

論文 発泡スチロール廃材を細骨材とした超軽量モルタルの圧縮疲労特性

松尾 栄治*1・玉滝 浩司*2・保井 渉*3・川崎 秀明*4

要旨：筆者等は、遠赤外線減容処理を施した発泡スチロール廃材を細骨材代替とした軽量モルタルを開発対象として、材料分離を抑制できる配合を明らかにするとともに、構造材として必要な圧縮強度を確保することをこれまでに実現してきた。本研究では、この軽量モルタルの実用性をより高めるためのデータ提供の一環として圧縮疲労強度性状を明らかにしたのでその報告を行う。すなわち、本軽量モルタルの 200 万回疲労強度は高強度・普通強度軽量コンクリートと同程度であること、発泡スチロール骨材混入率を高くすると疲労強度は低下傾向を示すことを明らかにした。

キーワード：軽量モルタル, 発泡スチロール廃材, 圧縮疲労強度

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、循環型社会構築の一環として産業廃棄物をコンクリート用材料として有効利用する技術の開発・研究が盛んに実施されている。本研究は写真-1 に示す発泡スチロール (Expanded Polystyrene, 以下 EPS と称す) 骨材を超軽量骨材として実用化することを目的としている。この EPS 骨材は回収された EPS 廃材に遠赤外線照射による減容処理が施されたものであり、一般にイメージされる製品としての発泡スチロールとは物性が大きく異なる。この EPS 骨材は表-1 にその物性を示すように、吸水性がほとんどなく、密度が 0.53g/cm^3 と従来の骨材と比較すると極めて軽量であるという特徴を有する。これを骨材として用いた軽量モルタル (以下 EPS モルタルと称す) の実用化を目指す場合には、材料分離の抑制、強度低下の抑制、収縮に対する抵抗性の改善、疲労性状の把握、フレッシュ性状の評価など様々な課題がある。

筆者等は既往の研究¹⁾において、EPS モルタルの材料分離性状と強度特性などの基礎的物性を明らかにした。EPS モルタルの実用化を促進するためには、付加価値を高める一方で各種耐久性を明らかにし、適材適所で活用できるデータベースを構築しておく必要がある。特に軽量骨材コンクリートの場合には一般的に疲労強度が普通コンクリートよりも小さくなるといわれており、その検討が必要である。一般的な軽量コンクリートの場合で 200 万回疲労強度は普通コンクリートの 75~80% に低下するとされている²⁾。その原因は骨材強度が低いことに起因すると考えられることから、本研究の EPS モルタルの場合はその傾向がさらに強くなるのが懸念される。したがって、本稿では圧縮疲労強度性状を実験的に明ら

かにした。

1.2 EPS モルタルに関する既往の研究

本研究で用いた EPS 骨材の粒径は 4mm 以下であることから、筆者等はこれを細骨材として使用した。その EPS モルタルの密度と各種強度の関係を実験的に明らかにした¹⁾。特に混和剤を使用しないプレーンの状態で前提として、角柱圧縮強度 30N/mm^2 を目標とした配合選定が可能であることを明らかにした。

また、曲げ・せん断・引張強度およびそのばらつきを実験的に求め、圧縮強度に対するせん断強度の比率が一

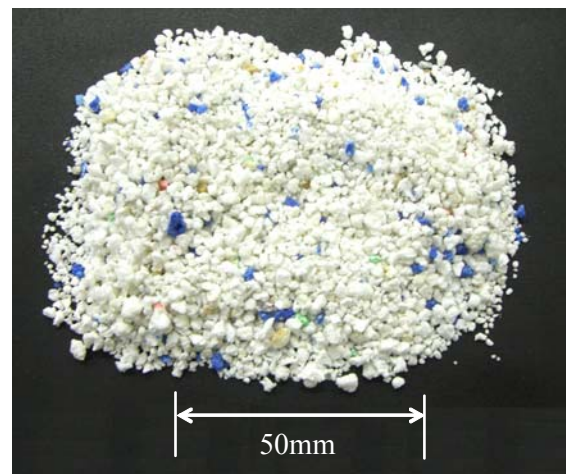


写真-1 EPS 骨材の外観

表-1 EPS 骨材の物性

密度 (g/cm^3)	0.53
粒径 (mm)	4以下
実積率 (%)	64.8
粗粒率	3.02
吸水率 (%)	0
骨材の損失質量百分率 (%)	0.55

*1 山口大学 大学院理工学研究科助教 博(工) (正会員)

