

論文 圧縮載荷による骨材の破碎過程のワイブル解析による品質評価に関する研究

飯笹 真也^{*1}・重石 光弘^{*2}・首藤 親哉^{*3}・月岡 美佳^{*4}

要旨：骨材再生技術において再生処理途中における品質の概値を簡易的に把握することができれば高品質な再生骨材を効率よく回収することが可能と思われる。そこで、再生粗骨材の代替試料として、碎石と人工軽量骨材を試料として用いた最大載荷荷重 400kN の載荷試験を行い、80kN 毎の破碎値を算出した。その結果、破碎値は密度が上昇し吸水率が低下すると大きくなった。その上で、破碎値をワイブル分布にあてはめ、m 値と骨材試料の密度、および吸水率の関係について調べた。その結果、m 値は骨材試料の密度が上昇し吸水率が低下するに従って大きくなる傾向が見られた。

キーワード：碎石, 人工軽量骨材, 骨材品質評価, 骨材強度試験, ワイブル分布

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建造された多くのコンクリート建築物が耐用年数を迎え、都市の安全性を守る意味でも建て替えやリフォームの必要性が高まっている。そして、その際には大量のコンクリート骨材が必要となる。しかし、天然のコンクリート骨材は有限の資源であり、良質なコンクリート骨材の供給が逼迫する事態になることも否定できない。一方で、コンクリート建設物の建て替え時には大量の廃コンクリート塊が発生するため、今後、廃コンクリート排出量は増加すると推測される。つまり、廃コンクリート塊からコンクリート用の再生骨材の回収を推進していく必要がある。

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おり、再生骨材の品質規格としては、JIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」¹⁾が規定されるに至った。

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²⁾。さらに、回収された再生粗骨材の力学的強度を調べるために TS A 0006³⁾に提案されていた「骨材強度試験」を応用し、再生粗骨材への載荷試験を行い、載荷荷重 20kN 毎に破碎値を算出した結果⁴⁾、再生処理の進行に応じて、再生粗骨材の密度は増加し、吸水率も低下して原粗骨材のこれらの値に漸近し、それとともに 20kN ないし 100kN までの破碎値も低下することを示した。

再生粗骨材の品質は付着モルタル分に大きく依存し、付着モルタル分が低下すれば高品質な再生粗骨材となる。つまり、付着モルタルを有する再生粗骨材の載荷試

験を行えば、載荷によって脆弱なモルタル部位から優先的に剥離する。これは物質の破壊は、物質そのものの強度とはほとんど関係なく、脆弱な部分の存在に支配されるためである。骨材載荷試験における骨材試料を個々の骨材粒の一つの集合体と考えた場合、原粗骨材及びモルタル片、あるいはモルタルが付着した原粗骨材など、それぞれが個別の性質を持つ部品の集合体と置き換えられる。よって、再生粗骨材への載荷時における破碎値は、その内のそれぞれの部品の故障発生数と考えることができるだろう。よって、再生処理が進行する時々において採取した再生粗骨材から得られた破碎値に対して、故障解析手法であるワイブル分布解析を適用した結果、ワイブル分布パラメータの一つである m 値が、密度が上昇し吸水率が低下するにつれて大きくなることが確かめられた。このように、高度再生処理過程中の再生粗骨材の密度、および吸水率が、再生処理が進行するにともなって原粗骨材のそれらの値に漸近していく過程は、再生粗骨材の破碎値のワイブル分布解析によって一意的に示される可能性が示された。

しかし、BS(英国規格)に規定されている骨材の破碎試験⁵⁾では最大載荷荷重を 400kN に設定してあったため、本研究では、さらに載荷荷重を増加させ 400kN までとした場合における載荷試験を密度および吸水率が異なる骨材試料へ行い 80kN 毎に破碎値を算出し、そのワイブル分布解析を試みた。

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、品質の異なる骨材試料に TS A 0006「骨

*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 修(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 工学部社会環境工学科 (非会員)

*4 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 (非会員)

材強度試験」を応用した骨材への载荷試験を行い、簡易的な品質評価が可能であるか検討を行った。以後本文において本試験を「骨材载荷試験」と称す。骨材载荷試験の仕組みを図 - 1 に示す。

