

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

尾上 幸造¹・松下 博通²

¹正会員 宮崎大学助教 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail: onoue@civil.miyazaki-u.ac.jp

²フェロー会員 九州大学名誉教授 福岡建設専門学校校長 (〒812-0053 福岡市東区箱崎6-15-34)

土木学会コンクリート標準示方書における設計疲労強度の算定式は、乾湿状態の影響を反映しているが、水以外の液体作用の影響については考慮されていない。したがって、絶えず海水と接する海洋コンクリート構造物や、凍結防止剤が浸透する床版コンクリートなどの疲労破壊に対する安全性については検討の余地を残しており、各種液体の浸漬により疲労強度が低下する機構を明らかにする必要がある。本論文では、繰返し圧縮応力を受けるコンクリートの疲労強度について供試体の変形特性ならびにエネルギー吸収特性の観点から検討し、浸漬液体の表面張力が高いほど界面エネルギーの低下によってサイクル毎のひずみ増加量が増大し、その結果として疲労寿命が低下することを示した。また、湿潤状態における標準圧縮強度を基準とした時間耐久線図を提案した。

Key Words: compressive fatigue strength, immersion of liquid, microcrack, stress-strain curve, strain velocity, loss energy, surface energy, modified Goodman diagram

1. はじめに

水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度は、気中におけるよりも著しく低下する¹⁾⁹⁾ことが、実験的に明らかとされている。このことは、常時湿潤状態で波浪による多数回の繰返し応力を受ける海洋構造物や、疲労被害を受ける代表的な構造物である床版が雨水や融雪などの影響下に置かれる場合の疲労耐力を算定する際に、考慮されるべき重要事項である。

土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁹⁾におけるコンクリートの設計疲労強度 f_{d} の算定式(式(1))では、 K 値に湿潤の影響を反映させており、普通コンクリートが継続してあるいはしばしば水で飽和される場合、および軽量骨材コンクリートの場合は $K=10$ 、その他の一般の場合は $K=17$ とすることで安全性を確保している。すなわち、湿潤状態においては K 値を小さくすることで、設計疲労強度 f_{d} を小さく見込んでいく。

$$f_{d} = k_{1f} f_{d} (1 - \sigma_p / f_{d}) \left(1 - \frac{\log N}{K} \right) \quad (1)$$

ここに、 k_{1f} : 圧縮および曲げ圧縮の場合0.85, 引張および曲げ引張の場合1.0

f_{d} : コンクリートの設計強度

σ_p : 永久荷重による応力度

N : 疲労寿命 ($\leq 2 \times 10^6$)

一方、海水中において、RCはりの疲労強度が水中におけるよりもさらに低下する⁷⁾⁸⁾ことが報告されている。これは、塩水中において鉄筋の疲労強度が水中よりもさらに低下する⁹⁾のと同時に、コンクリートの疲労強度も何らかの作用によって水中におけるよりも一層低下するためと推察される。しかしながら、コンクリートの設計疲労強度の算定式(式(1))においては海水など水以外の液体作用の影響について何ら考慮されていない。したがって、絶えず海水と接する海洋コンクリート構造物や凍結防止剤が浸透する床版等の疲労に対する安全性については検討の余地を残しており、各種液体の浸漬によりコンクリートの疲労強度が低下する機構を明らかにする必要がある。

破壊現象は応力の作用によって新しい表面(破断面)を形成する現象であるため、強度が本質的に表面エネルギーの大きさに依存することは疑問の余地がない¹⁰⁾。なお、表面エネルギーとは通常、単位面積の表面のもつ過剰のエネルギーを意味し、構成原子間の結合エネルギーに応じて物質固有の確定値を示すもの¹⁰⁾である。

Benedicks¹¹⁾は、砂糖固結物や石膏などの多孔質固体を各種液体中に浸漬し、液体を十分浸透させた状態でそれらの曲げ強度を測定し、多孔質固体の曲げ強度が浸漬液

