

質問 10.7 道示 10.6 の解説では、不静定構造物の非線形領域の塑性変形能に関する既往の研究成果により、一層式の鉄筋コンクリートラーメン橋脚には、エネルギー一定則の適用性が確認されており、単柱式鉄筋コンクリート橋脚と同様、地震時保有水平耐力法に基づく静的照査法が適用できるが、二層式のラーメン橋脚や形状の複雑なラーメン橋脚には動的照査法を適用しなければならない、とあります。この理由を簡単に説明してください。

回答 10.7

単柱式鉄筋コンクリート橋脚のように静定構造では、荷重と部材の曲げモーメントの間には比例関係があり、一つの塑性ヒンジの発生により崩壊メカニズムが形成されます。この場合は、水平荷重 (P) - 水平変位 (δ) の関係の完全弾塑性型のモデル化により、エネルギー一定則に基づく許容塑性率の設定が容易であります。しかしながら、鉄筋コンクリートラーメン橋脚のような不静定構造では、 $P-\delta$ 曲線を求めるには、一つの塑性ヒンジの発生では崩壊メカニズムが形成できず、最初の塑性ヒンジから順次塑性ヒンジの形成過程を辿って、最終的な崩壊メカニズムの形成まで追跡して解析せねばなりません。また、早期に発生した塑性ヒンジ区間での部材断面が許容限界曲率 (ϕ_{ls2}, ϕ_{ls3}) に達すれば、崩壊メカニズムが形成される前に、終局限界状態に達することも考えられます。そのような懸念から、道示(14年版)では、先行した塑性ヒンジ区間において、許容限界曲率の2倍以下になるような規定が設けられていましたが、その後の研究成果により、道示(H24年版)では、軸方向鉄筋の引張限界ひずみの規定が設けられた替りに、許容限界曲率の2倍以下の規定は削除されています。詳しくは、道示 10.6 の解説をご覧ください。

一般に、塑性ヒンジ区間での曲率が無制限に許容される場合には、 n 次不静定構造の崩壊メカニズムは、 $n+1$ 個の塑性ヒンジの発生により形成されます。したがって、高次不静定系である二層式ラーメン橋脚や形状が複雑な構造に対しては、エネルギー一定則に基づく許容塑性率の適用性がまだ十分に確かめられていないので、現在のところ、一層式鉄筋コンクリートラーメン橋脚に対してのみ単柱式鉄筋コンクリート橋脚に準じた保有水平耐力と許容塑性率に基づく静的照査法が適用されています。

質問 10.8 鉄筋コンクリートラーメン橋脚の面内方向（橋軸直角方向）の水平保有耐力および許容塑性率の求め方について教えて欲しい。

回答 10.8

図 10.8-1 は、平成 14 年度版の道示、耐震設計編での鉄筋コンクリートラーメン橋脚での塑性ヒンジの発生可能位置を示しています。前述の図 10.2-1 で示したように、塑性ヒンジ区間での曲げモーメント (M_i) と曲率 (ϕ_i) の関係は完全弾塑性型の曲線でモデル化されているので、塑性ヒンジ区間では、一

