

論文 省力化を意図した高応力・低周波数条件下におけるモルタルの疲労寿命予測に関する研究

橋本 涼太*1・尾上 幸造*2

要旨：本研究では、種々の疲労試験結果に基づくひずみ速度と疲労寿命の関係から得られた実験式により、高応力・低周波数条件下における疲労寿命予測を行うことで、疲労試験の省力化を検討した。細骨材には高炉スラグ細骨材と山砂をそれぞれ用い、水セメント比を 50%および 65%とした各種モルタルについて疲労寿命を推定した。その結果、上限応力と疲労寿命の関係を表す $S-N$ 線図は、細骨材の種類や水セメント比の違いに依らず、概ね一致することが明らかになった。また、高応力・低周波数条件下による過去の研究結果との整合性を確認することができ、実験式の適用が疲労試験の省力化に繋がる可能性が示された。

キーワード：疲労試験、ひずみ速度、疲労寿命、高炉スラグ細骨材

1. はじめに

我が国では、建設後数十年が経過したコンクリート構造物が多く存在し、それらの中には老朽化により著しい劣化現象がみられるケースも少なくない。劣化したコンクリートは、ひび割れ等の発生により強度や耐久性が急激に低下することから、構造物全体の安全性を確保する上でも無視できない問題である。

こうした中で、近年は、既存のコンクリート構造物を効率的に維持管理する手法や持続可能なコンクリート材料の開発に向けた動きが高まっている。内閣府 SIP における「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」では、第一期課題として「超耐久コンクリートを用いたプレキャスト部材の製品化のための研究開発」が取り組まれた¹⁾。また、土木学会では、高炉スラグ細骨材（以下、BFS）をプレキャスト製品に適用するための設計・製造・施工に関する指針が示されている²⁾。

BFS とは、製鉄所で発生する高炉スラグを原料としたコンクリート用細骨材である。BFS は潜在水硬性を有し、それをコンクリートに用いた場合、セメントペースト組織の緻密化や骨材界面の性状が改善されることが知られている。最近では、BFS を用いたコンクリートの長期強度や化学抵抗性が優れている^{3), 4)}点を活かし、コンクリート構造物の長寿命化を図るための研究が盛んに行われている。その他にも、BFS は本来が産業副産物であることから、資源循環型社会を形成するリサイクル材料の一つとして環境的観点からも注目されている。

BFS を用いたプレキャスト製品の適用先としては、高速道路の床版取替工事等が想定される。そのような場合、長期的な繰返し荷重による疲労が問題となる。コンクリートの疲労強度は、コンクリートのひび割れ進展に対する抵抗性と密接な関係にあり、BFS を用いたコンクリ

ートのひび割れ進展エネルギーは普通コンクリートと同等以上となることが報告されている⁵⁾。このことは、BFS がコンクリートの疲労抵抗性を向上させる可能性を示唆するものといえる。

一方、コンクリートの疲労に関する研究は過去にも数多くなされてきた。しかし、一般的な疲労試験では相当量の供試体に多数回の繰返し荷重を加えるため、実験データの取得に長時間を要する⁶⁾。故に、コンクリートの疲労検討においては、試験時間の長さやそれに伴う電力消費が懸念点となっており、これらの負担をできる限り軽減することが望まれる。

尾上らは、コンクリートの疲労寿命をサイクル毎のひずみ増分（ひずみ速度）から予測するために、種々の実験条件下におけるひずみ速度と疲労寿命の関係を整理し、その結果として重相関係数の高い実験式を得たことを報告している⁷⁾。この実験式を用いることで、供試体の疲労破壊を待たずに試験を打ち切ることができ、試験にかかる負担を軽減できる可能性が考えられる。

本研究では、モルタル供試体を用いて上記の実験式を適用した疲労寿命予測を行い、実験式の妥当性および疲労試験の省力化について検討した。また、細骨材に BFS と山砂をそれぞれ用いたモルタルの疲労寿命を比較し、BFS によりコンクリートの疲労寿命が向上するかどうか調べた。

