

ASI 法による骨組構造体の衝撃破断挙動の有限要素解析

Finite Element Analysis of Impulsive Fracture Behavior
of Framed Structures by the ASI Technique

李 廷 権*・都 井 裕*

Jeoung Gwen LEE and Yutaka TOI

1. はじめに

骨組構造体の有限要素解析では一般に、せん断変形を考慮する場合には線形チモシェンコはり要素、せん断変形を無視する場合には Bernoulli-Euler の仮定に基づく 3 次はり要素が用いられる。都井はこれらの有限要素の数値積分点位置と剛体・ばねモデルの塑性ヒンジ発生点位置の関係を初めて見出し Adaptively Shifted Integration 法 (ASI 法と称する) と称する計算手法を開発した^{1)~3)}。この手法では、数値積分点位置を順応的にシフトすることにより、弾性変形時の高精度を保持しつつ、塑性ヒンジを正確な位置に発生させることができるので、少数要素のモデリングでも高精度の解が得られる利点がある。

また著者らは、骨組構造体の動的クラッシュ挙動の有限要素解析に ASI 法をより効果的に適用するためのモデル化および計算手順について検討を行い、最適なモデルとして線形チモシェンコはり要素および 3 次はり要素を組み合わせた LCL モデルを提案している⁴⁾。線形チモシェンコはり要素においては塑性ヒンジ位置における破断も容易に考慮される。本研究では、LCL モデルと ASI 法を用い、骨組構造体の動的クラッシュ挙動に対し破断を考慮した解析を試みる。

2. 衝撃破断解析モデル

Fig. 1 に示すように、骨組構造体の一部材は 3 要素分割され、中央部には Bernoulli-Euler の仮定に基づく 3 次はり要素 (以後、3 次要素と称する) を、両端部には線形チモシェンコはり要素 (以後、線形要素と称する) を配置する。このモデルを以後、LCL モデルと称する。

線形要素の長さは計算効率と計算精度を考慮して $\beta=0.3$ を選択した⁴⁾。両端部の線形要素においては、数値積分点

位置 (s_i) と塑性ヒンジ発生位置 (r_i) の関係として次式が成立する²⁾。

$$s_1 = -r_1 \text{ or } r_1 = -s_1 \dots\dots\dots (1)$$

この関係式に従って、全塑性断面発生の判定に基づき数値積分点を順応的にシフトすることにより、部材結合部や荷重作用点などのような局所的な塑性域を正確に考慮することが可能となる。全塑性断面が要素右端 ($r_1=1$) に生じた後の断面力増分ベクトル $\{d\sigma\}$ は次式のように表せる。

$$\{d\sigma(r_1)\} = [D_{ep}(r_1)]\{d\varepsilon(r_1)\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $[D_{ep}]$ は弾塑性変形の場合の断面力・一般化ひずみマトリックスである。

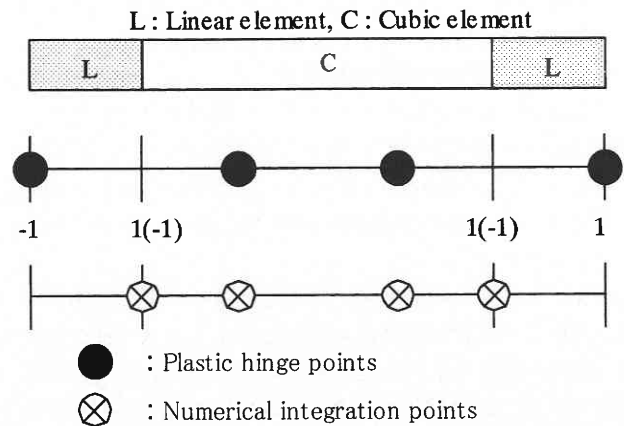


Fig. 1 LCL model and relation between locations of integration points and plastic hinges