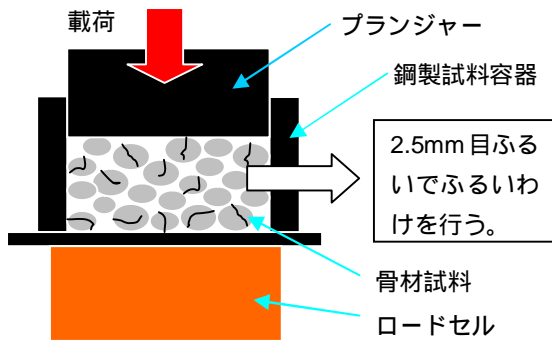


図 - 1 骨材载荷試験の仕組み

骨材载荷試験に使用した器具は骨材強度試験で使用されるものを使用した。試験器具について表 - 1 に示す。

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

骨材载荷試験では一定载荷荷重毎に試料を取り出し 2.5mm 目ふるいでふるいわけを行い、一定载荷荷重毎の破砕値を式(1)により算出した。

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

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)

2.2 ワイブル分布

ワイブル分布⁹⁾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。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。

これは骨材への载荷時においても言えると考えられる。骨材へ载荷を行った際、多数ある骨材の中の脆弱な骨材から破壊が始まり、载荷が進むと共に破壊される骨材が増加していくと考えられる。つまり、脆弱な骨材粒が多数含まれていれば低い载荷荷重から破壊が起こり、含まれていなければ高い载荷荷重まで破壊が進まない。そこで骨材粒の破砕を骨材の中の故障と考えると、载荷荷重の増加、すなわち故障要因の増加に伴う故障発生確率が破砕値により表せると考えられる。そして、その故障発生確率は製品の品質管理で用いられているワイブル分布で表現できる可能性がある。

ワイブル分布の基礎式は次式で表される。

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

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

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

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

式(2)の両辺において 2 度対数をとると、

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

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、 $Y = mX - \log$ (8)

の直線になり、式(7)の傾きが m 値である。時間経過に伴う瞬間故障率は、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。 m 値による信頼性評価では m 値が大きくなれば信頼性の向上を示している。つまり、 m 値を骨材の品質評価に適用した場合、 m 値が大きくなれば品質の高い骨材と推測される。例として既往の研究で再生骨材へ载荷を行った場合におけるワイブル分布を図 - 2 に示す。

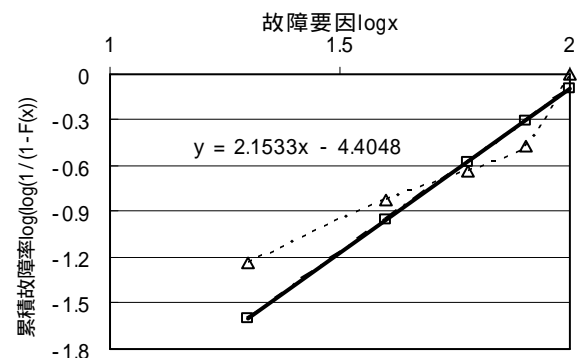


図 - 2 ワイブル分布

図 - 2 において x 軸は最大载荷荷重を 100% とし、各载荷荷重を正規化したものを x とし式(6)にあてはめたものである。また、 y 軸は最大载荷荷重における故障発生率、

つまり破砕値を 100%とし各載荷荷重における破砕値を正規化したものを x として式(7)にあてはめたものである。そして、累積故障率（破線）が実測値をプロットしたものであり、近似累積故障率（実線）が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である。近似累積故障率の傾きが m 値となる。

2.3 再生粗骨材における破砕値のワイブル解析

既往の研究⁴⁾では、骨材載荷試験の最大載荷荷重を100kNとし本大学で提案している「コンクリート内パルスパワー放電法」による骨材再生処理によって回収された再生粗骨材の破砕値を求め、破砕値のワイブル解析を試みた。尚、破砕に用いたコンクリート供試体は熊本県山鹿産ハンレイ岩を原骨材としており、表-2に物理的性質を示す。

表-2 原骨材の品質

絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
3.04	0.49	6.66

表-3にそれぞれの再生粗骨材の密度、吸水率試験結果を示す。尚、表-3において再生レベル（パルスパワーの印加回数）の増加に従い、密度が増加し、吸水率が低下する。尚、本試験はTS A 0006の試験方法を基に行っているため、試験回数は各再生粗骨材において3回実施した。得られた破砕値および破砕値のワイブル解析結果の m 値を表-4に示す。

表-3 再生粗骨材の密度、吸水率試験結果

再生レベル (印加回数)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水 率(%)	粗粒 率
20	2.47	5.25	7.23
40	2.65	3.71	6.82
60	2.81	2.38	6.56
80	2.94	1.53	6.50
100	2.94	1.53	6.38