2. 実験概要

2.1 実験式について

図-1 は、コンクリートの疲労試験における繰返し回数と上限応力時のひずみ（載荷軸方向ひずみ）の関係を表したものである。図中に示されるように、コンクリートの疲労過程は遷移領域・定常領域・加速領域の3段階

*1 熊本大学大学院 自然科学教育部土木建築学専攻（学生会員）

*2 熊本大学大学院 先端科学研究部（工学系） 准教授 博士（工学）（正会員）

に分類される。このうち、大部分を占める定常領域は、微細ひび割れの安定的な成長段階であると考えられており、コンクリートの疲労寿命に多大な影響を及ぼすことが知られている。定常領域におけるサイクル毎のひずみは「ひずみ速度」と定義され、ひずみ速度の対数と疲労寿命の対数は直線関係を示す⁷⁾。

尾上らは、異なる研究者が実施した圧縮疲労試験の実験データから、ひずみ速度と疲労寿命の関係を整理することで以下の実験式を得ている（図-2）。

$$\log N = -1.008 \log(d\varepsilon/dn) + 2.919 \quad (1)$$

ここで、 N ：圧縮疲労寿命、 $d\varepsilon/dn$ ：ひずみ速度である。

本実験では、この実験式(1)を用いたコンクリートの疲労寿命予測を行い、疲労試験の省力化を検討した。

2.2 使用材料

普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³），高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.78 g/cm³，吸水率：0.21%，粗粒率：2.13），天然山砂（表乾密度：2.56 g/cm³，吸水率：0.21%，粗粒率：2.58）を用いた。

2.3 配合条件

表-1 に、本実験で検討したモルタル供試体の配合およびフロー値を示す。細骨材には BFS と山砂をそれぞれ使い、水セメント比は 50% と 60% の 2 水準とした。細骨材量については、事前に試練りを行い、15 打フロー値が 160～180 mm 程度となるように調整した。

2.4 供試体

モルタル供試体は JIS R 5201-2015⁸⁾ に準じ、Φ50×100 mm の円柱を作製した。脱型後、28 日間の水中養生を行い、その後、所定の材齢になるまで気中養生を行った。水中養生から気中養生に移す際に、研磨機によりモルタル供試体の上底面を研磨した。

各種モルタルにおける所定の材齢に達した時点で、静的強度試験および疲労試験を実施した。静的強度試験は JIS A 1108-2018⁹⁾ に準じて行った。表-2 に、普通モルタルと BFS モルタルの養生期間と静的強度を示す。実験日の都合により N50 と B50 の養生期間が異なるが、いずれも 100 日以上が経過し、各種モルタルの疲労試験期間（2 日間）における静的強度は安定していると思われることから、試験結果に対する影響には問題ないと考えられる。

2.5 疲労試験方法

疲労試験には、各種モルタルについて基本的に 5 本ずつ供試体を用いた。モルタル供試体にひずみゲージを添付し、1 秒ごとに荷重と縦ひずみをデータロガーで計測した。試験機は 100t 試験機を使用し、プログラム制御によりサイクル荷重を与え、供試体が破壊する時点、あるいは 100 サイクルを経過する時点まで载荷を行った。

