I-83　ボトル状薄肉容器の落下衝撃解析

(株) 三菱総合研究所　応用システム部 構造システム室
会員 清水 史也, 斉藤 寛, 渡辺 正明, 矢部 泰博
(財) 電力中央研究所　土木技術研究所
会員 満木 泰郎,　五味 義雄

1. 緒言

本報告は、軸対称のボトル状薄肉容器が動的荷重をうけ、大変形を生じる場合についての簡易解析法を検討したものである。

衝突のような衝撃荷重をうける構造物の解析には、最近では衝撃解析汎用コードPISCESなどが使用され、ひずみ分布はもとより弾性波の伝播等についても詳細に解析できるようになってきた。　一方、衝撃荷重が作用する場合でもその衝突速度が弾性波速度(鋼: 5km/s)に比べてかなり小さい場合には、非線形構造解析汎用コードMARCによる弾塑性大変形解析によっても、変形挙動やひずみ分布は対象を上述の軸対称のボトル状薄肉容器に限定すると評価できる場合がある。　しかし、これらのコードを用いた計算はいずれも多大の時間を要し、パラメータ・サーベイなどを行なうには必ずしも合理的とは言えない。　このため、適用範囲は限定されるが、簡易解析法の検討を行った。

最近の有限要素法での新しい要素の開発をみると従来の高次の要素に代わり、より低次な要素を使っても精度が劣らないばかりか、かえって向上するというような報告が多くみられる。　軸対称シェル要素に関しては Hughes[1] の要素がよく知られている。　川井、都井[2] も極限解析の立場から同様な要素を開発しており、ヒンジ発生点を要素の中心に置いたとき Hughes の要素に一致することが確認されている。[3]

簡易解析法は、Hughes の要素を用い、ヒンジの代わりに、板厚方向に積分点を数点設ける方法を用いて大変形弾塑性解析を行うもので、板厚方向に積分点を考えたとしても、要素方向には一点で済むため、定式化の簡単さも相俟って計算時間が非常に短縮される。　ボトル状の薄肉容器についてこの簡易解析法を適用した結果を MARC や PISCES の結果と比較すると、十分な精度で計算ができる見通しが得られた。

2. 定式化

図1に、新しい軸対称シェル要素を示す。　非線形問題では増分理論を用いるが、歪み増分は、

$$\Delta \varepsilon_s = \Delta \varepsilon_{s\ell} + \Delta \varepsilon_{sn} + z \Delta K_s \quad \text{(子午線方向)}$$

$$\Delta \varepsilon_\theta = \Delta \varepsilon_{\theta \ell} + z \Delta K_\theta$$

と分解できる。　ここで、各項は節点変位を用いて、それぞれ

$$\Delta \varepsilon_{s\ell} = \frac{\Delta u_2 - \Delta u_1}{\ell} + \frac{1}{\ell}(\ell_1 \theta_1 \Delta\theta_1 + \ell_2 \theta_2 \Delta\theta_2)$$

$$\Delta \varepsilon_{sn} = \frac{1}{2\ell}(\ell_1 \Delta\theta_1^2 + \ell_2 \Delta\theta_2^2)$$

$$\Delta K_s = -\frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\ell}$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta\ell} = \frac{1}{2r_2}\left\{(\Delta w_1 + \ell_1 \Delta\theta_1 + \Delta w_2 - \ell_2 \Delta\theta_2)\cos\phi + (\Delta u_1 + \Delta u_2)\sin\phi\right\}$$

$$\Delta K_\theta = -\frac{\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2}{2r_2}\sin\phi$$

と書ける。　基礎となる変分原理は、

$$\int(\Delta\sigma_s \delta\Delta\varepsilon_{s\ell} + z\Delta\sigma_s \delta\Delta K_s + \Delta\sigma_\theta \delta\Delta\varepsilon_{\theta\ell} + z\Delta\sigma_\theta \delta\Delta K_\theta + \Delta\tau\delta\Delta\gamma)ds + \int\sigma_s \delta\Delta\varepsilon_{sn} ds$$
$$= \int\Delta\bar{F}_i \delta u_i ds - \int\left\{(\sigma_s \delta\Delta\varepsilon_{s\ell} + \sigma_s \cdot z\,\delta\Delta K_s + \sigma_\theta \delta\Delta\varepsilon_{\theta\ell} + \sigma_\theta \delta\Delta K_\theta + \tau\delta\Delta\gamma) - \bar{F}_i \delta\Delta u_i\right\} ds$$

