

論文 鉄鋼スラグ水和固化体の水中における圧縮疲労強度に関する研究

尾上 幸造^{*1}・鯨津 成瑛^{*2}・阿南 拓人^{*3}・今井 富士夫^{*4}

要旨: 本論文では、鉄鋼スラグ水和固化体 (SSC) を海洋・港湾構造物へ適用する場合を想定した水中圧縮疲労試験に基づき、実用的な強度範囲における SSC の圧縮疲労寿命予測式を提案している。同予測式より、水中における SSC の疲労強度は普通コンクリートよりも若干低下することが明らかとなった。供試体の変形特性に着目した検討により、SSC では同等となる応力繰返し 1 サイクル毎の損傷量が普通コンクリートよりも大きく、その結果早期に疲労寿命に達することが分かった。さらに粗骨材の圧かい荷重の比較より、磨砕した溶銑予備処理スラグや転炉スラグ等を骨材に用いることで SSC の疲労強度が改善できる可能性が示唆された。

キーワード: 鉄鋼スラグ水和固化体, 溶銑予備処理スラグ, 疲労強度, 疲労寿命, ひずみ速度, 圧かい荷重

1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体¹⁾ (Steel-making Slag Concrete, 以下 SSC と称する) は、高炉スラグ微粉末、製鋼スラグ (溶銑予備処理スラグ、転炉スラグ等) の細粗骨材、ポゾラン (フライアッシュ等) を原料とし、高炉スラグの潜在水硬性により固化するもので、コンクリートと同様の設備・工程で製造することができ、コンクリートと同等の強度を発現する。SSC は、その原料の大部分が産業副産物であること、セメントを使用しないこと、鉄やケイ素といった生物生育に好適な成分を豊富に含有することなどの特徴を有しており、資源循環・低炭素社会に寄与できる環境負荷低減型の材料であるといえる。

製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末が主に臨海製鉄所から発生すること、すり減り抵抗性が高い²⁾ ことなどの理由により、SSC は海洋・港湾構造物や空港舗装への利用が想定されている。また、固化体からのアルカリ溶出性がコンクリートと比較して低く海藻の成長に必須の元素である鉄を放出することから、海域における工事用ブロックや藻場・漁礁ブロックとしての活用も期待できる。

SSC を海洋・港湾構造物や空港舗装として適用する場合、交通荷重や波浪による多数回の繰返し応力を受けることとなる。そのため、それら構造物の設計に際しては、繰返し応力下における SSC の疲労に対する破壊安全性を考慮する必要がある。

既往の研究²⁾ で、SSC の曲げ疲労強度は普通コンクリートと同等であると報告されている。しかしながら、SSC の圧縮疲労強度に関する研究例はなく、これを明らかにする必要がある。

本研究に先立ち、溶銑予備処理スラグを骨材とする SSC の静的圧縮破壊試験を実施したところ、骨材を貫通する破断面が確認された。これは、溶銑予備処理スラグ

の特性 (たとえば、吸水率が比較的高いこと、強度が小さいこと、骨材中に脆弱部を含むことなど) に起因すると考えられる。このことより、SSC の圧縮疲労強度は普通コンクリートのそれとは異なることも予想される。

以上より本研究では、水中で繰返し圧縮応力を受ける SSC の疲労寿命予測式 (S-N 曲線式) を提案するとともに SSC と普通コンクリートの疲労破壊過程を比較検討することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

SSC 供試体の作製にあたり、高炉スラグ微粉末 4000 (比表面積: 4280cm²/g, 密度: 2.89g/cm³), 溶銑予備処理スラグ細骨材 (粒径: 5mm 以下, 表乾密度 3.26g/cm³, 吸水率: 7.04%), 溶銑予備処理スラグ粗骨材 (粒径: 20 ~ 5mm, 表乾密度: 2.75g/cm³, 吸水率: 7.37%), フライアッシュ (JIS II 種, 比表面積: 4020cm²/g, 密度: 2.28g/cm³), 消石灰 (密度: 2.20g/cm³) および水道水を使用した。なお、溶銑予備処理スラグとは、脱 C 精練前に S, Si, P などを除去する過程で生成するスラグ³⁾ である。遊離 CaO や遊離 MgO の水和反応による膨張を避けるため、エージング処理を施し膨張性のないことが確認されたものを使用した。表-1 に溶銑予備処理スラグの化学成分を、図-1 に溶銑予備処理スラグ骨材の粒度分布を示す。