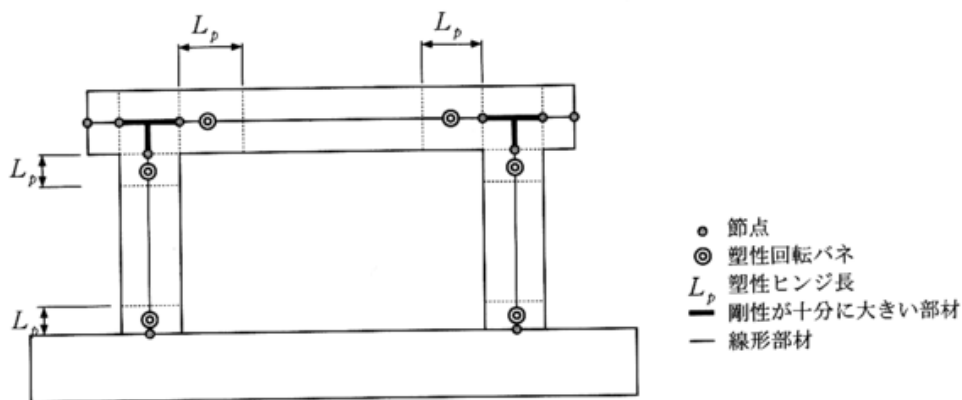


図-解 10.8.1 鉄筋コンクリートラーメン橋脚のモデル化

図 10.8-1 鉄筋コンクリートラーメン橋脚の塑性ヒンジの位置

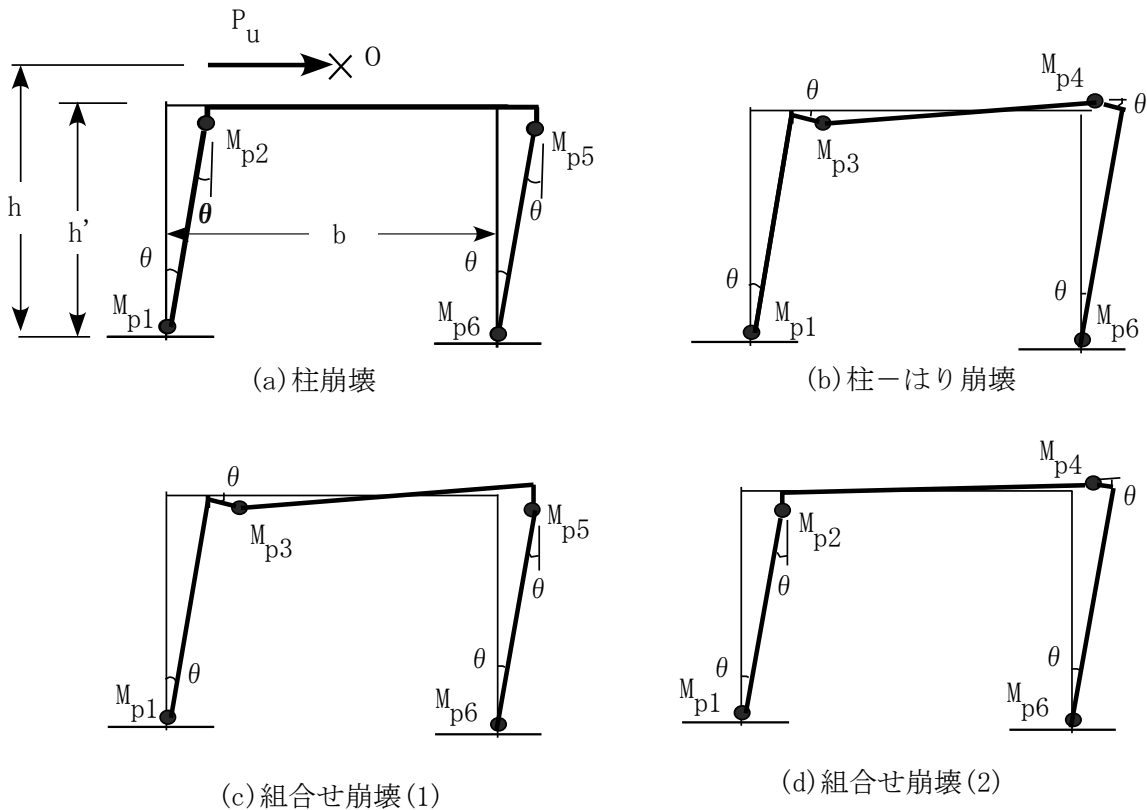


図 10.8-2 可能な崩壊メカニズム

定の全塑性モーメント ($M_u = M_y$) を保持しながら塑性曲率 (ϕ_p) が増加することになります。ところで、図 10.8-1 の門型ラーメン橋脚は 3 次不静定系の構造であるので、上部工の重心に作用する水平力 (P) を単調増加させていくと、曲げモーメントが最大になる位置から塑性ヒンジが順次発生して、3 個の塑性ヒンジの発生した時点で静定系になり、4 個目の塑性ヒンジの発生した時点で、不安定になり、それ以上の荷重が支持できない崩壊メカニズムが形成されることになります。

