

インパクトクラッシャによる骨材の一貫生産法の検討

EXAMINATION OF THE INTEGRATED PRODUCTION METHOD FOR THE AGGREGATE OF CRUSHED STONE BY USING A IMPACT CRUSHER

今井忠男*・馬場将行**・木崎彰久***・杉本文男****

by Tadao IMAI, Masayuki BABA, Akihisa KIZAKI and Fumio SUGIMOTO

1. はじめに

日本におけるコンクリート骨材は、はじめは天然砂(細骨材)と天然砂利(粗骨材)とを、実積率が最大となるような割合(細骨材率)で調合し製造してきた。このように、天然の砂と砂利に恵まれた地域では、天然資源をそのまま骨材として用いる生産法が、最も合理的であった。

しかしながら、国土の環境保全の観点から河川砂利の開発規制が厳しくなり、粗骨材は天然砂利から碎石へと変遷してきた。また、近年では、瀬戸内海での天然砂の採取が全面禁止となり、関西地方では細骨材の確保が困難になってきている¹⁾。今後は全国規模で、細骨材も天然砂から砕砂へと代替させ、細骨材の安定供給を推進するとともに、将来的には碎石業において、砕砂から碎石まで一貫的に生産し、総合的にコンクリート骨材を供給しなければならない。

現在、砕砂と碎石の両者を生産している碎石メーカーでは、砕砂と碎石をそれぞれ生産し、両者を別々にコンクリートメーカーに出荷している。したがって、両者を合わせて一貫した骨材として出荷することは稀で、一貫した骨材製品を生産するという考え方がほとんどない。

これまで、著者らは、岩石を破碎すると、その破碎物の実積率は、破碎の程度にしたがって大きくなり、最適な細骨材比の骨材と同程度の実積率になることを明らかにしてきた²⁾。これまでの骨材生産では、破碎・分級・調合等の多くの工程が必要であったが、著者等の考え方に基けば、破碎工程を主とした簡素化された工程で、細骨材と粗骨材とを合わせた一貫的な骨材を、合理的に生産できる可能性がある。

本研究では、岩石の破碎工程のみによって、一貫的な骨材を生産する手法の確立を目的とし、イン

パクトクラッシャを用いて、岩石の破碎試験をおこない、破碎物の実積率が大きくなる破碎条件について検討した。また、クラッシャの破碎条件によって、破碎物の平均粒径および粒度分布を制御する手法を明らかにし、一貫的な骨材の生産における理論設計について提案した。

2. 岩石破碎物の粒度特性

2.1 リッチンガーの破碎理論

次に示すリッチンガーの破碎式は、破碎エネルギー E を増加させると、破碎物の平均粒径 ϕ_{50} が減少していくことを表している。ただし、 ϕ_{50} が初期粒径 ϕ_0 よりも十分に小さい場合は、 ϕ_0 は省略可能である。

$$E = C_r (\phi_{50}^{-1} - \phi_0^{-1}) \cong C_r \cdot \phi_{50}^{-1} \quad \dots (1)$$

ここで、 C_r は比例定数である。岩石の破碎過程がこの式にしたがうならば、破碎エネルギーによって、破碎物の粒度分布が制御可能である。

2.2 破碎物の粒度分布式

著者等は、破碎物の粒径 ϕ の累積質量分布 $R(\phi)$ は、そのフラクタル性を利用して、次式で表すことが可能であることを報告してきた³⁾。

$$R(\phi) = 1 - \frac{C_F}{(3/D-1)W_{max}} \phi^{3-D} \quad \dots (2)$$

ただし、 D はフラクタル次元、 C_F は近似係数、 W_{max} は試料の全質量である。上式において、 $R(\phi)=0$ となるときに粒径を粒子の最大径 ϕ_{max} とすると、式(2)は粒径比 (ϕ/ϕ_{max}) を用いて表すことが可能となり、次式のように簡略化され、 D のみの式となる。

$$R(\phi) = 1 - (\phi/\phi_{max})^{3-D} \quad \dots (3)$$

また、破碎物の平均粒径 ϕ_{50} は、上式に $R(\phi_{50})=0.5$ の条件を代入し、次式で表される。

$$\phi_{50} = 0.5^{1/(3-D)} \cdot \phi_{max} \quad \dots (4)$$

ここで、粒子の最大径 ϕ_{max} は、クラッシャの排出口における隙間幅 d やスクリーン径 ϕ_s の関数 $f(d, \phi_s)$ と

* 秋田大学大学院 准教授 工学資源学研究科

(〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、 ** 秋田大学大学院 院生、*** 秋田大学 准教授、**** 秋田大学大学院 教授 工学資源学研究科