表-2 に、SSC の配合条件および単位量を示す。SSC の静的強度が疲労強度に及ぼす影響を検討するため、強度指数の異なる 2 種類の配合で供試体を作製した。強度

表-1 溶銑予備処理スラグの化学成分

T. Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO
14.3	34.9	28.5	3.6	9.4	3.8	5.7

(mass%)

*1 宮崎大学 工学教育研究部社会環境システム工学科助教 博士 (工学) (正会員)

*2 宮崎大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 修士課程 (学生会員)

*3 宮崎大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 修士課程 (学生会員)

*4 宮崎大学 工学教育研究部社会環境システム工学科教授 工博 (正会員)

指数とは SSC の強度発現性の度合いをあらわす指標であり、高炉スラグ微粉末に対し消石灰を1倍、普通ポルトランドセメントを2倍、フライアッシュを0.35倍とするとよい相関がある³⁾と報告されている。強度指数はコンクリートにおけるセメント水比に相当し、これが大きいほど高強度となる。本研究において、強度指数 2.17 は普通強度を、強度指数 3.50 は中～高強度を想定し、静的強度を変化させる目的で2種類の配合を選定した。

2.2 練混ぜおよび供試体の作製方法

溶銑予備処理スラグ粗骨材、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、消石灰、溶銑予備処理スラグ細骨材の順に2軸強制練りミキサ内に投入し、30秒間空練りをした後に水を加え、さらに150秒間練り混ぜ排出した。供試体はφ75×150mmの円柱とし、鋼製型枠に2層各15回の突固めにより充填し、さらに振動台によって締固めを施した。今回検討した配合は化学混和剤を用いていないこともあり、単位水量が250kg/m³と一般的なコンクリートと比較して大きくなっている。しかしながら、フレッシュ時には適度な粘性を有し、著しい材料分離もなく、施工性は良好であった。各配合条件について1バッチあたり45本の供試体を作製し、それらを静的強度試験および疲労試験に用いた。

2.3 実験手順

図-2に実験手順を示す。供試体を打設後24時間で脱型し、強度試験に先立ち端面処理・ひずみゲージ貼付を施す直前まで水中養生した。疲労試験期間中におけるSSCの大幅な強度増進を避けるため、水中養生期間を180日以上とした。疲労試験開始時におけるSSCの静的強度（それぞれ同一バッチより抽出した3本の供試体により得られた平均値）は強度指数2.17の場合で32.4N/mm²、強度指数3.50の場合で42.1N/mm²であり、これらを疲労試験における繰返し応力比の基準値とした。

2.4 疲労試験方法

試験に先立ち、供試体を水槽から取り出し上下端面の研磨処理を施した。また、疲労試験時における供試体の縦ひずみを計測するため、供試体表面をドライヤーにて乾燥し、サンドペーパーで平滑にしたうえで荷重軸方向2箇所にひずみゲージ（検長60mm）を専用接着剤により貼付した。さらに、防水処理を施すため、防水テープと断熱・防湿テープによりひずみゲージを被覆した。ひずみゲージの防水処理の後、供試体を一旦水槽に戻し、質量増加が認められず供試体がほぼ含水したと判断された48時間以降に疲労試験を実施した。

