

## 10章 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力及び許容塑性率に関連づけて

質問 10.1 単柱式の鉄筋コンクリート橋脚の破壊形態は、次式に示すように、

(1)  $P_u \leq P_s$  : 曲げ破壊型, (2)  $P_s \leq P_u \leq P_{s0}$  : 曲げ損傷からせん断破壊移行型, (3)  $P_{s0} < P_u$  : せん断破壊型, に分類し, それぞれの破壊形態に応じて, 耐震性能 2 または 3 の照査を行うようになっていますが, これらの破壊形態の判別の仕方について解説して欲しい.

回答 10.1

単柱式鉄筋コンクリートが地震水平力を受けると, 最大曲げモーメント ( $M_{\max}$ ) および最大せん断力 ( $S_{\max}$ ) は橋脚下端断面で発生します (図 10.1-1 では  $M_{\max} = M_{uw} + M_{up}$ ). すなわち, 橋脚が支持する上部工の重量を  $W_u$ , 下部工の重量を  $W_p$  とし, レベル 2 地震に対する設計水平震度を  $k_{hc}$  とすれば, 以下のようになります.

$$M_{\max} = k_{hc}(W_u + 0.5W_p)h, \quad S_{\max} = k_{hc}(W_u + W_p) \quad (10.1-1)$$

ここに,  $h$  : 橋軸方向では, 上部工の水平慣性力を伝達する支承から橋脚下端までの距離, 橋軸直角方向では, 上部工の重心から橋脚下端までの距離であり, 下部構造の重心は橋脚下端から  $0.5h$  の距離にあると仮定しています (回答 6.6 を参照してください).

ところで,  $M_{\max}$  に着目したときの上部工の水平慣性力の換算値 ( $P$ ) を

$$P = \frac{M_{\max}}{h} \quad (10.1-2)$$

とし, 橋脚下端で終局曲げモーメント ( $M_u$ ) に到達するときの荷重 (終局曲げ耐力) を  $P_{um} = M_u / h$  とし,  $P$  の作用位置での水平変位を  $\delta$  とすれば, 一方向の単調載荷試験での  $P - \delta$  曲線は, せん断耐力が十分に大きく, 橋脚下端断面での引張鉄筋の塑性ひずみに伴う曲げ変形に支配される場合には, 曲線 (0) に示すようなねばり強い特性を示し, 載荷と除荷を繰り返す左右 (正負) 交番載荷試験でも, 曲線 (1) に示すように終局曲げ耐力 ( $P_u$ ) の顕著な低下は見られず, 安定したエネルギー吸収と水平保有耐力が保持できます. つぎに, 単調載荷でのせん断耐力が終局曲げ耐力 ( $P_{um}$ ) より多少大きくても十分でなければ, 曲線 (2) に示すように, 単調載荷試験では  $P_{um}$  に到達できても, 正負交番載荷試験では,  $P_{um}$  より低い荷重 ( $P_{ms}$ ) でせん断破壊が起こることが実験では知られています. さらに, 単調載荷でのせん断耐力 ( $P_{us}$ ) が終局曲げ耐力 ( $P_{um}$ ) より小さい場合は, 曲線 (3) のように,  $P_{um}$  に至る前に耐力が急速に低下する, いわゆる脆性破壊が起こり, 塑性変形によるエネルギー吸収は全く期待できません.

