

三次元個別要素法を用いた版の衝撃解析について

STUDY ON THE IMPACT ANALYSIS OF PLATE BY THREE-DIMENSION DISTINCT ELEMENT METHOD

石井繁治*, 赤田朋哉**, 榎谷浩***, 梶川康男****

Shigeharu ISHII, Tomoya AKADA, Hiroshi MASUYA, Yasuo KAJIKAWA

*金沢大学大学院 自然科学研究科前期課程 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

**金沢大学 土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

***工博, 金沢大学助教授 土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

****工博, 金沢大学教授 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

キーワード: 個別要素法, 衝撃, 連続体解析, 版

(the distinct element method, impact, the analysis of continuum, plate)

1. はじめに

連続体の解析には有限要素法が広く用いられているが, 衝撃問題のように大変形を伴う破壊が生じる場合には困難な点もある. そこで本研究では大変形を伴う破壊の進展や局所破壊に見られる粒子の飛散を再現することができる個別要素法を用いて衝撃挙動特性に関する解析を行った. まず, 重錘や要素の動き, エネルギーの大きさなどの基本的性質を調べるために立方体や版状に配置した要素に重錘を衝突させる解析を行った. 次に, 要素数 27 個からなる立方体モデルや版状モデルの連続体の弾性解析を示す. まず, 簡単な立方体モデルにステップ荷重を加えてエネルギーと時間の関係を考察することにより連続体への応用が可能であることを確認した. そして, 版状に要素を配列したモデルに対しても同様の解析を行い, 変位, エネルギーを調べており, 有限要素法との解析結果の比較からばね定数の設定を検討している.

2. 解析方法

個別要素法では, 対象とする構造物を 3 次元では球, 2 次元では多角形要素や円要素といった要素の集合体として離散化を行う. これらの要素は剛体とみなし, 要素間の接線方向および法線方向にばねとダッシュポットを挿入することによって弾性および非弾性的性質を表現する. この個々の要素の並進 $\mathbf{u}$ および回転 ϕ についての運動方程式は, 次式で表現できる.

$$m\ddot{\mathbf{u}} + c\dot{\mathbf{u}} + k\mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{I}\ddot{\phi} + c\dot{\phi} + k\phi = 0 \quad (2)$$

ここで, m および $\mathbf{I}$ はそれぞれ各要素の質量および慣性モーメントであり, k, c はそれぞればね定数および減衰係数である. また, r は要素を円要素または球要素としたときの半径である. なお, 式中のドット($\cdot$)は時間に関する微分を表している.

次に式(1), 式(2)を次式に示すような陽的差分となる形に変形して, Δt 時間ごとに逐次計算を行う方法を用いた.

$$m[\mathbf{u}]_t = -c[\mathbf{u}]_{t-\Delta t} - k[\mathbf{u}]_{t-\Delta t} \quad (3)$$

$$\mathbf{I}[\phi]_t = -c\dot{\phi}_{t-\Delta t} - k\phi_{t-\Delta t} \quad (4)$$

この式は, 時刻 t より Δt 時刻前の変位, 角度 $[\phi]_{t-\Delta t}$ と

速度 $[\dot{\mathbf{u}}]_{t-\Delta t}$, 角速度 $[\dot{\phi}]_{t-\Delta t}$ により, 現在の時刻の加速度

$[\ddot{\mathbf{u}}]_t$, 角加速度 $[\ddot{\phi}]_t$ を求める方法である.

3. 解析結果

3.1 立方体モデルの解析

解析モデルは, 図1に示す 27 個の要素からなる立方体である. このモデルに対して重錘を 27 番の要素に鉛直方向に衝突させた. (a) 半径 0.05m の重錘を質量 0.10kg の要素

に衝突させた場合、(b)半径0.10mの重錘を質量0.10kgの要素に衝突させた場合の2通りに設定し、これらの違いによって解析結果にどのような影響が表れるかを検討した。いずれの場合も要素の半径は0.05m、重錘の質量は0.10kg、初速度は3.0m/sとして、重錘がもつ最初の運動エネルギーがすべての場合において等しくなるように設定した。図2の(a)の場合は重錘と要素の半径が等しいためx軸方向にしか力が発生せず、(b)の場合では重錘の半径の方が要素の半径よりも大きいいためy軸方向、z軸方向にも力が発生している。図3では(a)の場合の方が要素の運動エネルギー