疲労試験は電気油圧サーボ式疲労試験機（静的容量：300kN）を用い、写真-1に示すように供試体をアクリル水槽内で水浸させた状態で実施した。

図-3に繰返し応力の概略を示す。繰返し応力の荷重

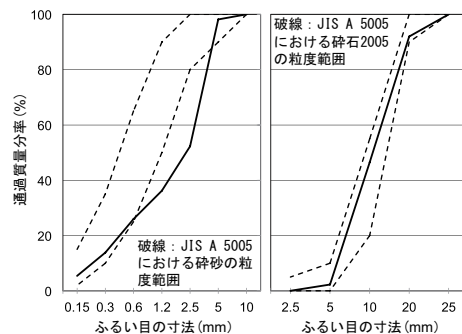


図-1 溶銑予備処理スラグ骨材の粒度分布（左）細骨材、（右）粗骨材

表-2 SSCの配合条件および単位量

強度指数*	水 W	高炉スラグ微粉末 BF	消石灰 CH	フライアッシュ FA	溶銑予備処理スラグ		スランプ	空気量	
					細骨材 SS	粗骨材 GS			
	(kg/m ³)							cm	%
2.17	250	463	46.3	93	756	749	10.5	2.8	
3.50	250	748	74.8	150	590	540	11.5	3.0	

*強度指数 = (CH + BF + 0.35FA) / W

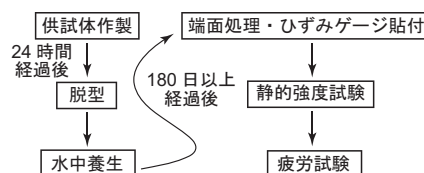


図-2 実験手順

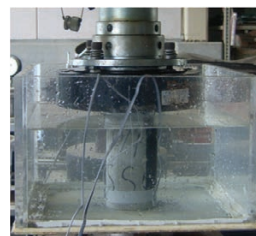


写真-1 疲労試験状況

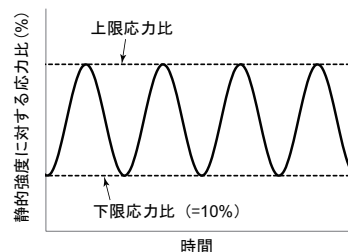


図-3 繰返し応力の概略

波形は正弦波、周波数は1.5Hzとした。なお、後に本研究の結果と比較するために引用した既往の文献^{4,5)}では、繰返し応力の荷重波形を正弦波、周波数を5Hzとしている。本研究では、使用する疲労試験機の特性を考慮し、安定して再現性の高い繰返し応力を発生できる周波数1.5Hzに設定した。なお、普通コンクリート（普通ポルトランドセメント、W/C=50%、石灰石砕砂・砕石使用）で作製したφ75mm×150mmの円柱供試体を用い、本研

究で使用した疲労試験機により正弦波形、周波数 1.5Hz、下限応力比 10% の条件下で水中疲労試験を実施した結果、その $S-N$ 線図は文献 5) で示されているものと一致し、周波数の違いによる疲労強度への影響は無視できることを確認している。繰返しの下限応力比 S_{\min} は静的強度の 10% で固定し、上限応力比 S_{\max} は表 -3 に示す 3 水準に設定した。同一の上限応力比に対し、5～9 本の供試体を用いて疲労寿命を測定し、2.5 に述べる統計的手法を用いて平均疲労寿命を算定した。また、動ひずみ計を介し所定のサイクル数に達した時点の応力とひずみ（データ数：1 秒間に 1000）をノートパソコンのハードディスク内に記録した。

2.5 疲労寿命の統計的処理方法

一般に、疲労寿命のばらつきは非常に大きいため、本実験のように供試体本数が少ない場合、順序統計量の理論⁹⁾を適用し生存確率を求める方法が一般的である。同一条件下で試験された総数 n 本の供試体が全て規定回数 N_x （本研究では $N_x=200$ 万回）以内で破壊した場合、疲労寿命が小さい方から r 番目の供試体の生存確率の期待値 $P(N_r)$ は式 (1) で与えられる。

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

もし、 m 本の供試体が規定回数 N_x （本研究では 200 万回）

までに破壊しなかった場合、 $n+1$ 本の供試体が試験されたと仮定し、疲労寿命が小さい方から r 番目の供試体の生存確率の期待値 $P(N_r)$ は式 (2) で与えられる⁷⁾。

