

コンクリート飛散片シミュレーションにおける構成則パラメータの影響

防衛大学校 学生会員 ○原木 大輔
防衛大学校 正会員 香月 智

1. 緒言

コンクリート破砕片の飛散シミュレーションに適した三次元個別要素法の解析プログラムにおいて、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。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

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、圧縮側は線形とし、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。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し、その勾配は ψ_1, ψ_2 に従い変化するものとした。

シミュレーション解析するための要素配列モデルは、図-4 に示すような、直径 10mm ($R=5.0\text{mm}$)の球形要素 2083 個を用いた最密充填配列である。解析モデルの上下を平面要素ではさみ、上側の平面を急速载荷(2.0m/s)の条件となる時間制御される変位を与えた。

コンクリートの構成則パラメータは普遍に決定できるものではなく、図-5(a), (b)に示すようなコンクリー

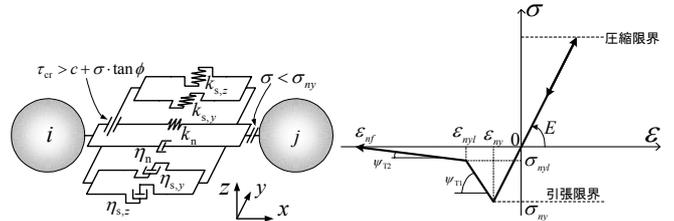


図-1 局所座標系における接触ばねモデル

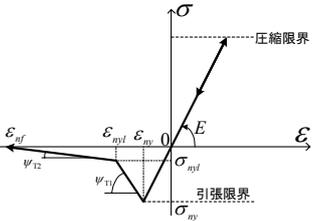


図-2 法線方向ばねの応力～ひずみ関係

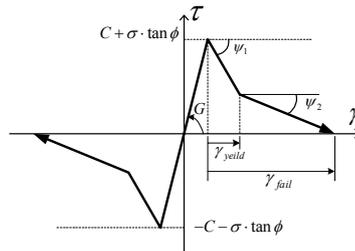


図-3 接線方向ばねの応力～ひずみ関係

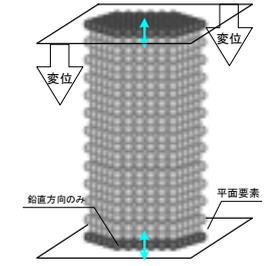
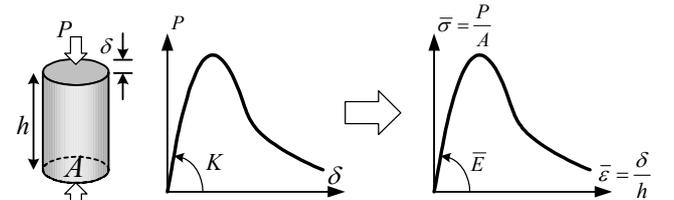
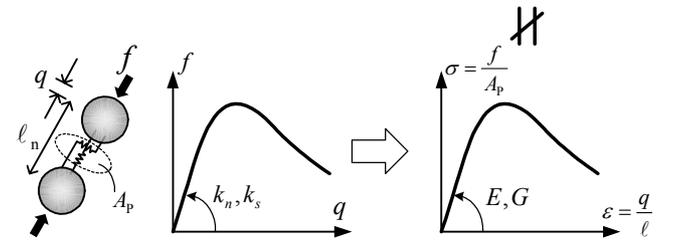


図-4 解析モデル



(a) 巨視的荷重～変形関係 (b) 巨視的応力～ひずみ関係



(c) 局所的ばね力～変形関係 (d) 局所的応力～ひずみ関係

図-5 巨視的構成則と局所的構成則(ばね)

