

論文 再生粗骨材への圧縮載荷時における破砕値とアコースティック・エミッションのワイブル解析

飯笹 真也^{*1}・重石 光弘^{*2}・浪平 隆男^{*3}

要旨：骨材再生技術において高品質な再生骨材を効率よく回収するためには再生処理途中における品質を簡易的、かつ適切に把握することが必要である。そこで、品質の異なる再生粗骨材試料へ最大載荷荷重 400kN の載荷試験を行い、80kN 毎の破砕値、およびアコースティック・エミッションの発生数を計測した。そして、破砕値、および AE 発生数に対しワイブル解析を行い再生粗骨材の品質と載荷荷重による故障発生確率の相関性について調べた。その結果、破砕値、および AE のワイブル解析より得られたワイブルパラメータ m 値は、再生粗骨材の品質の向上に伴って増加し、再生粗骨材の品質評価指標として適用できる事が示唆された。

キーワード：再生粗骨材、骨材品質評価、破砕値、アコースティック・エミッション、ワイブル分布、

1. はじめに

建設産業廃棄物は毎年約 8 千万トン排出されており、建設産業廃棄物の大半を占めるコンクリート塊のリサイクル率は約 98% と非常に高い値となっている¹⁾。しかし、今後は、主なリサイクル先であった路盤材の需要は低下すると思われる。さらに、老朽化したコンクリート建築物、すなわち、補修、建て替えが必要な建築物が増加するため、コンクリート塊の排出量は、今後、増加すると推測される。一方、コンクリート建築物の補修、建て替え時にはコンクリート用骨材が必要となる。しかし、コンクリート骨材は有限の資源であることや、環境保全から良質なコンクリート骨材の採取が困難になる恐れがある²⁾。つまり、コンクリート塊から、コンクリート用骨材が回収可能となれば、廃コンクリート排出量の減量および環境保全への対策になる。

このような背景から骨材の高度再生処理法の開発が進められ、加熱すりもみ法などが実用化されている。また、再生骨材の品質規格として、JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」³⁾が規定され、近年では、JIS A 5308「レディミクストコンクリート」⁴⁾の改正により普通コンクリート、および舗装コンクリートに再生骨材 H の使用も可能となった。このように、今後、高品質再生骨材の需要は益々高まってくるものと考えられる。筆者らは、既に「コンクリート内パルスパワー放電法」による高度骨材再生処理法を提案して、その実用化を進めている⁵⁾。

さて、骨材再生技術の種類に関わらず、再生骨材の品質は、再生処理時間の増加と共に向上する。しかし、過剰な再生処理は処理コストの増加、および発生微粉末量の増加を引き起こす。よって、再生骨材を回収する際は、再生処理時間の増加に伴う再生骨材の品質の変化を把

握しなければならない。そのため、一定処理時間が経過する毎に試料を抽出し、品質評価を行う必要がある。しかし、密度、吸水率、およびふるいわけ試験等による厳密な評価方法は時間を要す。よって、最終的には密度、吸水率、およびふるいわけ試験等による品質評価は必要であるが、再生処理途中における品質を簡易的に評価する事が可能となれば、より効率的に再生骨材の生産が可能になると思われる。

そこで、著者らは、既に JIS A 5023「再生骨材 L を用いたコンクリート」(付属書 2) に規定されている「再生粗骨材の製造工程管理用品質試験方法」⁶⁾を応用した最大載荷荷重 100kN の載荷試験をパルスパワー再生粗骨材へ実施した⁷⁾。そして、載荷荷重 20kN 毎の破砕値を算出した結果、再生処理の進行に応じて、再生粗骨材の品質は向上し、破砕値は低下することを示した。また、載荷時におけるアコースティック・エミッション (AE) を計測し、破砕値と AE のワイブル解析を行った。その結果、破砕値のワイブルパラメータ m 値は再生粗骨材の品質の向上に伴い上昇した。一方、AE 発生数のワイブルパラメータ m 値は再生粗骨材の品質の向上に伴って顕著な増加傾向は見られなかった。