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

このとき、規定回数 N_x で $(n-m+1)$ 番目の供試体がちょうど破壊したとみなし、その生存確率の期待値 $P(N_x)$ は式 (3) で与えられる。

$$P(N_x) = 1-(n-m+1)/(n+2) \quad (3)$$

コンクリートの疲労寿命は、各種理論分布に適合するが、実用的には対数正規分布するとしてよい⁴⁾ことが明らかとなっている。本研究では対象とする供試体が SSC でありコンクリートとは異なるが、まずはコンクリートと同様に圧縮疲労寿命が対数正規分布すると仮定して実験データの処理を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 SSC の疲労寿命予測式の算定

表-3 に SSC の圧縮疲労試験結果を示す。生存確率の期待値 $P(N_r)$ と疲労寿命の対数 $\log N_r$ を正規確率グラフ上にプロットすることで、図-4 に示す $P-N$ 線図が得られた。疲労寿命が対数正規分布するとき、その回帰直線式は式 (4) で表すことができる。

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

ここに、 t ：正規分布曲線の対称軸からの距離

A, B ：実験定数

本実験結果について、式 (4) にあてはめて求めた回帰式を表-4 に示す。いずれも重相関係数 R^2 の値が高く、実験結果のプロットは直線回帰できることが確認される。このことより、SSC の圧縮疲労寿命のばらつきはコンク

表-3 SSC の圧縮疲労試験結果

強度指数=2.17				
S_{\max} (%)	r	N_r (回)	$\log N_r$	$P(N_r)$ (%)
75	1	81	1.91	90.0
	2	177	2.25	80.0
	3	530	2.72	70.0
	4	679	2.83	60.0
	5	786	2.90	50.0
	6	830	2.92	40.0
	7	1854	3.27	30.0
	8	2811	3.45	20.0
	9	3174	3.50	10.0
65	1	461	2.66	90.0
	2	597	2.78	80.0
	3	1333	3.12	70.0
	4	2483	3.39	60.0
	5	8782	3.94	50.0
	6	8860	3.95	40.0
	7	9950	4.00	30.0
	8	15984	4.20	20.0
	9	132019	5.12	10.0
50	1	2666	3.43	88.9
	2	2737	3.44	77.8
	3	6365	3.80	66.7
	4	21421	4.33	55.6
	5	920502	5.96	44.4
	6	$>200 \times 10^4$	6.30	33.3
	7	$>200 \times 10^4$	-	-
強度指数=3.50				
S_{\max} (%)	r	N_r (回)	$\log N_r$	$P(N_r)$ (%)
73	1	91	1.96	83.3
	2	306	2.49	66.7
	3	1136	3.06	50.0
	4	1190	3.08	33.3
	5	3837	3.58	16.7
68	1	373	2.57	83.3
	2	1737	3.24	66.7
	3	3468	3.54	50.0
	4	6535	3.82	33.3
	5	20667	4.32	16.7
63	1	395	2.60	83.3
	2	8443	3.93	66.7
	3	11189	4.05	50.0
	4	59000	4.77	33.3
	5	63951	4.81	16.7

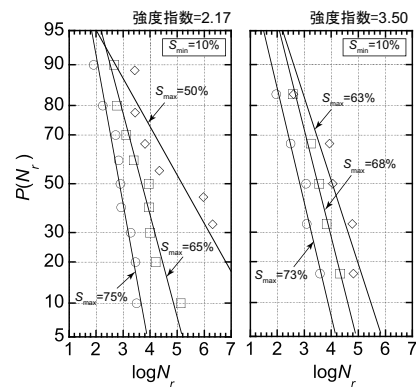


図-4 $P-N$ 線図

表-4 $P-N$ 線図の回帰直線式

強度指数	上限応力比	回帰直線式	重相関係数 R^2	$\log N$
2.17	75%	$t = -1.52 \log N + 4.35$	0.941	2.86
	65%	$t = -1.03 \log N + 3.81$	0.942	3.70
	50%	$t = -0.43 \log N + 2.29$	0.824	5.33
3.50	73%	$t = -1.18 \log N + 3.34$	0.954	2.83
	68%	$t = -1.15 \log N + 4.01$	0.983	3.48
	63%	$t = -0.78 \log N + 3.15$	0.866	4.04

