

有限要素法による RC 立体骨組構造物の 地震崩壊解析手法の開発

DEVELOPMENT OF SEISMIC COLLAPSE ANALYTICAL SCHEME FOR RC SPACE FRAMED STRUCTURES USING FINITE ELEMENT METHOD

津田真啓¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Michihiro TSUDA and Daigoro ISOBE

- 1) 工修 日立ソフトウェアエンジニアリング (〒231-8475 神奈川県横浜市中区尾上町 6 丁目 81)
- 2) 工博 筑波大学講師 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

A new finite element code using the Adaptively Shifted Integration (ASI) technique with a linear Timoshenko beam element, which can express member fracture by a plastic hinge located at an exact position with a simultaneous release of the resultant forces in the element, is applied to the seismic damage analysis of reinforced concrete (RC) framed structures. Contact between members is also considered in order to obtain results that agree more closely with actual behaviors such as intermediate-layer failure. By using the proposed code, sufficiently reliable solutions have been obtained and the results reveal that this technique can be used in the numerical estimation of structural reliabilities.

Key Words : ASI technique, Vertical earthquake motion, Phase difference of seismic-wave propagation, Member Fracture, Contact

1. はじめに

従来の建築物の設計では、計算コストを抑えるために、重要な構造物以外は震度法による水平一軸方向の静的解析のみが実施されることが多い。鉛直方向に対しては、自重を支える強度があれば充分という考え方が主流である。また動的解析を実施する場合でも、層を質点系モデルに置換した解析が主流であり、柱や梁など部材レベルでの構造物の複雑な動的挙動を十分に把握するまでには至っていない。そのため、計算効率の高い簡便でかつ高精度な動的解析手法の出現が望まれている。

近年、計算機の著しい進歩によって計算コストの制限は取り払われつつあり、種々の動的解析手法が開発されているが、本研究では順応型 (Adaptively) Shifted Integration (ASI) 有限要素法¹⁾²⁾³⁾を地震応答解析に適用する。

本研究は、RC 構造物の地震応答解析における ASI 法の有効性を検証し、計算効率の高い RC 立体骨組構造物の地震応答解析手法を構築することを目的とした。またその解析手法の適用例として、従来の質点系モデルでは困難であった鉛直方向地震動を考慮した地震応答解析、地震波伝播位相差を考慮した地震応答解析、さらに通常の有限要素法では解析困難であった部材破断を伴うような強非線形性、不連続性の高い崩壊解析、さらに部材間接触を考慮した解析を実施した。

2. 順応型 (Adaptively) Shifted Integration (ASI)

法

ASI 法¹⁾²⁾³⁾とは、弾性要素における数値積分点位置は線形解析に対する最適位置(線形チモシェンコはり要素の場合は中央点)に置き、全塑性断面の発生直後に、その点に正確に塑性ヒンジが形成されるように数値積分点をシフトする手法である。通常の有限要素法に比べ格段に少ない要素数で高精度の解が得られ、また断面力を解放することで部材の破断も考慮可能³⁾であり、さらに従来の有限要素解析コードへのインプリメントが容易であるという大きな特長を持ち合わせている。また、ASI 法は微小変形・大変形、静的・動的、単調負荷・繰り返し負荷の如何に関わらず、骨組構造の有限要素解析において有効であることが立証されている。線形チモシェンコはり要素の場合は、図 1 に示すように数値積分点位置と塑性ヒンジ発生位置の関係は