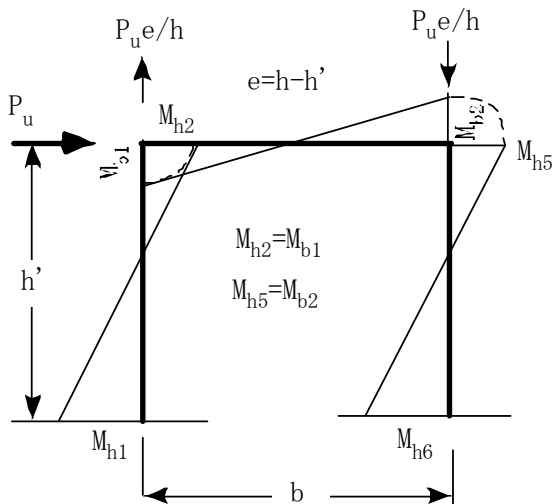


図 10.8-3 曲げモーメント図

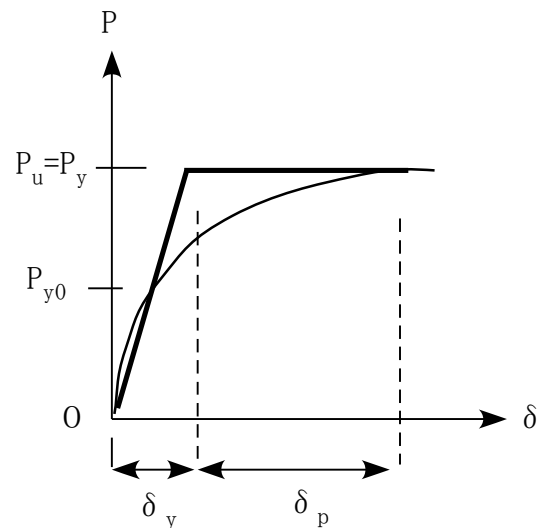


図 10.8-4 水平荷重—変位曲線

ところで、図 10.8-1 に示すような門型ラーメン橋脚の上端に水平荷重 (P_u) を受けたときの可能な崩壊メカニズムは、図 10.7-2 に示すような 4 タイプになります。すなわち、柱崩壊タイプは左右の柱の上下端に塑性ヒンジが起こるメカニズムで、柱一はり崩壊型は左右の柱下端とはりの両端に塑性ヒンジ

が起るメカニズムで、組み合わせ崩壊型はそれらの複合メカニズムであります。柱上端かはり端部のどちらに塑性ヒンジができるかは、両者の曲げモーメントの小さい方に塑性ヒンジが発生すると言えます。たとえば、節点から塑性ヒンジまでの距離 ($L_{np} = L_n + L_p/2$, L_n : 隅角部での剛域長さ, L_p : 塑性ヒンジ長) が柱およびはりの長さ (h' または b) に比べて十分に小さく、その影響が無視できる場合で、かつ、左右の柱間長が狭く、橋脚上端と重心 0 までの距離による偏心モーメントは左右の柱の軸力で受け持たせる場合には、曲げモーメント図は図 10.8-3 のようになり、柱上端断面の曲げモーメントとはり端部断面の曲げモーメントは同じ値になります。

