

(6) 多層モデルの堰柱の地震時保有水平耐力及び許容塑性率

ア 破壊形態

破壊形態は、多層構造であることから、曲げ破壊よりせん断破壊が先行することがないようにすることを原則とする。

イ 地震時保有水平耐力

地震時保有水平耐力は、図-14.2-13 に示すようにプッシュオーバー解析より得られる全体系バイリニアモデルの降伏水平震度 k_{hy} とする。

ウ 許容塑性率

許容塑性率は、プッシュオーバー解析による降伏変位と終局変位を用いて式 (14.2-32) による。

$$\mu_a = \begin{cases} 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \delta_y} & (\text{曲げ破壊型}) \\ 1.0 & (\text{曲げ損傷からせん断破壊移行型、せん断破壊型}) \end{cases} \dots\dots\dots (14.2-32)$$

ここに、 μ_a : 許容塑性率

δ_u : 可動堰の終局変位 (mm)

δ_y : 可動堰の降伏変位 (mm)

α : 安全係数 (表-14.2-3 参照)

エ モデル化

プッシュオーバー解析のモデル化は、1 層ラーメンモデルと同様に 14.2.2 (7) 及び 14.2.2 (10) により部材の弾塑性特性を算出して行う。このとき、解析は、1 層ラーメンモデル手順の 14.2.2 (5) キ (ハ) の水平力を構造物へ作用する震度として置き換えた弾塑性解析となる。

なお、プッシュオーバー解析ツールは多数あるが、使用に当たっては、必ず解析精度を確認する。

オ 構造物の初降伏時と終局時の定義

構造物の初降伏時と終局時は、以下のとおり定義する。

初降伏時	k_{hy0}	複数ある塑性ヒンジのうち最初に降伏した震度
終 局 時	k_{hu}	複数ある塑性ヒンジ部がすべて終局耐力に達した震度又は先に終局状態に達した塑性ヒンジ部の曲率が終局曲率の 2 倍となった震度