$$s = -r \quad \text{または} \quad r = -s \quad (1)$$

と表現される¹⁾。

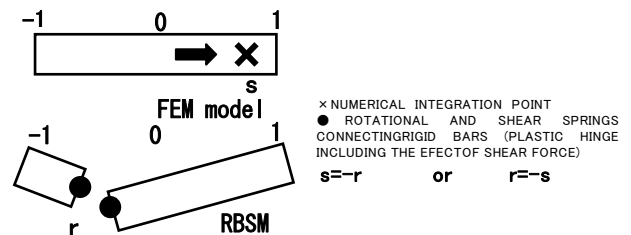
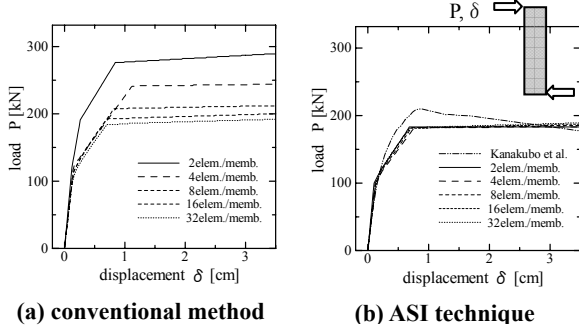


Fig.1 Linear Timoshenko beam element and its physical equivalent

3. RC 構造物の静的・準静的解析

静的・準静的解析における ASI 法の有効性と妥当性を検証した。部材の静的・準静的解析において、通常の有限要素法では収束解を得るのに多くの要素分割数を必要とするのに対し、ASI 法では 1 部材当たり 2 要素分割で収束解を得ることが可能であることが示された(図 2)。

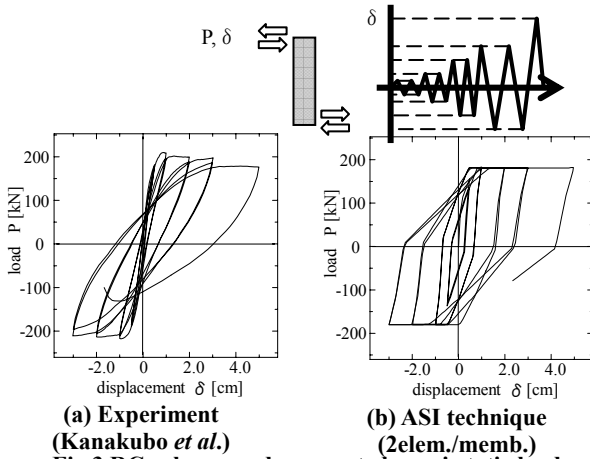


(a) conventional method

(b) ASI technique

Fig.2 Simply supported column subjected to shear force

また実験値⁴⁾との比較により、用いた Degrading tri-linear 型部材モデル⁵⁾は妥当であることが示された(図 3)。



(a) Experiment
(Kanakubo et al.)

(b) ASI technique
(2elem./memb.)

Fig.3 RC column under repeated quasi-static load

12 層 3 スパンの実構造物⁶⁾に関して ASI 法により 1 部材 2 要素分割で静的解析を実施した結果、塑性化状況(図 4)や変形分布(図 5)などの考察結果から、モデル化および ASI 法による解析は妥当であることが示された。要素数は 336、節点数は 304 であり、また計算機には SUN ultra 5 (CPU 270MHz, メモリ 128MB)を使用し、計算時間は約 10 分であった。

