

論文 パルスパワー放電方式再生粗骨材の載荷時におけるアコースティック・エミッション

飯笹 真也^{*1}・重石 光弘^{*2}・浪平 隆男^{*3}・大津 政康^{*4}

要旨：本研究では再生粗骨材の簡易的品質評価手法確立のために、パルス放電技術によって回収された再生粗骨材にまで骨材強度試験を応用した載荷試験を行った。そして、この試験時において試料に対する 2.5mm 以下に破砕されたものの質量割合および AE を計測した。そして、20kN 毎の破砕値、および AE ヒット数におけるワイブル分布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、破砕値における解析結果では品質との相関性を得ることができた。一方、AE ヒット数における解析結果では明確な相関性を得ることはできなかったが、品質評価手法として適用できる可能性を示唆した。

キーワード：再生粗骨材、パルスパワー、骨材品質評価、アコースティック・エミッション

1. はじめに

現在、建設廃棄物においてコンクリート塊の占める割合は高く、そのリサイクル率は近年でも非常に高い割合を示している。しかし、排出量は今後も増大する傾向が見られる。また近年の建設物のリニューアルの増加などによって構造用骨材の必要性の高まりや天然骨材の枯渇懸念などの問題からコンクリート塊から回収された再生粗骨材の構造用粗骨材への再利用を行っていく必要がある。このような背景から骨材の高度再生処理方法の開発が進められ、現在の代表的な高度再生処理技術として磨砕処理法が実用化されている。また近年では再生粗骨材の品質基準として、JIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」²⁾が規定されている。

そして、本研究ではこれまで粗骨材の再生処理方法として磨砕処理法ではなく水中におけるパルス放電技術³⁾を用いた骨材再生技術を提案してきた⁴⁾。ここで、この技術で回収された再生粗骨材を「パルスパワー再生粗骨材」と称する。このパルスパワー再生粗骨材は「コンクリート用再生骨材H」としての基準を十分に満たすことが可能であることがこれまでの研究で判明した。

次に、パルスパワー技術による再生粗骨材処理過程の確立を目指した場合、密度、吸水率試験⁵⁾、ふるいわけ試験⁶⁾による品質評価試験は必要な品質評価であるが、処理過程における品質評価手法としては時間コストなどの問題点からは不向きと考えられるため、簡易的に品質を評価できる手法が必要と考えられる。そこで、本研究ではTSA 0006の「骨材強度試験」⁷⁾を応用した再生粗骨材への載荷試験を行う事を考えた。そして、載荷によって2.5mm以下に破砕されたものの質量比を用いて算出

する破砕値、および載荷時にAEが計測された場合を載荷荷重による故障発生と見なし、それぞれにワイブル分布⁸⁾⁹⁾を用いた故障解析を行い、再生粗骨材の簡易的品質評価として適用できる可能性について調べた。

2. パルスパワー再生粗骨材

2.1 パルスパワー技術による骨材再生技術

本研究では、パルスパワー技術⁵⁾を用いて再生粗骨材を回収するために、パルスパワー技術の複合誘電体における絶縁破壊⁶⁾の特性を利用し、水中においてコンクリート塊にパルス放電を行い、コンクリート塊を破壊し再生粗骨材を回収した。尚、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。今回、本試験に使用したパルスパワー再生粗骨材は、コンデンサ容量0.8μF、電圧400kVでの高電圧により発生させた瞬間的な放電流パルス放電を20回から100回まで20回毎に印加してコンクリートを破砕し、回収したものを使用した。尚、回収の仕組みについて図-1に示す。また、以後、パルス放電1回のことを印加回数1回と称する。

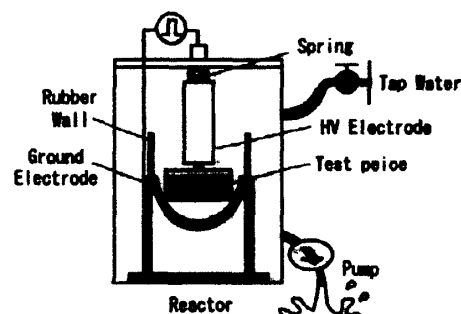


図-1 パルスパワー再生粗骨材の回収の仕組み

*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 社会環境工学専攻 (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 大学院自然科学研究科 准教授 博(工) (非会員)

