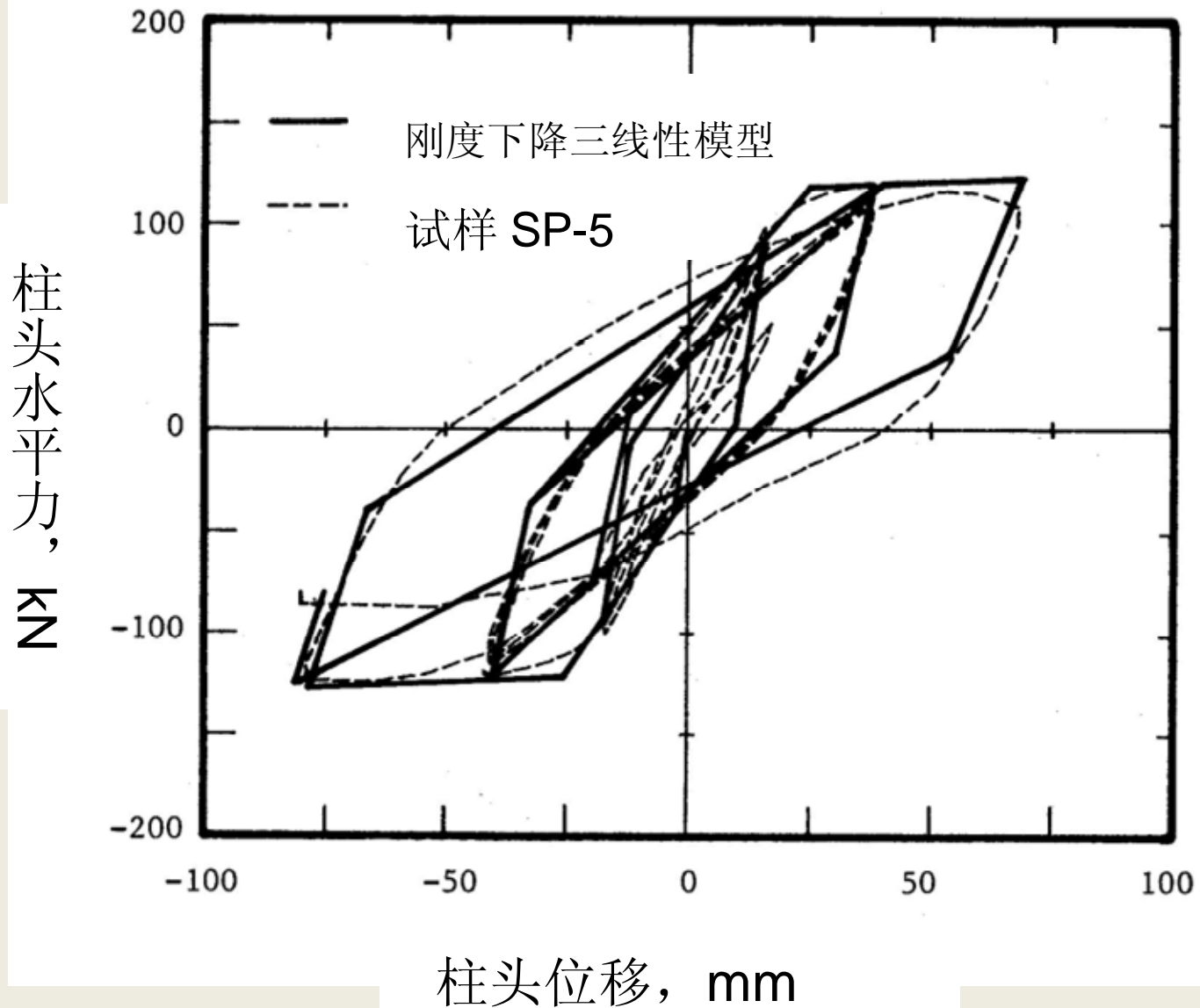


(a) 弯曲屈服前



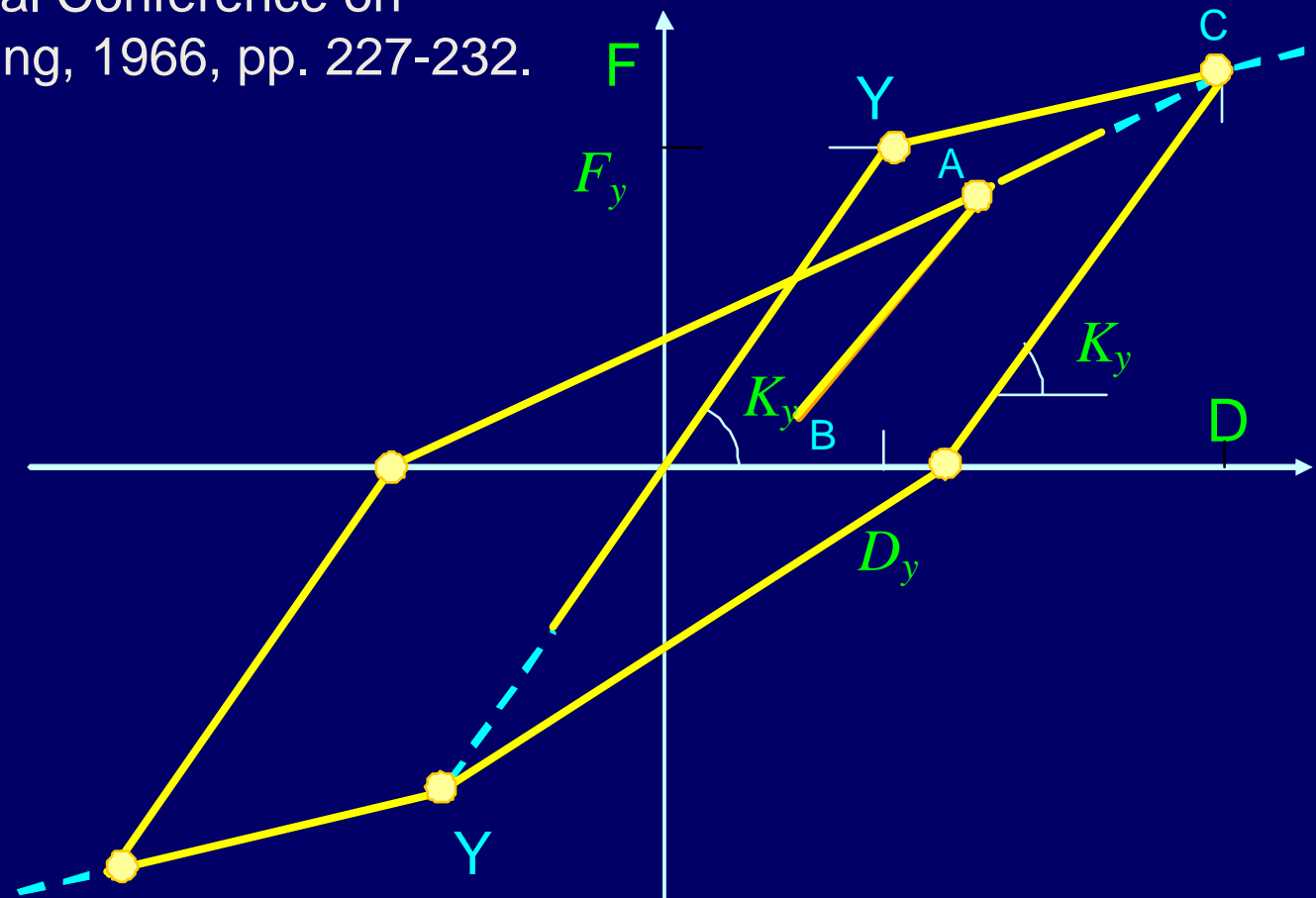
(b) 弯曲屈服后

钢筋混凝土结构构件的滞后模型

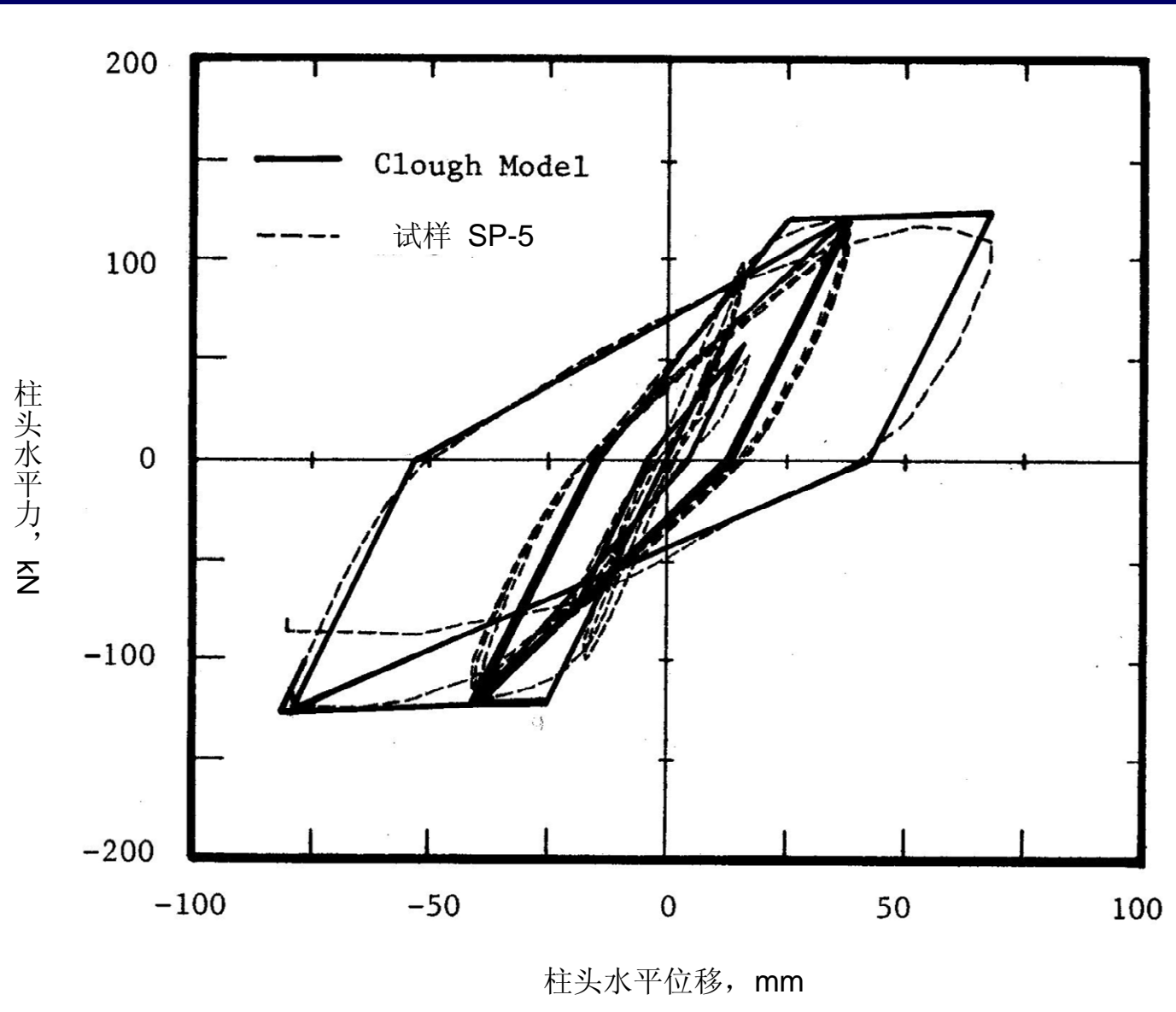


Clough Model

Clough, R. W., and S. B. Johnston, "Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements," Proceedings, Second Japan National Conference on Earthquake Engineering, 1966, pp. 227-232.

