

製鋼スラグの高い吸水率に着目した鉄鋼スラグ水和固化体の 圧縮疲労特性に関する研究

尾上 幸造^{*1}・鋤田 諒^{*2}

^{*1} 宮崎大学 工学部土木環境工学科 助教

^{*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

概要：鉄鋼スラグ水和固化体（SSC）の水中における圧縮疲労特性について検討した。本研究で得られた寿命予測式を用いて SSC の 200 万回疲労強度を算定した結果、普通コンクリートよりも 5% 程度低い値を得た。疲労破壊過程の考察より、SSC については製鋼スラグ骨材の吸水率が高いために、同レベルの繰返し応力に対する微細ひび割れの進展が促進されやすい状況にあることが示唆された。

1. 序論

鉄鋼スラグ水和固化体¹⁾ (Steel-making Slag Concrete：本論文では、以下 SSC と称する) は、高炉スラグ微粉末、製鋼スラグ骨材、ポゾラン（フライアッシュ等）を主原料とし、高炉スラグの潜在水硬性により硬化するもので、コンクリートと同等の強度を発現する。原料がほぼ副産物であること、CO₂ 排出の原因となるセメントを使用しないこと、鉄やケイ素といった生物に必須の元素を含むことなどから、SSC は資源循環・低炭素化社会の推進に寄与できる環境負荷低減型の材料であるといえる。

SSC は、すりへりに対する抵抗性が高く、空港における舗装材や波しぶきを受ける港湾構造物として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、生物の生育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漁礁として付加価値の高い活用も期待できる。

SSC を空港舗装や港湾構造物に適用する場合、同固化体は航空機の離発着にともなう衝撃荷重や波浪による繰返し応力を受けることとなる。したがって、それら構造物の設計に際しては、繰返し応力に対する疲労寿命予測式に基づく照査が必要となる。

既往の研究²⁾で、SSC の曲げ疲労については検討されており、その S-N 線図（繰返し応力と寿命の関係）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 の圧縮疲労に関する研究例は見当たらず、これを明らかにする必要がある。

著者らは、SSC の静的圧縮試験を行った際、その破断面が写真-1 に示されるように製鋼スラグ骨材を貫通したものとなることを観察した。これは、製鋼スラグ骨材の吸水率が通常の骨材と比べて大幅に

高く、骨材自体の強度がペースト部分よりも弱いことに起因すると考えられる。したがって、SSC の圧縮疲労破壊過程は普通コンクリートのそれとは異なることが予想され、その結果として圧縮疲労強度や疲労寿命予測式も普通コンクリートのそれとは異なることが大いに考えられる。

以上より本研究では、SSC 構造物の圧縮疲労耐久性照査に資するデータを蓄積することを目的とし、実験的な検討を行った。前述のように、SSC は港湾構造物としての適用が想定されていることから、今回は疲労試験の環境条件を水中とした。まず、繰返しの下限応力比を静的強度の 10% で固定し、上限応力比を 65%、70%、75% に変化させ各 5～7 本の供試体を用いて水中における圧縮疲労試験を行い、疲労寿命予測式 (S-N 曲線式) を求め、普通コンクリートの式と比較した。その結果、SSC と普通コンクリートでは水中における S-N 曲線式が多少異なることを明らかとした。次に、その原因を探るため、疲労試験時におけるサイクル毎のひずみ増分である「ひずみ速度」を求め、これと疲労寿命との関係について考察した。



写真-1 静的圧縮試験による SSC の破断面

2. 実験概要

2.1 使用材料, 配合および供試体の作製方法

本研究で使用した材料を表-1に示す。今回、アルカリ刺激材として消石灰を用いた。

表-2に、SSCの配合条件と単位量を示す。SSCの強度指数を2.17、消石灰に対する高炉スラグ微粉末の質量比CH/BFを0.10として供試体を作製した。材料を練り混ぜるにあたり、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、鋼製型枠にまだ固まらないSSCを2層に分けて詰め、各層15回突き固めた後に振動台上で締固めを施し作製した。

2.2 実験手順

図-1に実験手順を示す。供試体を作製後、約24時間で脱型し、所定の材齢まで水中にて養生した。今回は180日間以上養生した供試体を使用した。これは、疲労試験期間中のSSCの大幅な強度増進を避けるためである。所定の材齢に達した時点で、抽出した3本の供試体により静的強度を測定し、その平均値32.4N/mm²に対して上限・下限応力比を設定し、順次、疲労試験を行った。