*4 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 教授 工博 (正会員)

2.2 パルスパワー再生粗骨材の一般的品質

パルスパワー再生粗骨材の一般的品質を判断するために印加回数20回毎に回収された再生粗骨材において密度・吸水率試験・ふるいわけ試験⁸⁾を行った。その結果を表-1に示す。表-1より、パルスパワー再生粗骨材は印加回数の増加に伴って高品質になり、原粗骨材の値に近づいていることが分かる。これは、印加回数を重ねることで再生粗骨材に付着しているモルタル分の剥離が進行していくためである。これは、ふるいわけ試験結果より得られた粗粒率からも判断することができる。

そして、表-1より今回の印加条件で回収されたパルスパワー再生粗骨材は印加回数60回の時点でJIS A 5021「再生粗骨材H」の規格を満たし、原粗骨材の粗粒率を下回ったため細粒化が確認できた。ここで、印加回数80回と100回の変化の様子に着目する。密度においては表乾密度、絶乾密度、吸水率において変化がほとんどなくなっている。密度、吸水率共に再生粗骨材への付着モルタル分による影響が大きいと考えられるため、印加回数が80回において品質に悪影響を及ぼすような付着モルタル分がほとんどなくなっていると考えられる。しかし、印加回数100回においても原粗骨材に比べ絶乾密度、表乾密度共に小さくなり、吸水率が大きくなっている。これは、付着モルタル分が減少した粗骨材にパルスパワーを印加したことによって、絶縁破壊が粗骨材の内部で起きてしまったため、骨材に損傷が生じるなどしたためだと考えられる。つまり、パルスパワー再生粗骨材は印加回数を増加させれば高品質になるが、必要以上の印加を行うと粗骨材自体が破壊されてしまうと考えられる。

3. ワイブル分布を用いた品質評価手法の提案

3.1 載荷試験概要

本研究では、再生粗骨材への載荷時に付着モルタル分が優先的に剥離するという特徴に着目し、印加回数の異なる再生粗骨材、つまり品質の異なる再生粗骨材に載荷試験を行った。そして、載荷試験時における故障発生確率と再生粗骨材の品質に相関性があるのではないかと考えた。尚、試料として印加回数20回毎に回収されたパルスパワー再生粗骨材を使用し、載荷荷重は20kNから100kNまで20kN毎に設定した。試験時の様子を図-2に示す。この試験では、載荷によって2.5mm以下に破碎されたものの質量を計測した。また、鋼鉄製容器の側面にAEセンサーを2つ設置し、載荷によって発生した故障をAEにより計測した。ここで、本試験における故障発生とは、再生粗骨材が2.5mm以下に破碎された場合、および載荷によってAEが計測された場合とする。尚、載荷試験は同じ印加回数のパルスパワー再生粗骨材で2回または、3回行った。

3.2 骨材強度試験

本研究では、「骨材強度試験」を応用した載荷試験を行った。以下に「骨材強度試験」について示す。この試験は、鋼鉄製の容器の中に再生粗骨材を入れ100kNの載荷を行い、その後破碎された再生粗骨材を2.5mm目ふるいでふるい分け、2.5mm以下に破碎されたものの質量を計測し、式(1)に示す式で100kN破碎値(C_g)を算出する。

$$100\text{kN 破碎値}(C_g) = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

そして、求められた100kN破碎値から式(2)に示す式で推定吸水率(Q)を算出する。

$$\text{推定吸水率}(Q) = 0.85C_g + 1.50 \quad (2)$$

次に、求められた推定吸水率から式(3)に示す式で推定安定性質量(P)を計算する。

$$\text{推定安定性損失質量}(P) = 8.0 \times Q \quad (3)$$

これらのパラメータによって品質を簡易的に評価する。尚、あらかじめ行った骨材強度試験で得られた推定吸水率および吸水率試験結果を表-2に示す。

表-1 パルスパワー再生粗骨材試験結果

印加回数	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
20 回	2.60	2.47	5.25	7.23
40 回	2.75	2.65	3.71	6.82
60 回	2.87	2.81	2.38	6.56
80 回	2.99	2.94	1.53	6.50
100 回	2.99	2.94	1.53	6.38
原粗骨材	3.06	3.04	0.49	6.66



