個別要素法を用いたモービルクラッシャによるコンクリート塊の破碎性能評価

Evaluation of Crushing Performance of Concrete Blocks by Mobile Crusher using Distinct Element Method

里見知昭*・山藤佑樹**・高橋弘***

Tomoaki SATOMI, Yuki SANDO and Hiroshi TAKAHASHI

*正会員 工博 東北大学大学院助教 環境科学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

**東北大学大学院博士前期課程 環境科学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

***正会員 工博 東北大学大学院教授 環境科学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

Recently, on-site recycling method used mobile crusher has been receiving considerable attention. As the function of the mobile crusher is to crush the concrete blocks and to use the fragments as the aggregates at the construction sites, the machine needs to have an ability to crush the concrete blocks to the target particle sizes. However, many parameters of the machine such as the discharge width and rotation number affect the crushing performance. So the effect of these parameters on the crushing performance is not cleared. In this paper, the simulation model by using Distinct Element Method (DEM) to predict the crushing performance of the mobile crusher was developed, and then the effect of several parameters on the crushing performance was analyzed by using Principal Component Analysis (PCA), which is one of multivariate analysis technique.

Key Words: Mobile crusher, concrete blocks, DEM, statistical analysis

1. はじめに

近年、土地の再開発に伴って建築物のスクラップアンドビルドが盛んに行われ、大量の建設副産物が発生している。そこで、平成 12 年に施行された建設工事に係る資材の再資源化などに関する法律（建設リサイクル法）は、コンクリート、アスファルト・コンクリート、木材など特定建設資材を用いた建築物を解体する際に、これらの資材廃棄物を分別し再資源化することを義務付けている。平成 12 年度の統計ではコンクリート塊の再資源化率は 96 %以上であり、それ以降非常に高い水準を保っている¹⁾。建設現場で発生したコンクリート塊は主に中間処理施設にて選別や破碎などが行われ、路盤材や埋戻し材、再生骨材などに再資源化されている。つまり、大量のコンクリート塊は建設現場から中間処理施設へ運ばれ、再資源化後に再び建設現場に運ばれている。しかし、大量のコンクリート塊を輸送する過程は非効率的であるばかりでなく、大量のダンプトラックの往来によって環境への悪影響も懸念されている。

そこで近年、現場循環型工法と呼ばれる工法が注目されている²⁾。コンクリート塊の場合、この現場循環型工法では、モービルクラッシャを用いて建設現場内でコンクリート塊を破碎し再資源化するため、コンクリート塊を中間処理施設へ輸送する必要がなくなり、建設現場から新たな建設現場へ即時に搬入することができる。したがって、従来工法に比べて燃料消費量の減少や輸送距離の短縮等によるコストの削減および作業の効率化が可能になる。また、二酸化炭素の排出抑制にも繋がり、大気汚染を低減できる

ため、環境に配慮した工法でもある。

モービルクラッシャの破碎原理は中間処理施設の固定式クラッシャとほぼ同じである。中間処理施設のクラッシャの場合、目的にあった粒度範囲の産物を得るために 1 次破碎と 2 次破碎の 2 段階で行われることが多い。しかし、モービルクラッシャは建設現場内でできる限り少ない破碎回数で目的粒度の産物を得ることを要求されることから、さらなる高性能化が望まれている。

モービルクラッシャ用の破碎機として一般に使われているジョークラッシャについては従来から研究されており、徳田ら^{3), 4)}は可動板の運動機構や破碎荷重と破碎材料の内部応力の関係について検討している。しかしながら、モービルクラッシャの機械要素と破碎性能に関するデータは少なく、十分に検討されていないのが現状である。モービルクラッシャによるコンクリート塊の効率的な破碎方法を検討するためには、条件を種々変化させて実験を行う実験的アプローチが考えられる。しかし、モービルクラッシャの破碎機の破碎性能に関するパラメータは、投入物の大きさや形状などの基本的性質、クラッシャの排出口幅や回転数などの機械的性質などと非常に多い。したがって、それぞれのパラメータが破碎に及ぼす影響を実験的に検討するには多大な時間とコストを要するため、非効率かつ非経済的である。そこで、数値シミュレーションによる検討が望ましく、例えば Refahi ら^{5), 6)}は個別要素法 (Distinct Element Method; DEM)⁷⁾を用いてジョークラッシャによる岩石の破壊挙動のモデル化について議論している。以上の

背景のもと、本研究では個別要素法を用いたモービルクラッシャによるコンクリート破碎のシミュレーションモデルを開発し、実機による破碎実験結果とシミュレーション結果を比較検討する。そして、モービルクラッシャの破碎性能に関する機械パラメータ（クラッシャの排出口幅、回転数、可動幅）を種々変化させて、破碎性能に及ぼす機械パラメータの影響について議論する。

2. 個別要素法を用いたシミュレーションモデルの開発

2.1 個別要素法の概要

DEM では解析対象物を剛体要素の集合体であると仮定し、個々の要素に対する運動方程式（式(1)、式(2)を参照）を差分近似して時間領域で前進的に解くことで、要素の挙動を解析する手法である^{8),9)}。要素同士が接触している場合のみ相互作用力が働き、図-1 に示すように要素間の法線方向および接線方向に弾性バネと粘性ダッシュポットを設定し、接線方向のみに摩擦を考慮したスライダを追加して要素間に働く力を表現している。

$$m_i \cdot \ddot{\mathbf{u}} + C_i \cdot \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{F}_i = 0 \quad (1)$$

$$I_i \cdot \ddot{\boldsymbol{\phi}} + D_i \cdot \dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{M}_i = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{F}_i$ は要素 i に働く合力、 $\mathbf{M}_i$ は要素 i に働く合モーメント、 m_i は要素 i の質量、 I_i は要素 i の慣性モーメント、 C_i 、 D_i は減衰定数、 $\mathbf{u}$ は要素 i の変位ベクトル、 $\boldsymbol{\phi}$ は要素 i の回転変位ベクトルである。

