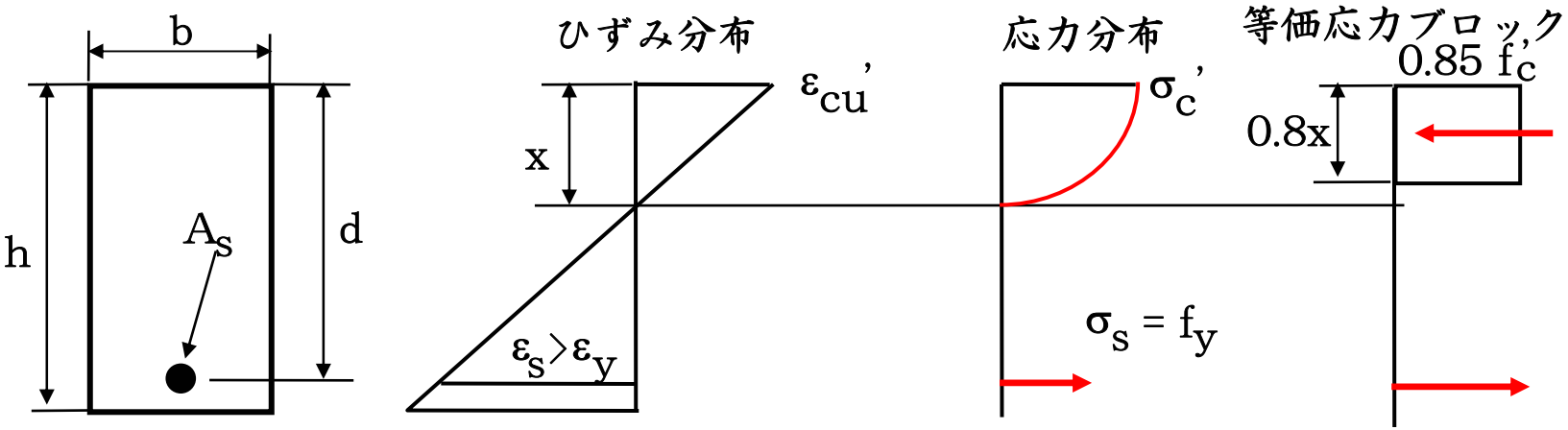
2.4　曲げ終局状態の解析方法

1.　はじめに

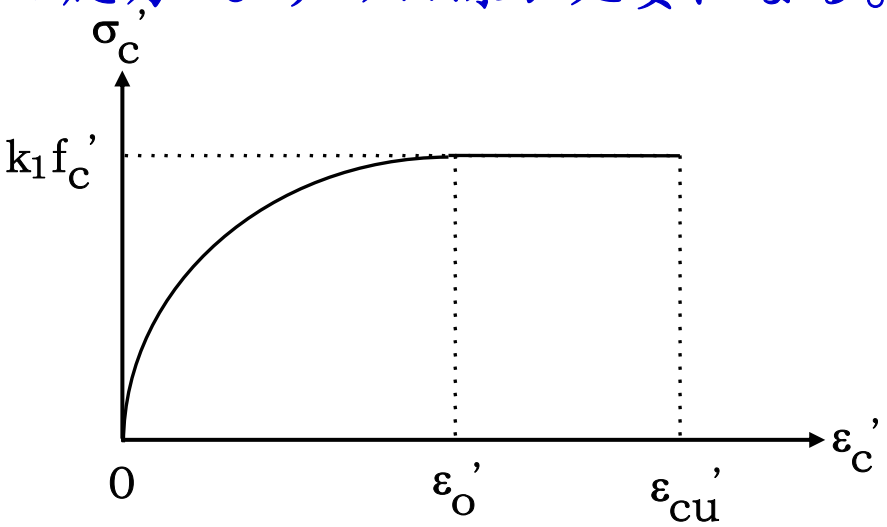


○弾性状態との一番大きな相違は圧縮側コンクリートの応力状態が非線形となること。

○圧縮を受けるコンクリートの応力−ひずみ曲線が必要になる。

$$\sigma_c' = k_1 f_c' \left[2\left(\frac{\varepsilon_c'}{\varepsilon_o'}\right) - \left(\frac{\varepsilon_c'}{\varepsilon_o'}\right)^2 \right]$$