*2 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 修(工) (正会員)

*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 修(工) (正会員)

*4 山口大学 大学院理工学研究科教授 博(工) (正会員)

表-2 配合と静的圧縮強度

配合名	W/C (%)	V _{EPS} (%)	単位量 (kg/m ³)			理論密度 (g/cm ³)	円柱圧縮強度 (N/mm ²)
			C	W	EPS		
A	30	40	972	292	212	1.48	23.6
B	40	50	697	279	265	1.24	17.2

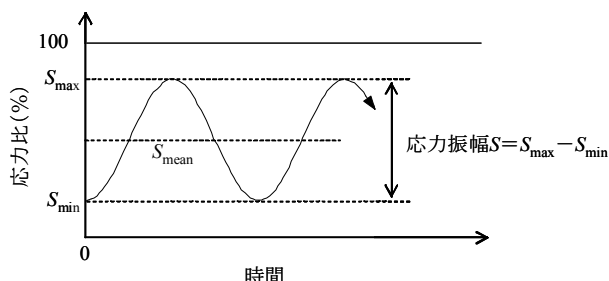


図-1 疲労試験における応力

般のコンクリートと比較して大幅に大きいことなどを明らかにした。またそれに先立ち、材料分離とセメントペーストの粘性の関係を定量化し、材料分離の抑制が可能で、かつ施工性も良好となる配合を確立した。

2. 実験方法

疲労試験用の配合を表-2に示す。これは、既往の研究の中から比較的密度差のある代表的な2種類として選択した配合である。配合Aが強度を重視した配合で、配合Bが軽量性を重視した配合と位置づけている。バッチ間の強度誤差をなくすために、練混ぜには大型の強制練りミキサーを用いて一度に打設を行った。その際、コンクリートミキサーにおいてもEPSモルタルの練混ぜが良好に行われることを確認した。供試体寸法はφ5×10cmの円柱とした。使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。

疲労試験に用いる供試体は、十分に強度発現が完了し、試験に供する順番が材齢経過による強度増進へ影響を及ぼさないようにしなくてはならないため、一般には材齢150日以降のものが望ましいとされる。予備実験においてEPSモルタルは材齢28日以降の強度増進がほとんど見られなかったため、本研究では材齢28日まで標準養生を施し、その後供試体の質量変化がなくなるまで自然乾燥させて疲労試験に用いた。静的強度は表-2の圧縮強度を基本とした。

表-3 圧縮疲労試験結果

配合A							配合B								
S _{max}	S _{min}	応力振幅 S	r	破壊回数 (N)	logN	P(N)	S _{max}	S _{min}	応力振幅 S	r	破壊回数 (N)	logN	P(N)		
0.90	0.1	0.80	0.1	1	15	1.1761	0.833	0.90	0.1	0.80	0.1	1	1,056	3.0237	0.833
				2	93	1.9685	0.667					2	2,367	3.3742	0.667
				3	213	2.3284	0.500					3	7,305	3.8636	0.500
				4	3,768	3.5761	0.333					4	8,327	3.9205	0.333
				5	8,230	3.9154	0.167					5	25,213	4.4016	0.167
0.85	0.1	0.75	0.1	1	15,268	4.1838	0.833	0.85	0.1	0.75	0.1	1	4,703	3.6724	0.833
				2	15,563	4.1921	0.667					2	4,870	3.6875	0.667
				3	18,449	4.2660	0.500					3	12,183	4.0858	0.500
				4	23,511	4.3713	0.333					4	19,593	4.2921	0.333
				5	32,754	4.5153	0.167					5	69,946	4.8448	0.167
0.80	0.1	0.70	0.1	1	42,191	4.6252	0.889	0.80	0.1	0.70	0.1	1	22,042	4.3433	0.900
				2	70,020	4.8452	0.778					2	22,238	4.3471	0.800
				3	123,977	5.0933	0.667					3	30,648	4.4864	0.700
				4	196,973	5.2944	0.556					4	48,406	4.6849	0.600
				5	212,302	5.3270	0.444					5	54,709	4.7381	0.500
				6	346,414	5.5396	0.333					6	59,432	4.7740	0.400
				7	364,296	5.5615	0.222					7	73,589	4.8668	0.300
				8	553,473	5.7431	0.111					8	94,520	4.9755	0.200
0.75	0.1	0.65	0.1	1	1,298,672	6.1135	0.875	0.75	0.1	0.65	0.1	1	83,904	4.9238	0.909
				2	1,536,807	6.1866	0.750					2	308,998	5.4900	0.818
				3	1,806,252	6.2568	0.625					3	484,750	5.6855	0.727
				4	2,000,000	6.3010	—					4	785,400	5.8951	0.636
				5	2,000,000	6.3010	—					5	837,482	5.9230	0.545
				6	2,000,000	6.3010	—					6	906,240	5.9572	0.455
0.70	0.1	0.60	0.1	1	2,000,000	6.3010	—	0.70	0.1	0.60	0.1	7	1,509,547	6.1788	0.364
				2	2,000,000	6.3010	—					8	1,829,855	6.2624	0.273
				3	2,000,000	6.3010	—					9	2,000,000	6.3010	—
0.70	0.1	0.60	0.1	1	2,000,000	6.3010	—	0.70	0.1	0.60	0.1	1	2,000,000	6.3010	—
				2	2,000,000	6.3010	—					2	2,000,000	6.3010	—

