

(3) コンクリート版の衝撃挙動に関する個別要素法を用いた解析的研究

STUDY ON CHARACTERISTICS OF IMPACT BEHAVIOR OF CONCRETE PLATE BY DISTINCT ELEMENT METHOD

渡辺高志*, 久保田晃生**, 榎谷浩***

Takashi WATANABE, Akio KUBOTA, Hiroshi MASUYA

* 金沢大学大学院, 自然科学研究科博士前期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

** 工修 川田建設株式会社 (〒114-8505 東京都北区滝野川6丁目3番1号)

*** 工博 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

キーワード: コンクリート版, 衝撃実験, 個別要素法
(Concrete plate, Impact test, Distinct element method)

1. まえがき

コンクリート構造物の設計に際して衝撃荷重は重要である。その例として、車両や船舶、航空機の衝突、落石や津波など、発生頻度が比較的高いものから低いものまであらゆるものが考えられる。特に、我が国は地形が急峻であり、地質も脆弱な上、地震も多く、多雨多雪地帯であるため、地滑り、崖崩れ、雪崩や落石などの自然災害が大きな問題となっている。さらに、近年、社会的に重要性の高い公共物の中には爆発事故や破壊テロを考慮すべき構造物が多数存在しており、2001年の同時多発テロ事件以降は、このような衝撃問題に関する社会的ニーズも高まっている。

土木分野においては、衝撃外乱から生活・生命・財産等を防護するための構造物の建設は必須であり、信頼できる高い安全性を確保するためには各構造物の耐衝撃設計法を早期に確立する必要がある。また、構造物の設計に関しては、現在、性能照査型設計法を確立するための研究が、様々な機関により進められている。この設計法では、構造の性能の明示、国際標準化への対応、新技術の導入、コスト低減などが期待されており、衝撃荷重を受ける構造物においても、この設計法に関する技術的な検討を行うことが急務とされている^{1),2)}。

想定される衝撃荷重に対して構造物を安全かつ合理的に建設するためには、構成要素であるはり・柱・版部材の個々の衝撃破壊挙動を明らかにし、各部材の合理的な耐衝撃設計手法を確立しておくことが必要である。このような観点より本研究では、最も基本的な部材であるコンクリート版の重錘衝突による衝撃破壊挙動の解明と数値解析手法の確立を目的として解析を行った。

本研究では離散化手法の一つである個別要素法による研究を行うことにした。個別要素法では、要素が相対的に大きく移動する場合、要素間の相対位置関係が変わる場合、要素が飛散する場合などにもシミュレーションが可能である。各分野で粒状体などの非連続体の解析に用いられることが多いが、近年、大変形を伴い破壊を生じる連続体の解析にも用いられており、衝撃問題の局所破壊の解析に有効であると考えられている。本研究では、衝撃破壊現象の解明に役立つ知見を得ることを目的とし、実際の現象を正確に表すために三次元モデルを用いた解析を行った。

2. 個別要素法の解析概要

個別要素法は土粒子などの非連続体に適用されてきた解析法であり、要素が相対的に大きく移動する場合や要素間の相対位置関係が変わる場合、また要素が飛散する場合などもシミュレーションが可能である³⁾。近年では、接触要素間のばねにある程度の引張抵抗を持たせることにより、連続体であるコンクリート部材の破壊現象の解明にも適用されている例が多い^{4),5)}。

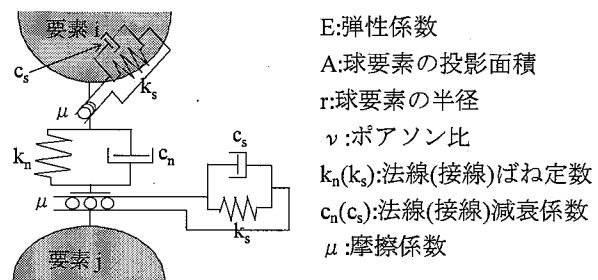


図-1 要素の結合モデル

個別要素法では、図-1 に示すように対象とする構造物を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、要素の接点間に挿入したばねとダッシュポットによって材料の持つ弾性的性質および非弾性的性質を表現する。本研究では、個々の要素の運動方程式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進めた。

$$m[\ddot{u}]_t = -c[\dot{u}]_{t-\Delta t} - k[u]_{t-\Delta t} \quad (1a)$$

$$I[\ddot{\phi}]_t = -cr^2[\dot{\phi}]_{t-\Delta t} - kr^2[\phi]_{t-\Delta t} \quad (1b)$$