図-1 のノーテンションジョイントは要素同士が接触している間、つまり圧縮時のみ作用する。そこで、結合した要素間に対してノーテンションジョイントを無効にすることで引張への抵抗にも許容できるため、解析対象物は連続体の挙動を示す。一方、法線方向と接線方向それぞれに破壊基準を超える力が要素間に働いた場合（式(3)、式(4)を参照）、結合を解除することで解析対象物は粒状体の挙動を示す。このように、要素間の結合および結合破壊を想定することで、連続体から粒状体へ遷移する挙動を表現することができるようになる。

$$f_n \geq S_e \cdot a \quad (3)$$

$$f_s \geq C_e \cdot a + f_n \tan \phi_e \quad (4)$$

$$a = \frac{2\pi}{3} (r_i^2 + r_j^2 - r_i \cdot r_j) \quad (5)$$

ここで、 f_n 、 f_s はそれぞれ法線方向と接線方向の要素間に作用する力、 S_e は要素間引張強度、 C_e は要素間粘着力、 ϕ_e は要素間摩擦角、 a は要素間接触面積（式(5)を参照）、 r_i 、 r_j は要素 i と要素 j の半径である。

2.2 クラッシャのモデル化

モービルクラッシャの破碎装置に多く用いられているジョークラッシャは、可動板と固定板の間に投入された破碎材料を可動板の偏心運動によって破碎する一次破碎装置である。ジョークラッシャの特徴として、構造が簡単であること、機体に対して投入口が大きいこと、比較的強靱

図-1 DEM の粒子間接触モデル

図-2 クラッシャのモデル化

で処理量が多いことなどが挙げられる。ジョークラッシャをモデル化するにあたり、可動板の動きをてこクラック機構と考えた³⁾。本研究ではプレートの幅も考慮し、図-2 に示すようにクラッシャを3次元でモデル化した。ここで、 p_o 、 p_a 、 p_a' 、 p_b 、 p_b' 、 p_c 、 p_b 、 p_g はそれぞれ可動板の回転中心、可動板の上端（外側）、可動板の上端（内側）、可動板とトグルプレートの結合点、可動板下端、トグルブロック、固定板上端、固定板下端である。また、 L_{a1} 、 L_{a2} 、 L_b 、 L_c 、 L_d 、 L_f 、 L_g はそれぞれ可動板の回転半径の長軸、短軸、可動板長さ、トグルプレート長さ、回転中心とトグルブロックの距離、投入部の開口幅、固定板の垂直方向の長さで、 ψ_a 、 ψ_b 、 ψ_o はそれぞれ可動板ブロックの回転角、固定板の回転角、偏心軸の傾きである。 p_c を固定して p_a が楕円を描いて運動することで p_b と p_b' が揺動するため、可動板が前

後に運動して投入物を挟み込み破碎することができる。

さらに、ジョークラッシャの壁面は平らではなく 10 個程度の山を持つ曲面である。そこで、この曲面におけるそれぞれの山を図-2(b)のような 2 次関数と考え、壁面のモデル化を行った。山の数は可動板と固定板のどちらも 10 個とし、可動板と固定板は互いの山と谷が噛み合うような曲面に設計した。 L_k 、 L_h 、 L_l はそれぞれ一つの山の幅、山の高さ、可動板の幅である。

3. コンクリート塊破碎のシミュレーションモデルに関する妥当性検討

本章では、コンクリート塊の破碎後の粒度分布を検討対象として、実機による実験結果とシミュレーション結果について比較検討する。なお、粒度分布は個数基準の粒径加積曲線によって表すことにした。

3.1 実機によるコンクリート塊破碎実験

(1) 試料の作製

試料の作製には、住友大阪セメント株式会社の普通ポルトランドセメント、コンクリート工事用の川砂利、7 mm の多用途敷砂利碎石、モルタル工事用の川砂（並粒）、および株式会社マノールのマノールポリマー3 倍溶液型（混和剤）を用いた。なお、今回はいわみ生コンクリート協同組合の生コンクリート標準配合表一覧に記されている、普通コンクリート（普通）20 mm¹⁰ の呼び強度 18 N/mm、スランブ 10 cm を参考に、配合比を表-1 のように設定した。

試料の大きさは、直径 200 mm×高さ 150 mm および直径 100 mm×高さ 100 mm の円柱、一辺 200 mm×高さ 150 mm および一辺 100 mm×高さ 100 mm の正三角柱であり、4 個ずつ計 16 個作製した。養生はエアコンで 20℃に設定した部屋において水中で 10 日間を行った。作製した試料を図-3 に示す。

(2) 実験方法

モービルクラッシャとして、図-4 に示すキャタピラージヤパン株式会社製の MC230/VERSION2 を用いた。本実験では、クラッシャの設定を排出口幅 28 mm、回転数 290 rpm に固定し、クラッシャへの試料の投入は図-5 の 2 方向で行った。以降、図-5(a)のように排出口の向きと同じ方向を「横方向」、図-5(b)のように排出口の向きに垂直な方向を「縦方向」と呼ぶこととする。それぞれの試料に対して 2 回ずつ、計 16 回の破碎実験を行った。実験手順は以下のとおりである。

1. 全試料の初期位置は投入部の高さとし、排出口に対して真上で試料を保持する。
2. 試料の向きを変えないように手を放し、クラッシャ内に試料を投入する。
3. 破碎終了後、図-6 のようにベルトコンベアから落下した試料をビニールシートで回収する。

(3) 実験結果

回収した破片に対してふるい試験を行い、粒度を測定した。個数基準の粒径加積曲線を図-7 に示す。図-8 はふるい

表-1 配合比

普通ポルトランドセメント [kg]	10.7
川砂利 [kg]	20.0
川砂 [kg]	34.8
砂利碎石 [kg]	19.8
水 [kg]	6.9
混和剤 [kg]	1.0