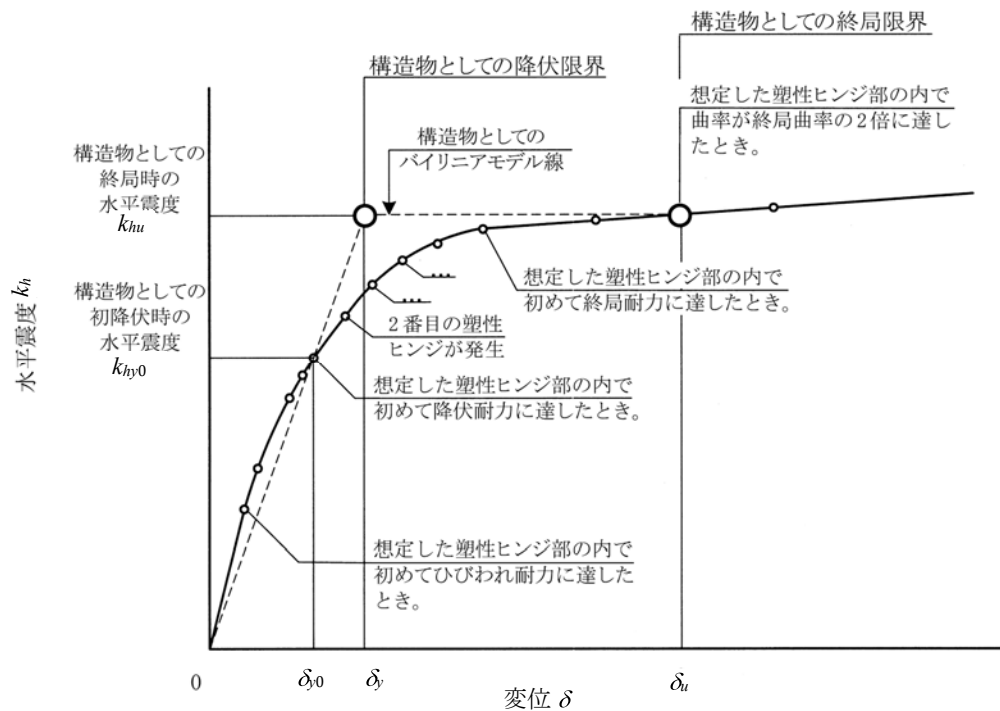


図-14.2-13 全体系モデルにおける弾塑性の関係

カ 安全性の照査

(ア) 重要度 AA の多層形式の可動堰

重要度 AA の多層モデルの堰柱の照査は、式 (14.2-33) 及び式 (14.2-34) により照査する。

$$k_{hc} \leq k_{hy} \quad \dots\dots\dots (14.2-33)$$

$$\delta_R \leq \delta_{Ra} \quad \dots\dots\dots (14.2-34)$$

ここに、 k_{hc} : レベル 2 地震動の設計水平震度

k_{hy} : 構造物全体の降伏設計水平震度

δ_R : 可動堰の残留変位 (mm)

δ_{Ra} : 堰柱の許容残留変位 (mm)

$$\delta_R = C_R(\mu_r - 1)(1 - \gamma)\delta_y \quad \dots\dots\dots (14.2-35)$$

C_R : 残留変位補正係数で、0.6 とする。

γ : 堰柱の降伏剛性に対する降伏後の二次剛性の比で、0 とする。

δ_y : 堰柱の降伏変位 (mm)

μ_r : 構造物全体の最大応答塑性率

$$\mu_r = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{C_Z k_{hc0}}{k_{hu}} \right)^2 + 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (14.2-36)$$

