

個別要素法による衝撃力特性の評価に関する基礎的考察

防衛大学校 正会員 別府万寿博 大野友則 学生会員 千賀孝宣

1. 緒言

物体同士の衝突によって生じる衝撃力特性は、物体の材料特性や境界条件などによって大きく変化することがわかっている。このように複雑な衝突現象を数値的にシミュレートするためには、応力波の伝播やエネルギーの散逸をできるだけ正確に表現することが重要である。本研究は、固体の衝突により発生する衝撃力特性を個別要素法により評価する場合のばね定数や衝突部の取り扱いについて検討を行っている。

2. 重錘落下衝突実験

2.1 実験の概要

図-1 に示す重錘落下装置を用いて、重量 134.5N の重錘(底面の半径 3.49cm で先端に緩い曲率有り)を高さ 100cm から落下させた。被衝突体の材料は板厚 50mm のモルタルである。計測項目は、衝撃力、加速度である。衝撃力は板部材の直下にロードセルを設置して計測した。加速度は重錘の上に取り付けた加速度計で計測した。

2.2 実験結果

図-2 に、加速度の時刻歴波形を示す。最大加速度は 2736.0G、加速度波形の継続時間は 0.35ms である。図-3 はロードセルで計測した衝撃力～時間関係である。これより、衝撃力は加速度応答より約 0.25ms 遅れて発生し、最大衝撃力は約 33 kN で、衝撃継続時間は 1.2ms である。ここで、最大加速度より衝撃力を求めると $F = m\alpha = 368\text{kN}$ となり、ロードセルによる衝撃力の約 11 倍もの大きさになる。一般に、加速度波形は物理的意味が不明確な高周波成分を多く含むため、以下に行う数値的検討の対象はロードセルによる衝撃力とする。

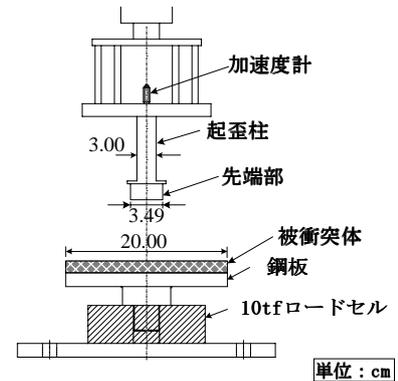


図-1 重錘落下装置

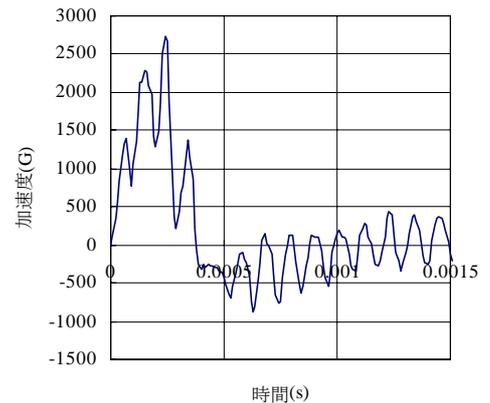


図-2 加速度～時間関係

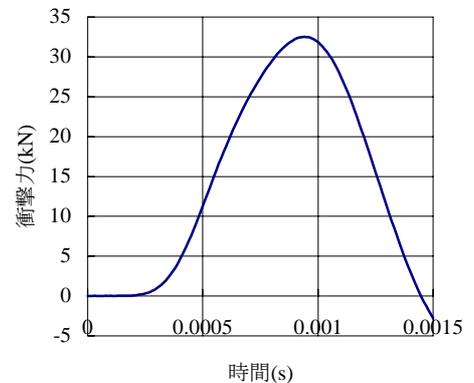


図-3 衝撃力～時間関係

3. 解析モデルと解析定数の検討

本研究で用いる個別要素法は、剛体同士を法線方向と接線方向のばねで結合させたモデルである。個別要素法は、不連続体を対象としている数値解析手法のため、連続体を対象とする場合、剛体要素の配列やばね定数および接触部のばね定数の設定が重要となる。以下に、本解析に用いた各解析定数について述べる。

3.1 要素配列とばね定数

阿部¹⁾は、個別要素法を連続体解析に適用するときの問題点を検討しており、最密配列(図-4 参照)において次に示すばね定数を用いると精度よく連続体を表現できると報告している。そこで、本研究ではこのばね定数を用いることにした。

$$\text{法線方向} : k_N = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{G}{1-2\nu'} t \quad (1a)$$

キーワード：衝撃力特性、衝突解析、個別要素法、ばね定数、減衰定数

連絡先：〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 Tel:046-841-3810 Fax:046-844-5913

$$\text{接線方向} : k_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1-4\nu'}{1-2\nu'} Gt \quad (1b)$$

