

1. 緒言

土石流防護のために設置されたコンクリート製砂防えん堤において、土石流中の巨礫によってその袖部が破壊されることがあるが、破壊されたコンクリート片が流下して問題となる可能性がある。衝撃によって与えられたエネルギーがどのような配分で破壊に至っているかを知ることは、このような破壊推定にとって重要である。よって、破砕片について、例えば、どのような大きさでどのくらいの速さの破砕片が発生するかなど、その挙動を知ることにも必要と思われる。そこで本研究は、基礎的段階として材料レベルでの構成則と飛散片の挙動を検討するため、個別要素法による高速載荷を受けるコンクリート円柱供試体の飛散片シミュレーションを試み、飛散片の大きさや速度について実験結果と比較検討を行ったものである。

2. 解析手法

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、三次元における運動方程式を中心差分法を用いて解く。ただし、速度項は後進差分とした。

要素間の接触力は図-1 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。法線方向のばねは図-2 に示すように、引張側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 モデルに従ってばね力を低減させた。また、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による関係を与えた。接線方向ばねは、図-3 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。ただし、塑性滑り量に比例して低下するものとした。

解析モデルは図-4 に示すように、高さ 20cm、直径 10cm の円柱供試体を、球形要素 2083 個を用いてモデル化した。また、解析モデルの上下を平面要素ではさみ、上側の平面を高速載荷(2.0m/s)の条件で時間制御される変位を与えた。

本研究では、圧縮強度 30N/mm^2 のコンクリート供試体を対象として、解析パラメータを決定した¹⁾。特に、本解析手法は、飛散片の大きさや速度は引張側の軟化特性に大きく影響を受けることから、引張側の構成則パラメータを決定するために、直接引張実験を実施した。その結果、引張破壊エネルギー G_F および引張強度 f_{ny} にばらつきがあり、引張破壊エネルギーと引張強度の平均 \bar{G}_F 、 \bar{f}_{ny} 、および、標準偏差 σ_{GF} 、 σ_{fny} を用いて、 $G_F \pm \sigma_{GF}$ 、 $f_{ny} \pm \sigma_{fny}$ の組み合わせ 5 通りの解析を行うことにより引張特性のばらつきを考慮することとした。