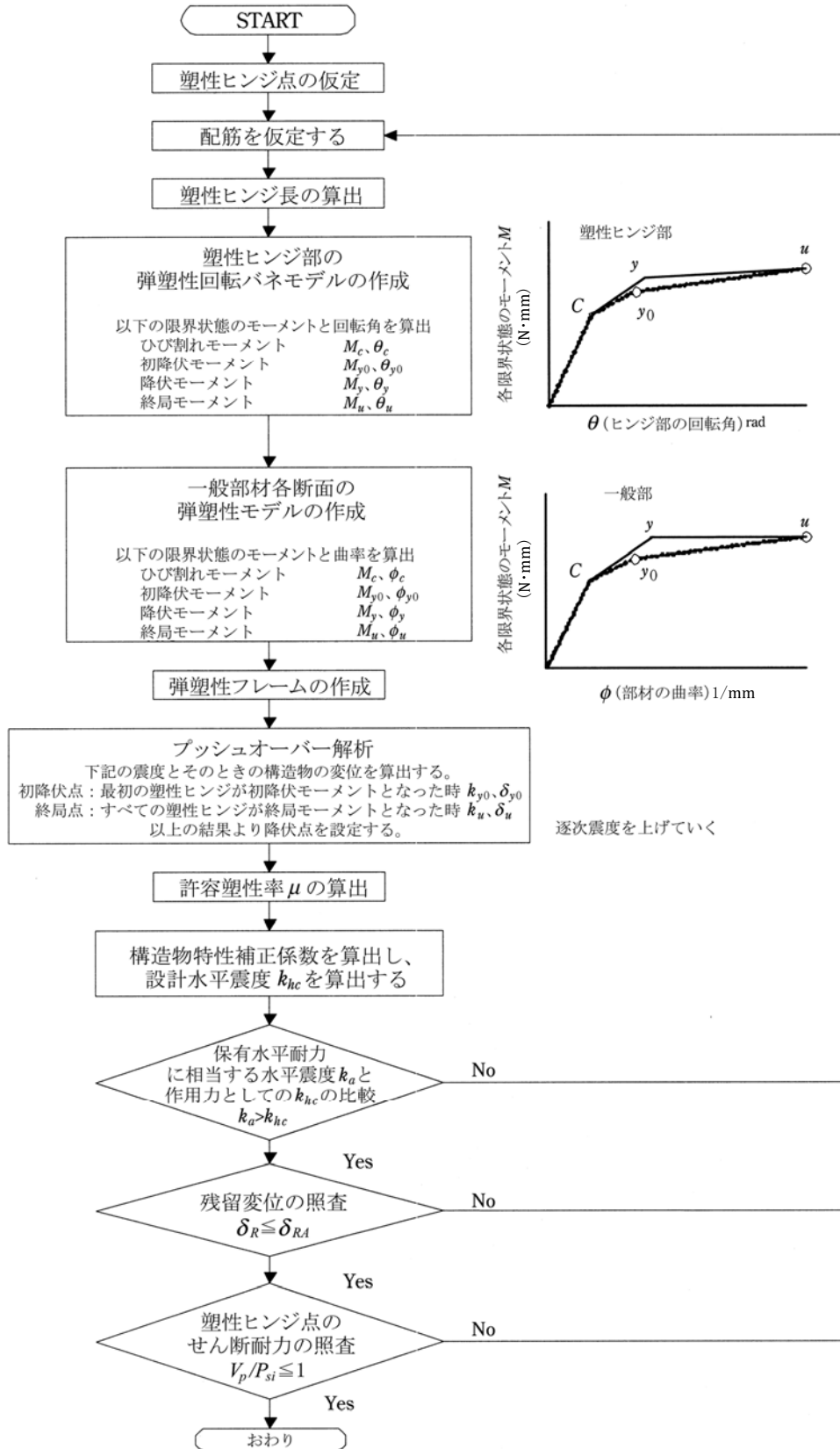
k_{hc0} : レベル 2 地震動の設計水平震度の標準値

k_{hu} : 構造物全体の終局限界水平震度

C_Z : 地域別補正係数

(イ) 重要度 A の多層形式の可動堰

重要度 A の多層モデルの堰柱の照査は、式 (14.2-33) 及び式 (14.2-34) により照査する。



(7) 部材の曲げに対する限界値

部材の曲げ限界には、ひび割れ限界・降伏限界・終局限界があり、その曲げ耐力・水平耐力及び水平変位等は、以下の方法にて求める。

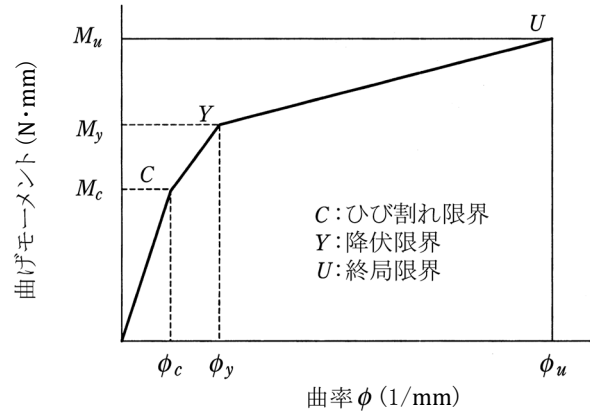


図-14.2-15 各限界状態における曲げ耐力と曲率の関係

ア 部材ひび割れ時の曲げモーメント M_c 及び曲率 ϕ_c

部材ひび割れ時の曲げモーメント及びその時の曲率を下式により算出する。この場合、対象とする躯体の高さを m 分割し計算を実施する。ただし、分割数は、 $n = 50$ としてよい。

$$M_c = W_i \times (\sigma_{bt} + N_i / A_i) \dots\dots\dots (14.2-37)$$

$$\phi_c = M_c / E_c I_i \dots\dots\dots (14.2-38)$$

ここに、 M_c : 検討 i 番目断面におけるひび割れ曲げモーメント (N・mm)

ϕ_c : ひび割れ曲率 (1/mm)

W_i : 部材の断面係数 (mm³)

σ_{bt} : コンクリートの曲げ引張応力度 (N/mm²)

$$\sigma_{bt} = 0.23 \times \sigma_{ck}^{2/3}$$

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

N_i : 検討 i 目断面の軸力 (N)

A_i : 検討 i 番目の軸方向鉄筋を考慮した柱の換算断面積 (mm²)

E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

I_i : 検討 i 番目の軸方向鉄筋を考慮した柱の断面二次モーメント (mm⁴)

イ 部材中立軸及び曲げ耐力の算出の一般式

部材中立軸は、軸力と、部材端部からの下記に示す式にて算出する。この場合、平面保持の仮定が成立するものとして求めた中立軸からの距離に比例する錐ひずみ及びこれに対応する応力度が各微小要素内では一定としている。なお、部材要素分割数は、 $n = 50$ とする。また、この場合、コンクリートの引張応力は無視する。

$$N_i = \sum_{j=1}^n \sigma_{cj} \Delta A s_{cj} + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} \Delta A s_{sj} \dots\dots\dots (14.2-39)$$