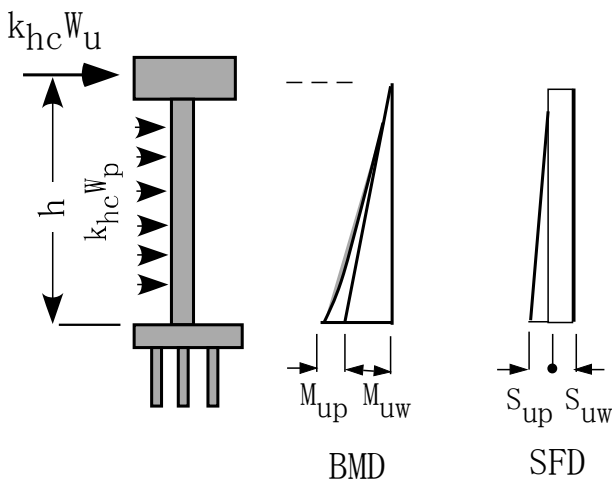


図 10.1-1 RC 単柱式橋脚

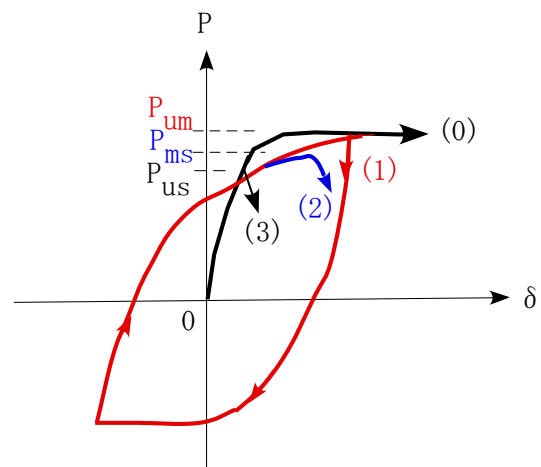


図 10.1-2 単調および正負交番載荷での水平荷重-変位曲線 (概念図)

以上のような実験的知見に基づいて、道示では、図 10.1-2 の曲線(1)の  $P-\delta$  曲線に該当する場合を“曲げ破壊型”と呼び、曲線(2)に該当する場合を“曲げ損傷からせん断破壊移行型”，さらに曲線(3)に該当する場合を“せん断破壊型”と名づけているように思われます。

ところで、終局曲げ耐力 ( $P_u$ ) は平面保持の仮定に基づく鉄筋コンクリートはりの解析により容易に求められるが、せん断耐力は実験に頼らねばならず、道示、10.5 では、長方形断面の鉄筋コンクリート橋脚のせん断耐力 ( $P_s$ ) は、以下の実験式に基づいています。

$$P_s = S_c + S_s \quad (10.1-3)$$

ここに、 $S_c$  はコンクリートが受け持つせん断耐力、 $S_s$  は帯鉄筋が受け持つせん断耐力であり、 $S_s$  は正負交番载荷による低減は考慮しないが、 $S_c$  については、単調载荷によるせん断耐力を  $S_{c0}$  とし、レベル 2 地震動のタイプ I に対する正負交番繰返载荷では  $0.6S_{c0}$ 、タイプ II に対する正負交番繰返载荷では  $0.8S_{c0}$  と低減しています。したがって、道示では、 $P_{s0} = S_{c0} + S_s$ 、 $P_s = c_c S_{c0} + S_s$ 、ここに  $c_c$  : 正負交番载荷による補正係数で、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  $c_c = 0.8$  とし、終局水平保有耐力 ( $P_u$ ) は、(1)  $P_u \leq P_s$  ; 曲げ破壊型、(2)  $P_s \leq P_u \leq P_{s0}$  ; 曲げ損傷からせん断破壊移行型、(3)  $P_{s0} < P_u$  ; せん断破壊型、に判別されています。

一方、回答 6.7 での式(6.7-1)による単柱式鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査式： $k_{hc}W \leq P_a$  は静的照査式であることより、保有水平耐力 ( $P_a$ ) は、(1) 曲げ破壊型では、 $P_a = P_u$ 、(2) 曲げ損傷からせん断破壊移行型では、 $P_a = P_u$ 、(3) せん断破壊型では、 $P_a = P_{s0}$  と規定されていますが、構造物特性補正係数 ( $c_s$ ) を与える許容塑性率 ( $\mu_a$ ) は、(2) 曲げ損傷からせん断破壊移行型および(3) せん断破壊型では、 $\mu_a = 1$ 、すなわち  $c_s = 1/\sqrt{2\mu_a - 1} = 1.0$  としており、塑性変形によるエネルギー吸収を期待していません。

