

III-434

個別要素法における力の伝達速度に関する一考察

清水建設大崎研究室 正員 吉田 順

1. はじめに

個別要素法(以下DEMと略す)においては要素を剛体として取り扱うため、要素内において変形による力の蓄積あるいは伝達の遅れなどは生じず、力は一瞬のうちにそのまま伝わることになる。そのため、要素間の接触点に仮定したバネダッシュポット系において力は蓄積され、要素間の力の伝達を表現することとなり、このバネダッシュポットのパラメータがFEM等で取り扱われるヤング率や減衰定数に対応することになる。従来、このDEMパラメータと実験等で得られる材料定数の関係については、弾性論あるいは接触問題の理論解から一定の関係を示すような報告がなされているが、実際の計算においてその関係をそのまま用いている例はほとんどない。しかし、DEMの実問題への適用を考えればあまり物性パラメータを操作することは望ましくなく、実験値あるいは理論値からそのまま設定できる方法が必要である。そこで、本研究ではDEM解析における力の伝達速度に着目し、バネ定数、要素の数あるいは大きさなどと伝達速度の間の相関について検討を加え、DEMパラメータの設定について考察したものである。

2. DEMにおける力の伝達機構について

DEMでは基本的な仮定として要素を剛体として取扱い、変形あるいは力の伝達に関しては要素間の接触点に仮定したバネダッシュポット系で表現することになっている。また、DEMは各時刻毎に積分を進める陽解法であり、力の伝達にはある程度のステップ数を必要とすることとなる。ここで、図-1の例を用いて具体的に力の伝達のメカニズムを示す。

- 1) 第1ステップでは右端の要素10に力Fを加えると要素10の加速度 $a_{1,10}=F/m$ (m : 質量), 速度 $v_{1,10}=a\Delta t$, 変位 $d_{1,10}=v\Delta t$ が求められる。この変位と速度から要素10と9の間の接触力 ΔF が求められる。
- 2) 第2ステップでは要素9, 10の加速度 $a_{2,9}=\Delta F/m$, $a_{2,10}=F-\Delta F/m$ および要素9, 10の速度, 変位が求められ、これより要素10と9の間および要素9と8の間の接触力が求められる。

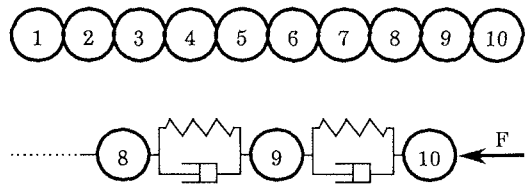


図-1 DEMにおける力の伝達機構

- 3) この計算を繰り返し、左端の要素1が動き始めるのは10ステップ目である。

この例でもわかるようにDEMでは隣の要素に力を伝えるために必ず1ステップを要する。そのため、力の伝達速度は(要素の大きさ/時間増分)と考えられるが、この初期の段階では微小な力は伝達されるものの伝えられるべき力の主要部分は要素間の変位すなわちバネダッシュポットの変形として蓄えられ、次の要素への伝達はかなり遅れを生じる。これを踏まえて、DEMによる数値解析例を示し、パラメータと力の伝達速度の関係について考察する。

3. DEM解析における力の伝達速度

解析に用いたモデルは図-1と同様なもので要素数、粒径およびバネ定数などをパラメータとしていくつかの解析を実施した。基本としたモデルは要素数21、粒径1mのもので物性としては表-1に示すようなものである。ただし、力は要素の並びに平行すなわち要素間の垂直成分のみを考えるため、せん断にかかわる定数は意味がない。

表-1 解析条件

単位体積重量 γ	7.85	t/m ³
垂直バネ定数 k_n	2.8×10^8	kN/m
せん断バネ定数 k_s	1.4×10^8	kN/m
比例減衰係数 β	0.0	sec
摩擦係数 μ	0.5	

