

軸力変動を考慮したラーメン式橋脚の非線形静的解析法に関する一提案

白石（正会員）瀬川 信弘
白石（正会員）青柳 守
白石（正会員）久保田 翼

はじめに

1層または2層の RC ラーメン橋脚を、静的非線形解析法に基づき耐震設計を行う際に、留意すべき事項として、部材の「降伏過程」と「軸力変動」の2点が挙げられる。

この2点に関する、解析上の取り扱い方で比較的多い事例は、① 部材の剛性は自重による初期軸力を基に求められる降伏剛性を解析過程を通じて一定として用い、地震荷重を漸増させる。② 塑性ヒンジ部の曲げモーメントが、軸力に応じ計算された降伏（=終局）曲げモーメントに達した時に、そのヒンジが降伏したと判定し、塑性ヒンジを発生させる、③ 系全体の終局時変位は、上記 ① ② の計算で、系の安定が失われる数の塑性ヒンジがすべて終局時回転角になった時の変位としている。

本報告では、部材の剛性およびヒンジ部のバネについて、[A] 初期軸力を基に求められる降伏剛性で一定値とする場合と変動軸力に基づき計算した降伏剛性を用いた場合との比較、[B] 軸力変動に応じてヒンジ部の塑性化を判定するための簡易な方法、について報告する。

事例による手順の説明

図-1 に示す1層1径間の RC ラーメン橋脚に例に説明する。橋脚下端は固定とし、下端から上部梁軸線までの高さは $h=11.3$ m、柱中心間隔は $B=9.3$ m である。塑性ヒンジは図のように6箇所で仮定した。計算方法は道示によった。

まず、自重解析で得られた部材軸力に基づく降伏剛性を用いたモデルで漸増地震力を作用させる。漸増地震荷重は、系全体に震度 k を作用させることにした。ヒンジ部の降伏の判定は、発生軸力に応じた降伏時回転角で判定した。

想定ヒンジ（○で示す）、①→④の順序で降伏した(Step1)。④まで降伏した後の各部材の軸力による降伏剛性に修正したモデルで、漸増地震力をあらためて作用させ、ヒンジ部の降伏の判定を再度行った(Step2)。④が塑性化した後は、軸力の変動は大きくなかった。Step2 での震度と水平変位の関係を図-2 に示した。

Step1 と Step2 の結果を比較すると下記のようになった。

Step	降伏変位 cm	終局変位 cm	終局震度
1	4 cm	106 cm	0.83
2	4 cm	89 cm	0.82

軸力変動を考慮した部材剛性評価の影響は、降伏変位と終局震度に関しては少なく、終局変位で約 20%の誤差があった。

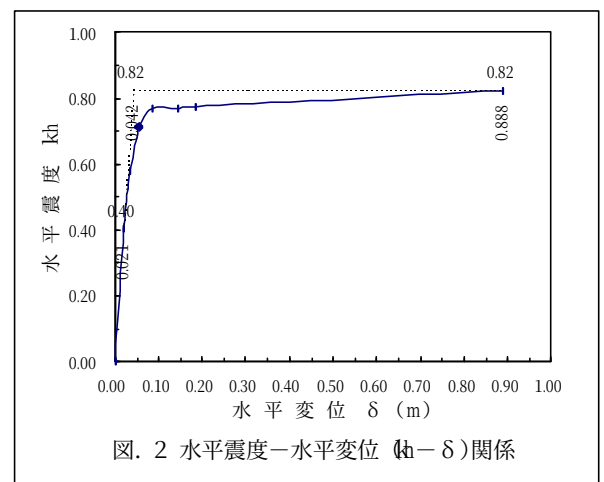
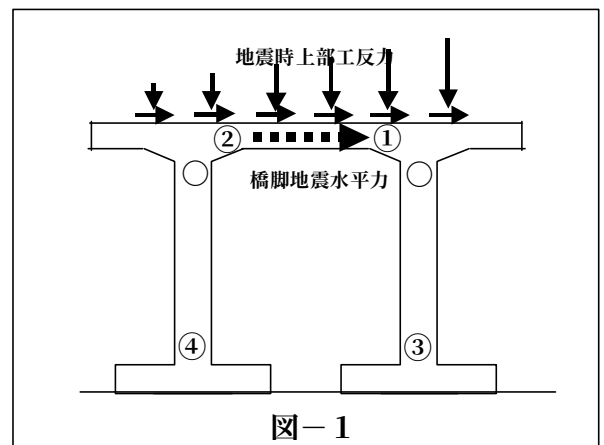