疲労試験の応力波形は、図-1のように周波数 5Hz の正弦曲線とした。応力振幅に、上限荷重比 S_{\max} をそのまま用いるか、上限荷重比 S_{\max} と下限荷重比 S_{\min} の差を用いるかについては議論の分かれるところであるが、本研究では下限荷重の影響が無視できないことを考慮し^{3)~5)}、後者すなわち式(1)から求められる応力振幅 S とした。

$$S = S_{\max} - S_{\min} \quad (1)$$

応力振幅 S は 60~80% とし、下限荷重比 S_{\min} は静的圧縮強度の 10% とした。なお、供試体が破壊しない場合の途中打ち切り回数は 200 万回とした。

3. 実験結果

3.1 S-N 曲線の算出

表-3 に疲労試験結果を示す。各応力振幅における破壊回数は疲労現象特有のばらつきを示すため、順序統計量の理論^{6)~7)}を用いて解析した。生存確率 $P(N)$ は順序統計量の理論を適用し、式(2)より求められる。

$$P(N) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (2)$$

ここで、

$P(N)$: 生存確率

r : 破壊時の繰返し回数の小さいものからの順位

n : 同一条件で試験を行った供試体数

200 万回での途中打ち切りデータが含まれる場合には、順序統計量に対する合理的解釈⁸⁾による $P(N)$ の推定方法に従った。すなわち、 n 個の供試体のうち m 個が 200 万回までに破壊しなかった場合、 $(n+1)$ 個の供試体が試験に供されたとして、200 万回で $(n-m+1)$ 番目の供試体が破壊したとみなすと、 $P(N)$ が式(3)で求まる。

$$P(N) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (3)$$

コンクリートの疲労寿命の分布形に関しては各種モデルが提案⁹⁾されているが、本研究では対数正規分布関数を適用して既往の研究結果と比較した。その場合、 $P(N)$ と N の関係は式(4)で回帰でき、 $P(N)=0.5$ ($t=0$) に対応する平均疲労寿命 $m(\log N)$ および標準偏差 $\sigma(\log N)$ は、それぞれ式(5)と式(6)で表される。

$$t = A \log N + B \quad (4)$$

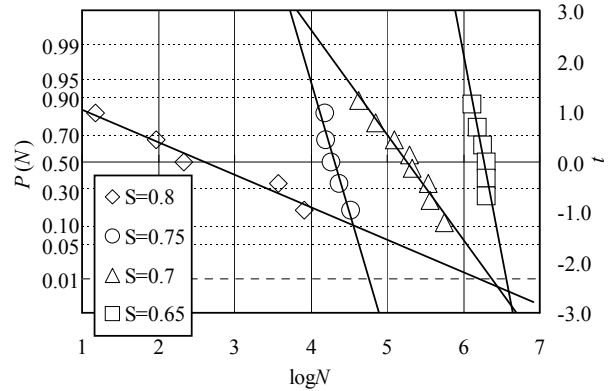


図-2 対数確率紙における $P(N)$ - N 曲線 (配合 A)

