

道路橋の耐震設計における鉄筋コンクリート橋脚の
水平力－水平変位関係の計算例
(H24 版道示対応)

(社) 日本道路協会

橋梁委員会

耐震設計小委員会

平成 24 年 5 月

目次

・ 本資料の利用にあたって	1
・ 矩形断面の橋軸方向の水平耐力及び水平変位の計算例	2
・ 矩形断面（D51・SD490 使用）橋軸方向の水平耐力及び水平変位の計算例	8
・ 矩形断面の橋軸直角方向の水平耐力及び水平変位の計算例	14
・ 円形断面の水平耐力及び水平変位の計算例	20
・ 小判形断面の水平耐力及び水平変位の計算例	26
・ 中空断面橋脚に対する d' 及び n_s の設定例	32

本資料の利用にあたって

本資料は、平成 24 年に改定された道路橋示方書Ⅴ耐震設計編において、鉄筋コンクリート橋脚の水平力－水平変位関係の算出方法として、塑性ヒンジの形成メカニズムを踏まえ、軸方向鉄筋の引張ひずみによって定義される限界状態に基づく評価方法が導入されたことを受け、この評価方法を用いて鉄筋コンクリート橋脚の水平力－水平変位関係を算出する際の参考となるように、具体的な計算過程を例示したものである。

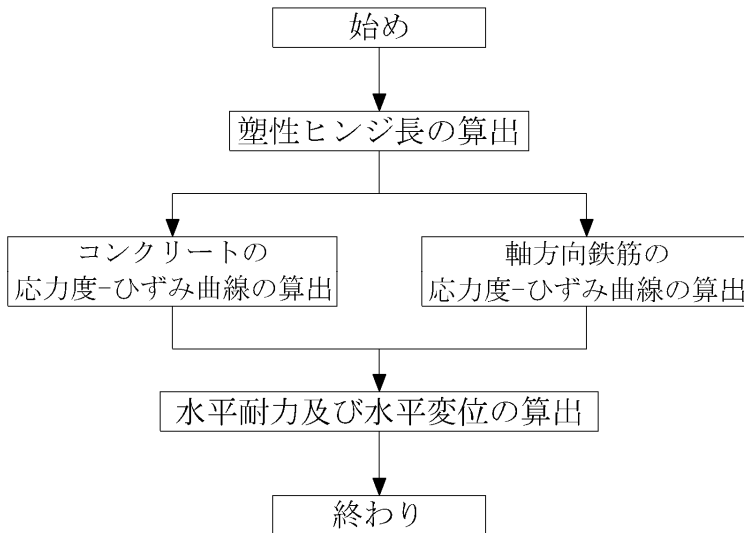
本資料では、一般的な 5 つの鉄筋コンクリート橋脚の断面条件を対象として、その水平力－水平変位関係を算出する過程を例示しているが、ここではあくまでも平成 24 年の改定において変更された水平力－水平変位関係の算出方法の箇所のみを中心に計算例を示したものであり、鉄筋コンクリート橋脚の照査までは含んでいないことに注意が必要である。また、本資料に示した鉄筋コンクリート橋脚の断面条件や計算条件等についても、あくまでも計算過程をわかりやすく示すためだけに設定したものであり、耐震設計として最適化された断面の例を示したものではないことにも注意が必要である。

本資料の利用に際しては、上述の趣旨を踏まえた上で、適切に参考にされたい。

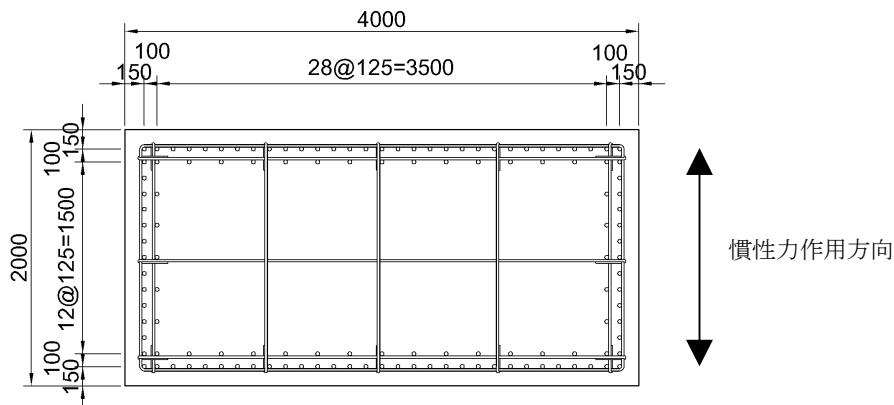
(社) 日本道路協会
橋 梁 委 員 会
耐 震 設 計 小 委 員 会

矩形断面の橋軸方向の水平耐力及び水平変位の計算例

水平耐力及び水平変位の算出の手順



計算条件



- 軸方向鉄筋径 : D32
- 横拘束筋径 : D19
- 横拘束筋間隔 : 150mm
- 鉄筋強度 : SD345
- コンクリート表面から軸方向鉄筋中心までの距離 : 150mm
- 橋脚高さ : 10m
- 慣性力作用高さ : 10m
- コンクリート基準強度 : 30N/mm²
- 鉄筋コンクリート単位体積重量 : 24.5kN/m³
- 軸応力 : 1.0N/mm²
- 上部構造死荷重 : 6040kN

・計算を簡単にするため、横梁はない条件とする。

1. 塑性ヒンジ長の算出

塑性ヒンジ長は道路橋示方書V編 10.3 に従い、次式により算出する。

$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

ただし、 $L_p \leq 0.15h$

L_p : 塑性ヒンジ長 (mm)

σ_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏点 (N/mm²)

β_n : 軸方向鉄筋のはらみ出しに対する抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、断面形状にかかわらず次式により算出する。

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co}$$

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s}$$

E_0 : 横拘束鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

I_h : 横拘束鉄筋の断面二次モーメント (mm⁴)

d' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 (mm) で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置する横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も大きい値とする。ただし、円形断面の場合においては、最外縁に配置された横拘束鉄筋が囲むコンクリートの直径の 0.8 倍の値とする。

n_s : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される圧縮側軸方向鉄筋の本数で、複数段配筋される場合においてはそれらの合計の本数とする。(d' が同じ場合は最も多い本数を n_s として用いる。側方鉄筋は計上しない。)

s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_{co} = 0.01c_0$$

c_0 : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分の最外縁に配置された軸方向鉄筋の最外面からコンクリートの表面までの距離 (mm)

ϕ' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される軸方向鉄筋の直径 (mm) で、40mm 以上の直径の軸方向鉄筋を用いる場合においては 40mm とする。(直径の異なる軸方向鉄筋が含まれている場合、小さい方の直径を用いる。)

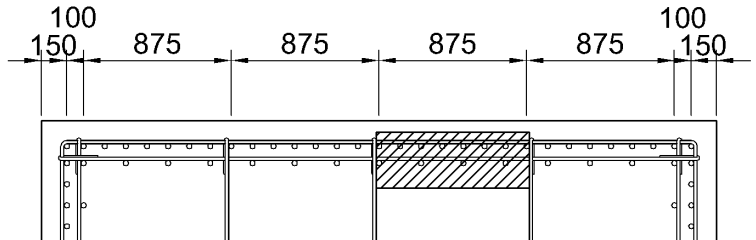
ここで、 d' 及び n_s については $d'=875\text{mm}$ 、 $n_s=12$ 本となる。

なお、軸方向鉄筋が2段配筋されており、それぞれの段において等間隔で配置されているため、 n_s は簡便のため次式により算出している。ここで、1段目の軸方向鉄筋間隔が125mm、2段目の軸方向鉄筋間隔が250mmであるため、次式によれば1段目8本、2段目4本となる。

$$n_s' = \frac{d'}{a} \quad (\text{小数点以下は切り捨て})$$

$$n_s = n_s' + 1$$

a : 軸方向鉄筋間隔(mm)



これらより、塑性ヒンジ長を算出すると次のとおりとなる。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s} = \frac{384 \times 2.0 \times 10^5 \times 6533}{12 \times 875^3 \times 150} = 0.416$$

$$\beta_{co} = 0.01c_0 = 0.01 \times 134 = 1.34$$

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co} = 0.416 + 1.34 = 1.756$$

$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

$$= 9.5 \times 345^{1/6} \times 1.756^{-1/3} \times 31.8 = 663 \leq 1500 = 0.15h$$

以上より、塑性ヒンジ長は663mmと算出される。

2. 軸方向鉄筋の応力度-ひずみ曲線の算出

軸方向鉄筋の許容引張ひずみは道路橋示方書V編 10.4に従い、次式により算出する。

・耐震性能2

$$\varepsilon_{sr2} = 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

・耐震性能3

$$\varepsilon_{sr2} = 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

ε_{sr2} : 耐震性能2の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

ε_{sr3} : 耐震性能3の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

L_p : 塑性ヒンジ長(mm) (1.で算出した値を用いる。)

ϕ : 軸方向鉄筋の直径(mm) (上限値の設定はない。)

