

## (1) 三次元個別要素法によるコンクリート供試体の衝撃破壊解析

## ANALYSIS OF CONCRETE SPESIMEN UNDER THE IMPACT LOADING BY 3-D DISTINCT ELEMENT METHOD

原木大輔\*, 香月智\*\*  
Daisuke Haraki, Satoshi Katsuki

\*修(工), 防衛大学校理工学研究科 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\* 工博, 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: コンクリート飛散片, 軟化領域の構成則, 三次元個別要素法  
(Scattering fragments of concrete, Constitutive law of softening region, 3-d distinct element method)

## 1. 緒言

コンクリート構造物が衝撃力を受ける場合, 構造破壊に至る前段階として, 表面破壊, 裏面剥離などのコンクリート片の飛散現象をともなう破壊形態が生じる. このような局所的な破壊は, 構造全体の安全性に直接影響することはないが, 破片によって構造物近辺, もしくは内部にある設備や人命の安全性を脅かす二次被害の可能性もある. このような飛散片による二次被害が問題となる場合には, その挙動を解析する手法が必要となる.

個別要素法は解析媒体を剛体要素の集合体と考え, 接触した要素間にばねを設定し力のやり取りをさせ, 個々の要素ごとに独立した運動方程式を立て, 要素の挙動を追跡し解析するものである<sup>1)</sup>. この手法は P.A.Cundall<sup>2)</sup>によって提案され, 当初は壁面を有する岩塊群の解析などに適用された. その後, 粒状体や流体の力学的挙動の数値解析に適用されてきた<sup>3~5)</sup>. また, 要素間ばねに固体としての性質を与えることで, 固体の破壊現象にも適用されてきており<sup>6~11)</sup>, 個別要素法は衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の破砕片のシミュレーション解析への適用性が高いと考えられる.

このような観点から, 著者らはコンクリート材料の解析法を研究するため, 三次元個別要素法の解析プログラムを作成し, まず静的載荷時のモール・クーロンの破壊基準の形状や粘着力と摩擦角が破壊形態に及ぼす影響について検討した<sup>12)</sup>. また, これらの成果を基に次の段階として, 高速荷重を受けるコンクリート供試体の破壊挙動への個別要素法の適用を試みた<sup>13)</sup>. さらに, 破砕片シミュレーション法に軟化領域の制御に改良を加え, 高速破壊実験結果のシミュレーション解析の荷重~変形関係および破砕片の飛散現象のシミュレーションに適してい

ることを示した<sup>14)</sup>. しかし, コンクリート破砕片の飛散挙動は, 破壊前のひずみエネルギーの蓄積とその解放を支配する軟化領域の構成則が重要と考えられるにもかかわらず, その関係については明らかにされていない.

そこで本研究は, 軟化勾配などを支配する軟化領域の構成則パラメータがコンクリート飛散片の挙動に与える影響を考察するものである.

## 2. 解析手法

## 2.1 基本式

本解析では, コンクリートを細かい球形要素の集合体と考え, 図-1に示すような要素モデルについて, 三次元における運動方程式をオイラー法に比べて計算結果が安定して得られる中心差分法<sup>12)</sup>を用いて解く. ただし, 速度項は後進差分とした. すなわち,

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t+\Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t^2} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで,  $\mathbf{u}$ : 変位ベクトル,  $(\cdot)$ : 時間に関する1次微分.

これを運動方程式と連立して解き, 次時点( $t+\Delta t$ )における変位を次式によって求める.

$$\mathbf{u}(t+\Delta t) = \left( \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right)^{-1} \left\{ \mathbf{F}(t) - \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D} \frac{\Delta \mathbf{u}}{\Delta t} \right\} + \{ 2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t) \} \quad (3)$$

ここで,  $\mathbf{M}$ : 質量マトリクス,  $\mathbf{D}$ : 減衰マトリクス,  $\mathbf{K}$ : 剛性マトリクス,  $\mathbf{F}$ : 外力ベクトル,  $\Delta \mathbf{u} : \Delta t$  秒間の  $\mathbf{u}$  の増分.