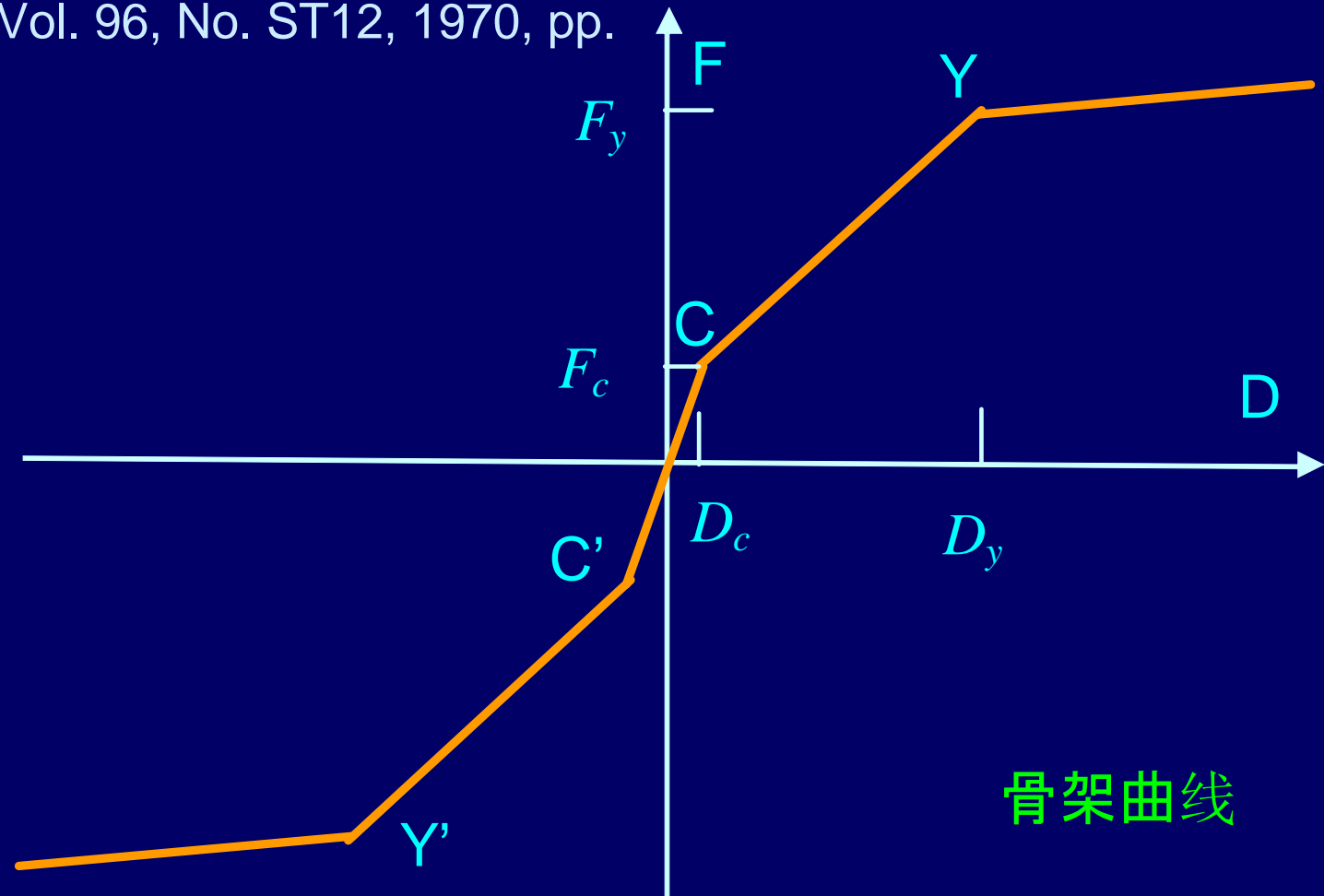


Clough Model



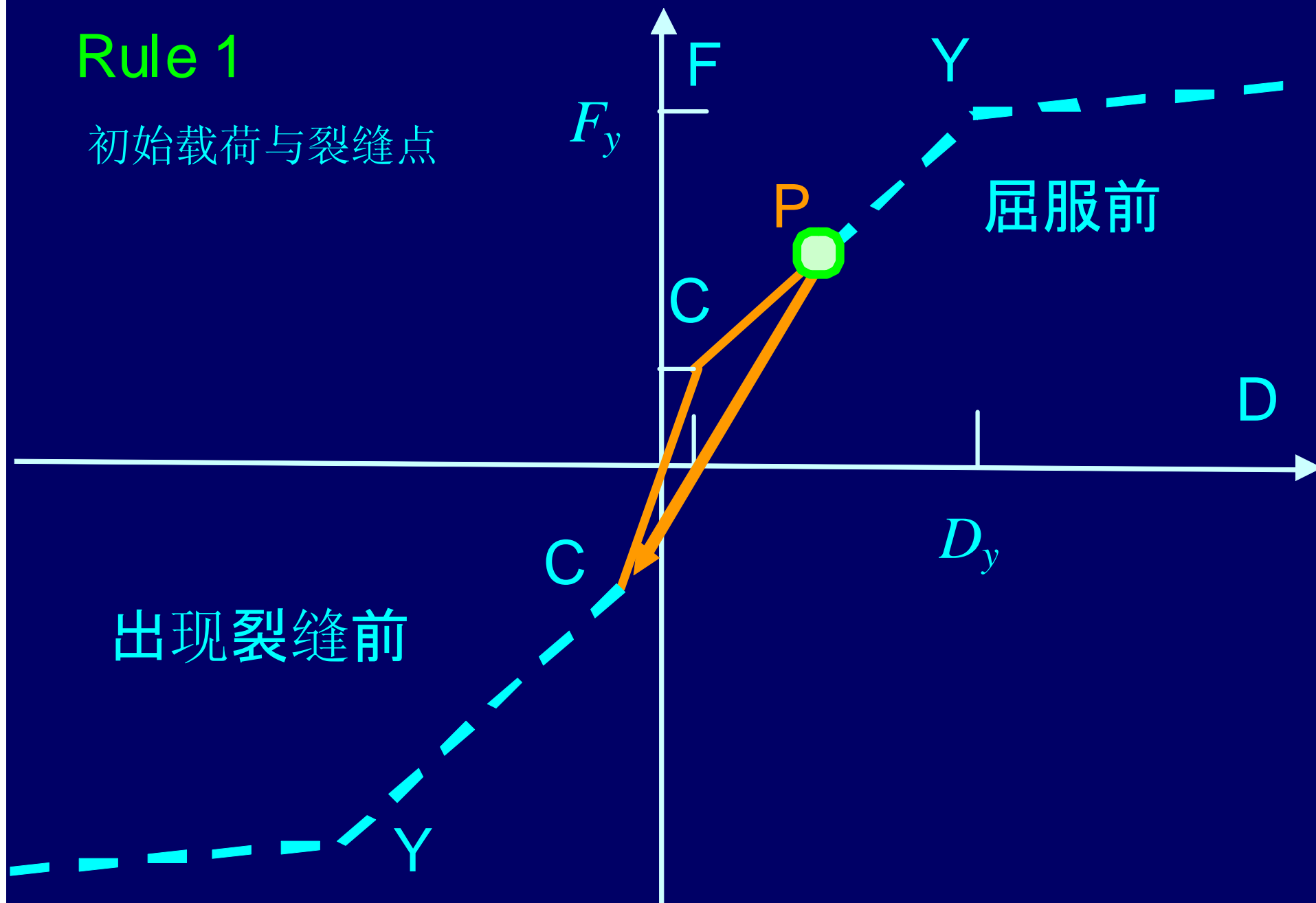
Takeda Degrading Model

Takeda, T., M. A. Sozen and N. N. Nielsen,
"ReinfoRCed Concrete Response to
Simulated Earthquakes," Journal, Structural
Division, ASCE, Vol. 96, No. ST12, 1970, pp.
2557-2573.