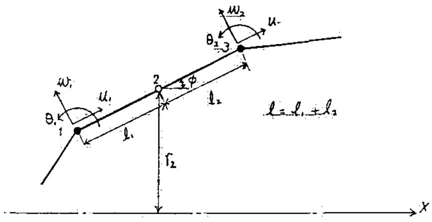

Fig.1　Simplified new axisymmetric shell element

である。

弾塑性解析は、板厚方向に積分点を設け、山田の方法[4]を使った。

3. 解析結果

解析は、容器上部を28要素でモデル化し、下端部は完全固定とした。増分計算は、蓋部分に軸方向強制変位を与えて行なった。

図2に、解析により求めた荷重ー変位曲線を示す。増分の初期の段階では、変形挙動は両解析ともよく一致している。また、MARCの静解析では現われなかったsnap throughが、見られ、これは実験とよく対応している。

次に、変形の進行と共にヒンジが形成されたような挙動を示す部分につき、塑性仕事の蓄積の様子を、図3(PISCES 衝撃解析)、図4(簡易解析法)に示す。これらから両者はかなりよく一致していることがわかる。表面歪については、MARCの結果とは定量的にも一致し、蓄積された歪エネルギーが、同レベルとなる時点での衝撃解析との対応も良かった。

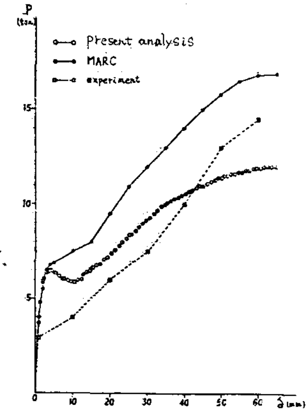

Fig.2 Load-deflection curves

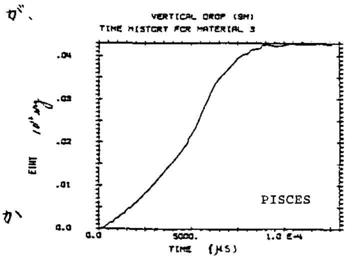

Fig.3 History of dissipated energy at A in Fig.4

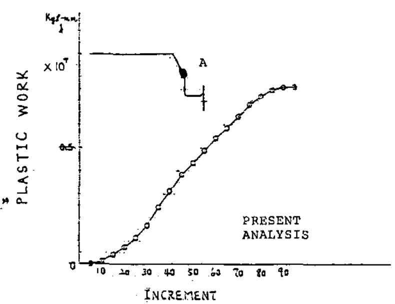

Fig.4 Plastic work at A

4. 結言

ボトル状薄肉容器の落下衝撃に関しては、歪の時刻歴などの詳細な情報が必要な場合は、衝撃解析の必要がある。しかし、例えば、設計段階で大まかな挙動を知るためパラメータ・サーベイを実施する場合には、今回の簡易解析法で十分であると言える。

今後の課題として、接触および剥離を考慮した解析法に拡張し、実験とのより詳細な検討を予定している。

(参考文献)

1) Hughes, J. T. R. etal, "A simple and efficient finite element for plate bending", Int. J of Num. Meth. in Engng., 11 (1977)

2) 都井、石鍋、川井、"回転対称シェルの弾塑性飛移り挙動の一離散化解析", 33巻4号 (1981). 14

3) 渡辺, "変分差分法によるせん断変形を含んだRBSM梁要素の導出" (川井研究室発表資料) 1980

4) Y. Yamada, etal, "Plastic Stress-Strain Matrix and Its Application for the solution of Elastic-Plastic Problems by the Finite Element Method", Int. J. Mechanical Sciences, Vol. 10, 343 (1968)

表1. 各解析の機能の比較

機能 / 解析	弾性波伝播	弾塑性	大変形	接触	CPU time (IBM3081換算)
PISCES	○	○	○	○	1200 sec
MARC	×	○	○	○	850 sec
present analysis	×	○	○	×	90 sec

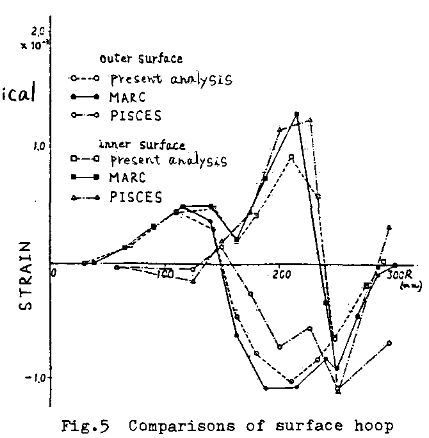

Fig.5 Comparisons of surface hoop strain distributions