

減衰の影響を考慮した強震時損傷過程の静的評価法に関する研究

埼玉大学 工学部

正会員 齊藤 正人

1. はじめに

近年、構造物の耐震設計法は性能照査型設計法(*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。将来的に性能照査型設計法が有効に使用されるには、信頼性の高い解析手法が必要不可欠である。ATC(*Applied Technology Council*)ではATC-55¹⁾のプロジェクトにより、既設・新設構造物への性能照査型設計法の精度向上や *consensus* を得るため、*Phase* として最近まで各国の研究者により提案されてきた解析手法、特に静的解析法についての報告書が公開された。ここでは、*Capacity Spectrum Approach*, *N2 Method*, *Direct Displacement-based Design* 等、多くの手法が紹介され、各々の利点、精度等について言及している。こうした設計法の中で、構造物のキャパシティー特性を評価すべく、*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。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、一般に *Pushover* 解析では作用荷重分布を固定する仮定が用いられており、これにより弱い階層に過剰な損傷を生じ、反対に他の階層は過小な損傷を評価する傾向が示唆されている。こうした問題を解決するため、Bracci等²⁾は階層の耐力比に応じて作用荷重を逐次変化させる方法を提案し、また Yang等³⁾は非線形時の等価剛性による変形モードを損傷過程毎に算出し、そのモードに比例した荷重を作用させる方法を提案している。これらの方法は一般に *Adaptive pushover* 解析と呼ばれている。これらについてはこれまでの *Pushover* 解析よりも、精度良く変形性能が評価できるという報告がされているが、十分な検討はなされていないのが現状である。

一方、著者等は *Pushover* 解析に代わる解析法として、IMDA法(*Inelastic Modal Deformation Analysis*)を提案している⁴⁾。これは、非線形時の各階層の等価剛性と等価減衰を用いて、状態空間法⁵⁾による固有値解析から変形モードを算出し、これに比例した変位を累積させる解析法である。既往の研究により、この解析法が動的な損傷過程をより精度良く評価できることがわかっている。

そこで本研究では、既往の *Pushover* 解析、*Adaptive pushover* 解析と IMDA の特性を把握すべく、様々な建築形式に対して検討を実施した。その中で、特に興味深い *Adaptive pushover* 解析と IMDA との相違が現れたケースである、減衰効果が卓越する場合について本紙で紹介する。

2. 解析手法の概要

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(yielding)の震度 $k = 0.2$ 、塑性率 $\mu = 1.0$ 、第 2 折れ点(spalling)の塑性率 $\mu = 2.0$ 、終局耐力点(ultimate)の塑性率 $\mu = 3.0$ とする。降伏剛性(初期剛性)に対する第 2 勾配剛性比 $= 0.1$ 、第 3 勾配剛性比 $= 0.01$ を仮定する。以下に簡単な各解析法の説明を記す。

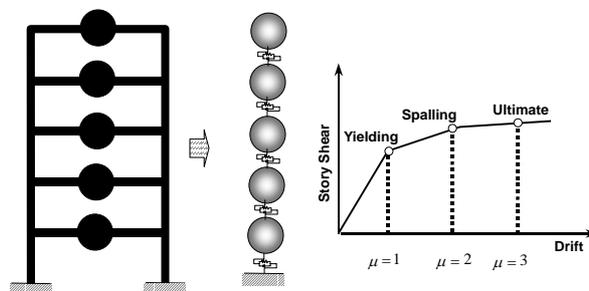


Fig.1MDOF and story shear-drift relation

キーワード 静的非線形解析法, *pushover* 解析, IMDA, 性能照査型設計法, *Adaptive pushover* 解析
連絡先 浦和市下大久保 255 埼玉大学工学部建設工学科

(a) Pushover 解析

各層の降伏点と原点を結ぶ割線剛性を用いたモード解析を実施し、これにより得られる1次モードに比例させた固定水平荷重を適用する。減衰効果は考慮しないものとする。

(b) Adaptive pushover 解析

各層でイベント(yielding, spalling)が生じた時点でモード解析を実施し、1次モードの変位分布に比例させた荷重を次のステップ以降作用させる。再度イベントが生じたら同様にモード解析を実施する。等価剛性は次に発生するイベントと原点を結ぶ割線剛性とする。通常減衰効果は考慮しないが、本紙では(c)IMDAと同様の減衰効果をモードに考慮したものについても、同時に掲載する。