して表すことができると仮定する。

$$\phi_{\max}=f(d,\phi_s) \quad \dots (5)$$

よって、 ϕ_{\max} と d あるいは ϕ_s との関係と、岩石の破碎特性としての D 値を測定できれば、上述の式から、破碎エネルギーに対する破碎物の粒度分布および平均粒径を求めることが可能となり、理論的に岩石の破碎物の粒度分布を制御することが可能となる。

2.3 破碎物のフラクタル次元と実積率の関係

これまで著者らは、岩石の破碎物の実積率とその粒度分布におけるフラクタル次元との関係を、実験によって明らかにしてきた³⁾。その結果、岩種に係わらず、粒度分布のフラクタル次元が大きくなると、実積率も直線的に大きくなることわかってきた。とくに、岩石試料によって実積率とフラクタル次元との関係に違いが生じることから、岩石ごとにこれらの粒度特性を把握する必要がある。なお、骨材の実積率は粒子の形状に影響を受けると考えられるが、粒子が円形に近いほど実積率が高くなるような単純な傾向にはならず⁴⁾、十分に解明されていないため、本論では粒子形状については論じない。

3. 研究方法

3.1 試料岩石

表1に、本試験に用いた石灰岩および安山岩の基礎物性値を示す。本試料は、それぞれ骨材として使用されている。なお、この安山岩は、吸水率が3%以

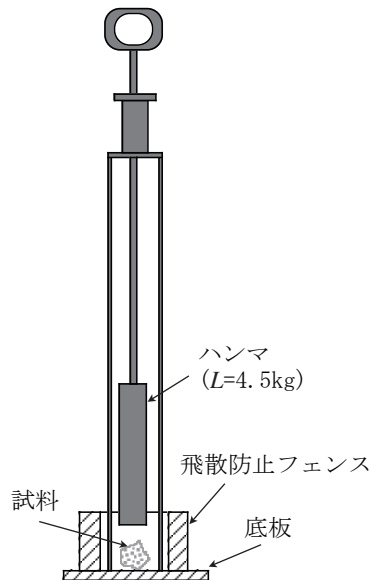


図1 基礎破碎装置

表1 岩石試料の基礎物性値

岩種	産地	圧縮強度(MPa)	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)
石灰岩	東京都	71.0	2.68	0.37
安山岩	秋田県	98.3	2.45	3.13

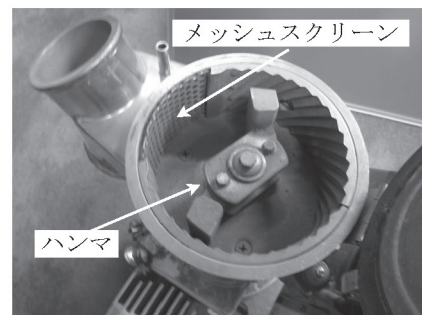
上のため、主に路盤材に用いられることが多い。破碎実験には、それぞれの岩石試料を、あらかじめ粗破碎し、初期粒径 $\phi_0=30\pm 5\text{mm}$ 、初期質量 $W_{\max}=20\sim 80\text{g}$ 、含水条件を自然状態として用いた。

3.2 基礎破碎実験

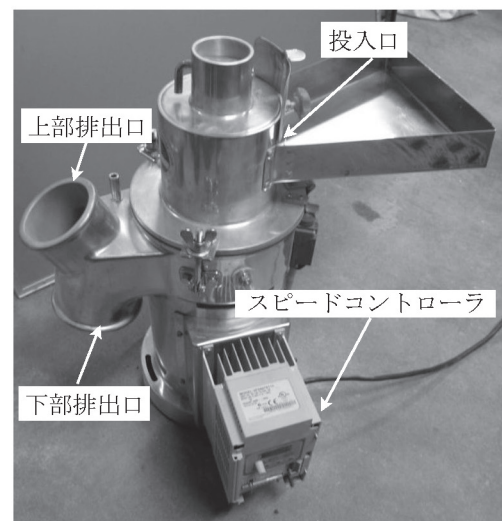
岩石の基礎的な破碎特性を調べるため、図1に示すハンマを用いて岩石試料を衝撃破碎させ、破碎エネルギー E_r (kJ/kg)と破碎物の粒度分布および平均粒径 ϕ_{50} (mm)を求めた。基礎破碎試験では、ハンマ(質量 $L=4.5\text{kg}$)を高さ0.2mから、繰返し自由落下させて岩石を破碎した。このとき、ハンマの位置エネルギーが全て破碎エネルギーに変換されたと仮定し、 E_r は位置エネルギーに落下回数を乗じて求めた。この結果とクラッシャを用いた場合における岩石の破碎特性とを比較することで、クラッシャの特性を評価することが可能となる。