時間増分は 10^{-5}sec で右端の要素21に速度 -100m/sec を与えたときの各要素間の接触力の時刻暦を重ね書きしたものを図-2に示す。左から順に要素21, 20間, 要素20, 19間……要素2, 1間というように20個の接触点における力の変化を表している。時間が経過するにしたがって徐々に最大値が小さくなるかわりに裾が広がり山の形が変化していることがわかるが、この解析では減衰を考慮していないため、各要素で影響を受ける隣接要素の範囲が異なることに起因していると考えられる。通常、弾性波速度 V_p の場合には波の立ち上がり時刻から速度を求めるが、この解析では前章でも述べたように各接触点の力が発生する時刻は右(要素21, 20間)から順に1ステップずつ加えたものとなる。この時刻を波形の立ち上がりと見ることは図-2を見ても少し無理があると考えられるため、今回の検討では最大値の発生時刻から伝達速度を求めることとした。

表-2に各接触力の最大値の発生したステップを示す。時間増分の 10^{-5}sec を掛ければ時刻になり、最後の要素2, 1間接触点で最大値が発生するまでに 0.00309sec を要したことになる。最初の要素21, 20間接触点での最大値発生時刻が 0.00017sec であるから、伝達速度 $V=19/0.00292=6507\text{m/sec}$ となる。ただし、速度は解析の前後半で異なり、徐々に速くなる傾向が見られる。この速度を $E=\rho V_p^2$ として弾性体のヤング率に置き換えてみると $E=3.37\times 10^8\text{kN/m}^2$ となり、垂直バネ定数 $k_n=2.8\times 10^8\text{kN/m}$ と同じオーダーとなっていることがわかる。これを他の条件でも確認するために垂直バネ定数を1オーダーずつ変化させて解析を実施した。その結果、 $k_n=2.8\times 10^7\text{kN/m}$ の場合には伝達速度 $V=2056\text{m/sec}$ 、 $k_n=2.8\times 10^9\text{kN/m}$ の場合には伝達速度 $V=20541\text{m/sec}$ が得られ、伝達速度は k_n の1/2乗にほぼ比例していることがわかった。また、要素数を11個、粒径を 2m とした場合の接触力の時刻暦を重ね書きした結果を図-3に示す。伝達の状況はほぼ21個の場合と同じであり、伝達速度 $V=6360\text{m/sec}$ が得られ、速度もあまり差のないことがわかった。

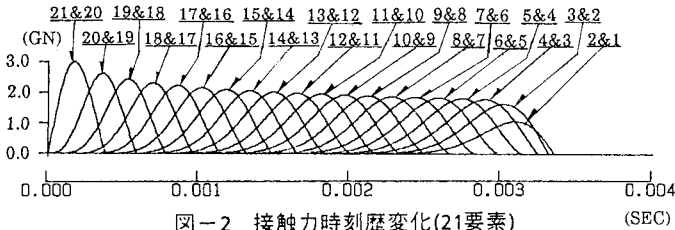


図-2 接触力時刻歴変化(21要素)

表-2 最大値発生ステップ

接触点		最大値発生 ステップ	最大接触力 (kN)
要素	要素		
21	20	17	2.99×10^6
20	19	36	2.62×10^6
19	18	53	2.43×10^6
18	17	69	2.31×10^6
17	16	86	2.23×10^6
16	15	102	2.16×10^6
15	14	118	2.10×10^6
14	13	134	2.06×10^6
13	12	150	2.02×10^6
12	11	165	1.98×10^6
11	10	181	1.95×10^6
10	9	197	1.92×10^6
9	8	212	1.90×10^6
8	7	228	1.87×10^6
7	6	243	1.85×10^6
6	5	259	1.83×10^6
5	4	274	1.81×10^6
4	3	289	1.78×10^6
3	2	302	1.64×10^6
2	1	309	1.07×10^6

4. まとめ

DEM解析における力の伝達速度(最大接触力に関するもの)について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 力の伝達速度は垂直バネ定数の1/2乗に比例する。
- 2) 力の伝達速度を V_p と仮定して得られたヤング率はバネ定数と同じオーダーの値を示す。
- 3) 力の伝達速度は要素数あるいは要素の大きさによる影響をあまり受けない。

今回の検討では力の伝達に関する一部のパラメータを考慮しただけであり、今後は実験等も含めた検討を行ってDEMパラメータの設定法を確立していきたい。