そこで、その要因は、載荷試験時の最大載荷荷重 100kN では不十分であるためと考えられ、本研究においては、British standard (英国規格) に規定されている「Methods for determination of aggregate crushing value」⁸⁾に着目し、載荷試験時の最大載荷荷重を 400kN に設定することとした。尚、試料としては、パルスパワー再生粗骨材を用いて、80kN 毎の破砕値、および載荷時に計測された AE 発生数のワイブル解析を行い、再生粗骨材の品質との相関性を調べ、簡易的品質評価手法としての適用を検討した。

*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 博(工) (正会員)

*2 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 国立大学法人熊本大学 バイオエレクトリクス研究センター准教授 博(工) (非会員)

2. ワイブル分布を用いた品質評価手法の提案

2.1 骨材載荷試験

本研究では、JIS A 5023「再生骨材 L を用いたコンクリート」(付属書 2) に規定されている「再生粗骨材の製造工程管理用品質試験方法」を応用した載荷試験を行った。以後本文において本試験を「骨材載荷試験」と称す。骨材載荷試験の仕組みを図-1 に示す。尚、骨材載荷試験に使用した試験器具について表-1 に示す。

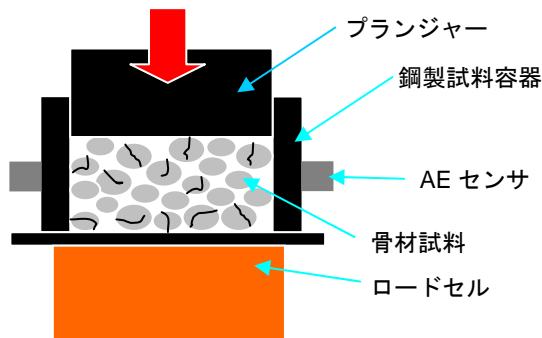


図-1 骨材載荷試験の仕組み

表-1 試験器具

名称	寸法
鋼製試料容器	内径 154mm 内高 140mm
プランジャー	直径 152mm

骨材載荷試験では所定の載荷終了時に試料を取り出し 2.5mm 目ふるいでふるいわけを行い、破砕値を式(1)により算出するものである。

$$\text{破砕値(\%)} = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

m_1 : 2.5mm 目ふるいを通過した質量(g)
 m_0 : 骨材試料の全体質量(g)

式(1)により得られる破砕値は試料全体における載荷により破砕された試料の質量の割合であるため、これは載荷による試料の故障発生確率とみなせる。よって、最大載荷荷重に至るまでの各荷重段階での破砕値を算出する事で、信頼性解析手法の一つであるワイブル解析が適用可能と考えられる。

2.2 アコースティック・エミッション

一般的に、AE とは「固体材料に外力や変形が作用することで内部に発生する微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義される。以上より、AE の発生は微小破壊と直結した現象であり、AE を検出することで固体材料内部の形成を検出可能である⁹⁾。

骨材載荷試験時において、試料容器内では試料同士の摩擦や試料の破砕が起こる。その際には AE が起こり、これらは、AE の発生原因となる。よって、図-1 のような

骨材載荷試験においては、載荷荷重の増加に伴い AE 発生数も増加する。載荷時に発生した AE は試料における故障の発生とみなせば載荷荷重の増加に伴う AE 発生数に対してもワイブル解析が適用できると考えられる。

また、破砕値のワイブル解析を行うためには、各載荷荷重段階で試料を取り出し 2.5mm ふるいでふるいわけをする必要があり、その都度載荷試験を行う必要がある。一方、AE 発生数のワイブル解析では、試料を取り出す必要はなく 1 回の骨材載荷試験で載荷荷重に応じた故障の発生挙動を把握する事が可能である。よって、AE 発生数によるワイブル解析の妥当性が得られれば、より簡易的な品質評価手法となる。

