

鉄鋼スラグ水和固化体の水中における圧縮疲労寿命予測式の算定および圧縮疲労破壊過程に関する考察

宮崎大学工学教育研究部 正会員 ○尾上 幸造 宮崎大学大学院 学生会員 鯨津成瑛

1. 研究の背景と目的

鉄鋼スラグ水和固化体¹⁾ (Steel-making Slag Concrete, 以下 SSC と称する) は、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末および水を必須材料とし、コンクリートと同様の設備・工程で製造でき、コンクリートと同程度の強度を発現する材料である。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こと、海藻などの生物生育に好適な元素を含有することなどから、SSC は海洋・港湾構造物としての適用が想定される。この場合、SSC は波浪による多数回の繰返し圧縮応力を受けることとなるが、研究例がなく現状では圧縮疲労に対する耐久性照査を行うことができない。骨材である製鋼スラグの吸水率が普通骨材よりも大幅に高いこと、および静的圧縮試験時に製鋼スラグ骨材を貫通する破断面が観察されることを考慮すれば、SSC の圧縮疲労強度は普通コンクリートとは異なることが大いに予想される。本研究の目的は、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) を提案すること、および SSC の疲労破壊過程を普通コンクリートのそれと比較検討することである。

2. 実験概要

SSC 供試体の作製には高炉スラグ微粉末 4000 (比表面積: 4280cm²/g, 密度: 2.89g/cm³), 製鋼スラグ細骨材 (粒径: 5mm 以下, 表乾密度: 3.26g/cm³, 吸水率: 7.04%), 製鋼スラグ粗骨材 (粒径: 20~5mm, 表乾密度: 3.12g/cm³, 吸水率: 5.04%), 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。表-1 に SSC の配合条件および単位量を示す。今回、強度指数 (普通コンクリートにおける水セメント比に相当する指標で、これが大きいほど高強度) の異なる 2 種類の配合について検討した。製鋼スラグ粗骨材、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、消石灰、製鋼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投入し、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、鋼製型枠へ 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。供試体は打設後 24 時間で脱型し試験時まで水中にて養生した。

疲労試験期間中の SSC の大幅な強度増進を避けるため、180 日間以上養生した供試体を用いた。疲労試験開始時における SSC の静的圧縮強度は強度指数 2.17 の場合 32.4N/mm², 強度指数 3.50 の場合 42.1N/mm² であった。疲労試験時の供試体のひずみを測定するため、載荷軸方向 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。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、供試体を水槽内で完全に水浸させ実施した。載荷波形は正弦波、周波数は 1.5Hz とした。繰返し時の下限応力比 S_{min} は静的圧縮強度の 10% で固定し、上限応力比 S_{max} は表-2 の 3 水準に設定した。

3. 結果および考察

表-2 に SSC の圧縮疲労試験結果を示す。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²⁾を適用し、生存確率を求める必要がある。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 (200 万回) 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は、P(N_r)=1-r/(n+1) で与えられる。もし、200 万回以内に破壊しない供試体が m 本含まれていた場合、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は P(N_r)=1-r/(n+2) で与えられ、規定回数でちょうど破壊したとみなす供試体の生存確率の期待値は P(N_r)=1-(n-m+1)/(n+2) で与えられる³⁾。コンクリートの疲労寿命は、各種の理論分布に適合するが、実用的には対数正規分布するとみなしてよい⁴⁾。本実験により得られた疲労寿命の対数を正規確率グラフ上にプロットした P-N 線図を図-1 に示す。いずれの上限応力比についても直線で近似できることから、SSC についてもコンクリートと同様に圧縮疲労寿命が対数正規分布に従うといえる。

いま、生存確率の期待値が 50% のときの logN を平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ とし、各上限応力比における疲労寿命の代表値とする。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-2 に示す。強度指数の違いによらず、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}=9.279logN+100) を用いて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

表-1 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	製鋼スラグ細骨材 SS	製鋼スラグ粗骨材 GS
	(kg/m ³)					
2.17	250	463	46.3	93	785	850
3.50	250	748	74.8	150	613	613

*強度指数 = (CH + BF + 0.35FA) / W

表-2 SSC の圧縮疲労試験結果

強度指数=2.17					
S _{max} (%)	r	N _r (回)	logN _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 × 10 ⁴	6.30	33.3	
	7	>200 × 10 ⁴	-	-	
強度指数=3.50					
S _{max} (%)	r	N _r (回)	logN _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	

キーワード 鉄鋼スラグ水和固化体, 圧縮疲労, 疲労寿命予測式, 定常領域, ひずみ速度
連絡先 〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1 TEL 0985-58-7334 FAX 0985-58-7344

用性は $S_{\min}=10\%$ 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、任意の下限応力比に対応可能なものに拡張する必要がある。ここで、① $S-N$ 曲線において $S_{\min}$ 一定の下で $S_{\max}$ と $\log N$ が直線関係にあり、② 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 $\overline{\log N} = K(100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min})$ が提案され⁴⁾、土木学会コンクリート標準示方書（設計編）における設計疲労強度算定式のベースとなっている。本実験により得られたデータを整理し、 $(100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min})$ と $\overline{\log N}$ との関係をプロットすると図-3 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

$$\overline{\log N} = 9.69(100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