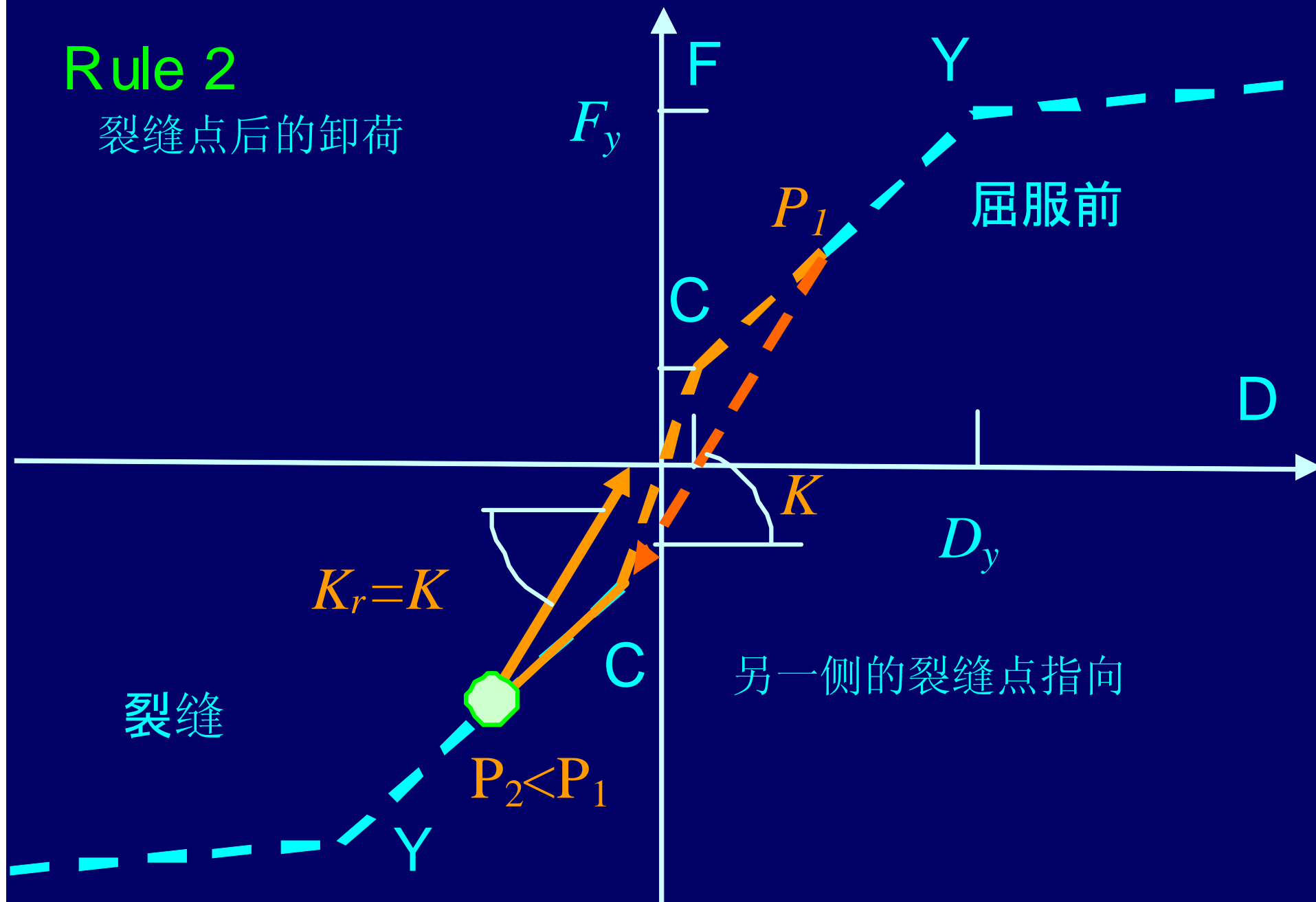
Rule 1

初始载荷与裂缝点



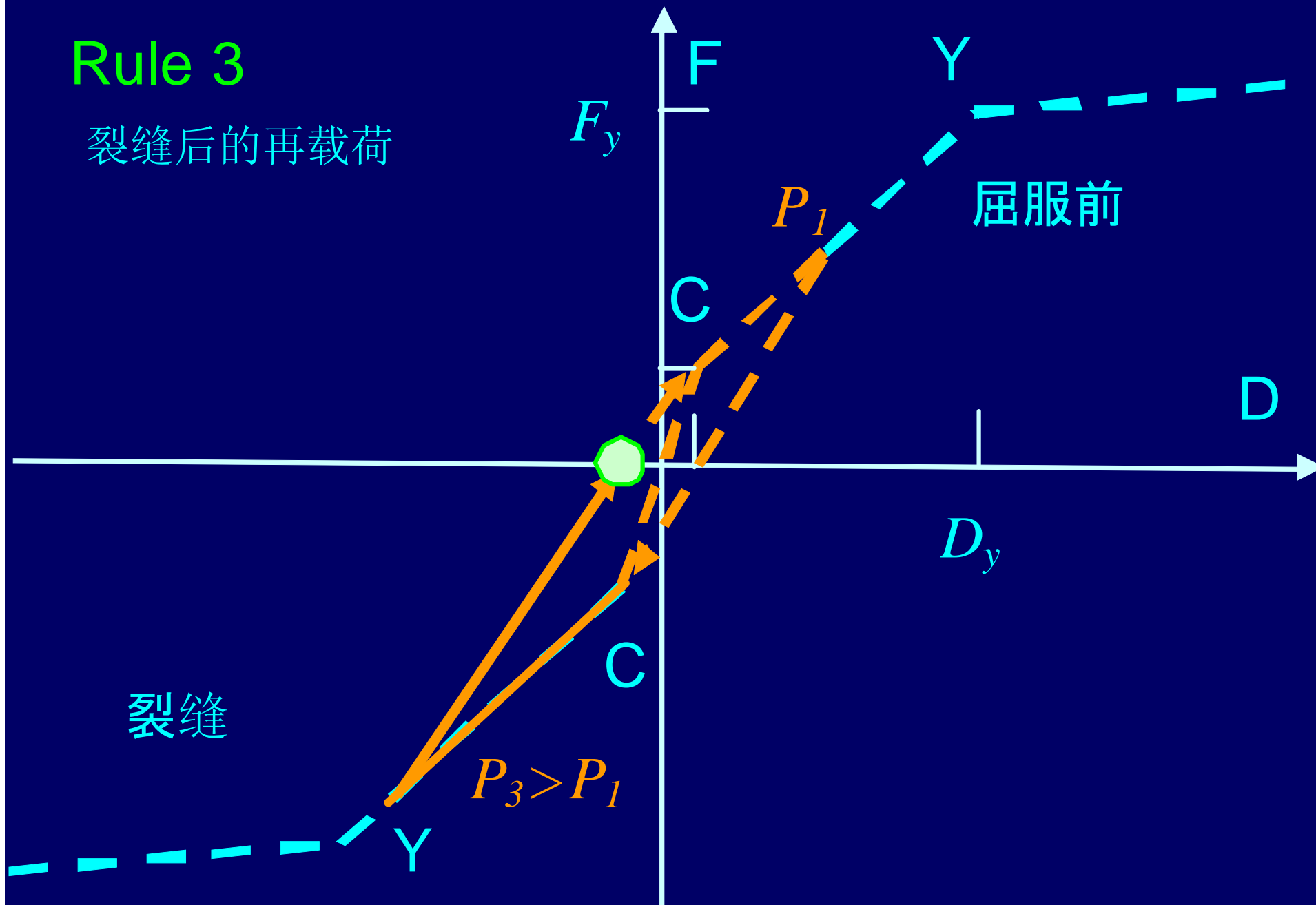
Rule 2

裂缝点后的卸荷



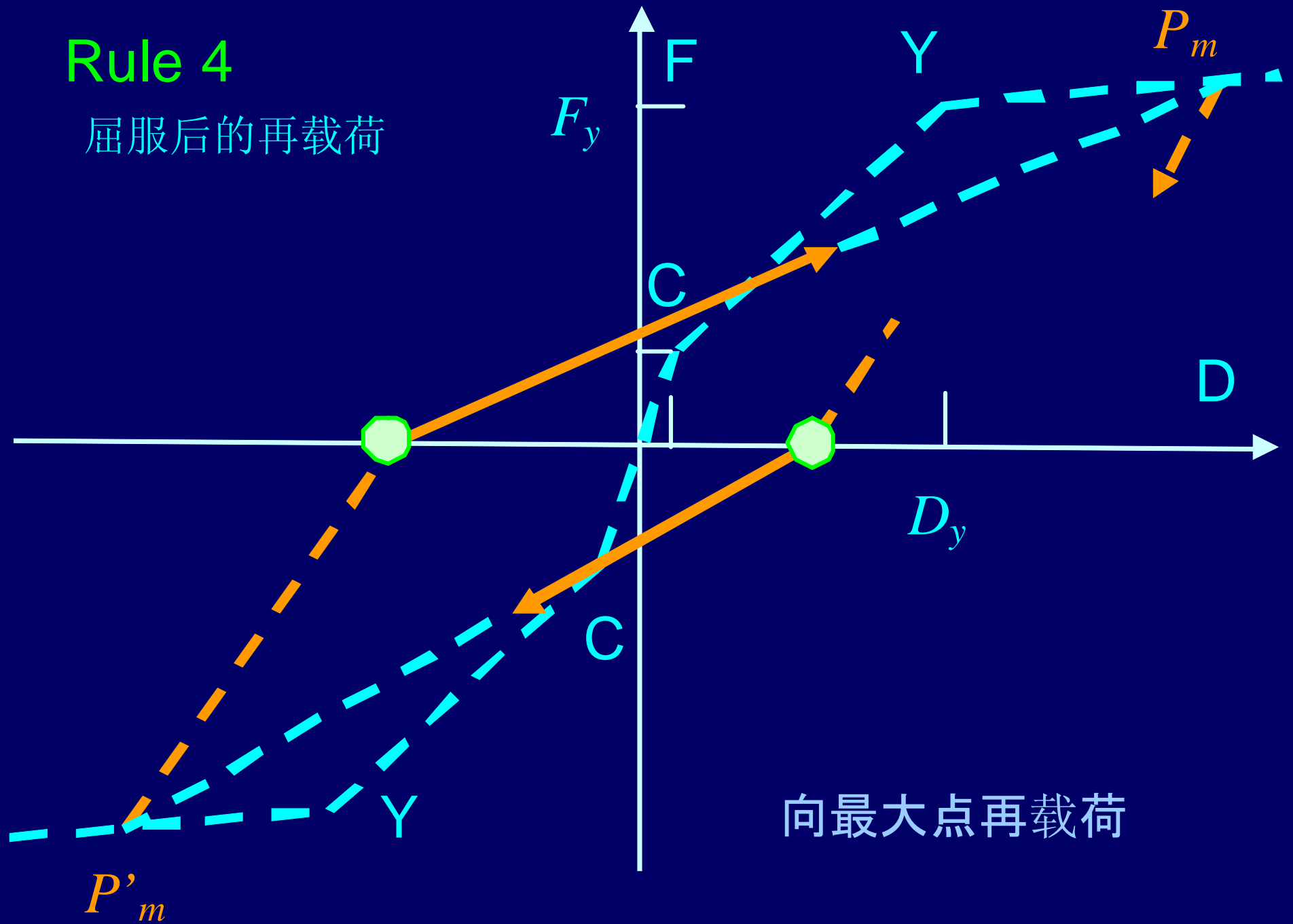
Rule 3

裂缝后的再载荷



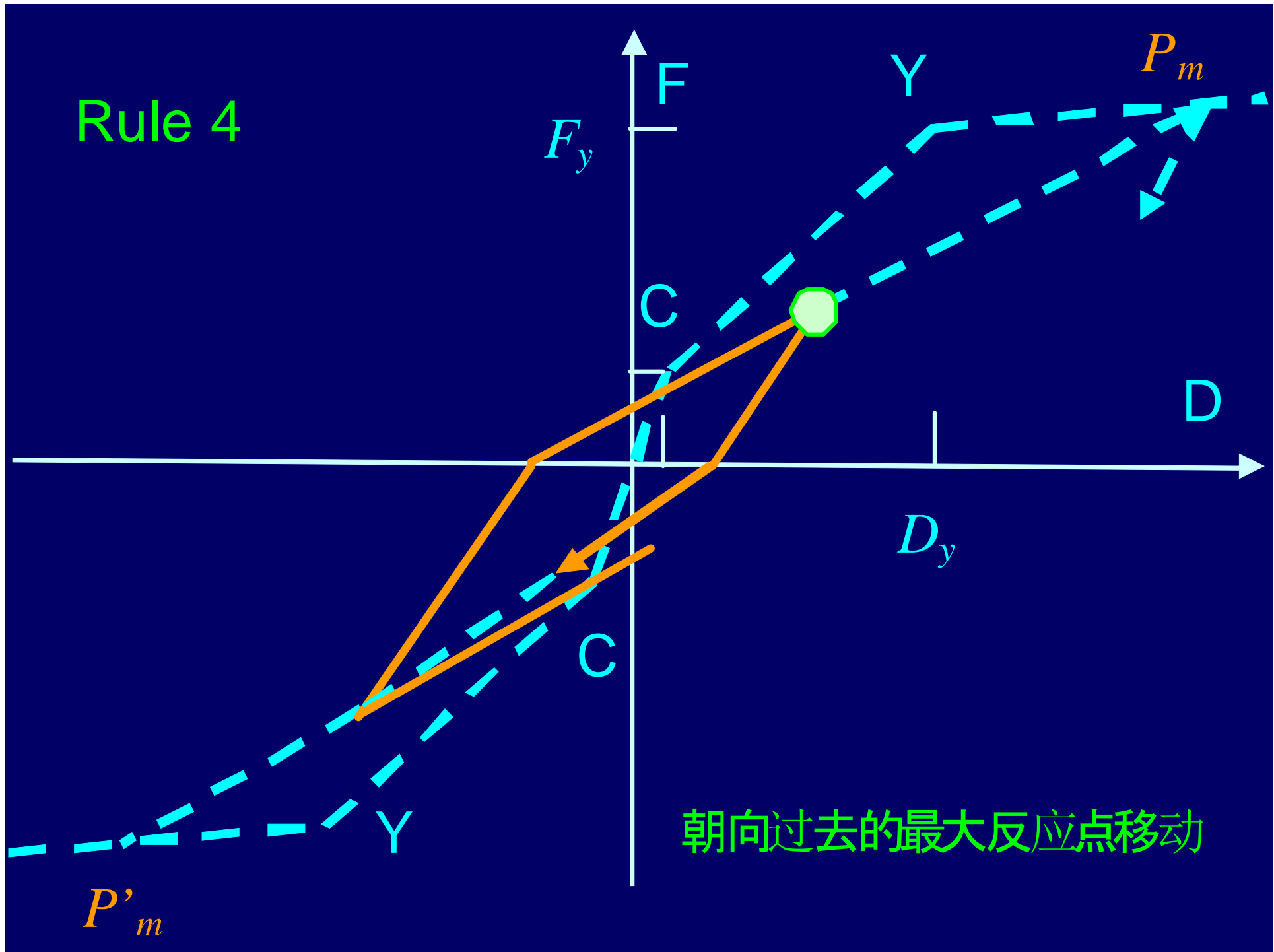
Rule 4

屈服后的再载荷



向最大点再载荷

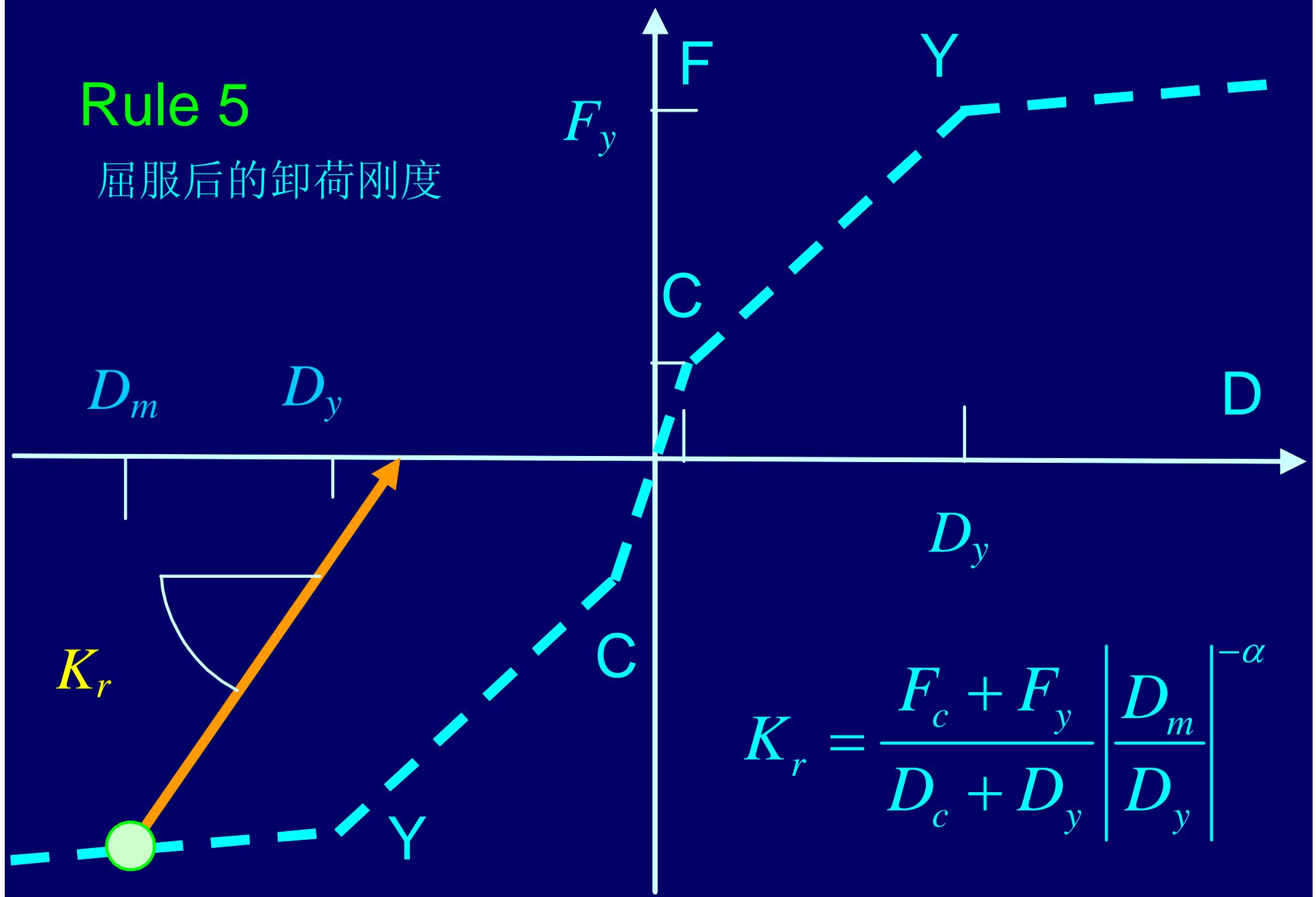
Rule 4



朝向过去的最大反应点移动

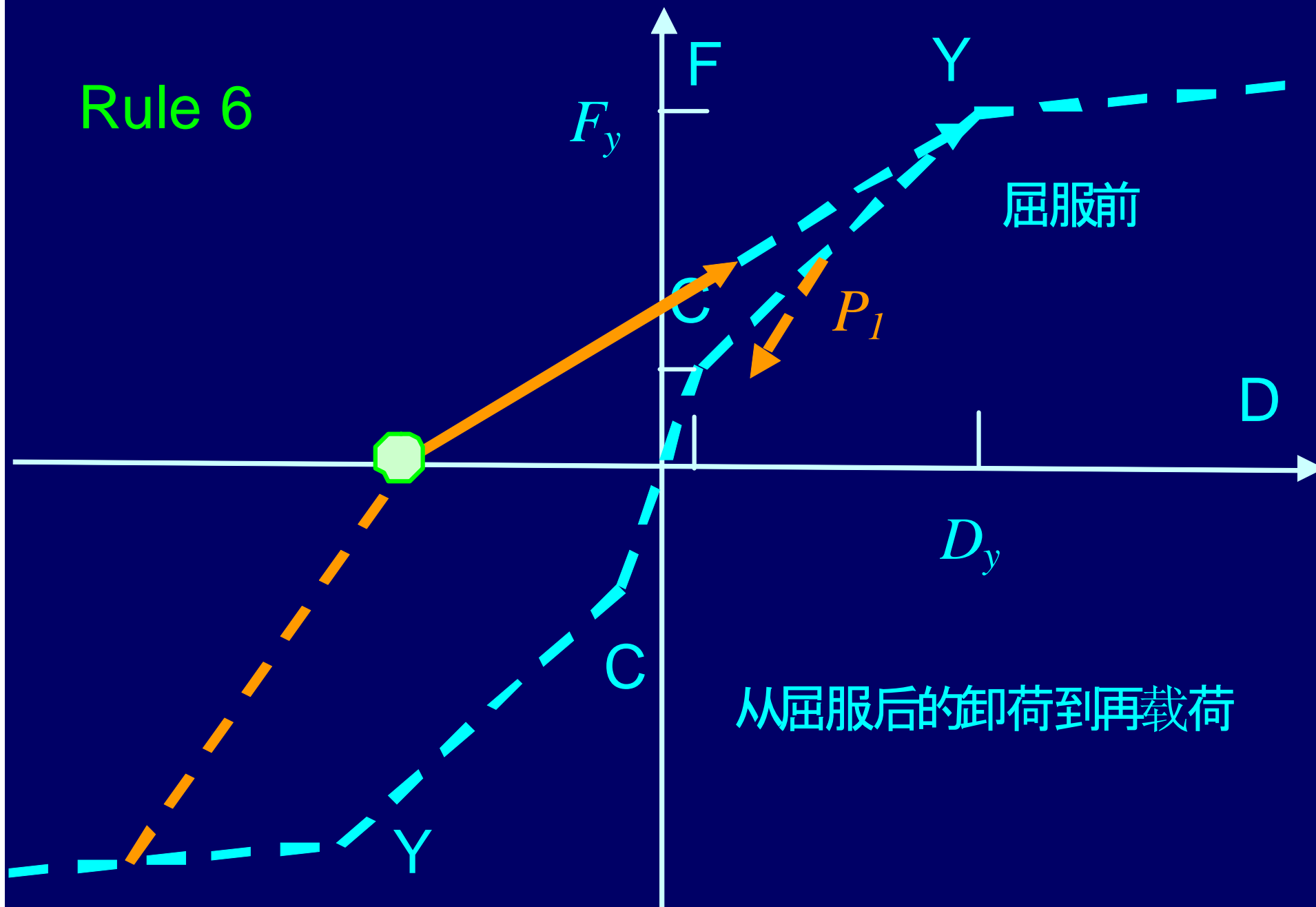
Rule 5

屈服后的卸荷刚度

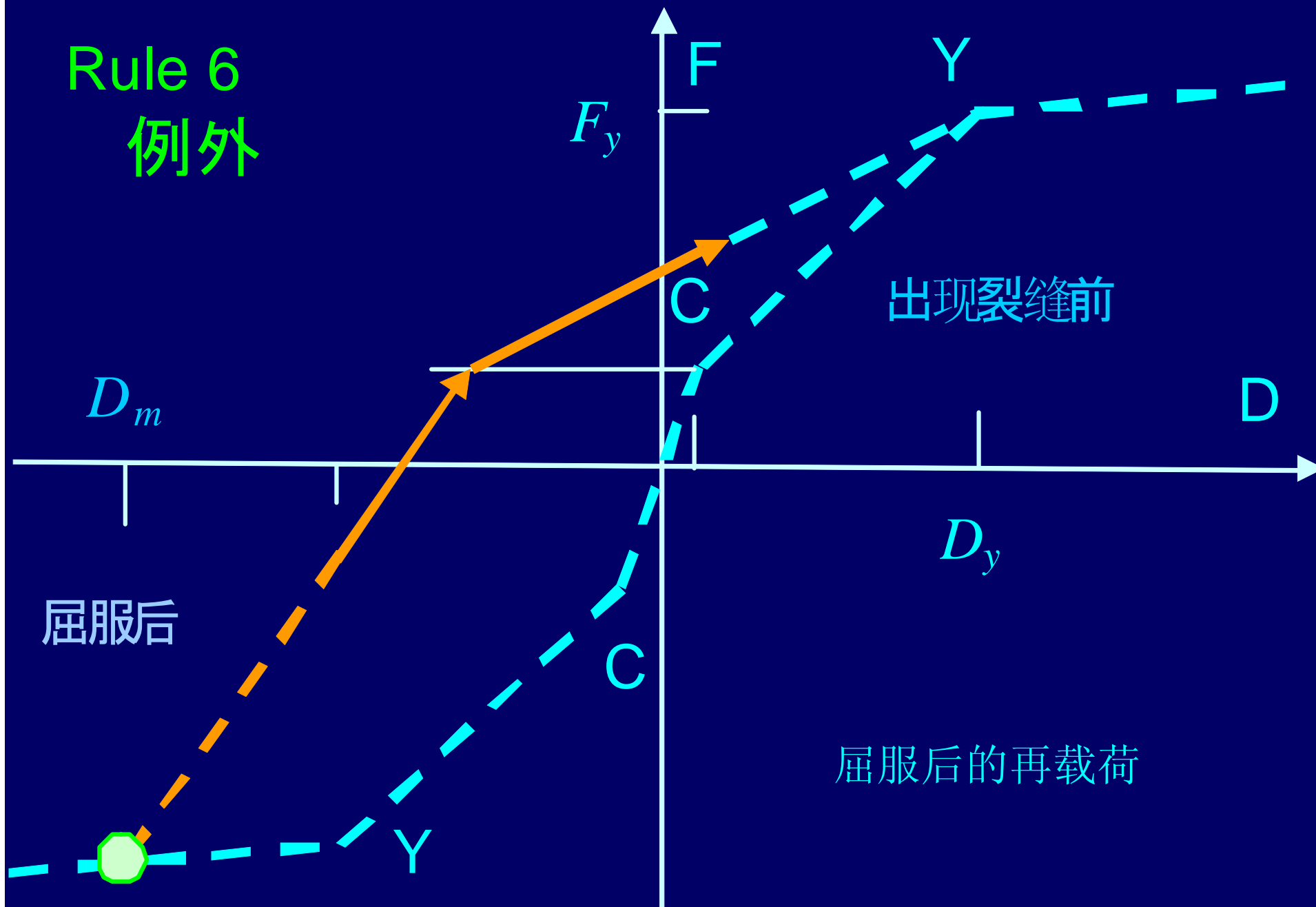