リートと同様に対数正規分布に従うと考えられる。

いま、生存確率の期待値 $P(N)=50\%$ のときの $\log N$ を平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ として疲労寿命の代表値とする。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。

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

本実験結果について、式 (5) より平均疲労寿命を求めた結果は表-4 に示される通りである。

平均疲労寿命と上限応力比の関係をプロットした $S-N$ 線図を図-5 に示す。強度指数によらず、1本の $S-N$ 曲線で近似可能であることが分かる。したがって、強度指数 2.17 ~ 3.50 の範囲において、1つの $S-N$ 曲線式 ($S_{\max} = -9.279 \overline{\log N} + 100$) を用いることで疲労寿命を予測可能であるといえる。しかしながら、同式の適用は下限応力比 $S_{\min}=10\%$ の場合に限定される。疲労寿命予測式の汎用性を高めるためには、任意の下限応力に対応可能なものに拡張する必要がある。ここで、 $S-N$ 曲線において S_{\min} 一定の下で S_{\max} と $\overline{\log N}$ が直線関係にあり、繰返し回数一定の下での S_{\max} と S_{\min} の関係を表す「耐久線図」が (S_{\max}, S_{\min})=(100%, 100%) を通る直線となることから、下限応力比を考慮した $S-N$ 曲線式

$$\overline{\log N} = K (100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min}) \quad (6)$$

が提案され⁴⁾、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁸⁾における設計疲労強度算定式のベースとなっている。式 (6) 中、 K はコンクリートの含水状態やコンクリートの種類を考慮するための係数である。本実験により得られたデータを整理し、 $(100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min})$ と $\overline{\log N}$ との関係プロットすると図-6 のようであり、高い相関性が認められ、水中で繰返し圧縮応力を受ける SSC の疲労寿命予測式

$$\overline{\log N} = 9.69 (100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min}) \quad (7)$$

を得た。なお、本実験で得られた SSC の $K=9.69$ (水中) に対し、既往の研究⁵⁾では普通コンクリートについて $K=11.7$ (水中) が得られており、SSC の水中における圧縮疲労強度は普通コンクリートのそれよりも低くなる。例として、 $S_{\min}=20\%$ 、 $N=2 \times 10^6$ としたとき、疲労強度 S_{\max} は SSC で 48.0%、普通コンクリートで 56.9% となる。

疲労強度は静的強度に対する上限応力の比で表されるため、SSC と普通コンクリートの静的強度の違いによる影響は無視できる。にもかかわらず、両者の疲労強度が異なるということは、微細ひび割れの蓄積過程である疲労破壊過程が異なることを意味するものと考えられる。そこで、疲労試験時における供試体の変形特性に着目し、SSC と普通コンクリートの疲労破壊過程を比較した。

3.2 ひずみ速度と疲労寿命の関係

コンクリートの疲労試験において、繰返し回数と上限応力時の縦ひずみの関係を表す曲線 (回数-ひずみ曲線)

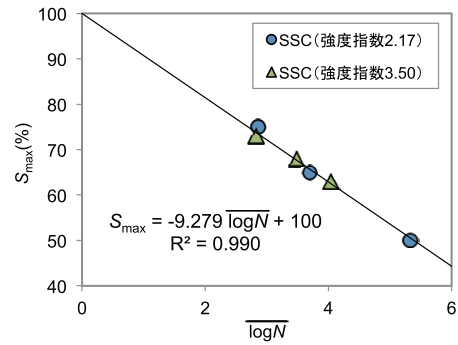


図-5 S-N 線図

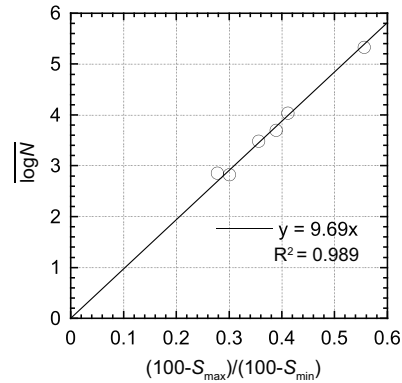


図-6 $(100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min})$ と $\log N$ の関係