(c)IMDA

各層でイベント(yielding, spalling)が生じた時点でモード解析を実施し、1次モードの変位分布に比例させた変位を次のステップ以降累積させる。再度イベントが生じたら同様にモード解析を実施する。等価剛性の定義は(b)に等しい。各層の初期減衰を0.05とし、履歴減衰については応答最大点を次に発生するイベント点として、最大点指向型 Clough モデルの定常応答時における等価粘性減衰定数と仮定する。本解析では、最下層(第1層)に大きな減衰を想定し、これを初期減衰として0.3を仮定することにする。この減衰は免振効果や逸散減衰効果を想定するものである。層毎に減衰係数を算出し、これを減衰係数マトリクスに集約して計算を行う。

(d)時刻歴動的解析

本解析では、時刻歴動的解析結果を正解値と仮定し、静的非線形解析の検証を行うものとする。解析では Newmark-法を用い、時間刻みを0.001(s)に設定する。入力地震動は1)El Centro NS(1940), 2)Hachinohe EW(1968), 3)Kobe NS(1995)を使用する。本解析では各地震動のPGAを0.4gに変換している。

3. 解析結果とまとめ

Fig.2 に解析結果を示す。本解析では、ある層が終局耐力点に達するまでの各階の最大応答変位と、各層の最大層間変位を高さ方向にプロットしたものである。その結果、1)Pushover 解析では大幅に最下層に損傷が集中し、他層の損傷を過小評価する危険性がある；2) Adaptive pushover 解析は、減衰効果の有無に拘わらず第1層から損傷が生じ、第1層の損傷程度を過大評価する傾向にある；3)IMDA では、損傷が第2層から生じており、これは動的解析結果と一致する。最大変位の高さ分布に見られるように、減衰効果によるモード変形特性がある程度評価されたものと考えられる。重要なことは、荷重載荷を基本とした静的解析では、各層の降伏耐力が等しければ、負方向の荷重を含む分布を使用しない限り第1層から損傷が必ず生じてしまう点である。IMDA では変位が先に与えられることから、第1層を損傷の起点とする必然性がなくなり、このような問題に対して有効であると考えられる。

参考文献：

[1] Applied Technology Council, ATC-55 Evaluation and improvement of inelastic seismic analysis procedures, Research summary, 2002.2. [2] Bracci JM, Kunnath SK, Reinhorn AM. Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures. Journal of Structural Engineering, ASCE 1997; 123(1):3-10. [3] Yang P, Wang Y. A Study on improvement of pushover analysis. 12th World Conference on Earthquake Engineering 2000; CD-ROM, No.1940.[4] 齊藤, 池亀, 棚村, 非線形モード解析法による強震時損傷過程の把握, 第56回年次学術講演会講演概要集, CD_ROM, I-B012 [5] Hart GC, Wang K. Structural dynamics for structural engineers. John Wiley and Sons, 1999.

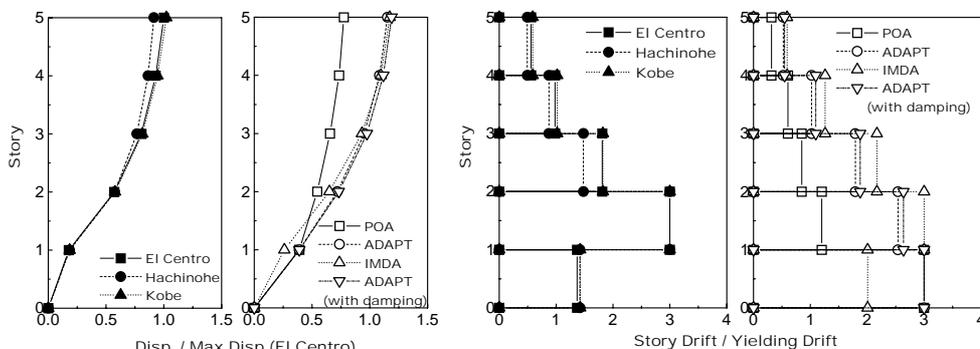


Fig.2 Results of static and dynamic analyses

improvement of pushover analysis. 12th World Conference on Earthquake Engineering 2000; CD-ROM, No.1940.[4] 齊藤, 池亀, 棚村, 非線形モード解析法による強震時損傷過程の把握, 第56回年次学術講演会講演概要集, CD_ROM, I-B012 [5] Hart GC, Wang K. Structural dynamics for structural engineers. John Wiley and Sons, 1999.