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数(N/mm²) (1.で算出した値を用いる。)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数(N/mm²) (1.で算出した値を用いる。)

以上の式より軸方向鉄筋の許容引張ひずみを算出すると次のとおりとなる。

・耐震性能 2

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st2} &= 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.025 \times 663^{0.15} \times 31.8^{-0.15} \times 0.416^{0.2} \times 1.34^{0.22} = 0.0353\end{aligned}$$

・耐震性能 3

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st3} &= 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.035 \times 663^{0.15} \times 31.8^{-0.15} \times 0.416^{0.2} \times 1.34^{0.22} = 0.0494\end{aligned}$$

3. コンクリートの応力度-ひずみ曲線の算出

道路橋示方書V編 10.4 に従い、コンクリートの限界圧縮ひずみを次のように算出する。

・横拘束鉄筋体積比の算出

$$\rho_s = \frac{4A_h}{sd} = \frac{4 \times 286.5}{150 \times 875} = 0.00873 \leq 0.018$$

ρ_s : 横拘束鉄筋の体積比で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置された横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も小さい値とする。

A_h : 横拘束鉄筋 1 本あたりの断面積 (mm²)

s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)

d : コンクリートの横拘束効果を考慮するための横拘束鉄筋の有効長 (mm)

・コンクリートの最大圧縮応力度に達する時のひずみの算出

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cc} &= 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \\ &= 0.002 + 0.033 \times 0.4 \times \frac{0.00873 \times 345}{30} = 0.00333\end{aligned}$$

ε_{cc} : コンクリートの最大圧縮応力度に達するときのひずみ

β : 断面補正係数で、矩形断面の場合においては 0.4

σ_{sy} : 横拘束鉄筋の降伏点 (N/mm²) で、上限を 345N/mm² とする。

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度の算出

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\rho_s\sigma_{sy} = 30 + 3.8 \times 0.2 \times 0.00873 \times 345 = 32.3$$

σ_{cc} : 横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度 (N/mm²)

α : 断面補正係数で、矩形断面の場合においては 0.2

・応力度-ひずみ曲線の下降勾配の算出

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} = 11.2 \times \frac{30^2}{0.00873 \times 345} = 3347$$

E_{des} : 応力度-ひずみ曲線の下降勾配 (N/mm²)

・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの限界圧縮ひずみの算出

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.5\sigma_{cc}}{E_{des}} = 0.00333 + \frac{0.5 \times 32.3}{3347} = 0.00816$$

4. 水平耐力及び水平変位の算出

道路橋示方書V編 10.3の規定に従い、上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位の関係を、橋脚の各断面における曲げモーメント-曲率の関係をを用いて算出する。橋脚躯体基部断面における曲げモーメント-曲率の関係を示すと次のようになる。

算出における補足事項

- ・耐震性能2又は耐震性能3の限界状態における水平耐力を算出する場合には、圧縮側のかぶりコンクリートは圧縮応力を分担しないと仮定する。
- ・塑性ヒンジ領域以外の断面に対して曲げモーメント-曲率関係を算出する場合には、塑性ヒンジ長の上限值 $0.15h$ は考慮しなくてよい。
- ・軸方向鉄筋の段落のない単柱式の鉄筋コンクリート橋脚のように、塑性ヒンジが柱基部のみに形成されることが明らかな場合には、簡便のため、軸方向鉄筋の許容引張ひずみの算出の際に用いる塑性ヒンジ長は、塑性ヒンジ領域以外の断面に対しても塑性ヒンジ領域に対して求めた塑性ヒンジ長の値としてよい。

・曲げモーメント-曲率関係の算出

ひび割れ時	$M_c = 9.588 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_c = 1.121 \times 10^{-7} \text{ 1/mm}$
初降伏時	$M_{y0} = 3.041 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{y0} = 1.360 \times 10^{-6} \text{ 1/mm}$
耐震性能2の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls2} = 3.449 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls2} = 2.315 \times 10^{-5} \text{ 1/mm}$
耐震性能3の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls3} = 3.446 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls3} = 3.232 \times 10^{-5} \text{ 1/mm}$

M_c : ひび割れ曲げモーメント (N・mm)

M_{y0} : 最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls2} : 耐震性能2の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls3} : 耐震性能3の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

ϕ_c : ひび割れ曲率 (1/mm)

ϕ_{y0} : 橋脚基部断面の最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの曲率 (1/mm)

ϕ_{ls2} : 橋脚基部断面における耐震性能 2 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

ϕ_{ls3} : 橋脚基部断面における耐震性能 3 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

・ 橋脚躯体の上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位関係の算出

$$\delta_{y0} = 39.0$$

$$\phi_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \phi_{y0} = \frac{3.449 \times 10^{10}}{3.041 \times 10^{10}} \times 1.360 \times 10^{-6} = 1.542 \times 10^{-6}$$

$$P_u = M_{ls2} / h = 3.449 \times 10^{10} / 10000 = 3.449 \times 10^6$$

$$\delta_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \delta_{y0} = \frac{3.449 \times 10^{10}}{3.041 \times 10^{10}} \times 39.0 = 44.2$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls2} &= \delta_y + (\phi_{ls2} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 44.2 + (2.315 \times 10^{-5} - 1.542 \times 10^{-6}) \times 663 \times (10000 - 663 / 2) = 183 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls3} &= \delta_y + (\phi_{ls3} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 44.2 + (3.232 \times 10^{-5} - 1.542 \times 10^{-6}) \times 663 \times (10000 - 663 / 2) = 241 \end{aligned}$$

δ_{y0} : 初降伏変位 (mm)

ϕ_y : 橋脚基部断面における降伏曲率 (1/mm)

P_u : 終局水平耐力 (N)

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

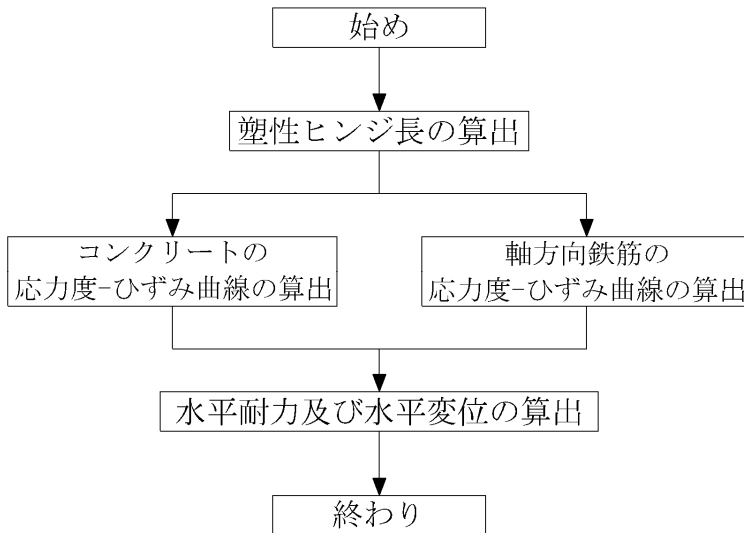
δ_y : 降伏変位 (mm)

δ_{ls2} : 耐震性能 2 の限界状態に相当する変位 (mm)

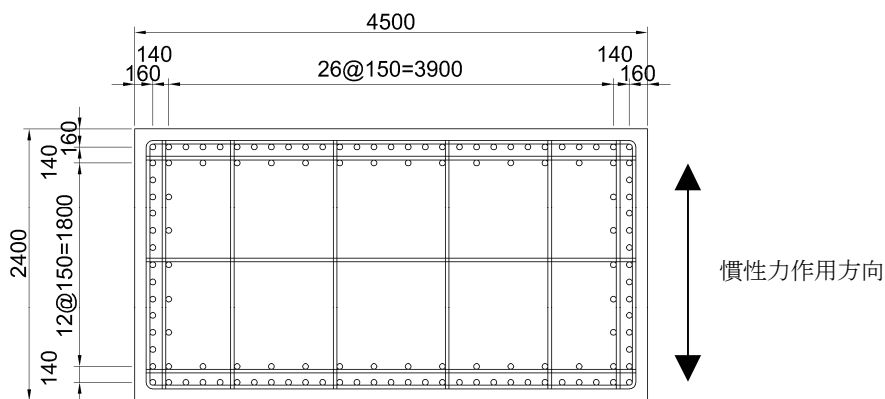
δ_{ls3} : 耐震性能 3 の限界状態に相当する変位 (mm)

矩形断面 (D51 鉄筋・SD490 使用) 橋軸方向の水平耐力及び水平変位の計算例

水平耐力及び水平変位の算出の手順



計算条件



- 軸方向鉄筋径 : D51
- 横拘束筋径 : D29
- 横拘束筋間隔 : 250mm
- 鉄筋強度 : 軸方向鉄筋 SD490、帯鉄筋、中間帯鉄筋 SD390
- コンクリート表面から軸方向鉄筋中心までの距離 : 160mm
- 橋脚高さ : 10m
- 慣性力作用高さ : 10m
- コンクリート基準強度 : 30N/mm²
- 鉄筋コンクリート単位体積重量 : 24.5kN/m³
- 軸応力 : 1.0N/mm²
- 上部構造死荷重 : 8154kN