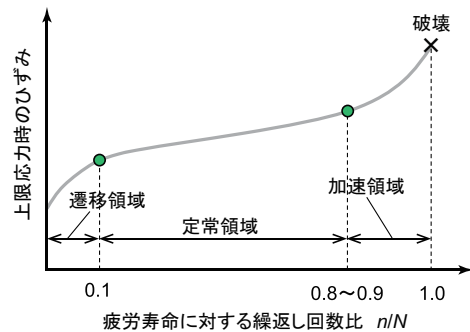


図-7 コンクリートの疲労破壊過程の模式図

は、図-7 に示すように、繰返し初期の上に凸な「遷移領域」、遷移領域の後に現れひずみが一定の割合で増加してゆく「定常領域」および破壊直前にひずみが急激に増大する下に凸な「加速領域」の3段階に分類される。これらのうち、疲労破壊過程の大部分を占める定常領域は、微細ひび割れの安定的な進展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。たとえば、サイクル毎のひずみ増分 de/dn (ϵ : ひずみ, n : 繰返しのサイクル数) を「ひずみ速度」と定義したとき、コンクリートの疲労寿命と定常領域におけるひずみ速度は強い負の相関関係にある^{9),10),11)}ことが明らかとなっている。

本研究で得られた実験結果について、回数-ひずみ曲線における直線部分を最小二乗法で直線近似し、その近似直線の傾きをひずみ速度として求め、疲労寿命との関係を両対数グラフ上にプロットすると、図-8 のようであ

る。上限応力比や強度指数にかかわらず、実験データは1本の近似曲線で回帰可能であり、ひずみ速度が大きくなるほど疲労寿命は小さくなる事が分かる。

図-9は、上限応力比の大きさがひずみ速度と疲労寿命の関係に及ぼす影響について調べるため、SSC(本研究)および普通コンクリート¹¹⁾の実験データを同一グラフ上にプロットしたものである。試験環境条件はいずれも水中である。SSCと普通コンクリートで関係式が概ね一致することは興味深い。なお、著者らの一部は、国内外で実施されたコンクリートの圧縮疲労試験結果を参照し、定常領域におけるひずみ速度と圧縮疲労寿命の回帰直線が実験条件(使用材料、配合、供試体の形状寸法、載荷速度等)によらずほぼ一致することを報告している¹²⁾。図-9より、同じ上限応力比 S_{max} で比較すると、今回対象としたSSCの方がグラフ上のより左上側にプロットされることが分かる。このことより、同じ上限応力比であってもSSCの方がひずみ速度すなわち繰返し回数あたりの損傷量が大きく、普通コンクリートよりも早期に疲労寿命に達する可能性が指摘される。その原因として、SSCでは溶銹予備処理スラグ骨材の吸水率が強く強度が低いことが考えられる。

3.3 粗骨材の圧かい荷重の比較

SSCの疲労強度が普通コンクリートよりも低下する理由について調べるため、粗骨材の圧かい荷重を比較検討した。本研究で使用した溶銹予備処理スラグの他、溶銹予備処理スラグをロサンゼルス試験機により磨砕(鉄球約420g×8個、1000回転)したもの(以下、磨砕溶銹予備処理スラグ)、転炉スラグ、石灰石砕石を対象とした。磨砕溶銹予備処理スラグと転炉スラグは、いずれもSSCの骨材として適用されることを想定し、疲労強度改善の可能性を探るために選定した。石灰石砕石は、普通コンクリートに用いられる骨材の1例として選定した。各粗骨材を絶乾状態とし20~10mmと10~5mmにふるい分け、各粒度から100個をランダムに抽出して1粒ずつ質量を測定した後に耐圧試験機(容量:2000kN)で圧かいし、ピーク荷重を読み取った。