ここに、 σ_{cj} : 検討 j 番目の微小要素のコンクリート応力度 (N/mm²)

σ_{sj} : 検討 j 番目の微小要素の鉄筋応力度 (N/mm²)

ΔA_{cj} : 検討 j 番目の微少要素のコンクリート断面積 (mm^2)

ΔA_{sj} : 検討 j 番目の微少要素の鉄筋断面積 (mm^2)

N_i : 着目断面 i に作用する軸力 (N)

また、曲げ耐力 M_i 及びその時の曲率 ϕ_i は、以下の式により算出する。

$$M_i = \left[\sum_{j=1}^n \sigma_{cj} \times X_j \times \Delta A_{cj} + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} \times X_j \times \Delta A_{sj} \right] \dots \dots \dots (14.2-40)$$

$$\phi_i = \varepsilon_{c0} / X_0 \dots \dots \dots (14.2-41)$$

ここに、 M_i : 着目断面 i に作用する曲げモーメント (N・mm)

ϕ_i : 着目断面 i の曲率 (1/mm)

X_j : 図心から検討 j 番目の微少要素までの距離 (mm)

ε_{c0} : コンクリートの圧縮縁ひずみ

X_0 : コンクリート圧縮縁から中立軸までの距離 (mm)

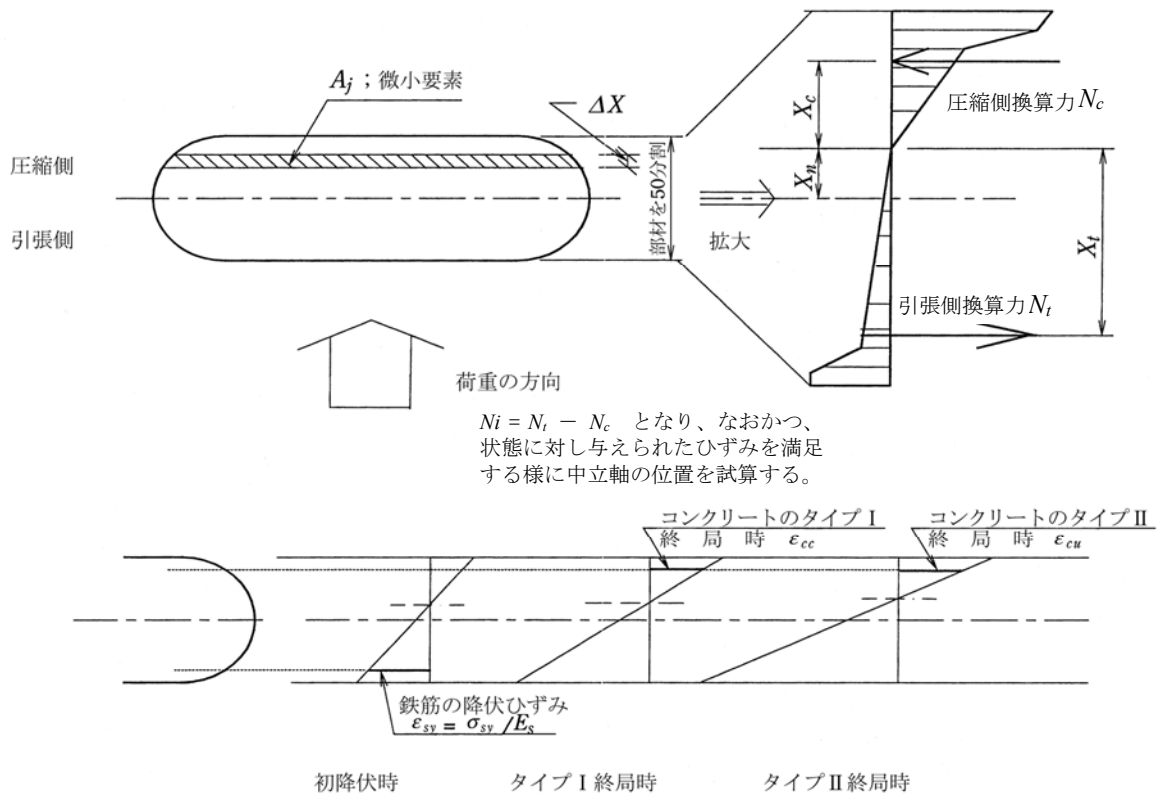


図-14.2-16 部材耐力算出時の部材ひずみ模式図

ウ 曲げ耐力 M_x 及び曲率 ϕ_x

初降伏時の耐力 M_{y0} 、その曲率 ϕ_{y0} 及び終局時の曲げ耐力 M_u 、その曲率 ϕ_u は、表下記に示す条件の下で式 (14.2-39)、式 (14.2-40)、式 (14.2-41) の連立式が成立するように中立軸の位置を試算により変化させ収束させた値となる。

表-14.2-5 各限界状態での条件

限界状態	条 件	備 考
初降伏時 M_{y0} ϕ_{y0}	・最も外側に配置された鉄筋が降伏ひずみに達した $\varepsilon_{sy} = \sigma_{sy} / E_s$ ・最も外側に配置された鉄筋が降伏強度 σ_{sy} に達した	$E_s : 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
終局時 M_u ϕ_u	・コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみに達した ・最も外側に配置された鉄筋が終局応力度 σ_{su} に達した	コンクリートの終局ひずみ タイプ I 地震動 : ε_{cc} タイプ II 地震動 : ε_{cu}

エ 降伏時の曲率 ϕ_y 及び降伏変位 δ_y

降伏時の曲率 ϕ_y 及び降伏変位 δ_y は、下式により算出する。