このような場合は、左右柱の上端の塑性モーメント (M_{p2} , M_{p5}) とはり左右端の塑性モーメント (M_{p3} , M_{p4}) のそれぞれ小さい方を M_{p1}^u , M_{p2}^u とし、仮想仕事の定理により、以下のように簡単に計算できます。

$$\text{外働: } U_e = P_u h' \theta$$

$$\text{内働: } U_i = (M_{p1} + M_{p6} + M_{p1}^u + M_{p2}^u) \theta$$

ここに、 θ は塑性ヒンジでの仮想回転角で、外働と内働は等しいので、終局水平荷重 (P_u) は、

$$P_u = \frac{M_{p1} + M_{p6} + M_{p1}^u + M_{p2}^u}{h'} \quad (10.8-1)$$

となります。もちろん、隅角部の剛域長 (L_n) や塑性ヒンジ長 (L_p) を考慮すれば、解析は複雑になりますが、同様な方法で P_u を求めることができます。

つぎに、塑性率 (μ) については、単柱式鉄筋コンクリート橋脚の項で説明したように、水平荷重 (P) - 変位 (δ) 関係を完全弾塑性型の曲線で表わし、以下のように定義しています。

$$\mu = \frac{\delta}{\delta_y} = 1 + \frac{\delta_p}{\delta_y} \quad (10.8-2)$$

ここに、 δ_y : 降伏変位, δ_p : 塑性変位, δ : 全変位 ($= \delta_y + \delta_p$) であります。

したがって、図 10.8-4 に示すように、まず、着目しているラーメン橋脚の単調増加弾性解析により、部材断面の引張鉄筋が最初に降伏する曲げモーメントに到達する時の水平荷重 (P_{y0} : 初降伏荷重) と水平変位 (δ_{y0}) を求め、ついで、終局荷重 ($P_u = P_y$) 時の水平変位 (δ_y) を、 $\delta_y = (P_y / P_{y0}) \cdot \delta_{y0}$ とし、式(10.7-2)より μ を算定します。塑性率 (μ) の許容値 ($\mu_a = 1 + \delta_{pa} / \delta_y$) は、単柱式鉄筋コンクリート橋脚に対する式に準じて、耐震性能 2 の照査では、水平変位の許容限界値は

$$\delta_{pa} = (\phi_{lb2} - \phi_y) \cdot L_p \cdot (h' - L_p / 2) \quad (10.8-3)$$

$$\delta_{ls2} = \delta_y + \delta_{pa} = (\phi_{lb2} - \phi_y) \cdot L_p \cdot (h' - L_p / 2) \quad (10.8-4)$$

ここに、 ϕ_y , ϕ_{lb2} はそれぞれ柱下端の塑性ヒンジでの降伏曲率および耐震性能 2 の限界状態に相当する許容曲率、となります。

回答 10.6 で述べたように、鉄筋コンクリートラーメン橋脚に対しては、複数の塑性ヒンジの発生により崩壊メカニズムが形成されるまでの途中段階では、先行した塑性ヒンジでの塑性曲率の許容限界値は設けられていませんが、崩壊メカニズムの形成後の許容塑性率 (μ_a) の算定には、式(10.8-2)に示すように、柱下端の塑性ヒンジでの曲率の許容限界値(耐震性能 2 では ϕ_{lb2} , 耐震性能 3 では ϕ_{lb3}) を設けており、 ϕ_{lb2} , ϕ_{lb3} は柱下端の塑性ヒンジ断面でのコンクリートの終局限界圧縮ひずみ (ε_{cc1}) および鉄筋の終局限界引張ひずみ (ε_{st2} , ε_{st3}) により制限されています。このような崩壊メカニズムによる終局荷重 ($P_u = P_y$) の到達は構造力学的には明確ではありませんが、実験的な検証により十分安全が確保されているとの判断によるものと推測されます。

質問 10.9 鉄筋コンクリートラーメン橋脚において、(1)曲げ破壊型、(2)曲げ損傷からせん断破壊移行型、および(3)せん断破壊型、はどのようにして判別するのですか？