3.3 インパクトクラッシャによる破碎実験

図2に本実験で用いたインパクトクラッシャ(三庄インダストリー製、NH-34)を示す。本機は、破碎室(図2(2))の中にある1対のハンマ(質量 $M=0.342\text{kg}$)が回転(最大3,450rpm)し、岩石を破碎室内で衝撃破碎させ、メッシュスクリーンのスク



(2) 破碎室



(1) インパクトクラッシャの外観

図2 インパクトクラッシャの構造

リーン径以下となった粒子を排出する仕組みである。ハンマは、コントローラによって任意の角速度 ω (rad/s)で回転させることが可能であり、これによって岩石試料への衝撃力を調整できる。破碎されて排出される試料の粒径は、破碎室内に設置されたメッシュスクリーンのスクリーン径 ϕ_s を調整することで制御できる。

ここで、破碎過程において、ハンマが質量 W_{max} の岩石試料に与える単位質量あたりの衝撃エネルギー E_h は、ハンマの回転エネルギー K と試料との衝突回数 N によって、次式で表すことができる。

$$E_h = KN / W_{max} \quad \dots (6)$$

なお、ハンマの回転エネルギー K は、角速度 ω と慣性モーメント I で次式で表される。

$$K = 1/2 I \omega^2 \quad \dots (7)$$

ただし、 $I = M r^2$ であり、 r はハンマの回転半径($r=61\text{mm}$)である。

次に、衝突回数 N は、ハンマが1回転すると、全試料は必ず1度はハンマと衝突すると仮定し、試料

投入から全排出までの時間 t_0 と角速度 ω から、次式で求めた。ただし、試料質量は、投入後から減少し、時間 t_0 後に0となるので、この間の平均質量を($W_{max}/2$)として算定した。

$$N = (t_0 / 4\pi) \omega / W_{max} \quad \dots (8)$$

破碎実験では、クラッシュャの角速度 ω を、100、150、200、361rad/sの4段階に変化させ、投入試料が全て排出されるまで破碎した。また、クラッシュャの破碎室内に設置したメッシュスクリーンには、スクリーン径 ϕ_s が3、6、12mmの3種類のものを用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 破碎エネルギーと平均粒径との関係

図3に、基礎破碎試験の結果を示す。また、それぞれの図中にはリッチンガーの式(1)を直線で示した。図3(a)の石灰岩では、破碎エネルギー E_r の増加とともに破碎物の平均粒径 ϕ_{50} が減少しており、リッチンガーの式に良くしたがうことがわかる。これ