## 2.2 構成モデル

図-1に示す要素間の接触力は図-2に示す法線方向ばね

と接線方向ばね(合力方向)およびそれぞれに並列されたダッシュポッドによって表す。

なお図中の記号は、 $k_n$ :法線方向のばね係数、 $k_s$ :接線方向のばね係数、 $f_n$ :要素に作用する法線方向のばね力、 $f_s$ :要素に作用する接線方向のばね力、 $\eta_n$ :法線方向の減衰係数、 $\eta_s$ :接線方向の減衰係数を示す。

法線方向のばねは図-3に示すように、計算開始時に接触している要素間においては、その初期接触量 $q_{n0}$ を差し引いて接触力を0とするものである。引張については引張強度に達するまでは線形弾性とし、その後は引張破壊エネルギー $G_F$ によって軟化勾配を変化させる1/4モデル<sup>11, 15)</sup>に従ってばね力を低減させた。ここで、引張破壊エネルギー $G_F$ は次式によって求められ、単位面積当たりの、完全に開口したひび割れを形成するのに要するエネルギーに等しいとした<sup>16)</sup>。

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_{ck} \quad (4)$$

ここで、 $d_{\max}$ :粗骨材の最大寸法(mm)、 $f'_{ck}$ :圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)。

また、引張側終局変位 $q_{nf}$ を超えた後の再接触では、引張に対して抵抗しないものとし、計算開始時に接触していない要素間においては、引張抵抗力は存在しないものとした。

法線方向の圧縮側にはコンクリートの非線形性を表現するために、任意の圧縮応力限界に漸近するポポビクス式<sup>14, 15)</sup>による関係を与えた。

$$f_n = f_{n\max} \left( \frac{q_n}{q_{n\max}} \right) \frac{N}{(N-1) + (q_n/q_{n\max})^N} \quad (5)$$

ここで、 $f_n$ :法線方向のばね力、 $q_n$ :法線方向ばねの変形量、 $f_{n\max}$ :法線方向ばねの強度(コンクリートの圧縮強度に相当するばね力)、 $q_{n\max}$ :強度に対応するばねの変形量(最大荷重時の変形量に相当するばねの変形量)、 $N$ :非線形パラメータ。

接線方向ばねは、図-4に示すような線形モデルとし、モール・クーロンの限界状態に達すると塑性的に滑るものとした。

$$f_s = \bar{f}_s + k_s \Delta q_s \quad (6)$$

$$|f_s| \leq C + f_n \tan \phi \quad (7)$$

ここで、 $f_s$ :要素に作用するせん断方向のばね力、 $\bar{f}_s$ :前段階のせん断方向のばね力、 $k_s$ :接線方向のばね係数、 $\Delta q_s$ :前段階からの接線方向ばねの変形量の増分、 $C$ :粘着力、 $\tan \phi$ :摩擦係数。