2.3 ワイブル分布

物体の破壊現象は、材料の最も弱い部位に生じた損傷が拡大するという現象と考えられる。ワイブル分布は、物質の故障、破壊を記述する場合に用いられる確率密度関数である¹⁰⁾。ワイブル分布の基礎式は次式で表される。

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1-F(x)} = \frac{mx^{m-1}}{\alpha} \quad (2)$$

$f(x)$: 密度関数, $F(x)$: 分布関数, m : 形状母数
 α : 尺度母数

そして、式(2)における故障の分布関数 $F(x)$ 、および密度関数 $f(x)$ は、ハザード関数から以下のように導かれる。

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right) \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{mx^{m-1}}{\alpha} \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right) \quad (4)$$

式(2)の両辺において 2 度対数をとると、

$$\log\left[\log\left\{\frac{1}{(1-F(x))}\right\}\right] = m \log x - \log \alpha \quad (5)$$

となり、これを

$$X = \log x \quad (6)$$

$$Y = \log\left[\log\left\{\frac{1}{(1-F(x))}\right\}\right] \quad (7)$$

で変換すると、

$$Y = mX - \alpha \quad (8)$$

の直線になり、式(8)の傾きは形状母数 m となる。本論文ではこれをワイブルパラメータ m 値とする。時間経過に伴う瞬間故障率は、 m 値によって変化する。 $m < 1$ ならば単調減少となり初期故障型、 $m = 1$ であれば一定となり偶発故障型、 $m > 1$ ならば単調増加となり磨耗故障型と呼ばれる。一般的には m 値が大きいかほど物質の故障率が

表-2 示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	8±2.5	1.5	47	41	176	374	724	1217	1.27

低い、すなわち物質として信頼性が高いと判断することができる。ワイブル分布の一例を図-2に示す。図-2において、累積故障率(破線)が実測値をプロットしたものであり、これを非線形最小二乗法を用いてワイブル分布にあてはめたものが近似累積故障率(実線)となる。また、この傾きがm値となる。そこで、本研究では、ワイブルパラメータm値による信頼性評価による再生粗骨材の簡易的品質評価を試みた。すなわち、m値が大きくなるほど品質が高い再生粗骨材ということとなる。

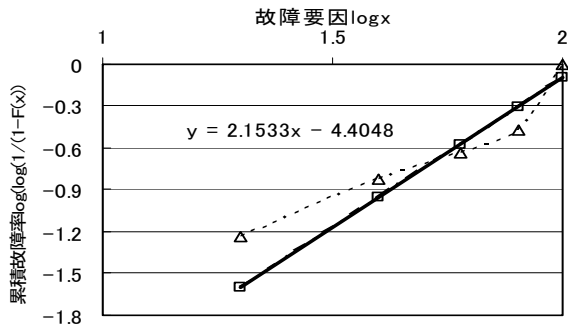


図-2 ワイブル分布

3. パルスパワー再生粗骨材

3.1 水中コンクリート内パルス放電法

著者らが提案している「水中コンクリート内パルス放電法」による高度骨材再生技術は、パルスパワー技術¹¹⁾による気体と固体の絶縁破壊現象¹²⁾を応用し、コンクリートから再生骨材を回収する技術である。回収の仕組みについて図-3に示す。

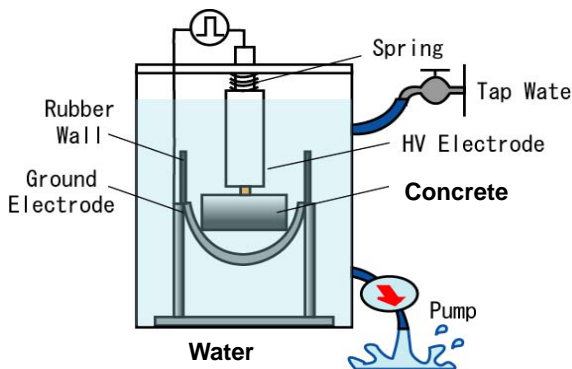


図-3 コンクリート破碎装置

「水中コンクリート内パルス放電法」は、図-3に示すように水中に設置したコンクリートに高電圧電極から繰り返し放電を行い、コンクリート破碎し再生粗骨材を回収する。放電エネルギー量(放電回数)の増加に伴い、粗骨材からのモルタルの剥離が進み回収される粗骨