回答 10.9

基本的には、単柱式鉄筋コンクリート橋脚の場合（回答 10.2 参照）と同じ考えに基づいて判別しています。すなわち、図 10.6-1 に示したような鉄筋コンクリートラーメン橋脚は左右の柱、上部のはりおよび地中ばりから構成されており、塑性ヒンジは左右柱の上下端部または左右はりの両端部での形成を許容しており、地中ばりは強固で塑性化させないことが前提になっていると思います。したがって、耐震性能 2 および 3 では、複数の塑性ヒンジによる崩壊メカニズムが形成されるまで、左右柱およびはりにせん断破壊を起さないこと、ならびに正負交番繰返载荷によっても安定した保有水平耐力 ($P_u = P_y$) が確保できることが塑性変形によるエネルギー吸収の前提になっています。

ところで、地震水平荷重によるラーメン橋脚の曲げモーメント図は、図 10.8-1 に示すように、上部工の重心 0 に水平荷重 (P_y) が作用し、崩壊メカニズムが形成されたときの曲げモーメント図は、塑性ヒンジの可能な位置での全塑性モーメントを柱下端で M_{p1} , M_{p6} 、柱上端で M_{p2} , M_{p5} とし、はり端では、 M_{p3} , M_{p4} とすれば、せん断力はつりあい条件より、以下のようになります。

す。

$$\text{柱断面では、 } Q_{h1} = (M_{p1} + M_{p2}) / h_{p1}, \quad Q_{h2} = (M_{p6} + M_{p5}) / h_{p2} \quad (10.9-1)$$

$$\text{はり断面では、 } Q_b = (M_{p3} + M_{p4}) / b_p \quad (10.9-2)$$

ここに、 $M_{p1,2,5,6}$ は柱の塑性ヒンジ断面での降伏モーメント、 $M_{p3,4}$ ははりの塑性ヒンジ断面での降伏モーメント、 h_{p1}, h_{p2} は柱上下端の塑性ヒンジ間の距離、 b_p ははり左右端の塑性ヒンジ間の距離であります。ただし、崩壊メカニズムの到達時には柱およびはりのすべて塑性ヒンジが形成される訳ではなく、そのうち、4 個の塑性ヒンジのみが形成されることになるので、式(10.8-1)および(10.8-2)は柱およびはりに発生する可能な最大せん断力を意味しています。

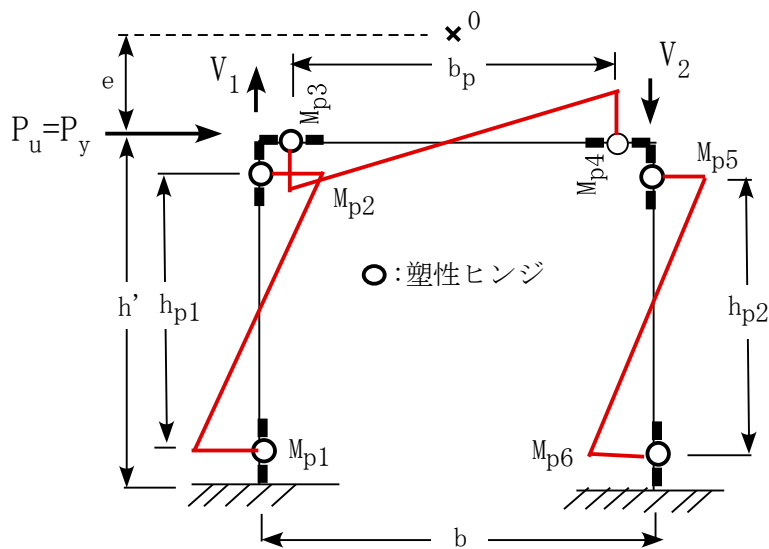


図 10.9-1 水平降伏荷重 (P_y) での、曲げモーメント図

さて、着目する鉄筋コンクリートラーメン橋脚の柱またははり部材のせん断耐力は、すでに、回答 10.1 で説明したように、道示 10.5 で規定されたせん断耐力式を用いて、

$$P_{s0} = S_{c0} + S_s, \quad P_s = c_c S_{c0} + S_s \quad (10.9-3)$$

ここに、 S_{c0} は静的載荷でのコンクリート部が受け持つせん断耐力成分、 S_s は鉄筋部が受け持つせ

ん断耐力成分であり、 c_c は交番繰返載荷時の補正係数で、レベル2のタイプI地震では $c_c = 0.6$ 、タイプII地震では $c_c = 0.8$ であります。