*東京大学生産技術研究所 人間・社会大部門

研究速報

塑性状態での挙動は降伏関数 f を塑性ポテンシャルとし、塑性ひずみ増分 $\{d\varepsilon^p\}$ および相当塑性ひずみ増分 dp は次式のように与えられるものとする。

$$\{d\varepsilon^p\} = h df \left\{ \frac{\partial f}{\partial R} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

$$dp = \left\{ \frac{\partial f}{\partial R} \right\}^T [D_e] \{d\varepsilon\} / \left(H'/A + \left\{ \frac{\partial f}{\partial R} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial R} \right\} \right) \dots \dots (4)$$

さらに、次式のように相当塑性ひずみ p がある限界値に達した時に破断が発生すると仮定し、破断直後に (2) 式の $\{d\sigma\}$ の累積値である要素の断面力を開放する。

$$P \geq P_{cr} \dots \dots \dots (5)$$

一方、中央部の3次要素は必ずしも曲げモーメント支配で降伏せず、また弾塑性波の伝播に伴う複雑な負荷除荷履歴を受けるため、積分点のシフティングは計算精度を損なう場合もあるのでASI法を適用しない⁴⁾。また、破断も考慮しない。

以上のようなLCLモデルとASI法を用いた非線形有限要素解析の増分理論として、更新ラグランジュ流の弾塑性有限変形解析の定式化を行い、時間積分スキームとしては中心差分法を用いる。

3. 解析結果

要素の端に正確に塑性ヒンジあるいは破断を表現できるASI法と簡易化モデルとして提案されたLCLモデルを用い、回転はり⁵⁾、簡単な平面フレーム⁵⁾、電車の下部構造⁵⁾などの骨組構造体の衝撃破断挙動を解析した。

3.1 回転はり部材の衝撃破断解析

図2のように、左端をクランプ、右端に重りを付加した回転はりの中央部が支点到衝突し右半分が大きく曲がる。さらに (5) 式の破断点を超えると右半分は分離し、独立に運動する。部材の中央部が破断するので、二つのLCLモデルを用いる。

図3には破断後の変形図、図4には回転角度の時刻歴を示している。部材が塑性化することにより大きく曲がった後、除荷が起こる前に分離され、破断後の回転角度は増え続けていることが確認できる。図5には分離後の右側3次要素内部の断面力を示しており、要素内部に残っている断面力が開放されることにより短周期で振動していることが

わかる。

3.2 門型フレームの衝撃破断解析

門型フレームの上段部に一様分布初期速度を与えた場合、上段部材の中央点が大きく曲がることにより、衝突エネルギーが吸収される。図6は、過大な衝突エネルギーにより両側の支持部材が塑性変形後に破断分離し、上段部材が独立に運動する様子を示している。変形図は左半分に対応する。図7には、中央点変位の時刻歴を示している。衝撃負荷後急激に塑性変形が進み、0.1msec付近で破断が起こり、その後、各部材は除荷を起こし完全に分離された独立部材として運動している。

3.3 三角形フレームの衝撃破断解析

三角形フレームの一点に集中衝撃荷重を与えた場合には、ほとんどの変形が荷重点に集中し塑性ヒンジが生じる。破断後は、図8に示したように、右部材の下段部はそのまま倒壊するが上段部は左部材の弾性復元力ですらに振動している。図9は、破断点上段部における変位の時刻歴を示している。破断が生じた結果、部材は分離され、荷重方向にさらに変形した後、上段部の荷重点での変形は反対方向