下限応力は、同一の上限応力下において、その値が大きいほど疲労寿命が大きくなることが知られており、一

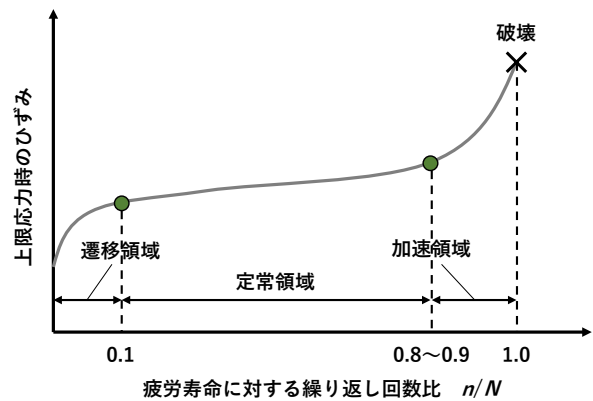


図-1 コンクリートの疲労段階

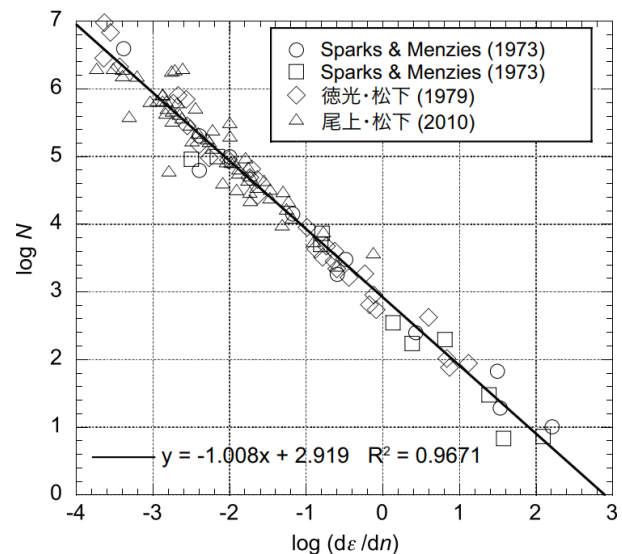


図-2 ひずみ速度と疲労寿命の関係（参考文献 2 をもとに作成）

表-1 モルタルの配合およびフロー値

配合	使用 細骨材	W/C (%)	細骨材量 (Vol%)	単位量(kg/m ³)			フロー値 (mm)
				W	C	S	
N50	山砂	50	53	287	575	1357	167
N65		65	55	302	465	1408	180
B50	BFS	50	50	306	612	1390	163
B65		65	52	322	496	1446	160

表-2 モルタルの養生期間および静的強度

配合	養生期間(日)	静的強度(N/mm ²)
N50	136	46.5
N65	65	29.9
B50	112	54.6
B65	65	37.2

般には静的強度の 10% 程度で検討される場合が多い。本実験では、下限応力が試験結果に影響を及ぼす点を考慮して静的強度の 10% に固定した。上限応力については、静的強度の 90%、80%、70% の 3 ケースを選定した。

また、通常の疲労試験における載荷周波数は5～10 Hz程度である¹⁰⁾が、今回は使用した試験機の仕様により、載荷周波数を0.02～0.06 Hz (5 kN/sec) とした。

なお、各種モルタルの疲労試験に先立ち、疲労寿命予測で用いる実験式(1)の妥当性検証試験を実施した。

2.6 疲労寿命の推定

疲労試験において、100 サイクル以内に破壊した供試体については、破壊時のサイクル数をその供試体の疲労寿命とした。100 サイクルを超えても破壊しない場合は、次の手順により、疲労寿命予測を行った。

- (1) 載荷中に記録されるサイクル毎の上限応力時のひずみを抽出し、図-1と同様のグラフを作成した。
- (2) 作成したグラフについて、定常領域と判定される直線の傾きから得られる近似式からひずみ速度を求めた。
- (3) ひずみ速度を先に示した実験式(1)に代入し、疲労寿命を推定した。

また、疲労寿命の平均値については、生存確率の考え方¹¹⁾を用いて求めた。同一条件で試験された総数 n 個の供試体の疲労寿命のうち、寿命の小さいほうから数えて r 番目の測定値 N_r が出現する確率の期待値 $p_f(N_r)$ は、

$$p_f(N_r) = r/(n+1) \quad (2)$$

で表され、生存確率の期待値 $p(N_r)$ は、

$$p(N_r) = 1 - r/(n+1) \quad (3)$$

で表される。

コンクリートの疲労寿命は、各種理論分布に適合するが、その中でも対数正規分布は最も適合性が良く、簡便かつ実用的であるとされる¹²⁾。疲労寿命が対数正規分布するとき、その回帰直線式は、