表-4 再生粗骨材の破砕値および m 値

再生レベ ル(印加 回数)	各荷重段階における破砕値(%)					m 値
	20kN	40kN	60kN	80kN	100kN	
20	1.7	3.2	4.7	5.9	8.2	1.6059
40	0.8	2.1	2.7	4.3	5.0	1.8720
60	0.7	1.7	2.2	2.7	3.5	2.0657
80	0.6	1.0	1.6	2.5	3.1	2.0389
100	0.3	0.7	1.0	1.3	2.2	2.1533

表-4よりそれぞれの試料の20kN毎の破砕値は密度が高くなり吸水率が低下するに従って低下していることが分かる。つまり、破砕値は再生粗骨材の密度が上昇

し吸水率が低下すると大きくなることが確かめられた。これは、 m 値による信頼性評価をした場合、信頼性が向上したと言え、モルタル部分、つまり再生骨材における脆弱部位が低減したことを示している。

ここで、再生レベル60以上の再生粗骨材における m 値に着目すると、ほぼ同じ値になっている。そして、表-2より再生レベル60以上の再生粗骨材はJIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」の規格を満たしており、再生レベル60以上の再生粗骨材は表-3より絶乾密度および吸水率が頭打ちになっていることが分かる。つまり、再生粗骨材の絶乾密度および吸水率が頭打ちになると、破砕値のワイブル解析結果 m 値も頭打ちになると思われた。

以上より、再生粗骨材への骨材載荷試験で得られた破砕値のワイブル解析の m 値は再生粗骨材の密度が上昇し吸水率が低下すると大きくなることが確かめられ、それらの値が頭打ちになると m 値も頭打ちになった。

3. 砕石と人工軽量骨材を用いた骨材載荷試験

3.1 骨材載荷試験試料

骨材載荷試験によって得られた破砕値のワイブル解析結果である m 値と骨材試料の密度および吸水率の関係をより詳細に確かめるために、密度および吸水率が明確となっている砕石(山鹿斑レイ岩)と人工軽量骨材(太平洋アサノライト⁷⁾)を再生粗骨材の代替骨材試料として用いて、骨材載荷試験を試みた。試料を表-5に示す。試料は砕石のみ、人工軽量骨材のみ、および砕石と人工軽量骨材の混合率を変化させた計5種類である。尚、人工軽量骨材で砕石の一部を置換した目的は、再生粗骨材内におけるモルタル片が再生粗骨材の物質値を大きく変化させるのと同様に、本試料の物性値を原粗骨材から大きく変化させ、異なる物性値にし、試料内に軟弱部分を有する必要があったためである。また、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-3)。尚、最大骨材寸法は15mmである。

表-5 骨材試料の混合率

試料	骨材混合率(%)	
	砕石	人工軽量 骨材
AL 100	0	100
AL 75	25	75
AL 50	50	50
AL 25	75	25
AL 0	100	0

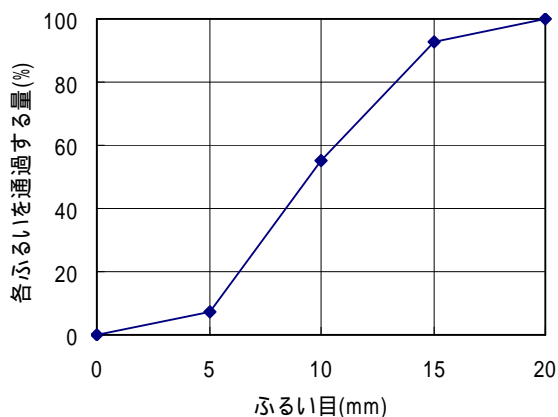


図 - 3 骨材試料の粒度分布

3.2 砕石と人工軽量骨材の物理的性質

試料として使用した人工軽量骨材（太平洋アサノライト⁷⁾）は、膨張頁岩を原料とした焼成技術によって製造された非造粒型人工軽量骨材である。特長として、高い品質の均一性が挙げられるため、本試験の目的に適する。さらに、試料として使用した砕石（山鹿斑レイ岩）は深成岩の一種であり。有色鉱物や輝石を多く含んでいる。表 - 6 にこれら試料の物理的性質を示す。

表 - 6 砕石と人工軽量骨材の物理的性質

骨材種類	人工軽量骨材	砕石
絶乾密度(g/cm ³)	1.22	3.04
吸水率 (%)	24 時間	0.49
	出荷時	24 ~ 34
単位容積質量(kg/l)	0.77 ~ 0.82	1.77
実績率(%)	63 ~ 65	58.4