ただし、粘着力と摩擦角は図-5に示すように塑性滑り量に比例して低下するものとした。すなわち、

$$C = \alpha C_0 \quad (8-a)$$

$$\tan \phi = \alpha (\tan \phi)_0 \quad (8-b)$$

$$\alpha = 1 - (q_s \leq q_{s\text{yield}}) \quad (9-a)$$

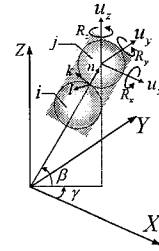


図-1 3次元全体座標系と局所座標系

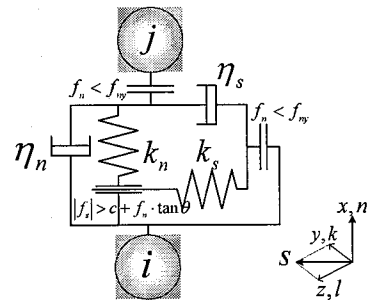


図-2 局所座標系における接触力モデル

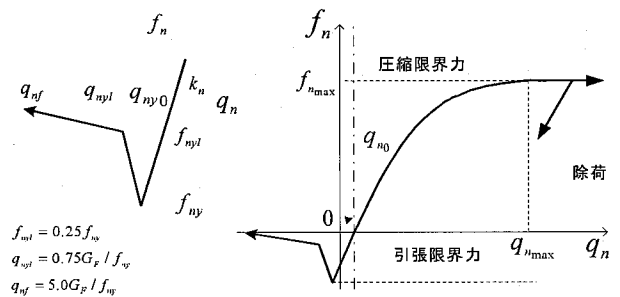


図-3 法線方向ばねの荷重～変形関係

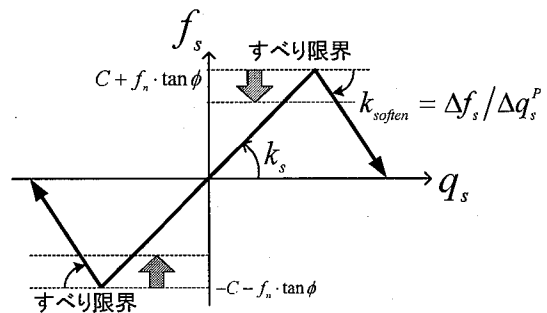


図-4 接線方向ばねの荷重～変形関係

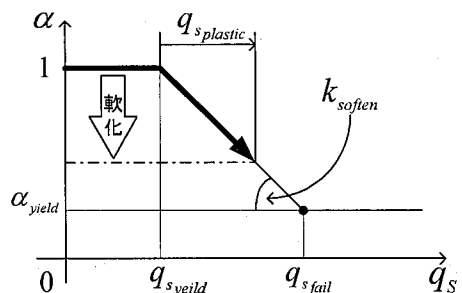


図-5 摩擦力・粘着力の低減

$$\alpha = 1 - \left( \frac{1 - \alpha_{yield}}{q_{s\,fail} - q_{s\,yield}} \right) q_{s\,plastic} \quad (q_{s\,yield} < q_s < q_{s\,fail}) \quad (9-b)$$

$$\alpha = \alpha_{yield} \quad (q_s \geq q_{s\,fail}) \quad (9-c)$$

$$q_{s\,plastic} = q_s - q_{s\,yield} \quad (10)$$

$$q_{s\,fail} = \left( \frac{R_i + R_j}{2} \right) \cdot \gamma_{s\,fail} \quad (11)$$

ここで、 $\alpha$ :低減係数、 $C_0$ :初期の粘着力、 $(\tan \phi)_0$ :初期の摩擦係数、 $q_s$ :せん断方向の変形量、 $q_{s\,yield}$ :モール・クーロンのすべり限界条件に達したときのせん断方向の変形量、 $q_{s\,plastic}$ :せん断方向の塑性変形量、 $q_{s\,fail}$ :せん断方向の破壊に相当する変形量、 $R$ :要素の半径、 $\alpha_{yield}$ :最終縮小率、 $\gamma_{s\,fail}$ :軟化終了変形角。