図-3 試料（円柱，正三角柱）

図-4 モービルクラッシャ

図-5 試料の投入方向

図-6 試料の回収

図-7 破碎実験結果（個数基準の粒径加積曲線）

試験結果の一例（一辺 200 mm×高さ 150 mm の三角柱）である。なお、今回使用したふるいの呼び径は 5.6mm～75mm の範囲であり、同じ呼び径のふるい上に残った粒子は全て同径の球であると仮定し、質量と密度から粒子数を計算した。

図-7 から分かるように、本実験では試料の投入の向きと大きさを変えた 8 種類の条件で破碎実験を行ったが、粒度分布の全体的な傾向は一致していた。ただし、一辺 100 mm×高さ 100 mm の正三角柱は他条件の結果と比べて粒径が 6.73mm～37.5mm の範囲で違いが見られるが、この供試体は全ての試料の中で最も質量が小さく、破碎後の試料の回収およびふるい分析における質量測定がふるい試験の結果に影響を与えたと考えられる。つまり、今回のふるい試験結果の誤差は許容できる範囲内であると判断できることから、クラッシュの稼動条件を一定にした場合は、破碎後の粒度分布には試料の投入の向きや大きさおよび形状は依存しないと解釈することができる。

3.2 コンクリート塊破碎の DEM シミュレーション

(1) コンクリートのパラメータ設定

表-2 にコンクリート塊破碎のシミュレーションに用いたコンクリートモデルの DEM パラメータ値を示す。本研究では DEM 要素に球体を使用し、直径 100 mm×高さ 100 mm の円柱を横方向に投入した場合（図-5(a)を参照）の実験結果とシミュレーション結果が合うように試行錯誤的に DEM パラメータを設定した。(a) 要素直径は、コンクリート塊の非均質性を表現するため、あらかじめ設定した最大および最小要素直径の中間値を中心とする正規分布に従って要素直径をランダムに与えた。今回はボックス・ミュラー法¹¹⁾を用いて正規乱数を発生させた。(b) 要素密度は、70%程度の充填率におけるバルク密度と実際の解析対象物の湿潤密度が等しくなるように設定した。(c) 要素間減衰比は、DEM モデルのダッシュポットの粘性を決定するパラメータである。粘性定数を η とすると、 η は要素間減衰比 ξ 、要素質量 m 、バネ定数 k を用いて式(6)のように表される¹²⁾。

図-8 ふるい試験結果例（L200 mm×H150 mm の三角柱）

表-2 コンクリートの DEM パラメータ

(a) 要素直径	d [m]	0.004 ～ 0.01
(b) 要素密度	ρ [kg/m ³]	3000
(c) 要素間減衰比	ξ [-]	0.01
(d) 要素間弾性係数	E_e [N/m ²]	1.23×10^{10}
(e) 要素間ポアソン比	ν_e [-]	0.20
(f) 要素間引張強度	S_e [N/m ²]	7.89×10^6
(g) 要素間粘着力	C_e [N/m ²]	3.50×10^6
(h) 要素間摩擦角	ϕ_e [-]	0.83

$$\eta = \xi \cdot 2\sqrt{m \cdot k} \quad (6)$$

(d) 要素間弾性係数 E_e および (e) 要素間ポアソン比 ν_e は、それぞれ DEM モデルにおける法線方向および接線方向のバネ定数を決定するパラメータである。法線方向・接線方向のバネ定数は E_e と ν_e を用いて、式(7)、式(8)のように表される。ただし、 a は要素間接触面積（式(5)を参照）、 l は要素間距離である。

$$k_n = \frac{a \cdot E_e}{l} \quad (7)$$

$$k_s = \frac{1 - 2\nu_e}{2 - 2\nu_e} \cdot k_n \quad (8)$$

(f) 要素間引張強度 S_e 、(g) 要素間粘着力 C_e 、(h) 要素間摩擦角 ϕ_e は、先述した式(3)、式(4)に対応するパラメータであり、要素間引張強度 S_e および要素間粘着力 C_e は、それぞ

れ法線方向および接線方向の結合の破壊基準を決定するパラメータである。

(2) シミュレーション用供試体の作製

コンクリート塊のような連続体をモデル化する場合、球形要素の集合体として表現する必要がある。本研究では以下のパッキング方法で供試体を作製した。

はじめに一定の数の球形要素を発生させる。そして、要素群を重力作用によって自由落下させ、容器の形状(円柱、正三角柱)に対応するように要素を移動させる。そして、各要素の速度が十分小さくなったこと(全要素の運動エネルギーの総和が全力学的エネルギーの総和の0.001%以下と定義)が確認できたときをパッキング終了とした。パッキング終了後、要素群の全ての要素間において接触判定を行い、接触している要素間に結合を与えることで、結合要素間には引張りにも抵抗し、容器の壁を無効化しても自立した供試体を得られる。しかし、要素間に反発力が働いている場合に壁を無効化すると供試体が膨張する。そこで、供試体が膨張しないようにするため、要素*i*と要素*j*が式(9)の条件を満たす場合に要素が接触しているものとした。

$$r_i + r_j \leq R_{ij} - (r_i + r_j - R'_{ij}) \quad (9)$$

ここで、 r_i, r_j はそれぞれ要素*i*、要素*j*の半径、 R_{ij} は要素の中心間距離、 R'_{ij} は各要素の速度が十分小さくなったときの要素間距離である。式(9)中の $r_i + r_j - R'_{ij}$ は、図-9に示すように要素*i*と要素*j*間の重なり of the 大きさを表す。