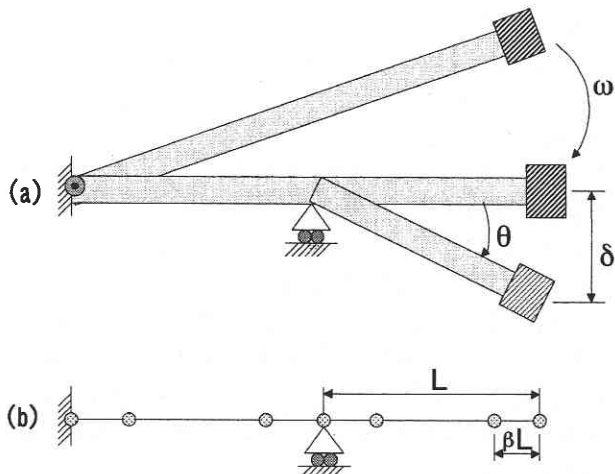


Fig. 2 Physical model and finite element model of a rotating beam

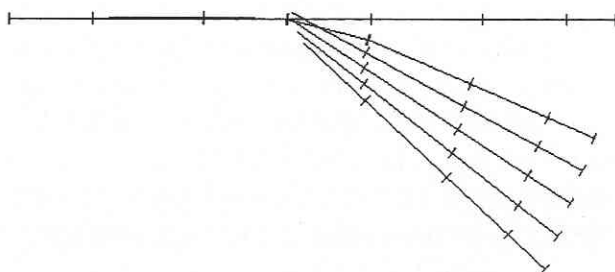


Fig. 3 Fracture process of a rotating beam

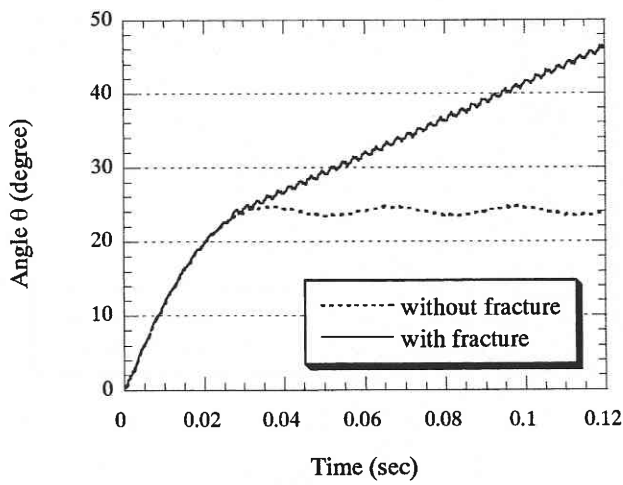


Fig. 4 Time history of angle of a rotating beam at the middle point

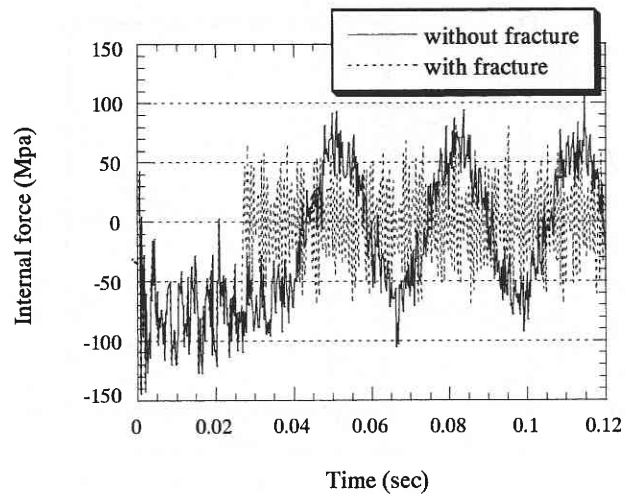


Fig. 5 Time history of internal force of a rotating beam at the right cubic element