質問 10.2 単柱式鉄筋コンクリート橋脚の上部工の重心に作用する水平荷重 ( $P$ ) と水平変位 ( $\delta$ ) の関係は、図 10.2-1 に示すような、橋脚断面の曲げモーメント ( $M$ ) と曲率 ( $\phi$ ) の関係を完全弾塑性型のバイリニアモデルに基づいて算定するようになっていますが、 $P-\delta$  曲線と  $M-\phi$  曲線の関連性について説明して欲しい。

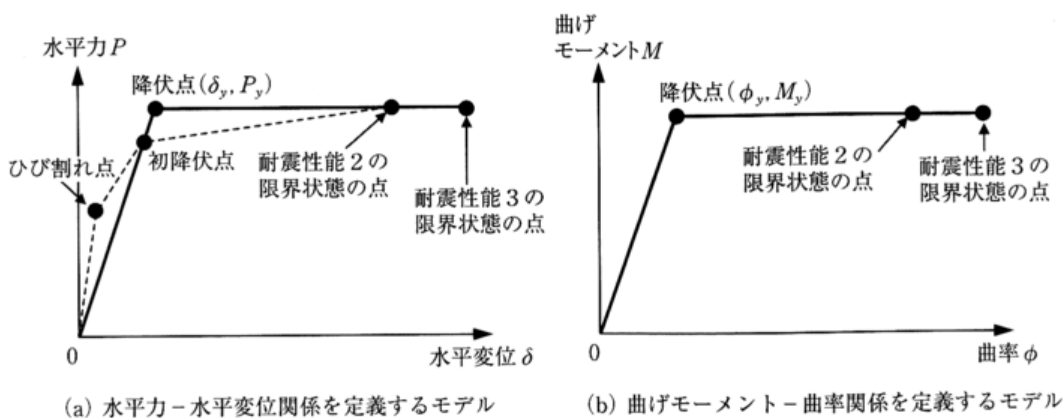


図-解10.2.3 鉄筋コンクリート橋脚の骨格曲線の例

図 10.2-1 耐震性能 2 および 3 の照査での  $P-\delta$  曲線と  $M-\phi$  曲線のモデル化 (道示 (H24 年版))

回答 10.2

前質問で曲げ破壊型に判別された場合、橋脚断面の曲げモーメント ( $M$ ) - 曲率 ( $\phi$ ) の関係は、図

10.2-1(b)に示すような完全弾塑性モデルで表わし、それに対応して、水平荷重( $P$ )－水平変位( $\delta$ )の関係は、図10.2-1(a)に示すようなバイリニア曲線で与えており、弾性域での剛性は最下端での橋脚断面での最外縁の鉄筋が引張降伏に達する時(以後、初降伏時と呼ぶ)の勾配である降伏剛性( $K_y$ )、すなわち $K_y = P_{y0} / \delta_{y0}$ 、 $P_{y0}$ ：初降伏荷重、 $\delta_{y0}$ ：初降伏変位、を用いています。単柱式鉄筋コンクリート橋脚は静定構造であるので、荷重と曲げモーメントは比例関係にあります。したがって、最大曲げモーメントが起こる橋脚下端の断面の曲げモーメントが初降伏モーメント( $M_{y0}$ )時の荷重は、 $P_{y0} = M_{y0} / h$ 、ここに、 $h$ ：橋軸直角方向では上部工の重心から橋脚下端までの距離で、その時の曲率を $\phi_{y0}$ とすれば、図10.2-1(b)の $M-\phi$ 曲線の弾性域での勾配(割線曲げ剛性： $(EI)_s$ )は、 $(EI)_s = M_{y0} / \phi_{y0}$ に対応することになります。