以上の方法で作製した供試体の形状および大きさ、要素数を図-10に示す。本研究では、試料の投入を横方向にした場合(図-5(a)を参照)のシミュレーションでは、直径200 mm×高さ150 mmの円柱および一辺200 mm×高さ150 mmの正三角柱は、高さを50 mmとした。これは、計算コストを考慮し、クラッシャの形状が破碎後の粒度分布に対して影響は小さいと考えられるからである。一方、試料の投入方向を縦方向にした場合(図-5(b)を参照)のシミュレーションのうち、直径200 mm×高さ150 mmの円柱および一辺200 mm×高さ150 mmの正三角柱は実施しなかった。その理由として、計算コストと破碎後の粒度分布(図-7を参照)が形状などに依存しないことが挙げられる。

(3) クラッシャのパラメータ設定

表-3にコンクリート塊破碎のシミュレーションに用いたクラッシャのDEMパラメータ値を示す。要素-壁面間減衰比 ζ_w 、要素-壁面間の法線および接線方向のバネ定数 k_{nw}, k_{sw} は、破碎実験の結果と合うように試行錯誤的に直接数値を与えた。要素-壁面間の摩擦角は要素間の摩擦角と共通に設定した。

クラッシャの機械パラメータは、破碎実験に用いたモービルクラッシャに搭載されているクラッシャの寸法を手に入れることができなかったため、入手できた他社製のモービルクラッシャ用のジョークラッシャの寸法を参考にした。表-4にクラッシャの機械パラメータを示す。なお、可動幅は図-11に示すように可動板が固定板に最も近づいたときと最も離れたときの水平方向の距離と定義し、排出口幅は可動板と固定板が最も近づいたときに通過できる最

図-9 パッキング終了後の要素間距離

図-10 試料の形状および大きさ、要素数

表-3 クラッシャのDEMパラメータ

(a) 要素-壁面間減衰比	$\zeta_w [-]$	0.97
(b) 要素-壁面間 法線方向バネ定数	$k_{nw} [N/m]$	2.5×10^7
(c) 要素-壁面間 接線方向バネ定数	$k_{sw} [N/m]$	2.0×10^7
(d) 要素-壁面間摩擦角	$\phi_w [-]$	0.83

表-4 クラッシャの機械パラメータ

(a) 可動板の回転半径の長軸	$L_{a1} [m]$	0.023
(b) 可動板の回転半径の短軸	$L_{a2} [m]$	0.01725
(c) 可動板長さ	$L_b [m]$	0.98
(d) トグルプレート長さ	$L_c [m]$	0.58
(e) 投入部の開口幅	$L_f [m]$	0.30
(f) 可動板ブロックの回転角	$\psi_a [deg]$	245
(g) 固定板の角度	$\psi_f [deg]$	269
(h) 偏心軸の傾き	$\psi_o [deg]$	60
(i) 固定板長さ: $L_g / [\sin(\psi_f - 180)]$	$[m]$	0.98
(j) 回転数	$[rpm]$	290
(k) 排出口幅	$[m]$	0.028
(l) 可動板の可動幅	$[m]$	0.023

図-11 クラッシャの可動板の可動幅の定義

大の球の直径と定義する。また、破碎のシミュレーションを実行するにあたり、破碎実験と同じ条件にするため、実験開始時における解析物の初期高さは投入口の高さに設定し、位置は排出口の真上とした。

(4) シミュレーションの刻み時間設定

DEM シミュレーションにおける安定な計算のための刻み時間 Δt の目安は次式で与えられる¹³⁾。

$$\Delta t \leq 2\sqrt{m/k} \quad (10)$$

本シミュレーションでは、式(10)で計算される Δt の値からさらに一桁小さくした 2×10^{-7} sec を用いた。また、DEM の時間刻みを大きくして計算負荷を減らすため、所らが提案した接触力予測法¹⁴⁾を実装した。接触力予測法とは、一般的な DEM の計算で 2 次精度の解が期待される 2 次の Adams-Bashforth 式（単位時間刻み後の接触力の予測値を直接外挿して求める方法）と予測子・修正子法（接触を支配する常微分方程式を使って接触力の予測値を求める方法）をさらに拡張した方法である。具体的には、2 体接触の段階で接触点ごとの接触力の予測値をより安定な解法で求め、粒子の速度や位置を求める方法である。

3.3 破碎実験結果とシミュレーション結果の比較検討

シミュレーション結果を図-12 に示す。破碎の様子の一例として、円柱の結果を図-13 に示す。なお、排出された粒子の粒径は次の方法で求めた。要素が結合した状態の一つの粒子となって排出された場合には、粒子を構成する全要素の体積の和を充填率で除し、それと等しい体積をもつ球の直径を粒子の粒径とした。図-12 に示すように、実機による破碎実験の結果と同様、クラッシュヤの稼動条件を一定にした場合では、供試体の投入の向きや大きさおよび形状は破碎後の粒度分布にほとんど依存しないと解釈することができる。

破碎実験結果とシミュレーション結果を図-14 に示す。なお、それぞれの結果は平均値である。図-14 より、シミュレーション結果は破碎実験結果と比べて、粒径が 7.93 mm~9.52 mm の範囲では粒子の割合が大きいものの、7.93 mm 未満および 9.52 mm を超える範囲では実験結果を良好に表現できていることから、シミュレーション結果は破碎実験の結果と良好な整合性を示していると考えられる。しかし、図-13 のコンクリート塊の破壊の様子からも分かるように脆性材料のような破壊挙動を完全に表現で

図-12 破碎シミュレーション結果（個数基準の粒径加積曲線）

図-13 破碎の様子（円柱：直径 200 mm）

図-14 実験結果とシミュレーション結果の比較

きていない。つまり、今回用いた DEM の粒子間接触モデル (図-1 を参照) と結合による粒子の破壊基準 (式(3), (4) を参照) がシミュレーション結果に影響を与えた可能性があると考えられ、破壊挙動を精度よく表現できるような DEM モデルに改良することが今後の課題である。