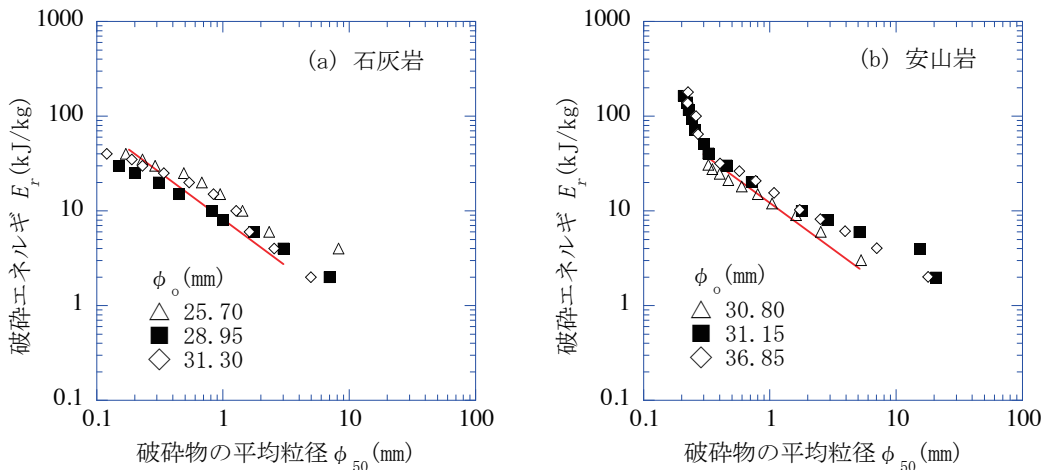


図3 基礎破碎試験における平均破碎粒径 ϕ_{50} と破碎エネルギー E_r との関係

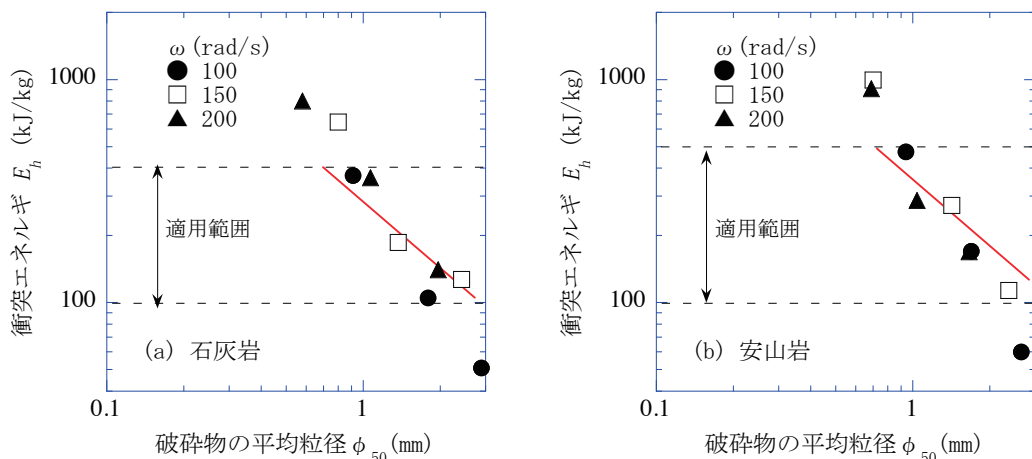


図4 インパクトクラッシュャにおける平均破碎粒径 ϕ_{50} と衝撃エネルギー E_h との関係

に対し、**図3(b)**の安山岩では、 $0.3 < \phi_{50} < 5\text{mm}$ の範囲ではリッチンガーの式が成り立つが、 $\phi_{50} < 0.3\text{mm}$ では成立たなくなることがわかる。よって、従来の破碎式の適応は、限定的であることが明らかとなった。

次に、インパクトクラッシャによる破碎試験の結果を**図4**に示す。それぞれの図中には、リッチンガーの式(1)を示した。ハンマの衝突エネルギーは、全て岩石の破碎エネルギーに変換される訳ではないが、両図より、石灰岩および安山岩とも、衝突エネルギー E_h と平均破碎粒径 ϕ_{50} との関係が、 $100 < E_h < 400\text{kJ/kg}$ の範囲では、岩種、角速度およびスクリーン径に係わらず、概ねリッチンガーの式にしたがう傾向が明らかとなった。

ここで、**図3**および**図4**における破碎物の平均粒径 ϕ_{50} のデータをもとに、基礎破碎試験の破碎エネルギー E_r と、インパクトクラッシャによる破碎試験の衝突エネルギー E_h との関係を求めた。その結果につい

て、安山岩の例を**図5**に示す(安山岩)。図より、 $E_h < 500\text{kJ/kg}$ の範囲では、 E_r と E_h とは比例しており、その比 α はおよそ0.03であることがわかった。すなわち、ハンマの回転エネルギーのうち、約3%しか岩石の破碎に使用されておらず、エネルギー効率は極めて低いことがわかった。

4.2 破碎物の粒度分布

図6(1)、**(2)**に安山岩を例として、基礎破碎試験およびクラッシャ破碎試験における破碎物の粒度分布について、その解析例を示す。それぞれの図中には、粒度分布式(2)の近似線を示す。両図より、本粒度分布式は、破碎物の粒度分布とよく一致することがわかる。この式で近似することにより、各破碎物の粒度分布におけるフラクタル次元 D_h をそれぞれ求めることができ、この値を粒度分布の特徴として用いることができる。ちなみに、粒度分布のフラクタル次元の範囲は2~3であり、数値が大きくなるにしたがい、粒度分布の幅が広いこと