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

と表すことができる。

ここで、 t ：正規分布曲線の対称軸からの距離

A, B ：実験定数

生存確率 $p(N_r) = 50\%$ のときの $\log N$ を平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ (上線は平均を表すものとする) として、疲労寿命の代表値とした。すなわち、式(4)において $t=0$ とおき、平均疲労寿命は定数 A, B を用いて式(5)で算定される。

$$\log N = -B/A \quad (5)$$

2.7 結果の比較

疲労寿命の比較は、上限応力と疲労寿命の対数の関係を表す $S-N$ 線図を用いた。2.6 項の手順により得られた平均疲労寿命をグラフにプロットし、直線回帰することで $S-N$ 線図を作成した。

3. 実験結果

3.1 実験式の妥当性検証試験

各種モルタルの疲労試験（本試験）に先立ち、実験式(1)の妥当性検証試験を実施した。はじめに、B65の供試

体を用いて上限応力を90%、85%、80%とした場合に供試体が破壊するまでサイクル荷重を与えた。その後、2.6項に示した手順に沿って、試験データをひずみ速度と疲労寿命の関係を表すグラフにプロットし、実験式の回帰直線と比較した。加えて、妥当性検証後に実施した疲労試験（本試験）においてサイクル荷重が100サイクルに到達する前に破壊した各種モルタル（N50を除く）の試験データについてもプロットした。

図-3に、妥当性検証試験の結果を示す。図より、試

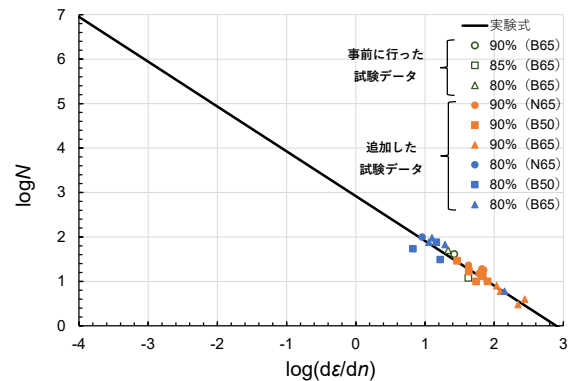


図-3 妥当性検証試験の結果

表-3 普通モルタルの疲労試験結果

供試体	上限応力 (%)	r	ひずみ速度 (10^{-6} /回)	N (回)	$\log N$
N50	70	1	5.54	148	2.17
		2	5.33	154	2.19
		3	4.96	165	2.22
		4	4.80	171	2.23
		5	3.72	221	2.34
	80	1	7.29	112	2.05
		2	5.32	154	2.19
	90	1	-	6 (破)	0.78
		2	-	21 (破)	1.32
		3	-	22 (破)	1.34
		4	-	36 (破)	1.56
		5	-	50 (破)	1.70
N65	70	1	5.87	139	2.14
		2	4.70	174	2.24
		3	4.61	178	2.25
		4	4.17	197	2.29
		5	3.92	209	2.32
	80	1	9.70	84	1.92
		2	8.47	93	1.97
		3	0.96	99 (破)	2.00
		4	6.69	122	2.09
		5	6.52	125	2.10
	90	1	-	13 (破)	1.11
		2	1.78	15 (破)	1.18
		3	1.85	18 (破)	1.26
		4	1.82	19 (破)	1.28
		5	1.63	23 (破)	1.36