上記の限界条件から法線方向ばね力とせん断ばね力は図-6に示すような限界状態を有し、その限界線が塑性滑り量に応じて相似的に縮小することとなる。

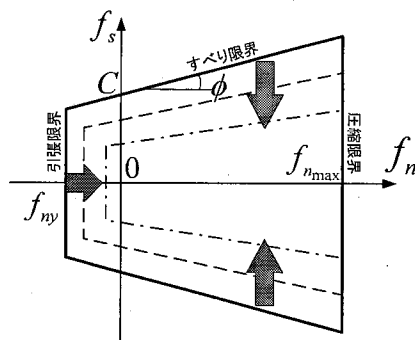


図-6 限界条件式の挙動

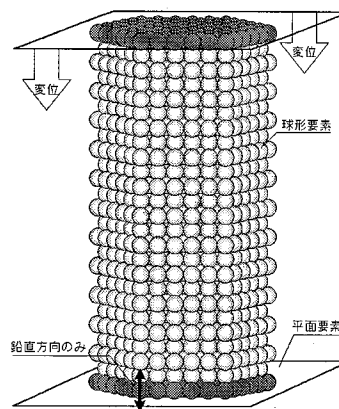


図-7 解析モデル

### 2.3 解析モデル

シミュレーション解析するための要素配列モデルは、図-7に示すものである。直径10mm (R=5.0mm)の球形要素2083個を用いた最密充填配列とし、解析モデルの上下を平面要素ではさみ、上側の平面を実験と同条件となる時間制御される変位を与えた。重力は外力として与え、端面摩擦を考慮してモデルの最上段、最下段の球形要素は鉛直方向の自由度以外は拘束した。

### 3. 高速破壊実験と解析パラメータ

破砕片のシミュレーション解析の適用性を確認するため、直径10cm、高さ20cmの供試体の高速載荷破壊実験を行った。コンクリートの配合は表-1に示すものであり、水セメント比61.5%で静的強度 $22\text{N/mm}^2$ のものである。図-8に静的および高速載荷実験の荷重～変形関係を示す。高速載荷では耐力が $28\text{N/mm}^2$ とひずみ速度効果により静的強度の27%大きな値となっている。

解析に用いたパラメータを表-2に示す。本研究では、軟化領域の構成則パラメータの飛散片の速度や大きさに与える影響を考察するため、軟化終了変形角 $\gamma_{s\,fail}$ と引張破壊エネルギー $G_F$ をそれぞれ変化させた。すなわち、まず引張破壊エネルギー $G_F$ を $3.9\text{ (J/m}^2\text{)}$ と固定した上で、軟化終了変形角 $\gamma_{s\,fail}$ を $0.125, 0.175, 0.225\text{ (rad)}$ と変化させた。また、軟化終了変形角 $\gamma_{s\,fail}$ を $0.175\text{ (rad)}$ と固定した上で破壊エネルギー $G_F$ を $1.95, 3.9, 7.8\text{ (J/m}^2\text{)}$ と変化させた。

その他の解析パラメータについては既往の研究<sup>14)</sup>に基づいて決定した。

表-1 コンクリート配合表

最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	粗骨材		水セメント		粗骨材			単位量 (kg/m <sup>3</sup> )
		W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	混和剤	
20	12.0	61.5	46.5	160	261	864	1025	2.61	

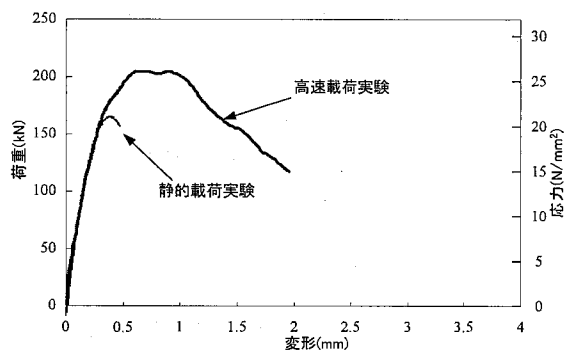


図-8 荷重～変形関係

表-2 解析パラメータ

引張破壊エネルギー $G_F$ (J/m <sup>2</sup> )	3.9	1.95	3.9	7.8
軟化終了変形角 $\gamma_{s\,fail}$ (rad)	0.125	0.175	0.225	0.175
ばね定数	法線方向 $k_n$ (N/mm)	1.06 × 10 <sup>5</sup>		
	接線方向 $k_t$ (N/mm)	2.73 × 10 <sup>4</sup>		
減衰定数 $h$	0.05			
粘着力 $C$ (N)	272			
摩擦角 $\phi$ (°)	20			
引張限界力 $f_m$ (N)	-33.6			