したがって、左右の柱断面にのみに塑性ヒンジが発生する場合は、

(1) 曲げ破壊型では、

$$Q_{h1} \leq P_{si}, \quad i = 1, 2, \quad \text{および}, \quad Q_{h2} \leq P_{sj}, \quad j = 5, 6 \quad (10.9-4)$$

(2) 曲げ損傷からせん断破壊移行型では、式(10.7-3)の一部が満足せず、かつ

$$P_{si} < Q_{h1} \leq P_{s0i}, \quad i = 1, 2, \quad \text{および}, \quad P_{sj} < Q_{h2} \leq P_{s0j}, \quad j = 5, 6 \quad (10.9-5)$$

(3) せん断破壊型では、式(10.7-3)および(10.7-4)の一部が満足せず、かつ、

$$P_{s0i} < Q_{h1}, \quad i = 1, 2, \quad \text{および}, \quad P_{s0j} < Q_{hj}, \quad j = 5, 6 \quad (10.9-6)$$

ここに、 $i = 1, 2$ は左柱の塑性ヒンジ位置、 $j = 5, 6$ は右柱の塑性ヒンジ位置を意味しています。

また、はりの左右端の塑性ヒンジが発生する場合には、はり部材には、上部工の主荷重（ただし、衝撃を除いた）の作用による曲げモーメントが付加されるので、曲げモーメント図は、図10.8-1とは異なり、径間長が大きくなる場合には、塑性ヒンジがはり端部より中央に寄る場合もあるので、注意しなければなりません。道示10.6の解説には、はり塑性ヒンジは端部以外に発生させてはならないとあり、さらに以下の式を付加しています。

$$V_b / P_{sl} \leq 1, \quad l = 3, 4 \quad (10.9-7)$$

ここに、 $l = 3, 4$ ははり端部の塑性ヒンジの位置を意味し、 V_b は地震荷重に加えて主荷重（衝撃を除く）の合計によるはり部材に生じる最大せん断力であります。したがって、はり部材の塑性ヒンジの発生ははりの径間長が狭い場合にのみに限定されるものと推察されます。

質問 10.10 道示10.6では、鉄筋コンクリートラーメン橋脚部材の塑性ヒンジ区間での全塑性モーメント (M_{pi}) の算定には軸力の影響を考慮しなければならないとありますが、具体的にはどのように計算するのですか？

回答 10.10

鉄筋コンクリート部材の軸力 (N) と全塑性モーメント (M_u) の関係は、図10.10-1に示すように、 $N = 0$ ときの全塑性モーメント (M_{u0}) により、ある程度の大きさの圧縮軸力 (N_c) の作用下で全塑性モーメントが大きくなるのが良く知られています。

先に述べた**回答 10.2**での図10.2-1の曲げモーメント (M) - 曲率 (ϕ) 曲線は、単柱式鉄筋コンクリート橋脚のように、上部工の自重による一定の大きさの軸力 (N) の下で定義されたものであるため、鉄筋コンクリートラーメン橋脚の柱断面のように、上部工の自重による軸力の上に、地震水平慣性力による軸力が加算され、変動する軸力の下での $M - \phi$ 曲線の算定という複雑な問題が起こります。そこで、道示では、柱上下端部の塑性ヒンジ (j) の位置での軸力の最大値 ($N_{j\max}$) と最小値