2.3 ひずみゲージの防水処置

疲労試験時における供試体のひずみを測定するため、荷重軸方向2か所にひずみゲージ(検長60mm)を貼付した。今回、水中で疲労試験を行うため、ひずみゲージに防水処置を施した。ひずみゲージの貼付方法を図-2に示す。ひずみゲージの貼付にあたり、水中から供試体を取り出し、供試体表面を十分に乾燥させた。その後、ひずみゲージの貼付部分を紙やすりで研磨して微粉を除き、2液混合型の用接着剤を表面に塗布した後ひずみゲージを貼り付けた。接着剤の乾燥後、防水テープ、断熱・防湿テープをその上から貼り付けた。

2.4 疲労試験方法

疲労試験には電気油圧式サーボ試験機(静的容量:300kN)を使用し、荷重時の波形を正弦波形、周波数は1.5Hzとした。応力振幅については、下限応力

表-1 使用材料

使用材料	物性等
製鋼スラグ細骨材	粒径:5mm以下 表乾密度:3.26g/cm ³ 吸水率:7.04%
製鋼スラグ粗骨材	粒径:5~20mm 表乾密度:3.01g/cm ³ 吸水率:5.04%
高炉スラグ微粉末4000	密度:2.89g/cm ³
フライアッシュ	JIS II種 密度:2.28g/cm ³
消石灰	密度:2.20g/cm ³

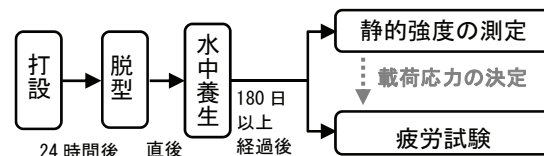


図-1 実験手順

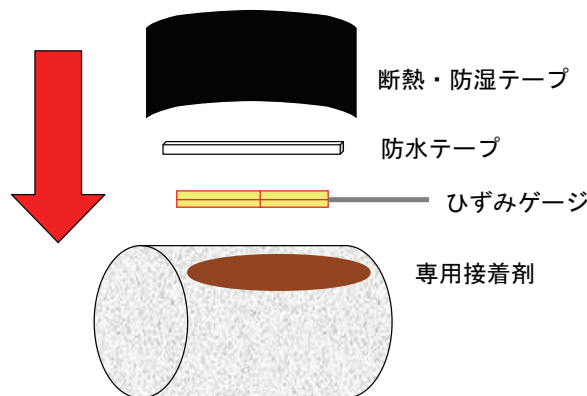


図-2 ひずみゲージの貼付方法

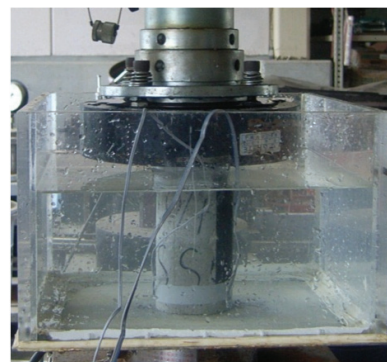


写真-2 疲労試験状況

表-2 SSCの配合条件と単位量

CH/BF	強度指数	水	高炉スラグ微粉末	消石灰	フライアッシュ	製鋼スラグ細骨材	製鋼スラグ粗骨材
		W	BF	CH	FA	SS	GS
(kg/m ³)							
0.10	2.17	250	463	46.3	93	785	850

$$\text{強度指数} = (\text{BF} + \text{CH} + 0.35\text{FA}) / \text{W}$$

比を静的圧縮強度の10%に固定し、上限応力比を75%、70%、65%の3パターンに設定して疲労試験を行った。なお、供試体が破壊しなかった場合の載荷回数の上限は200万回とした。疲労試験状況を写真-2に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労試験結果およびP-N線図の作成

表-3に水中におけるSSCの圧縮疲労寿命の測定結果を示す。コンクリートの圧縮疲労試験結果と同様に、上限応力比が同じであっても疲労寿命は供試体ごとにばらついている。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³⁾を適用して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本の全供試体が規定回数内で破壊した場合、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。

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

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は、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⁴⁾。

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

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、規定回数における生存確率の期待値 $P(N_x)$ は式(3)で与えられる。