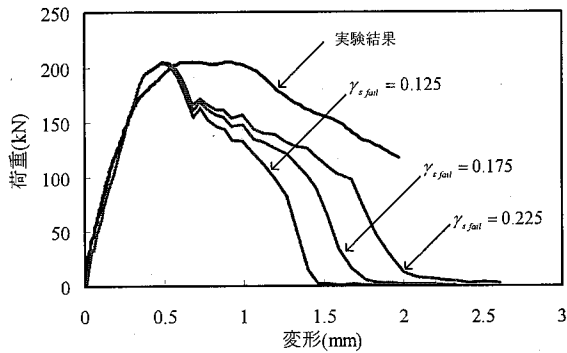


図-9 荷重～変形関係

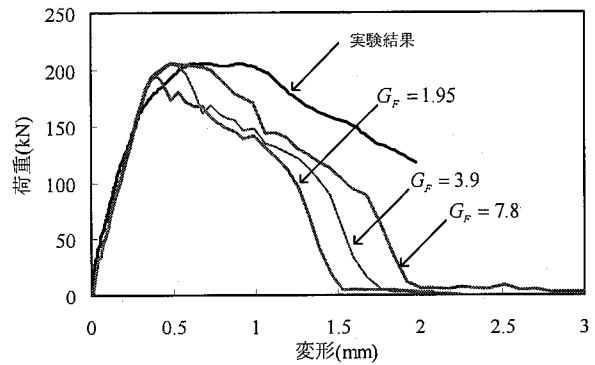
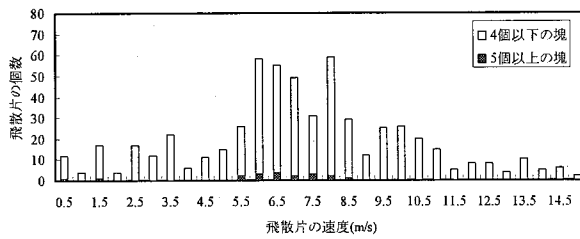
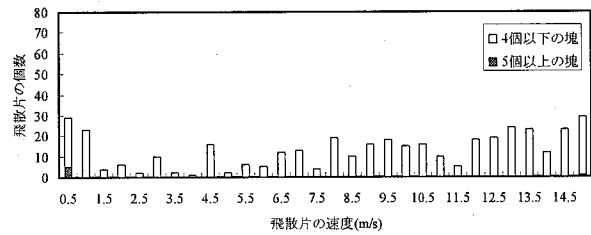


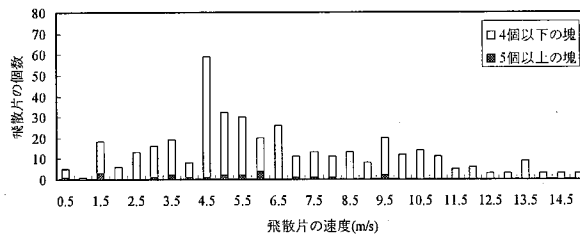
図-11 荷重～変形関係



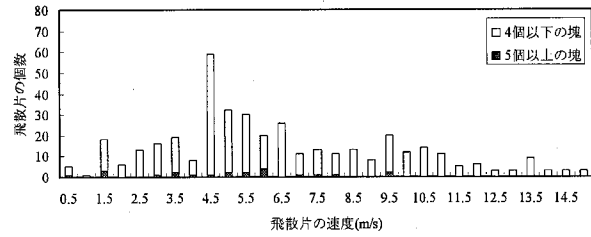
(a)  $\gamma_{s\text{fail}} = 0.125 (G_F = 3.9)$



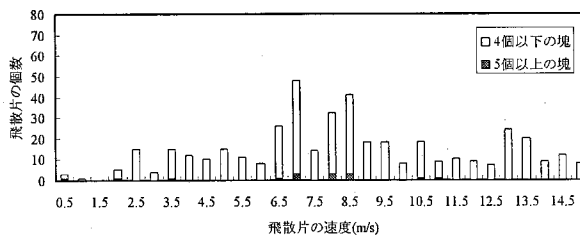
(a)  $G_F = 1.95 (\gamma_{s\text{fail}} = 0.175)$