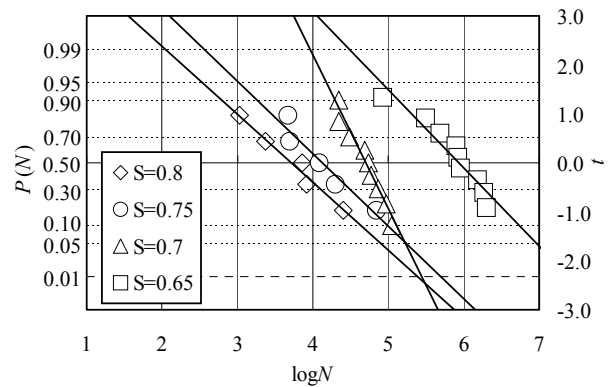


図-3 対数確率紙における $P(N)$ - N 曲線 (配合 B)

表-4 各応力振幅の t と N の回帰式

配合 A			
S	回帰式	$m(\log N)$	$\sigma(\log N)$
0.80	$t = -0.671 \log N + 1.740$	2.59	1.49
0.75	$t = -5.637 \log N + 24.271$	4.31	0.18
0.70	$t = -2.162 \log N + 11.359$	5.25	0.46
0.65	$t = -9.208 \log N + 57.681$	6.26	0.11
配合 B			
S	回帰式	$m(\log N)$	$\sigma(\log N)$
0.80	$t = -1.430 \log N + 5.315$	3.72	0.70
0.75	$t = -1.608 \log N + 6.620$	4.12	0.62
0.70	$t = -3.263 \log N + 15.320$	4.70	0.31
0.65	$t = -1.750 \log N + 10.380$	5.93	0.57

$$m(\log N) = -\frac{B}{A} \quad (5)$$

$$\sigma(\log N) = \frac{1}{A} \quad (6)$$

ここで、

A, B : 実験より求まる定数

t : 正規分布曲線の対称軸からの距離で、任意の $P(N)$ に対して標準正規積分表より求まる

図-2~3は $P(N)$ と N の関係を対数確率紙上にプロットしたものである。図中のデータは概ね一直線上にあり、各応力振幅のデータがそれぞれ対数正規分布の母集団に属するとみなすことができる。

表-4は、各応力振幅の t と N の関係を N 軸方向の最小二乗法で求めた回帰式と、式(5)と式(6)より求めた平均疲労寿命 m ($\log N$) および標準偏差 σ ($\log N$) を示したものである。表中の m ($\log N$) と S の関係を N 軸方向の最小二乗法で求めることで、 $P(N)=0.5$ の場合の $S-N$ 曲線がそれぞれ式(7)、(8)のように得られる。

$$S = -0.0420 \log N + 0.918 \quad (\text{配合 A}) \quad (7)$$

$$S = -0.0667 \log N + 1.032 \quad (\text{配合 B}) \quad (8)$$

3.2 S-N 曲線の評価

表-5に $P(N)$ が 0.5 のときの $S-N$ 曲線式および 200 万回疲労強度を、早川ら¹⁰⁾の結果と比較して示す。なお、図-4は表-5において下限応力が基準強度（静的強度）の 10% における各 $S-N$ 曲線である。配合 B の EPS モルタルの $S-N$ 曲線は、早川らによる高強度軽量コンクリートおよび普通強度軽量コンクリートの $S-N$ 曲線と比較すると、同程度の傾きである。また 200 万回疲労強度もこれらの人工軽量骨材コンクリートと同程度である。また EPS 骨材の混入量は疲労性状にも若干影響しており、混入量が多い配合 B の $S-N$ 曲線は、配合 A の $S-N$ 曲線よりも傾き（右下がり傾向）が大きい。すなわち、配合 B は応力振幅が小さい場合に疲労強度が弱くなる傾向を示した。