表-1 構成則パラメータの算定

パラメータ	算定式	基準パラメータ
ばね剛性 E (N/mm ²)	$E = \frac{A_p}{3A' \sin \theta_v} \cdot \frac{1}{\sin \theta_v} \cdot \frac{\sin^2 \theta_v}{\sin^2 \theta_v + \nu \cos \theta_v \sin \theta_u (1 - 2 \sin^2 \theta_u)} \bar{E}$	1.169×10^4
G (N/mm ²)	$G = \frac{A_p}{3A' \sin \theta_v} \cdot \frac{\sin^2 \theta_v \cos \theta_v + \nu \sin \theta_u (\cos^2 \theta_v - 2 \sin^2 \theta_u)}{(\cos \theta_v - \nu \sin \theta_u) \{\sin^2 \theta_v + \nu \cos \theta_v \sin \theta_u (1 - 2 \sin^2 \theta_u)\}} \bar{E}$	1.015×10^4
粘着力 c (N/mm ²)	$c^0 = 1.4 \sigma_{ny}$	2.162
摩擦係数 (摩擦角) $\tan \phi$ (ϕ (°))	$\phi^0 = 2(\theta - 45^\circ)$	0.7542 37.02
軟化勾配 ψ_1	$\psi_1 = \alpha_1 \frac{A_p}{3A' \sin \theta_v} \cdot \frac{\sin^2 \theta_v \cos \theta_v + \nu \sin \theta_u (\cos^2 \theta_v - 2 \sin^2 \theta_u)}{(\cos \theta_v - \nu \sin \theta_u) \{\sin^2 \theta_v + \nu \cos \theta_v \sin \theta_u (1 - 2 \sin^2 \theta_u)\}} \beta_1$	
ψ_2	$\psi_2 = \alpha_2 \frac{A_p}{3A' \sin \theta_v} \cdot \frac{\sin^2 \theta_v \cos \theta_v + \nu \sin \theta_u (\cos^2 \theta_v - 2 \sin^2 \theta_u)}{(\cos \theta_v - \nu \sin \theta_u) \{\sin^2 \theta_v + \nu \cos \theta_v \sin \theta_u (1 - 2 \sin^2 \theta_u)\}} \beta_2$	
α_{yield}		0.5
引張限界力 σ_{ry} (N/mm ²)	$\sigma_{ny} = C_1 \bar{\sigma}_{ny}$	-2.162
引張破壊エネルギー G_F (J/m ²)	$G_{F, analysis} = \frac{(G_{F, ex} \times A)}{N}$	115.6

キーワード 3次元個別要素法, コンクリート飛散片, 構成則パラメータ

連絡先 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL : 046-841-3810

E-mail : g45076@nda.ac.jp

ト要素試験によって決定される。要素試験の「要素円の応力およびひずみは偏りなく平均的に分布している」という仮定が用いているが、弾性範囲後の挙動においては仮定が成立しない。図-5のように同じ局所的構成則を用いても、同時刻における応力状態(ひずみ状態)は場所によって異なる状態となる。また場所により、一部は破片となって飛び出し、一部は残ることになる。よって、これらの2つの応力~ひずみ関係は決して同じにならない。そこで本研究では、まず規則配列で最小要素スケールが5mm程度の解析法における構成則について検討するものとした。さらに軟化領域では周辺の弾性ひずみエネルギーの解放を吸収するために、塑性化した局所領域に急激に塑性ひずみが集中する。そのため比例関係が成立しないことを考慮し、これを補正するため補正係数 α を用いる。パラメータを決定するための基準とした実験結果より求めた解析パラメータを表-1に示す。本研究では、軟化領域の構成則パラメータの補正係数 α を変化させ、その影響について検討した。

3. 解析結果

補正係数 α を1.0から0.005まで変化させた場合の、応力~ひずみ関係を図-5に示す。また、パラメータを決定するための基準とした実験結果もあわせて示している。補正係数の大小にかかわらず初期勾配は変化しないが、小さくなるにつれて最大応力が大きくなり、その後の軟化勾配は緩やかになっている。すなわち、補正係数により軟化勾配を制御でき、 $\alpha=0.05$ のとき実験結果の応力~ひずみ関係を概ねシミュレートできている。

$\alpha=1.0, 0.05, 0.005$ のときの载荷後0.01s後の破壊状態を図-7に、その時の飛散した破片の質量~速度関係を

図-8に示す。補正係数 $\alpha=1.0$ のとき、上下の端面を含む円錐状の塊を残し、それ以外の要素は小さい塊を形成し激しく飛散していることがわかる。また、 $\alpha=0.05$ のときは、 $\alpha=1.0$ のときと同様の円錐状の塊と、側面の要素が6つの大きな塊として外側へはき散していることがわかる。 $\alpha=0.005$ のときは、飛散する破片が発生しておらず、塊のままどまっていることがわかる。