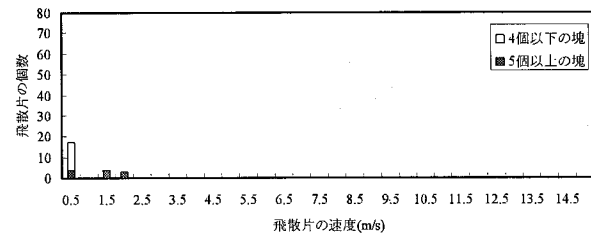
(b)  $\gamma_{s\text{fail}} = 0.175 (G_F = 3.9)$



(b)  $G_F = 3.9 (\gamma_{s\text{fail}} = 0.175)$



(c)  $\gamma_{s\text{fail}} = 0.225 (G_F = 3.9)$



(c)  $G_F = 7.8 (\gamma_{s\text{fail}} = 0.175)$

図-10 速度分布

図-12 速度分布

#### 4. 解析結果

軟化終了変形角  $\gamma_{s\text{fail}}$  を 0.125, 0.175, 0.225 (rad) と変化させた場合の解析結果から得られた、荷重～変形関係を実験結果とあわせて図-9 に示す。初期勾配・最大荷重は、実験結果を概ねシミュレートできている。しかし、最大荷重後に実験では少し荷重が維持された後に低下するのに対して、解析ではすぐに荷重が低下しておりあまり良いシミュレーション結果は得られていない。ただし、軟化勾配は軟化終了変形角が大きいほど、勾配が緩やかに

なる傾向がある。

図-10 に解析結果から得られた飛散片の速度分布をそれぞれ示す。いずれのケースも、5 個以上の要素によって形成された塊の飛散速度の付近に最大頻度が現れる。最大頻度の速度に着目すると、 $\gamma_{s\text{fail}} = 0.125$  (rad) のとき 6.0m/sec、 $\gamma_{s\text{fail}} = 0.175$  (rad) のとき 4.5m/sec、 $\gamma_{s\text{fail}} = 0.225$  (rad) のとき 7.0m/sec であり、軟化終了変形角に対する飛散速度の明瞭な傾向は見られない。

図-11 に引張破壊エネルギー  $G_F$  を 1.95, 3.9, 7.8 (J/m<sup>2</sup>) と変化させた場合の、荷重～変形関係を示す。引張破壊