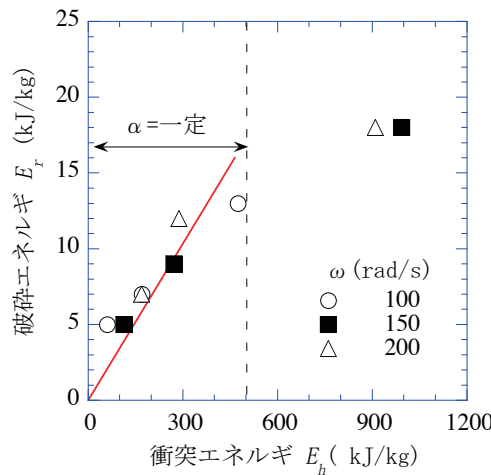
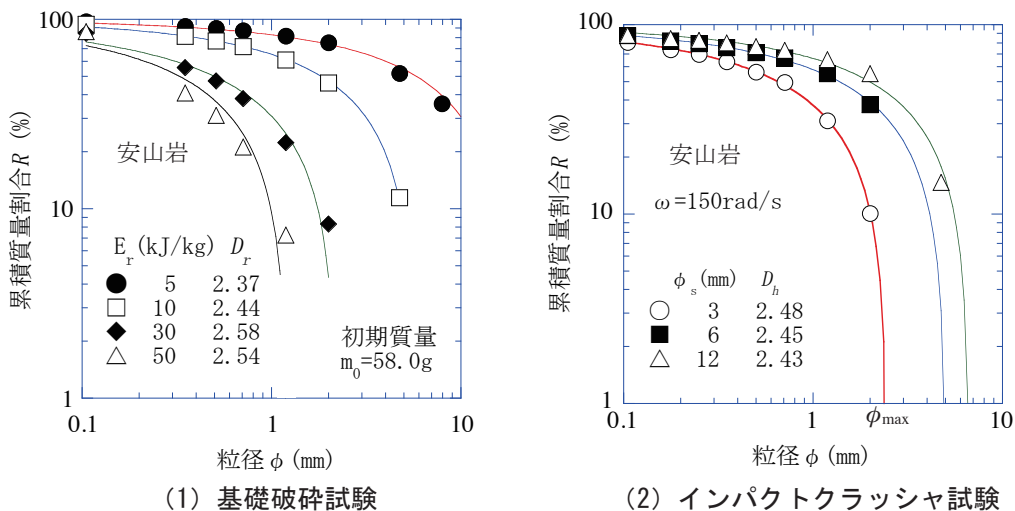


図5 衝突エネルギー E_h と破碎エネルギー E_r との関係



(1) 基礎破碎試験

(2) インパクトクラッシャ試験

図6 破碎物の粒度分布

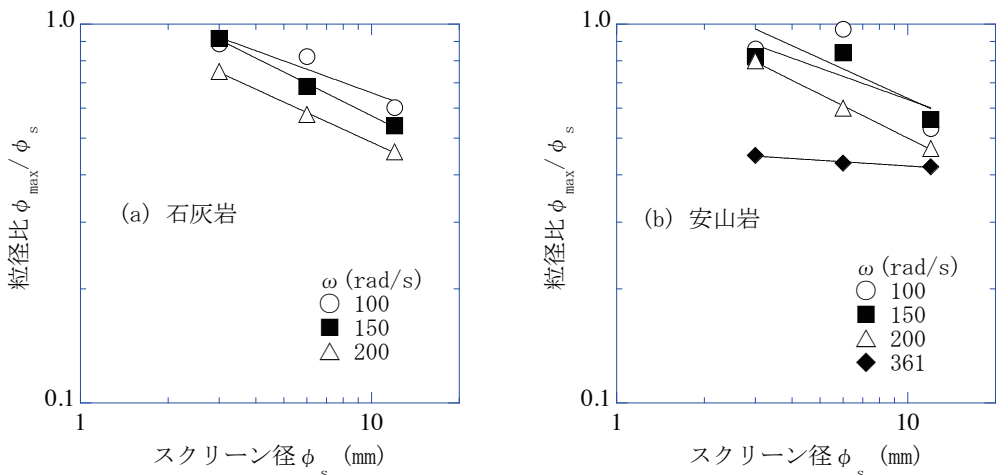


図7 インパクトクラッシャの破碎による粒径比 ϕ_{max}/ϕ_s とスクリーン径 ϕ_s との関係

を示している。ここで、粒子の最大径を個別に測定することは困難なので、例として図6(2)に示すように、この粒度分布が、累積質量割合 $R=1\%$ のときの値(横軸上の値)を最大粒径 ϕ_{max} と仮定し、図から ϕ_{max} を求めた。