体の表面張力とともにほぼ直線的に減少することを示した。同氏は、液体中に浸漬した多孔質固体の破壊現象を取り扱う場合には表面エネルギーを固液界面の界面エネルギーで置き換えるべきであるとし、さらにAntonoffの規則¹²⁾より互いに飽和して接する液体間の界面張力はこれらの液体の表面張力の差に等しいことから、この規則が固液界面にも適用されるものと仮定して、

$$\gamma_{sl} = \gamma_s - \gamma_l \quad (2)$$

ここに、 γ_{sl} ：固体と液体の界面エネルギー

γ_s ：固体の表面エネルギー

γ_l ：液体の表面張力

なる関係式、ならびに強度 σ が界面エネルギーに比例するとの式

$$\sigma \propto \gamma_s - \gamma_l \quad (3)$$

を導き、上記の実験事実を説明している。式(3)はBenedicksの法則といわれるものである。なお、液体の表面エネルギーは通常、表面張力と呼ばれる。

同じく多孔質固体であるセメント硬化体の強度について界面エネルギーの観点から最初に検討がなされたのは堀¹⁰⁾の研究においてである。同氏は、JIS規格に準じて作製したモルタル供試体を約100°Cに加熱してほぼ完全に乾燥した後に、これを各種液体中に長時間（液体が十分浸透するまで）浸漬して曲げ強度試験を行い、浸漬液体の表面張力と曲げ強度との間に負の相関が存在することを示した。関連して、大岸ら¹³⁾は表面張力の異なる各種液体を含浸させたモルタルの力学的性質について検討し、含浸液体の表面張力の減少により界面エネルギーが増加すると圧縮・引張強度および静弾性係数が増大すると述べている。また、著者ら¹⁴⁾はモルタルの内部空隙を満たす浸漬液体の表面張力の大きさを種々に変化させて静的圧縮強度を測定し、浸漬液体の表面張力と静的圧縮強度との間に負の相関が存在することを確認している。

このように、液体浸漬によるセメント硬化体の静的強度（曲げ・引張・圧縮）の低下には、式(2)に示されるような界面エネルギーの低下が大いに関係するであろうことが実験的に明らかとなっている。すなわち、液体浸漬により界面エネルギーが減少し、乾燥時と比較してより少量のエネルギーで微細ひび割れが進展し、結果的に破壊強度が低下する。この意味で界面エネルギーは破壊力学における破壊エネルギーに類似した概念であると考えられる。

荷重の種類が静的であるか動的であるかにかかわらず、コンクリートの破壊は微細ひび割れの発生・伝播の結果として生じる。よって、水中におけるコンクリートの疲労強度の低下には、静的強度の場合と同様に界面エネルギーの低下が関係していることは大いにあり得ることである。この機構によれば、海水中やその他の液体（水以

外）中におけるコンクリートの疲労強度が、水中とは異なる現象を説明できるものと思われる。

このような背景のもと、著者ら¹⁵⁾は、各種液体中におけるコンクリートの圧縮疲労強度について検討し、浸漬液体の表面張力が大きいほど式(1)におけるK値が直線的に減少することを明らかとした。しかしながら、微細ひび割れの進展に関連した供試体の変形特性やエネルギー吸収特性については何ら論じておらず、液体浸漬によるコンクリートの疲労強度の低下機構を解明するにあたっての課題となっていた。

そこで本論文では、既報¹⁵⁾を踏まえ新たに供試体の変形特性とエネルギー吸収特性に関する実験結果を追加し、液体浸漬によりコンクリートの圧縮疲労強度が低下する機構について検討することとした。また、標準圧縮強度（湿潤状態でのコンクリートの静的強度）を基準とした時間耐久線図を提案した。

2. 実験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³、比表面積3260cm²/g）、細骨材には海砂（表乾密度2.59g/cm³、吸水率1.40%）、粗骨材には碎石（最大寸法20mm、表乾密度2.86g/cm³、吸水率1.19%）を使用した。また、化学混和剤としてリグニンスルホン酸系のAE減水剤およびアルキルアリルスルホン酸系の空気連行剤を併用した。コンクリートの配合条件と単位量を表-1に示す。配合は、目標スランプが8cm、目標空気量が4.5%となるよう試験練りを行って決定した。

(2) 供試体

コンクリートの練混ぜには、1軸のパン型ミキサを用いた。粗骨材、セメント、細骨材の順に投入し、30秒間の空練りを行った後、化学混和剤を溶解させた水を投入し、さらに150秒間練り混ぜた。

供試体はφ75×150mmの円柱とし、コンクリートを鋼製型枠に2層に分けて詰め、各層6回ずつ突き棒で突いたのち木槌で軽く叩き、テーブルパイププレートによって振動締固めを施した。供試体は、打設後24時間で脱型し、