・計算を簡単にするため、横梁はない条件とする。

1. 塑性ヒンジ長の算出

塑性ヒンジ長は道路橋示方書V編 10.3 に従い、次式により算出する。

$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

ただし、 $L_p \leq 0.15h$

L_p : 塑性ヒンジ長 (mm)

σ_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏点 (N/mm²)

β_n : 軸方向鉄筋のはらみ出しに対する抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、断面形状にかかわらず次式により算出する。

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co}$$

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s}$$

E_0 : 横拘束鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

I_h : 横拘束鉄筋の断面二次モーメント (mm⁴)

d' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 (mm) で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置する横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も大きい値とする。ただし、円形断面の場合においては、最外縁に配置された横拘束鉄筋が囲むコンクリートの直径の 0.8 倍の値とする。

n_s : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される圧縮側軸方向鉄筋の本数で、複数段配筋される場合においてはそれらの合計の本数とする。(d' が同じ場合は最も多い本数を n_s として用いる。側方鉄筋は計上しない。)

s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_{co} = 0.01c_0$$

c_0 : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分の最外縁に配置された軸方向鉄筋の最外面からコンクリートの表面までの距離 (mm)

ϕ' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される軸方向鉄筋の直径 (mm) で、40mm 以上の直径の軸方向鉄筋を用いる場合においては 40mm とする。(直径の異なる軸方向鉄筋が含まれている場合、小さい方の直径を用いる。)

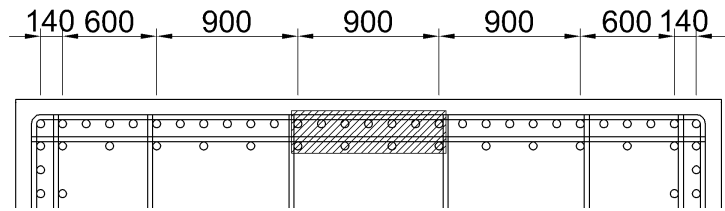
ここで、 d' 及び n_s については $d'=900\text{mm}$, $n_s=11$ 本となる。

なお、軸方向鉄筋が2段配筋されており、それぞれの段において等間隔で配置されているため、 n_s は簡便のため次式により算出している。ここで、1段目の軸方向鉄筋間隔が150mm、2段目の軸方向鉄筋間隔が300mmであるため、次式によれば1段目7本、2段目4本となる。

$$n_s' = \frac{d'}{a} \quad (\text{小数点以下は切り捨て})$$

$$n_s = n_s' + 1$$

a : 軸方向鉄筋間隔(mm)



これらより、塑性ヒンジ長を算出すると次のとおりとなる。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s} = \frac{384 \times 2.0 \times 10^5 \times 32842}{11 \times 900^3 \times 250} = 1.258$$

$$\beta_{co} = 0.01c_0 = 0.01 \times 134.5 = 1.345$$

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co} = 1.258 + 1.345 = 2.603$$

$$L_p = 9.5 \sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

$$= 9.5 \times 490^{1/6} \times 2.603^{-1/3} \times 40 = 776 < 1500 = 0.15h$$

以上より、塑性ヒンジ長は776mmと算出される。

なお、ここでは軸方向鉄筋径がD51であるため、 ϕ' については上限値の40mmとして計算している。

2. 軸方向鉄筋の応力度-ひずみ曲線の算出

軸方向鉄筋の許容引張ひずみは道路橋示方書V編10.4に従い、次式により算出する。

・耐震性能2

$$\varepsilon_{st2} = 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

・耐震性能3

$$\varepsilon_{st2} = 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

ε_{st2} : 耐震性能2の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

ε_{st3} : 耐震性能3の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

L_p : 塑性ヒンジ長(mm) (1.で算出した値を用いる。)

ϕ : 軸方向鉄筋の直径(mm) (上限値の設定はない。)

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数(N/mm²) (1.で算出した値を用いる。)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数(N/mm²) (1.で算出した値を用いる。)

以上の式より軸方向鉄筋の許容引張りひずみを算出すると次のとおりとなる。

・耐震性能 2

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st2} &= 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.025 \times 776^{0.15} \times 50.8^{-0.15} \times 1.258^{0.2} \times 1.345^{0.22} = 0.0421\end{aligned}$$

・耐震性能 3

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st3} &= 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.035 \times 776^{0.15} \times 50.8^{-0.15} \times 1.258^{0.2} \times 1.345^{0.22} = 0.0589\end{aligned}$$

3. コンクリートの応力度-ひずみ曲線の算出

道路橋示方書V編 10.4 に従い、コンクリートの限界圧縮ひずみを次のように算出する。

・横拘束鉄筋体積比の算出

$$\rho_s = \frac{4A_h}{sd} = \frac{4 \times 642.4}{250 \times 900} = 0.01142 \leq 0.018$$

ρ_s ：横拘束鉄筋の体積比で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置された横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も小さい値とする。

A_h ：横拘束鉄筋 1 本あたりの断面積(mm²)

s ：横拘束鉄筋の間隔(mm)

d ：コンクリートの横拘束効果を考慮するための横拘束鉄筋の有効長(mm)

・コンクリートの最大圧縮応力度に達する時のひずみの算出

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cc} &= 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \\ &= 0.002 + 0.033 \times 0.4 \times \frac{0.01142 \times 345}{30} = 0.00373\end{aligned}$$

ε_{cc} ：コンクリートの最大圧縮応力度に達するときのひずみ

β ：断面補正係数で、矩形断面の場合においては 0.4

σ_{sy} ：横拘束鉄筋の降伏点(N/mm²)で、上限を 345N/mm² とする。

σ_{ck} ：コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度の算出

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\rho_s\sigma_{sy} = 30 + 3.8 \times 0.2 \times 0.01142 \times 345 = 33.0$$

σ_{cc} ：横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度(N/mm²)

α ：断面補正係数で、矩形断面の場合においては 0.2

- ・応力度-ひずみ曲線の下降勾配の算出

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} = 11.2 \times \frac{30^2}{0.01142 \times 345} = 2558$$

E_{des} : 応力度-ひずみ曲線の下降勾配 (N/mm²)

- ・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの限界圧縮ひずみの算出

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.5\sigma_{cc}}{E_{des}} = 0.00373 + \frac{0.5 \times 33.0}{2558} = 0.01018$$

4. 水平耐力及び水平変位の算出

道路橋示方書V編 10.3の規定に従い、上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位の関係を、橋脚の各断面における曲げモーメント-曲率の関係をを用いて算出する。橋脚躯体基部断面における曲げモーメント-曲率の関係を示すと次のようになる。

算出における補足事項

- ・耐震性能2又は耐震性能3の限界状態における水平耐力を算出する場合には、圧縮側のかぶりコンクリートは圧縮応力を分担しないと仮定する。
- ・塑性ヒンジ領域以外の断面に対して曲げモーメント-曲率関係を算出する場合には、塑性ヒンジ長の上限值 $0.15h$ は考慮しなくてよい。
- ・軸方向鉄筋の段落のない単柱式の鉄筋コンクリート橋脚のように、塑性ヒンジが柱基部のみに形成されることが明らかな場合には、簡便のため、軸方向鉄筋の許容引張ひずみの算出の際に用いる塑性ヒンジ長は、塑性ヒンジ領域以外の断面に対しても塑性ヒンジ領域に対して求めた塑性ヒンジ長の値としてよい。

- ・曲げモーメント-曲率関係の算出

ひび割れ時 $M_c = 1.685 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_c = 9.167 \times 10^{-8} \text{ 1/mm}$

初降伏時 $M_{y0} = 1.065 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{y0} = 1.700 \times 10^{-6} \text{ 1/mm}$

耐震性能2の限界状態に達するとき $M_{ls2} = 1.258 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls2} = 2.411 \times 10^{-5} \text{ 1/mm}$

(軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)

耐震性能3の限界状態に達するとき $M_{ls3} = 1.250 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls3} = 2.888 \times 10^{-5} \text{ 1/mm}$

(コンクリートの限界圧縮ひずみで決定)

M_c : ひび割れ曲げモーメント (N・mm)

M_{y0} : 最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls2} : 耐震性能2の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls3} : 耐震性能3の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

ϕ_c : ひび割れ曲率 (1/mm)

ϕ_{y0} : 橋脚基部断面の最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの曲率 (1/mm)