3.3 ばらつきに関する検討

設計に用いられる 200 万回疲労強度は、生存確率 50% では半分が供用中に疲労限界状態に達する可能性があるため、より高い生存確率での疲労強度が設定される。図-5~6は、得られた $S-N$ 曲線における N 軸方向のばらつきの標準偏差 $\sigma(S-N)$ を求め、 $\pm 1\sigma(S-N)$ と $\pm 2\sigma(S-N)$ の範囲を示している。

全測点の分散が対数正規分布とみなせることから、 $-1\sigma(S-N)$ と $-2\sigma(S-N)$ の曲線はそれぞれ $P(N)$ が 0.86 および 0.98 の $S-N$ 曲線に相当する。これらの曲線から配合 A、B の 200 万回疲労強度 S はそれぞれ $P(N)=0.86$ のとき 0.63、0.58、 $P(N)=0.96$ のとき 0.60、0.55 となり、設計における疲労強度は小さくなる。

コンクリートの疲労寿命のばらつきには静的強度のばらつきも含まれている。一般にコンクリートの静的強

表-5 各疲労試験における $S-N$ 曲線と 200 万回疲労強度

実験者	コンクリート種類	使用骨材	下限応力	$S-N$ 曲線式	200万回疲労強度
著者ら	配合A	EPS骨材	10%	$S = -0.0420 \log + 0.918$	0.654
	配合B	EPS骨材	10%	$S = -0.0667 \log + 1.032$	0.612
早川ら ¹⁰⁾	高強度軽量コンクリート	人工軽量骨材	10%	$S = -7.134 \log + 108.7$	0.638
	普通強度軽量コンクリート	人工軽量骨材	10%	$S = -8.970 \log + 116.3$	0.598