$$\phi_y = \left(\frac{M_u}{M_{y0}} \right) \times \phi_{y0} \quad \dots\dots\dots (14.2-42)$$

$$\delta_y = \left(\frac{M_u}{M_{y0}} \right) \times \delta_{y0} \quad \dots\dots\dots (14.2-43)$$

ここに、 M_u : 終局時の曲げ耐力 (N・mm)
 M_{y0} : 初降伏時の曲げ耐力 (N・mm)
 ϕ_{y0} : 初降伏時の曲率 (1/mm)
 δ_{y0} : 初降伏時の変位 (mm)

オ 材料の応力度－ひずみ曲線

(ア) コンクリートの応力度－ひずみ曲線

コンクリートの応力度－ひずみ曲線は、式 (14.2-44) により算出する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= \begin{cases} E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} & (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \\ \sigma_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) & (\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \\ n &= \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - \sigma_{cc}} \\ \sigma_{cc} &= \sigma_{ck} + 3.8 \alpha \rho_s \sigma_{sy} \\ \sigma_{cc} &= 0.002 + 0.033 \beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \\ E_{des} &= 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} \\ \varepsilon_{cu} &= \begin{cases} \varepsilon_{cc} & (\text{タイプ I 地震動}) \\ \varepsilon_{cc} + \frac{0.2 \sigma_{cc}}{E_{des}} & (\text{タイプ II 地震動}) \end{cases} \\ \rho_s &= \frac{4 A_h}{s \cdot d} \leq 0.018 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14.2-44)$$

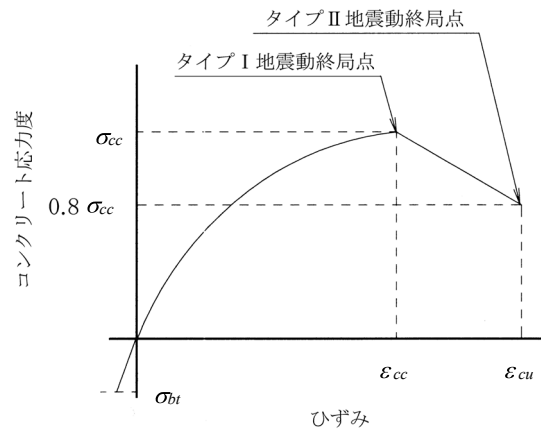


図-14.2-17 コンクリートの応力度とひずみの関係

ここに、 σ_c : コンクリート応力度 (N/mm²)

σ_{cc} : 横拘束筋で拘束されたコンクリート強度 (N/mm²)