$$K_r = \frac{F_c + F_y}{D_c + D_y} \left| \frac{D_m}{D_y} \right|^{-\alpha}$$

Rule 6

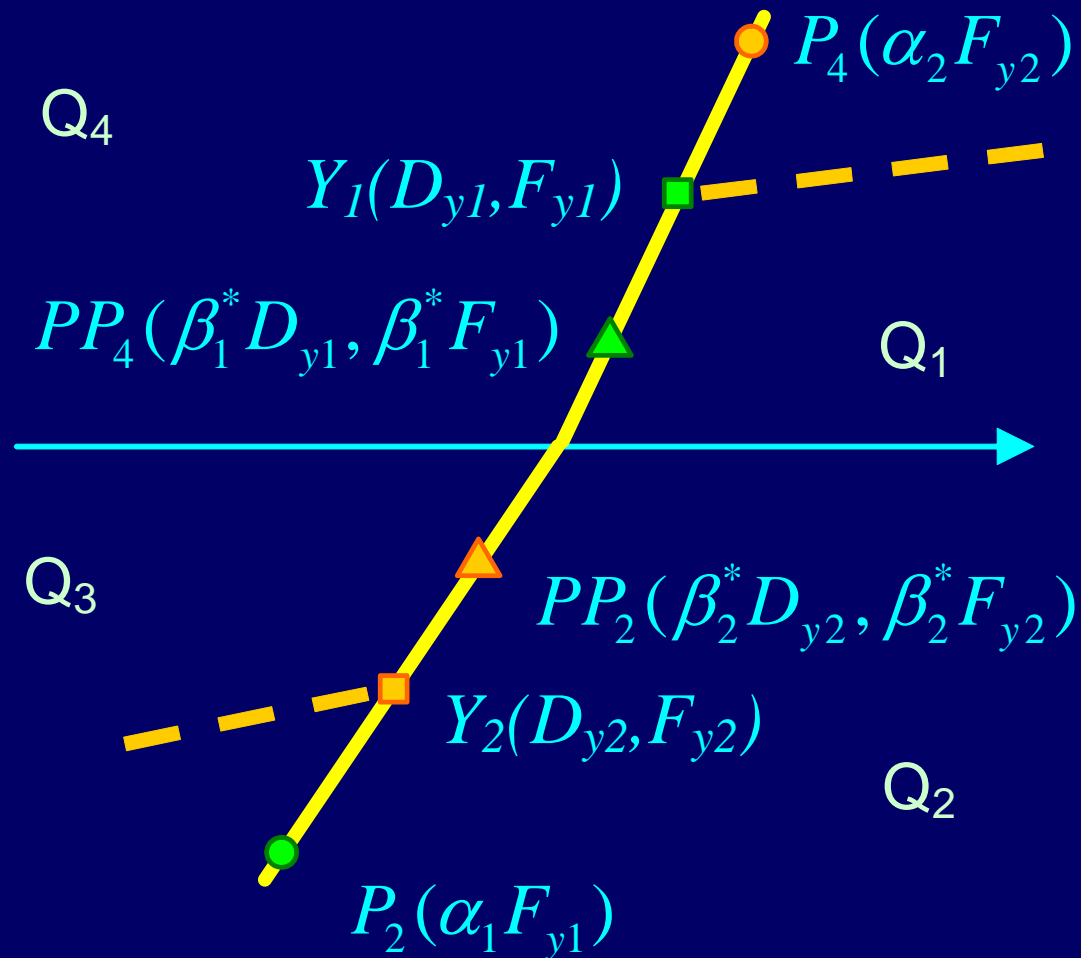


Rule 6 例外



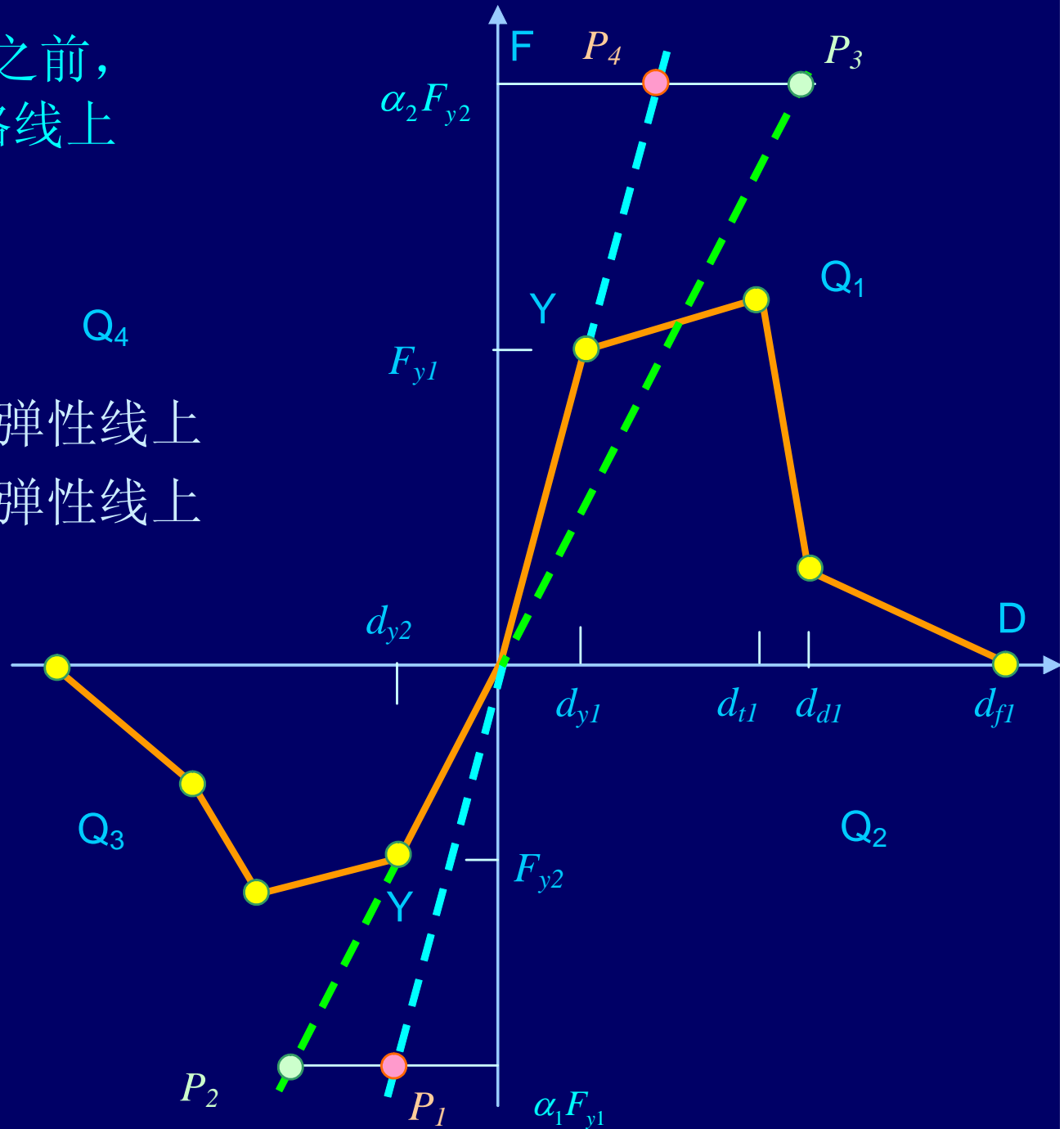
Pivot Hysteresis Model

Robert K. Dowell, Frieder Seible and Edward L. Wilson, "Pivot Hysteresis Model for Reinforced Concrete Members," ACI Structural Journal, Title No. 95-S55, Vol. 95, No. 5, September-October 1998, pp. 607 - 617.