表－4 BFS モルタルの疲労試験結果

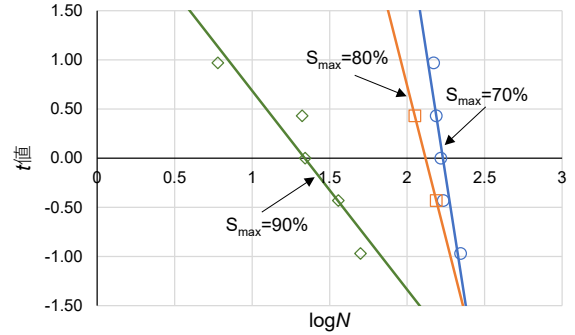
供試体	上限応力 (%)	r	ひずみ速度 ($10^{-6}/回$)	N (回)	$\log N$
B50	70	1	4.25	193	2.29
		2	3.44	239	2.38
		3	3.37	244	2.39
		4	2.05	402	2.60
		5	1.96	420	2.62
	80	1	1.22	31 (破)	1.49
		2	0.83	54 (破)	1.73
		3	1.17	76 (破)	1.88
		4	9.02	90	1.95
		5	8.97	91	1.96
	90	1	1.91	10 (破)	1.00
		2	1.73	10 (破)	1.00
		3	1.84	13 (破)	1.11
		4	1.63	17 (破)	1.23
		5	1.46	29 (破)	1.46
B65	70	1	3.04	271	2.43
		2	2.86	288	2.46
		3	2.55	322	2.51
		4	2.16	421	2.62
		5	1.65	512	2.71
	80	1	2.15	6 (破)	0.78
		2	1.33	50 (破)	1.70
		3	1.29	67 (破)	1.83
		4	1.06	76 (破)	1.88
		5	1.10	95 (破)	1.98
		6	9.15	112	2.05
	90	1	2.35	3 (破)	0.48
		2	2.44	4 (破)	0.60
		3	2.09	6 (破)	0.78
		4	2.03	8 (破)	0.90
		5	1.42	41 (破)	1.61

験データにはばらつきが少なく、いずれも実験式の回帰直線と一致するようにプロットされていることがわかる。このことから、実験式(1)を用いた疲労寿命予測の結果について、その妥当性が示されたといえる。

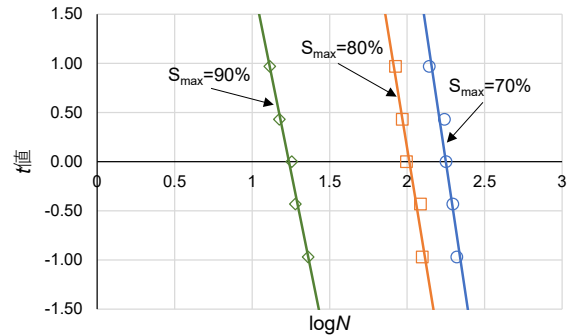
3.2 疲労試験の結果

疲労試験の結果を表－3と表－4に示す。表中の「 N (回)」欄に記す「(破)」は、試験中に破壊(サイクル荷重が100サイクルに到達する前に破壊)したケースである。それ以外の供試体は、実験結果から得たひずみ速度を実験式(1)にあてはめて予測した値である。なお、疲労試験の実施期間中に試験機の不具合により取得できなかったデータは「-」で表記している。

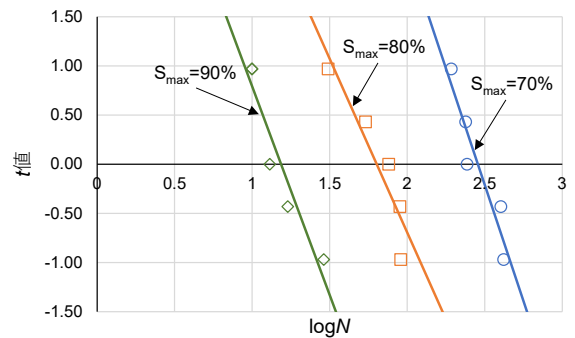
平均疲労寿命を求めるために、疲労試験の結果から得られた各供試体における生存確率の期待値 $p(N)$ を t 値に変換し、 t 値と疲労寿命の対数 $\log N$ との関係をグラフ