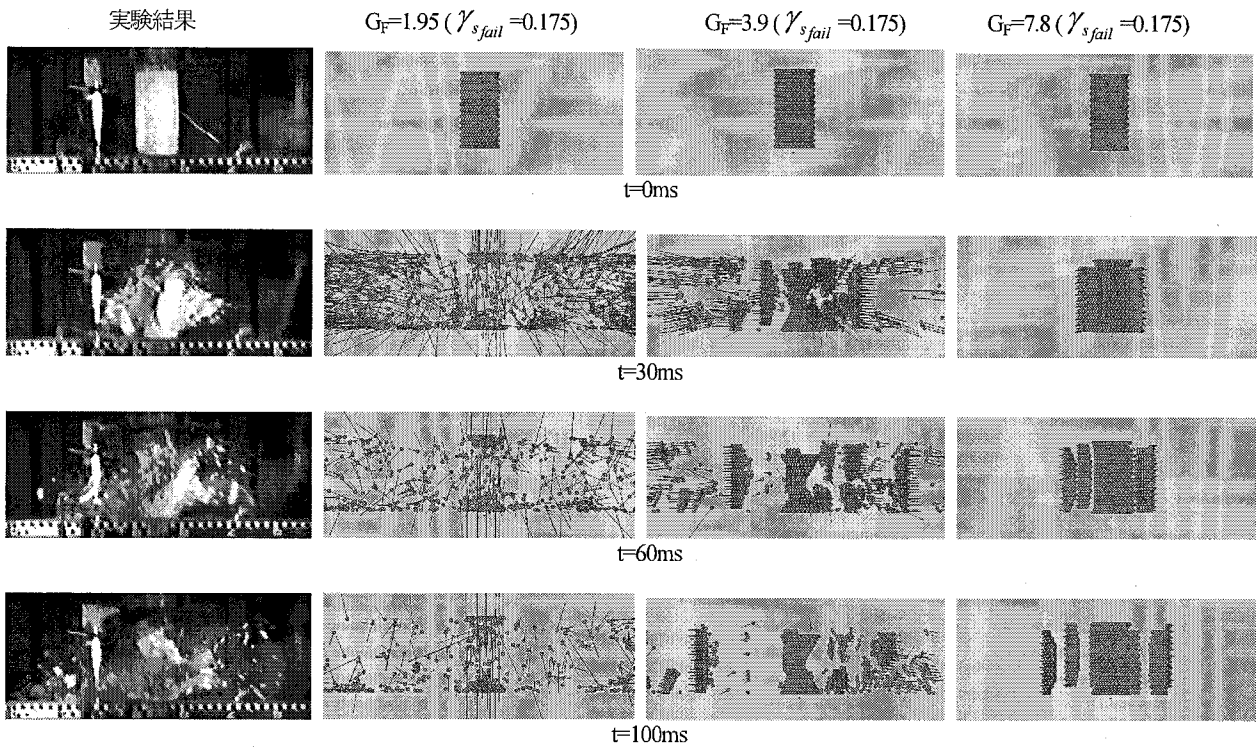


図-13 破壊形態

エネルギーが小さいほど、最大荷重時の変位は小さくなる傾向がある。そのため、 $G_F = 1.95 \text{ (J/m}^2\text{)}$ のときの最大荷重は  $195\text{kN}$  に対して、 $G_F = 3.8, 7.8 \text{ (J/m}^2\text{)}$ のときは  $205, 206\text{kN}$  となり、 $10\text{kN}$  程度大きくなっている。また、 $G_F = 7.8 \text{ (J/m}^2\text{)}$ の場合には、最大荷重後に荷重が低下し始めるまでにやや粘りが生じ、実験の傾向と一致しているようにも見受けられる。

図-12 に軟化終了変形角  $\gamma_{sfail}$  を  $0.175$  と固定して引張破壊エネルギー  $G_F$  を変化させた場合の飛散片の速度分布を示す。 $G_F = 1.95 \text{ (J/m}^2\text{)}$ では、飛散片の速度は広く分布している。なお、飛散片の速度は最大のもは  $84\text{m/sec}$ にも達している。一方、 $G_F = 7.8 \text{ (J/m}^2\text{)}$ では、塊が形成されるため、飛散速度は最大でも  $2.0\text{m/sec}$ である。このように、引張破壊エネルギーの飛散片の速度・塊の形成に与える影響は大きいことがわかる。

図-13 には  $0, 30, 60, 100\text{msec}$ における破碎粒子の挙動を実験結果と比較して示す。軟化終了変形角を変化させた場合を比較すると、塊を形成して飛散する要素、ばらばらになって飛散する要素が混在しており、また、破碎後には円錐状の塊が残されており、実験結果と似た傾向が得られているが、要素の飛散に大きな違いは見られない。

図-14 には、解析結果から得られた吸収エネルギー～運動エネルギー関係を示す。図中の( )内は、エネルギーの変換率を示している。本解析手法においては、吸収エネルギーと運動エネルギー関係に明瞭な傾向はみられない。また、 $\gamma_{sfail} = 0.175, G_F = 1.95$ のときは、変換率が  $1$ を大きく上まわる結果となった。

