

構造物の強震時損傷過程を把握するための新しい静的非線形解析法に関する研究

埼玉大学 工学部 正会員 ○齊藤 正人
 復建エンジニアリング 正会員 池亀 真樹
 鉄道総合技術研究所 構技研 正会員 棚村 史郎

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が²⁾、これらの手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。そこで本研究は、このような荷重作用手法から変位作用方法に転換した、動的挙動をより精度よく追従できる新しい静的非線形解析法を提案するものである。以下の検討では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、上記に示す3つの分布形状を用いて *pushover* 解析を実施しその特性を明らかにすると共に、本論の提案法である **非線形モード解析法**(*Inelastic Modal Deformation Analysis : IMDA*)によりその妥当性について検討を行うものである。

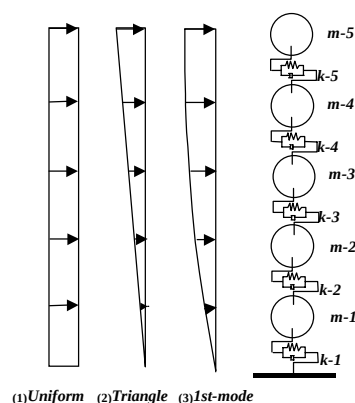


Fig.1 解析モデルと荷重分布性状

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

解析モデルは Fig.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 $\mu=6.0$ 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。動的解析に用いた調和振動入力の振動数

キーワード 損傷過程, 静的非線形解析法, *pushover* 解析, 非線形モード解析法, 性能照査型設計法

連絡先 浦和市下大久保 255 埼玉大学工学部建設工学科

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 $f_g/f_s = 0.5$ とし、入力振幅は重力加速度比で0.15を設定した。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载荷するものとする。

Fig.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。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変形量が動的解析に比べて大きくなる傾向にある。特に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も作用荷重の分布性状が変化しないことから、第1層間に損傷が集中することで上部に損傷が進行しなくなるためと考えられる。しかしながら損傷イベントに応じた荷重分布を求めるためには、減衰力の影響等を含めた動的解析を実施する必要がある、非常に困難な状況になることが容易に推測される。

3. 非線形モード解析法の提案

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、Fig.3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。このとき静的モデルに等しい変位を与える節点拘束力(Driving Force)が動的解析における慣性力と減衰力の和となる。動的挙動を静的非線形解析で再現するには、静的非線形解析で各自由度の変位を動的応答に一致させればよいことになる。動的解析せずに動的変位を評価する方法は、各損傷イベント毎のモード解析であり、各自由度の変位比率を算定し強制変位を静的モデルに作用させればよい。本解析では履歴減衰の影響を考慮するため、イベント毎に**複素固有モード解析**を実施する。このモード解析では、復元力特性にトリリニア型Cloughモデルを仮定し、次に発生するイベント点と原点を結ぶ割線勾配を等価剛性に、またそのときの履歴特性を等価減衰として評価した。その結果、Fig.4に示すように、上記手法による損傷過程と変位は前述の荷重载荷方法と比較して、より動的解析結果に近い結果となった。上記アンダーラインに示す仮定は、履歴特性による1変位に対する復元力の多価関数的な挙動を無視するものであり、この点について今後更なる研究を行い本解析手法の精度向上に努める。

参考文献：1) SEAOC Vision2000 Committee [1995] Performance-based Seismic Engineering, Report, California. 2)例えば、MJN Priestley [2000] Performance Based Seismic Design, 12WCEE. 3)Hosseini, et al [2000] Design Verification of an Existing 8-story Irregular Steel Building by 3-D Dynamic and Pushover Analyses, 12WCEE.

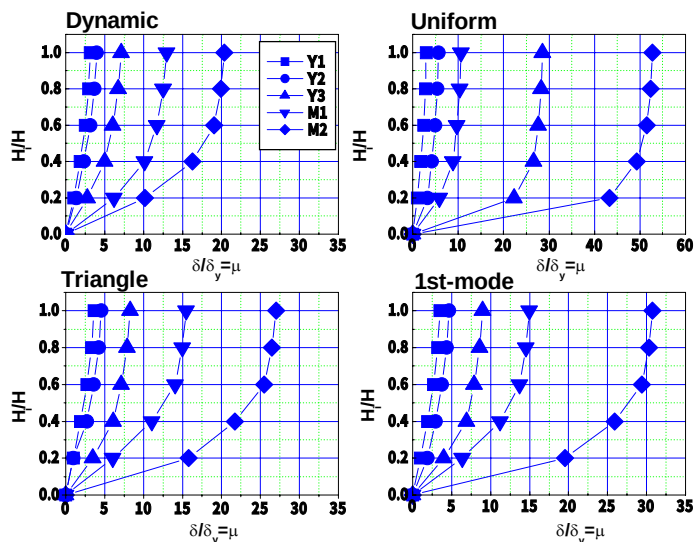


Fig.2 動的解析とPushover解析の損傷過程の比較

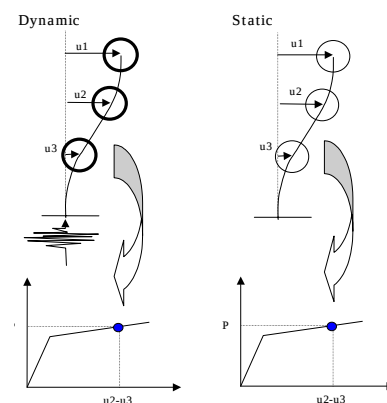


Fig.3 動的変位と静的変位の関係

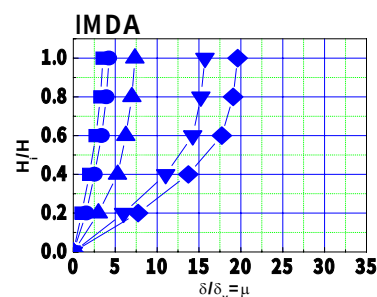


Fig.4 IMDA による損傷過程