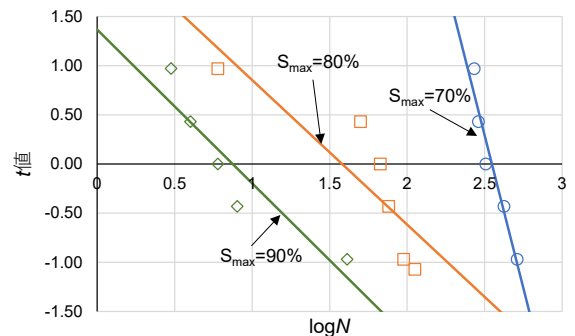
図－4 t - N 線図 (N50)



図－5 t - N 線図 (N65)



図－6 t - N 線図 (B50)



図－7 t - N 線図 (B65)

にプロットすることで t - N 線図を作成した。各種モルタルの t - N 線図を図－4～図－7に示す。統計処理によるコンクリートの疲労寿命に関する過去の研究では、1つの条件につき供試体数を10本前後もしくはそれ以上とする場合が多い。疲労試験の省力化という観点から、本実験の供試体数は1つの条件につき5本としているが、い

表-5 t - N 線図の回帰直線式と平均疲労寿命

配合	上限応力 (%)	回帰直線式	重相関係数 R^2	$\overline{\log N}$ ($t=0$)
N50	70	$t = -10.12 \log N + 22.57$	0.847	2.23
	80	$t = -6.22 \log N + 13.17$	1.000	2.12
	90	$t = -2.02 \log N + 2.71$	0.892	1.34
N65	70	$t = -10.58 \log N + 23.8$	0.916	2.25
	80	$t = -9.67 \log N + 19.47$	0.936	2.01
	90	$t = -7.8 \log N + 9.65$	0.985	1.24
B50	70	$t = -4.73 \log N + 11.62$	0.893	2.47
	80	$t = -3.53 \log N + 6.37$	0.862	1.80
	90	$t = -4.24 \log N + 5.03$	0.913	1.19
B65	70	$t = -6.22 \log N + 15.83$	0.936	2.55
	80	$t = -1.47 \log N + 2.32$	0.740	1.58
	90	$t = -1.56 \log N + 1.37$	0.855	0.88

ずれの t - N 線図についても実験結果のプロットを直線回帰できることが確認できた。また、コンクリートの疲労寿命は高応力・低周波数条件下においても対数正規分布に従うことがわかっており¹³⁾、本実験のように実験式を用いて疲労寿命を推定した場合でもその結果は一致するものとなった。表-5には、 t - N 線の回帰直線式および平均疲労寿命を示している。ほぼ全てのケースにおいて、重相関係数 R^2 は概ね高い値となっている。これらを踏まえても、実験式による疲労寿命予測については妥当性の高い結果が得られたといえる。

3.3 S- N 線図

各種モルタルについて、上限応力と疲労寿命の関係から S - N 線図を作成した。その結果を図-8, 9に示す。

図-8は、N50とB50の比較である。普通モルタルの方が僅かに直線の傾きが緩やかなものの、その差はほとんどないものといえる。図-9は、N65とB65の比較であるが、こちらも図-8と同様の傾向を示した。結果的に、本実験で得られた S - N 線図については、細骨材の種類や水セメント比の違いに依らず、各種モルタルの回帰直線が概ね一致する形となった。

本実験では疲労寿命に対する BFS の効果は認められなかったが、BFS が有する潜在水硬性の特徴を活かした供試体の養生条件や養生期間を再検討することで、コンクリートの疲労寿命が向上する可能性が考えられる。

ここからは、実験式を適用した疲労試験結果の妥当性について、コンクリートやモルタルの疲労寿命に関する過去の研究結果と照合しながら考察する。

畑野らの報告¹⁴⁾によると、コンクリートの低サイクル疲労現象において、最大応力は疲労寿命の増加に伴い直線的に減少する。本実験でも同様に、上限応力と疲労寿命の関係をプロットした結果、それらが直線関係を示す S - N 線図を得ることができた。