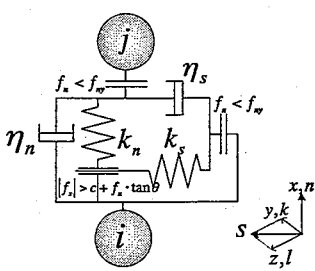


図-1 局所座標系における接触力モデル

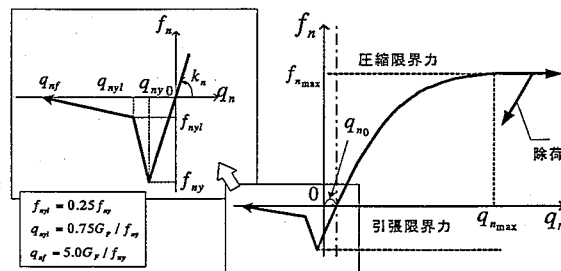


図-2 法線方向ばねの荷重～変形関係

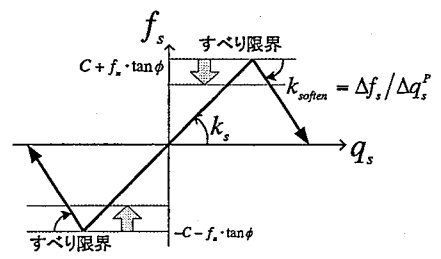


図-3 接線方向ばねの荷重～変形関係

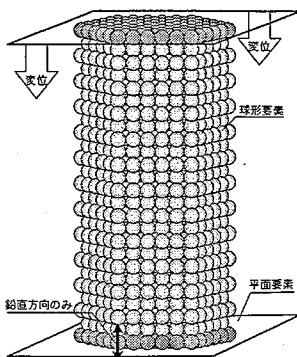


図-4 解析モデル

項目	平均	標準偏差	値
引張破壊	平均 \bar{G}_F (J/m^2)		55.86
エネルギー	標準偏差 σ_{GF} (J/m^2)		20.9
引張限界力	平均 \bar{f}_{ny} (N)		-99.5
	標準偏差 σ_{fny} (N)		17.4
ばね	法線方向 k_n (N/mm)		7.45×10^7
定数	接線方向 k_s (N/mm)		4.56×10^7
	減衰定数 h		0.01
	粘着力 C (N)		510
	摩擦角 ϕ ($^\circ$)		15
	軟化終了変形角 $\gamma_{s,fin}$ (rad)		0.03

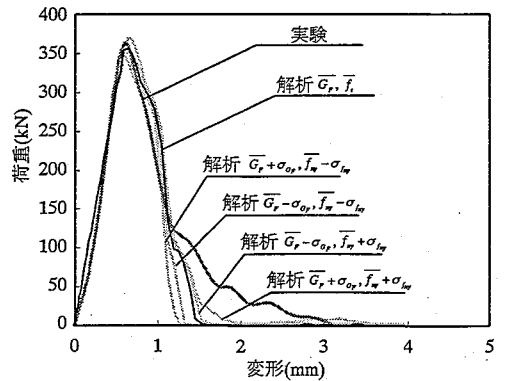


図-5 荷重～変形関係

3. 解析結果

引張破壊エネルギー G_F および引張強度 f_{ny} の組み合わせ 5 通りについて、荷重～変形関係を実験結果と比較して図-5 に示す。いずれの組み合わせにおいても、初期勾配、最大荷重および軟化勾配の最大荷重の 2/3 の位置までは、実験結果を良好にシミュレートできている。それ以降は、実験結果と比べて急勾配となる。その勾配は引張破壊エネルギー G_F および引張強度 f_{ny} の組み合わせによって異なり、 $\overline{G_F} - \sigma_{G_F}$ 、 $\overline{f_{ny}} - \sigma_{f_{ny}}$ の組み合わせのとき、勾配がもっとも急になっている。

図-6 には、引張破壊エネルギー G_F の平均および引張強度 f_{ny} の平均の組み合わせのときの、載荷後の要素の挙動を実験結果と比較した。解析結果において、載荷後、要素が塊を形成して移動しており、実験結果の飛散片を表現できている。

引張破壊エネルギー G_F と引張強度 f_{ny} の全組み合わせから得られた累計の飛散片の速度分布を図-7 に示す。実験では最頻値が 2m/s で最大速度は 10m/s まで達しているのに対して、解析では最頻値が 2m/s であるが最大速度は 4m/s にしかならない。

図-8 に飛散片の質量と速度の関係を実験結果と合わせて示す。実験は大きなばらつきがあるものの、概して、重い飛散片の速度は小さく、軽いものの速度が大きくなるのに対して、解析は質量の大きさにかかわらず、平均して 2m/s を中心に ± 1 m/s でばらついている。

図-9 にコンクリート供試体の吸収エネルギーと飛散片の運動エネルギーの関係を示す。実験結果と比較して、吸収エネルギーは全体的に小さくなっているが、飛散片の有する運動エネルギーの分布の範囲は、おおむね一致している。また、引張破壊エネルギー G_F の平均および引張強度 f_{ny} の平均の組み合わせのとき、吸収エネルギーの運動エネルギーに対する変換率は 2.0% であり、実験結果の平均のエネルギー変換率とほぼ一致していることがわかる。

4. 結言

本研究は、個別要素法による飛散片シミュレーションを試み、実験結果の飛散片の大きさや速度について比較検討を行った。その結果、直接引張実験により得られた引張側の構成則パラメータのばらつきを考慮することにより、高速荷重を受けるコンクリート円柱供試体の飛散現象をシミュレートできる可能性を示した。

参考文献

- 1) 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.