ϕ_{ls2} : 橋脚基部断面における耐震性能 2 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

ϕ_{ls3} : 橋脚基部断面における耐震性能 3 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

・ 橋脚躯体の上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位関係の算出

$$\delta_{y0} = 53.5$$

$$\phi_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \phi_{y0} = \frac{1.258 \times 10^{11}}{1.065 \times 10^{11}} \times 1.700 \times 10^{-6} = 2.008 \times 10^{-6}$$

$$P_u = M_{ls2} / h = 1.258 \times 10^{11} / 10000 = 1.258 \times 10^7$$

$$\delta_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \delta_{y0} = \frac{1.258 \times 10^{11}}{1.065 \times 10^{11}} \times 53.5 = 63.2$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls2} &= \delta_y + (\phi_{ls2} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 63.2 + (2.411 \times 10^{-5} - 2.008 \times 10^{-6}) \times 776 \times (10000 - 776 / 2) = 228 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls3} &= \delta_y + (\phi_{ls3} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 63.2 + (2.888 \times 10^{-5} - 2.008 \times 10^{-6}) \times 776 \times (10000 - 776 / 2) = 264 \end{aligned}$$

δ_{y0} : 初降伏変位 (mm)

ϕ_y : 橋脚基部断面における降伏曲率 (1/mm)

P_u : 終局水平耐力 (N)

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

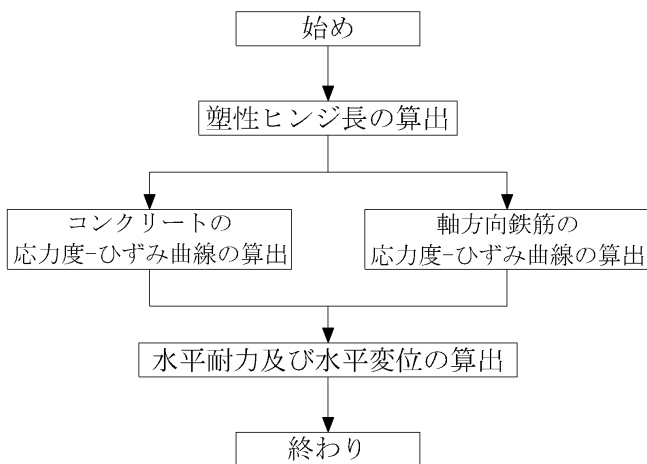
δ_y : 降伏変位 (mm)

δ_{ls2} : 耐震性能 2 の限界状態に相当する変位 (mm)

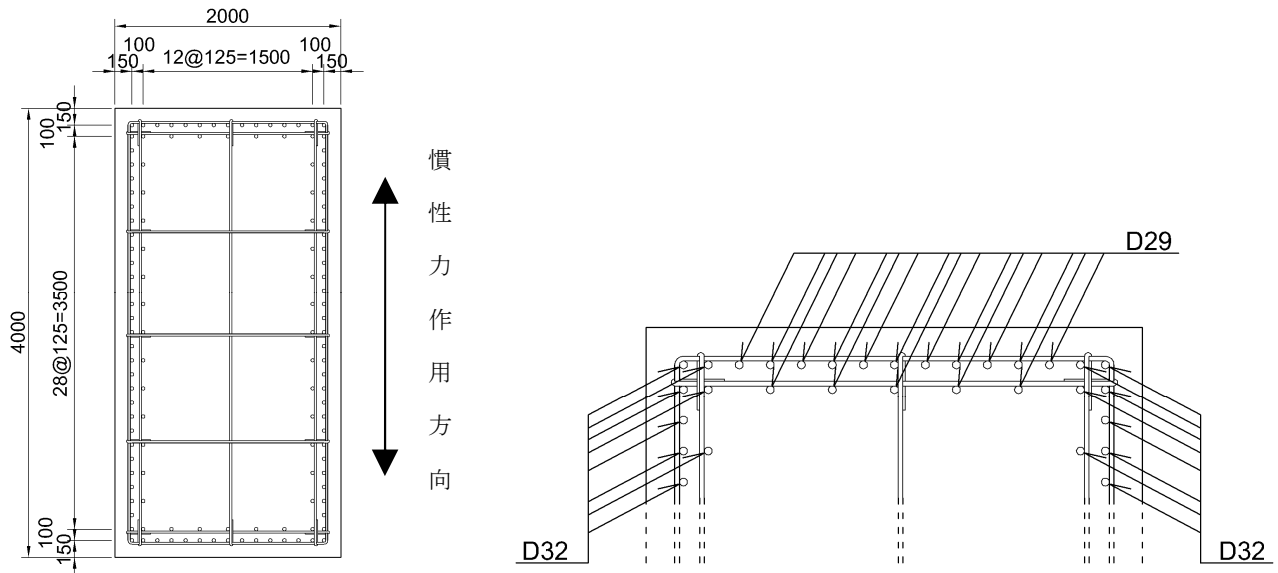
δ_{ls3} : 耐震性能 3 の限界状態に相当する変位 (mm)

矩形断面の橋軸直角方向の水平耐力及び水平変位の計算例

水平耐力及び水平変位の算出の手順



計算条件



- 軸方向鉄筋径 : D32、D29
- 横拘束筋径 : D19
- 横拘束筋間隔 : 150mm
- 鉄筋強度 : SD345
- コンクリート表面から軸方向鉄筋中心までの距離 : 150mm
- 橋脚高さ : 10m
- 慣性力作用高さ : 10m
- コンクリート基準強度 : 30N/mm²
- 鉄筋コンクリート単位体積重量 : 24.5kN/m³
- 軸応力 : 1.0N/mm²
- 上部構造死荷重 : 6040kN

・計算を簡単にするため、横梁はない条件とする。

1. 塑性ヒンジ長の算出

塑性ヒンジ長は道路橋示方書V編 10.3 に従い、次式により算出する。

$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

ただし、 $L_p \leq 0.15h$

L_p : 塑性ヒンジ長 (mm)

σ_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏点 (N/mm²)

β_n : 軸方向鉄筋のはらみ出しに対する抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、断面形状にかかわらず次式により算出する。

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co}$$

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s}$$

E_0 : 横拘束鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

I_h : 横拘束鉄筋の断面二次モーメント (mm⁴)

d' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 (mm) で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置する横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も大きい値とする。ただし、円形断面の場合においては、最外縁に配置された横拘束鉄筋が囲むコンクリートの直径の 0.8 倍の値とする。

n_s : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される圧縮側軸方向鉄筋の本数で、複数段配筋される場合においてはそれらの合計の本数とする。(d' が同じ場合は最も多い本数を n_s として用いる。側方鉄筋は計上しない。)

s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_{co} = 0.01c_0$$

c_0 : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分の最外縁に配置された軸方向鉄筋の最外面からコンクリートの表面までの距離 (mm)

ϕ' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される軸方向鉄筋の直径 (mm) で、40mm 以上の直径の軸方向鉄筋を用いる場合においては 40mm とする。(直径の異なる軸方向鉄筋が含まれている場合、小さい方の直径を用いる。)

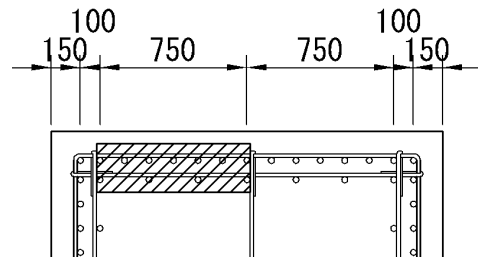
ここで、 d' 及び n_s については $d'=750\text{mm}$ 、 $n_s=11$ 本となる。

なお、軸方向鉄筋が2段配筋されており、それぞれの段において等間隔で配置されているため、 n_s は簡便のため次式により算出している。ここで、1段目の軸方向鉄筋間隔が125mm、2段目の軸方向鉄筋間隔が250mmであるため、次式によれば1段目7本、2段目4本となる。

$$n_s' = \frac{d'}{a} \quad (\text{小数点以下は切り捨て})$$

$$n_s = n_s' + 1$$

a : 軸方向鉄筋間隔(mm)



これらより、塑性ヒンジ長を算出すると次のとおりとなる。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d^3 s} = \frac{384 \times 2.0 \times 10^5 \times 6533}{11 \times 750^3 \times 150} = 0.721$$

$$\beta_{co} = 0.01c_0 = 0.01 \times 135.5 = 1.355$$

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co} = 0.721 + 1.355 = 2.076$$

$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

$$= 9.5 \times 345^{1/6} \times 2.076^{-1/3} \times 28.6 = 564 < 1500 = 0.15h$$

以上より、塑性ヒンジ長は564mmと算出される。

なお、ここでは軸方向鉄筋径はD32及びD29であるが、 ϕ' については小さい方の鉄筋径である28.6mmを用いて計算している。

2. 軸方向鉄筋の応力度-ひずみ曲線の算出

軸方向鉄筋の許容引張ひずみは道路橋示方書V編10.4に従い、次式により算出する。

・耐震性能2

$$\varepsilon_{st2} = 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

・耐震性能3

$$\varepsilon_{st2} = 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

ε_{st2} : 耐震性能2の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

ε_{st3} : 耐震性能3の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

L_p : 塑性ヒンジ長(mm) (1.で算出した値を用いる。)

ϕ : 軸方向鉄筋の直径(mm) (上限値の設定はない。)

