129 DEMによるぜい性材料板の衝撃貫通破壊現象の解析と評価

On Impact Penetration Analysis and Evaluation of Brittle Material Plate using DEM

正 尾田 十八 (金沢大学)

学 坂野 憲一 (金沢大院)

○ 学 安田 浩人 (金沢大学)

Juhachi ODA, Kanazawa University, 2-4-20, Kodatsuno, Kanazawa

Kenichi SAKANO, Kanazawa University, Graduate School of Natural Science and Technology

Hiroto YASUDA, Kanazawa University, Graduate School of Natural Science and Technology

Key Words: Impact Strength, Penetration, Brittle Material, Plate, DEM

1. 緒言

ぜい性材料板の安全設計を行う上で、その破壊挙動や原因を知ることは重要な意味を持つが、これまで十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、連続体から離散体までの破壊挙動の解明に有効である個別要素法（以下 DEM とする）を用いてぜい性材料板の衝撃貫通破壊現象の解析を行い、実験と比較・検討し、衝突速度と貫通速度・貫通エネルギーの関係を考察する。

2. ガラスの衝撃貫通破壊実験

ぜい性材料板としてガラス板を用い、図1に示すようなエアガン型実験装置で衝突貫通実験を行った。重量 1.3kg の鋼製衝撃子をガラス板に衝突させ、衝撃子の衝突前後の速度を計測した。衝撃子の発射速度は 13.2, 18.2, 22.0m/s に変化させた。固定部を除いたガラスの寸法は 440×440×8mm で、その特性を表1に示す。

衝撃子の衝突速度と貫通後の速度の関係を図2に示す。これより、衝突速度の増加に伴い貫通後の速度がほぼ線形に増加することがわかる。また、衝突速度が高くなると、衝突時に衝撃子がガラスを打ち抜く領域が広がり、低いと打ち抜く領域は狭くなる。しかし、衝突速度が低い場合では亀裂が広範囲に生じるために欠落する破片は大きくなる。

Fig.1 Experimental systems

Fig.2 Relationship between collision speed and penetration speed

Table.1 - Material properties of glass

Density ρ (kg/m ³)	2.50×10^3
Young's modulus E (GPa)	74.1
Poisson's ratio ν	0.225
Tensile strength σ_t (MPa)	34.6
Compressive strength σ_c (MPa)	350

3. DEMによる破壊挙動解析

3.1 DEMについて

DEM は解析対象物を離散的な剛体要素の集合体として表現し、それら個々の要素ごとに独立した2階常微分方程式をたて、これを差分近似し、時間領域で前進的に解くことによって解析対象物の動的挙動を求める方法である。ある要素とそれに接触している要素との間に法線方向および接線方向にバネ（弾性係数 K_n, K_s ）とダッシュポット（粘性係数 η_n, η_s ）を配置し、引張・圧縮力を伝達させることによって、材料の持つ弾性的および非弾性的性質を表現している。ここではその理論の詳細は省略する。

3.2 解析モデルおよび条件

解析モデルでは、長さ 802mm、奥行き 6mm の両端固定ガラス板の上方から中央に直径 10mm、質量 4.05g の鉄球をモデル化した要素を衝突させる。ガラス板は要素半径 1.0mm、六角形要素配置の様な円柱要素から構成され、厚さの異なる3種類を用意した（図3参照）。解析用諸定数は表1と同様なものとする。解析は以下に示す3種類の条件で解析を行った。

①3種類の解析モデルについて衝撃子衝突速度 V_{start} を 10m/s～80m/s の領域で 10m/s ずつ変化させる。

②3層モデル（厚さ 5.77mm）について V_{start} を 30m/s に固定し、材料特性のうち、ヤング率 E のみを 2GPa～500GPa まで変化させる。

③3層モデルについて V_{start} を 30m/s に固定し、強度（引張強さ σ_t 、圧縮強さ σ_c ）のみを 0.0001 倍～10 倍と変化させる。

3.3 貫通および貫通エネルギーの定義

衝突開始時点から 1ms が経過した時点で衝撃子が初速度と逆向きの速度を持っていないことと同時に、破壊挙動から、明らかな貫通破壊が確認された場合に貫通が成立しているとみなした。貫通した場合、衝突開始時点と衝突開始から 1ms が経過した時点における衝撃子の運動エネルギーの差を貫通エネルギーとする。