ここで、 u および ϕ はそれぞれ並進変位、回転変位、 m および 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。

3. 個別要素法の連続体への適用

個別要素法の連続体解析への適用において、最も重要な問題は、接触要素間に挿入したばねやダッシュポットの物理的定数の設定である。前述の通り、個別要素法は、本来、離散体の解析を対称としたもので、土粒子などを対象とした非連続体の問題に適用されていたが、接触要素間のばねにある程度の引張抵抗を持たせることにより、コンクリート構造物の動的破壊現象のような連続体から非連続体までの一連の現象をシミュレートすることが可能となる。しかしながら、ばね定数の設定に関しては、理論的な根拠が明確に述べられていない^{4),6),7)}。

そのため本節では、コンクリート版の衝撃破壊解析に至る以前に、連続体としての弾性範囲における挙動を明確に表現することによって、本解析手法の信頼性を高めることが必要であると考えた^{8),9)}。具体的には、ステップ荷重を受けるコンクリート版を対象に、一般に弾性解析で用いられている有限要素法による解析結果と比較・検討を行い、本解析手法の妥当性を示す。また、要素分割数や要素配列の影響について比較・検討を行い、要素分割数の異なる場合についての要素分割に関する修正ばね定数や要素配列が異なる場合についての配列形式に関する修正ばね定数を提案する。

3.1 格子配列を用いた版状モデルによる解析

格子配列を用いた版状モデルによる弾性解析を行い、有限要素法を用いた汎用ソフト ADINA での解析結果と比較する。有限要素法は弾性解析で一般に広く用いられている手法であり、ある程度、信頼できる値が得られている。

また、異なる要素分割数のモデルで解析を行い、

要素分割に関する修正ばね定数の設定をする。

(1) 解析モデル

個別要素法の解析に用いた解析モデルを図-2 に示す。一辺の長さが 1300mm の正方形で、厚さが 60mm のコンクリート版を想定した版状モデルであり、要素数は 4624 個である。解析に用いた諸定数を表-1 に示す。また、ADINA の解析に用いた解析モデルと諸条件を図-3、表-2 に示す。どちらも対称性を考慮して 1/4 モデルであり、版の四隅を支持し (スパン 1200mm、張り出しあり)、版の中央にステップ荷重 98kN を X 軸正方向に作用させた。

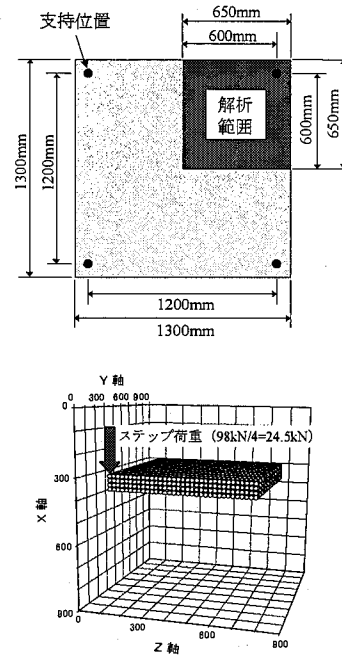


図-2 個別要素法の解析モデル

表-1 個別要素法に用いた諸定数

弾性係数	32.9 (kN/mm ²)
ポアソン比	0.21
要素半径	10.0 (mm)
要素質量	0.01876 (kg)

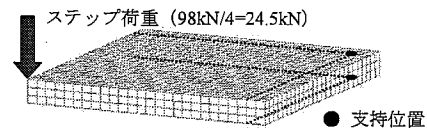


図-3 ADINA の解析モデル

表-2 ADINA に用いた諸定数

弾性係数	3.29×10^7 (kN/m ²)
ポアソン比	0.21
密度	2418.253 (kg/m ³)