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

本研究では全ての実験において供試体が破壊したため、 $P(N_r)$ の算出は式(1)を用いて行った。その算定結果は表-3に示される通りである。

コンクリートの疲労寿命は、対数正規分布、Weibull分布、およびMcCallの提案した分布などの各種理論分布に適合するが、実用的には対数正規分布とするとしてよい⁵⁾。本実験により得られたデータを正規確率グラフ上にプロットすると図-3に示すP-N線図が得られた。いずれの上限応力比についても直線で近似でき、疲労寿命が対数正規分布に従うことが確認される。

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。

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

表-3 圧縮疲労寿命の測定結果と $P(N_r)$ の算定結果

上限応力比(%)	r	N_r (回)	$\log N_r$	$P(N_r)$ (%)
75	1	81	1.91	87.5
	2	177	2.25	75.0
	3	530	2.72	62.5
	4	679	2.83	50.0
	5	786	2.90	37.5
	6	830	2.92	25.0
	7	1854	3.27	12.5
70	1	461	2.66	87.5
	2	597	2.78	75.0
	3	1333	3.12	62.5
	4	2483	3.39	50.0
	5	8782	3.94	37.5
	6	8860	3.95	25.0
	7	9950	4.00	12.5
65	1	2500	3.40	83.3
	2	2737	3.44	66.7
	3	6365	3.80	50.0
	4	15984	4.20	33.3
	5	125000	5.10	16.7

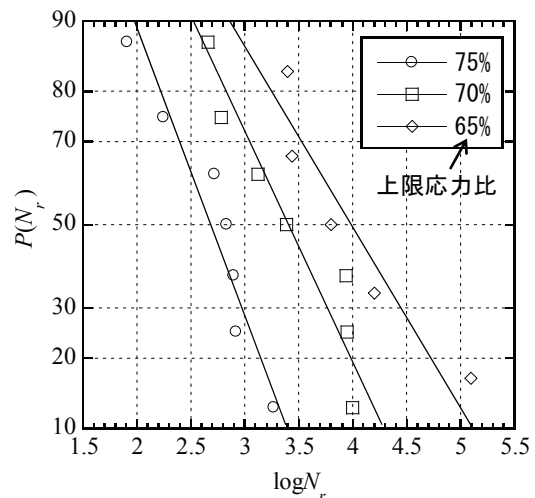


図-3 P-N線図

表-4 対数正規分布による回帰直線式および $\overline{\log N}$

上限応力比(%)	回帰直線式	R^2	$\overline{\log N}$
75	$t = -1.65 \log N_r + 4.43$	0.908	2.68
70	$t = -1.32 \log N_r + 4.51$	0.909	3.42
65	$t = -1.01 \log N_r + 4.02$	0.885	3.98

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直線式を表-4に示す。いずれの上限応力比についても重相関係数 R^2 の値は高く、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。

3.2 平均疲労寿命の算定およびS-N線図の作成

いま、生存確率の期待値 $P(N_r)=50\%$ のときの $\log N$ の値を平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ として疲労寿命の代表値とする。すなわち、式(4)において $t=0$ とおくことで、平均疲労寿命は定数A, Bを用いて式(5)で算定される。

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

表-5 鉄鋼スラグ水和固化体と普通コンクリートのS-N曲線式の比較

供試体の種類	試験環境	下限応力比 (%)	S-N曲線式	R ²	200万回疲労強度 (%)
SSC (本研究)	水中	10	$S_{max} = -8.897 \overline{\log N} + 100$	0.969	43.9
普通コンクリート ⁶⁾	水中	10	$S_{max} = -8.083 \overline{\log N} + 100$	0.983	49.1

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。

3.3 S-N線図

本実験結果について、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-4に示す。図中の点線は、普通コンクリートの水中疲労試験(下限応力比:10%)で得られたS-N線図⁶⁾である。普通コンクリート⁶⁾および本実験で得られたSSCのS-N曲線式をまとめて表-5に示す。なお、 $\log N = 0$ すなわち $N=1$ のとき、静的試験に相当し、上限応力比は100%に相当する。このことを考慮し、S-N曲線式は定数項を100(%)に固定して求めた。