($N_{j\min}$) を予測し、 $N_{j\min} \leq N_j \leq N_{j\max}$ での補間式を事前で作っておいて、**補足 A-4**で示した計算法により各ヒンジ点での塑性モーメント (M_{jy}) を繰返し計算によって求める方法を推奨しています。この方法によれば、

$N_k = N_{\min}, 0, N_{\max}$ の3つの代表点での M_{ky} 、 $k = 1, 2, 3$ を事前に求めておけば、任意の N の値での M_{jy} は放物線補間により容易に求めることができます (図10.10-2参照)。

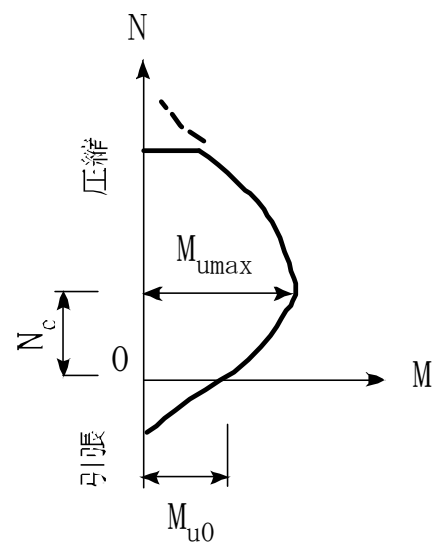


図10.10-1 曲げモーメント (M) と軸力 (N) の相関曲線

具体的な計算法は、補足 A-4 での式(A-4.8)および(A-4.9)より、

$$M_{jy} = b \sum_{i=1}^n \alpha_i f_c(\varepsilon_{ci}) y_i \Delta h + A_s f_s(\varepsilon_s) (d - \frac{h}{2}) + A_s' f_s(\varepsilon_s') (\frac{h}{2} - d') \quad (10.10-1)$$

$$N_k = b \sum_{i=1}^n \alpha_i f_c(\varepsilon_{ci}) \Delta h - A_s f_s(\varepsilon_s) + A_s' f_s(\varepsilon_s') \quad (10.10-2)$$

ここに、 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 、 n : 塑性ヒンジ点(j)での断面分割点の総数、 Δh : 分割層厚、 α_i は数積分の重みで、台形公式を適用すると、 $i = 1, n$ では $\alpha_i = 0.5$ 、 $1 < i < n$ では $\alpha_i = 1$ であり、コンクリート層および鉄筋層のひずみ ($\varepsilon_{ci}, \varepsilon_s, \varepsilon_s'$) は、許容限界曲率 (ϕ_{lb2}, ϕ_{lb3}) での平面保持の仮定に基づく値であります。

繰返し計算に際しては、最初に、水平荷重(P_y)を仮定して、

上部工の自重(W_u)と P_y による左右柱の軸力 (N_1, N_2) を

$$N_1 = \frac{W_u}{2} - \frac{P_y h}{b}, \quad N_2 = \frac{W_u}{2} + \frac{P_y h}{b} \quad (10.10-3)$$

ここに、軸力は圧縮を正とし、 h は上部工の重心から柱下端までの距離、 b は柱間長で、繰返し交番荷重では、 $N_{\max} = N_2, N_{\min} = N_1$ になり、軸力が0の3ケースについて、式(10.10-1)および(10.10-2)を計算し、それぞれの M_{jy} を求め、3点を結ぶ2次式を決定する手順を辿ります。

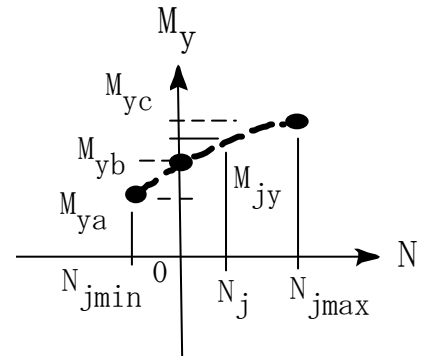


図 10.10-2 補間式の例

以上