

非線形モード解析法による構造物の損傷過程と 動的挙動に関する研究

齊藤 正人¹・室野 剛隆²・棚村 史郎³

¹正会員 博(工) 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

²正会員 博(工)(財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

性能照査型設計法における構造物の耐震設計法には構造物の損傷過程を把握するための *Pushover* 解析が必要不可欠である。この *Pushover* 解析は、多自由度系モデルに置換した構造物に地震時水平荷重を逐次作用させて、構造物全体系と各部材の損傷過程を把握する静的非線形解析である。しかしながら、この *Pushover* 解析により評価される損傷過程と、地震応答解析による損傷過程が大きく異なることが報告されている。この差異を生じさせる要因の把握を既往の手法に基づき検討し、その要因を考慮した動的損傷過程を模擬できる静的解析法(非線形モード解析法)を本論文で提案するものである。本手法により動的損傷過程をより精度よく評価することが可能となった。

Key Words : *Seismic Design, Pushover Analysis, Performance-based Seismic Design, Inelastic Modal Deformation Analysis*

1. はじめに

近年、構造物の耐震設計法は耐力照査型(*Force-based Seismic Design*)から変形性能照査型設計法(*Performance-based Seismic Design*)への移行過程であり、今後その傾向は益々強くなることが予想される。1960年代から70年代において強震動に対する構造物の非弾性的挙動の重要性が認識され、その後の構造部材・要素に関する定量的な変形特性の研究が数多く実施されたことにより、性能照査型設計法は、現在世界各国で具体的な適用に向けて指針やガイドライン等が検討されている¹⁾。性能照査型設計法における構造物の性能照査法は *Capacity Spectrum Approach* , *N2 Method* , *Direct Displacement-based Design* 等、多くの手法が提案されている²⁾。鉄道構造物の耐震設計法は、この中の *N2 Method* に含まれる手法である。これらの性能照査法には構造物の損傷過程を把握するための *Pushover* 解析が必要不可欠である。この *Pushover* 解析は、多自由度系モデルに置換した構造物に地震時水平荷重を逐次作用させて、構造物全体系と各部

材の損傷過程を把握する静的非線形解析である。一般に、想定される地震動に対する等価な1自由度系に置換した構造物モデルの動的応答値と、*Pushover* 解析から得られる荷重-変位曲線の関係から、部材の照査や *Substitute Structure Analysis* に見られる収束計算等により、構造物の耐震性能を評価する方法が取られている。従って、この *Pushover* 解析は対象構造物の耐震性能を決定づける重要な役割を担うものであり、その精度向上は性能照査型設計法において今後重要な課題である。しかしながら、この *Pushover* 解析により評価される損傷過程と、同モデルを用いた地震応答解析による損傷過程が大きく異なることが報告されている³⁾。この差異を生じさせる主な要因として、解析モデルに作用させる水平荷重の分布特性が挙げられる。既往の手法ではその分布形状を一様分布、逆三角形分布、構造物の1次モード分布(弾性状態や降伏状態の剛性を用いて算定)等で全損傷過程を通じて一様に設定しているのが一般的である。しかしながら、強震時における慣性力分布は損傷過程に応じて変化すると考えられ、更に動的挙動には慣性力のみならず減衰力の影

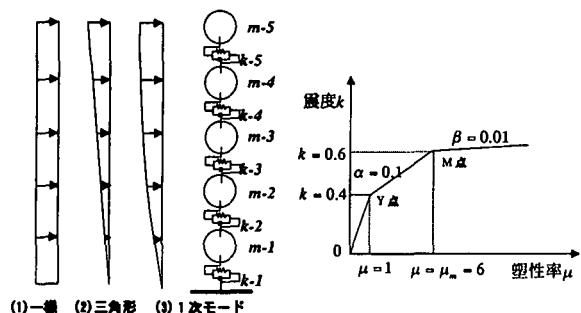


図-1 解析モデルと層間復元力特性の設定

響も無視できないため、適切な荷重分布を考慮した *Pushover* 解析法の精度化は非常に困難な状況にある。また近年においては、部材の変形性能を、最大耐力点から終局耐力点に至る負勾配領域まで厳密に評価する傾向にある。しかしながら荷重制御法を適用する限り、負勾配領域での損傷過程を追跡することは解析上非常に困難であり、その対処法も未だ確立するに至っていないのが現状である。