図-2 パルスパワー再生粗骨材への載荷試験

表-2 推定吸水率、吸水率試験結果の比較

	原粗骨材	パルスパワー 再生粗骨材
吸水率(%)(¹)	0.49	1.42
推定吸水率(%)(²)	2.61	3.03

(1) JIS A 1110-1999 による試験結果

(2) TS A 0006 による試験結果

表-2 から分かるように推定吸水率と吸水率試験によって得られた吸水率には大きな違いが見られた。これは推定吸水率および推定安定性損失質量を求める式(2)、式(3)が 100kN 破砕値を用いて算出する経験式であるためである。また、再生粗骨材に載荷を行った際に 2.5mm 以下に破砕されたものに剥離した付着モルタル分が多く含まれるため、推定吸水率および推定安定性損失質量は再生粗骨材に付着しているモルタル分の影響を大きく受けられると思われる。この結果から骨材強度試験によって得られた推定吸水率による簡易的な品質評価は難しいと言える。

3.3 ワイブル分布

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ため、載荷試験によりパルスパワー再生粗骨材が 2.5mm 以下の大きさに破砕される事象、および載荷によって計測された AE 事象がワイブル分布で表されると考える。尚、ワイブル分布は式(4)で表すことができる。

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1-F(x)} = \frac{mx^{m-1}}{\alpha} \quad (4)$$

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

時間経過に伴う瞬間故障率は、式(4)中の形状母数 m によって変化する。 $m < 1$ のときには単調減少で初期故障型、 $m = 1$ であれば一定で偶発故障型、 $m > 1$ のときには単調増加で磨耗故障型となる。なお、 $m = 1$ の場合はワイブル分布は指数分布に一致する。

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。

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right) \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{mx^{m-1}}{\alpha} \exp\left(-\frac{x^m}{\alpha}\right) \quad (6)$$

式(5)の両辺において 2 度対数をとると、

$$\ln\left[\ln\left\{\frac{1}{(1-F(x))}\right\}\right] = m \ln x - \ln \alpha \quad (7)$$

となり、これを

$$Y = \ln\left[\ln\left\{\frac{1}{(1-F(x))}\right\}\right] \quad (8)$$

$$X = \ln x$$

で変換すると、 $Y = mX - \ln \alpha$ の直線になる。

物体の破壊現象は、材料の最も弱いところにできた損傷が一気に拡大するというメカニズムと言える。また材

料の平均的な性格とは関係なく最弱点だけで決まるため、破壊データの統計的性格は、正規分布を前提にした平均と標準偏差の関係が役に立たない。つまり、正規分布を持つ母集団からその一部を抜き出したとき、最小強度の分布がどうなるかを調べなければならない。

そして、これは再生粗骨材への載荷時にも適用できると考えられる。再生粗骨材の品質に最も影響を及ぼす因子として付着モルタル量が挙げられる。つまり、付着モルタル量が多ければ低品質な再生粗骨材となる。また、付着モルタル量が少なくなるにつれて高品質な再生粗骨材となる。そして、再生粗骨材自体の力学的強度を見た場合、最弱点の部分とは付着モルタル分と再生粗骨材の界面と言える。つまり、再生粗骨材に載荷をした場合、破壊現象はこの界面から発生するため優先的に付着モルタル分の剥離が起こる。これは、過去に行った骨材強度試験結果において確認することができた。

ここで、再生粗骨材への載荷時の破壊現象における本関数の適用を考えてみると、 $F(x)$ を再生粗骨材の故障発生確率、 x を AE の累積発生数または 20kN 毎の破砕値とした場合、再生粗骨材の故障発生確率を式(6)により最小二乗法で近似的に示すことができる可能性がある。

3.4 20kN 毎の破砕値におけるワイブル分布解析

印加回数 20 回毎に回収したパルスパワー再生粗骨材の載荷荷重 20kN 毎での破砕値におけるワイブル分布解析を行った。この場合、故障要因のパラメータを 100kN までの荷重とし、再生粗骨材の故障を 2.5mm 以下に破砕された場合とした時の関係を非線形最小二乗法を用いて $Y = mX - \alpha$ で直線近似したものを図-3 に示す。縦軸は 2.5mm 以下に破壊された時の破壊確率、横軸は応力レベルを表しており、両軸の数値は 10 のべき乗の値を示している。近似累積故障率線形式の傾きが m 値になる。また印加回数 20 回毎で回収されたパルスパワー再生粗骨材の載荷荷重 20kN 毎の破砕値、および印加回数 20 回毎の m 値を表-3 に示す。