Fig.3 Analytical models

3. 4 解析結果と考察

①の解析から、図4-(a)に衝撃子の衝突速度と貫通後の速度(1ms 時の衝撃子速度)の関係を、図4-(b)に衝撃子の衝突速度と貫通エネルギーの関係を示す。また図5-(a), (b)には、3層モデルについて、衝突速度が10m/s と70m/s の場合における破壊状態(解析開始から1ms 経過時のもの)をそれぞれ示した。図4-(a)より、衝撃子の衝突速度の増加に伴い貫通後の衝撃子の速度は線形に増加することがわかる。これは図2の実験結果とほぼ類似しており、解析結果の正当性が確認できる。図4-(b)より、貫通エネルギーは衝撃子の衝突速度の増加に伴い非線形に増加することがわかる。また、厚さが増すほど貫通前後の速度差が大きくなることが確認できる。一般にひずみ速度が大きくなるほど、材料の強度は増加するので、衝撃子はその速度が大きいくほど、より多くのエネルギーを貫通に消費することが考えられる。図5-(a), (b)より、貫通時に衝撃子がガラス板を打ち抜く領域は、衝撃子の貫通速度が高いほど大きくなることがわかり、先の実験結果と対応していると言える。

②の解析から、図6にヤング率と貫通エネルギーの関係を示す。貫通エネルギーはヤング率の変化に関わらず、ほぼ一定の値をとることがわかる。この理由として、ヤング率を変化させることによってDEMにおける以下の定数が変化する。

$$K_n = EA/2r \quad (1)$$

$$K_s = K_n/2(1+\nu) \quad (2)$$

A : 円柱要素に対応する接触面積, r : 要素半径

ν : ポアソン比

また、破壊判定における以下の式が変化する。

$$[D_{ij}]_t \leq -\sigma_t/E \quad (3)$$

$$[D_{ij}]_t \leq \sigma_c/E \quad (4)$$

$[D_{ij}]_t$: 要素 i, j 間の相対変位

σ_t : 引張強さ, σ_c : 圧縮強さ

式(1), (2)より、ヤング率が大きくなるほど K_n , K_s が増加し、材料が剛くなる。また、式(3), (4)より、ヤング率が大きくなるほど、要素間のバネは破壊しやすくなる。これらのことから、ヤング率を変化させても貫通エネルギーが大きく変化しないと考えられる。

③の解析から、図7にガラスの強度を変化させた倍率 β ($=\sigma_t'/\sigma_t$ or σ_c'/σ_c) と解析開始から1ms 秒後の衝撃子のエネルギー損失との関係を示す。これより、強度の変化に対し貫通エネルギーが段階的な変化を示すことがわかる。強度を増加させていくと5倍付近の強度まではほぼ一定の貫通エネルギーを示し、その後若干上昇した後、6倍以上の強度では貫通しなかった。ガラスの貫通破壊では、貫通が起こる範囲の強度ではどの強度においても貫通エネルギーはほぼ一定の値を示し、ある強度を境に貫通が起こらなくなることが考えられる。

4. 結言

実験とDEM解析の結果より、ぜい性材料板の衝撃貫通破壊現象について以下の結論を得た。

- (1) 衝突による衝撃力の増加に伴い貫通速度が線形に増加し、貫通エネルギーは非線形に増加する。
- (2) 貫通エネルギーはヤング率、強度をそれぞれ単体で変化させてもほぼ一定の値をとる。
- (3) 衝撃子の衝突速度が高いほど、貫通時に打ち抜かれる領域は大きくなる。

参考文献

- (1) 伯野元彦, 破壊のシミュレーション, 森北出版株式会社, 1997, 10-55.
- (2) 尾田十八・鈴木健文・坂野憲一, 機講論, No.027-1(2001), 269-270.

Fig.4 Relationship with collision speed

Fig.5 Destructive behavior (Three layers model)

Fig.6 Relationship between Young's modulus and penetration energy

Fig.7 Relationship between β and energy loss for 1ms