4. 機械パラメータが破碎性能に及ぼす影響の検討

モービルクラッシャによるコンクリート塊の破碎は、排出口幅、回転数、可動板の可動幅など、クラッシャの機械パラメータの影響を受けると考えられる。それぞれのパラメータの影響の大きさを十分に検討することが重要であるものの、実機による破碎実験を何度も行うのは非効率的である。そこで、効率的なモービルクラッシャの設計には、コンクリート塊の破碎挙動を正確に表現できるシミュレータの開発が必要不可欠であると考え、前章で DEM によるコンクリート塊破碎のシミュレータを作製した。

本章では、クラッシャの 3 種類の機械パラメータ (排出口幅、回転数、可動板の可動幅) が破碎性能に及ぼす影響について検討する。はじめに、3 種類のパラメータのうち、1 種類ずつ変化させた破碎シミュレーションを行い、それぞれのパラメータが破碎性能に与える影響について考察する。次に、排出口幅、回転数、可動幅の 3 種類の機械パラメータが破碎性能に及ぼす影響を総合的に評価し、モービルクラッシャによる最適な破碎条件について検討する。

4.1 各機械パラメータが破碎性能に及ぼす影響の評価

前章の実験結果とシミュレーション結果より、供試体の投入の向きや大きさおよび形状は破碎後の粒度分布にほとんど依存しないことから、クラッシャに投入する供試体は直径 100 mm × 高さ 100 mm の円柱のものを使い、試料の投入方向は横方向とした。クラッシャの機械パラメータの設定の基準値は前章で示した表-4 と同じである。

本節では、基準値から 3 種類の機械パラメータを 1 種類ずつ変えた条件で破碎シミュレーションを行い、(1) 破碎成績、(2) 解析物によるクラッシャのエネルギー損失、(3) 破碎の所要時間を算出し、各機械パラメータが破碎に及ぼす影響について考察する。(1) 破碎成績は、破碎後の粒子の表面積と定義し、破碎後の粒子の表面積は、要素が結合した状態で排出された場合は粒子を構成する全要素の体積の和を充填率で除した体積を想定し、これと等しい体積をもつ球の表面積とする。つまり、破碎後の粒子の表面積が大きいほど破碎がよく行われたことを意味する。(2) 解析物によるクラッシャのエネルギー損失は、解析物がクラッシャにおける回転方向の逆方向に与えたトルクと定義し、可動板が各要素から受けた力を用いて図-15 に示す点 p_a に働く回転方向の力 F と可動板の回転半径 L_{at} を用いてトルクを計算した。(3) 破碎の所要時間は、解析物をクラッシャに投入してから解析物の質量の 95 % が排出されるまでの時間と定義する。

(1) 排出口幅の影響

回転数と可動幅を固定し、排出口幅を 0.02 m から 0.06 m

まで 0.01 m ずつ変化させてシミュレーションを行った。図-16、図-17、図-18 にそれぞれ破碎成績、解析物によるクラッシャのエネルギー損失、破碎の所要時間を示す。

これらの図に示されるように、排出口幅の拡大に伴っていずれも減少する傾向が見られる。これは、排出口幅が広がることによって未破碎の大きい粒子が排出されるようになるためであると考えられる。つまり、回転数と可動幅を固定して排出口幅を変化させた場合では、排出口幅が狭いほど破碎成績は良いが、クラッシャのエネルギー損失と破碎の所要時間は増加すると解釈することができる。

図-15 可動板に作用するトルク概念

図-16 排出口幅と破碎成績の関係

図-17 排出口幅とクラッシャのエネルギー損失の関係

図-18 排出口幅と破碎の所要時間の関係

(2) 回転数の影響

排出口幅と可動幅を固定し、回転数を 100 rpm から 400 rpm まで 50 rpm ずつ変えてシミュレーションを行った。図-19、図-20、図-21 にそれぞれ破碎成績、解析物によるクラッシュのエネルギー損失、破碎の所要時間を示す。

図-19 より、得られた結果には大きな差は見られないものの、回転数が 150 rpm 以上の範囲では回転数の増加に伴って破碎成績が向上する傾向を示した。これは、回転数の増加によって、可動板の速度の増加および解析物と可動板が衝突する回数の増加が影響したためであると考えられる。なお、回転数 100 rpm で破碎成績が良い理由は、低回転数のために粒子の閉塞現象が生じ、クラッシュの圧縮力に伴う破碎よりもクラッシュの摩擦力に伴う破碎が増えて、試料の表層部分から順に破碎されたためであると推測される。

図-20 より、回転数 300 rpm でクラッシュのエネルギー損失が最大となっていることが分かる。そこで、回転数 300 rpm 前後の結果を大別して検討する。回転数 300 rpm より小さい場合は、回転数の増加によってエネルギー損失（トルク）が増えている。その理由として、回転数の増加に伴い解析物と可動板が衝突する回数が増えたこと、可動板の速度増加に伴って要素から受ける力が大きくなったことが考えられる。一方、回転数 300 rpm より大きい場合は、回転数の増加によってエネルギー損失（トルク）は減少している。その理由は、可動板の速度が大きくなることで、クラッシュの圧縮力に伴う破碎だけではなく、解析物とクラッシュの衝撃力に伴う破碎も生じたためであると考えられる。

図-21 より、回転数の増加に伴って破碎の所要時間は短くなり、回転数 250 rpm 以上になるとほぼ一定となった。また、最短所要時間と最長所要時間は 1.6 倍異なる結果が得られた。回転数が小さくなると所要時間が長くなる要因は、排出口付近で粒子が排出されずにクラッシュ内に留まるという閉塞現象が生じやすくなるためであると考えられる。一方、回転数が大きくなると所要時間が短くなる要因は、回転数が一定以上になると閉塞の発生頻度もほぼ一定となり、さらに破碎の機会も多くなって破碎が迅速に行われるためであると考えられる。

以上の結果より、排出口幅と可動幅を固定し、回転数を変えた場合では、回転数が 100 rpm のときの破碎成績が良く、回転数が 300 rpm 以上の範囲では破碎成績はほとんど変わらないことが確認できた。