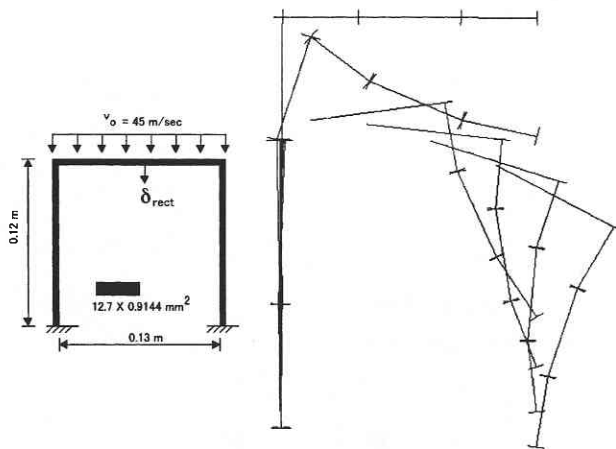


Fig. 6 Deformation and fracture process of a rectangular frame

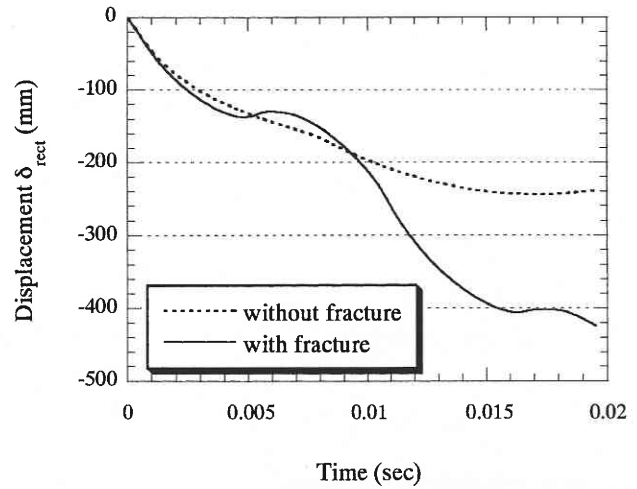


Fig. 7 Time history of deflection of a rectangular frame

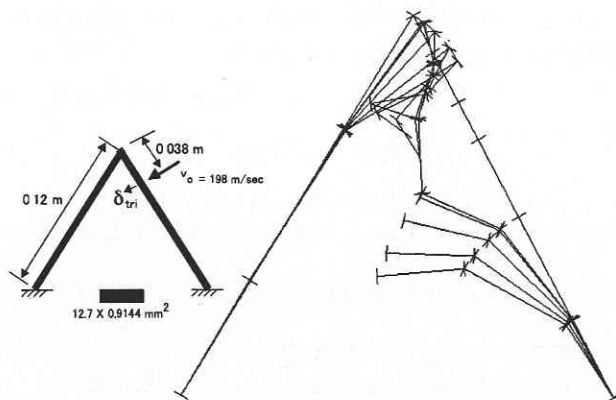


Fig. 8 Deformation and fracture process of a triangular frame

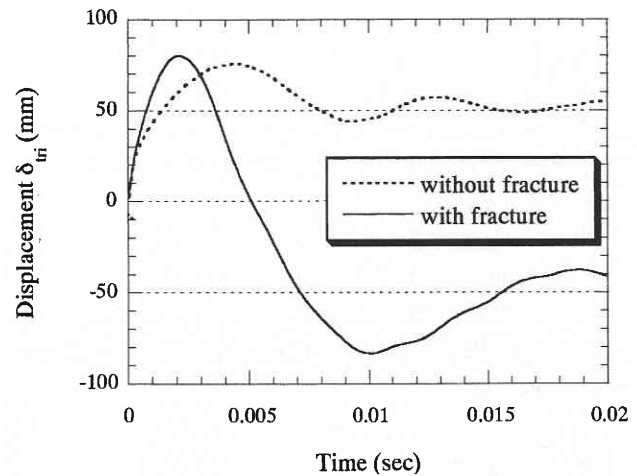


Fig. 9 Time history of deflection of a triangular frame

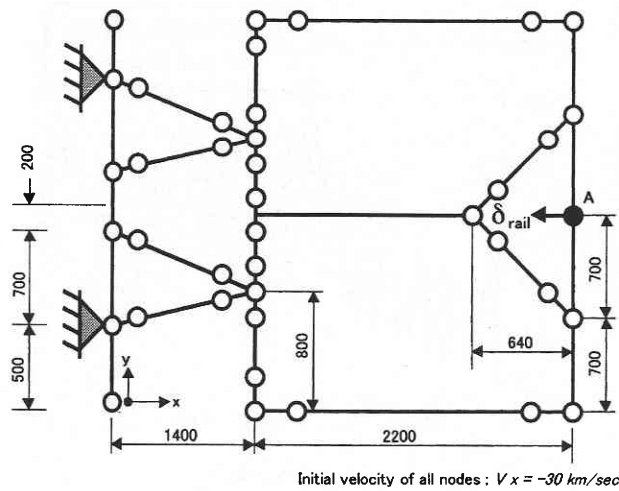


Fig. 10 Finite element model of railway end under-frame

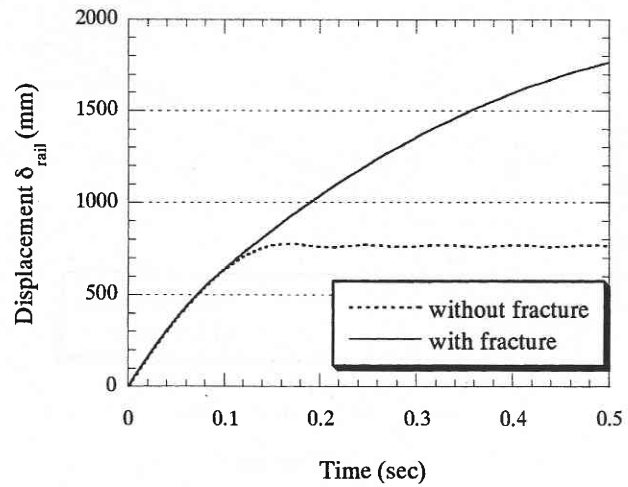


Fig. 11 Time history of deflection of railway end under frame

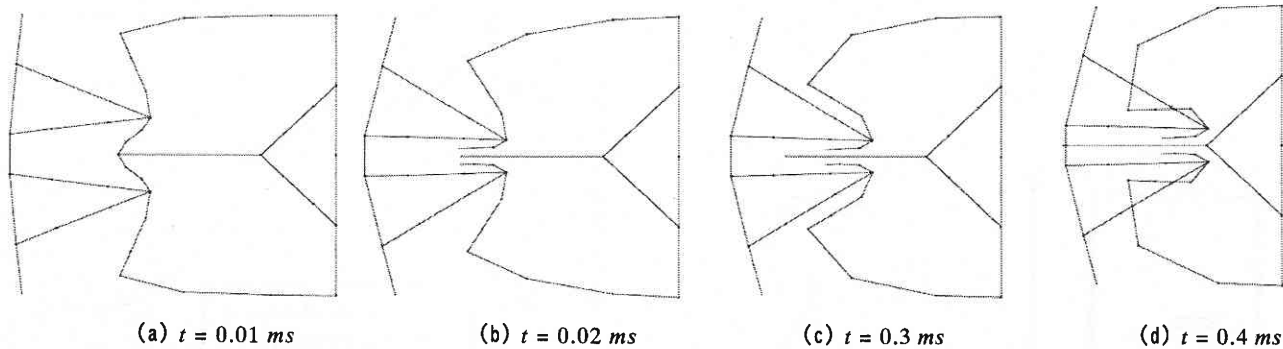


Fig. 12 Deformation and fracture process of railway end under-frame

に戻る。

3.4 電車下部構造の衝撃破断解析