図7(a)および(b)に、インパクトクラッシャによる破碎物について、粒径比 ϕ_{max}/ϕ_s とスクリーン径 ϕ_s との関係を示す。両図より、石灰岩および安山岩とも、スクリーン径が大きくなると粒径比 ϕ_{max}/ϕ_s は小さくなり、またハンマの角速度が大きくなると、粒径比 ϕ_{max}/ϕ_s は小さくなるのがわかる。とくに図7(b)より、十分に破碎エネルギーが大きい場合($\omega=361\text{rad/s}$)には、 ϕ_{max}/ϕ_s は0.4程度で一定となることがわかった。したがって、このような岩石の破碎特性を把握することで、スクリーン径 ϕ_s および角速度 ω から、最大径 ϕ_{max} を推定することが可能であり、さらに ϕ_{max} で正規化した粒度分布式(3)によって、粒度分布を推定することが可能となる。

4.3 粒度分布への影響因子

図8に基礎破碎試験の破碎物における破碎エネルギー E_r とフラクタル次元 D_r との関係を示す。両図とも、破碎エネルギー E_r の増加にともない、フラクタル次元 D_r は増加する傾向にあり、図8(a)の石灰岩は、図8(b)の安山岩に比較し、フラクタル次元が大きく変化することがわかる。このことから、比較的強度の低い石灰岩は、安山岩に比較し低いエネルギーで破碎しやすく、粒度分布の幅が広がる傾向がわかった。

次に、インパクトクラッシャによる破碎物について、初期粒径 ϕ_0 に対する平均粒径 ϕ_{50} の比を破碎比とし、図9に破碎比 ϕ_{50}/ϕ_0 とフラクタル次元 D_h との関係を示す。ここで、破碎比が小さくなると、破碎エネルギーは大きくなっていることを示している。図9(a)の石灰岩では、角速度 ω に係わらず、破碎比 ϕ_{50}/ϕ_0 が小さくなるとフラクタル次元は大きくなる傾向にあることがわかる。これは、基礎破碎試験の図8(a)の傾向と調和的である。しかし、図9(b)の安山岩では、角速度 $\omega > 150\text{rad/s}$ の条件にお

