217 個別要素法による応力波伝播シミュレーションを用いたスポール破壊応力評価

Evaluation of Spall Fracture Stress by Wave Propagation Simulation using Distinct Element Method

○ 山川敏広 (名工大) 正 川嶋紘一郎 (名工大) 正 西村尚哉 (名工大)

Toshihiro YAMAKAWA, Koichiro KAWASHIMA and Naoya NISHIMURA
: Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cyo, Syouwa-ku, Nagoya

Key words : Stress wave, Distinct element method, Spall damage, Plate impact test, Lumped mass model

1. 緒言

航空、宇宙分野では高速衝撃により材料内部に発生するスポール損傷が構造の機能及び安全性上の重要な問題の一つである。スポール損傷発生機構を解明するためには応力波の伝播過程を把握することが必須であり、応力波を測定することでスポール限界応力等の動的材料特性を得ることができる。動的材料特性計測方法として異種材料境界での反射を利用して応力波を測定するインピーダンスマッチング法がある。この場合得られた応力履歴の説明をするために、試験片全域の応力波伝播状態を把握する必要がある。

スポール損傷の数値解析は多数報告されているが⁽¹⁾、損傷発生やスポール限界応力に関する報告が多く、平板衝撃試験における試験片全体の応力波伝播過程を扱った報告は少ない⁽²⁾。著者らは平板衝撃試験におけるスポール損傷発生機構を明らかにするために、境界面での応力波の反射・透過、材料内部のスポール損傷による自由境界形成の扱いが簡単である、ばね-集中質量系モデルで速度体を表現し、その運動方程式を数値計算する方法^(3,4)（軸対称個別要素法）を用い、スポール損傷の初期発生位置、成長について実験結果と比較し、このシミュレーションの有効性を示した⁽⁵⁾。

本報告では、軸対称個別要素法により平板衝撃試験の試験片全域の応力波伝播シミュレーションを行い、インピーダンスマッチング法で得られる応力履歴の説明を試みた。

2. スポール損傷

2.1 発生機構

高速飛翔体が物体に衝突すると衝撃力は物体内を圧縮応力波となって伝播する。その後自由表面で反射後希薄波となり、これと衝撃面側からの希薄波が重畳し引張応力が形成され、それが限界値を越えるとスポール損傷が発生する。

2.2 平板衝撃試験

スポール損傷発生は、飛翔板と標的板の厚さの比を変えた Fig.1 の平板衝撃試験で行う。また、スポール強度測定は、圧力ゲージを標的板と背面板で挟み込み背面板に透過する応力波を測定するインピーダンスマッチング法を用い測定する。

3. 個別要素法による計算法

3.1 ばね-集中質量系による近似解法

標的板・飛翔板・背面板を軸対称弾性体と仮定し、Fig.2 のように離散化し集中質量間を弾性ばねで連結した系を用いて運動方程式を構成した。主応力が引張限度を超えた時にばねを切断し自由境界を作り、破壊を表現した。

3.2 近似運動方程式

軸対称性を考慮し、Fig.2 のように飛翔板・標的板・背面板を半径方向は全て n 個、軸方向は $m1 \cdot 2m1 \cdot m1$ 個に分割した。各節に質量を集中させ、各質量 $M(i,j)$ の間を弾性ばねで連結した集中質量系を考える。Fig.3 に示すように集中質量 $M(i,j)$ には垂直力 $T_z(i,j)$ 、 $T_\theta(i,j)$ 、 $T_r(i,j)$ 及びせん断力 $T_{rz}(i,j)$ 、 $T_{zr}(i,j)$ が働き、近似運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} M(i,j)v_{zt}(i,j) &= T_z(i,j) - T_z(i,j-1) + T_{rz}(i,j) - T_{rz}(i-1,j) \\ M(i,j)u_{zt}(i,j) &= T_r(i,j) - T_r(i-1,j) + T_{zr}(i,j) - T_{zr}(i,j-1) \\ &\quad - 2T_\theta(i,j)\sin(\theta_0/2) \end{aligned}$$

ここで、 $u_{zt}(i,j)$ 、 $v_{zt}(i,j)$ は集中質量 $M(i,j)$ の半径、軸方向加速度を表す。周囲の集中質量の変位の差分式から垂直及びせん断ひずみ、ひずみから応力、応力から力を求めた。

Fig.1 Plate impact test.

Fig.2 Computational model.

Fig.3 Internal forces on lumped mass.

4. 解析

4.1 計算条件

静止している標的板(炭素鋼 S45C)-背面板(アクリル樹脂 PMMA)に対し、飛翔板(炭素鋼 S45C)が速度 V で高速衝突する場合を解析した。ここで、飛翔板及び背面板の厚さは 4mm、標的板の厚さは 8mm、半径は全て 30mm とした。無次元時間 τ は、衝突の瞬間を 0、弾性縦波が標的板の半径を伝播する時間を 1 とした。圧縮応力波が標的板-背面板の境界に到達する時刻は 0.27、引張応力の発生時刻は 0.41 となる。初期条件は、飛翔板の軸方向速度を衝突速度 V とし、加速度、速度、変位は 0 とした。Table 1 に計算に用いた S45C