材(再生粗骨材)の品質が向上する。本手法では、微粉末の発生量は10%未満ながらも、再生骨材Hが回収可能である¹³⁾。

3.2 パルスパワー再生粗骨材の一般的性質

パルスパワー再生粗骨材回収のために使用したパルスパワー発生装置はマルクスバンク方式と呼ばれるものである。本実験ではコンデンサ容量0.8μF、充電電圧400kVに設定した。尚、この放電条件における放電1回あたりのエネルギー量は6.4kJに相当する。そして、総放電エネルギー量が640kJ(放電回数100回)に達するまで表-2に示す示方配合で作製したコンクリートに対し放電を繰り返した。そして、放電エネルギー量160kJ(放電回数25回)、放電エネルギー量320kJ(放電回数50回)、および放電エネルギー量480kJ(放電回数75回)の時に再生粗骨材を回収した。また、放電処理を施していない廃コンクリート塊、および碎石の計6種類の粗骨材試料を準備した。本研究で使用した碎石は熊本県山鹿産の斑レイ岩である。斑レイ岩は九州地方に多く分布しており、熊本県などで多く使用されている。

尚、以後本論文において、各再生粗骨材試料をE=0kJ, E=160kJ, E=320kJ, E=480kJ, E=640kJ, および碎石と称する。各粗骨材試料の一般的品質を判断するために密度・吸水率試験を行った。その結果を表-3に示す。

表-3 粗骨材試料の一般的品質

粗骨材試料名	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)
E=0kJ	2.44	6.03
E=160kJ	2.59	4.14
E=320kJ	2.71	2.85
E=480kJ	2.77	2.20
E=640kJ	2.85	1.40
碎石	3.04	0.49

表-3より、パルスパワー再生粗骨材は放電エネルギー量の増加に伴って高品質になった。E=320kJ, E=480kJ, およびE=640kJの3種類の試料はJIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」²⁾の品質規格を満たした。また、E=160kJの再生粗骨材はJIS A 5022「再生骨材Mを用いたコンクリート」¹⁴⁾の品質規格を満たし、E=0kJの再生粗骨材はJIS A 5023「再生骨材Lを用いたコンクリート」⁵⁾の品質規格を満たした。

骨材載荷試験時において粒度の違いによる誤差を抑えるために、粒度調整を行い、それぞれの試料の粒度を均一にした(図-4)。粒度調整後の粒度分布は砕石のみ試料の粒度を基準とした。尚、骨材の最大骨材寸法は20mmである。

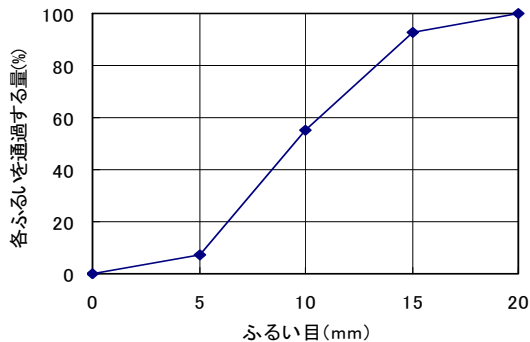


図-4 粗骨材試料の粒度

4. 骨材載荷試験による簡易的品質評価

4.1 破砕値のワイブル解析

各試料に最大載荷荷重を400kNに設定した骨材載荷試験を行った。その際、載荷荷重が80kN, 160kN, 240kN, 320kN, および400kNに達する毎に試料を取り出し2.5mmふるいでふるいわけを行い、それぞれの破砕値を算出した。載荷試験は各試料において3回行った。得られた各試料の破砕値の平均を図-5に示す。