電車車両の強度設計には 30 km/s の速度で衝突した場合、乗客室の永久変形が生じないことが要求される。したがって、図 10 に示すような衝撃エネルギーを吸収するための崩壊メカニズムが設けられる。本節では、電車下部構造を構成する各部材が過大なエネルギーを受けることを想定し、破断後の挙動を解析した。衝突直後は、前部（図の左側）の部材が大きく変形することによりエネルギーが吸収されるが、破断後はほとんどのエネルギーは吸収されず、破断部材の運動エネルギーに変換されるため、着目点（図中の A 点）の変位は増大を続ける。図 11 には A 点の衝突方向変位の時刻歴を示す。図 12 は、各時間ステップにおける変形図である。

4. 結 論

本研究では、骨組構造体の衝撃破断問題において、ASI 法および LCL モデルを用いることにより、塑性変形から部材破断後の解析に至るまで効率的・合理的な計算が可能であることを示した。今後、破断に至るまでの損傷発展の過程を含めた解析に拡張する予定である。

(2000 年 6 月 9 日受理)

文 献

- 1) Toi Y., *Int. J. Num. Methods Eng.*, 31 (1991), 1537-1552.
- 2) Toi Y. and Isobe, D., *Int. J. Num. Methods Eng.*, 36 (1993), 2323-2339.
- 3) Toi Y. and Isobe D., *Computers and Structures*, 58 (1996), 947-955.
- 4) 都井・李, 機論, 65-637, A (1999), 1-8.
- 5) Pereira, M.S., *Int. J. Num. Methods Eng.*, 40 (1997), 655-687.