表-5に示されるS-N曲線式より200万回疲労強度を求めると、SSCでは43.9%、普通コンクリートが49.1%となり、SSCの方が5%程度低い値となった。ここで、疲労強度は静的強度に対する上限応力の比で表される。そのため、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S-N曲線式が異なったということは、微細ひび割れの蓄積の過程すなわち疲労破壊過程が異なるということを意味していると考えられる。そこで、疲労試験時における供試体の変形特性に着目し、疲労破壊過程の観点からSSCと普通コンクリートの比較を行うこととした。

3.4 ひずみ速度と疲労寿命

上限応力時のひずみと疲労寿命Nの関係を表す曲線(回数-ひずみ曲線)は、図-5に示されるように3つの段階に分類することができる。すなわち、繰返し初期のひずみが急激に増加する「遷移領域」、その後現れるひずみが一定の割合で増加してゆく「定常領域」および破壊する直前にひずみが急激に増大する「加速領域」の3つである。図-6に、本実験で得られた回数-ひずみ曲線の一例(上限応力比が70%のケース)を示す。SSCを対象とした今回の実験においても、図-5に示されるものと類似した曲線が得られた。これは他の実験ケースについても同様であった。

コンクリートの疲労において、サイクル毎のひずみ増分のことをひずみ速度と呼ぶ。そして、疲労破壊過程の大部分を占める定常領域のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (以下、本論文では単に「ひずみ速度」と称する)は、

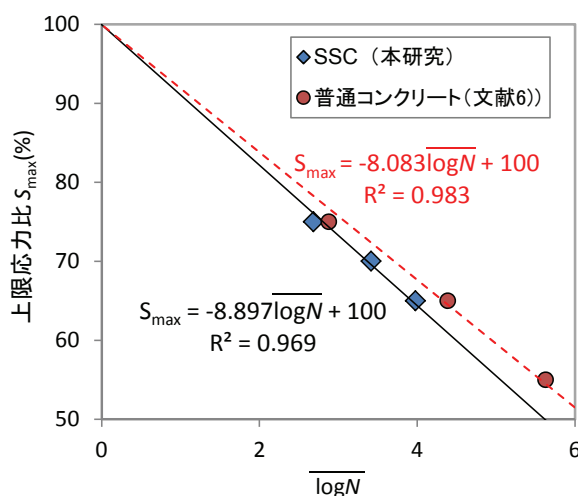


図-4 S-N線図

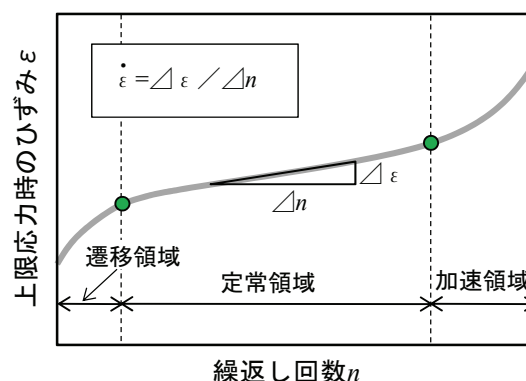


図-5 疲労破壊過程とひずみ速度の説明図

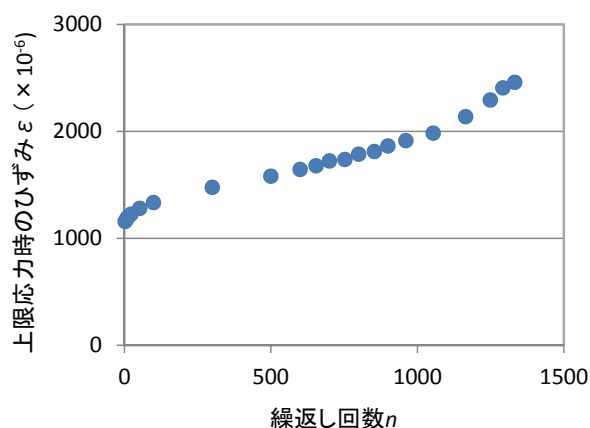


図-6 回数-ひずみ曲線の一例(上限応力比=70%)

コンクリートの疲労寿命と負の相関関係にあることが既存の研究^{7),8),9)}より明らかとなっている。そこで、本研究の実験結果について、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