Farooq¹⁵⁾らは、過去に、本実験と同じくモルタル供試体

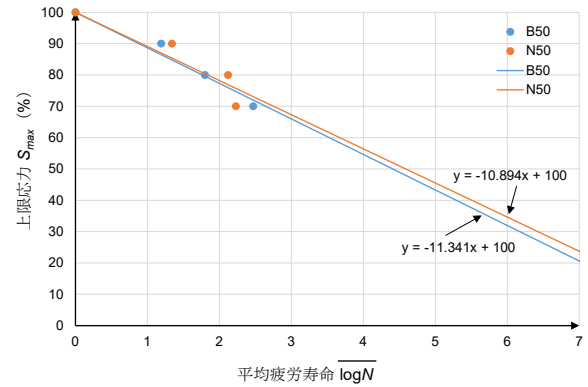


図-8 S - N 線図 (水セメント比 50%)

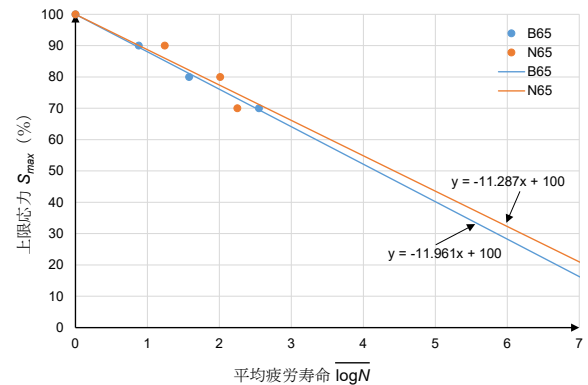


図-9 S - N 線図 (水セメント比 65%)

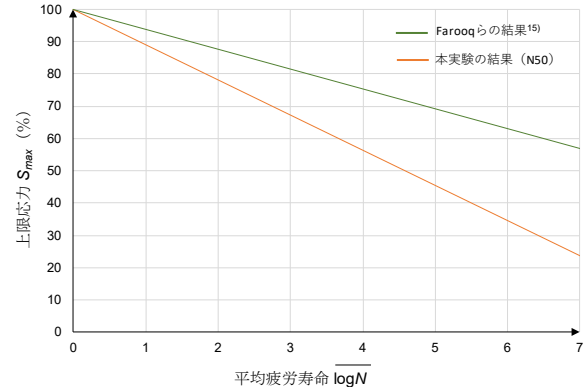


図-10 S - N 線図の比較

を用いた疲労試験を実施している。図-10は、Farooq らの疲労試験結果に基づいて作成した S - N 線図と本実験で検討した N50 の S - N 線図を比較したものである。 S - N 線図では、直線の傾きが緩やかであるほど同一の上限応力比に対する疲労寿命は大きく、反対に傾きが急であるほど疲労寿命は小さい。2つの S - N 線図について、それぞれの 200 万回疲労強度で比較したところ、Farooq らの疲労強度が静的強度の約 63%であるのに対し、本実験の結果は約 35%と約半分ほど小さい値で推定されていることが明らかになった。

今回のように、疲労寿命が小さくなる原因の一つとしては、疲労試験の載荷周波数が考えられる。井上らは、

上限応力 90%のとき、疲労寿命に対する載荷周波数の影響が 0.01 Hz～0.1 Hz の範囲で大きく、0.1 Hz～15 Hz の範囲では大差がない¹⁰⁾としている。本実験で実施した疲労試験の載荷周波数 (0.02 Hz～0.06 Hz) は、疲労寿命への影響が大きいとされる範囲に入っている。また、井上らの疲労試験結果では、載荷周波数が 0.01 Hz のときの上限応力 90%における平均疲労寿命は 1.54 であった。本実験による上限応力 90%の平均疲労寿命と比較すると、やや大きい値となっているが、ある程度の整合性を示す結果となっている。