同一の粒度範囲における骨材寸法の影響を除去するため、圧かい荷重 S (kN)を容積 1cm^3 あたりの圧かい荷重 s (kN/cm³)に換算し、実験データを小さい方から並べたとき、下から r 番目の s_r に対する累積確率を $P(s_r)=r/(n+1)$ として求め、正規確率グラフにプロットしたものが図-10である。なお、横軸には s_r の対数をとっている。表-5に回帰直線式を示す。いずれの実験結果についても重相関係数が高く直線近似できることから、 s_r のばらつきは対数正規分布するとみなしてよいと考えられる。同表中には各骨材の絶乾密度、吸水率および圧かい荷重の代表値 \bar{s} を示す。 \bar{s} は回帰直線式で $r=0$ とおくことで求

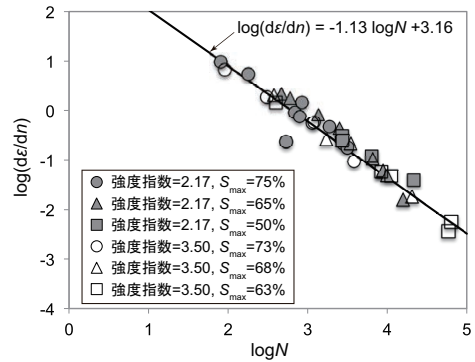


図-8 定常領域のひずみ速度と疲労寿命の関係

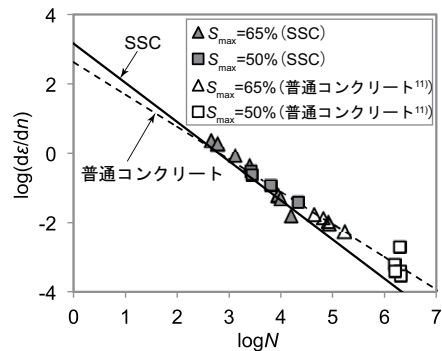


図-9 定常領域のひずみ速度と疲労寿命の関係 (SSCと普通コンクリートの比較)

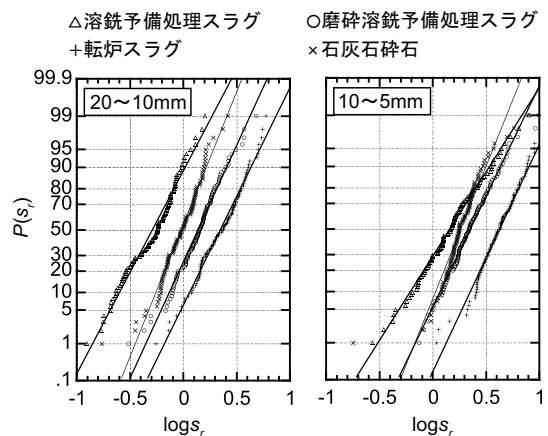


図-10 圧かい荷重の対数正規分布へのあてはめ

めた。粒径が大きいほど \bar{s} は小さくなっているが、これは微細なクラックや粗大な空隙などの弱点部分の含まれる確率が高くなるためと考えられる。同じ粒径で \bar{s} を比較すると、今回用いた溶銹予備処理スラグ粗骨材は比較的小さい値を示しており、このことがSSCの圧縮疲労強度の低下につながった可能性があると考えられる。

一方、藤井ら¹³⁾が報告しているのと同様に、ロサンゼルス試験機により磨砕することで溶銹予備処理スラグの密度が増加し吸水率が減少した。それに伴い、磨砕溶銹予備処理スラグ粗骨材は圧かい荷重が大幅に改善されており、転炉スラグも高い数値を示している。よって、磨砕溶銹予備処理スラグや転炉スラグを骨材に使用することでSSCの疲労強度を改善できる可能性があるといえる。