4. 結言

本研究は、軟化領域の構成則パラメータの補正係数 α が飛散片の速度や大きさに与える影響を考察した。その成果を以下に示す。

- (1) 補正係数 α が小さいと、応力~ひずみ関係における軟化勾配は緩やかになり、 $\alpha=0.05$ のとき実験結果の応力~ひずみ関係を概ねシミュレートできる。
- (2) 補正係数 α が小さいと、ばらばらになって飛散し、補正係数 α が大きいと、飛散要素は大きな塊を形成する。

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, 2006.8

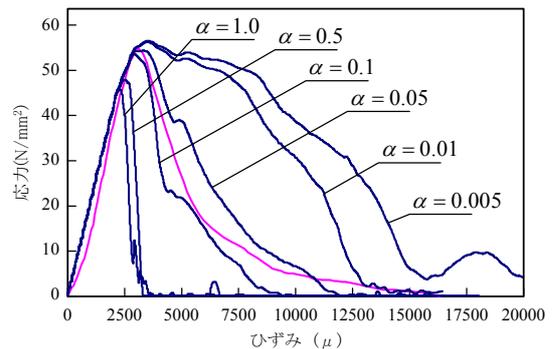


図-6 応力~ひずみ関係

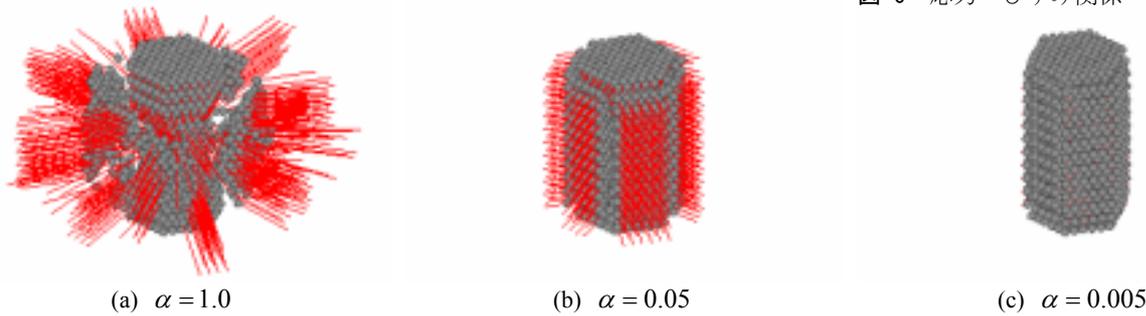


図-7 破壊形態

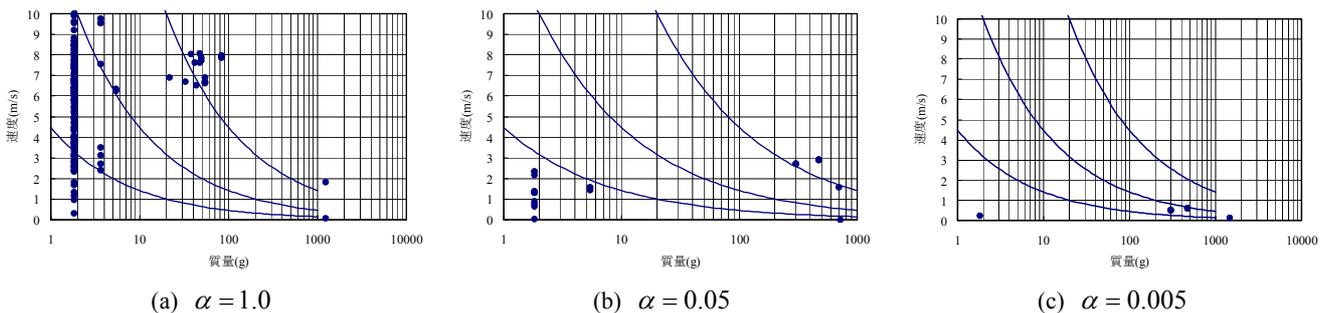


図-8 飛散片の速度~質量関係