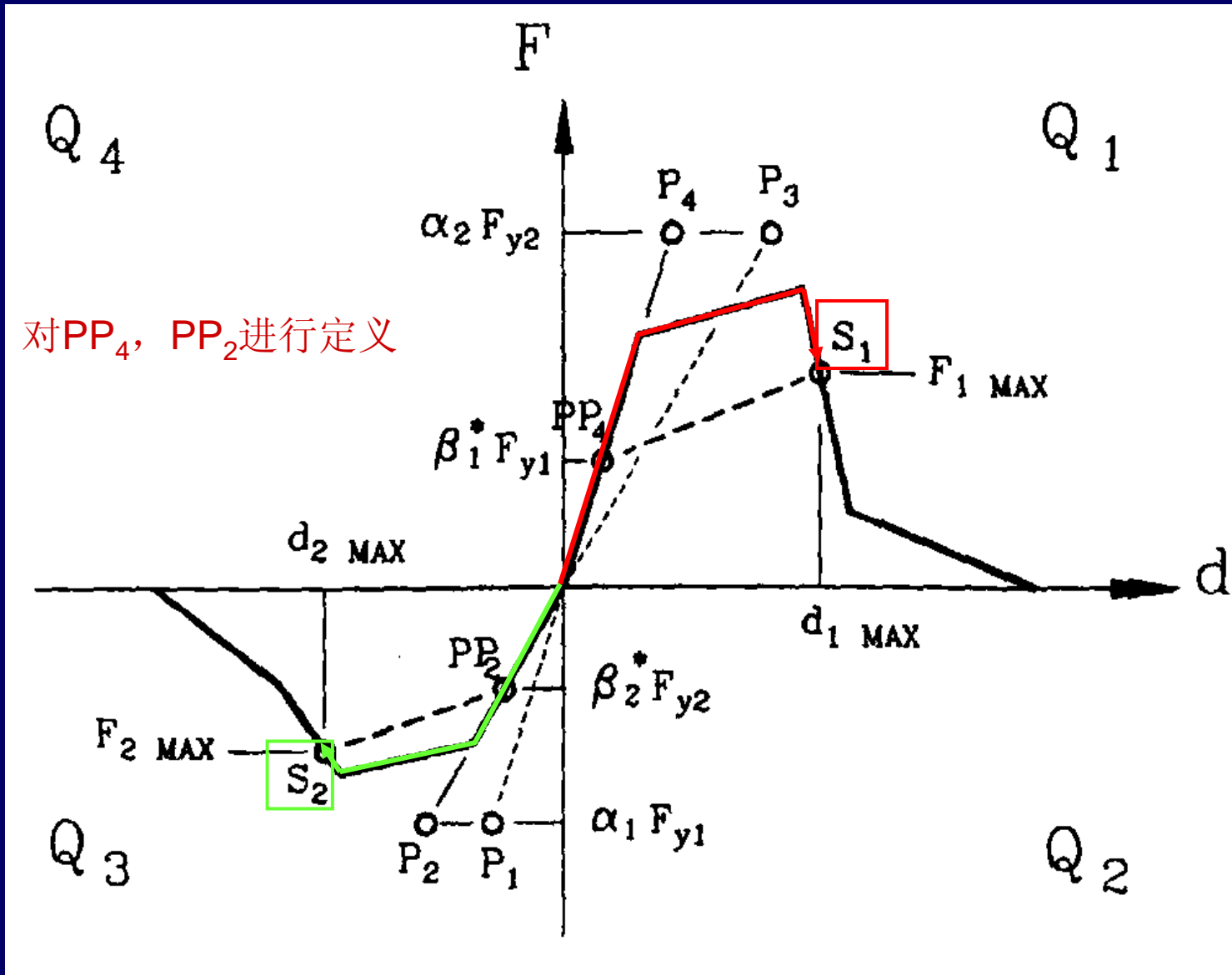


(1) 反应在出现卸荷之前，
都沿着屈服强度包络线上
移动。

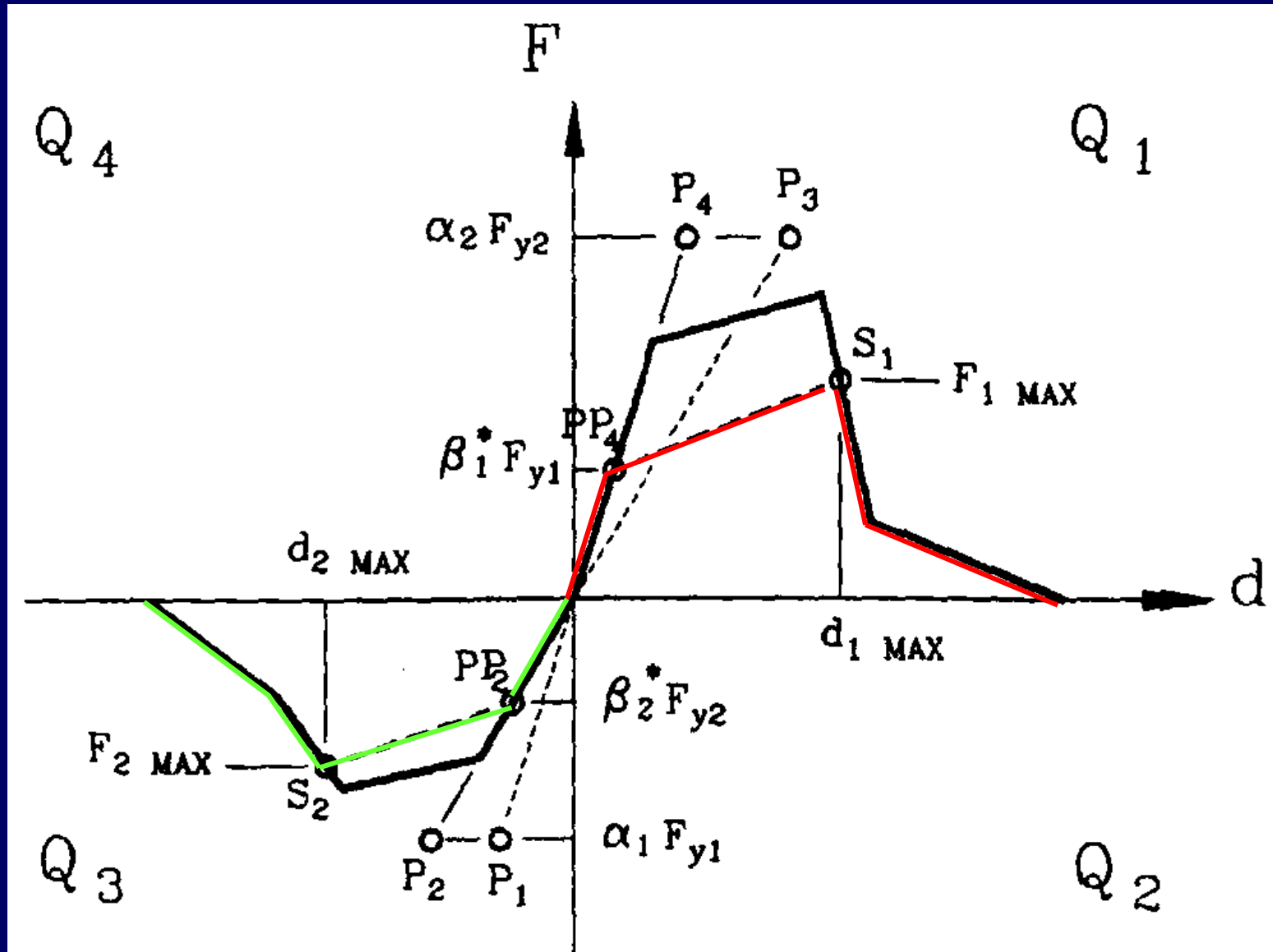
P_3, P_4 在第1象限的弹性线上
 P_1, P_2 在第3象限的弹性线上



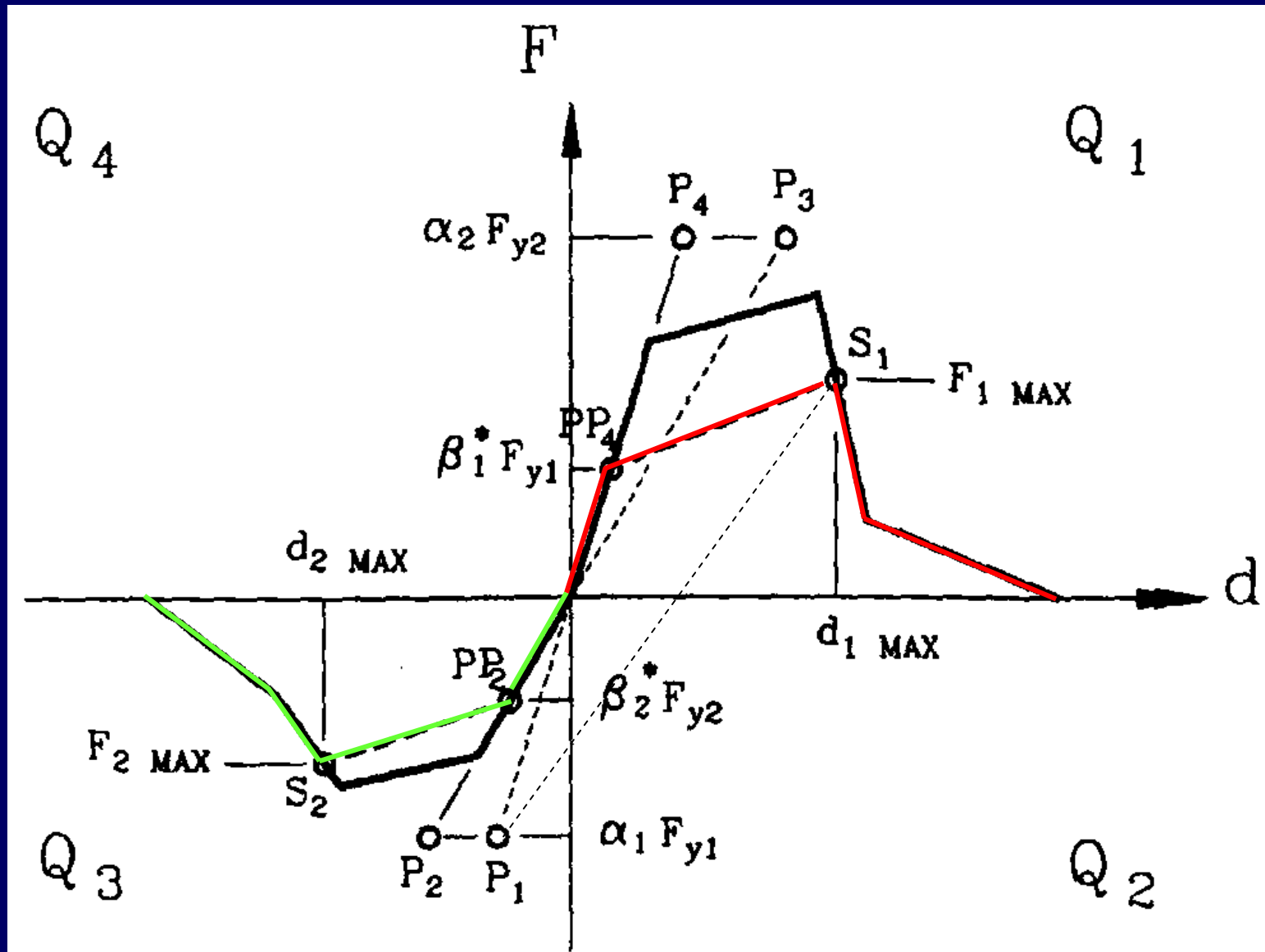
(2) 当在正向或负向上超过了最大强度点的话，最大强度点将按照屈服强度包络线上的过去最大点 S_1 及 S_2 进行定义。



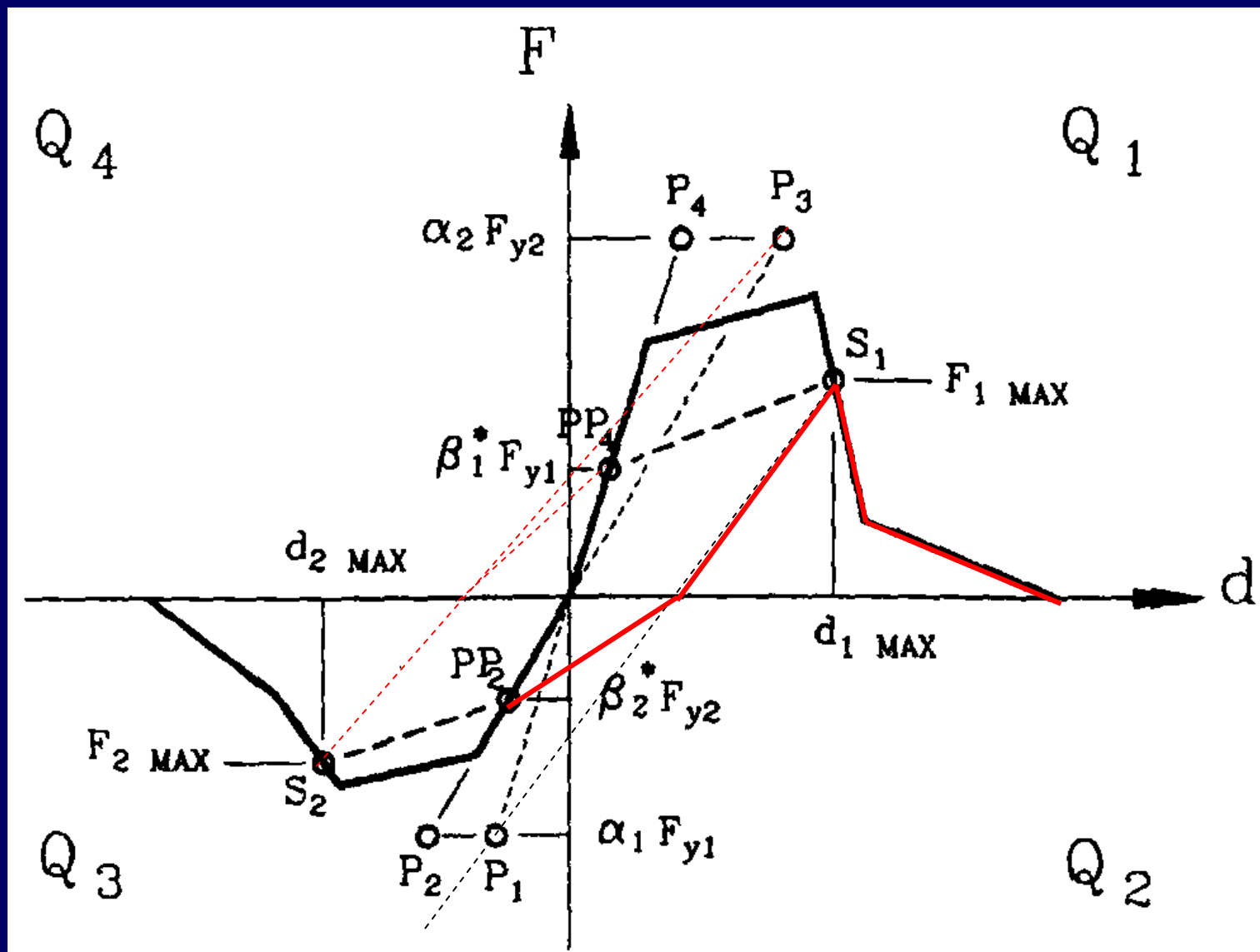
(3) 被修正的屈服强度包络线，将用连结点 PP_4 与 S_1 或者点 PP_2 与 S_2 的线表达。