表-5 各種粗骨材の物性値および単位容積あたりの圧かい荷重の代表値

粒径	粗骨材の種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	回帰直線式	重相関 係数R ²	$\overline{\log s}$	\bar{s} (kN/cm ³)
20~10mm	溶銹予備処理スラグ	2.48	7.53	$t = 4.06 \log s_r + 1.18$	0.977	-0.291	0.51
	磨砕溶銹予備処理スラグ	2.70	2.83	$t = 4.66 \log s_r - 0.65$	0.981	0.139	1.38
	転炉スラグ	3.20	2.56	$t = 4.40 \log s_r - 1.52$	0.988	0.345	2.21
	石灰石碎石	2.68	0.25	$t = 5.17 \log s_r + 0.12$	0.954	-0.024	0.95
10~5mm	溶銹予備処理スラグ	2.68	7.14	$t = 3.42 \log s_r - 0.55$	0.994	0.162	1.45
	磨砕溶銹予備処理スラグ	2.98	2.56	$t = 4.46 \log s_r - 1.57$	0.987	0.352	2.25
	転炉スラグ	3.45	3.45	$t = 4.53 \log s_r - 2.84$	0.974	0.627	4.24
	石灰石碎石	2.66	0.50	$t = 4.69 \log s_r - 1.23$	0.868	0.262	1.83

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 水中で繰返し圧縮応力を受ける SSC の疲労寿命は、実験条件が同一であっても大きくばらつくが、そのばらつきは普通コンクリートと同様に対数正規分布に従うと考えられる。
- SSC の水中での平均圧縮疲労寿命 $\overline{\log N}$ は、任意の上限応力比 S_{max} および下限応力比 S_{min} に対し、式 (6) を用いることで予測できる。普通コンクリートの $K=11.7$ (水中) に対し、本実験では SSC に対し $K=9.69$ (水中) が得られ、本研究で対象とした SSC の水中での圧縮疲労強度は普通コンクリートよりも若干低下する結果となった。
- 定常領域におけるサイクル毎のひずみ増分である「ひずみ速度」と疲労寿命の関係式は、SSC と普通コンクリートとで概ね一致し、ひずみ速度が大きいほど疲労寿命は低下する。
- 同一の上限応力比に対するひずみ速度は、普通コンクリートよりも SSC の方が大きい。すなわち、SSC の方が普通コンクリートに比べ 1 サイクルあたりの変形量、すなわち損傷量が大きく、早期に疲労寿命に達する可能性がある。
- SSC の圧縮疲労強度が普通コンクリートよりも低下した理由として、溶銹予備処理スラグ骨材の圧かい荷重が小さいことが考えられる。
- 圧かい荷重の比較より、磨砕溶銹予備処理スラグや転炉スラグを骨材に用いることで SSC の圧縮疲労強度を改善できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、平成 22 年度九州建設技術管理協会研究開発助成（代表者：尾上幸造）および土木学会平成 22 年度吉田研究奨励賞（受賞者：尾上幸造）を受け実施しました。また、研究の遂行にあたり多大な協力を頂いた宮崎大学工学部卒業生の佐藤悠樹氏、同大学院修士生の鋤田諒氏に謝意を表します。

参考文献

- 松永久宏，小菊史男，高木正人，谷敷多穂：鉄鋼スラ

グを利用した環境に優しい固化体の開発，コンクリート工学，Vol.41，No.4，pp.47-54，2003.4

- 高橋良輔，濱田秀則：曲げ 5N/mm² クラスの鉄鋼スラグ水和固化体の力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1613-1618，2006.7
- 財団法人 沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル（改訂版）— 製鋼スラグの有効利用技術—，2008.2
- 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，土木学会論文報告集，No.284，pp.127-138，1979.4
- 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，No.296，pp.87-95，1980.4
- Gumbel, E. J. (河田竜夫ら訳)：極値統計学，pp.45-51，廣川書店，1963.2
- 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研究，土木学会論文報告集，No.189，pp.99-105，1971.5
- 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，丸善（株），2008.3
- Sparks, P. R. and Menzies, J. B.: The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression, Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No.83, pp.73-80, 1973.6
- 徳光善治，松下博通：繰返し荷重を受けるコンクリートの疲労強度，コンクリート工学，Vol.17，No.6，pp.13-22，1979.6
- 尾上幸造，松下博通：液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度低下に関するエネルギー的考察，土木学会論文集 E，Vol.66，No.2，pp.166-178，2010.4
- 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 回年次学術講演会講演概要集，V-164，2012.9
- 藤井隆史，藤木昭宏，綾野克紀，阪田憲次：鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性とその改善に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.63，No.2，pp.262-273，2007.5