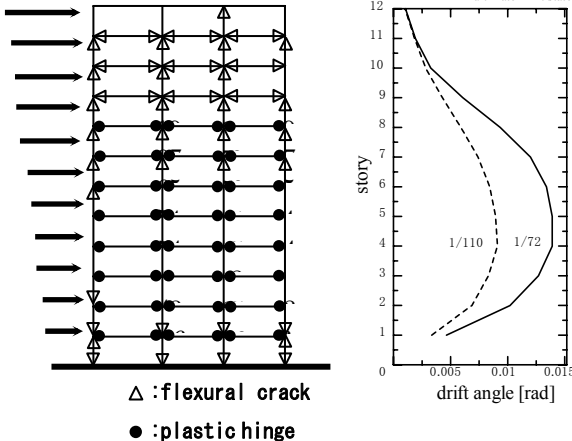


Fig.4 Plastic chart

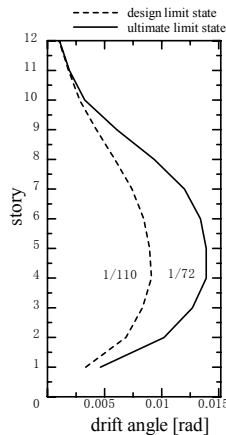


Fig.5 Drift angle distribution

4. RC 構造物の地震応答解析

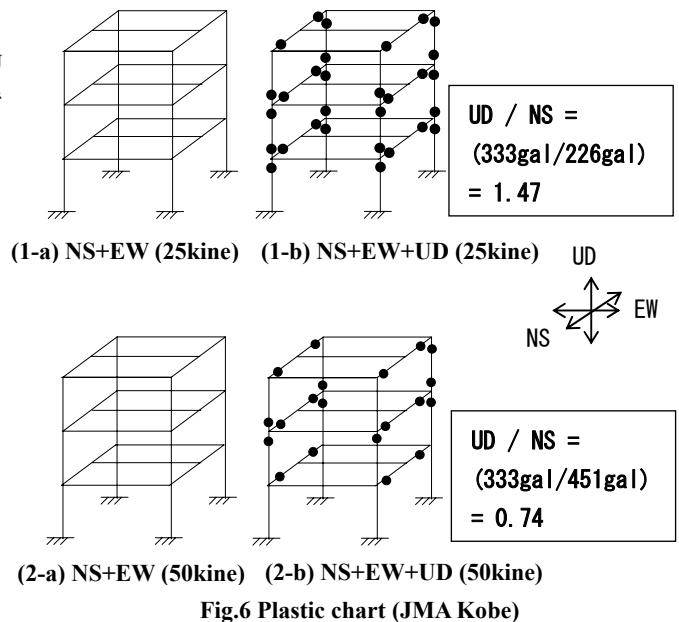
次に、ASI 法を用いた地震応答解析を実施し、解析手法の妥当性を検証した。仮想仕事の原理より、時刻 $t + \Delta t$ における運動方程式は、以下のように定式化される。

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \quad (2)$$

ASI 法を用いる場合には少ない要素数でモデル化を図るため、 $[M]$ には振動応答解の精度の良い分布質量マトリックスを使用する。減衰マトリックスには $[C] = \alpha[K]$ と定義する剛性比例型減衰マトリックスを使用し、 α は 5% と設定する。また解法には Newmark の β 法 ($\beta=1/4$)⁷⁾を用いて計算する。荷重の与え方は支持点加振⁸⁾とした。

実験結果⁹⁾との比較の結果、床の有無などで剛性、慣性質量および減衰の取り扱いに注意を要し、今後より詳細なモデル化の検討が必要であることが分かった。しかし、本節で用いた解析手法は定性的には実用上有用な知見を簡便に得られることが確認された。

また、神戸地震において被害が拡大した要因の一つに鉛直方向の地震動が大きかったことが挙げられている。そこで鉛直方向地震動も考慮した 3 軸加振の解析を実施した結果、部材の塑性化がさらに進行し、異なる崩壊形式が出現するなどの現象が確認された。さらに、水平方向振動に対する鉛直方向振動の比率が増加することでも変形、塑性ヒンジ数が増加する現象が確認された。よって、静的解析もしくは水平振動のみを作用させた動的解析で得られた結果でも、場合によっては安全側に評価している可能性が考えられるため、特に活断層が存在し直下型地震の発生が予想される地盤上に構造物を設計する場合には注意が必要であると考えられる。図 6 に 2 軸加振の場合と 3 軸加振の場合の塑性化状況を示す。



(1-a) NS+EW (25kine)

(1-b) NS+EW+UD (25kine)

(2-a) NS+EW (50kine)

(2-b) NS+EW+UD (50kine)

Fig.6 Plastic chart (JMA Kobe)