(4) 当从第 D_n 象限的包络线上的点卸荷的时候，将朝向另一侧的Pivot点 P_n 移动。

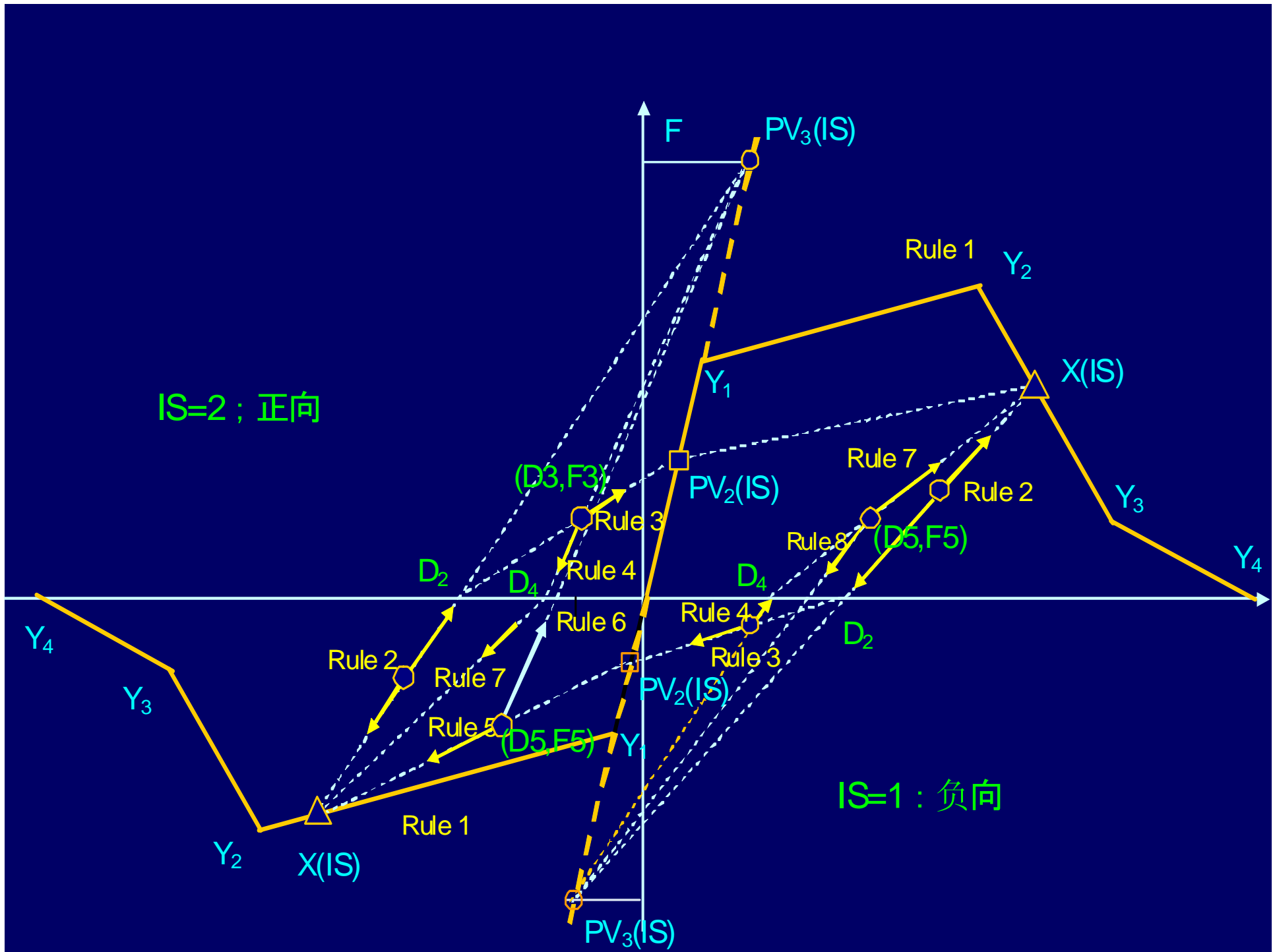


(4) 当从第 Q_n 象限的包络线上的点卸荷的时候，将朝向另一侧的Pivot点 P_n 移动，横穿位移轴，当在另一侧对第 Q_n 象限进行再载荷的时候会朝向Pivot点 PP_n 移动。

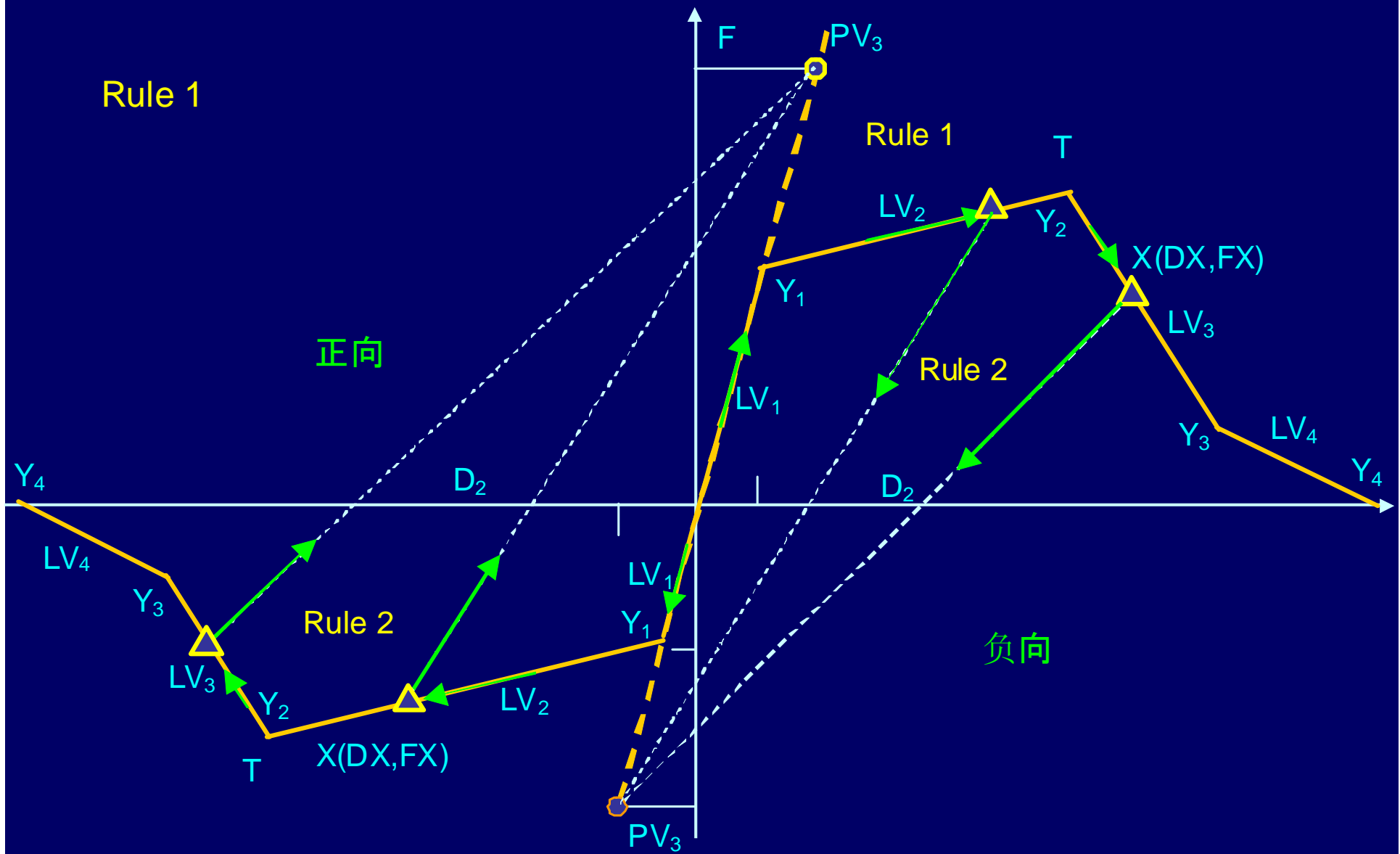


模型的修正

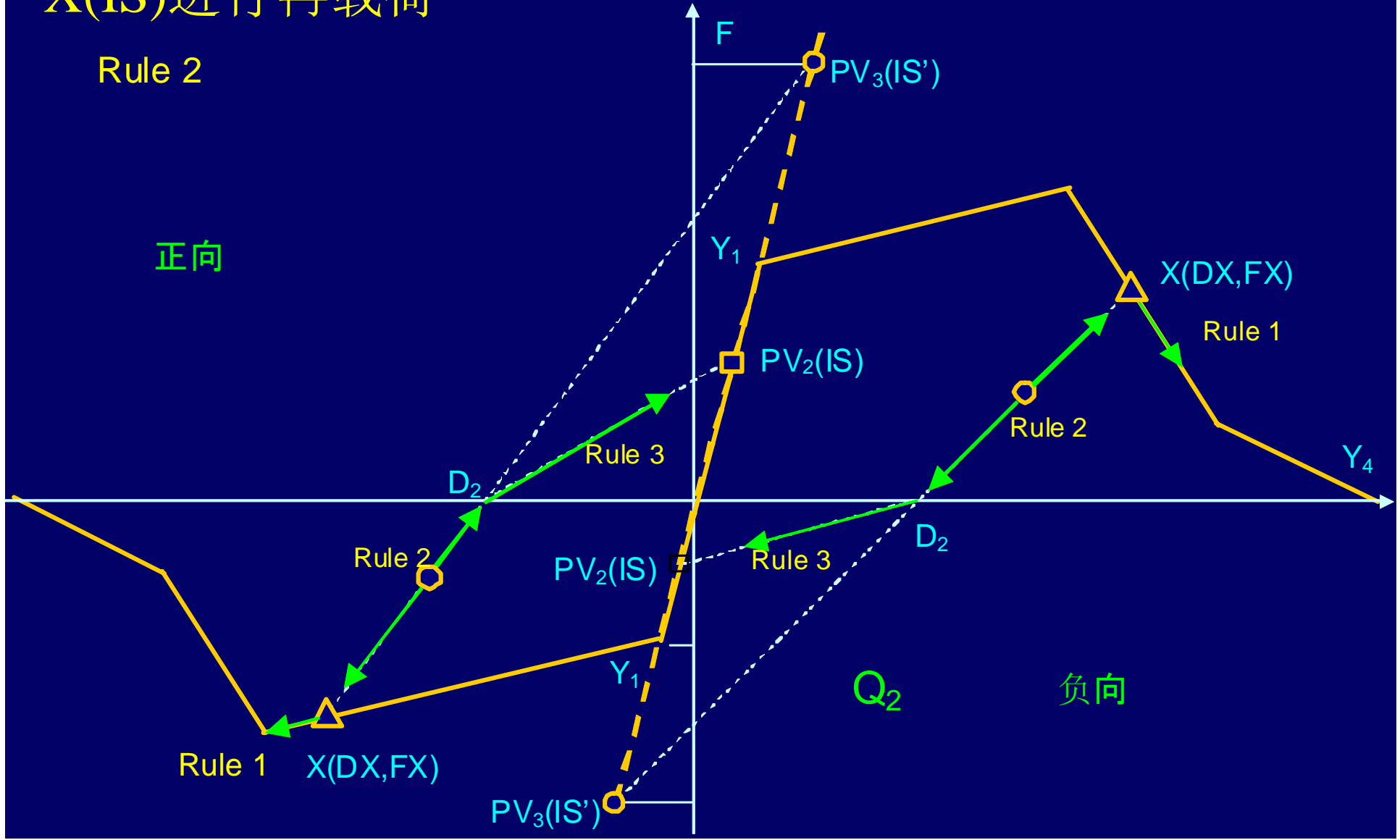
- (1) 使初始刚度正负相等 ($IS=2$, $IS=1$)。
- (2) 在再载荷的象限上 Q_n ($n=1$ or 3), 在朝向过去的最大反应点移动之后, 将会在骨架曲线上移动。
- (3) 在卸荷的象限 Q_n ($n=1$ or 3)中, 会朝向Pivot Point P_n 移动。
- (4) 在再载荷的象限 Q_n ($n=2$ or 4)中, 会在朝向Pivot Point PP_n 移动后, 再朝向过去的最大反应点 Si , 之后在骨架曲线上移动。
- (5) 在卸荷的象限 Q_n ($n=2$ or 4)中, 反应点将在远离Pivot Point P_n 的方向上移动。



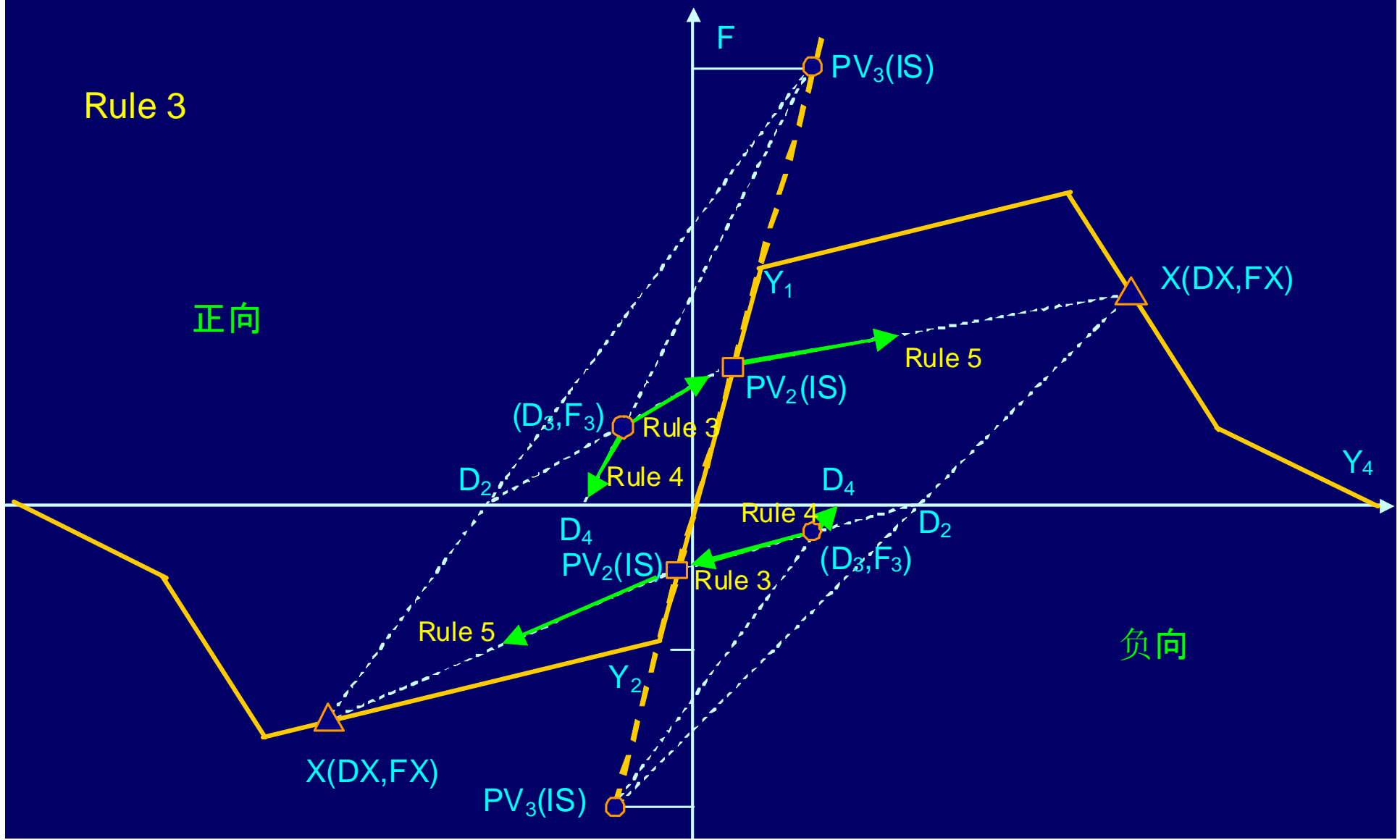
Rule 1: 在包络线上载荷 (第 1、3象限)