つぎに、図10.2-1(b)での $M_y$ は、終局曲げモーメント( $M_u$ )に対応しており、耐震性能2または3での許容限界曲率( $\phi_{lb2}$ 、 $\phi_{lb3}$ )に到達時の曲げモーメント( $M_{lb2}$ 、 $M_{lb3}$ )になります。したがって、終局水平耐力( $P_u = P_y$ (降伏水平荷重))は、 $P_y = M_{lb2} / h$ または $M_{lb3} / h$ として与えられ、降伏曲率( $\phi_y$ )は、 $\phi_y = (M_{lb2} / M_{y0}) \cdot \phi_{y0}$ または $(M_{lb3} / M_{y0}) \cdot \phi_{y0}$ に対応しています(図10.2-2参照)。

なお、初降伏モーメント( $M_{y0}$ )および初降伏曲率( $\phi_{y0}$ )の計算法については、補足A-4で詳述しています。

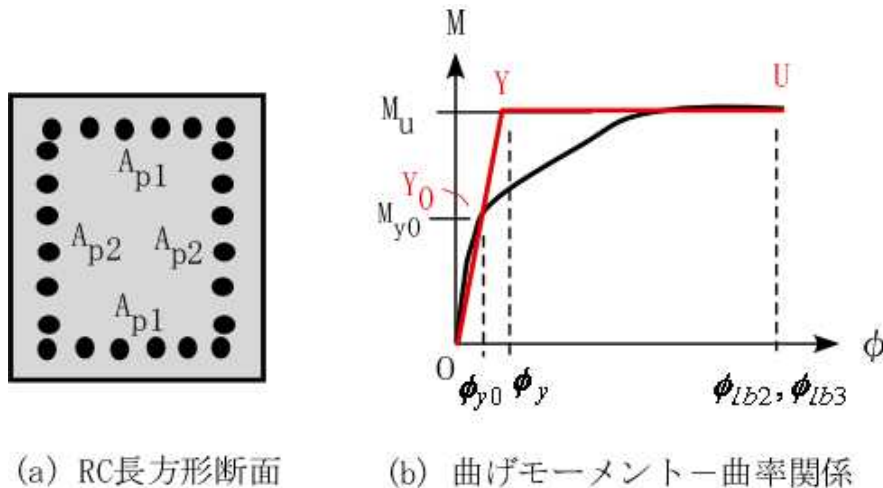


図10.2-2 曲げモーメント－曲率関係の完全弾塑性型モデル

質問 10.3 前問に関連させて、単柱式鉄筋コンクリート橋脚に対する図10.2-1(a)の水平荷重( $P$ )－水平変位( $\delta$ )を求める具体的な手順を教えてください。

回答 10.3

まず最初に、最大曲げモーメントの位置である橋脚下端の断面で最外縁の引張鉄筋が最初に降伏するときの曲げモーメント( $M_{y0}$ )と上部工の重心での水平荷重( $P_{y0}$ )および水平変位( $\delta_{y0}$ )を求めます。つぎに、橋脚下端の断面での終局曲げモーメント( $M_u$ )を降伏曲げモーメント( $M_y$ )と見なし、降伏水平荷重( $P_y$ )は、 $P_y = P_{y0} \cdot (M_y / M_{y0})$ 、降伏水平変位( $\delta_y$ )は、 $\delta_y = \delta_{y0} \cdot (M_y / M_{y0})$ により求めます。さらに、地震時の水平応答変位が $\delta_y$ を越えると、図10.2-3に示すように、橋脚下端の塑性ヒンジが発生し、塑性ヒンジの回転( $\theta_p$ )による水平変位( $\delta_p$ )が加わり、 $\delta = \delta_y + \delta_p$ になり、先に述べた、主たる塑性化によるエネルギー吸収の評価では、 $\delta_y$ が弾性限界変位(降伏変位)、 $\delta_p$ が塑性変位と見なされます。