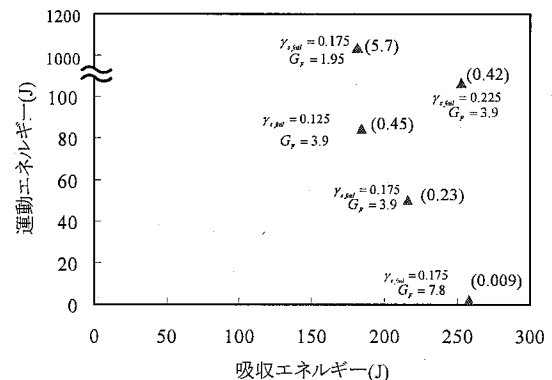


図-14 吸収エネルギー～運動エネルギー

## 5. 結言

本研究は軟化終了変形角  $\gamma_{sfail}$  および引張破壊エネルギー  $G_F$  が、飛散片の速度や大きさに与える影響を考察した。その結果、引張破壊エネルギー  $G_F$  が小さいと、飛散片は細かく分裂し、個々の破砕片の飛散速度が大きくなることがわかった。逆に引張破壊エネルギー  $G_F$  が大きいと、飛散片は塊を形成し、飛散速度は小さくなる。

## 参考文献

- 1) 伯野元彦：破壊のシミュレーション，森北出版，pp.25-38，1997。
- 2) Cundall, P. A. and Strack, O. : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, pp. 47-65. 1979.
- 3) Tarumi, Y. and Hakuno, M. : A Granular Assembly

- Simulation for the seismic Liquefaction of Sand, Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. JSCE, Vol. 5, No. 2, pp. 333~342, 1988.
- 4) Casaverde, M. L. Ishikawa, K. Tarumi, Y. and Hakuno, M : Distinct Element Analysis For Rock Avalanche, Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. JSCE, Vol. 6, No.1, pp. 131s~140s, 1989.
  - 5) Hakuno, M. and Uchida, Y. : Application of The Distinct Element Method to The Numerical Analysis of Debris Flows, Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. JSCE, No. 432/I-16, pp. 75s~85s, 1991.
  - 6) Meguro, K. Ishikawa, K. and Hakuno, M : Fracture Analysis of Media Composed of Irregularly Shaped Regions by The Extended Distinct Element Method, Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. of JSCE, No. 437/I-17, pp. 131s~142s, 1991.10.
  - 7) 目黒公郎 : コンクリートの破壊解析への個別要素法の適用, コンクリート工学, Vol.31, No.5, pp.5-17, 1993.5.
  - 8) 下田義文, 鈴木真次, 石川信隆, 古川浩平 : 個別要素法によるモルタル片持ちばりの衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1467-1476, 1992.3.
  - 9) 鈴木真次, 石川信隆, 石川芳治, 水山高久, 古川浩平 : 高速载荷を受ける主鉄筋で補強したコンクリート製砂防ダム袖部模型の動的挙動と個別要素法による破壊解析, 土木学会論文集, No.567/VI-35, pp.141-160, 1997.6.
  - 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, 1998.3.
  - 11) N. Monteiro Azevedo, J. V. Lemos : Particle Shape Influence on The Fracture Behavior of Concrete, Proceedings of The 2<sup>nd</sup> International PFC Symposium, 28-29 October 2004., pp.323-330.
  - 12) 原木大輔, 白石博文, 香月智 : 個別要素法によるコンクリート圧縮破壊解析におけるモール・クーロン条件の及ぼす影響, 応用力学論文集, Vol.7, No2, pp.757-766, 2004.8.
  - 13) 原木大輔, 香月智 : 個別要素法によるコンクリート供試体の高速破壊挙動解析の試み, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1645-1652, 2005.3.
  - 14) 原木大輔, 香月智, 藤掛一典 : 個別要素法のコンクリート破片飛散シミュレーションへの応用, 応用力学論文集, Vol.9, pp.667-678, 2006.8.
  - 15) 武藤信太郎, 中村光, 田辺忠顕, スリソロ ワラポン, 李相勲 : メゾスケール解析によるコンクリートと異形鉄筋の付着解析, 応用力学論文集, Vol.7, pp.767-774, 2004.8.
  - 16) (社) 土木学会 : コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.