した。t=0.01(s)の時点ではx軸方向の要素が重錘に大きく下方方向に押されている。またy軸方向、z軸方向の要素も版状モデルの端から押し出されて飛散している

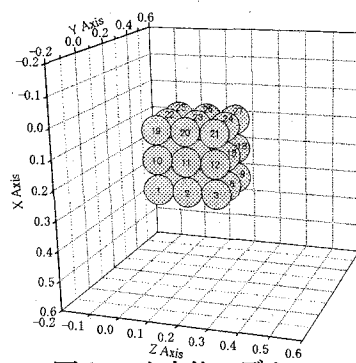
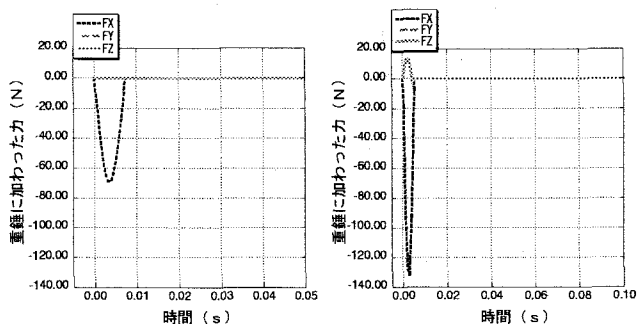
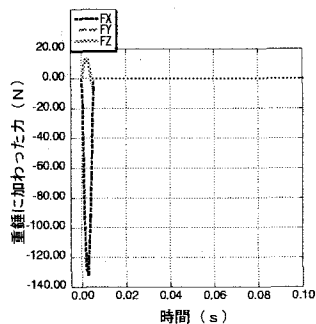


図1 立方体モデル

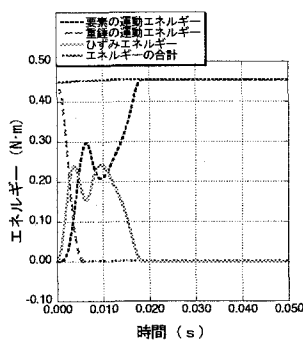


(a)

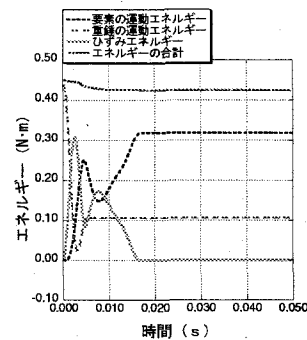


(b)

図2 重錘に加わる力と時間変化

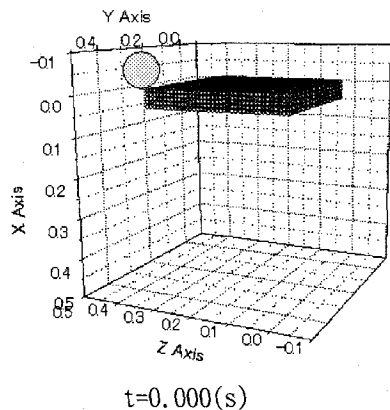


(a)

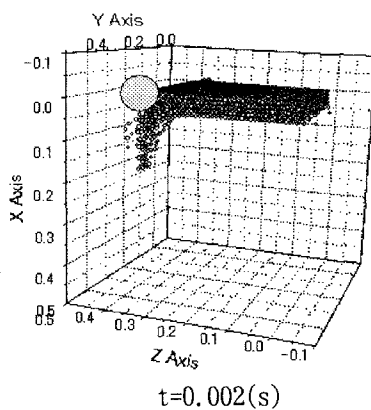


(b)

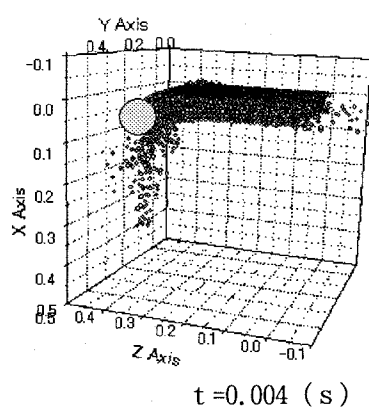
図3 エネルギーと時間変化



t=0.000(s)



t=0.002(s)



t=0.004(s)