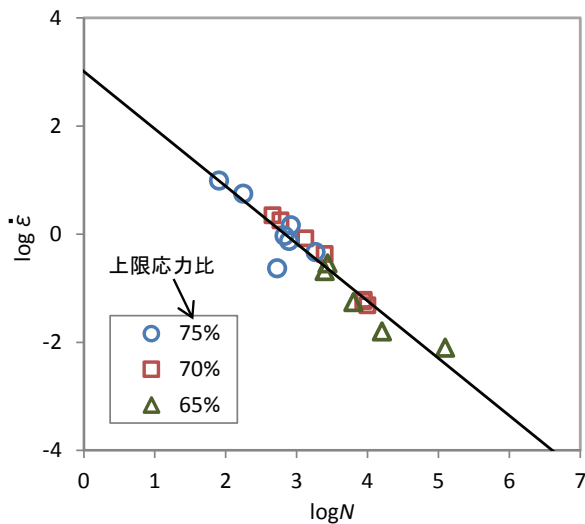


図-7 定常領域におけるひずみ速度と圧縮疲労寿命の関係（本研究の実験結果）

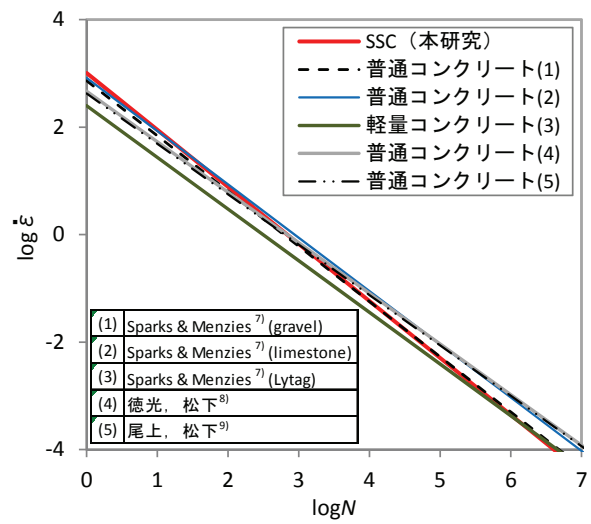


図-8 定常領域におけるひずみ速度と圧縮疲労寿命の回帰直線の比較

表-6 ひずみ速度と圧縮疲労寿命の関係式の比較

供試体の種類	粗骨材	環境条件	下限応力比 (%)	ひずみ速度と疲労寿命の関係式
SSC (本研究)	製鋼スラグ	水中	10	$\log \dot{\epsilon} = -1.061 \log N + 3.01$
普通コンクリート ⁷⁾	gravel	気中	33	$\log \dot{\epsilon} = -1.028 \log N + 2.87$
普通コンクリート ⁷⁾	limestone	気中	33	$\log \dot{\epsilon} = -0.992 \log N + 2.92$
軽量コンクリート ⁷⁾	Lytag	気中	33	$\log \dot{\epsilon} = -0.962 \log N + 2.40$
普通コンクリート ⁸⁾	砕石	気中	8	$\log \dot{\epsilon} = -0.941 \log N + 2.67$
普通コンクリート ⁹⁾	砕石	液体中	10	$\log \dot{\epsilon} = -0.938 \log N + 2.63$

式の傾きをひずみ速度として求め、圧縮疲労寿命 N との関係を両対数グラフ上にプロットしてみた。その結果を図-7に示す。既存の研究と同様に、本研究の実験結果についてもひずみ速度と圧縮疲労寿命は高い相関で直線近似できることが確認でき、ひずみ速度からコンクリートの圧縮疲労寿命をある程度予測することが可能であるといえる。

また、本研究および既存の研究^{7),8),9)}で得られたひずみ速度と圧縮疲労寿命の回帰直線を図-8に示すとともに、それらの関係式をまとめて表-6に示す。なお、文献9)における液体とは、界面活性剤希釈溶液、精製水および高濃度塩水を指す。本研究で得られたSSCについてのひずみ速度と圧縮疲労寿命の関係式は、既存の研究で報告されている普通コンクリートについての関係式とほぼ一致することが明らかとなった。このことから、供試体種類や試験環境条件によらず、ひずみ速度が供試体の圧縮疲労寿命に及ぼす影響はほぼ同等であるといえる。

図-9は、上限応力比の大きさがひずみ速度と圧縮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⁹⁾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。