(2) 修正係数の導入

最初に、個別要素法による解析では法線方向と接線方向のばね定数の設定が非常に重要である。本解析では式 (2a)、(2b) で法線方向、接線方向の基準ばね定数を設定した。

$$k_n = \frac{EA}{2r} \quad (2a)$$

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu)} \quad (2b)$$

ここで、 k_n と k_s はそれぞれ法線方向、接線方向のばね定数である。また、 E 、 A はそれぞれヤング係数と球要素の投影面積であり、 ν と r はそれぞれポアソン比と球要素の半径である。しかし、個別要素法は離散化解析手法の一種であるため、理論的な連続体の解析におけるばね定数の決定は困難である。そこで、基準ばね定数に修正係数を導入することによってばね定数の設定を検討した。

$$k_n' = \alpha \cdot k_n = \alpha \cdot \frac{EA}{2r} \quad (3a)$$

$$k_s' = \beta \cdot k_s = \beta \cdot \frac{k_n}{2(1+\nu)} \quad (3b)$$

α 、 β はそれぞれ法線方向、接線方向に導入した修正係数である。

(3) 接線方向ばね定数の違いによる影響

修正係数を導入するにあたり、式 (3a)、(3b) の修正係数 α 、 β の値を変化させることによって解析結果にどのような影響が現れるか、つまり、法線方向と接線方向のばね定数がそれぞれ解析結果にどのように影響しているかを検討しなければならない。格子配列を用いたモデルでは、法線方向に比べ接線方向のばね定数が解析結果に大きく影響することが、経験上わかっている。そこで、まず、接線方向のばね定数の影響を見るために、 α を $\alpha=1.000$ で固定し、 β を変化させた。図-4 に接線方向のばね定数を変化させたことによる荷点変位の違いを示し、この解析結果と ADINA での解析結果とを比較した。

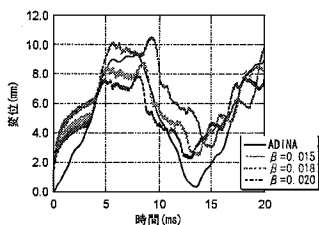


図-4 接線方向ばね定数の影響

接線方向のばね定数が、変位の最大値、周期ともに影響を与えていることが確認できる。ばね定数を

小さくすれば最大値は大きくなり、周期は長くなっており、ADINA での結果と比較すると、 $\beta=0.018$ のときにほぼ一致した結果が得られた。

(4) 法線方向ばね定数の違いによる影響

続いて、法線方向のばね定数の影響を見るために、 β を $\beta=0.018$ で固定し、 α を変化させた。図-5 に法線方向のばね定数を変化させたことによる荷点変位への影響を示す。

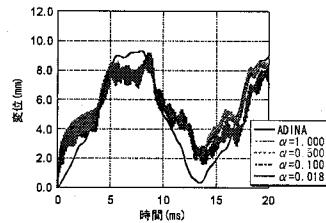


図-5 法線方向ばね定数の影響

初期の段階では法線方向のばね定数を変化させたことによる荷点変位への影響はそれほど見られず、周期もほぼ一致している。しかしながら、時間の経過とともに解析結果に違いが現れている。これは、要素一つ一つではわずかな違いが生じるだけであるが、解析に用いたモデルは 4624 個の要素から成り立っているため、一つ一つの要素の違いが時間の経過とともに大きくなり、それが足し合わされたことにより、このような結果になったと考えられる。しかしながら、法線方向のばね定数が解析結果に与える影響は大きなものではないと考えられ、 α は $\alpha=1.000$ を用いることとする。

ADINA による解析と比較することで、 $\alpha=1.000$ 、 $\beta=0.018$ という修正係数を得た。最大変位、周期ともにある程度一致した結果が得られたが、初期段階における変位の勾配の違いが見られる。これは要素の配列が大きく関係していると考えられる。本解析では格子配列を用いているが、この配列は法線方向の曲げ変形よりもせん断変形に近い変形が起こりやすく、要素が滑りやすい配列であるといえる。そのため、初期段階における荷重荷点の変位の勾配が ADINA の解析結果に比べて急になると考えられる。

(5) 要素分割数による影響

格子配列を用いた解析モデルにおける、要素分割数による影響について検討する。解析には、図-6 に示す 4 種類の要素分割数によるモデルを用いて、先程と同様に修正係数 α 、 β を求めた。解析に用いた解析モデルと諸条件は、要素分割に伴う要素半径、要素質量の違い以外に差異は無く、図-2、表-1 と同様である。