図4 各時間における要素の位置

ギーが大きく、(b)の場合の方が重錘の運動エネルギーが大きくなっている。これは重錘が跳ね返っていることによるものである。

3.2 版状モデルの解析

解析モデルは、図4の左端の図に示すような版状のモデルの端に重錘を鉛直方向に衝突させた。要素の半径0.005m、質量 5.0×10^{-3} kgとし、重錘の半径0.05m、質量10.0kgとしている。この場合の重錘の初速度は6.0m/sでる。

図4に各時間における要素と重錘の位置を示

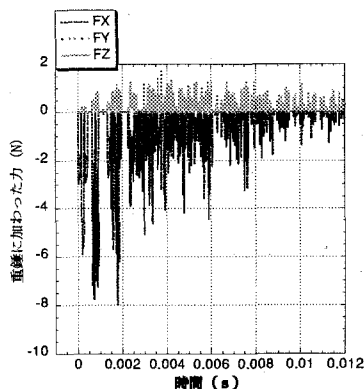


図5 重錘に加わる力と時間変化

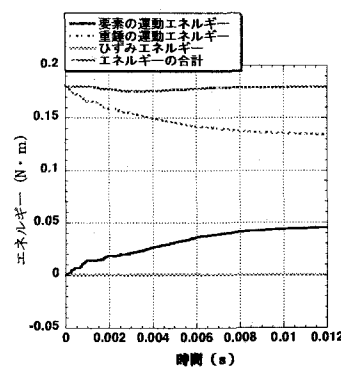


図6 エネルギーと時間変化

ことがわかる。t=0.02(s)後になると、x 軸方向、y 軸方向、z 軸方向の要素の変位がさらに大きくなっている。また、重錘と対角線方向の要素の飛散も見られる。図 5 には重錘に加わる力と時間の関係を示した。この版状モデルの場合では重錘が多くの要素と接触するために荷重 x 軸方向、y 軸方向、z 軸方向ともに何度も加わっていることがわかる。また、エネルギーと時間の関係を示した図 6 では重錘の運動エネルギーの減少とともに要素の運動エネルギーが増加していく様子が見られ、この時、ひずみエネルギーはほとんど発生していないことがわかる。

4. 連続体の弾性解析結果

4.1. 立方体モデルの解析

今では、無重力の空間に浮かんでいる要素に重錘を衝突

させた時の要素や重錘の動き、エネルギーなどの基本的な性質を調べるといったシミュレーション的な解析をおこなうことでプログラムの有効性をみてきた。ここからは、個別要素法の連続体への適用を試みた。図 7 のような要素数 27 個からなる簡単な立方体モデルを連続体とみなし、ステップ荷重を加える解析を行った。この連続体の解析では接触判定を最初の一度しか行っておらず、接触している要素の位置関係は変位の大小にかかわらず変わらないと仮定した。拘束条件は各要素に与えており、拘束を与えた要素の並進変位や回転を拘束した。拘束を与えた要素は図 7 の色のついている要素である。この立方体モデルではステップ荷重を 0.0005 s まで作用させた場合と荷重を作用し続けている場合の解析を行い、エネルギーと時間の関係を調べた。図 8 はエネルギーと時間の関係の図であり、荷重を 0.0005 s まで作用させた場合では 0.0005 s 以後は、運動エネルギーとひずみエネルギーの位相が逆になり、エネルギーの合計が一定になる。荷重を作用させ続けた場合では運動エネルギーに比べてひずみエネルギーが非常に大きくなっている。これは荷重を加えつづけているために要素の運動が制限されていることによるものであると思われる。図 9 では、この計算の妥当性を見るために、エネルギーとステップ荷重 P に荷重が作用している要素の変位 Δ の積 $P\Delta$ 、すなわち仕事を比較した。わずかな誤差は認め

られる部分もあるがほとんど一致しているために計算は問題ないと考えられる。

4.2 版状モデルの解析

立方体モデルの解析結果から連続体への適用が可能であると判断し、要素数を多くした図 10-1 のような版状モデルの解析を行った。解析モデルは図 10-2 のように縦 75cm 横 75cm 厚さ 4cm のコンクリート版を想定した