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数(N/mm²) (1.で算出した値を用いる。)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数(N/mm²) (1.で算出した値を用いる。)

以上の式より軸方向鉄筋の許容引張りひずみを算出すると次のとおりとなる。

・耐震性能 2

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st2} &= 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.025 \times 564^{0.15} \times 28.6^{-0.15} \times 0.721^{0.2} \times 1.355^{0.22} = 0.0392\end{aligned}$$

・耐震性能 3

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st3} &= 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.035 \times 564^{0.15} \times 28.6^{-0.15} \times 0.721^{0.2} \times 1.355^{0.22} = 0.0548\end{aligned}$$

3. コンクリートの応力度-ひずみ曲線の算出

道路橋示方書V編 10.4 に従い、コンクリートの限界圧縮ひずみを次のように算出する。

・横拘束鉄筋体積比の算出

$$\rho_s = \frac{4A_h}{sd} = \frac{4 \times 286.5}{150 \times 750} = 0.01019 \leq 0.018$$

ρ_s : 横拘束鉄筋の体積比で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置された横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も小さい値とする。

A_h : 横拘束鉄筋 1 本あたりの断面積 (mm²)

s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)

d : コンクリートの横拘束効果を考慮するための横拘束鉄筋の有効長 (mm)

・コンクリートの最大圧縮応力度に達する時のひずみの算出

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cc} &= 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \\ &= 0.002 + 0.033 \times 0.4 \times \frac{0.01019 \times 345}{30} = 0.00355\end{aligned}$$

ε_{cc} : コンクリートの最大圧縮応力度に達するときのひずみ

β : 断面補正係数で、矩形断面の場合においては 0.4

σ_{sy} : 横拘束鉄筋の降伏点 (N/mm²) で、上限を 345N/mm² とする。

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度の算出

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\rho_s\sigma_{sy} = 30 + 3.8 \times 0.2 \times 0.01019 \times 345 = 32.7$$

σ_{cc} : 横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度 (N/mm²)

α : 断面補正係数で、矩形断面の場合においては 0.2

- ・応力度-ひずみ曲線の下降勾配の算出

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} = 11.2 \times \frac{30^2}{0.01019 \times 345} = 2867$$

E_{des} : 応力度-ひずみ曲線の下降勾配 (N/mm²)

- ・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの限界圧縮ひずみの算出

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.5\sigma_{cc}}{E_{des}} = 0.00355 + \frac{0.5 \times 32.7}{2867} = 0.00925$$

4. 水平耐力及び水平変位の算出

道路橋示方書V編 10.3の規定に従い、上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位の関係を、橋脚の各断面における曲げモーメント-曲率の関係をを用いて算出する。橋脚躯体基部断面における曲げモーメント-曲率の関係を示すと次のようになる。

算出における補足事項

- ・耐震性能2又は耐震性能3の限界状態における水平耐力を算出する場合には、圧縮側のかぶりコンクリートは圧縮応力を分担しないと仮定する。
- ・塑性ヒンジ領域以外の断面に対して曲げモーメント-曲率関係を算出する場合には、塑性ヒンジ長の上限值 $0.15h$ は考慮しなくてよい。
- ・軸方向鉄筋の段落のない単柱式の鉄筋コンクリート橋脚のように、塑性ヒンジが柱基部のみに形成されることが明らかな場合には、簡便のため、軸方向鉄筋の許容引張ひずみの算出の際に用いる塑性ヒンジ長は、塑性ヒンジ領域以外の断面に対しても塑性ヒンジ領域に対して求めた塑性ヒンジ長の値としてよい。

- ・曲げモーメント-曲率関係の算出

ひび割れ時	$M_c = 1.864 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_c = 5.609 \times 10^{-8} \text{ 1/mm}$
初降伏時	$M_{y0} = 5.084 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{y0} = 6.431 \times 10^{-7} \text{ 1/mm}$
耐震性能2の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls2} = 6.890 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls2} = 1.224 \times 10^{-5} \text{ 1/mm}$
耐震性能3の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls3} = 6.780 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls3} = 1.730 \times 10^{-5} \text{ 1/mm}$

M_c : ひび割れ曲げモーメント (N・mm)

M_{y0} : 最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls2} : 耐震性能2の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls3} : 耐震性能3の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

ϕ_c : ひび割れ曲率 (1/mm)

ϕ_{y0} : 橋脚基部断面の最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの曲率 (1/mm)

ϕ_{ls2} : 橋脚基部断面における耐震性能 2 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

ϕ_{ls3} : 橋脚基部断面における耐震性能 3 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

・ 橋脚躯体の上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位関係の算出

$$\delta_{y0} = 17.7$$

$$\phi_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \phi_{y0} = \frac{6.890 \times 10^{10}}{5.084 \times 10^{10}} \times 6.431 \times 10^{-7} = 8.715 \times 10^{-7}$$

$$P_u = M_{ls2} / h = 6.890 \times 10^{10} / 10000 = 6.890 \times 10^6$$

$$\delta_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \delta_{y0} = \frac{6.890 \times 10^{10}}{5.084 \times 10^{10}} \times 17.7 = 24.0$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls2} &= \delta_y + (\phi_{ls2} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 24.0 + (1.224 \times 10^{-5} - 8.715 \times 10^{-7}) \times 564 \times (10000 - 564 / 2) = 86 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls3} &= \delta_y + (\phi_{ls3} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 24.0 + (1.730 \times 10^{-5} - 8.715 \times 10^{-7}) \times 564 \times (10000 - 564 / 2) = 114 \end{aligned}$$

δ_{y0} : 初降伏変位 (mm)

ϕ_y : 橋脚基部断面における降伏曲率 (1/mm)

P_u : 終局水平耐力 (N)

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

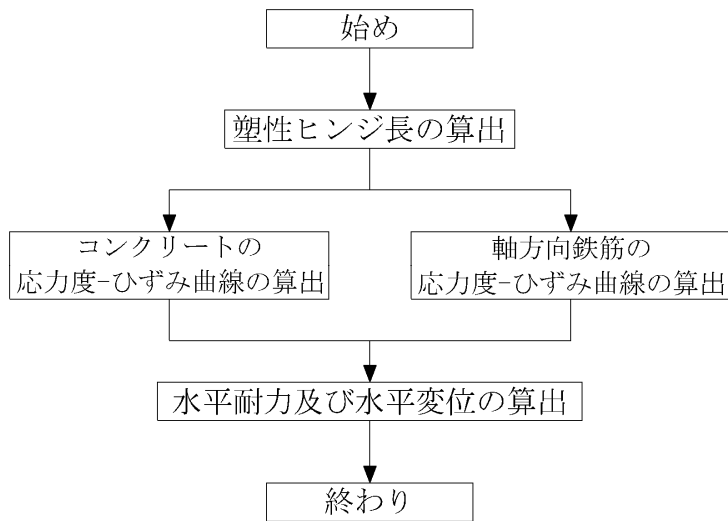
δ_y : 降伏変位 (mm)

δ_{ls2} : 耐震性能 2 の限界状態に相当する変位 (mm)

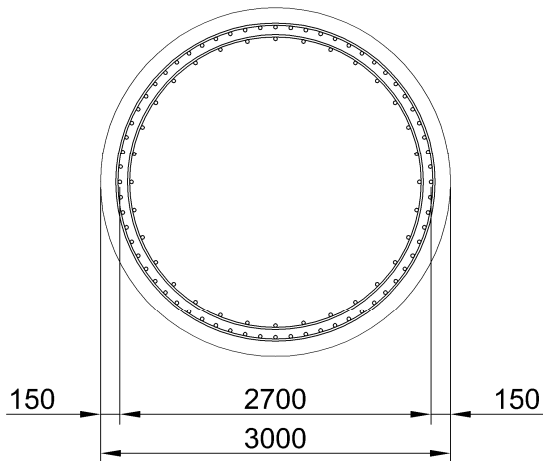
δ_{ls3} : 耐震性能 3 の限界状態に相当する変位 (mm)

円形断面の水平耐力及び水平変位の計算例

水平耐力及び水平変位の算出の手順



計算条件



軸方向鉄筋径 : D32 (1段目 64本 2段目 32本)

横拘束筋径 : D19

横拘束筋間隔 : 150mm

鉄筋強度 : SD345

コンクリート表面から軸方向鉄筋中心までの距離 : 150mm (1段目 150mm、2段目 250mm)

橋脚高さ : 10m

慣性力作用高さ : 10m

コンクリート基準強度 : 30N/mm²

鉄筋コンクリート単位体積重量 : 24.5kN/m³

軸応力 : 1.0N/mm²

上部構造死荷重 : 5338kN

・計算を簡単にするため、横梁はない条件とする。

1. 塑性ヒンジ長の算出

塑性ヒンジ長は道路橋示方書V編 10.3 に従い、次式により算出する。

$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

ただし、 $L_p \leq 0.15h$

L_p : 塑性ヒンジ長 (mm)

σ_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏点 (N/mm²)