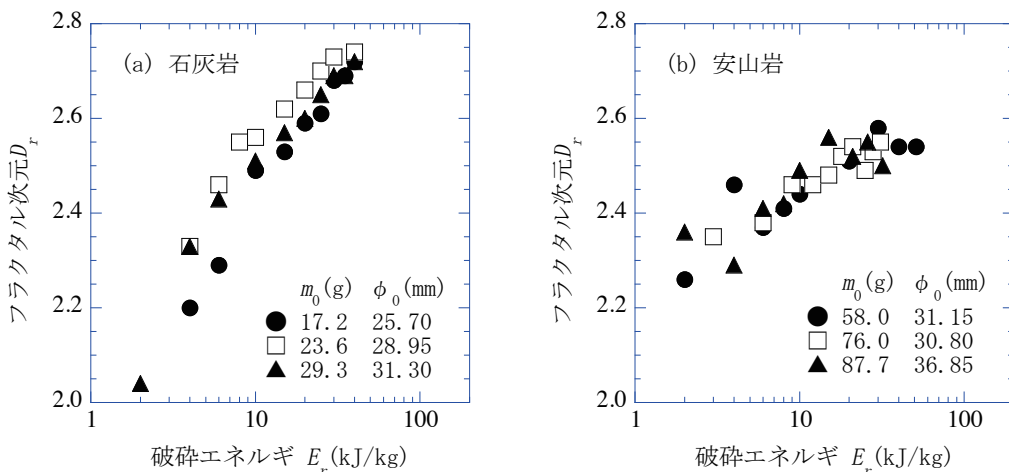


図8 基礎破碎試験における破碎エネルギー E_r とフラクタル次元 D_r との関係

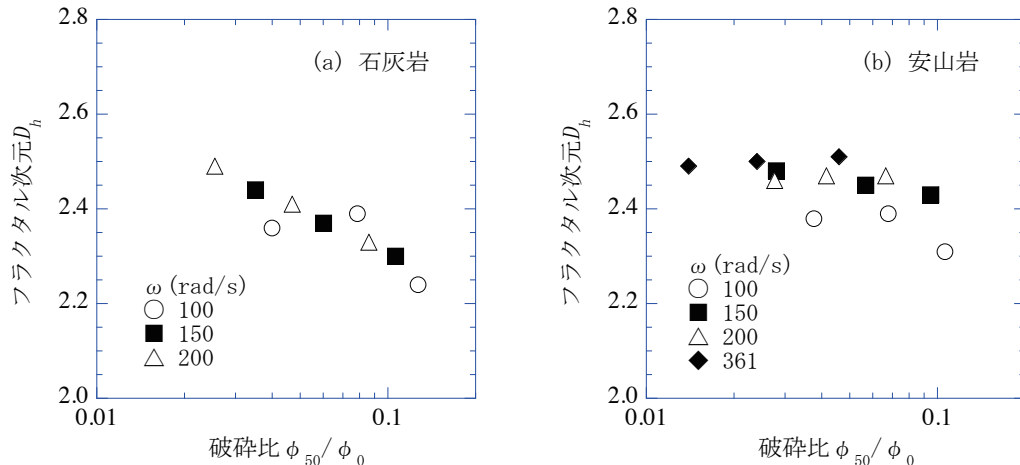


図9 インパクトクラッシャによる破砕比 ϕ_{50}/ϕ_0 とフラクタル次元 D_h との関係

いては、破砕比 ϕ_{50}/ϕ_0 に係わらず、フラクタル次元は、ほぼ一定であり、角速度 $\omega=100$ rad/s においてのみ、それ以上の角速度のデータと比較し、フラクタル次元が小さいことがわかる。このことから、比較的、強度の低い石灰岩では、角速度 $\omega > 100$ rad/s ならば、十分に衝撃力が大きく、角速度の影響はみられ無いが、安山岩のような硬質な岩石では、角速度が低い ($\omega < 100$ rad/s) 場合、十分に衝撃破砕されず、フラクタル次元が小さくなる傾向になることがわかった。また、岩種によらず、破砕比が $\phi_{50}/\phi_0 < 0.07$ ならば、破砕物のフラクタル次元は $D > 2.4$ となることから、実積率も65%以上が見込まれると予想される³⁾。

以上のことから、インパクトクラッシャの破砕においては、岩種に係わらず、衝撃力を大きくし破砕比を小さくするなら、破砕物の実積率は、コンクリート骨材として十分な値となることがわかった。

5. おわりに

本研究では、岩石の破砕工程のみによって、一貫的な骨材を生産する手法の確立を目的とし、インパクトクラッシャを用いて、岩石の破砕試験をおこない、破砕物の実積率が大きくなる破砕条件について明らかとした。また、クラッシャによって、破砕物の平均粒径を制御する手法を明らかとした。

本研究の結果を要約すると、以下のようである。

- (1) インパクトクラッシャによる破砕物の粒度分布は、フラクタル次元を用いて理論的に定式化できる。
- (2) インパクトクラッシャの衝撃力が十分大きい場合、破砕物の最大粒子径は、スクリーン径 ϕ_s の約0.4倍程度である。
- (3) 岩石への破砕エネルギーが増加すると、破砕物の粒度分布を特徴づけるフラクタル次元は大きくなる。
- (4) 岩種に係わらず、衝撃力を大きくし破砕比を0.07以下にするなら、破砕物のフラクタル次元は大きくなり、その実積率はコンクリート骨材として十分な値となる。

引用文献

- 1) 須藤定久 (2009) : 骨材需給のゆくえ-経緯と現状・今後の展開-、資源・素材2009(札幌)、Vol. 1、pp. 259-262.
- 2) 今井ら (2010) : 砕石による骨材の必要な粒度特性とその一貫的な生産法、建設用原材料、Vol. 18, No. 1, pp. 9-16.
- 3) 今井ら (2008) : フラクタル次元を用いた砕石・砕砂の新たな粒度分布の指標、砕石の研究、第23巻、第1号、pp. 2-13.
- 4) 岡屋ら (2008) : 形状と粒度分布による2次元粒子の充填特性、粉体工学会誌、第45巻、pp. 213-219.

(2013年12月13日受付 2014年2月27日受理)