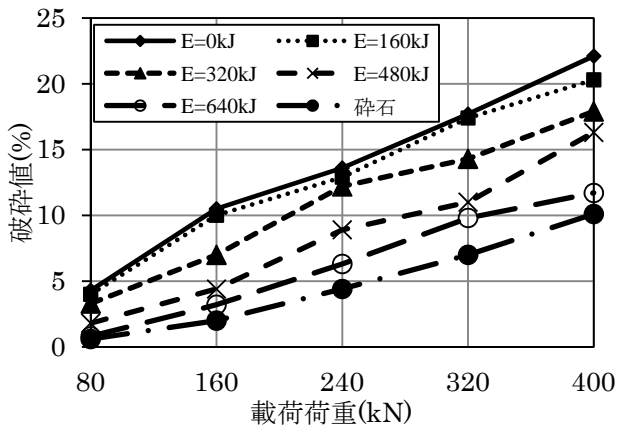


図-5 各試料の80kN毎の破砕値(%)

図-5に示した各載荷荷重の破砕値より、全ての粗骨材試料において、載荷荷重の増加に伴って破砕値は増加している。さらに、同じ載荷荷重における各試料の破砕値に着目すると、高品質な再生粗骨材ほど破砕値は小さくなった。物体の破壊現象は、材料の最も弱い部位に生じた損傷が拡大する。よって、破砕値が小さい試料は軟弱部位が少ないことを示している。ここで、再生粗骨材における軟弱部分とは、粗骨材と付着モルタルとの界面である。従って、再生粗骨材の載荷試験においては付着モルタルが優先的に剥離することとなる。また、一般的にモルタルの力学的強度は粗骨材のそれよりも低い。そ

のため、モルタルが剥離した後も載荷を継続すれば優先的にモルタルが破砕されることとなる。

このことより、付着モルタルが多い再生粗骨材試料ならば低い載荷荷重から故障発生数が多くなる。これは2.5mm以下に破砕されたもののほとんどをモルタル分が占めていた事からも確認できた。そして、再生粗骨材の品質は付着モルタル分に大きく依存するため、破砕値の大きい再生粗骨材は低品質な再生粗骨材となる。一方、付着モルタルが少なれば粗骨材の力学的強度に達するまで破砕されないため、低い載荷荷重下において故障発生数は僅少で、粗骨材の力学的強度に達するような高い載荷荷重下で故障発生数が急増する。

また、図-5に示す破砕値の大小は再生粗骨材試料の密度が大きく、吸水率が低いほどその品質が高いということと一致した。従って、骨材の品質は密度、吸水率などから評価されるものであるが、品質の異なる骨材間の相対的な品質の良否を判断する上では破砕値もまた有効な指標となる。しかし、本研究で用いた再生粗骨材試料の原骨材の種類は全て同一であったため、原骨材の種類が同じ場合の相対的な品質評価は可能である。

そこで、破砕値を骨材への載荷によって発生した故障と考え、各荷重段階における破砕値に対してワイブル解析を行った。図-6に破砕値のワイブル分布を示す。図-6における近似直線の傾きがm値となる。表-4に各試料の破砕値のm値を示す。

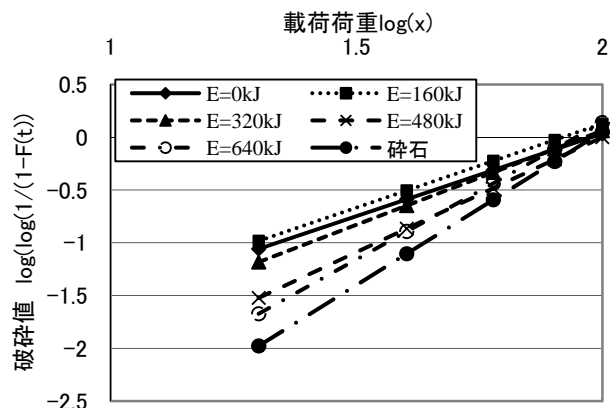


図-6 80kN毎の破砕値のワイブル分布

表-4 破砕値のワイブル解析m値

試料	0kJ	160kJ	320kJ	480kJ	640kJ	砕石
m 値	1.56	1.59	1.78	2.18	2.59	2.90

図-6、および表-4から分かるように破砕値のワイブル解析より得られたm値は再生処理の増加に伴い大きい値となった。2.3節で述べたようにm値が大きいほど信頼性が高いと評価する事ができる。この解析結果から得られたm値は再生粗骨材の品質の優劣を示す指標となることが確かめられた。