(3) 可動幅の影響

排出口幅と回転数を固定し、可動板の可動幅を 0.01 m から 0.06 m まで 0.01 m ずつ変化させて、シミュレーションを行った。ここでは、可動板の傾きを変えないようにするために、図-2(a)で示した回転中心とトグルブロックの距離 L_d 、そして可動板ブロックの回転角 ψ_a を変更して可動幅を設定した。図-22、図-23、図-24 にそれぞれ破碎成績、解析物によるクラッシュのエネルギー損失、破碎の所要時間を示す。

図-22 より、破碎成績は可動幅によらずほぼ一定であつ

図-19 回転数と破碎成績の関係

図-20 回転数とクラッシュのエネルギー損失の関係

図-21 回転数と破碎の所要時間の関係

図-22 可動幅と破碎成績の関係

た。これは、可動幅が大きくなることで一回の圧縮によって亀裂が多く生じるものの、排出口幅が広がったときに粒子が排出されやすくなったためであると考えられる。

図-23 より、クラッシュのエネルギー損失は可動幅の小さい範囲ではほぼ一定であるが、可動幅が大きくなるとエネルギー損失は減少している。つまり、クラッシュの可動幅が大きいほど可動板の最高速度が大きくなるため、クラッシュの圧縮力に伴う破碎のみでなく、コンクリート塊

とクラッシャの衝撃力によってコンクリート塊が破碎するという現象が起きると推測される。

図-24 より、破碎の所要時間が最も短いのは0.01 m のときであり、可動幅が0.02 m 以上になると、破碎の所要時間は減少する傾向にある。これは、可動幅が大きいほど一回の圧縮によってコンクリート塊を大きく圧縮することができるためであると考えられる。

以上の結果より、排出口幅と回転数を固定し、可動幅を変化させた場合、破碎成績はほとんど変わらないが、可動幅の増加に伴ってクラッシャのエネルギー損失は減少することが明らかとなった。

4.2 機械パラメータが破碎性能に及ぼす総合的評価

前節では、排出口幅、回転数、可動幅の3種類の機械パラメータを一つずつ変化させて、破碎成績、クラッシャのエネルギー損失、破碎の所要時間について検討し、有意な結果が得られた。しかし、3種類全ての機械パラメータを考慮したクラッシャの破碎性能については検討できていない。そこで、本節では、3種類全ての機械パラメータが破碎性能に及ぼす影響を総合的に評価し、モービルクラッシャによる最適な破碎条件について考察する。

クラッシャの機械パラメータである排出口幅、回転数、可動幅の3種類の機械パラメータが取り得る様々な値について検討するため、機械パラメータの範囲を、排出口幅0.02 m～0.06 m、回転数100 rpm～400 rpm、可動幅0.02 m～0.06 mとした。そして、各機械パラメータについて以下の4条件を全て組み合わせ、コンクリート塊破碎のシミュレーションを行った。なお、本節および前節のシミュレーション条件は全部で78条件となる。

(a) 排出口幅 [m] : 0.023, 0.030, 0.040, 0.060

(b) 回転数 [rpm] : 100, 210, 290, 400

(c) 可動幅 [m] : 0.020, 0.030, 0.040, 0.060

排出口幅、回転数および可動幅の3種類の機械パラメータの総合的な影響を評価するため、本研究では多変量解析手法の一つである主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA)^{15), 16)}を採用した。主成分分析は経済学や地盤工学などの分野で広く使われた分析方法であり、図-25に示すように、主成分分析は元の情報量の損失が最小となる評価軸(主成分, 合成変量)を新たに求める方法であり、高次元のデータからの情報を限りなく失わずに低次元のデータとして処理することができる。

(1) 主成分分析の概要

主成分の算出方法を概説する¹⁷⁾。 m 個の変量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ に対する n 個のデータ $(x_{ji} [j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n])$ に対する主成分 z_j は、式(11)のような一次式で表される。

$$z_j = a_{1j}X_1 + a_{2j}X_2 + \dots + a_{mj}X_m \quad (11)$$

ここで、 a_j は主成分の係数 ($a_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$, $j=1, 2, \dots, m$)、 X_j ($j=1, 2, \dots, m$) は式(12)で標準化した変量である。

$$X_{ji} = (x_{ji} - \bar{x}_j) / \sqrt{s_{jj}} \quad (12)$$

図-23 可動幅とクラッシャのエネルギー損失の関係

図-24 可動幅と破碎の所要時間の関係

図-25 2個の変量を想定した場合の主成分分析の概念

ここで、 $\bar{x}_j$ は変量 x_{ji} の平均、 s_{jj} は変量 x_j の分散である。主成分分析は固有値問題を解くことに等しく、得られた固有値の中で最大の固有値に対する固有ベクトル(主成分の係数)を使った主成分が「第1主成分」であり、以降「第2主成分、…」と続く。そして、式(11)を使って各データに対して主成分の値を計算したものを「主成分得点」とよぶ。なお、第 i 主成分が元の情報量をどの程度含んでいるかを表す指標が「寄与率」であり、第1～ i 主成分までの寄与率の和が「累積寄与率」である。

主成分分析は、元の情報量をできるだけ少ない情報量で表すことが目的のため、主成分の採用数が重要となる。目安として、(1) 固有値が1以上、(2) 累積寄与率をある程度(例えば、80%以上)大きくすることなどが挙げられる。つまり、主成分の係数の解釈によっては固有値が1以上でない場合でも主成分を取り上げることがある¹⁷⁾。