そこで本研究は、上記2つの問題を解決するために、荷重制御法による *Pushover* 解析から、変位制御法による静的非線形解析に発想を転換した、新しい解析手法を提案し、その妥当性について検証するものである。まず本論文では、5自由度系モデルを対象として、調和振動入力による動的解析結果と、上記に示した数種の水平荷重の分布形状を用いて *Pushover* 解析を実施し、動的な損傷過程との相違について検証する。次に提案手法の考え方を述べた後に、その手法を用いて静的非線形解析を実施し、そこから得られる損傷過程の特性について論じることとする。

2 動的解析と既往の荷重分布を用いた *Pushover* 解析による損傷過程の違いについて

(1) 検討条件

解析モデルは図-1に示す5自由度モデルとし、各自由度に与える質量と節点を結合する水平ばねは全て等しいものとする。水平ばねに与える骨格曲線はトリリニアモデルとし、第1折れ点(降伏点)の震度 $k=0.4$ 、塑性率 $\mu=1.0$ 、第2折れ点(最大耐力点)の震度 $k=0.6$ 、塑性率 $\mu_m=6.0$ とする。降伏剛性(初期剛性)に対する第2勾配剛性比 $\alpha=0.1$ 、第3勾配剛性比 $\beta=0.01$ を仮定する。ここで本解析では、荷重制御法による収束計算上負勾配領域の計算が困難なため、ほぼフラットな正勾配を与えている。本解析モデルの骨格曲線を同時に図-1に示す。

動的解析に用いた調和振動入力の振動数 f_g はモデルの降伏剛性に相当する振動数 f_s との比率を

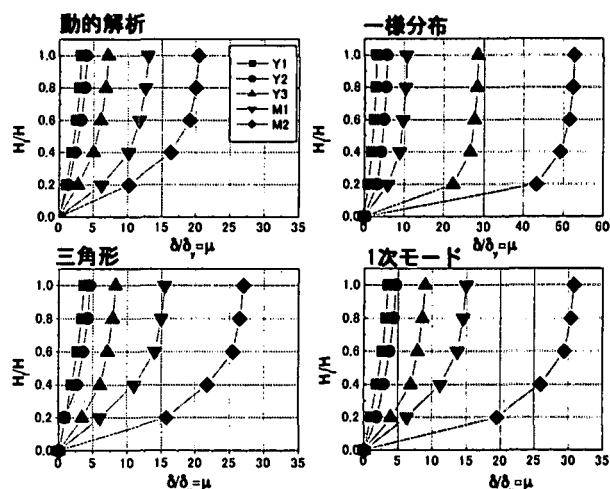


図-2 動的解析と *Pushover* 解析による損傷過程

$f_g/f_s=0.5$ とし、入力振幅は重力加速度比で 0.15 を設定した。入力波を上記条件に設定した理由としては、構造物の高次モードの影響を無視し、1次モードのみの特性に着目できるためである。高次モードの影響については興味のあるところであるが、現段階では1次モードの基本的特性について検討することとし、さらに本研究を進展させるに際して検討する予定である。因みに構造物の1次モードに対して2倍の周期を有する入力波であれば、構造物の2次モードに対して6倍周期の入力波となるため、本計算では構造物の2次モードが励起されにくい状態であると考えられる。

初期の減衰定数 h は 0.05 を設定し *Kelvin-Voigt* 型レーリー減衰として与えた。履歴特性は履歴最大点を指向する *Clough* モデルを設定した。*Pushover* 解析では、(1)一様分布、(2)逆三角形分布、(3)1次モード分布の3ケースについて実施し、損傷イベントに関わらず一定として解析を実施する。(3)については、降伏剛性を用いて固有値解析を実施し、そこから得られる1次モードベクトルに比例させて荷重を載荷するものとする。

(2) 解析結果

図-2に各層間復元力特性が降伏点(Y)、最大耐力点(M)に達した時点における変位の高さ方向分布を示す。図中の数字の suffix は節点番号を意味している。横軸は降伏変位で無次元化した変位量 μ を、縦軸には高さを全長で無次元化した値を示す。一様分布荷重のケース以外は動的解析結果と損傷過程のパターンが等しくなるが、どのケースについても、同じ損傷イベントが生じるときの変形量が動的解析に比べて大きくなる傾向にある。特に鉄道構造物の解析に使用している一様分布荷重のケースでは、第2層間で最大耐力点に達する最終変形量が2倍