表-1 コンクリートの配合条件と単位量

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (g/m ³)	AE剤 (ml/m ³)
		水 W	セメント C	海砂 S	碎石 G		
55	47	165	300	846	1054	938	300

養生室（室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相対湿度95%以上）内にて3カ月以上の湿空養生を施した。

(3) 表面張力の異なる浸漬液体の種類

本実験では、微細ひび割れを形成するための界面エネルギーを変化させることを目的として、異なる表面張力を持つ3種類の液体を供試体中含浸させた。すなわち、界面活性剤希釈溶液（界面活性作用のある空気連行剤を精製水で20倍希釈したもの）、精製水および高濃度塩水（4mol/lのNaCl水溶液）である。表面張力測定装置による表面張力の測定結果は、界面活性剤溶液が63.0dyn/cm、精製水が72.8dyn/cm、高濃度塩水が90.1dyn/cmであった。

(4) 供試体の乾燥方法、ひずみゲージの貼付方法および液体への浸漬方法

供試体は乾燥炉内で一旦絶乾状態とし、その後、各種液体中に浸漬した。急激な温度変化による微細ひび割れの発生を避けるため、養生室から取り出した供試体を恒温恒湿室（温度 20°C ，相対湿度60%）に3日間静置して緩やかに乾燥させたのち、 60°C の乾燥炉で3日間、その後 90°C の乾燥炉で7日間乾燥させた。

乾燥させた供試体をデシケータ内で室温まで冷却し、縦方向に2枚、ひずみゲージ（検長60mm）を貼り付けた。図-1に、ひずみゲージの貼付方法と実際の貼付状況を示す。疲労試験は長期間を要するため、特に今回のように液体中での試験を行う場合には、ひずみゲージの防水が重要となる。そのため、ひずみゲージの貼付に際しては、まず供試体表面をサンドペーパーで研磨し、水中硬化型エポキシ樹脂で土台を作製し、その平滑面に専用接着剤でひずみゲージを貼付し、さらに防水テープで被覆した。

ひずみゲージを貼付した状態で、供試体を各液体中に14日以上、質量変化が収束し十分に液体が浸透したと判断できるまで浸漬させた。なお、強度試験は液体を満たした水槽内に供試体を設置して実施した。

(5) 疲労試験方法

疲労試験は静的容量200kNの電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて実施した。図-2に繰返し応力の概要を示す。載荷波形を正弦波形とし、載荷速度は繰返し回数100回までは1Hz、100~200回の間で2~5Hzに徐々に上げてゆき、200回以上で5Hzとした。繰返しの下限応力比の大きさは、各液体中におけるコンクリートの静的強度に対し10%とした。繰返しの上限応力比の大きさ（表-2）は、浸漬液体の種類によって異なるが、各液体中で測定されたコンクリートの静的強度に対し5%刻みで45~75%の範囲とした。疲労試験中における荷重とひずみの値は、動ひずみ計を用いて測定した。



図-1 ひずみゲージの貼付方法（左）と実際の貼付状況（右）

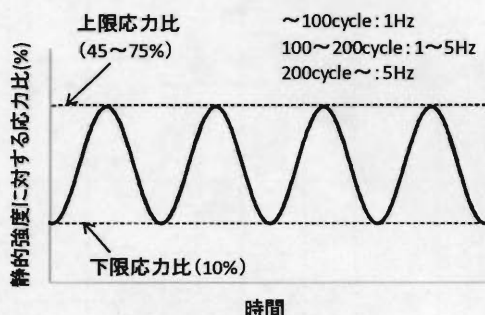


図-2 繰返し応力の概要

表-2 繰返しの上限応力比の大きさ

浸漬液体	表面張力 (dyn/cm)	各液体中での静的強度に対する繰返しの上限応力比(%)
界面活性剤希釈溶液	63.0	55, 60, 65, 70, 75
精製水	72.8	50, 55, 60, 65
高濃度塩水	90.1	45, 50, 55, 60, 65