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

ε_c : コンクリートひずみ

ε_{cu} : 横拘束筋で横拘束されたコンクリートの終局ひずみ

ε_{cc} : コンクリートが最大圧縮応力に達する時のひずみ

E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

ρ_s : 横拘束筋の体積比

A_h : 横拘束筋 1 本当たりの断面積 (mm²)

s : 横拘束筋の間隔 (mm)

d : 横拘束筋の有効長で帯鉄筋や中間帯鉄筋により分割拘束されるコアコンクリートの辺長のうち最も長い値。ただし、中間帯鉄筋を直角フックとした場合は、実コアコンクリート辺長の 1.5 倍とする。

σ_{sy} : 横拘束筋の降伏強度 (N/mm²)

α 、 β : 断面補正係数

円形断面	$\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 1.0$
矩形・中空円形 中空矩形断面	$\alpha = 0.2$ 、 $\beta = 0.4$

(イ) 鉄筋の応力度－ひずみ曲線

鉄筋の応力度－ひずみ曲線は、下記のようにモデル化する。

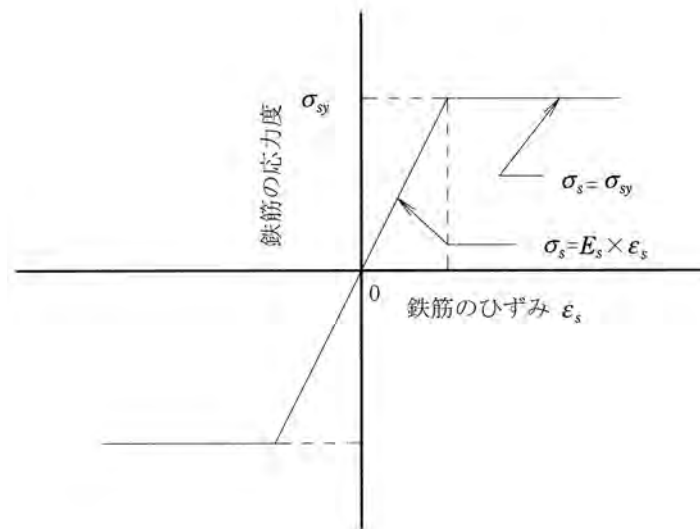


図-14.2-18 鉄筋の応力度とひずみ曲線

ここに、 σ_{sy} : 鉄筋の降伏強度 (N/mm²)

σ_s : 鉄筋の応力度 (N/mm²)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

ε_s : 鉄筋のひずみ

カ 各断面の部材曲げ耐力の分割

部材曲げ耐力の算出に用いる分割方法及び微小断面までの距離の取り扱いは、以下のとおりである。

(ア) コンクリート部分の分割

断面を n 等分した細片に分割して計算する。通常、 n は、50 分割で十分である。

a 矩形断面

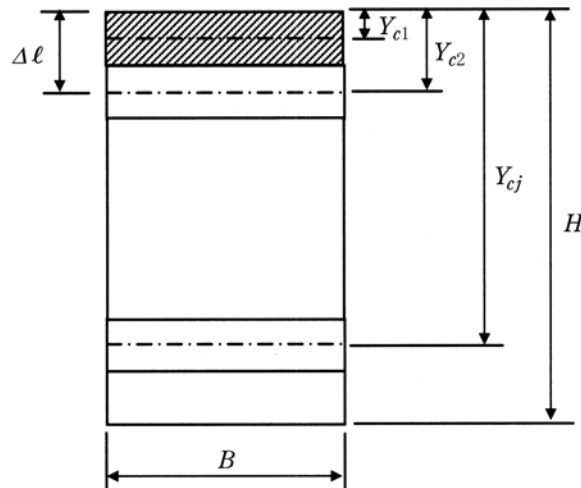


図-14.2-19 矩形断面の耐力算定分割

$$\left. \begin{aligned} \Delta \ell &= \frac{H}{n} \\ \Delta A_j &= \Delta \ell \cdot B \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n) \\ Y_{cj} &= (j-1) \cdot \Delta \ell + \frac{\Delta \ell}{2} \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (14.2-45)$$

ここに、 B : 断面幅 (mm)

H : 断面高 (mm)

n : コンクリート断面の分割数

$\Delta \ell$: コンクリート断面の細片の長さ (mm)