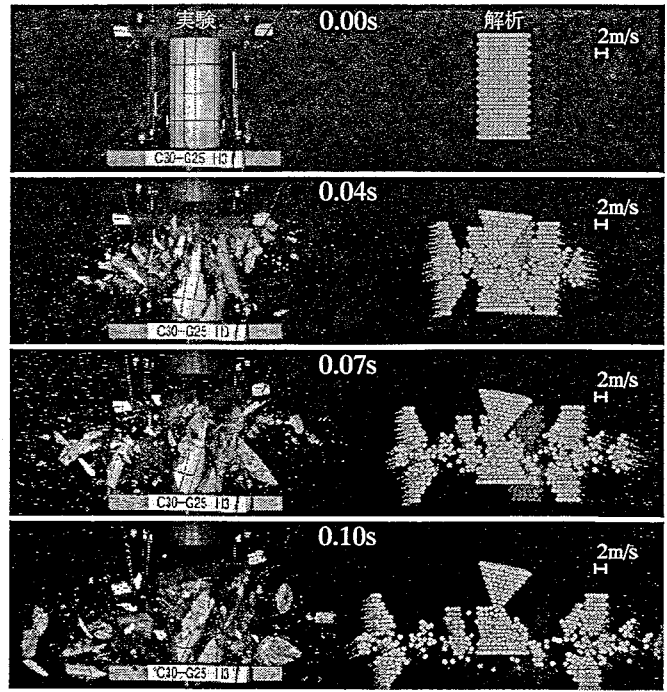


図-6 破壊形態 (G_F , f_{ny})

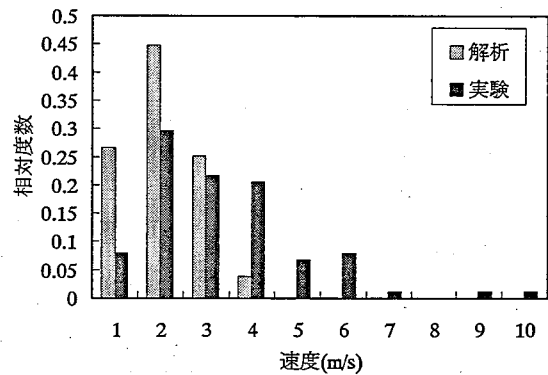


図-7 速度分布

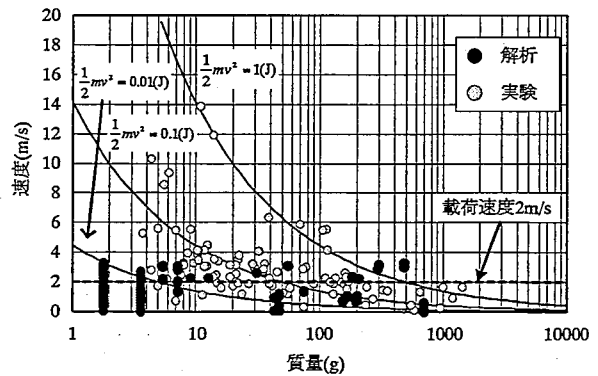


図-8 質量～速度関係

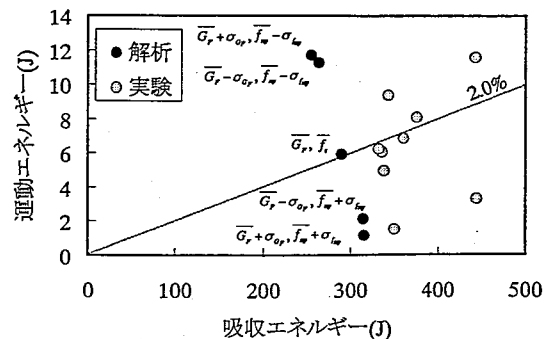


図-9 運動エネルギー～吸収エネルギー関係