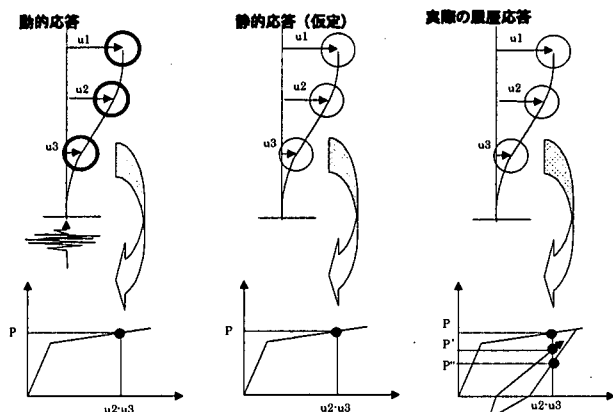


図-3 IMDAにおける考え方とその仮定条件

以上大きくなっていることがわかる。これは損傷イベントが生じて作用荷重の分布性状が変化しないことから、最初に損傷を受けた第1層間に損傷が集中し、他の部材（上層）に荷重の再分担が行われることがなくなるために生じると考えられる。他の荷重分布性状の場合では、一様分布に比べれば動的な損傷過程に近くはあるが、損傷が大きくなるに従って、同様に大きな差異が生じてしまう。

以上の結果から、水平荷重の分布性状を一律固定させる手法では、動的に損傷を受ける構造物の挙動を適切に評価できないことがわかる。従って動的な損傷過程を静的解析により模擬するためには、損傷イベントに応じて荷重の分布性状を適宜変化させる必要がある。しかし多自由度系モデルに作用させる水平荷重は、慣性力に加えて減衰力の影響も無視できず⁴⁾、この2つの力を損傷イベントごとに求めるためには、動的解析を実施する他に方法はないと考えられる。

3. 非線形モード解析法（IMDA）の提案

ここで、動的解析で得られる各イベントの変位量と全く等しい静的状態を考えることにする。この2つの系における層間復元力特性は、図-3(中央)に示すように全てのイベントが骨格曲線上で生じると仮定すれば必ず等しくなる。つまりこの仮定は、履歴特性に伴う復元力の変位に対する多価関数的な性状は無視することを意味している。このとき静的モデルに動的結果と等しい変位を与える節点拘束力(Driving Force)の意味を考えてみる。静的な釣り合い式は、以下ようになる。

$$[f(u)] = \{F_{\text{Driv.}}\} \quad (1)$$

ここで、

$[f(u)]$: 各自由度の復元力マトリクス
 $\{F_{\text{Driv.}}\}$: 各節点の拘束力マトリクス

u : 各節点間の相対変位

また動的な釣り合い式は次式で表される。

$$[m]\{\ddot{u} + \ddot{z}\} + [c]\{\dot{u}\} + [f(u)] = 0 \quad (2)$$

ここで、

$[m]$: 質量マトリクス
 $[c]$: 減衰係数マトリクス
 $\ddot{z}$: 基面からの入力加速度

従って、上記仮定のもとで静的モデルの各節点変位を動的応答に一致させれば、式(1)(2)から次式が得られる。

$$\{F_{\text{Driv.}}\} = -\{[m]\{\ddot{u} + \ddot{z}\} + [c]\{\dot{u}\}\} \quad (3)$$

つまり、上記仮定のもとでは、慣性力と減衰力の総和が静的モデルにおける拘束節点力と等しくなる。つまり、動的変位が静的解析上で模擬できるならば、慣性力と減衰力の動的な2つの荷重を同時に考慮した解析を実施したことに他ならない。

それでは次のステップとして、動的変位を動的解析に抛らずに求める手法を考える。弾性範囲内であればモード解析を行なうことで、変位分布はその変位ベクトルに準ずることになる。ただし本論文では目下前述のように高次モードは考えないものとする。また Kelvin-Voigt 型減衰による位相差を考慮する場合には、減衰項を考慮した複素固有値解析により変位分布を求めればよい。非弾性範囲ではどうであろう。構造物の応答は非線形化が進むにつれ、その剛性は変化する。そこで本研究では、以下の手順で各ステップ毎に変位を求めることにした。

- 1) 損傷イベントが生じる毎に、次のイベント点と原点を結ぶ割線剛性を用いてモード解析を実施する。ただし、損傷イベントが生じていない部材については、剛性は変化させないものとする。
- 2) 変位ベクトルが求まったら、次にいずれかの部材で損傷イベントが生じるまで、その変位比率で節点変位を静的モデルに作用させる。
- 3) 最大耐力点に達した場合には、次のイベント点を $\mu=12$ と設定する。

上記解析法におけるモード解析の剛性設定と最大耐力点以降のイベント点の設定には特別な根拠はない。まずこのような設定方法によって、ここで提案する新しい静的非線形解析法がどの程度の精度で、動的損傷過程を模擬可能であることを確認する。