4.2 AE 発生数のワイブル解析

骨材荷重試験時に鋼鉄製試料容器側面に設置した2つの AE センサにより再生粗骨材への荷重時に発生する AE を計測した。本試験では、可能な限り多くの AE の検出を試みたが、使用器具の問題上 AE の検出しきい値を低く設定した場合、AE が計測不能となったため、AE の検出しきい値を 60dB とした。図-7 に各粗骨材試料に最大荷重荷重 400kN までの荷重を行った際の 40kN 毎の AE 累計発生数を示す。図-7 に示す累計 AE 発生数は AE センサ 2 つで計測された累計 AE 発生数の平均である。

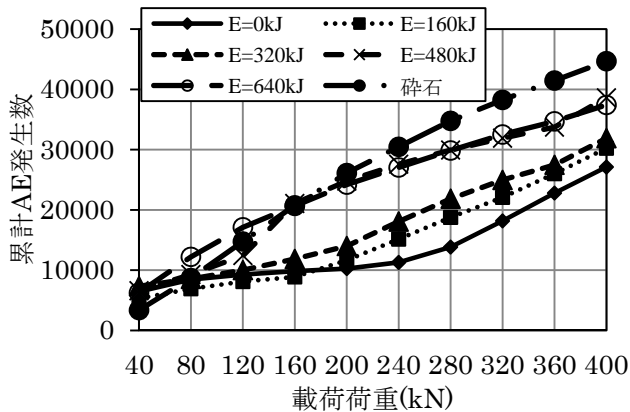


図-7 各試料の40kN毎の累計AE発生数

累計 AE 発生数は全ての粗骨材試料において荷重の進行に伴い増加した。しかしながら、破砕値の場合とは異なり、AE 発生数は品質の高い再生粗骨材試料ほど多く観察された結果となっている。本研究では、AE が計測された場合を粗骨材試料が破砕された場合とみなし、これをワイブル解析における累積故障発生数としてワイブル解析を行った。図-8 に累計 AE 発生数のワイブル分布を示す。図-8 における近似直線の傾きが m 値となる。表-5 に各試料の破砕値の m 値を示す。

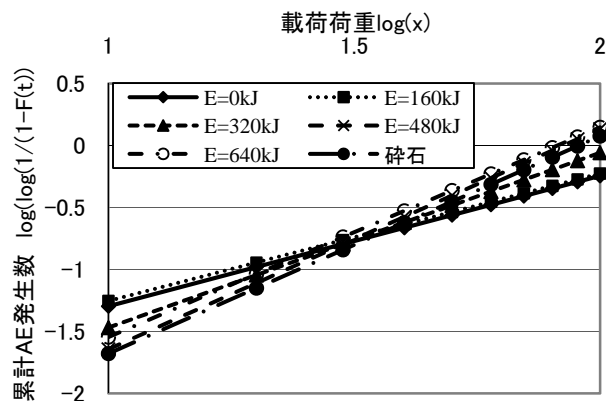


図-8 40kN毎の累計AE発生数のワイブル分布

表-5 累計AE発生数のワイブル解析m値

試料	0kJ	160kJ	320kJ	480kJ	640kJ	砕石
m 値	1.05	1.03	1.41	1.73	1.69	1.76

図-8, および表-5 より累計 AE 発生数のワイブル解析より得られた m 値は破砕値のワイブル解析同様に再生処理段階の増加に伴い大きくなった。よって、原骨材が同じ場合の再生粗骨材への荷重により得られた累計 AE 発生数のワイブル解析による再生粗骨材の簡易的品質評価が行える可能性が示唆された。