カタログ値

3.3 骨材載荷試験試料の密度、吸水率試験結果

骨材載荷試験試料の密度試験、吸水率試験を行った結果を表 - 7 に示す。表 - 7 より人工軽量骨材のみの試料である AL 100 が最も密度が低く吸水率が高い試料となり、砕石のみの試料である AL 0 が最も密度が高く吸水率が低い試料である。よって人工軽量骨材の混合率が低くなるに従って、試料の密度が上昇し吸水率は低下した。

表 - 7 密度・吸水率試験結果

試料	表乾密度 (g/cm)	絶乾密度 (g/cm)	吸水率 (%)
AL 100	1.37	1.22	12.68
AL 75	1.54	1.42	8.37
AL 50	1.80	1.68	7.31
AL 25	2.42	2.35	3.34
AL 0	3.06	3.04	0.49

3.4 骨材載荷試験

各試料に最大載荷荷重を 400kN に設定した静的載荷を行い、各試料において骨材載荷試験を行った。その際、載荷荷重を 80kN, 160kN, 240kN, 320kN, および 400kN として、それぞれの破砕値を算出した。尚、本試験は、TS A 0006 の試験方法を基に行ったため、載荷試験は各試料において 3 回行った。得られた破砕値の平均を表 - 8 に示す。

表 - 8 各試料の荷重段階毎の破砕値 (%)

試料	各荷重段階における破砕値 (%)				
	80kN	160kN	240kN	320kN	400kN
AL 100	5.8	15.8	24.3	30.7	35.6
AL 75	4.5	13.9	19.7	25.6	31.1
AL 50	2.7	8.5	14.2	21	23.5
AL 25	1.6	3.7	10.4	13.5	15.7
AL 0	0.5	1.9	4.1	6.9	10.1

表 - 8 より、いずれの試料においても載荷荷重の増加に伴って破砕値が増加し、同じ載荷荷重における各試料の破砕値は、人工軽量骨材の混合率が大きくなるにつれて大きくなった。破砕値は、力学的強度を評価する値であり、破砕値が小さい試料は力学的強度が高い。すなわち、脆弱な部位を有する骨材粒が少ないことを示している。そして、骨材試料における脆弱部分は人工軽量骨材に相当する。これは、表 - 8 に示した密度、吸水率試験結果においても人工軽量骨材の混合率が低くなるに従い、密度が上昇し吸水率が低下したことと一致する。

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言える。

しかし、各載荷荷重段階における破砕値の増加率は最大載荷荷重によって影響を受けるため一定にはならないと考えられる。例として、表 - 8 における各載荷荷重段階における AL-0 の破砕値に対する AL-100 の破砕値の比を図 - 4 に示す。

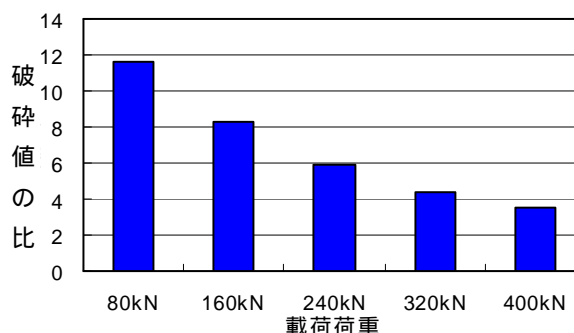


図 - 4 破砕値の増加率

図 - 4 より破砕値の比が各載荷荷重段階毎に大きく異なっていることが分かる。つまり、破砕値より品質の良否を定量的に評価することは難しいと言える。

3.5 80kN 毎の破砕値におけるワイブル解析結果

そこで、この破砕値を骨材載荷試験時の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を信頼性解析手法であるワイブル解析を行い、 m 値を算出した。そして、それぞれの試料の密度、吸水率の変化に伴う m 値の変化を調べた。

図 - 5 に各載荷荷重における破砕値のワイブル解析結果を示す。尚、図 - 5 において縦軸が最大載荷荷重 400kN を 100%とし各荷重を正規化したものを x とし式(6)にあてはめたものである。また、横軸は最大載荷荷重 400kN における破砕値を 100%とし各荷重における破砕値を正規化したものを x とし式(7)にあてはめたものである。累積故障率(破線)が実測値をプロットしたものであり、近似累積故障率(実線)が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である。この実線の傾きが m 値となる。尚、各荷重段階における破砕値のワイブル解析結果では $m > 1$ の場合のみであるため、 m 値が増加するほど信頼性が増すということになる。図 - 6 に各試料における m 値を示す。