また、塑性ヒンジの位置は橋脚下端から塑性ヒンジ長 ( $L_p$ ) の半分の位置に発生すると仮定し、この位置での  $M-\phi$  曲線は、図 10.2-1 (b) に示されたように、一定の曲げモーメント ( $M_y$ ) を保持しながら塑性曲率 ( $\phi_p$ ) のみが増加して、許容限界曲率 (耐震性能 2:  $\phi_{ls2}$ , 耐震性能 3:  $\phi_{ls3}$ ) に達するとしており、塑性ヒンジの回転角は、 $\theta_p = L_p \phi_{ls2,3}$  で、塑性水平変位は、 $\delta_p = \theta_p (h - L_p/2)$  となり、図 10.2-1 (a) に示すような完全弾塑性型の  $P-\delta$  曲線を求めることができます。

以上の結果、初期降伏時の荷重 ( $P_{y0}$ ) と変位 ( $\delta_{y0}$ )、および終局荷重 ( $P_y$ ) と橋脚下端断面での許容限界曲率 ( $\phi_{ls2,3}$ ) を求めておけば、図 10.2-1 (a) で示した完全弾塑性型の  $P-\delta$  曲線が定まることが分かります。

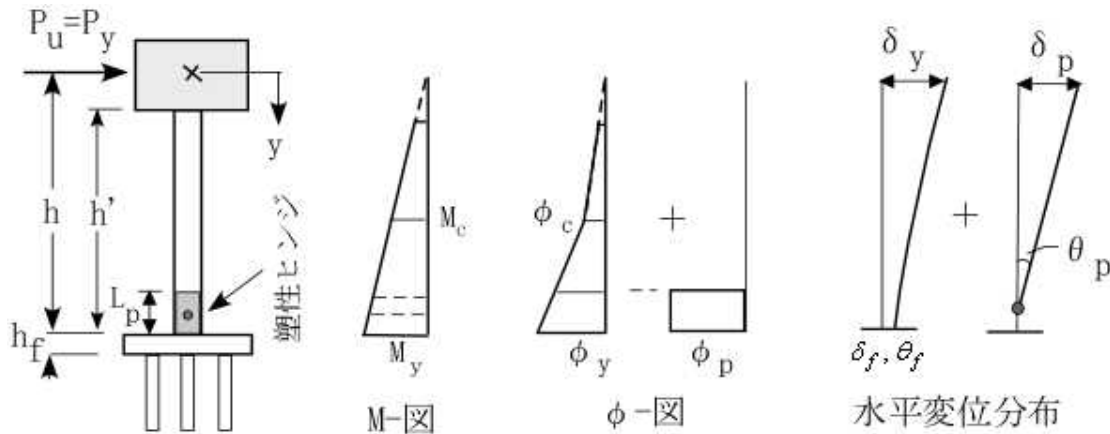


図 10.3-1 単柱式鉄筋コンクリート橋脚の曲率分布と水平変位 (橋軸直角方向)

さらに、図 10.3-1 に示すように、橋軸直角方向での水平荷重 ( $P$ ) において、橋脚柱断面の曲率分布  $\phi(y)$  が与えられた場合の水平変位 ( $\delta$ ) の求め方について、以下に補足しておきます。

補仮想仕事の定理である単位荷重法を適用すると、橋脚の曲げ変形による水平変位は

$$\delta_p = \int \phi(y) \bar{M}(y) \cdot dy = \int \phi(y) \cdot y dy \quad (10.3-1)$$

ここに、 $\bar{M}(y)$  は仮想曲げモーメントで、単位荷重法では  $P=1$  での曲げモーメント、 $\bar{M}(y) = 1 \times y$  を適用し、積分は図 10.3-1 での柱部 ( $h-h' \leq y \leq h$ ) について実行します。さらに、橋脚基礎の水平変位を付加すると、上部工の重心での水平変位 ( $\delta$ ) は次式で与えられます。