Rule 2: 向着包络线上的最大反应点 $X(IS)$ 的正对方向的 Pivot点 $PV_3(3-IS)$ 进行卸荷, 或对同方向的最大反应点 $X(IS)$ 进行再载荷

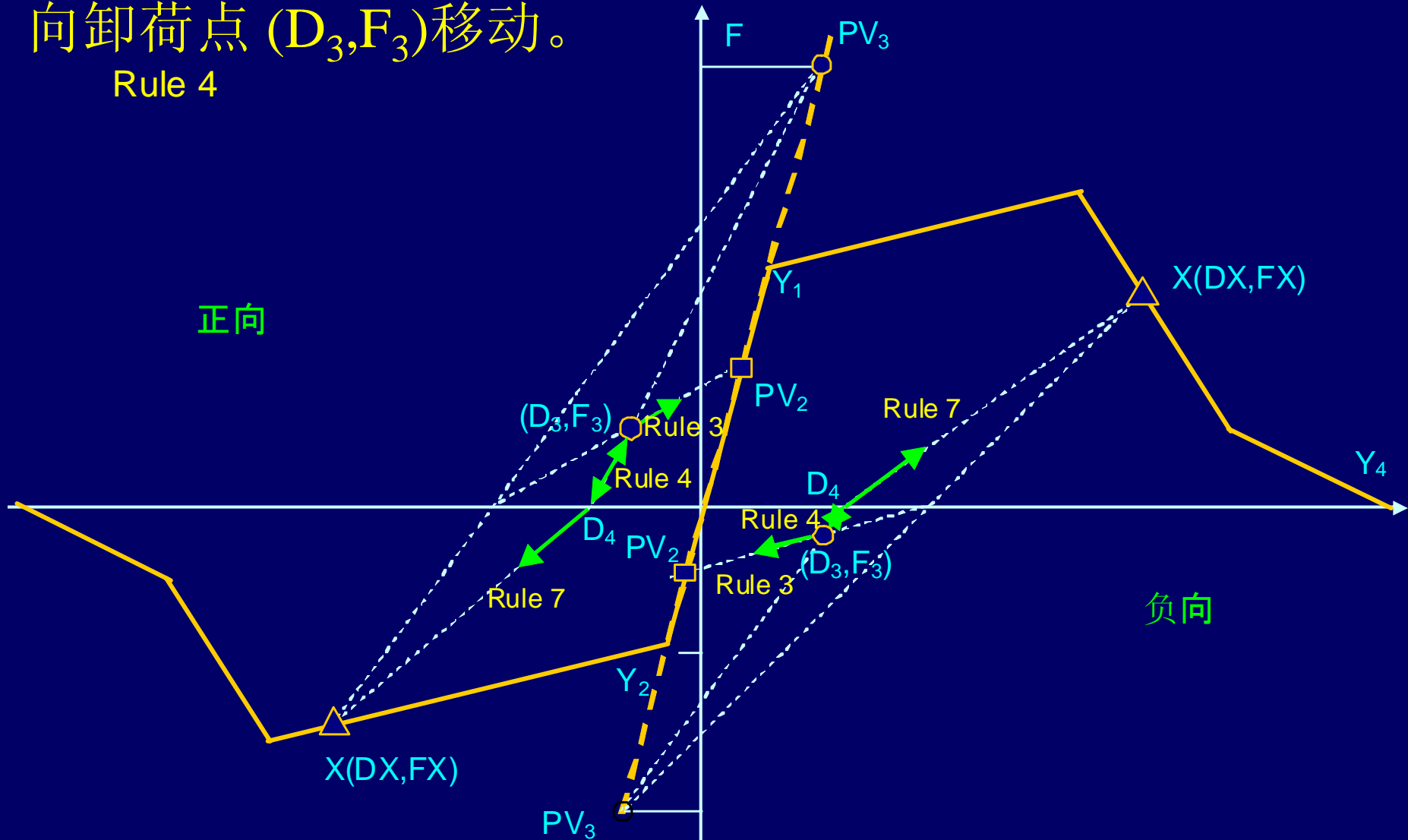


Rule 3: 当在Rule2之后超越位移轴 D_2 之后，将会朝向同侧的Pivot point $PV_2(IS)$ 移动

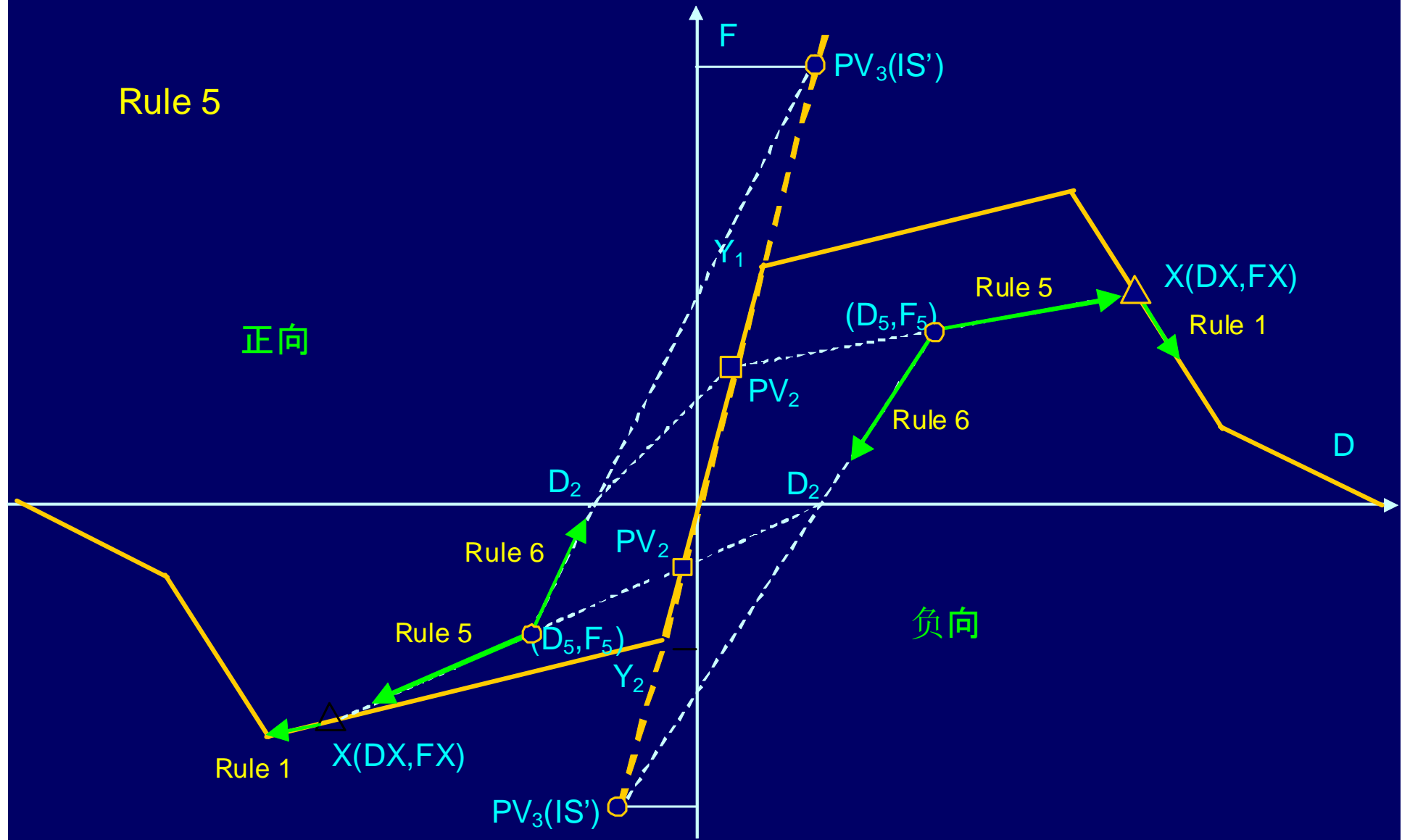


Rule 4: 当从Rule 3的反应点(D_3, F_3)上进行卸荷之后, 将会在到达位移轴之前, 朝着离开Pivot point $PV_3(IS)$ 的方向移动。当在卸荷的过程中进行再载荷的时候, 将会朝向卸荷点 (D_3, F_3)移动。

Rule 4

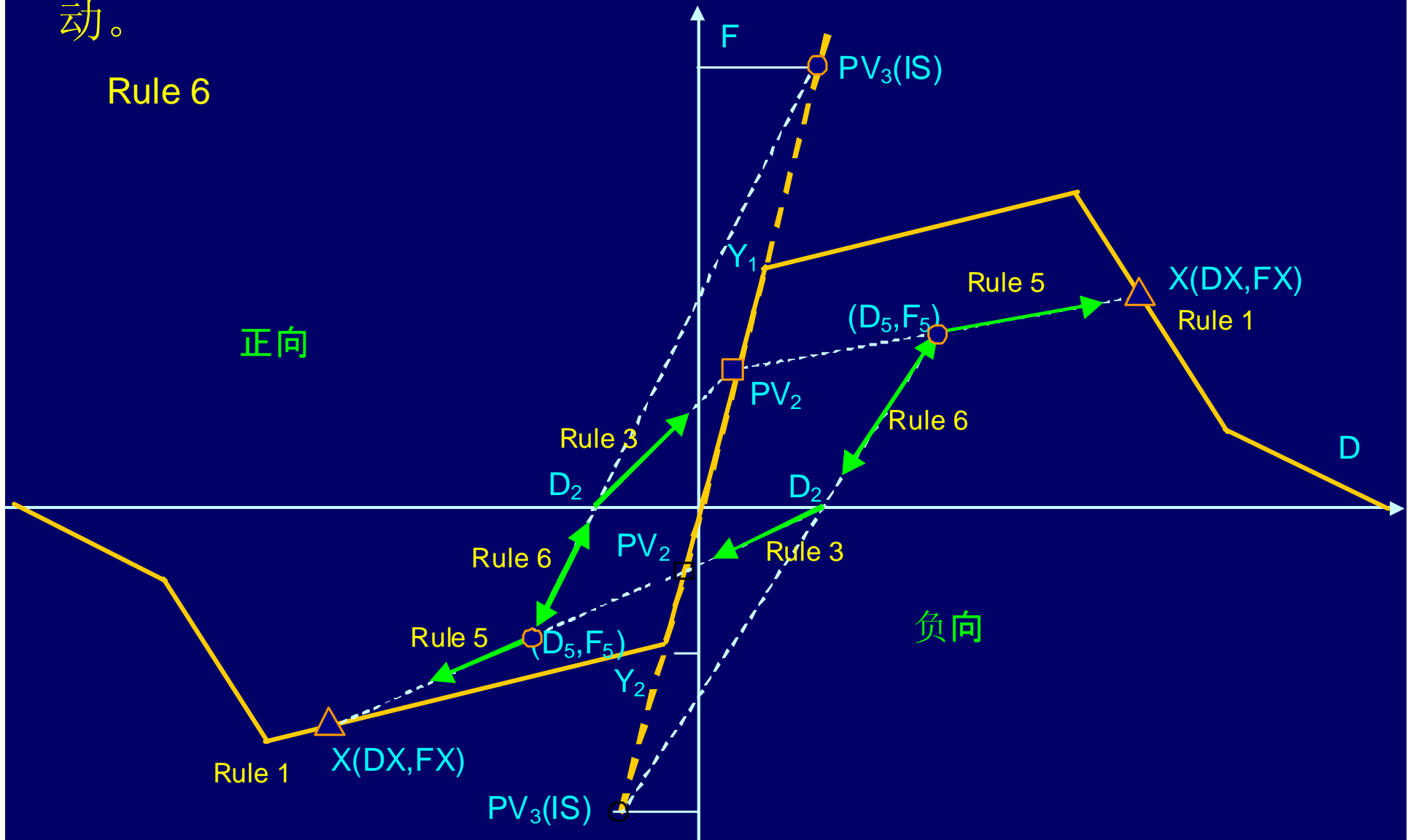


Rule 5: 在Rule3中，当超过Pivot point $PV_2(IS)$ 进行载荷时，将会朝同侧的最大反应点 $X(IS)$ 移动

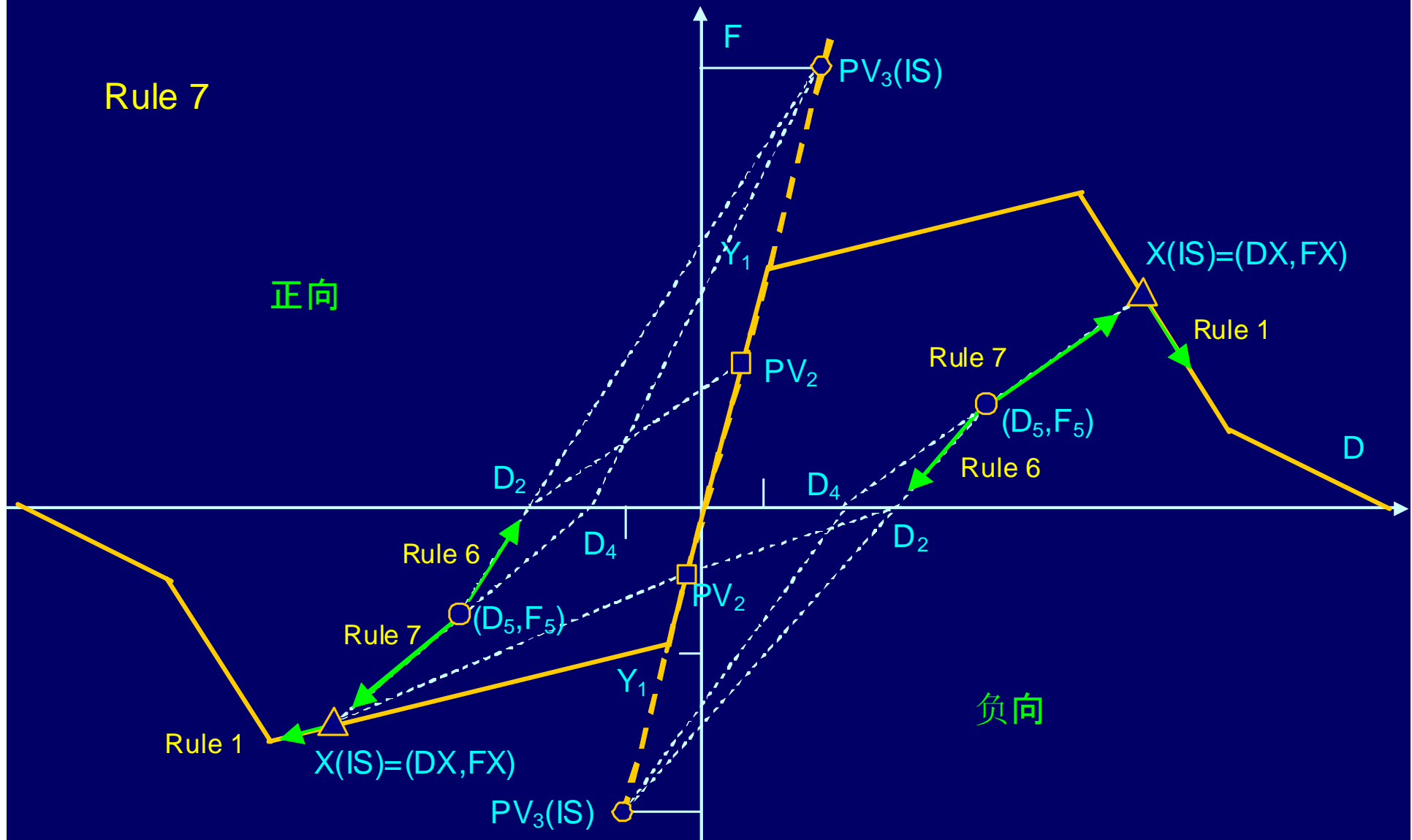


Rule 6: 当从Rule 5的反应点 (D_5, F_5) 上进行卸荷的时候，将会在到达位移轴之前，朝着离开Pivot point $PV_3(IS)$ 的方向移动。当在卸荷的过程中进行再载荷的时候，将会朝向卸荷点 (D_5, F_5) 移动。