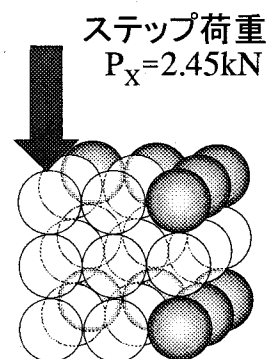
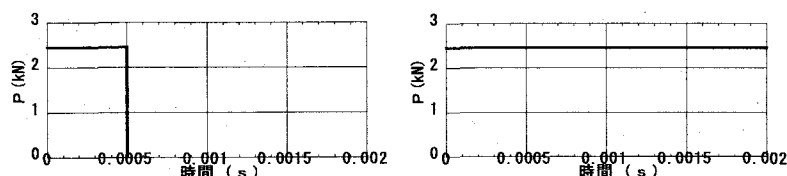
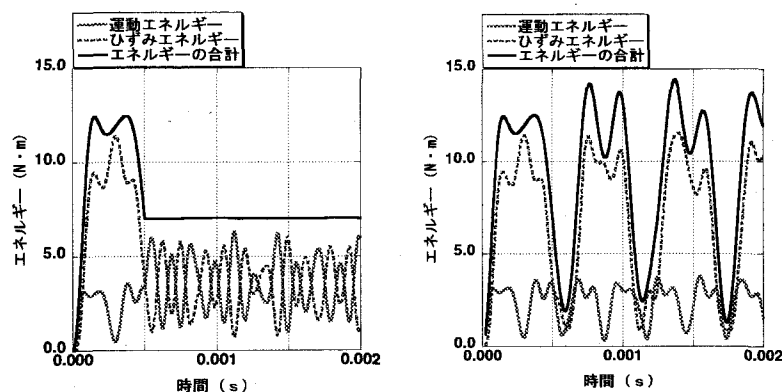


図 7 立方体モデル



荷重-時間図



荷重を途中で止めた場合

荷重を作用させ続けた場合

図 8 エネルギーと時間変化

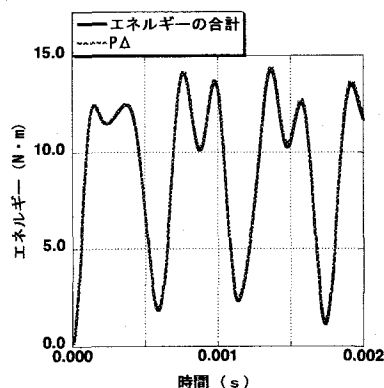


図 9 エネルギーと $P\Delta$ との比較

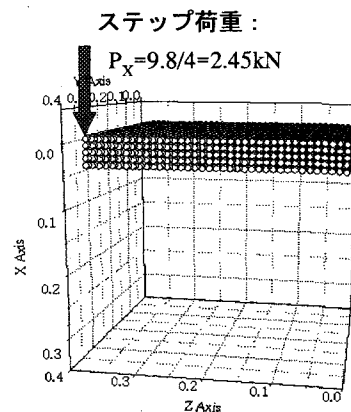


図 10-1 版状モデル

版状のモデルである。このモデルの縦、横端から 2.5cm の場所を四辺単純支持し中央にステップ荷重 9.8kN を加える解析を行った。解析では図 10-1 のように対象性を考慮して 1/4 モデルを使用している。版状モデルでは個別要素法と同じモデル寸法、拘束条件で汎用ソフト ADINA と変位を比較し、ばね定数の設定を試みている。図 11 には個別要素法と ADINA による解析結果から $t=0.002(s)$ の時の版のたわみを比較した。個別要素法と ADINA の解析結果で第一波の最大変位となる時間が違うために ADINA による解析結果の方が版全体のたわみが大きい。また、個別要素法の解析結果では中心部に近いところほど尖った形状をしている。これは個別要素法では接線方向のばね定数が弱いために版全体としての剛性が有限要素法に比べて弱いためだと思われる。図 12 荷重をかけた点、中心から 5cm*5cm 離れた対角線上の点、15cm*15cm 離れた対角線上の点の時間-変位曲線を示した。3 点とも周期、変位ともわずかな違いが認められる。個別要素法では変位が出るのが初めは遅く、その後は鋭く立ち上がるという傾向が見られる。現在は版の縦方向には要素が 5 段に並んでいる格子配列を用いている。有限要素法と個別要素法による解析結果の変位や周期の違いは、配列による影響やまだまだ要素数が少ないことに関係があると考えている。図 13 のエネルギーと時間の関係では、立方体モデルと同様にひずみエネルギーが運動エネルギーに比べてかなり大きいという結果になった。