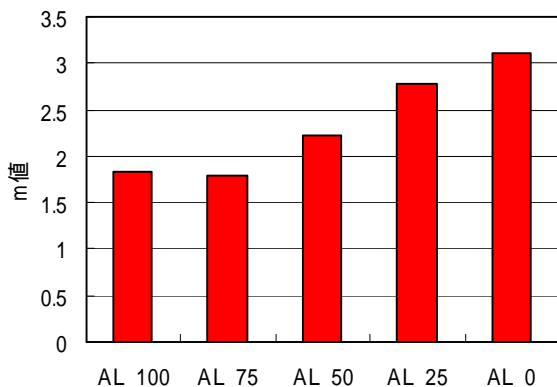


図 - 6 各試料の m 値

図 - 6 より各試料の m 値を比較すると、人工軽量骨材の混合率が低い試料ほど m 値が大きくなっていることが分かる。 m 値による信頼性評価を行った場合、同荷重レベルにおける累積故障率が低下したため、信頼性が向上している事を示している。そして、本研究では累積故障率は各荷重段階における破砕値をあてはめたため、信頼性が向上したということは力学的強度が向上したと言える。そして、力学的強度の向上は密度の上昇および吸水率の低下を示していると言える。そして、信頼性が向上したため破砕値は骨材試料への載荷荷重が増加しても増加率は大きくなる。さらに、人工軽量骨材の混合率の低下に伴い、密度が高くなり吸水率が低下していることは表 - 7 に示した密度、吸水率試験の結果から