Rule 6

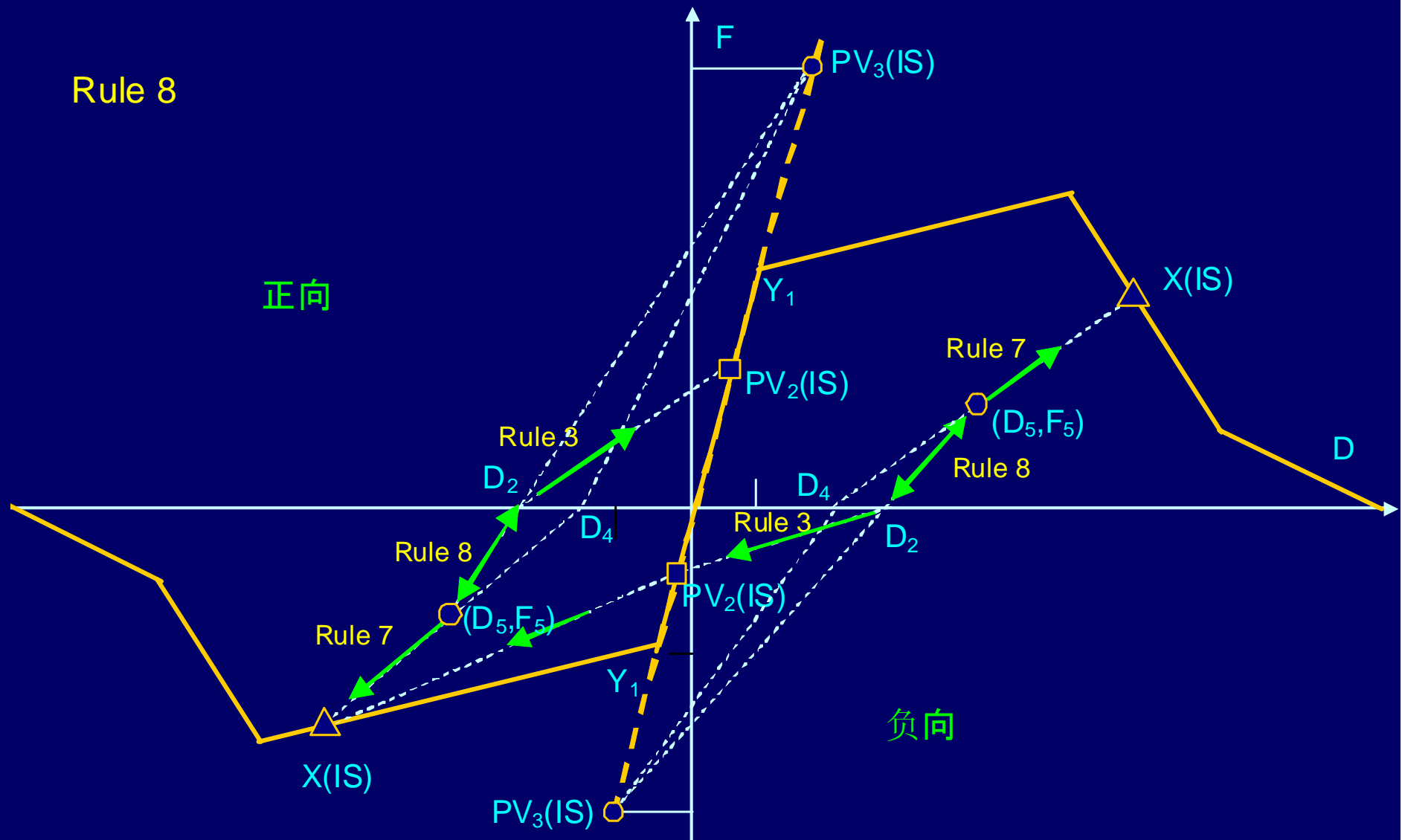


Rule 7: 在Rule4中，当超过位移轴后在对面方向进行再载荷时，将会朝最大反应点 $X(IS)$ 移动。

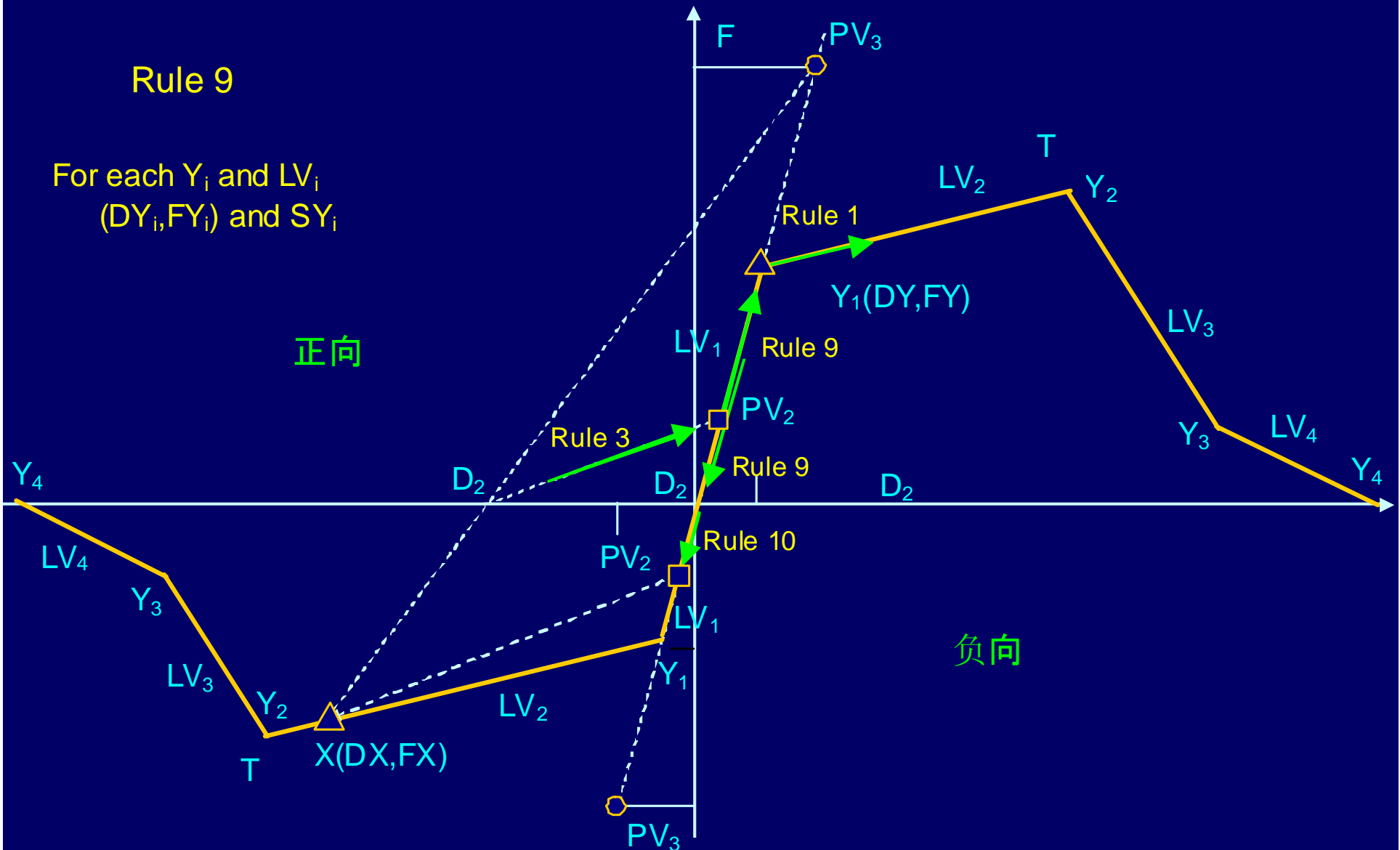


Rule 8: 在Rule 7中，当从反应点 (D_5, F_5) 上进行卸荷的时候，将会在到达位移轴之前，朝着相反一侧的Pivot point $PV_3(IS)$ 移动。当在卸荷的过程中进行再载荷的时候，将会朝向卸荷点 (D_5, F_5) 移动。

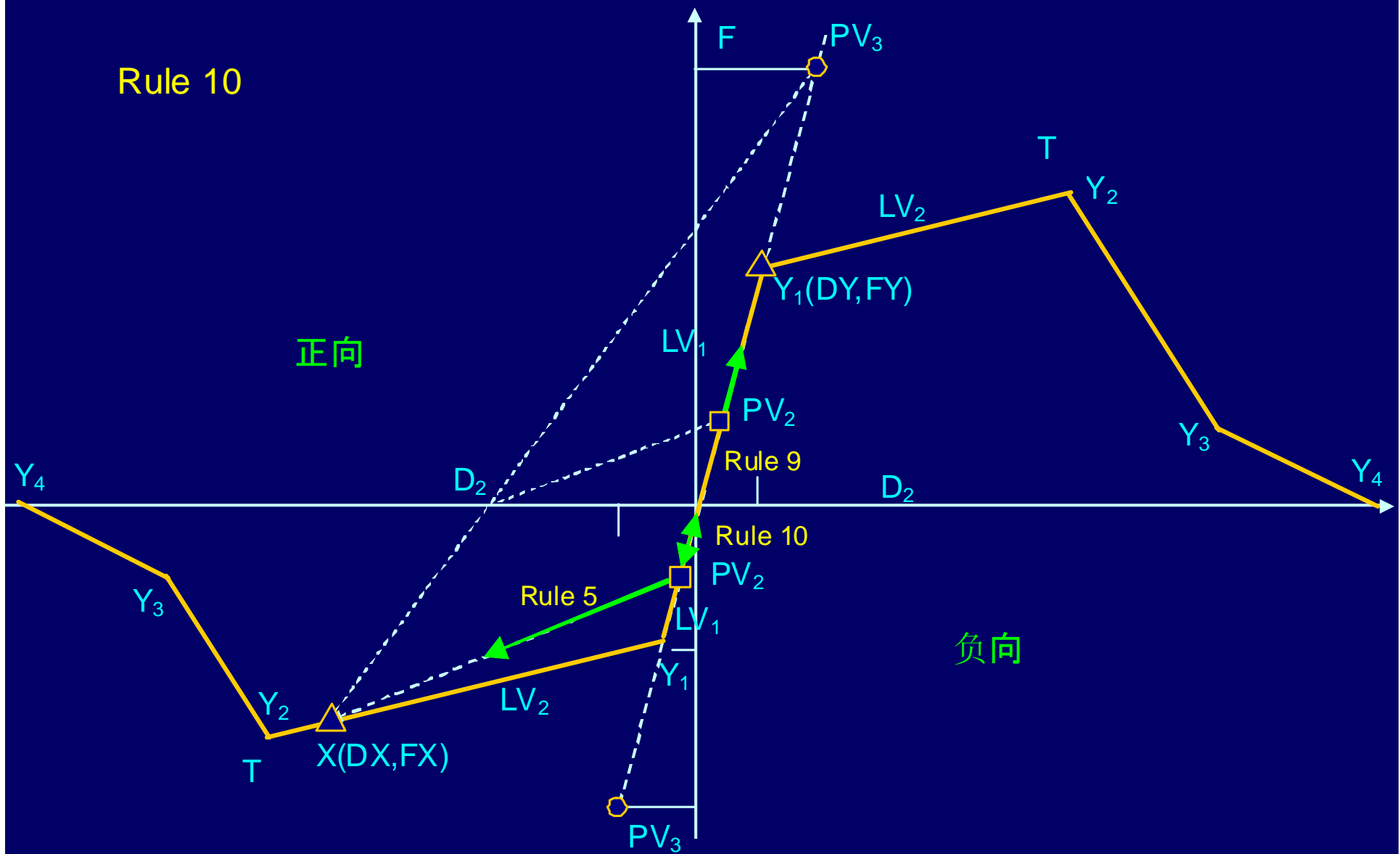
Rule 8



Rule 9: 在Rule 3中，当到达Pivot point PV2(IS)之后，将在初始弹性线上进行载荷，在初始弹性线上进行卸荷。



Rule 10: 在Rule 9中，当反应点在原点横穿位移轴之后，将在初始弹性线上进行再载荷。



谢谢

虽然钢筋混凝土结构框架的非线性解析已经普及，但还有很多问题，使用时需要加以注意。

小谷俊介