※応力比は%表示

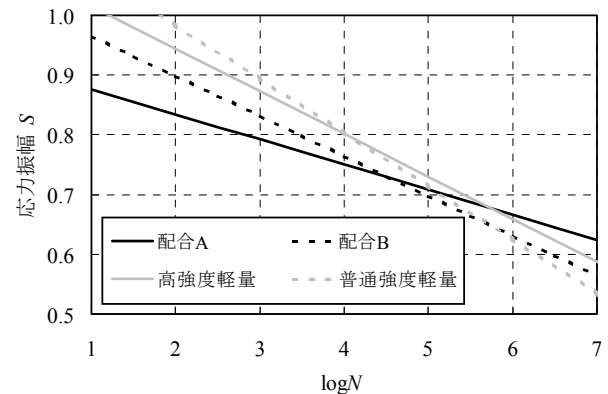


図-4 本研究および他研究者の $S-N$ 曲線

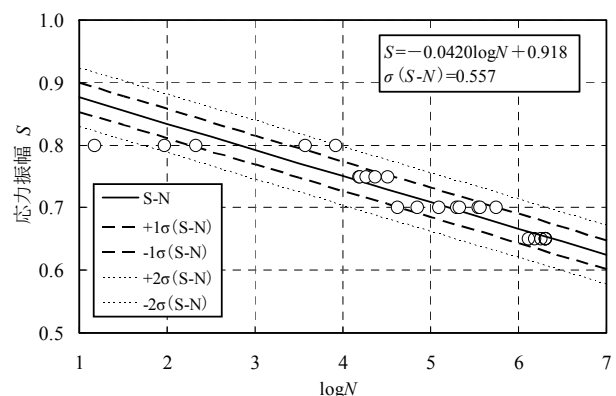


図-5 疲労寿命のばらつきと $S-N$ 曲線（配合 A）

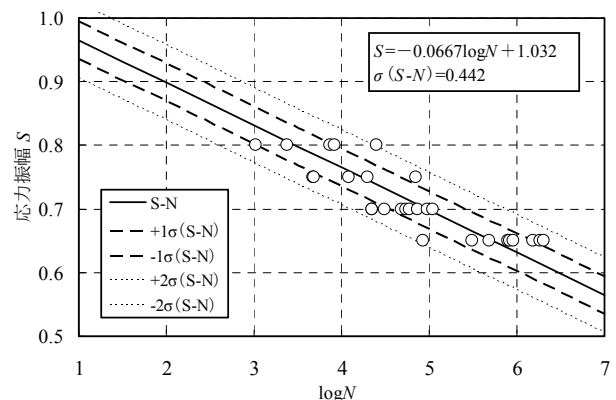


図-6 疲労寿命のばらつきと $S-N$ 曲線（配合 B）

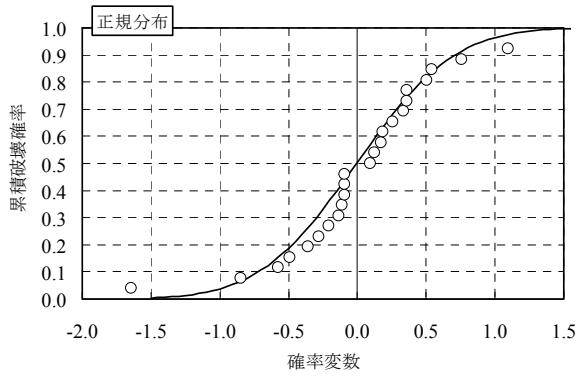


図-7 確率変数と累積破壊確率の関係 (配合 A)

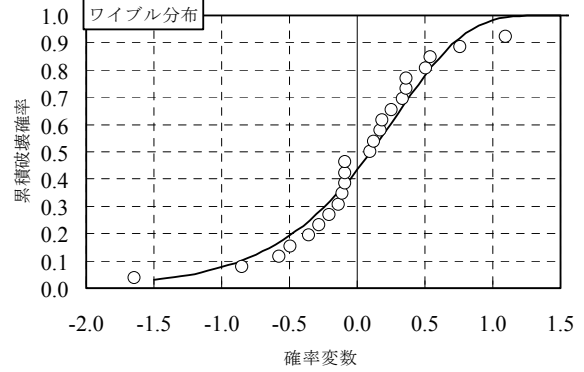


図-9 確率変数と累積破壊確率の関係 (配合 A)

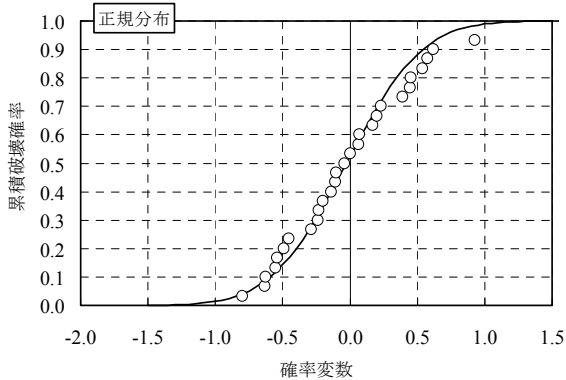


図-8 確率変数と累積破壊確率の関係 (配合 B)

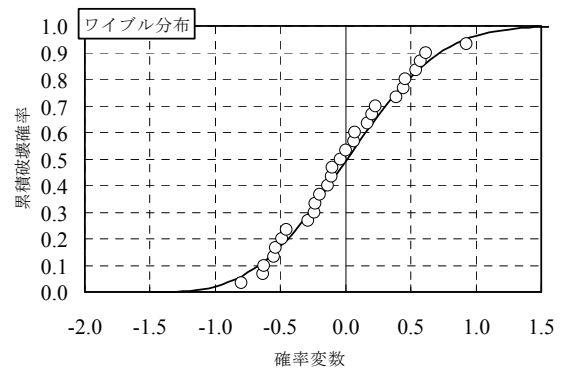


図-10 確率変数と累積破壊確率の関係 (配合 B)

度の変動係数は約 10%¹¹⁾ であるが、EPS モルタルの静的強度の変動係数は 5%前後と小さい¹⁾。また Murdock と Kesler¹²⁾ は、コンクリートの疲労破壊は、粗骨材とマトリックス間の付着力の低下および、ひび割れの発生と伝播による供試体断面積の減少に起因すると述べている。これらの理由を考慮すると、本研究の供試体はモルタルであることから、細骨材とペーストマトリックス間の付着力が大きく、疲労寿命のばらつきも小さくなったと考えられる。