表-3 印加回数 20 回毎破砕値および m 値

	20kN	40kN	60kN	80kN	100kN	m 値
20 回	1.7	3.2	4.7	5.9	8.2	1.6059
40 回	0.8	2.1	2.7	4.3	5.0	1.8720
60 回	0.7	1.7	2.2	2.7	3.5	2.0657
80 回	0.6	1.0	1.6	2.5	3.1	2.0389
100 回	0.3	0.7	1.0	1.3	2.2	2.1533

まず表-3 より印加回数 20 回毎における 20kN 毎の破砕値の推移を見た場合、印加回数の増加に伴って破砕値は低下しているのが分かる。これはパルスパワー再生粗骨材に載荷を行った際に付着モルタル分が優先的に剥

離する事が主な要因と言える。これは、2.5mm 以下に破碎されたものに剥離したモルタル分が多く見られたことから推測できる。そして、パルスパワー再生粗骨材が高品質になるにつれて付着モルタル分が低下し 2.5mm 以下に破碎されたものが低下したため、同時に破碎値も低下したと考えられる。つまり、パルスパワー再生粗骨材が高品質になってきたことを破碎値の推移から推測可能と言える。

次に、図-3 および表-3 より印加回数 20 回毎の m 値の推移を見ると印加回数の増加に伴って、 m 値も上昇しているのが分かる。つまり、 m 値により故障発生確率を判断した場合、故障発生確率が序盤に集中するのではなく、载荷終盤においても故障発生が分散する磨耗故障型が進行していると言える。また、今回の故障発生として使用したパラメータは 20kN 毎の破碎値であるため、印加回数の増加に伴って破碎現象が载荷序盤で突発的に起こるのではなく、载荷開始から载荷終了にわたって起きている事を示している。そして、上記したように再生粗骨材に载荷した際には载荷序盤で付着モルタル分が優先的に剥離するため、载荷序盤で剥離すると思われる付着モルタル分が印加回数の増加に伴い減少し、载荷序盤で 2.5mm 以下に破碎される質量が低下し、载荷終盤では粗骨材自体の破碎が起きていると推測される。これは 2.5mm 以下に破碎されたものに含まれていた剥離したモルタル分が印加回数の増加と共に低下していたことから推測できる。

ここで、表-3 より印加回数 60 回以上における m 値を見ると、変化の割合が小さくなっていることが分かる。これは故障発生の際のばらつきが小さくなってきたことを示している。つまり载荷序盤で剥離すると思われる脆弱な付着モルタル分が低下したため、再生粗骨材の品質が高品質になってきたためと考えられる。これは密度、吸水率試験の結果において印加回数 60 回の時点で「再生粗骨材 H」の規格を満たしていた事からも推測できる。

以上の事より、再生粗骨材に载荷試験を行った際の 20kN 毎における破碎値におけるワイブル分布解析を品質評価に適用できる可能性が示唆された。

3.5 载荷時に検出された AE におけるワイブル分布解析

3.4 同様、印加回数 20 回毎におけるパルスパワー再生粗骨材に载荷荷重 100kN までの载荷試験時において、20kN 毎に载荷した際において検出された、AE の最大振幅数が 40dB 以上 100dB 以下の AE の累積発生数を計測し、载荷時における故障発生を AE が計測された場合と見なし、計測された AE におけるワイブル分布解析を行った。ここで、再生粗骨材に载荷を行った際に故障が発生し AE が計測される現象を考えてみると、载荷序盤では再生粗骨材からの付着モルタル分の剥離時や再生粗