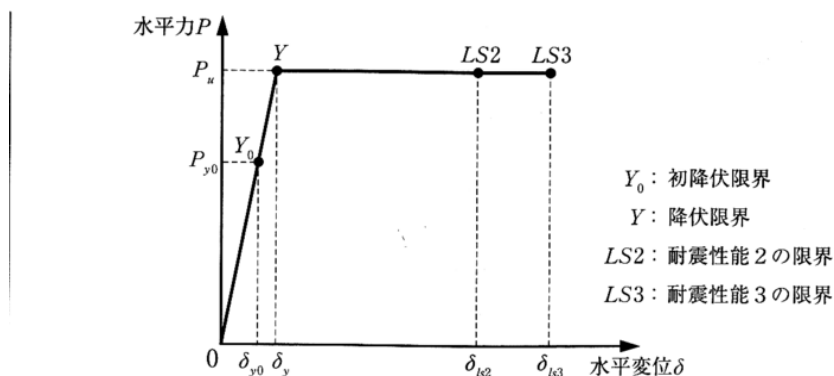


図-10.3.1 単柱式の鉄筋コンクリート橋脚の水平力-水平変位関係のモデル化

図 10.3-2 水平荷重 ( $P$ )—水平変位 ( $\delta$ ) 曲線

$$\delta = \delta_p + \delta_f + \theta_f(h + h_f) \quad (10.3-2)$$

ここに、 $\delta_f$ 、 $\theta_f$ ：フーチング下面での水平変位および回転変位、 $h_f$ ：フーチングの厚みで、フーチングは剛として取り扱っており、 $\delta_f$ 、 $\theta_f$ の求め方については、後述の回答 12.2 を参照してください。

式(10.3-2)は一般式であって、塑性ヒンジ区間を含む任意の弾塑性曲率分布に対しても適用でき、積分区間を多数の小区間に分割し、数値積分法を適用することによって容易に求めることができます。

以上の結果、単柱式鉄筋コンクリートの橋脚下端断面での最外縁の引張鉄筋が初期降伏するときの曲げモーメント ( $M_{y0}$ ) とその時点での橋脚柱部断面の曲率分布 ( $\phi_{y0}(y)$ ) を定めれば、

$$P_{y0} = \frac{M_{y0}}{h}, \quad \delta_{y0} = \int \phi_{y0}(y) \cdot y dy \quad (10.3-3)$$

$$P_y = P_{y0} \left( \frac{M_y}{M_{y0}} \right), \quad \delta_y = \delta_{y0} \left( \frac{M_y}{M_{y0}} \right) \quad (10.3-4)$$

となります。なお、式(10.3-3)での数値積分の詳細は補足 A-3 を参照してください。

以上の結果、道示では、単柱式鉄筋コンクリート橋脚の水平荷重 ( $P$ )－水平変位 ( $\delta$ ) の関係は、図 10.3-2 のようにモデル化されています。

なお、単柱式橋脚のような静定系の構造では、荷重と曲げモーメントの間には比例関係がありますので、式(10.3-4)の関係が成立しますが、ラーメン橋脚のような不静定系の構造では、部材の塑性化により応力の再分配が起こり、荷重と曲げモーメントの間には比例関係が成立しないので、図 10.2-1 での  $P-\delta$  曲線と  $M-\phi$  曲線の関係は複雑になり、完全弾塑性型の  $P-\delta$  曲線のモデル化には留意する必要があります。

**質問 10.4** 塑性ヒンジとはどのようなもので、塑性ヒンジの形成による水平変位の求め方を教えて欲しい。

**回答 10.4**

前述の図 10.1-1(b) のような  $M-\phi$  曲線を完全弾塑性型にモデル化すれば、単柱式鉄筋コンクリート橋脚では、橋脚下端での曲げモーメントが終局曲げモーメント ( $M_y$ ) に達すれば、終局水平荷重： $P_y = M_y/h$ 、ここに、 $h$ ：上部工の重心から橋脚下端までの距離、の下での水平変位の増加 ( $\delta > \delta_y$ )