3.4 疲労寿命の解析

図-7~8 に正規分布関数で回帰した場合の確率変数と累積破壊確率の関係を示す。確率変数は S-N 曲線と実験値の x 軸方向の誤差量とした。実測値における極値は工学分野では特に重要で、過去の極値観測データや実験データから最大値・最小値を予測するときに理論的根拠を与えるものとして極値分布の漸近理論がある。そこでよく使われるのがワイブル分布関数である。図-9~10 にワイブル分布関数によって回帰した結果を示す。ワイブル関数の 3 つの係数を求めるには種々の方法があるが、ここでは分割和法を用いた。分割和法の場合、データの分割方法によっては係数が求まらない場合が生じる。また分割時にデータの重み付けをどのように決定するかは研究者の裁量に任される。ここでは全データを約 20, 30,

表-6 各関数における平方 2 乗和

配合名	関数	平方2乗和
配合A	正規分布関数	0.0755
	ワイブル分布関数	0.0454
配合B	正規分布関数	0.0420
	ワイブル分布関数	0.0032

50%の割合で分割し、危険側に重み付けをして代表点を求めた。その回帰式を以下に示す。

$$y_i = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x_i + 408.90}{409.20} \right)^{\frac{1}{0.0012}} \right\} \quad (\text{配合 A}) \quad (9)$$

$$y_i = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x_i + 1.460}{1.662} \right)^{\frac{1}{0.3294}} \right\} \quad (\text{配合 B}) \quad (10)$$

これらの関数による回帰曲線と実験データの平方 2 乗和を表-6 に示す。いずれの配合においてもワイブル分布関数の方が高い精度で回帰できることが確認できる。このことは普通コンクリートの場合と同様である。

4. まとめ

本研究ではEPS骨材を用いた軽量モルタルの実用化を促進することを目的に、物性として懸念される事項の一つである疲労強度特性について実験的評価を行った。圧縮疲労強度試験の結果で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) EPS モルタルの 200 万回疲労強度は高強度・普通強度軽量コンクリートと同程度と考えてよく、EPS 混入率を高めて軽量化を促進するほど疲労強度は低下する傾向を示す。
- (2) EPS モルタルの圧縮疲労強度のばらつきは小さく、疲労試験結果は、正規分布関数よりもワイブル分布関数の方が高い精度で帰帰ができる。
- (3) EPS モルタルの圧縮疲労寿命は普通コンクリートの圧縮疲労寿命と同様に対数正規分布に従う。

謝辞：本研究の実験実施に際し、山口大学工学部社会建設工学科施設材料学研究室（当時在籍）の平田将司氏および田中裕也氏には多大なる御協力をいただきました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 松尾栄治, 玉滝浩司, 保井 渉: 発泡スチロール廃材を細骨材代替とした超軽量モルタルの材料分離性状および強度特性, 土木学会論文集 E, Vol.63 No.3, pp.368-378, 2007.7.
- 2) 阪田憲次: 持続および繰返し荷重下におけるコンクリートの塑性挙動に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1976.
- 3) 石橋忠良, 児島孝之, 阪田憲次, 松下博通: コンクリート構造物の耐久シリーズ, 疲労, p.41, 技報堂出版, 1987.
- 4) 浜田純夫, 成岡昌夫: 軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する一実験, 土木学会論文集 No.176, pp.83-88, 1970.
- 5) 阪田憲次, 木山英郎, 西林新蔵: 統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究, 土木学会論文集 No.198, pp.107-114, 1972.2.
- 6) 松下博通, 徳光善治: 生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究, 土木学会論文集 No.284, pp.127-138, 1979.4.
- 7) 林 宏信, 高木宣章, 小島孝之: 高強度コンクリートの圧縮疲労特性, 土木学会論文集 No.641, V-46, pp.67-76, 2000.2.
- 8) 浜田純夫, 中川健治, 成岡昌夫: 疲労試験における途中打ち切りデータの処理に関する検討, 土木学会論文集 No.189, pp.99-105, 1971.
- 9) McCall, J. T. : Probability of fatigue failure of plain concrete, Journal of ACI, Vol.55, pp.233-244, 1958.
- 10) 早川真吾, 岡部夕佳, 高木宣章, 小島孝之: 高品質軽量骨材コンクリートの圧縮疲労強度, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, pp.737-738, 2003.
- 11) 戸祭邦之: コンクリートの実像—その性能と性状—, p.246, 理工図書出版
- 12) Murdock, J., C. E. Kesler : The Mechanism of Fatigue Failure in Concrete, T&A.M. Report, No.587, University of Illinois, 1960.