図. 2 水平震度—水平変位 (k — δ) 関係

キーワード：耐震設計、静的非線形解析、ラーメン橋脚

連絡先：東京都千代田区岩本町 2-11-2 電話：03(5687)8325 FAX：03(5687)6493

上記の結果から、部材剛性評価に軸力変動の影響を考慮することが意味あることと判断された。

解析手法の要点

既往の多くの橋脚非線形静的解析事例では、ヒンジの降伏の判定を、軸力に応じたヒンジ部の終局曲げモーメントから行っている。このとき、ヒンジの非線形回転バネ特性を完全弾塑性と仮定した場合には、荷重漸増の解析では4つ目のヒンジが降伏して系の安定が失われる時点までしか、水平地震荷重を漸増させられない。そのため、荷重漸増解析ではその後の水平変位をにおいて求めることができない。

本報告の解析では、部材の剛性ならびにヒンジのバネ特性を、変動する軸力に応じた値を使用し、また、ヒンジ部の降伏および終局の判定をそれぞれの回転角で行っている。

このような方式での解析を可能とするために、軸力に応じたひび割れ時・初降伏時・終局時の各曲げモーメント M と曲率 ϕ が求めやすくなっていなければならない。本解析では、これらを作用軸力 N の関数として、あらかじめ求めておくことにしている。つまり、

$$M_i = f_i(N), \quad \phi_i = \varepsilon_i / g_i(N)$$

とし、それぞれ下記のような軸力 N に関する多項式で表現することにした。

$$X(N) = a_0 \cdot N^n + a_1 \cdot N^{n-1} + a_2 \cdot N^{n-2} + \dots + a_{n-2} \cdot N^2 + a_{n-1} \cdot N^1 + a_n \cdot N^0$$

ε_i は、各状態を規定する歪（たとえば初降伏時の規定歪は、鉄筋の降伏ひずみ）である。

g_i は、中立軸から規定歪までの距離をあらわす軸力 N に関する n 次の多項式である。曲率 ϕ を直接、軸力 N に関する多項式近似にしなかったのは、軸力 N の変化による曲率 ϕ の変化が非常に小さいために、精度良く近似することが難しいためである。

項数 n は、6～10 で十分精度の良い近似で十分である。これらの関数は、あらかじめ寸法・配筋が同じ断面毎に、6～10 ケースの中立軸に対して、 M_i と ϕ_i を求め、多項式近似した関数である。

このように、ひび割れ時・初降伏時・終局時の各曲げモーメント M と曲率 ϕ を軸力 N の関数とする方法の導入によって、解析のアルゴリズムが非常に単純化され、プログラム化しやすくなる利点がある。

たとえば、軸力に応じた部材の等価断面二次の $\{ E'I' / E_c \}$ の算定においては、

$$E'I' / E_c = \{ M_{y0}(N) / \phi_{y0}(N) \} / E_c$$

ただし、 E_c = 設計基準強度 σ_{ck} におけるコンクリートの弾性係数

$M_{y0}(N)$: 軸力に関する初降伏モーメント関数

$\phi_{y0}(N)$: 軸力に関する初降伏曲率関数

となる。

あとがき

橋脚の静的非線形特性では、部材の軸力変動の幅が大きい。したがって、部材の剛性（一般に降伏剛性）やヒンジのバネ特性を軸力に応じた値でモデル化し、塑性ヒンジの降伏・終局の判定も回転角で行うことを提案した。その際、上記のように、ひび割れ時・初降伏時・終局時の各曲げモーメント M と曲率 ϕ を事前に関数化しておくことによって、プログラム化が容易になり、仮に非線形特性が完全弾塑性でない場合への対応も容易になってくる。

静的非線形解析が可能な汎用ソフトは多く市販されている。これらのソフトの Pre, Post 処理として上記の考え方を基にしたプログラムを用意することによって、多少複雑な構造形式の橋脚に対しても容易に静的非線形解析を行うことができる。

また、Pre, Post 処理も EXCEL(VBA)程度で十分対応可能である。本文で示した事例でも、EXCEL(VBA)でプログラム化し処理したものである。

以上