畑野らは、同一の上限応力下では載荷周波数が大きいものほど疲労寿命が長くなる¹¹⁾ことを示している。一般的な疲労試験に用いられる載荷周波数が 5 Hz～10 Hz であることを鑑みると、今回の載荷周波数は極めて小さいといえる。これより、本実験で推定された疲労寿命が小さかった点については載荷周波数の影響が推察されるが、高応力・低周波数条件下における疲労寿命としては妥当であると考えられる。

4. 結論

- 1) 妥当性検証試験と疲労試験において破壊した供試体のひずみ速度と疲労寿命の関係をグラフにプロットした結果、実験式の回帰直線と一致した。
- 2) 本実験の条件下で得られた結果に関しては、疲労寿命に対する BFS の効果は認められなかった。
- 3) 実験式により推定した疲労寿命に基づく $t-N$ 線図および $S-N$ 線図は直線関係で表された。これにより、今回の疲労試験結果が対数正規分布に従うこと、過去の研究結果と一致することが検証され、実験式の妥当性が示された。
- 4) 本実験で得られた疲労寿命が過去の研究結果と比較して小さい値となったのは載荷周波数の影響が考えられる。一方、同一条件下による過去の疲労試験結果とはある程度の整合性が確認できた。

以上より、本研究では、実験式の妥当性が示されるとともに、高応力・低周波数条件下の疲労試験に関し、ある程度の疲労寿命予測が可能であることがわかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なるご尽力を賜りました熊本大学社会環境工学科卒業生の井土雄太氏に深く感謝の意を表すとともにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 戦略的イノベーション創造プログラムインフラ維持管理・更新・マネジメント技術「超耐久コンクリートを用いたプレキャスト部材の製品化のため

の研究開発」<http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/kadai/k07-38.pdf> (閲覧日：2019 年 12 月 16 日)

- 2) 公益財団法人 土木学会 コンクリート委員会：高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー，第 155 号，2019.3
- 3) 綾野克紀，藤井隆史：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol. 70, No. 4, 417-427, 2014
- 4) 藤井隆史，細谷多慶，杉田篤彦，綾野克紀：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの中性化，塩化物イオン浸透性および時間依存変形に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37, No. 1, 2015
- 5) 堤亮祐，尾上幸造，友田祐一，柳之内浩：高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの曲げ・圧縮応力下におけるひび割れ進展に関するエネルギー的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40, No. 1, 2018
- 6) 徳光義治，松下博通，牧角龍憲：繰返し応力によるコンクリートの圧縮疲労試験方法 (案)，コンクリート工学，Vol. 23, No. 3, pp. 33-39, 1985.3
- 7) 尾上幸造，鯨津成瑛，玉井宏樹：ひずみ速度によるコンクリートの疲労寿命予測，土木学会第 67 回年次学術講演会，5-164, pp. 327-328, 2012.9
- 8) JIS R 5201-2015「セメントの物理試験方法」，2015
- 9) JIS A 1108-2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」，2018
- 10) 松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，第 296 号，pp. 87-95, 1980.5
- 11) 松下博通，徳光義治：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，土木学会論文報告集，第 284 号，pp. 127-138, 1979.4
- 12) 井上正一，西林新蔵，吉野公：コンクリートの圧縮疲労特性と疲労強度の特性値に関する研究，土木学会論文集，No. 451, V-17, pp. 59-67, 1992.8
- 13) 都築和夫，成岡昌夫：低サイクル荷重下における軽量コンクリートの累積損傷の検討，土木学会論文報告集，第 206 号，pp. 125-133, 1972.10
- 14) 畑野正，渡辺啓行：周期的圧縮荷重によるコンクリートの疲労破壊，土木学会論文報告集，第 185 号，1971.1
- 15) Farooq, M. A., Sato, Y, Ayano, T and Niitani, K: Experimental and numerical investigation of static and fatigue behavior of mortar with blast furnace slag sand as fine aggregates in air and water, Construction and Building Materials, pp. 429-443, 2017