ΔA_j : コンクリート断面の細片の断面積 (mm²)

Y_{cj} : 圧縮縁からコンクリート細片図心までの距離 (mm)

b 円形断面

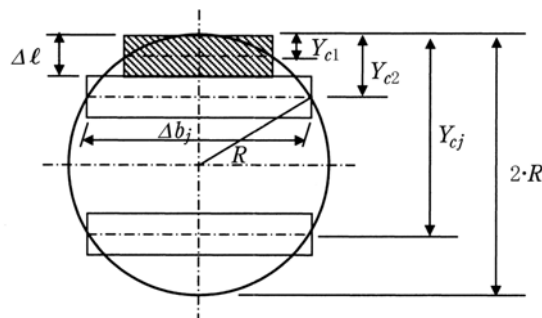


図-14.2-20 円形断面の耐力算定用分割

$$\left. \begin{aligned} \Delta \ell &= \frac{2 \cdot R}{n} \\ Y_{cj} &= (j-1) \cdot \Delta \ell + \frac{\Delta \ell}{2} \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n) \\ \Delta b_j &= 2 \cdot \sqrt{R^2 - (Y_{cj} - R)^2} \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n) \\ \Delta A_j &= \Delta \ell \cdot \Delta b_j \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14.2-46)$$

ここに、 R : コンクリート断面の半径 (mm)

n : コンクリート断面の分割数

$\Delta \ell$: コンクリート断面の細片の高さ (mm)

Δb_j : コンクリート断面の細片の断面幅 (mm)

ΔA_j : コンクリート断面の細片の断面積 (mm²)

Y_{cj} : 圧縮縁からコンクリート細片図心までの距離 (mm)

(4) 軸方向主鉄筋

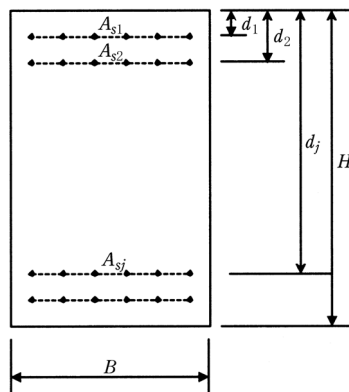


図-14.2-21 軸方向主鉄筋(矩形断面)

ここに、 B : 断面幅 (mm)

H : 断面高 (mm)

d_j : 圧縮縁から鉄筋図心までの距離 (mm)

A_{sj} : 鉄筋量 (mm²) ($j = 1, 2, 3 \cdots n_d$)

n_d : 鉄筋の配置段数

軸方向鉄筋は、主鉄筋と側鉄筋に分けて考える。主鉄筋は、圧縮鉄筋、引張鉄筋にそれぞれ圧縮縁からの距離と、その位置で鉄筋量を与える。

(ウ) 側鉄筋

側鉄筋は、均等に分布する帯状の鉄筋として扱う。

コンクリートの分割長 $\Delta\ell$ になる分割数を決定し、側鉄筋を細片に分割する。

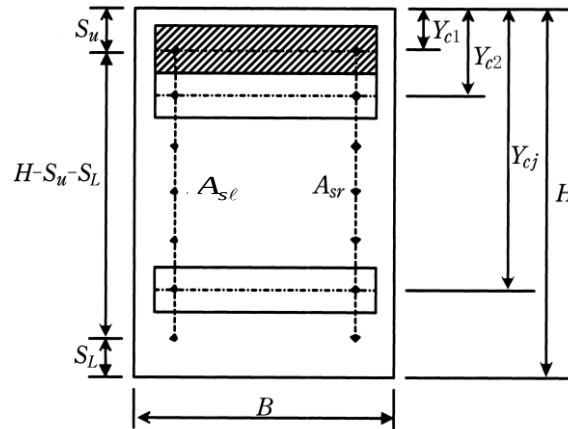


図-14.2-22 側鉄筋

$$\left. \begin{aligned} n_s &= \frac{H - S_u - S_L}{\Delta\ell} \\ \Delta\ell_s &= \frac{H - S_u - S_L}{n_s} \\ \Delta A_{ss} &= (A_{sl} + A_{sr}) \cdot \frac{\Delta\ell_s}{H - S_u - S_L} \\ Y_{cj} &= S_u + (j-1) \cdot \Delta\ell_s + \frac{\Delta\ell_s}{2} \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n_s) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (14.2-47)$$