$k_1=0.85, \varepsilon_o' = 0.002, \varepsilon_{cu}' = 0.0035$



○一般に多用される１軸応力下のコンクリートの応力−ひずみ曲線は、2次放物線と直線の組合せである。

ここに

f_c':　コンクリートの圧縮強度（＝圧縮試験により求める。φ10×20 cmのシリンダー強度）

ε_o':＝ 0.002　(2000μ) ＝ 0.2 %

ε_{cu}'：1軸応力下のコンクリートの圧縮破壊ひずみ

＝ 0.0035　(3500μ) ＝ 0.35 %

k_1：= 0.85 は、圧縮軟化域を含む応力−ひずみ曲線を簡易にモデル化したことを考慮。

○破壊の定義はコンクリートの圧縮縁ひずみが破壊ひずみ ε_{cu}' に達したときと仮定する。

○圧縮合力および圧縮合力の作用位置を定めるためには、非線形の圧縮応力部分に対して、積分を行う必要がある。

○計算上の仮定

(1) 断面内でひずみは直線分布する（平面保持の仮定）。

(2) 同一位置のコンクリートひずみと鉄筋ひずみは一致する（完全付着の仮定）。

(3) コンクリートの引張応力は無視する。コンクリートの圧縮応力は非線形分布。

(4) 圧縮縁のコンクリートひずみが破壊ひずみ（終局ひずみ）ε_{cu}' に達したときを破壊と定義する。$\varepsilon_{cu}' = 0.0035 = 0.35\ \% = 3500\ \mu$ としてよい。