5. 地震波伝播位相差を考慮した地震応答解析

地震応答解析の応用として、地震波伝播位相差が構造物に与える影響を検証した。本研究では水平方向の地震波は基準点から平面的に一定速度で同心円状に広がっていくものと仮定した。まず地震波の速度を設定し、次にある基準点、つまり地震波が最初に到達する支持点を設定する。そして基準点から各支持点間の距離を求め、地震伝播速度 v_s で除した値 Δt_s を地震到達時間差として、入力する地震波に時間差を生じさせるものとする。地震波の減衰、地盤と構造物の相互作用などは考慮しない。図7に8層3スパン奥行2スパンの構造物に対し位相差を考慮しない場合、地震伝播速度が10 km/sの場合および5 km/sの場合の塑性化状況を示す。地震波はエルセントロ波 NS 成分と EW 成分を20秒間入力した。入力地震波の到達時間差が変化することではりの負担が増大し、塑性ヒンジの発生数が増加するなどの影響が確認された。また、地震波伝播速度によっても地震応答に違いが生じることが確認された。よって、位相差を考慮していない場合の解析で得られた結果では、場合によっては安全側に評価している可能性があるため、設計段階において注意が必要であると考えられる。

実際の構造物の場合では、各支持点に入力する地震波を正確に把握することは非常に困難ではあるものの、ASI法を用いた地震応答解析手法により多入力振動が構造物に与える影響の差異を簡便に確認することが可能であることが示された。

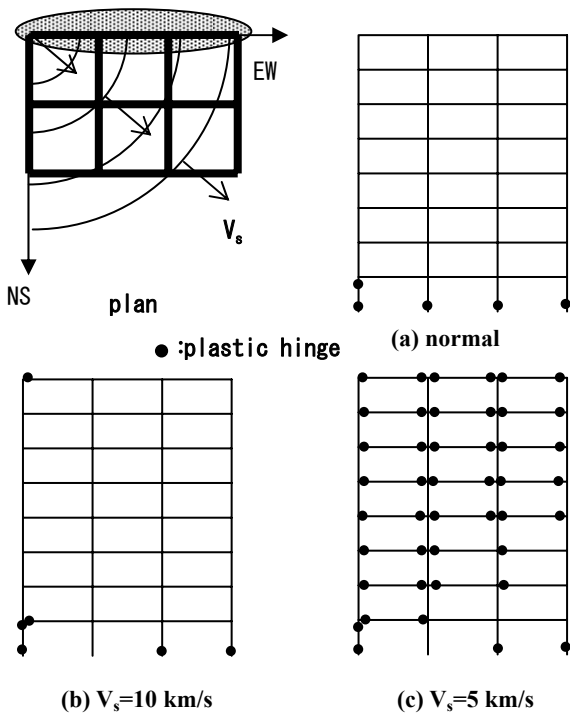


Fig.7 Plastic chart

6. 部材破断および接触を考慮した地震崩壊解析

従来の FEM の手法では困難であった強非線形性、不連続性を伴う現象は、ASI法を用いることによって容易に解析が可能となる³⁾¹²⁾。しかし一方で、部材破断を伴う解析を実施した場合、破断した部材が床をすり抜けていくなどの実際とは異なった挙動を示していた³⁾。実際には、神戸地震では構造物が中間層崩壊し、その上層階部分が上に重なるような現象が発生した¹⁰⁾。また、部材間接触を考慮した地震崩壊解析は個別要素法(DEM)¹¹⁾等に例があるが、崩壊前からの現象を連続的に解析することができる FEM では、その適用例は皆無である。そこで本節では、ASI法を用いて部材間接触を考慮した解析を実施し、中間層崩壊現象を再現することを目的とする。

まず破断に至る過程および破断の際のアルゴリズムについて説明する。部材の塑性率とせん断ひずみにより破断する要素を判定し、図8に示すように要素の数値積分点を式(1)に従ってシフトし、同時に断面力を解放することで部材の破断を表現する³⁾。