4. おわりに

本研究では、立方体モデルと版状モデルを用いた個別要素法による衝撃挙動解析と連続体の弾性解析について示した。今後は現在行っている連続体の弾性問題での 2, 3 の検討の後、鉄筋コンクリート版などの衝撃問題に応用していきたいと考えている。

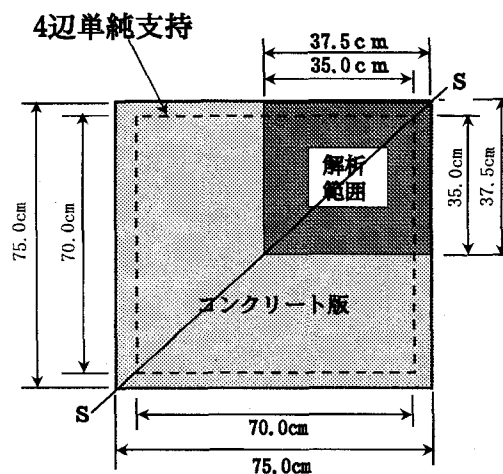


図 10-2 版状モデル(拘束条件)

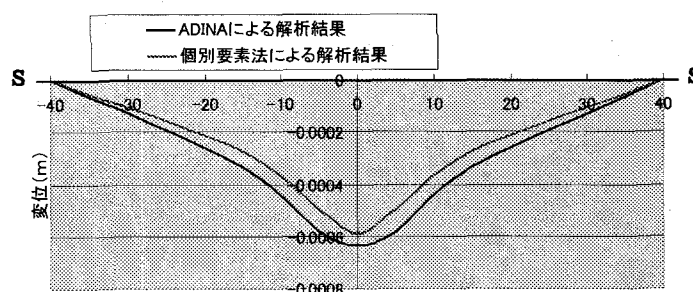
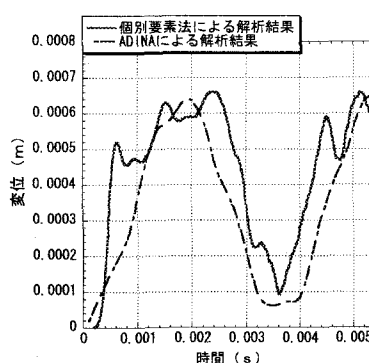
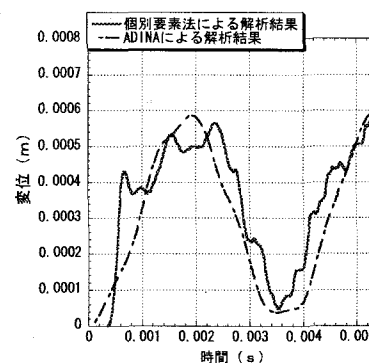


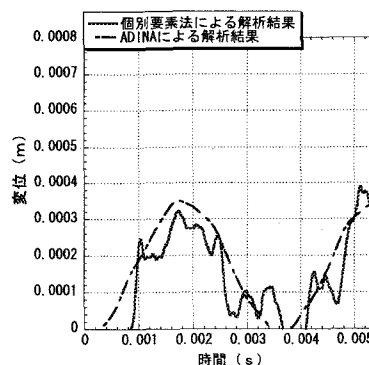
図 11 版のたわみ



荷重をかけた点



中心から 5cm*5cm の点



中心から 15cm*15cm の点

図 12 変位の時間変化

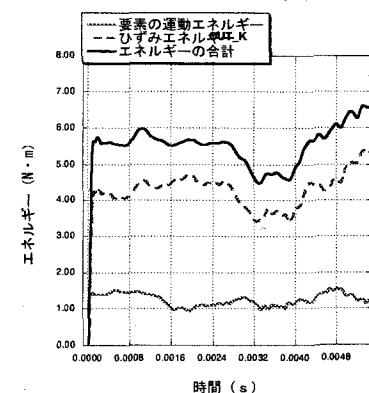


図 13 エネルギーと時間変化