ここに、 $\nu' = \frac{\nu}{1+\nu}$, G :せん断弾性係数, ν :ポアソン比,

t :奥行き

3.2 衝突部のばね定数と減衰定数

先に述べた衝突実験を観察すると、衝突は非弾性衝突であり、その反発係数は 0.1 以下であった。そこで、式(2)に示す反発係数 e に基づいた減衰定数を用いて衝突部におけるエネルギー散逸を表現する。

$$h_n = \sqrt{\frac{(\ln e)^2}{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (2)$$

また、ばね定数については、弾性接触論によるばね定数を用いた。

3.3 衝突部のモデル配列

実験に用いた重錘先端の曲率は非常に緩いものであるが、衝突部のモデル化は解析結果に大きな影響を及ぼすと考えられる。本解析は 2 次元解析であること、また実験において接触部における詳細挙動が不明であることから、図-5 に示すように(a)面的に接触する場合（平面モデル）、(b)要素 3 個のみで接触する場合（3 点モデル）、(c)要素 1 個のみで接触する場合（1 点モデル）の 3 種類を設定した。表-1 に解析ケースを示す。解析のパラメータは、衝突部のモデルに加え、衝突部の減衰の有無（ケース 1, 2）、さらに連続体内部でも減衰（減衰定数 5%）を考慮した場合（ケース 3）である。解析定数は、ヤング係数 $E = 20\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ 、反発係数 $e = 0.1$ とした。

4. 計算結果と考察

図-6 にケース 2（衝突部のみ減衰あり）における衝撃力～時間関係を実験結果と比較して示す。これより、平面モデルの最大衝撃力が最も大きく、接触要素数が減少するにしたがいその大きさは小さくなり、1 点モデルでは約 25%まで減少している。一方、衝撃継続時間は、平面モデルに比べ 1 点モデルの方が約 2.5 倍長くなった。図-7 は全ケースにおける最大衝撃力を示したものである。これより、接触要素数が減少するにしたがい、最大衝撃力は低減し、実験値に漸近する傾向が認められる。

参考文献

- 1)阿部和久：個別要素法による連続体解析におけるバネ定数の設定，土木学会論文集，No.543/I-36，pp.83-90，1996.
- 2)大町達夫：個別要素法で用いる要素定数の決め方について，構造工学論文集，Vol.32A，pp.715-723，1986.

表-1 解析ケース

モデル	ケース 1	ケース 2	ケース 3
平面接触	減衰なし	衝突部のみ減衰あり	衝突部，連続体内部の
3 点接触			減衰あり
1 点接触			減衰あり

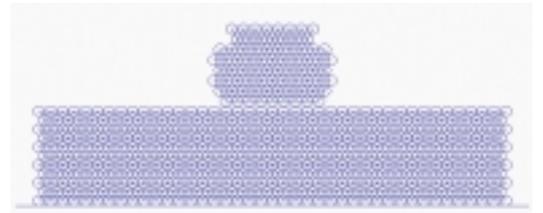
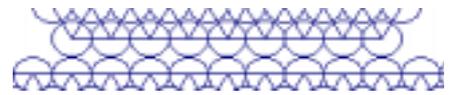
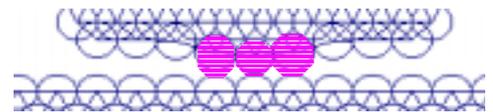


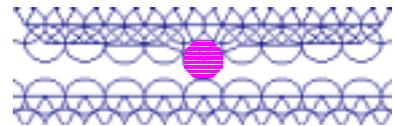
図-4 解析モデル（全体）



(a)平面モデル



(b)3 点モデル



(c)1 点モデル

図-5 衝突部のモデル配列

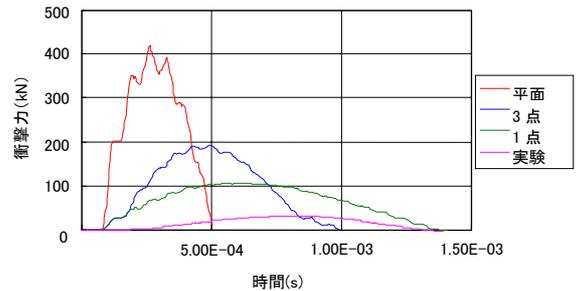


図-6 衝撃力～時間関係（ケース 2）

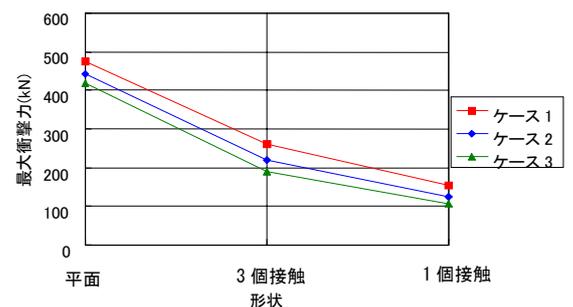


図-7 衝撃力～時間関係