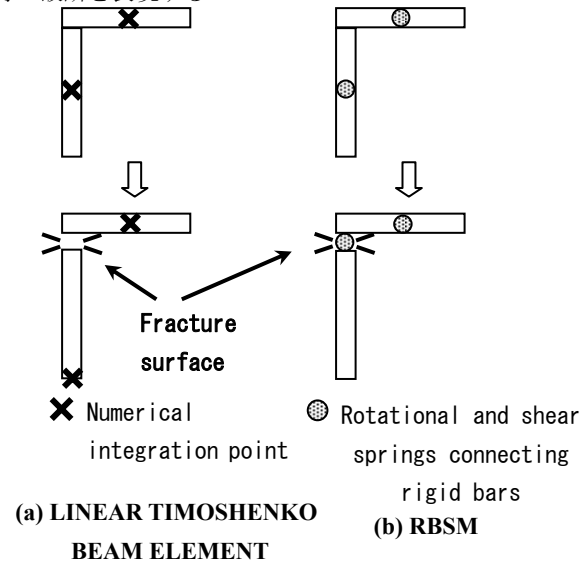


Fig.8 ASI technique dealing with member fracture

次に部材間接触アルゴリズム¹²⁾について説明する。破断した要素と他の要素との距離を計算し、破断要素および他の要素の計4つの節点が同一平面上に存在する条件、および各節点間距離により接触を判定する。次に、図9に示すように4つのギャップ要素により破断した要素を拘束することで接触を表現する。