及び PMMA の材料定数を示す。計算では、半径は全て 135 分割、標的板・飛翔板・背面板の厚さをそれぞれ 120・60・60 分割、一要素の円周角 θ_0 を 0.0074rad、時間刻みを単位無次元時間の 1/1000 とした。近似運動方程式の時間積分として、Runge-Kutta-Gill 法を用いた。

Table 1 Material parameters

Material	Young's modulus E[GPa]	Poisson's ratio ν	Density ρ [kg/m ³]	Longitudinal Wave velocity c [m/s]	Acoustic Impedance ρc [kg/(m ² ·s)]
S45C	209	0.29	7790	5909	$Z_1=4.6 \times 10^7$
PMMA	6	0.32	1181	2696	$Z_2=3.2 \times 10^6$

炭素鋼(S45C)のスポール限界応力は平板衝撃試験により得られた $\sigma_{\text{threshold}}=2.6\text{GPa}$ とした。飛翔板には、スポール限界応力を超える 2 種類の衝突速度 $V=130\text{m/s}$ (衝撃応力約 3.0GPa), $V=150\text{m/s}$ (衝撃応力約 3.5GPa) を与えた。

4.2 軸垂直応力分布

Fig.4 と 5 に飛翔板に衝突速度 $V=130\text{m/s}$ を与えた時の中心から 4mm の位置の軸垂直応力分布を示す。Fig.4 と 5 の縦軸は軸応力 σ_z を限界応力 $\sigma_{\text{threshold}}$ で正規化した無次元軸垂直応力であり、正側が引張応力、負側が圧縮応力であり、横軸は飛翔板の厚さ 4mm を 1 とした時の板厚方向の位置を示す。横軸座標 0 の位置が飛翔板自由表面、1 が衝突面、3 が飛翔板-背面板境界、4 が背面板自由表面である。

応力波は異種材料境界面で反射・透過する。この時反射率 R は、入射側と反射側の音響インピーダンス Z_1, Z_2 を用いて次式で表される。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

入射側が S45C、透過側が PMMA であるので式(1)より $R=0.87$ となる。Fig.4 では無次元衝撃圧縮応力 1.14 の時の標的板-背面板境界面での反射と透過の割合を示している。この図から背面板側へ透過する圧縮応力波は 0.146、標的板側へ反射する引張応力波は 0.994 となり反射及び透過は確実に表現されている。

Fig.5 では $\tau=0.43$ では標的板板厚方向中央部で限界応力を超える引張応力が発生しその位置のばねを切断、自由境界を形成し無次元軸垂直応力が 0 となっている。 $\tau=0.51$ は損傷発生後、引張応力が標的板-背面板の接着面に到達する直前である。 $\tau=0.60$ はその引張応力が標的板-背面板の境界で反射及び透過後の状態を表す。

4.3 軸垂直応力履歴

Fig.6 に衝突速度 130 と 150m/s で解析した時の背面板の中心から 4mm の位置の応力履歴を示す。縦軸は無次元軸垂直応力、横軸は無次元時間である。 $\tau=0.25$ で圧縮応力波が背面板側に到達し圧縮状態となる。飛翔板の速度変化による応力変化及び境界での透過割合変化は表現されている。 $\tau=0.50$ で引張応力波が到達し除荷され、 $\tau=0.55$ で損傷からの引張応力波が到達し再び圧縮される。Fig.6 より再圧縮の値を換算すると衝突速度 130 と 150m/s でそれぞれ約 2.2 と 1.6GPa となった。限界応力は 2.6GPa と設定したのでそれ以下の応力しか背面板に透過していないことになる。これは、Fig.5 において時間の経過と共に引張応力波の振幅が低下することが原因である。Fig.5 のばね切断直後 $\tau=0.43$ で無次元軸垂直応力 1 の値の前後は急勾配で減少する。解析では集中質量前後の応力の釣合いから変位を求めたので、1 の値は前後で応力の釣合いを保とうとするために徐々に減少する。今後、損傷発生条件の改善を行う必要がある。

5. 結言

平板衝撃試験で測定される応力履歴やスポール限界応力を損傷発生を伴う応力波伝播シミュレーションで説明することができた。

6. 参考文献

- (1) 煤田, 村上, 伊東, “スポール破壊の損傷力学的解析におけるポイド発達定式化”, 材料, Vol.47, No.3, (1998), 233-239.
- (2) Wang, Z.P. et al., “Description of two-dimensional spallation in pure copper”, Int.J.Frac., 60, (1993), 195-208.
- (3) J.P. Wolf, K.M. Bucher, P.E. Skrikerud, “Response of equipment to aircraft impact”, Nuclear Engineering and Design, Vol.47, (1978), 169-193.
- (4) 深津, 梶田, “太い弾性円柱の衝突と反発の集中質量系による解析”, 日本機械学会論文集 A 編 64 巻 621 号, (1998-5), 172-177.
- (5) 山川, 川嶋, 西村, “個別要素法を用いた応力伝播シミュレーション”, 平成 12 年度材料力学部門講演会講演論文集, (2000-10), 199-200.

Fig.4 Reflection and Transmission of the stress wave.

Fig.5 Axial stress distribution.

Fig.6 Stress history at backing plate.