求められた修正係数を表-3 に示し、それらの修正係数を用いて行った解析結果と ADINA による解

析結果の比較を図-7に示す。

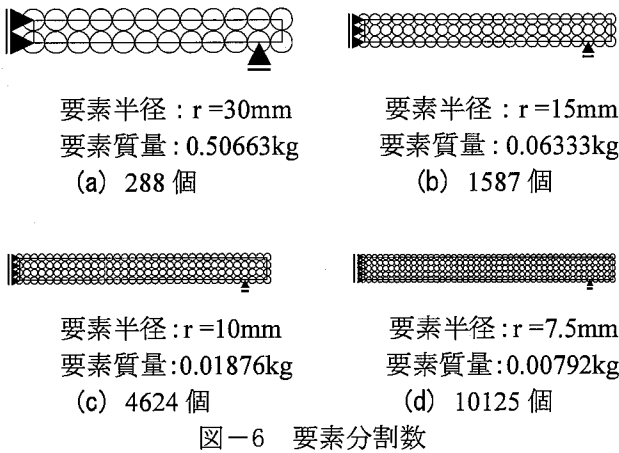


表-3 要素分割数に関する修正係数

要素分割数	α	β
288 個	1.000	0.010
1587 個	1.000	0.015
4624 個	1.000	0.018
10125 個	1.000	0.020

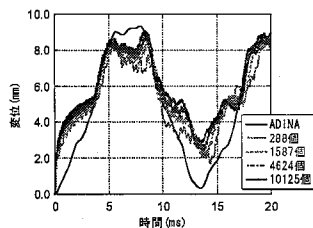


図-7 ADINAによる解析結果との比較

図-7 から、要素分割数を変化させても、変位、支点反力ともに大きな違いは見られず、どのモデルも ADINA による解析結果とほぼ一致している。よって、格子配列を用いた版状モデルの解析においては、要素分割数を比較的粗くした場合であっても、修正係数を導入したばね定数を設定することで、ADINA による解析結果を比較的よく再現でき、連続体の弾性解析において、ある程度、信頼性のある値を得られることが確認できた。

3.3 最密配列を用いた版状モデルによる解析

前節では格子配列を用いて解析を行い、有限要素法での結果と比較検討を行った。次に、より要素が密になる最密配列を用いることで、解析結果にどのような影響が出るかを検討した。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-8に示す。モデルの条件は格子配列を用いた版状モデルと同様であり、要素数は

5646 個である。解析に用いた諸定数を表-4に示す。

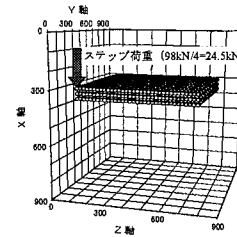


図-8 解析モデル

表-4 解析に用いた諸定数

弾性係数	32.9 (kN/mm ²)
ポアソン比	0.21
要素半径	10.0 (mm)
要素質量	0.01407 (kg)

(2) 修正係数の導入

要素配列を最密配列に変更したことにより、次式のような配列形式に関する修正係数を導入して、再びばね定数の設定を検討した。

$$k_n'' = \alpha' \cdot \alpha' \cdot k_n = \alpha' \cdot \alpha' \cdot \frac{EA}{2r} \quad (4a)$$

$$k_s'' = \beta' \cdot \beta' \cdot k_s = \beta' \cdot \beta' \cdot \frac{k_n}{2(1+\nu)} \quad (4b)$$

ここに、 α' 、 β' はそれぞれ法線方向、接線方向に導入した配列形式に関する修正係数である。なお、修正係数 α 、 β には、先に求めた値($\alpha=1.000$ 、 $\beta=0.018$)を用いている。

格子配列を用いた解析では、法線方向のばね定数は解析結果にほとんど影響していなかったが、最密配列では法線方向のばね定数も接線方向と同様に、解析結果に大きく影響しており、ADINA との結果を比較することで $\alpha'=0.500$ 、 $\beta'=0.040$ という修正係数を得た。格子配列モデルの解析結果および ADINA による解析結果との比較を図-9に示す。要素配列を最密配列に変更することによって、格子配列を用いた解析モデルでの問題点であった初期段階における荷重載荷点の変位の勾配が改善され、波形についても ADINA による解析結果に近い波形となっていることが確認できる。

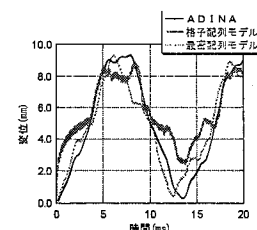


図-9 ADINAによる解析結果との比較

以上のことから、要素配列を格子配列から最密配列に変更し、配列形式に関する修正係数を導入することによって、より精度の高い弾性解析を行えることが確認できた。

4. 個別要素法による衝撃破壊解析

これまでの結果を用いて、コンクリート版の衝撃破壊解析を行い、実験結果と比較することで、その妥当性について検討する。

4.1 コンクリート版の衝撃実験

衝撃荷重を受けるコンクリート版の基本的な応答性状を実験的に調べるとともに、実験結果を解析手法の検証に反映できるデータの収集を目的として、コンクリート版の静的載荷実験と重錘落下衝突による衝撃実験を行った。