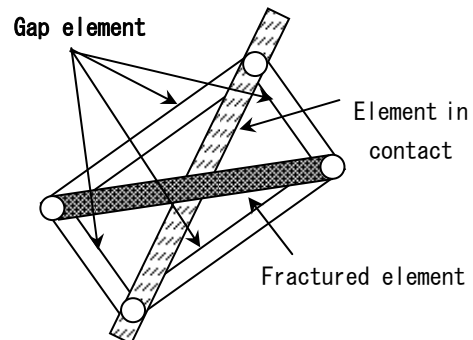


Fig.9 Binding condition of gap element

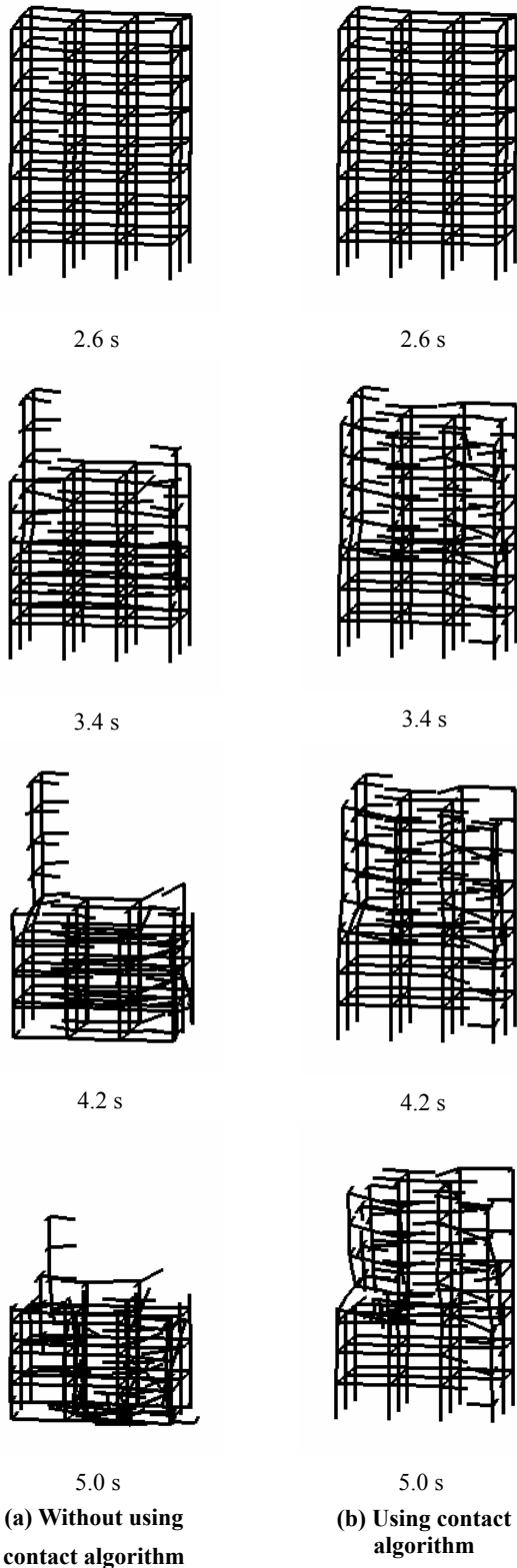


Fig.10 Seismic collapse analysis of RC building model

図 10 の(a)に破断のみを考慮した場合を、(b)に破断および接触を考慮した場合の崩壊挙動を示す。要素数は 464、節点数は 340 である。時間増分は 10ms とし、1000step の解析を実施した。また計算機には SUN ultra 5 (CPU 270MHz、メモリ 128MB)を使用し、計算時間は約 50 分であった。

ASI 法を用いることで、通常の有限要素法では解析困難であった部材破断を伴うような強非線形性および不連続性の高い崩壊解析が容易に実現可能であることが示された。さらに部材間接触を考慮することによって、神戸地震において特徴的な被害形態であった中間層崩壊現象を容易に再現可能であることが示された。

7. 結論

本手法は、RC 骨組構造物の地震崩壊挙動の解析を簡便に実施可能とし、設計および開発段階において非常に有用な知見を得ることを可能とする手法である。また、いくつかの数値例から、設計段階において鉛直方向地震動および地震波伝播位相差が構造物に与える影響を考慮することが必要であることが分かった。よって、これらの事項を考慮した実験および解析を今後も実施していくことが重要である。

参考文献

- (1) 都井 裕, 磯部 大吾郎:骨組構造の有限要素解析における順応型 Shifted Integration 法, 日本造船学会論文集, 第 171 号, (1992), 363-371
- (2) 都井 裕, 磯部 大吾郎:順応型 Shifted Integration 法による骨組構造の座屈崩壊挙動の有限要素解析, 日本造船学会論文集, 第 174 号, (1993), 469-477
- (3) 磯部 大吾郎, 都井 裕:順応型 Shifted Integration 法による脆性骨組構造体の動的崩壊挙動の有限要素解析, 日本造船学会論文集, 第 180 号, (1996), 471-478
- (4) 金久保 利之, 園部 泰寿:高強度人工計量骨材コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の耐震性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 441 号, (1992), 63-72
- (5) 梅村 魁:鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法:中層編, 技報堂出版, (1982)
- (6) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 日本建築学会, (1997)
- (7) 清水 信行:パソコンによる振動解析, 共立出版, (1989)
- (8) 河島 佑男:動的応答解析, 培風館, (1975)
- (9) 小駒 勲, 豊嶋 学, 林田 敏弘, 箕輪 親宏:実大 3 層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験(その 3. 実験結果), 日本建築学会学術講演会梗概集, (1995), 711-712
- (10) 日本建築学会:阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計, 丸善株式会社, (1998)
- (11) 伯野 元彦:破壊のシミュレーション:拡張個別要素法で破壊を追う, 森北出版, (1997)
- (12) 磯部 大吾郎, 森下 真臣:ASI 有限要素法による大規模宇宙骨組構造のデブリ衝突解析, 日本機械学会論文集, (A 編), 第 64 巻, 第 627 号, (1998), 2726-2733