(2) 主成分分析結果

表-5に分析結果を示す。表-5の各主成分の係数の解釈を行う。第1主成分は、排出口幅および可動幅の主成分の係

数が回転数よりも大きいことから、排出口幅と可動幅の影響が大きいと判断される。第2主成分は、回転数の主成分の係数が他の係数よりも非常に大きいので、回転数の影響を表していると考えられる。このように、「固有値が1以上」ではない第2主成分も容易に解釈でき、元の情報量もある程度多いほうが望ましいと判断し、第2主成分までを採用することにした。そして、採用した主成分の係数を用いて算出した第1および第2主成分得点を機械パラメータの総合的な指標と定義し、第1および第2主成分得点とシミュレーション結果である破碎性能（破碎の所要時間、破碎成績、解析物によるクラッシュのエネルギー損失）との関係を次項で考察する。なお、第1主成分得点と第2主成分得点はそれぞれ式(13)、式(14)のように表される。

$$z_1 = 0.6815X_1 - 0.2429X_2 + 0.6903X_3 \quad (13)$$

$$z_2 = 0.2108X_1 + 0.9685X_2 + 0.1327X_3 \quad (14)$$

ここで、 X_j ($j=1,2,3$) は、排出口幅、回転数、可動幅を式(12)で標準化した変量である。

(3) 考察

主成分得点と破碎成績、解析物によるクラッシュのエネルギー損失、破碎の所要時間の関係をそれぞれ図-26、図-27、図-28 に示す。これらの結果より、第1主成分得点が負値になるほど破碎成績は良いが、クラッシュのエネルギー損失は大きく、破碎の所要時間は長くなる傾向を示している。前項（表-5を参照）でも述べたように、第1主成分は排出口幅と可動幅を表すパラメータであることから、破碎性能は排出口幅と可動幅の影響を受けやすいと考えられる。

はじめに、破碎成績と機械パラメータの関係について検討する。各主成分得点と破碎成績の関係を図-29 に示す。図-29 より、破碎成績は第1主成分得点が大きくなると悪くなるが、第2主成分得点にあまり依存しないことが確認される。前項（表-5を参照）でも述べたように、第2主成分は回転数の影響を表すパラメータであることから、第2

主成分得点は回転数を表す指標である。したがって、排出口幅、回転数、可動幅の機械パラメータの中で、破碎成績に対して最も影響が小さいのは回転数であると考えられる。

次に、破碎成績の向上および解析物によるクラッシュのエネルギー損失の減少の両方を達成することのできる、

表-5 主成分分析結果

		第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値		1.057	0.997	0.947
主成分の係数	排出口幅	0.6815	0.2108	-0.7008
	回転数	-0.2429	0.9685	0.0551
	可動幅	0.6903	0.1327	0.7112
寄与率 [%]		35.2	33.2	31.6
累積寄与率 [%]		35.2	68.4	100.0

図-26 主成分得点と破碎成績の関係

図-27 主成分得点とクラッシュのエネルギー損失の関係

図-28 主成分得点と所要時間の関係

(a) 第1主成分得点と破碎成績の関係

(b) 第2主成分得点と破碎成績の関係

図-29 主成分得点と破碎成績の関係 (図-26 の投影)

機械パラメータ値について検討する。図-26、図-27、図-28の点線で表した(a), (b), (c)の3本の直線は、破碎成績が比較的高く、クラッシャのエネルギー損失が小さく、そして破碎の所要時間が短い結果の集合である。この集合、つまり第1主成分得点と第2主成分得点の関係を最小二乗法で直線近似すると、それぞれ以下のように表される。

$$z_{2,(a)} = 0.2854z_{1,(a)} + 1.5290 \quad (15)$$

$$z_{2,(b)} = 0.2759z_{1,(b)} + 0.4151 \quad (16)$$

$$z_{2,(c)} = 0.2715z_{1,(c)} - 0.3717 \quad (17)$$

ここで、 $z_{j(x)} [j=1, 2; x=a, b, c]$ は、図-26、図-27、図-28の点線に対応する主成分得点である。

この集合はそれぞれ回転数が400 rpm, 290 rpm, 210 rpmにおけるシミュレーション結果の一部である。そこで、第1主成分得点と第2主成分得点(式(13)、式(14)を参照)を式(15)、式(16)、式(17)に代入すると、ある回転数に対する可動幅と排出口幅の関係を求めることができ、それぞれ式(18)、式(19)、式(20)のように表される。

(a) 回転数 400 rpm

$$(\text{可動幅}) = 0.4594 \times (\text{排出口幅}) - 0.0040 \quad (18)$$

(b) 回転数 290 rpm

$$(\text{可動幅}) = 0.3846 \times (\text{排出口幅}) - 0.0090 \quad (19)$$

(c) 回転数 210 rpm

$$(\text{可動幅}) = 0.2472 \times (\text{排出口幅}) - 0.0109 \quad (20)$$

つまり、回転数 400 rpm, 290 rpm, 210 rpm において排出口幅と可動幅の関係を満たすように設定することで、破碎成績を比較的高くできるとともに、解析物によるクラッシャのエネルギー損失および破碎の所要時間を減らすことができるような性能を要するクラッシャを設計できる可能性がある。

5. おわりに

本研究では、個別要素法を用いてモービルクラッシャによるコンクリート破碎のシミュレーションモデルを開発し、実機による破碎実験結果とシミュレーション結果を比較検討した。そして、モービルクラッシャの破碎性能に関する機械パラメータ(クラッシャの排出口幅、回転数、可動幅)を種々変化させて、破碎性能に及ぼす機械パラメータの影響について、多変量解析の一つである主成分分析を用いて総合的に検討した。以下、得られた知見(1. 破碎実験結果とシミュレーション結果の比較, 2. 各機械パラメータが破碎性能に及ぼす影響の評価, 3. 機械パラメータが破碎性能に及ぼす総合的评价)を述べる。

(1) 破碎実験結果とシミュレーション結果の比較

- 1) 破碎実験より、クラッシャの移動条件を一定にした場合では、破碎後の粒度分布には供試体の投入の向きや大きさおよび形状は依存しないという結果が得られた。この結果はシミュレーション結果でも確認できた。
- 2) 本研究で開発した DEM シミュレーションモデルによってコンクリートの破碎実験を行い、シミュレーション結果の妥当性を検討した。その結果、実験結果とシミュレーション結果は良い整合性を示した。