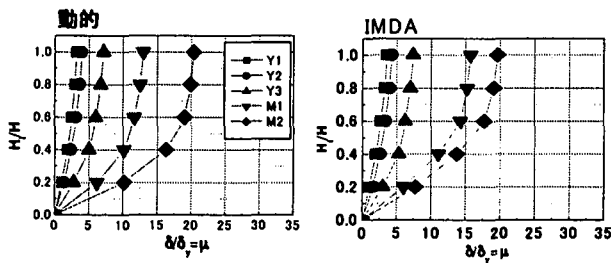


図-4 IMDA による損傷過程

これ以後、本手法の内容を鑑みてこれを非線形モード解析法(*Inelastic Modal Deformation Analysis : IMDA*)と呼称することにする。

前述の仮定について、更にここで考察を加える。実際の復元力特性は同一変位に対して、載荷ループと除荷ループでは取る復元力が異なる。また応答特性によっては、残留変位が生じる場合があり、このときには更に異なる復元力を取る可能性がある(図-3右参照)。これは非線形復元力特性の変位に対する多価関数的な性質であり、上記仮定を容易に否定できるものである。しかしながら、最初にイベントを発生させる状態は、既往の様々な履歴特性を鑑みれば載荷ループに他ならず、また残留変位を残した状態からの再載荷ループでは、最終的には骨格曲線上にループが復元した後に、新たな損傷イベントを生じさせることから、上記仮定は大きく実際の挙動から逸脱するものではないものと考えられる。

履歴特性に関して忘れてはならないのは、履歴減衰効果である。静的非線形解析では、絶対的な応答を議論することではなく、損傷過程を追跡することが主目的であるため、履歴減衰による応答低下は議論の対象外ではあるが、この減衰特性により変形モードに位相差が生じることは十分に考えられる。そこで本解析では履歴減衰の影響を考慮するため、等価線形化法における等価粘性減衰定数を本履歴モデルに適用し、下記のように定めた。

1) 降伏点目標

$$h_{eq} = 0 \quad (4)$$

2) 最大耐力点目標

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} (1 - \alpha) \frac{\mu_m - 1}{\mu_m} \quad (5)$$

3) 最大耐力点以降目標

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\mu} [\mu - \beta(\mu - \mu_m) - \alpha(\mu_m - 1) - 1] \quad (6)$$

初期減衰定数に上記の等価粘性減衰定数を付加して複素固有値解析を行い、変位分布を算定すること

にした。

4. 非線形モード解析法 (IMDA) の解析結果と考察

IMDA による解析結果を図-4 に示す。上記手法による損傷過程とその変位は前述の荷重載荷方法と比較して、より動的解析結果に近い結果となった。特に第2節点が最大耐力点に達する本解析での最終変形状態は、動的解析結果に良好に一致している。つまり変形モードが示すように、基部近傍で損傷が生じてもそこに損傷が集中することなく、損傷後も保持される剛性により全体系としての新たな振動モードが生じると解釈できる。この新たな振動モードは荷重の再分配と同義であり、損傷イベント毎に等価な剛性と減衰を用いた変位性状を評価する本手法の方向性は妥当であると考えられる。紙面の都合上詳細については省略するが、本解析モデルにおける履歴減衰の影響は、無次元化した変位ベクトル量に対して、小数点2桁程度の違いであったことをここに報告する。

5. 結論

本検討により耐震設計に重要な変形性能照査のための静的非線形解析において、IMDA を提案しその手法の方向性が妥当であることを確認した。現段階では、解析の前提・仮定や入力動の影響については一切議論していないため、本論文は報告に過ぎないが、今後それらについて十分に検討を進める予定である。また本論文の前段に提示した負勾配領域の対応については、本手法が変位制御法であることから、同アプローチにより損傷過程を容易に追跡できるものである。

最後に本手法では、荷重載荷法のように荷重伝達法等の収束計算は一切伴わないため、実務設計を考える上でも、効率的な設計法であると言える。

参考文献

- 1) SEAOC Vision2000 Committee : *Performance-based Seismic Engineering Report*, California, 1995.
- 2) 例えば、MJN Priestley : *Performance Based Seismic Design*, 12WCEE, CD-ROM, 2000.
- 3) Hosseini, et al : *Design Verification of an Existing 8-story Irregular Steel Building by 3-D Dynamic and Pushover Analyses*, 12WCEE, CD-ROM, 2000.
- 4) 矢部正明, 川島一彦 : 杭基礎の非線形地震応答特性とプッシュオーバーアナリシスによる解析法に関する研究。土木学会論文集, No.619, pp.91-109, 1999.