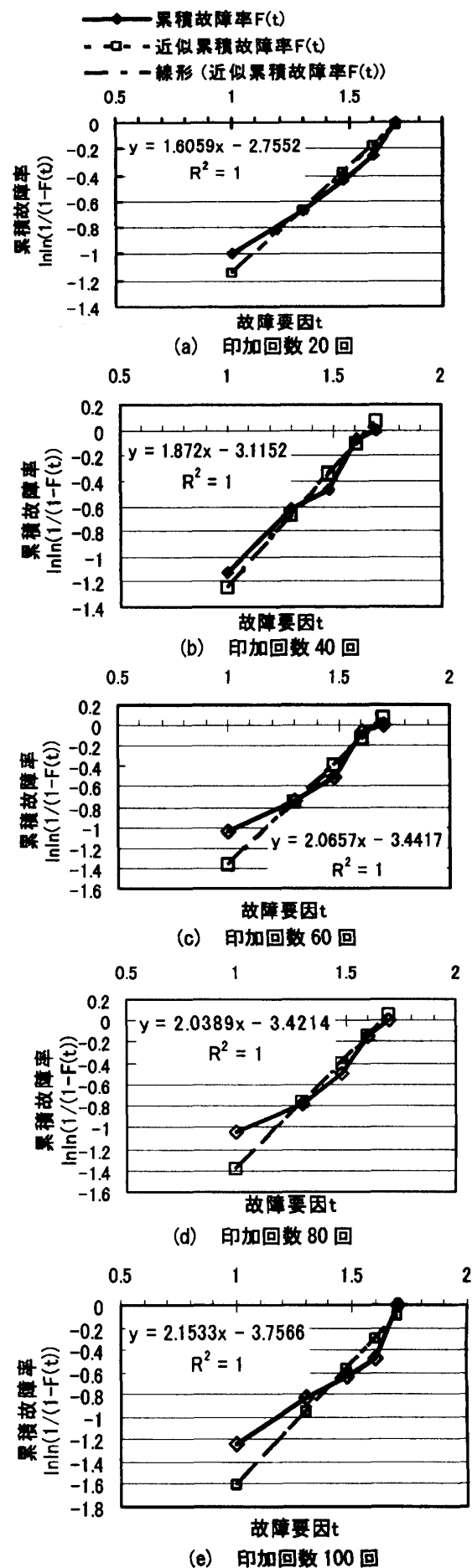


図-3 印加回数 20 回毎ワイブル確率紙

骨材同士の擦れあう時、等が考えられる。また、載荷終盤になり再生粗骨材の配置が安定状態となると、再生粗骨材自体の破碎が起こる場合などが考えられる。

尚、この場合においては、故障要因のパラメータを100kNまでの荷重とし、パルスパワー再生粗骨材の故障をAEが計測された場合と見なした。そして応力レベルとAE発生確率関数の関係を非線形最小二乗法を用いて $Y=mX-a$ で直線近似し得られたそれぞれのパルスパワー再生粗骨材から載荷によって計測されたAEにおけるワイブル分布解析を行った。また、本研究ではワイブル分布解析を行う際に、検出されたAEにおいて、AEの最大の振幅値が40dB、60dB、80dBにしきい値を設定し、それぞれのしきい値以上におけるAE毎にm値を算出した。各印加回数での供試体における最大値と最小値のm値の推移を図-4に示す。尚、図-4のm値を求めるために用いたAEヒット数はセンサー2つで検出された全てのAEヒット数の平均値である。そして、2つのAEセンサーが同じ故障発生現象を検出しているか確認するために各センサーで検出されたAEをしきい値40dBから60dB、60dBから80dB、80dBから100dBに設定し、載荷開始から載荷終了までそれぞれで計測されたAEヒット数を20kN毎に表したものを図-5に示す。尚、図-5は印加回数100回で回収した再生粗骨材におけるAEヒット数のデータである。

まず、図-4よりそれぞれのしきい値におけるm値を見ると、AEヒット数のしきい値を大きくするにつれてm値も全体的に上昇しているのが分かる。これはしきい値を大きくする事によって、載荷序盤に多く発生している40dBから60dB間の比較的デジベル数が小さいAEが取り除かれるためである。そして、図-4よりしきい値を40dBにした場合のm値の推移を見てみると、載荷した再生粗骨材のほとんどにおいてm値が1を下回り、故障発生傾向は初期故障型として現れた。この要因としては上でも示したように載荷序盤で多く発生しているAEのデータが含まれていることが挙げられる。そしてm値による評価を行う場合m値は1を基準として行うため、供試体のほとんどの故障発生傾向が、初期故障型として現れたしきい値40dBにおけるm値を用いた品質評価は難しいと言える。次に、しきい値80dBの場合のm値の推移を見た場合、ほとんどの供試体においてm値が1より大きくなっており、その故障発生確率は磨耗故障型として評価できる。しかし、これは図-5からも分かるようにしきい値が80dBの場合、載荷序盤でのAEヒットをほとんど含んでいないためと思われる。つまり、しきい値が80dBの場合では載荷初期時における故障発生を把握できない可能性があるため品質評価を行うのは難しいと言える。そして、しきい値60dBの場合にお