(2) 各機械パラメータが破碎性能に及ぼす影響の評価

クラッシャの排出口幅、回転数、可動板の可動幅の3種類の機械パラメータを1種類ずつ変えた条件で破碎シミュレーションを行った結果(得られた結果は破碎成績、解析物によるクラッシャのエネルギー損失、破碎の所要時間)、次のような成果が得られた。

- 1) 回転数と可動幅を固定して排出口幅を変えた場合、排出口が狭いほど破碎成績は良いが、破碎の所要時間は増大することが分かった。
- 2) 排出口幅と可動幅を固定して回転数を変えた場合、回転数が100 rpmのときは破碎成績が良い。また、回転数が300 rpm以上の範囲では破碎成績はほとんど変わらないことが分かった。

- 3) 排出口幅と可動幅を固定して回転数を変えた場合、回転数が小さくなると所要時間が長くなる要因は、排出口付近で粒子が排出されずにクラッシュ内に留まるといった閉塞現象が生じやすくなるためであることを推測することができた。
- 4) 排出口幅と回転数を固定して可動板を変えた場合、破碎成績はほとんど変わらないが、可動幅の拡大に伴ってクラッシュのエネルギー損失は減少することが明らかとなった。

(3) 機械パラメータが破碎性能に及ぼす総合的評価

排出口幅、回転数、可動幅の3種類の機械パラメータが破碎に及ぼす影響について主成分分析を使って総合的な指標（主成分得点）を定義し、シミュレーションで得られた破碎性能（破碎成績、解析物によるクラッシュのエネルギー損失、破碎の所要時間）と主成分得点との関係をまとめた結果、次のような成果が得られた。

- 1) 排出口幅および可動幅の値が小さいほど破碎成績が良いが、解析物によるクラッシャーエネルギー損失は大きく、破碎の所要時間は長くなる傾向にある。
- 2) 排出口幅、回転数および可動幅の3種類の機械パラメータの中で、破碎成績に対する影響が最も小さいのは回転数である。
- 3) ある回転数において排出口幅と可動幅の関係を満たすように設定することで、破碎成績を比較的高くできるとともに、解析物によるクラッシュのエネルギー損失および破碎の所要時間を減らすことができるような性能を要するクラッシャを設計できる可能性がある。

このように、DEMシミュレーションによりクラッシュの破碎を表現できたこと、また注目した3種類の機械パラメータが破碎に及ぼす影響を明らかにしたことは、今後のモバイルクラッシャにおける破碎性能の高い運転方法および効率的な機械の設計に貢献し得るものと考えられる。最後に、以上の知見をもとに今後の課題と展開を示し、さらに研究を進める予定である。

- 1) 本研究では破碎材料を一つのみとしたが、複数の試料を投入した場合の破碎挙動を解析する必要がある。これは、複数の試料を投入した場合にはクラッシュのより上部で破碎が発生し、また壁面から受ける直接の力ではなく粒子間の力によって破碎し合う現象が考えられるためである。
- 2) トグルプレートの長さ、固定板および可動板の傾き、可動板の回転角やクラッシュの壁面形状など、様々な機械パラメータを変えたシミュレーションを行い、より多くの機械パラメータと破碎に及ぼす影響を検討する必要がある。
- 3) 本研究で作製したシミュレーションでは、コンクリートを破壊するとき明確な破壊面を発生させることができなかったため、脆性材料が破壊する挙動をより精度良く表現できるようなDEMモデルを作る必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成20年度建設副産物実態調査結果参

考資料，<http://www.mlit.go.jp/common/000121183.pdf> (2012.01.07 現在)

- 2) 社団法人日本建設機械化協会調査部会：建設副産物のリサイクル機械の動向－現場における再生資源化と減容化の取り組み－，建設の機械化，Vol.651，pp.45-50，2004.
- 3) 徳田昭八郎：シングル・トグル・ジョウクラッシャによる岩石の破碎，日本鉱業会誌，Vol.96，No.1113，pp.827-832，1980.
- 4) 門脇良一，吉田豊，徳田昭八郎：シングル・トグル・ジョウ・クラッシャの破碎荷重に関する基礎的研究，資源・素材学会誌，Vol.111，No.9，pp.643-648，1995.
- 5) Refahi, A., Aghazadeh Mohandes, J. and Rezai, B.: Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol.109, No.12, pp.709-717, 2009.
- 6) Refahi, A., Aghazadeh Mohandes, J. and Rezai, B.: Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher, *International Journal of Mineral Processing*, Vol.94, No.1-2, pp.83-91, 2010.
- 7) Cundall P. A. and Strack O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 8) Potyondy D. O. and Cundall P. A.: A bonded-particle model for rock, *Int J RockMech Min Sci*, Vol.41, pp.1329-1364, 2004.
- 9) 伯野元彦：破壊のシミュレーション－拡張個別要素法で破壊を追う－，森北出版，pp.14-15，pp.1997.
- 10) いわみ生コンクリート協同組合：
http://iwaminamakon.net/haigo/haigo_N_futu_20.html (2012.01.07 現在)
- 11) G. E. P. Box and Mervin E. Muller: A Note on the Generation of Random Normal Deviates, *Annals Math. Stat*, Vol.29, pp.610-611, 1958.
- 12) 伯野元彦：前掲9)，p.44.
- 13) 伯野元彦：前掲9)，p.50.
- 14) 所千春，岡谷克則，定木淳：接触力予測法の適用による離散要素法の高速度化，紛体工学会誌，Vol.40，pp.236-245，2003.
- 15) Pearson, K.: On lines and planes of closest fit to systems of points in place, *Philosophical Magazine*, Vol.2, pp.559-572, 1901.
- 16) Hotelling, H.: Analysis of a complex of statistical variables into principal components, *Journal of Educational Psychology*, Vol.24, pp.417-441, 1933.
- 17) 田中豊，脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，pp.53-84，1983.

(2012年3月8日 受付)