ここに、 B : 断面幅 (mm)

H : 断面高 (mm)

S_u : 断面圧縮側の鉄筋無効長 (mm)

S_L : 断面引張側の鉄筋無効長 (mm)

A_{sl} : 左側鉄筋の全鉄筋量 (mm^2)

$\frac{A_{sl}}{H - S_u - S_L}$ の鉄筋量が $(H - S_u - S_L)$ の幅に均等に分布しているものとする。

A_{sr} : 右側鉄筋の全鉄筋量 (mm^2)

$\frac{A_{sr}}{H - S_u - S_L}$ の鉄筋量が $(H - S_u - S_L)$ の幅に均等に分布しているものとする。

$\Delta\ell$: コンクリート分割長 (mm)

n_s : 側鉄筋の分割数

$\Delta\ell_s$: 側鉄筋の分割長 (mm)

ΔA_{ss} : 側鉄筋の細片の断面積 (mm^2)

Y_{cj} : 圧縮縁からコンクリート細片図心までの距離 (mm)

(エ) 断面の曲げ耐力

a コンクリートの圧縮力 C

$$C = \sum_{j=1}^n \Delta A_j \cdot \sigma_{cj} \quad (\text{N}) \dots\dots\dots (14.2-48)$$

ここに、 ΔA_j : 細片の面積 (mm^2)

σ_{cj} : 細片の中心でのコンクリートの応力度 (N/mm^2)

n : コンクリート断面の分割数

b 軸方向主鉄筋 T_1

$$T_1 = \sum_{j=1}^{n_d} A_{sj} \cdot \sigma_{sj} \quad (\text{N}) \dots\dots\dots (14.2-49)$$

ここに、 A_{sj} : 各段の主鉄筋の断面積 (mm^2)

σ_{sj} : 各段の主鉄筋の応力度 (N/mm^2)

n_d : 主鉄筋の配置段数

c 側鉄筋 T_2

$$T_2 = \sum_{j=1}^{n_s} \Delta A_{ss} \cdot \sigma_{ssj} \quad (\text{N}) \dots\dots\dots (14.2-50)$$

ここに、 ΔA_{ss} : 細片の面積 (mm^2)

σ_{ssj} : 細片の中心での応力度 (N/mm^2)

n_s : 側鉄筋の分割数

d 断面耐力

作用軸力 N と内力がつり合う中立軸 x を求めれば、曲げ耐力 M_y は、

$$N = C + T_1 + T_2 \dots\dots\dots (14.2-51)$$

$$M_y = \sum_{j=1}^n \Delta A_j \cdot \sigma_{cj} (Y_0 - Y_{cj}) + \sum_{j=1}^{n_d} A_{sj} \cdot \sigma_{sj} (Y_0 - Y_{sj}) + \sum_{j=1}^{n_s} \Delta A_{ss} \cdot \sigma_{ssj} (Y_0 - Y_{ssj}) \dots\dots\dots (14.2-52)$$

より求まる。

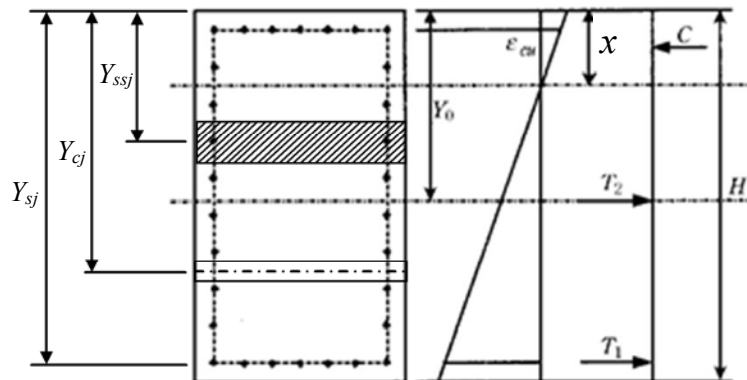


図-14.2-23 終局曲げ耐力