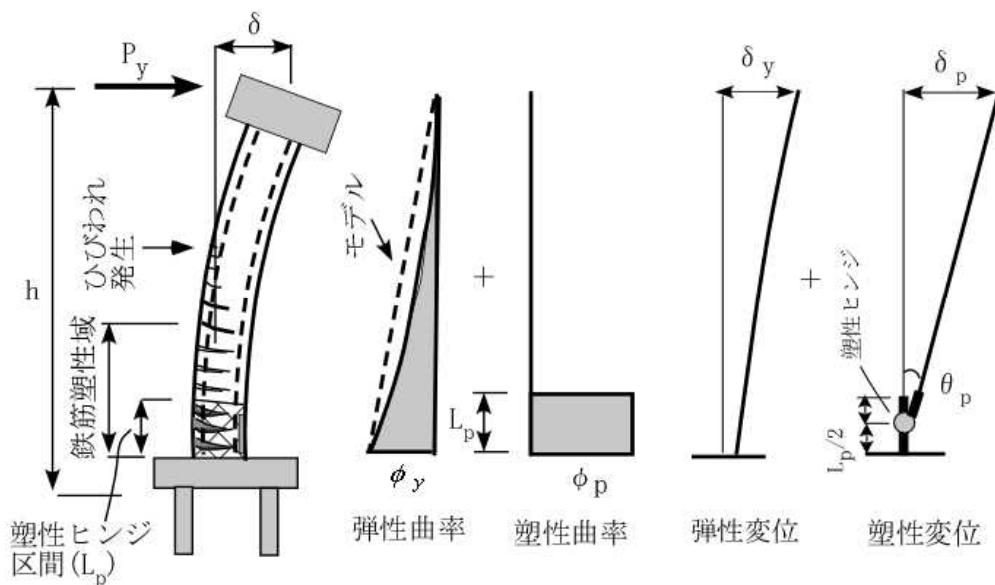


図 10.4-1 塑性ヒンジおよび曲率と変位の関係

に対して、橋脚下端断面の曲率が無限大となって解析が不能になります。この理由は、“平面保持の仮定”を用いた骨組構造解析法の不十分性にあります。モデル実験によれば、橋脚下端断面での鉄筋が引張降伏すれば、コンクリートとの付着力の喪失やフーチング部からの鉄筋の抜け出しが起り、平面保持の仮定は満足しなくなります。これらの現象を理論的に取り込むことが困難であるので、橋脚下端からの一定の長さの区間は一定の塑性曲率 ( $\phi_p$ ) を有する区間 ( $L_p$ ) と定義して、 $L_p$  を“塑性ヒンジ長”と名づけており、その大きさは実験により定められています。また、上部工の重心での水平変位の塑性成分は、 $\delta_p = \theta_p (h - L_p / 2)$ 、 $\theta_p$  : 塑性ヒンジでの回転角、と算定しています(図 10. 4-1 参照)。

**質問 10. 5** 単柱式鉄筋コンクリート橋脚の動的解析に用いる非線形履歴モデルには、剛性低下型モデルと知られている Takeda モデルを推奨されているが、このモデルはどのようなものですか？

**回答 10. 5**

道示 (H14 年版) の図-参 5.1 で紹介されている Takeda モデルは、曲げモーメント ( $M$ )-曲率 ( $\phi$ ) の正負交番繰返载荷による履歴曲線は、先行して受けた最大モーメントおよび曲率の地点に向かう直線を辿るようなモデルであります。すなわち、 $M = 0$  からひび割れ開始点 ( $M_c$ ) を通り、軸方向引張鉄筋の降伏モーメント ( $M_{y0}$ ) を越えて、点 ( $M_{max}, \phi_{max}$ ) まで正方向に载荷した後に除荷し、さらに負方向に载荷し、 $-M_c$  を通り、 $-M_{y0}$  を越えて、点 ( $-M_{min}, -\phi_{min}$ ) まで到達した後に、再度、除荷し、正方向に再载荷したときに、 $M - \phi$  曲線は正側の最大経験点 ( $M_{max}, \phi_{max}$ ) に向かい、以後の繰返し载荷に対しても、正負の最大経験点に向かうようなモデルで、一般に剛性低下型モデルと言われています。道示では、このようなモデルが実験結果と整合しており、動的解析に適用することを推奨しています。