(1) 衝撃実験の概要

供試体は、1300 mm×1300 mm×60 mmのプレーンコンクリート版を用いて行った。計測項目と計測位置は図-10に示す通りである。実験装置は、ロープで一定の高さまで持ち上げた重錘を自由落下させ、それを直接供試体に衝突させるのではなく、供試体の上に設置したインパクターを介して衝撃荷重を与えた。重錘は鋼製で、49.75kgのものを使用した。

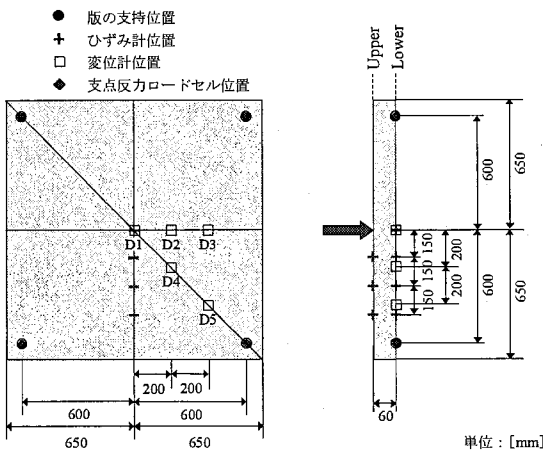


図-10 計測項目と計測位置

(2) 破壊状況

重錘落下衝撃試験における供試体の破壊状況を図-11に示す。なお、ひび割れにおいて太い実線は完全に割れたものであり、細い実線はひび割れを表している。また、網掛けをした部分は裏面剥離を表している。

載荷点直下の版中央に裏面剥離が確認できた。この裏面剥離は静的載荷では見られない衝撃荷重特有のものであるといえる。そして、実験終了後に拘束を解くとひび割れが開き、版が完全に割れた。

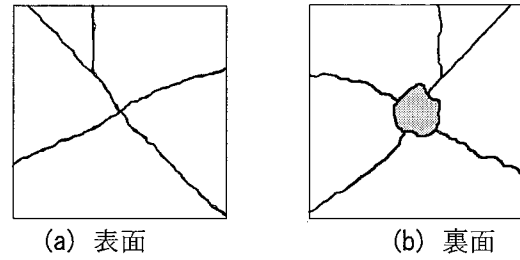


図-11 重錘衝突速度 4m/s での破壊状況

4.2 コンクリート版の衝撃破壊解析

衝撃破壊挙動を解明するためには、実験を補間する上で数値解析法が必要である。そこで、三次元個別要素法によるコンクリート版の衝撃破壊解析を行い、実験結果と比較することで、その妥当性について検討する。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-12に示す。最密配列を用いてモデル化し、要素数は5646個である。版の四隅(スパン1200mm, 張り出しあり)を支持し、版の中央に重錘要素を衝突速度4m/sで衝突させた。解析では対称性を考慮して1/4モデルを使用し、解析に用いた諸定数と修正係数を表-5に示す。

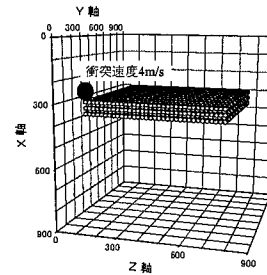


図-12 解析モデル

表-5 解析に用いた諸定数

弾性係数	32.9 (kN/mm ²)
ポアソン比	0.21
圧縮強度	6.79 × 10 ⁻² (kN/mm ²)
引張強度	4.39 × 10 ⁻³ (kN/mm ²)
粘着力	1.36 × 10 ⁻² (kN/mm ²)
内部摩擦角	37°
要素半径	10.0 (mm)
要素質量	0.01407 (kg)
重錘要素半径	40.0 (mm)
重錘要素質量	12.4375 (kg)
α	1.000
β	0.018
α'	0.500
β'	0.040