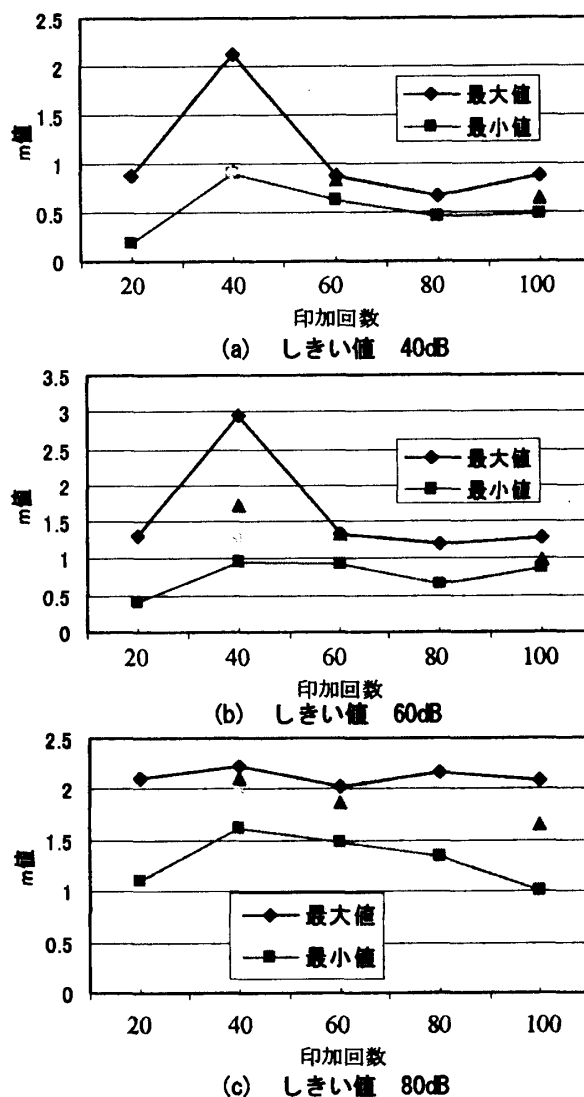


図-4 しきい値別m値推移

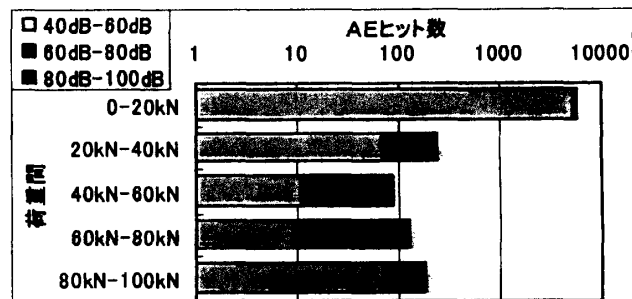
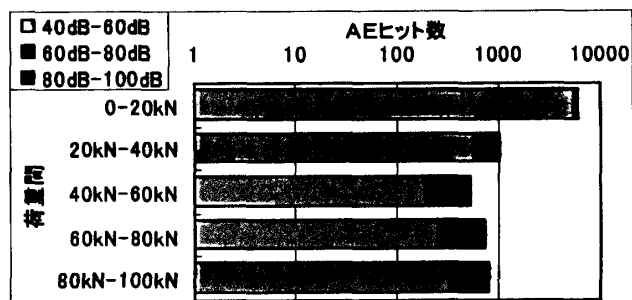


図-5 センサー別AEヒット数

ける m 値の推移を見た場合、初期故障型と磨耗故障型が混じっているのが分かる。また図-5 からも、しきい値 60dB 以上における AE は載荷序盤から載荷終盤まで計測されているため、本研究では、60dB 以上の AE の累積発生数による m 値を用いてパルスパワー再生粗骨材の品質との相関性の検討を試みた。