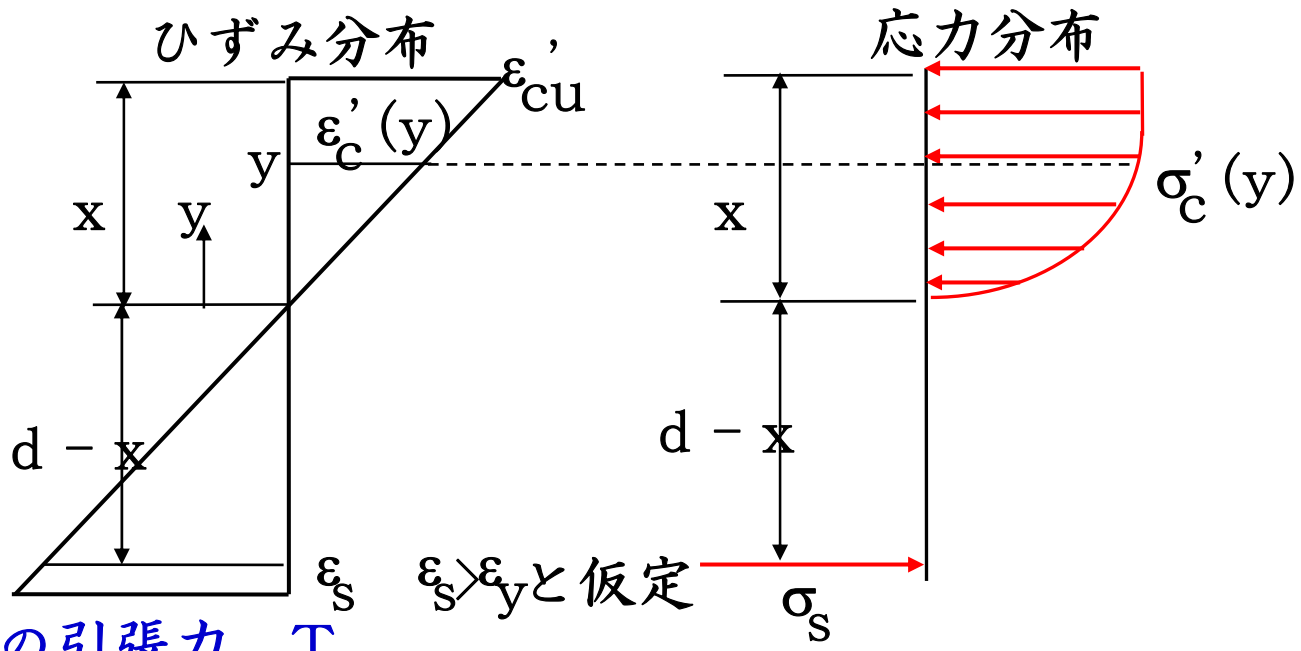
(5) 鉄筋は完全弾塑性体とする。

【具体的な計算の手順】

○通常の鉄筋コンクリート部材では、コンクリートが圧縮で破壊する以前に、引張力を受ける鉄筋が降伏するように設計されている。→「曲げ引張破壊」

○破壊前に、鉄筋を降伏させるということは、破壊性状を延性的とし、エネルギー吸収量も大きくなる。また、鋼材を有効に利用することにもつながる。

→　曲げ終局耐力の計算においては、最初に鉄筋の降伏を仮定してみるのがよい。



(a) 鉄筋の引張力　T

$$T = A_s\,\sigma_s = A_s\,f_y = T_y$$

鉄筋は通常、完全弾塑性体と仮定してよい。

(b) コンクリートの圧縮力　C'

$$C' = \int_0^x \sigma_c'(y)\,b\,dy \qquad \sigma_c' = k_1 \cdot f_c' \left[2\left(\frac{\varepsilon_c'}{\varepsilon_o'}\right) - \left(\frac{\varepsilon_c'}{\varepsilon_o'}\right)^2 \right],\ (0 \le \varepsilon_c' \le \varepsilon_o')$$

$$\sigma_c' = f(\varepsilon_c') \qquad \sigma_c' = k_1 \cdot f_c',\ (\varepsilon_o' \le \varepsilon_c' \le \varepsilon_{cu}')$$

$$y: 0 \rightarrow x$$

$$\varepsilon_c': 0 \rightarrow \varepsilon_{cu}'$$

$$\varepsilon_c' = \frac{y}{x}\varepsilon_{cu}'$$

$$d\varepsilon_c' = \frac{\varepsilon_{cu}'}{x} dy$$

$$C' = \int_0^{\varepsilon_{cu}'} f(\varepsilon_c')\, b\, \frac{x}{\varepsilon_{cu}'} d\varepsilon_c'$$

つまり、ひずみの関数として表されたコンクリートの圧縮応力を積分し、圧縮合力を計算する。

(c) 断面における力の釣合　←　これは今まで同様

$$C' - T = 0$$

これから、終局時の中立軸位置 x を求める。

(d) 鉄筋ひずみの降伏チェック　(∵降伏を仮定しているので)

$$\varepsilon_s : (d - x) = \varepsilon_{cu}' : x \rightarrow \varepsilon_s = \varepsilon_{cu}'(d - x)/x$$

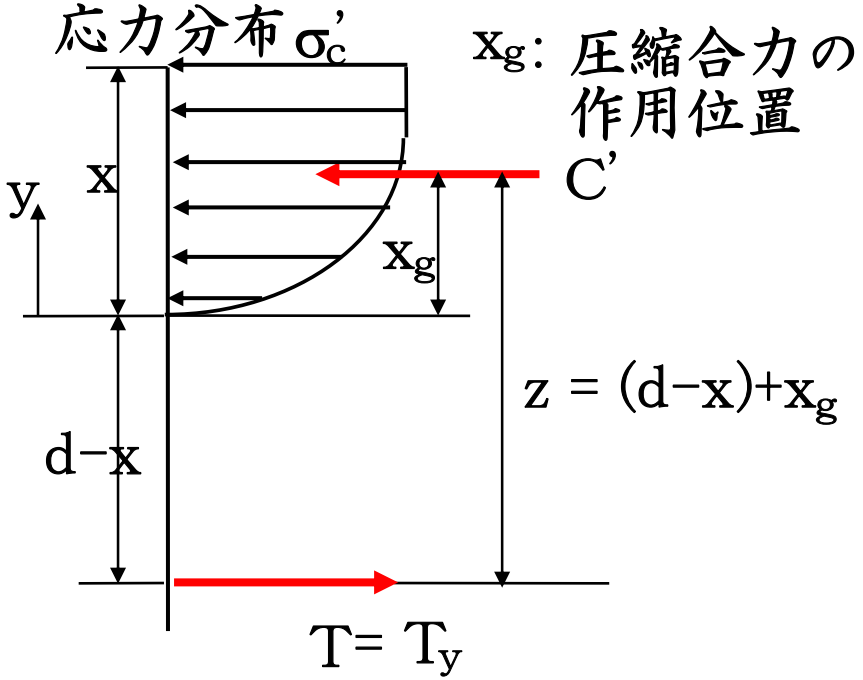
これが、降伏ひずみ $\varepsilon_y = f_y/E_s$ 以上であることを確認しておく。