道示 (H24 年版) では、単柱式鉄筋コンクリート橋脚には、図 10. 2-1 (b) に示した完全弾塑性型の  $M - \phi$  曲線を適用しているので、Takeda モデルによる履歴曲線は、図 10. 5-1 のようになると思われます。図 10. 5-1 は、载荷ステップを  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$  としたときの履歴曲線を示しています。ここでは、初期弾性曲げ剛性を  $K_1$  とし、図 10. 2-2 (b) での弾性域の曲げ剛性を適用し、除荷時の剛性は以下のように与えています。

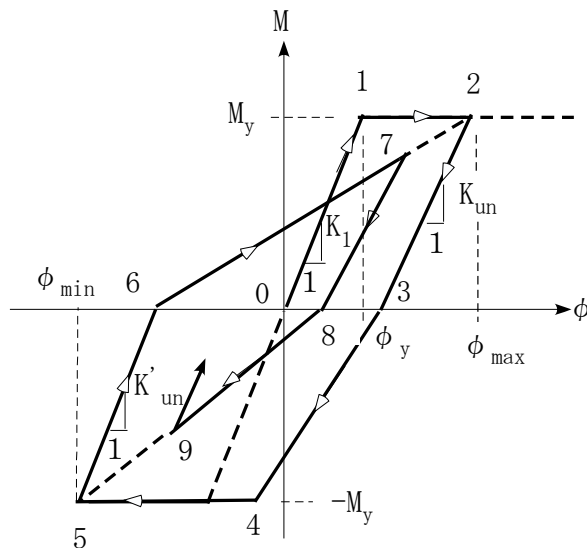


図 10. 5-1 剛性低下型履歴モデル (Takeda モデル)

$$K_{un} = K_1 \left| \frac{\phi_{max}}{\phi_y} \right|^{-a} \tag{10. 5-1}$$

ここに、 $K_1$ ：降伏曲げ剛性 ( $M_y / \phi_y$ )、 $\phi_{\max}$ ：経験した正負の最大曲率、 $\phi_y$ ：降伏曲率、 $\alpha$ ：除荷時の剛性低下指数で、 $\alpha = 0.5$ を標準としています。

なお、図 10.2-1(b)の完全弾塑性型の  $M-\phi$  は橋脚下端部の塑性ヒンジ区間に対して適用されているものであるため、動的解析においても、図 10.5-1 のような履歴モデルも塑性ヒンジ区間に対してのみに適用できるものであるものと推察されます。

**質問 10.6** 単柱式鉄筋コンクリート橋脚において、動的照査が必要であるのはどのような場合でしょうか？

#### 回答 10.6

前にも述べたように、動的照査が必要な場合とは、地震時の挙動が複雑で、1自由度系の振動問題として取り扱えない場合があります。したがって、単柱式鉄筋コンクリート橋脚でも、高さ 30m の高橋脚や上部工が斜桁や曲線桁である場合には、多自由度系の振動問題となり、動的照査が必要になります。

また、上部工が直線桁であっても、復員が広い上部工を支える単柱式鉄筋コンクリート橋脚では、橋軸方向の地震動に対しては1自由度系振動問題としての取り扱いで十分であっても、橋軸直角方向の地震動に対しては、上部工の回転慣性の影響が無視できなく、2自由度系の振動問題として取り扱い、動的照査が必要になる場合があります。このような場合の取り扱いを補足 A-5 および補足 A-6 に示しておきます。

以上