4.3 m 値と再生粗骨材の品質との相関性

再生粗骨材への荷重時に得られた破砕値, および累計 AE 発生数はワイブル解析により得られる m 値が再生粗骨材の品質の優劣を示す指標として用いられる可能性を示した。そこで、破砕値, および累計 AE 発生数のワイブル解析より得られたそれぞれの m 値と、再生粗骨材の密度, および吸水率との相関性を調べた。再生粗骨材の絶乾密度と m 値の関係を図-9, また吸水率と m 値の関係を図-10 に示す。

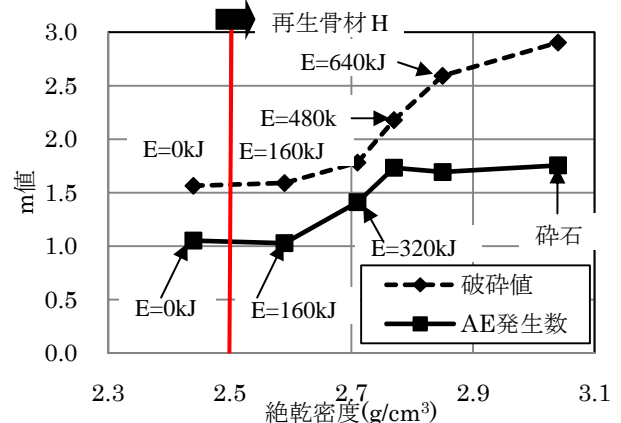


図-9 破砕値のm値と絶乾密度の関係

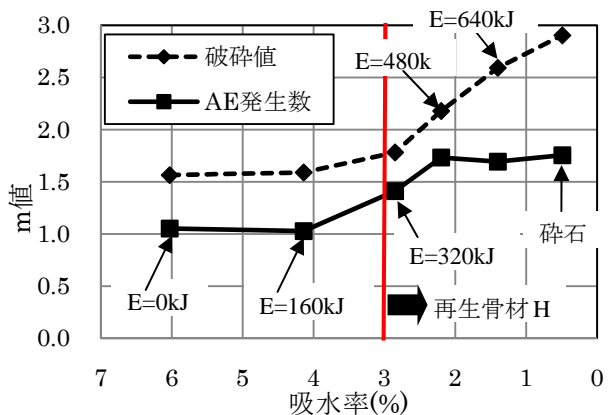


図-10 AE発生数のm値と吸水率の関係

図-9, および図-10 より再生粗骨材の密度が上昇し、吸水率が低下するに従って破砕値, および累計 AE 発生数のワイブル解析より得られた m 値は上昇傾向を示した。ここで、E=0kJ と E=160kJ の m 値に着目するとほぼ同じ値となっている。E=160kJ の方が高品質であるため、m 値は高い値を示すと考えられたが、これらの再生粗骨材は再生骨材 H 規格を満たしておらず、モルタル部分が

多い試料であるため、荷重による故障発生がモルタル部に集中することとなり、つまり m 値は再生粗骨材の品質が低い場合においては、ほぼ同じ値に収束するものと考えられる。次に、 $E=320\text{kJ}$ 時の m 値に着目すると、 m 値は $E=160\text{kJ}$ の m 値よりも上昇している。これは、 $E=320\text{kJ}$ の再生粗骨材は再生骨材 H の規格を満たすものであり、付着モルタル分が少ないためと考えられる。

次に $E=480\text{kJ}$, $E=640\text{kJ}$, および砕石については、破砕値による m 値と累計 AE 発生数による m 値では違いが見られる。すなわち、破砕値の m 値については、粗骨材の品質の向上に従って単調に増加しているのに対し、累計 AE 発生数の m 値ではこれらの m 値は上昇傾向が見られなかった。このことは、破砕値は 2.5mm 以下に破砕された事象のみを対象とするのに対し、累計 AE 発生数の場合は、試料容器内で生じているほとんどの故障発生を対象としている。そのため、十分に高品質な粗骨材試料となると、荷重による故障発生確率はほぼ同じになると考えられる。さらに、 $E=480\text{kJ}$ から $E=640\text{kJ}$ への密度、および吸水率の変化はそれまでに比べ小さいものである。そのため m 値の変化も小さくなったものと思われる。