を得た。式(1)を用いることで、強度指数 2.17~3.50 の実用的な範囲において任意の $S_{\max}$, $S_{\min}$ に対する SSC の水中での圧縮疲労寿命を予測できる。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。

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）は、図-4 に示すように、繰返し初期の上に凸な部分（遷移領域）、遷移領域の後に現れる直線部分（定常領域）および破壊近傍の下に凸な部分（加速領域）の3段階に分類される。このうち、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。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⁶⁾ことが実験的に明らかとなっている。そこで、本実験で得られたデータを整理し、 $\log(de/dn)$ と $\log N$ との関係をプロットすると図-5 のようである。同図中には、既往の研究⁷⁾における普通コンクリート（水中）のデータもあわせて示す。いずれもデータ数が少ないため確言はできないが、SSC と普通コンクリートの回帰曲線が概ね一致することは注目に値する。一方、同程度の上限応力比 $S_{\max}$ で比較すると、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。これは、同じ上限応力比であっても SSC の方がひずみ速度、すなわち供試体の繰返し回数あたりの変形量が大きく、普通コンクリートよりも早期に疲労寿命に達することを意味している。その原因として、SSC では製鋼スラグ骨材の吸水率が高く強度が低いことが考えられる。

4. まとめ

水中にて繰返し圧縮応力を受ける鉄鋼スラグ水和固化体 (SSC) の疲労寿命予測式 (式(1)) を提案した。また同式により、SSC の圧縮疲労強度は普通コンクリートよりも低くなることが明らかとなった。その原因として、SSC では製鋼スラグ骨材の吸水率が高く強度が低いために、同じ繰返し応力に対するひずみ速度（供試体の繰返し回数あたりの変形量）が大きくなり、普通コンクリートと比較して早期に疲労寿命に達することが考えられた。

謝辞 本研究は土木学会平成22年度吉田研究奨励賞の助成を受け実施したものです。関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) Gumbel, E.J. (河田竜夫ら訳): 極値統計学, pp.45-51, 廣川書店, 1963
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Sparks, P. R. and Menzies, J. B.: The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression, *Mag. Concr. Res.* Vol. 25, No. 83, pp. 73-80, 1973
- 7) 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

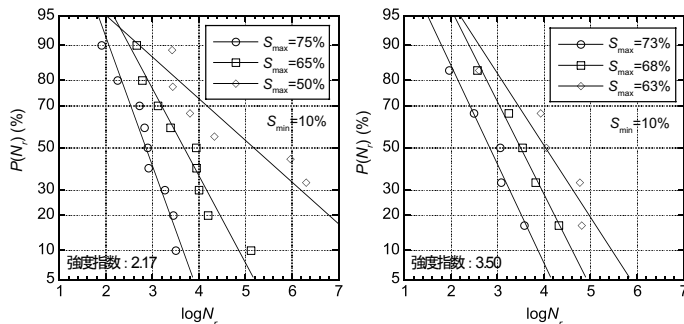


図-1 生存確率の期待値と疲労寿命の関係 ($P-N$ 線図)

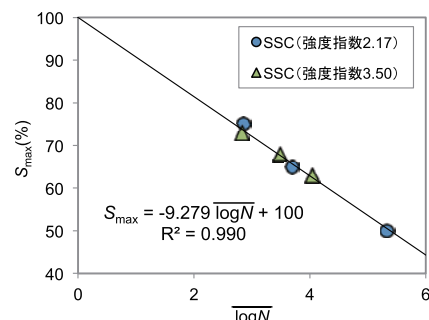


図-2 上限応力比と平均疲労寿命の関係 ($S-N$ 線図)

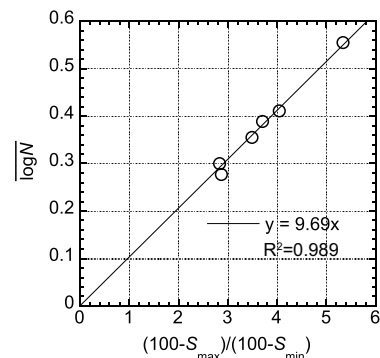


図-3 $(100 - S_{\max}) / (100 - S_{\min})$ と $\overline{\log N}$ との関係

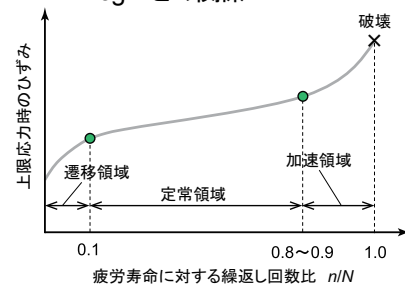


図-4 コンクリートの疲労破壊過程

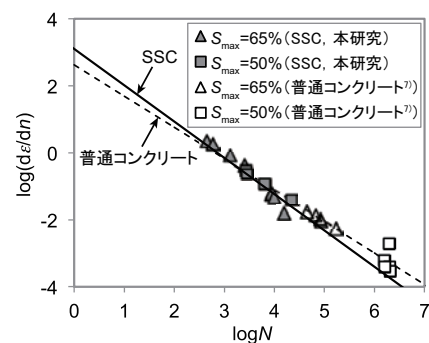


図-5 ひずみ速度と疲労寿命の関係