(2) 破壊基準と構成モデル

コンクリートの構成モデルとして用いた法線方向

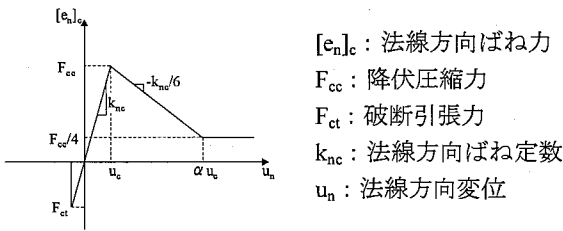
ばね力-変位関係を図-13 (a) に示す。

破壊が生じた後に再接触する場合, 図-14 (b) に示すように圧縮方向には降伏圧縮力の 1/4 まで抵抗できるものとした。

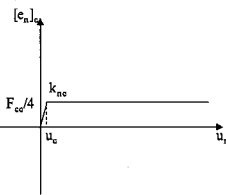
接線方向ばね力としては, モール・クーロンの破壊基準を採用した。その破壊基準は法線方向の圧縮および引張りに満たない場合,

$$[e_s]_c = \pm(c_0 A + [e_n]_c \tan \phi_c) \quad (5)$$

であり, 法線方向の圧縮力および引張基準を越えると $[e_n]_c$ は 0 とした。



(a) 初期段階



(b) 再接触時

図-13 法線方向のばね特性

(3) 荷重応答の比較

図-14 に荷重応答の比較を示す。解析値は, 実験値に比べ最大荷重が小さく, 波形も異なっている。実験では重錘をインパクトに衝突させて, インパクトに設置したロードセルにより荷重を計測している。一方, 解析ではインパクトのモデル化は行っておらず, 重錘要素が受ける力を荷重としているため, 実験値を精度よく再現することができなかったものとする。

(4) 支点反力応答の比較

図-15 に支点反力応答の比較を示す。支点反力においては, 解析値が実験値に比べて全体的に大きな値となっている。

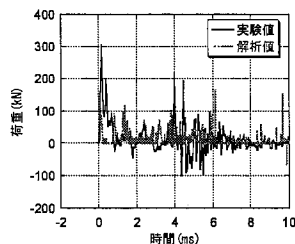


図-14 荷重応答

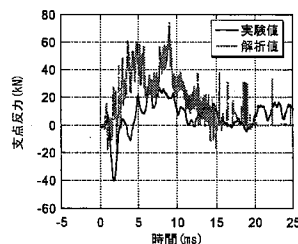


図-15 支点反力応答

5. 結論

本研究によって得られた結論を要約すると以下の通りである。

- 1) 有限要素法を用いた汎用ソフト ADINA での解析結果と比較することによって, 基準ばね定数に修正係数を導入し, 適切なばね定数の設定を行えた。
- 2) 要素分割数や要素配列の影響について比較・検討を行い, 要素分割数に関する修正ばね定数や配列形式に関する修正ばね定数を提案できた。
- 3) 最密配列を用いることによって, ADINA による解析結果により近い結果を得ることができた。
- 4) 衝撃破壊解析を行い, 衝撃実験における荷重応答, 支点反力応答と比較を行えた。

参考文献

- 1) 榎谷浩：性能照査設計法と落石防護構造物, 防災土木, 北陸 PC 防雪技術協会, Vol12, pp30-37, 2005.
- 2) 国土交通省：土木建築に関わる設計の基本検討委員会：「土木・設計にかかる設計の基本」, 2002.
- 3) Cundall, P.A. : Rational design of tunnel supports - a computer Model for rock mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data, technical report MRD-2-74, Missouri River Division, U.S.Army Corps of Engineers, 1974.
- 4) 目黒公郎, 伯野元彦：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 東京大学地震研究所集報第 63 号第 4 冊, pp.409-468, 1989.
- 5) 河西良幸, 坪田張二, 森川博司, 小鹿紀英：個別要素法による衝撃応答解析, 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会資料, pp.147-214, 1995.
- 6) 白井孝治, 伊藤千浩, 大沼博志：飛来物の衝突に対するコンクリートスラブの局所破壊解析への個別要素法の適用性, 第 15 回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 日本鋼構造協会, pp.409-414, 1991.
- 7) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英：個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 473 号, pp.127-135, 1995.
- 8) 榎谷浩, 中田吉彦, 梶川康男：個別要素法の衝撃問題への適用に関する一考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.38A, pp.1477-1487, 1992.
- 9) H.Masuya, Y.Kajikawa, Y.Nakata : Application of the distinct element method to the analysis of the concrete members under impact, Nuclear engineering and design 150, pp.367-377, 1994.
- 10) 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男, 森嶋芳大：個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1761-1771, 1998.