β_n : 軸方向鉄筋のはらみ出しに対する抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、断面形状にかかわらず次式により算出する。

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co}$$

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s}$$

E_0 : 横拘束鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

I_h : 横拘束鉄筋の断面二次モーメント (mm⁴)

d' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 (mm) で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置する横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も大きい値とする。ただし、円形断面の場合においては、最外縁に配置された横拘束鉄筋が囲むコンクリートの直径の 0.8 倍の値とする。

n_s : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される圧縮側軸方向鉄筋の本数で、複数段配筋される場合においてはそれらの合計の本数とする。(円形断面の場合には全本数の 0.3 倍の値を小数点以下切り捨てとした値とする。)

s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_{co} = 0.01c_0$$

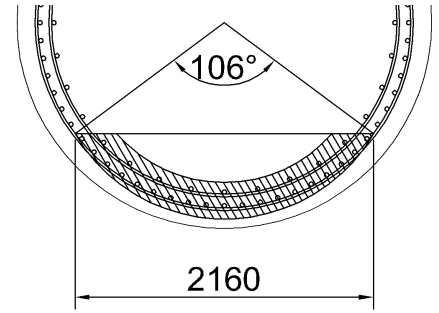
c_0 : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分の最外縁に配置された軸方向鉄筋の最外面からコンクリートの表面までの距離 (mm)

ϕ' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される軸方向鉄筋の直径 (mm) で、40mm 以上の直径の軸方向鉄筋を用いる場合においては 40mm とする。(直径の異なる軸方向鉄筋が含まれている場合、小さい方の直径を用いる。)

ここで d' 及び n_s については $d' = 2160\text{mm}$ 及び $n_s = 28$ 本となる。

なお、軸方向鉄筋の全本数は 96 本であり、これを 0.3 倍し、小数点以下を切り捨てることにより、 n_s を求めている。

$$n_s = 96 \times 0.3 = 28.8 \quad (\text{小数点以下は切り捨て})$$



これらより、塑性ヒンジ長を算出すると次のとおりとなる。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d^{13} s} = \frac{384 \times 2.0 \times 10^5 \times 6533}{28 \times 2160^3 \times 150} = 0.012$$

$$\beta_{co} = 0.01c_0 = 0.01 \times 134 = 1.34$$

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co} = 0.012 + 1.34 = 1.352$$

$$L_p = 9.5 \sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

$$= 9.5 \times 345^{1/6} \times 1.352^{-1/3} \times 31.8 = 724 < 1500 = 0.15h$$

以上より、塑性ヒンジ長は 724mm と算出される。

2. 軸方向鉄筋の応力度-ひずみ曲線の算出

軸方向鉄筋の許容引張ひずみは道路橋示方書 V 編 10.4 に従い、次式により算出する。

・耐震性能 2

$$\varepsilon_{st2} = 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

・耐震性能 3

$$\varepsilon_{st2} = 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

ε_{st2} : 耐震性能 2 の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

ε_{st3} : 耐震性能 3 の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

L_p : 塑性ヒンジ長 (mm) (1. で算出した値を用いる。)

ϕ : 軸方向鉄筋の直径 (mm) (上限値の設定はない。)

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm²) (1. で算出した値を用いる。)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm²) (1. で算出した値を用いる。)

以上の式より軸方向鉄筋の許容引張ひずみを算出すると次のとおりとなる。

・耐震性能 2

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st2} &= 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.025 \times 724^{0.15} \times 31.8^{-0.15} \times 0.012^{0.2} \times 1.34^{0.22} = 0.0176\end{aligned}$$

・耐震性能 3

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st3} &= 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.035 \times 724^{0.15} \times 31.8^{-0.15} \times 0.012^{0.2} \times 1.34^{0.22} = 0.0246\end{aligned}$$

3. コンクリートの応力度-ひずみ曲線の算出

道路橋示方書V編 10.4 に従い、コンクリートの限界圧縮ひずみを次のように算出する。

・横拘束鉄筋体積比の算出

$$\rho_s = \frac{4A_h}{sd} = \frac{4 \times 573}{150 \times 2700} = 0.00566 \leq 0.018$$

ρ_s : 横拘束鉄筋の体積比で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置された横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も小さい値とする。

A_h : 横拘束鉄筋 1 本あたりの断面積(mm²) (円形断面で帯鉄筋が多段配筋されている場合には配置される帯鉄筋の本数分考慮できる。)

s : 横拘束鉄筋の間隔(mm)

d : コンクリートの横拘束効果を考慮するための横拘束鉄筋の有効長(mm)

・コンクリートの最大圧縮応力度に達する時のひずみの算出

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cc} &= 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \\ &= 0.002 + 0.033 \times 1.0 \times \frac{0.00566 \times 345}{30} = 0.00415\end{aligned}$$

ε_{cc} : コンクリートの最大圧縮応力度に達するときのひずみ

β : 断面補正係数で、円形断面の場合においては 1.0

σ_{sy} : 横拘束鉄筋の降伏点(N/mm²)で、上限を 345N/mm² とする。

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度の算出

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\rho_s\sigma_{sy} = 30 + 3.8 \times 1.0 \times 0.00566 \times 345 = 37.4$$

σ_{cc} : 横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度(N/mm²)

α : 断面補正係数で、円形断面の場合においては 1.0

- ・応力度-ひずみ曲線の下降勾配の算出

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} = 11.2 \times \frac{30^2}{0.00566 \times 345} = 5162$$

E_{des} : 応力度-ひずみ曲線の下降勾配 (N/mm²)

- ・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの限界圧縮ひずみの算出

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.5\sigma_{cc}}{E_{des}} = 0.00415 + \frac{0.5 \times 37.4}{5162} = 0.00777$$

4. 水平耐力及び水平変位の算出

道路橋示方書V編 10.3の規定に従い、上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位の関係を、橋脚の各断面における曲げモーメント-曲率の関係をを用いて算出する。橋脚躯体基部断面における曲げモーメント-曲率の関係を示すと次のようになる。

算出における補足事項

- ・耐震性能2又は耐震性能3の限界状態における水平耐力を算出する場合には、圧縮側のかぶりコンクリートは圧縮応力を分担しないと仮定する。
- ・塑性ヒンジ領域以外の断面に対して曲げモーメント-曲率関係を算出する場合には、塑性ヒンジ長の上限值 $0.15h$ は考慮しなくてよい。
- ・軸方向鉄筋の段落のない単柱式の鉄筋コンクリート橋脚のように、塑性ヒンジが柱基部のみに形成されることが明らかな場合には、簡便のため、軸方向鉄筋の許容引張ひずみの算出の際に用いる塑性ヒンジ長は、塑性ヒンジ領域以外の断面に対しても塑性ヒンジ領域に対して求めた塑性ヒンジ長の値としてよい。

- ・曲げモーメント-曲率関係の算出

ひびわれ時	$M_c = 9.340 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_c = 7.498 \times 10^{-8} 1/\text{mm}$
初降伏時	$M_{y0} = 2.796 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{y0} = 9.090 \times 10^{-7} 1/\text{mm}$
耐震性能2の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls2} = 3.888 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls2} = 7.797 \times 10^{-6} 1/\text{mm}$
耐震性能3の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls3} = 3.923 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls3} = 1.076 \times 10^{-5} 1/\text{mm}$

M_c : ひび割れ曲げモーメント (N・mm)

M_{y0} : 最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls2} : 耐震性能2の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls3} : 耐震性能3の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

ϕ_c : ひび割れ曲率 (1/mm)

ϕ_{y0} : 橋脚基部断面の最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの曲率 (1/mm)

ϕ_{ls2} : 橋脚基部断面における耐震性能 2 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

ϕ_{ls3} : 橋脚基部断面における耐震性能 3 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

・ 橋脚躯体の上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位関係の算出

$$\delta_{y0} = 25.7$$

$$\phi_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \phi_{y0} = \frac{3.888 \times 10^{10}}{2.796 \times 10^{10}} \times 9.090 \times 10^{-7} = 1.264 \times 10^{-6}$$

$$P_u = M_{ls2} / h = 3.888 \times 10^{10} / 10000 = 3.888 \times 10^6$$

$$\delta_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \delta_{y0} = \frac{3.888 \times 10^{10}}{2.796 \times 10^{10}} \times 25.7 = 35.7$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls2} &= \delta_y + (\phi_{ls2} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 35.7 + (7.797 \times 10^{-6} - 1.264 \times 10^{-6}) \times 724 \times (10000 - 724 / 2) = 81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls3} &= \delta_y + (\phi_{ls3} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 35.7 + (1.076 \times 10^{-5} - 1.264 \times 10^{-6}) \times 724 \times (10000 - 724 / 2) = 102 \end{aligned}$$

δ_{y0} : 初降伏変位 (mm)

ϕ_y : 橋脚基部断面における降伏曲率 (1/mm)

P_u : 終局水平耐力 (N)