以上より、破砕値、および累計 AE 発生数のワイブル先関より得られた m 値と再生粗骨材の密度、吸水率には相関性があると考えられる。また、 m 値による簡易的品質評価を行う場合、 m 値の増加傾向が見られれば再生骨材 H 相当の品質と推測する事が可能と考えられる。さらに、累計 AE 発生数の m 値がほぼ同じ値になった場合には、再生骨材 H として十分な品質であると推測できる。

5. まとめ

本研究では、再生粗骨材の簡易的品質評価を提案し、その適用性を検討した。すなわち、最大荷重荷重 400kN の骨材荷重試験を再生粗骨材へ行い、破砕値、および累計 AE 発生数を計測した。その結果、全ての再生粗骨材試料において、破砕値、および累計 AE 発生数は荷重荷重の増加に伴い増加した。それらを荷重によって発生した故障と捉えワイブル解析を行った結果、再生粗骨材の品質の向上に伴って m 値が大きくなった。そこで、再生粗骨材の品質と m 値との相関性を調べた。その結果、再生粗骨材の品質と m 値には相関性があることが分かった。しかし、再生粗骨材が低品質である場合、 m 値は低い値で収束した。一方、高品質な再生粗骨材では m 値は増加したが、その増加傾向には違いがあった。

本研究で得られた成果より、原骨材と同じ再生粗骨材試料へ荷重を行った場合の破砕値、および累計 AE 発生数のワイブル解析より得られた m 値による簡易的な品

質評価が行える可能性が示唆された。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構による研究成果最適展開支援事業(育成研究)、文部科学省科学研究費補助金、および「熊本大学衝撃エネルギー工学グローバル COE」の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局：「建設廃棄物品目別排出量平成 17 年度建設副産物実態調査」,2006
- 2) 須藤定久：「日本の砕石資源」,(社)日本砕石協会,2001
- 3) 日本工業標準調査会：JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」,2005
- 4) 日本工業標準調査会：JIS A 5308「レディミクストコンクリート」,2009
- 5) 重石光弘, 浪平隆男ほか：パルスパワーによるコンクリートからの粗骨材の分離・回収, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp1475-1480, 2006.
- 6) 日本工業標準調査会：JIS A 5023「再生骨材 L を用いたコンクリート」,2006
- 7) 飯笹真也, 重石光弘ほか：パルスパワー放電方式再生粗骨材の荷重時におけるアコースティック・エミッション, コンクリート工学年次論文集, 30 巻, 2 号, pp433-438, 2008.7
- 8) British standard institution, BS 812,Part 110 : Methods for determination of aggregate crushing value (acv),1990
- 9) 大津政康：「アコースティック・エミッションの特性と理論—構造物の診断と破壊現象解析—」, 森北出版, 2005
- 10) 日本科学技術連盟：「@信頼性データの解析 -日科技連ワイブル確率紙の使い方-」, 日本科学技術連盟, pp1-10, 1967
- 11) 原雅則, 秋山秀典：「高電圧パルスパワー工学」, 森北出版株式会社, pp6-8, 1991
- 12) 秋山秀典：「高電圧パルスパワー工学」, オーム社, pp36-37,2003
- 13) S. Iizasa, M. Takaki, M. Shigeishi, T. Namihira, M. Ohtsu, H. Akiyama, "Recovery of aggregate from concrete waste by the electric pulsed power technology", Con-mat09, pp.1261 -pp.1266, 2009.JAPAN
- 14) 日本工業標準調査会：JIS A 5022「再生骨材 M を用いたコンクリート」,2007