そして、しきい値 60dB における m 値を見てみると、印加回数 60 回以上で同じ印加回数における再生粗骨材での m 値のばらつきが小さくなり、最大値および最小値の変化の割合が小さくなっている。これは故障発生確率が安定してきたことを示している。つまり、載荷序盤で剥離すると思われる脆弱な付着モルタル分が低下し、再生粗骨材が高品質になってきたためと思われる。そして、密度、吸水率試験結果においても印加回数 60 回の時点で「再生粗骨材 H」としての規格を満たしていたことから、印加回数 60 回におけるパルスパワー再生粗骨材の品質が高品質になっていることが分かる。

ここで、印加回数の増加に伴う m 値の推移を考えた場合、印加回数の増加に伴い、 m 値は増加し磨耗故障型になると考えられる。しかし、図-4 だけでは m 値の推移を一概に、増加傾向にあると言うことは難しいと思われる。この要因としてはデータ数の少なさや、図-5 から分かるように 2 つのセンサー間での AE ヒット数に誤差が見られたことが要因と考えられる。今回は、2 つの AE センサーで計測された AE の平均値を用いて m 値を算出したため、センサー間での AE ヒット数に誤差がある場合、正しい故障発生を検出できていない可能性がある。よってこの問題については今後検討し、改善していく必要がある。

以上より、再生粗骨材に載荷試験を行った際に検出される AE におけるワイブル分布解析結果と再生粗骨材の品質には明確な相関性が見られなかった。よって今後はデータの蓄積や試験方法の見直しが必要と思われる。

4. まとめ

本研究では再生粗骨材の簡易的品質評価手法の提案のために、パルスパワー技術を用いて回収した再生粗骨材に骨材強度試験を応用した載荷試験を行い、載荷時に検出された AE および載荷荷重 20kN 毎の破砕値におけるワイブル分布解析を行い、再生粗骨材との品質に相関性があるか調べ、品質評価手法として適用できる可能性について検討した。その結果以下の事が判明した。

- (1) 今回の印加条件で回収されたパルスパワー再生粗骨材は印加回数 60 回の時点で絶乾密度、吸水率共に「再生粗骨材 H」の規格を満たしていた。
- (2) 20kN 毎の破砕値におけるワイブル分布解析を行った結果、印加回数の増加と共に m 値が上昇し、再生

粗骨材の品質との相関性を見ることができた。

- (3) 載荷試験時に計測された AE を用いたワイブル分布解析を行った結果、AE のしきい値を 60dB にした際に、印加回数 60 回以上において、 m 値のばらつきが小さくなった。しかし再生粗骨材の品質との相関性を見ることはできなかった。

今回、本研究で行った再生粗骨材への載荷試験は「骨材強度試験」の試験方法を基に行ったため、載荷する荷重を 20kN から 100 k N までと設定し試験を行った。しかし、この 100kN という荷重が再生粗骨材の品質を評価するのに十分な荷重であると判断するにはデータ数が不十分である。よって、今後は、載荷する荷重を増加させた場合における m 値の推移についても調べる必要がある。また、載荷試験時に使用した鋼鉄製の容器も骨材強度試験に使用するものを使用したが、この容器が AE によって故障発生を捉えるのに適した容器であるのか検討する必要があると思われる。よって、使用する容器を変化させた場合に、AE の発生挙動にどのような影響があるか検討していく必要がある。また、パルスパワー再生粗骨材に載荷を行った際の故障発生を AE によって検出し、ワイブル分布によって正しく解析するためには、正確な故障発生を AE センサーで検出する必要がある。本研究では、使用する AE センサーおよびコード等は全て同じものを使用したが、載荷毎に AE センサーを取りはずすなどしたため、2 つの AE センサー間に誤差が生じたと思われる。よって、器具による誤差を抑えるためにも、今後は AE センサーを取り外す必要のない試験方法を考える必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省: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」,2006.12
- 2) 日本規格協会 JIS A 5021:コンクリート用再生骨材 H,2005.3
- 3) 秋山秀典,原雅則:高電圧パルスパワー工学,森北出版,pp.6-8,1991.4
- 4) 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.8, No.1, pp.1475-1480,2006.7
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書[標準編](JISA 1110-1999),2007.5
- 6) 土木学会:コンクリート標準示方書[標準編](JISA 1102-1999),2007.5
- 7) 日本工業標準調査会: TSA 0006,「再生骨材を用いたコンクリート」,2004.4
- 8) 平林浩一:疲労や破壊現象とワイブル分布,2002.8
- 9) 青木繁伸:ワイブル分布,2005