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

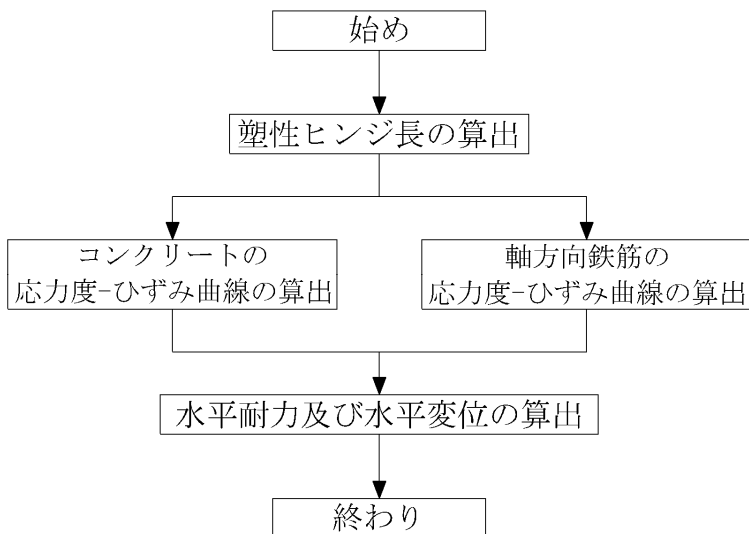
δ_y : 降伏変位 (mm)

δ_{ls2} : 耐震性能 2 の限界状態に相当する変位 (mm)

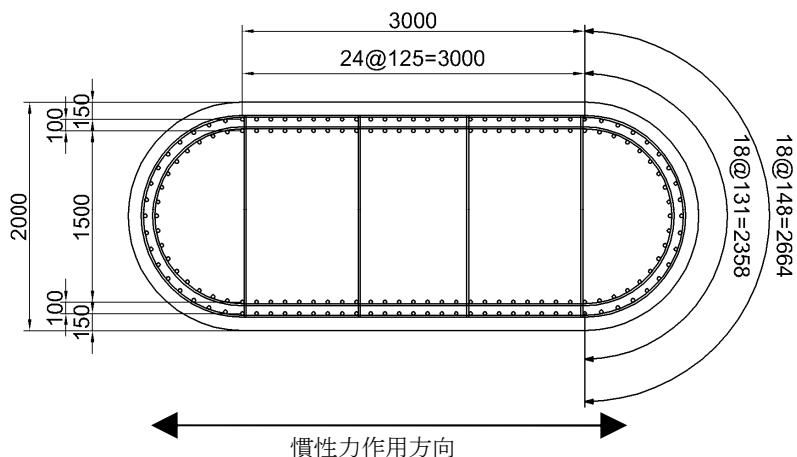
δ_{ls3} : 耐震性能 3 の限界状態に相当する変位 (mm)

小判形断面の橋軸直角方向の水平耐力及び水平変位の計算例

水平耐力及び水平変位の算出の手順



計算条件



- 軸方向鉄筋径 : D32
- 横拘束筋径 : D19
- 横拘束筋間隔 : 150mm
- 鉄筋強度 : SD345
- コンクリート表面から軸方向鉄筋中心までの距離 : 150mm
- 橋脚高さ : 10m
- 慣性力作用高さ : 10m
- コンクリート基準強度 : 30N/mm²
- 鉄筋コンクリート単位体積重量 : 24.5kN/m³
- 軸応力 : 1.0N/mm²
- 上部構造死荷重 : 6901kN

・計算を簡単にするため、横梁はない条件とする。

1. 塑性ヒンジ長の算出

塑性ヒンジ長は道路橋示方書V編 10.3 に従い、次式により算出する。

$$L_p = 9.5\sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

ただし、 $L_p \leq 0.15h$

L_p : 塑性ヒンジ長 (mm)

σ_{sy} : 軸方向鉄筋の降伏点 (N/mm²)

β_n : 軸方向鉄筋のはらみ出しに対する抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、断面形状にかかわらず次式により算出する。

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co}$$

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s}$$

E_0 : 横拘束鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

I_h : 横拘束鉄筋の断面二次モーメント (mm⁴)

d' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 (mm) で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置する横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も大きい値とする。ただし、円形断面の場合においては、最外縁に配置された横拘束鉄筋が囲むコンクリートの直径の 0.8 倍の値とする。

n_s : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される圧縮側軸方向鉄筋の本数で、複数段配筋される場合においてはそれらの合計の本数とする。(d' が同じ場合は最も多い本数を n_s として用いる。側方鉄筋は計上しない。)

s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm²) で、次式により算出する。

$$\beta_{co} = 0.01c_0$$

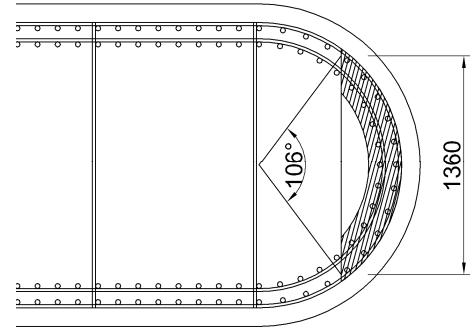
c_0 : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分の最外縁に配置された軸方向鉄筋の最外面からコンクリートの表面までの距離 (mm)

ϕ' : 塑性ヒンジ長を算出するための横拘束鉄筋の有効長 d' が最も大きいコンクリート部分に配置される軸方向鉄筋の直径 (mm) で、40mm 以上の直径の軸方向鉄筋を用いる場合においては 40mm とする。(直径の異なる軸方向鉄筋が含まれている場合、小さい方の直径を用いる。)

ここで d' 及び n_s については $d'=1360\text{mm}$ 及び $n_s=21$ 本となる。

なお、両側面の半円部分に配置される軸方向鉄筋の合計本数は 72 本であり、円形断面の場合と同様にこれを 0.3 倍し、小数点以下を切り捨てることにより、 n_s を求めている。

$$n_s = 72 \times 0.3 = 21.6 \quad (\text{小数点以下は切り捨て})$$



これらより、塑性ヒンジ長を算出すると次のとおりとなる。

$$\beta_s = \frac{384E_0I_h}{n_s d'^3 s} = \frac{384 \times 2.0 \times 10^5 \times 6533}{21 \times 1360^3 \times 150} = 0.0633$$

$$\beta_{co} = 0.01c_0 = 0.01 \times 134 = 1.34$$

$$\beta_n = \beta_s + \beta_{co} = 0.0633 + 1.34 = 1.403$$

$$L_p = 9.5 \sigma_{sy}^{1/6} \beta_n^{-1/3} \phi'$$

$$= 9.5 \times 345^{1/6} \times 1.403^{-1/3} \times 31.8 = 715 < 1500 = 0.15h$$

以上より、塑性ヒンジ長は 715mm と算出される。

2. 軸方向鉄筋の応力度-ひずみ曲線の算出

軸方向鉄筋の許容引張ひずみは道路橋示方書 V 編 10.4 に従い、次式により算出する。

・耐震性能 2

$$\varepsilon_{st2} = 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

・耐震性能 3

$$\varepsilon_{st2} = 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22}$$

ε_{st2} : 耐震性能 2 の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

ε_{st3} : 耐震性能 3 の軸方向鉄筋の許容引張ひずみ

L_p : 塑性ヒンジ長 (mm) (1. で算出した値を用いる。)

ϕ : 軸方向鉄筋の直径 (mm) (上限値の設定はない。)

β_s : 横拘束鉄筋の抵抗を表すばね定数 (N/mm²) (1. で算出した値を用いる。)

β_{co} : かぶりコンクリートの抵抗を表すばね定数 (N/mm²) (1. で算出した値を用いる。)

以上の式より軸方向鉄筋の許容引張りひずみを算出すると次のとおりとなる。

・耐震性能 2

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st2} &= 0.025 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.025 \times 715^{0.15} \times 31.8^{-0.15} \times 0.0633^{0.2} \times 1.34^{0.22} = 0.0245\end{aligned}$$

・耐震性能 3

$$\begin{aligned}\varepsilon_{st3} &= 0.035 \cdot L_p^{0.15} \phi^{-0.15} \beta_s^{0.2} \beta_{co}^{0.22} \\ &= 0.035 \times 715^{0.15} \times 31.8^{-0.15} \times 0.0633^{0.2} \times 1.34^{0.22} = 0.0343\end{aligned}$$

3. コンクリートの応力度-ひずみ曲線の算出

道路橋示方書V編 10.4 に従い、コンクリートの限界圧縮ひずみを次のように算出する。

・横拘束鉄筋体積比の算出

$$\rho_s = \frac{4A_h}{sd} = \frac{4 \times 573}{150 \times 1700} = 0.00899 \leq 0.018$$

ρ_s ：横拘束鉄筋の体積比で、耐震設計で考慮する慣性力の作用方向と平行な方向に配置された横拘束鉄筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も小さい値とする。

A_h ：横拘束鉄筋 1 本あたりの断面積(mm²)

s ：横拘束鉄筋の間隔(mm)

d ：コンクリートの横拘束効果を考慮するための横拘束鉄筋の有効長(mm)