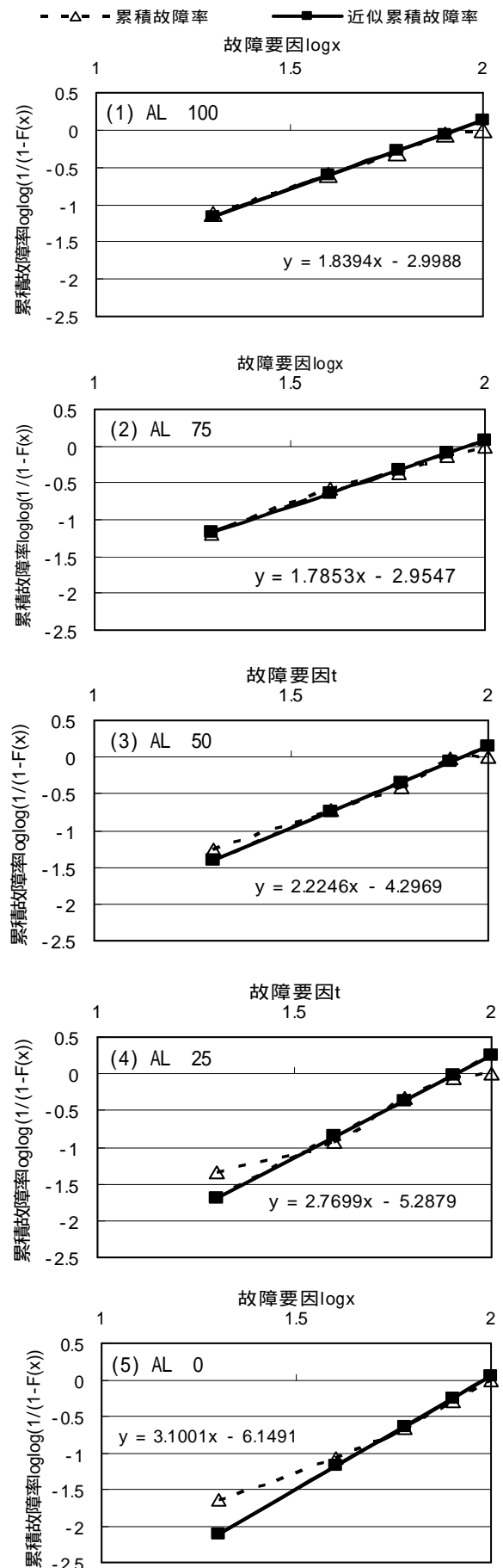


図 - 5 各試料のワイブル分布

も明らかである。よって試料の密度が上昇し吸水率が低下すると破砕値のワイブル解析結果である m 値は上昇することが確認された。

次に、図 - 5 および図 - 6 において AL 100 と AL 75 の m 値に着目すると、ほぼ同じ値になっている。これら 2 つの m 値が他の試料に比べ小さいため、載荷荷重が低い段階において故障が多く発生していることを示している。そして、表 - 7 に示した密度、吸水率試験の結果より AL 75 の試料が AL 100 の試料よりも密度が高く吸水率が低くなっていることは明らかである。つまり、 m 値が AL 100 の方が低くならなければならない。しかし、 m 値はほぼ同じ値になった。これは、人工軽量骨材の混合率が高いために、故障発生が脆弱部分である人工軽量骨材において多数発生するため、故障発生が人工軽量骨材にほぼ支配されたと考えられる。さらに、AL 100 と AL 75 これら 2 つの試料の 400kN 破砕値は 30% を超えている。BS に規定されている骨材の破砕試験⁵⁾において、破砕値が 30% を超えるような軟弱な試料の時は試験中に破砕した細粒が骨材粒の間に詰まり、正確な試験結果を得られない場合があるとされている。よって、今回の試料における AL 75 や AL 100 のように全体質量に対し 75% 以上も人工軽量骨材が占めるようになると、BS に規定される軟弱な試料に相当し、 m 値が底打ちになったという結果はそのためと考えられる。

4. まとめ

既往の研究において密度および吸水率が異なる 5 種類の再生粗骨材に骨材強度試験を応用した最大載荷荷重 100kN の骨材載荷試験を試みた。そして、20kN 毎に破砕値を算出しワイブル分布にあてはめた。その結果、再生粗骨材の密度が上昇し吸水率が低下するに従いワイブル解析結果である m 値は大きくなった。しかし載荷荷重の不十分および破砕値のワイブル分布パラメータである m 値と密度および吸水率の相関性の検討をより詳細に行うために、砕石と人工軽量骨材を試料として使用し、最大載荷荷重 400kN に設定した骨材載荷試験を行った。そして、載荷荷重 80kN 毎の破砕値のワイブル分布解析を行い、試料の密度が上昇し吸水率の変化に伴う m 値の変化を調べた。その結果、以下の事が判明した。

- (1) 砕石のみ、人工軽量骨材のみ、および砕石と人工軽量骨材を混合した試料に密度試験、吸水率試験を行った結果、人工軽量骨材の混合率が低くなるに従い試料の密度は上昇し吸水率は低下した。
- (2) それぞれの試料に最大載荷荷重を 400kN に設定した載荷試験を行い、載荷荷重 80kN 毎に破砕値を算

出した。その結果、人工軽量骨材の混合率低い試料ほど破砕値が小さくなった。

- (3) 各試料の 80kN 毎の破砕値を算出しワイブル解析を行った。その結果、人工軽量骨材の混合率が低い試料、つまり密度が高く吸水率が低い試料になるに従い、 m 値は上昇した。よって骨材試料の密度が上昇し吸水率が低下すると m 値は上昇する。
- (4) AL 75 や AL 100 のように人工軽量骨材の混合率が高い骨材試料における 320kN 破砕値 400kN 破砕値 30% 以上になるため、破砕値が正しく得られない可能性があり、ワイブル解析に影響を与える。

以上より、再生粗骨材の代替試料の破砕値のワイブル解析結果である m 値は骨材試料の密度が増加し吸水率が低下すると大きくなった。ただし、軟弱な骨材試料に載荷試験を行う場合、破砕値が 10% となるような荷重範囲を評価する必要があると思われ、今後検討を要する。

また、本試験において用いた代替試料ではなく、再生粗骨材への載荷荷重を増加させた場合における破砕値のワイブル解析結果である m 値を調べる必要がある。

謝辞

本研究において、試料として使用した人工軽量骨材（太平洋アサノライト）は太平洋マテリアル株式会社の九州支部よりサンプルとして、頂いたものを使用したことをここに付記させていただきます。快く、試料を提供して下さった太平洋マテリアル株式会社の九州支部の皆様はこの論文の完成をもって謝辞と変えさせていただきます。

参考文献

- 1) 日本規格協会 JIS A 5021: コンクリート用再生骨材 H, 2005.3
- 2) 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, pp1475-1480, 2006.
- 3) 日本工業標準調査会: TS A 0006, 「再生骨材を用いたコンクリート」, 2004.4
- 4) 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載荷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
- 5) 日本材料学会: 建設材料実験, 第 8 版, pp76, 2008.3
- 6) 青木繁伸: ワイブル分布, 2005
- 7) 太平洋アサノライト, 建設 MIL データベース, <http://dataseet.k-mil.net/pdf/42623D.pdf>