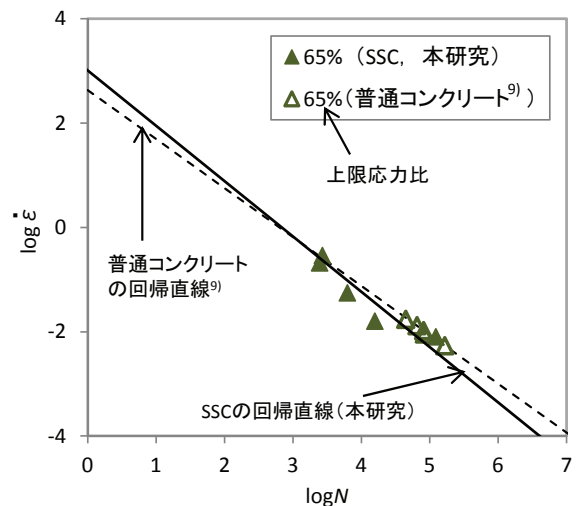


図-9 定常領域におけるひずみ速度と圧縮疲労寿命の関係に及ぼす上限応力比の影響

試験環境条件はいずれも水中（ただし、本研究が水道水中であるのに対し、文献9)では精製水中）である。文献9)の精製水中における疲労試験は、著者の一部が上限応力比50, 55, 60, 65%で実施したものであり、本研究の実験条件と一致する上限応力比65%のみ手元のデータと比較することにした。文献7), 8)については、ひずみ速度と疲労寿命の関係に

ついて上限応力比の情報が記載されておらず、比較することができなかった。

同図より、同じ上限応力比では 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、同一応力比に対するひずみ速度が普通コンクリートよりも SSC で大きいことを意味している。その原因として、骨材特性の違いに起因する微細ひび割れの蓄積過程の違いが考えられ、SSC では製鋼スラグ骨材の吸水率が高いために、微細ひび割れの進展が促進され、ひずみ速度が増大し、結果的に圧縮疲労寿命が普通コンクリートよりも低下するものと推察される。

4. 結論

製鋼スラグ骨材の高い吸水率に着目し、水中における鉄鋼スラグ水和固化体 (SSC) の圧縮疲労寿命予測式を実験的に算定するとともに、これが普通コンクリートと異なった理由を探るため、圧縮疲労破壊過程について考察した。本研究で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- (1) 水中で圧縮疲労を受ける SSC の疲労寿命は、繰返し応力比の範囲が同一であっても大きくばらつくが、実験データは普通コンクリートの場合と同様に対数正規分布に従う。
- (2) $S-N$ 線図より、上限応力比 S_{max} と疲労寿命 $\log N$ との間には直線関係が認められ、水中における SSC の圧縮疲労寿命予測式として次の式を得た。
$$S_{max} = -8.897 \log N + 100$$
同式を用いて SSC の 200 万回圧縮疲労強度を算出すると、43.9% となり、既往の研究で示されている普通コンクリートの 49.1% よりも 5% 程度低い結果となった。
- (3) 圧縮疲労試験時における繰返し回数と上限応力時のひずみの関係は、SSC においても普通コンクリートの場合と同様に、遷移領域、定常領域、加速領域の 3 つの領域に分類することができる。
- (4) 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」と圧縮疲労寿命の関係は、SSC においても普通コンクリートと同様に両対数グラフ上で負の一次関係にある。
- (5) 本研究で得られた SSC についてのひずみ速度と圧縮疲労寿命の関係式は、既存の研究で報告されている普通コンクリートについての関係式とほぼ一致することが明らかとなった。このことから、供試体種類や試験環境条件によらず、ひずみ速度

が供試体の圧縮疲労寿命に及ぼす影響はほぼ同等であるといえる。

- (6) 同一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 で大きい。その原因として、骨材特性の違いに起因する微細ひび割れの蓄積過程の違いが考えられる。すなわち、SSC では製鋼スラグ骨材の吸水率が高いために、微細ひび割れの進展が促進され、ひずみ速度が増大し、結果的に普通コンクリートよりも疲労寿命が低下するものと推察される。

謝辞：本研究を実施するにあたり、平成 22 年度九州建設技術管理協会研究開発助成（研究代表者：尾上幸造）を受けました。ここに記し、謝意を表します。

なお、本報告書の内容を元として、学術論文集への投稿を予定していることを申し添えます。

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) 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
- 3) Gumbel, E. J. (河田竜夫ら訳): 極値統計学, pp.45-51, 廣川書店, 1963
- 4) 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) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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