・コンクリートの最大圧縮応力度に達する時のひずみの算出

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cc} &= 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \\ &= 0.002 + 0.033 \times 1.0 \times \frac{0.00899 \times 345}{30} = 0.00541\end{aligned}$$

ε_{cc} ：コンクリートの最大圧縮応力度に達するときのひずみ

β ：断面補正係数で、小判形断面直角方向の場合においては 1.0

σ_{sy} ：横拘束鉄筋の降伏点(N/mm²)で、上限を 345N/mm²とする。

σ_{ck} ：コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度の算出

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\rho_s\sigma_{sy} = 30 + 3.8 \times 1.0 \times 0.00899 \times 345 = 41.8$$

σ_{cc} ：横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度(N/mm²)

α ：断面補正係数で、小判形断面直角方向の場合においては 1.0

- ・応力度-ひずみ曲線の下降勾配の算出

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} = 11.2 \times \frac{30^2}{0.00899 \times 345} = 3250$$

E_{des} : 応力度-ひずみ曲線の下降勾配 (N/mm²)

- ・横拘束鉄筋で拘束されたコンクリートの限界圧縮ひずみの算出

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.5\sigma_{cc}}{E_{des}} = 0.00541 + \frac{0.5 \times 41.8}{3250} = 0.01184$$

4. 水平耐力及び水平変位の算出

道路橋示方書V編 10.3の規定に従い、上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位の関係を、橋脚の各断面における曲げモーメント-曲率の関係をを用いて算出する。橋脚躯体基部断面における曲げモーメント-曲率の関係を示すと次のようになる。

算出における補足事項

- ・耐震性能2又は耐震性能3の限界状態における水平耐力を算出する場合には、圧縮側のかぶりコンクリートは圧縮応力を分担しないと仮定する。
- ・塑性ヒンジ領域以外の断面に対して曲げモーメント-曲率関係を算出する場合には、塑性ヒンジ長の上限值 $0.15h$ は考慮しなくてよい。
- ・軸方向鉄筋の段落のない単柱式の鉄筋コンクリート橋脚のように、塑性ヒンジが柱基部のみに形成されることが明らかな場合には、簡便のため、軸方向鉄筋の許容引張ひずみの算出の際に用いる塑性ヒンジ長は、塑性ヒンジ領域以外の断面に対しても塑性ヒンジ領域に対して求めた塑性ヒンジ長の値としてよい。

- ・曲げモーメント-曲率関係の算出

ひび割れ時	$M_c = 2.306 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_c = 4.466 \times 10^{-8} \text{ 1/mm}$
初降伏時	$M_{y0} = 7.081 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{y0} = 5.349 \times 10^{-7} \text{ 1/mm}$
耐震性能2の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls2} = 1.112 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls2} = 6.264 \times 10^{-6} \text{ 1/mm}$
耐震性能3の限界状態に達するとき (軸方向鉄筋の許容引張ひずみで決定)	$M_{ls3} = 1.120 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $\phi_{ls3} = 8.656 \times 10^{-6} \text{ 1/mm}$

M_c : ひび割れ曲げモーメント (N・mm)

M_{y0} : 最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls2} : 耐震性能2の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

M_{ls3} : 耐震性能3の限界状態における橋脚基部断面の曲げモーメント (N・mm)

ϕ_c : ひび割れ曲率 (1/mm)

ϕ_{y0} : 橋脚基部断面の最外縁にある軸方向引張鉄筋が降伏するときの曲率 (1/mm)

ϕ_{ls2} : 橋脚基部断面における耐震性能 2 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

ϕ_{ls3} : 橋脚基部断面における耐震性能 3 の限界状態に相当する許容曲率 (1/mm)

・ 橋脚躯体の上部構造の慣性力の作用位置における水平力-水平変位関係の算出

$$\delta_{y0} = 15.2$$

$$\phi_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \phi_{y0} = \frac{1.112 \times 10^{11}}{7.081 \times 10^{10}} \times 5.349 \times 10^{-7} = 8.400 \times 10^{-7}$$

$$P_u = M_{ls2} / h = 1.112 \times 10^{11} / 10000 = 1.112 \times 10^7$$

$$\delta_y = \frac{M_{ls2}}{M_{y0}} \delta_{y0} = \frac{1.112 \times 10^{11}}{7.081 \times 10^{10}} \times 15.2 = 23.9$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls2} &= \delta_y + (\phi_{ls2} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 23.9 + (6.264 \times 10^{-6} - 8.400 \times 10^{-7}) \times 715 \times (10000 - 715 / 2) = 61.3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{ls3} &= \delta_y + (\phi_{ls3} - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \\ &= 23.9 + (8.656 \times 10^{-6} - 8.400 \times 10^{-7}) \times 715 \times (10000 - 715 / 2) = 77.8 \end{aligned}$$

δ_{y0} : 初降伏変位 (mm)

ϕ_y : 橋脚基部断面における降伏曲率 (1/mm)

P_u : 終局水平耐力 (N)

h : 橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離 (mm)

δ_y : 降伏変位 (mm)

δ_{ls2} : 耐震性能 2 の限界状態に相当する変位 (mm)

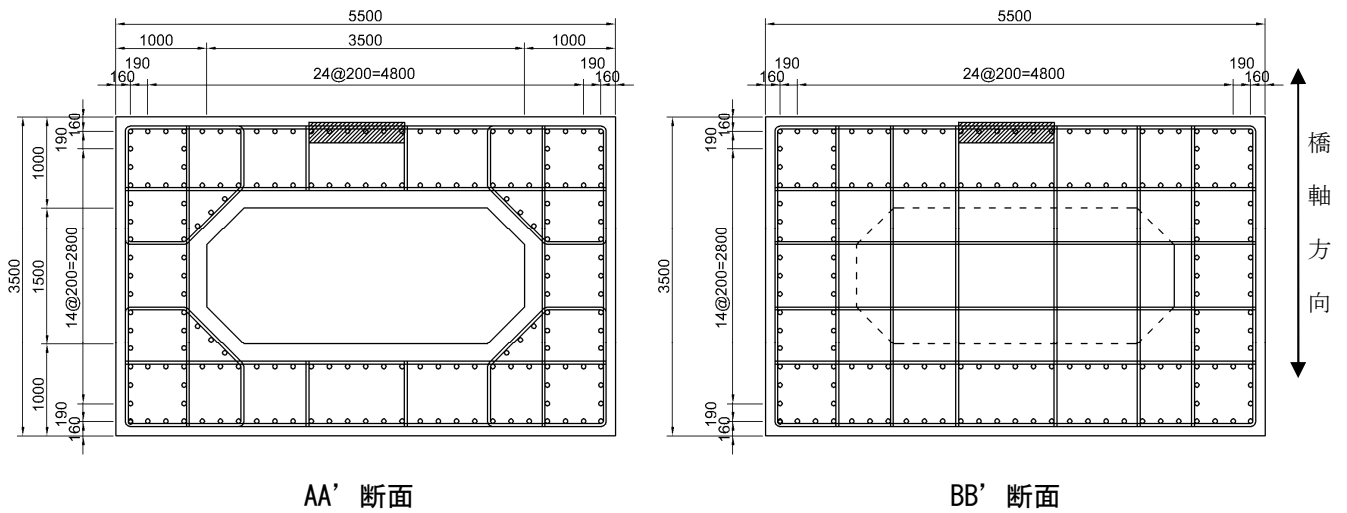
δ_{ls3} : 耐震性能 3 の限界状態に相当する変位 (mm)

中空断面橋脚に対する d' 及び n_s の設定例

中空断面橋脚における中空部及び充実部の断面をそれぞれ例として示す。

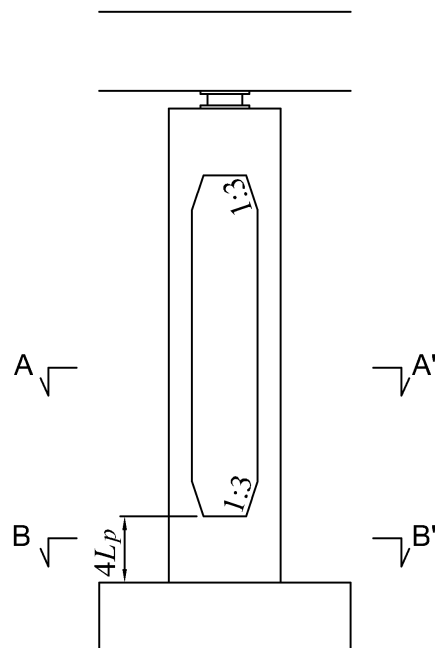
ここに示す例においては、横拘束筋配置は中空部、充実部で同様であるため、有効長 d' 及び圧縮側軸方向鉄筋本数 n_s もこれらの断面で同じとなる。

橋軸方向： $d' = 1000\text{mm}$ $n_s = 6$ 本



AA' 断面

BB' 断面



中空断面部を有する橋脚の側面図