Q：もし $\varepsilon_s < \varepsilon_y$ ならどうするか？？？？　→　$T = A_s E_s \varepsilon_s$

(e) 断面の抵抗モーメントの計算

$$M_u = T_y\,(d - x + x_g)$$

$$x_g = \frac{\int_0^x \sigma_c' b\, y\, dy}{\int_0^x \sigma_c' b\, dy}$$



○以上が、厳密な計算方法であるが、これを簡単な手計算ですませる巧妙な方法がある。→「等価応力ブロック」を用いた曲げ耐力の算定法。

○つまり、破壊時の圧縮合力とその作用位置が、厳密な計算を行った場合とほぼ同等なものとなるように、矩形の圧縮応力分布形を考えるという方法。

○各種の試算の結果、推奨されている等価応力ブロックは

$0.85 f_c' \times 0.8x$ のものである。

これを用いて、曲げ破壊荷重を算定してみる。

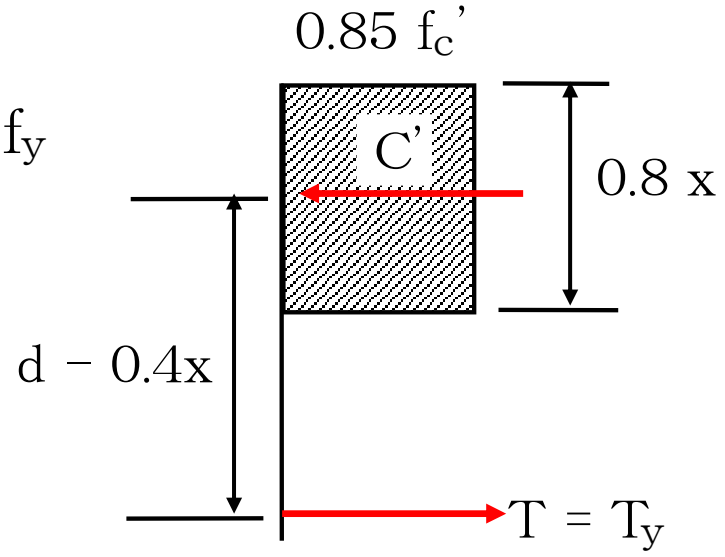
$$C' = 0.85 f_c' \cdot 0.8x \cdot b, \quad T = T_y = A_s f_y$$

$$C' = T$$

$$0.85 f_c' \cdot 0.8x \cdot b = A_s f_y$$

$$x = \frac{A_s f_y}{0.68 f_c' b}$$

$$M_u = T_y (d - 0.4 x)$$



なお、この場合も、鉄筋の降伏の有無は必ず確認しておくこと。

○補強量の変化に伴う破壊モードの変化
ここまでは、補強鉄筋が降伏した後にコンクリートが圧縮破壊することを前提としていた。

→この破壊形態は「曲げ引張破壊」と呼ばれている。

○鉄筋量がさらに増加していくとどうなるか？

→　鉄筋量が限界値を超えて増加していくと、鉄筋が降伏する前にコンクリートの圧縮破壊が起こる。
これを「曲げ圧縮破壊」と呼ぶ。

→　曲げ圧縮破壊は、鉄筋の降伏を伴わないので、変形量やエネルギー吸収が少なく、脆性的な破壊となり、コンクリート構造物の設計上、望ましくない破壊形態である。

→　なお、鉄筋の降伏とコンクリートの圧縮破壊が同時に起こる場合を「釣合破壊」と呼ぶ。

→　曲げ破壊の3通りの形態の区別は非常に重要である。

曲げ引張破壊　－　釣合破壊　－　曲げ圧縮破壊