3. 浸漬液体の表面張力の大きさがコンクリートの圧縮疲労強度に及ぼす影響

(1) 各液体中での静的圧縮強度の測定結果

表-3に、静的圧縮強度の測定結果を示す。界面活性剤希釈溶液中と高濃度塩水中における試験では、疲労試験の前後で静的圧縮強度の測定を行った。その結果、材齢の増加にともなう静的圧縮強度の増進はほとんど認められなかった。そのため、疲労試験前に測定された静的圧縮強度を繰返し応力比の基準値とした。

図-3に、浸漬液体の表面張力と液体中におけるコンクリートの静的圧縮強度との関係を示す。界面活性剤希釈溶液中および高濃度塩水中については疲労試験の前後で測定された静的圧縮強度（データ数：10）の平均値を、精製水については疲労試験前に測定された静的圧縮強度（データ数：5）の平均値をプロットしている。そのため、精製水中のデータについては95%信頼限界が他のものよりも大きくなっているが、浸漬液体の表面張力 γ_l

とコンクリートの静的圧縮強度 f'_{c-l} との間には既往の知見と同様に負の一次関係が存在することが再確認される。なお、本実験条件の範囲で下記の実験式が得られた。

$$f'_{c-l} = -0.111\gamma_l + 39.4 \quad (4)$$

表-3 静的圧縮強度の測定結果

浸漬液体	表面張力 (dyn/cm)	試験時期	供試体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	平均 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)
界面活性剤希釈溶液	63.0	疲労試験前	No.1	31.7	32.3	1.6	4.9
			No.2	31.4			
			No.3	30.6			
			No.4	34.7			
			No.5	32.8			
		疲労試験後	No.6	31.2	32.0	1.0	3.1
			No.7	33.4			
			No.8	32.7			
			No.9	31.2			
			No.10	31.6			
高濃度塩水	90.1	疲労試験前	No.1	28.4	28.8	1.0	3.6
			No.2	28.9			
			No.3	29.7			
			No.4	27.3			
			No.5	29.8			
		疲労試験後	No.6	30.1	29.6	1.0	3.3
			No.7	29.6			
			No.8	28.3			
			No.9	30.9			
			No.10	29.2			
精製水	72.8	疲労試験前	No.1	31.8	31.7	1.5	4.6
			No.2	29.4			
			No.3	32.5			
			No.4	31.6			
			No.5	33.4			

(2) 疲労試験結果

a) 疲労寿命の対数正規分布へのあてはめ

表-4 に、疲労試験結果を示す。コンクリートの疲労寿命のばらつきは大きく、疲労試験結果を整理するうえで統計的手法を用いることが必要である。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¹⁶⁾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(5)で与えられる。

$$P(N_r) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (5)$$

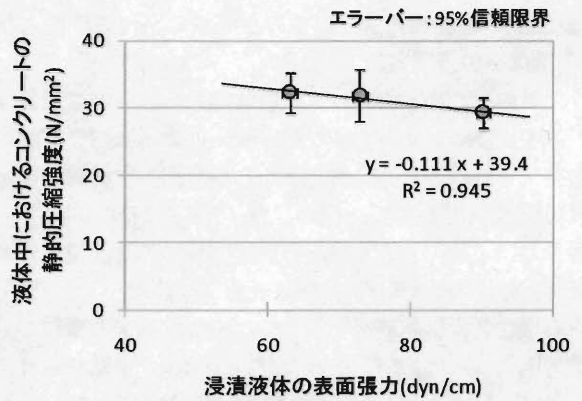


図-3 浸漬液体の表面張力と液体中におけるコンクリートの静的圧縮強度との関係

表-4 疲労試験結果

界面活性剤希釈溶液中					高濃度塩水中					精製水中				
σ'_{max}/f'_{c-l} (%)	r	N_r	$\log N_r$	$P(N_r)$	σ'_{max}/f'_{c-l} (%)	r	N_r	$\log N_r$	$P(N_r)$	σ'_{max}/f'_{c-l} (%)	r	N_r	$\log N_r$	$P(N_r)$
75	1	2422	3.38	0.83	65	1	9801	3.99	0.83	65	1	45163	4.65	0.83
	2	3796	3.58	0.67		2	21964	4.34	0.67		2	65722	4.82	0.67
	3	5550	3.74	0.50		3	24674	4.39	0.50		3	82269	4.92	0.50
	4	7813	3.89	0.33		4	32624	4.51	0.33		4	84552	4.93	0.33
	5	9110	3.96	0.17		5	33218	4.52	0.17		5	96125	4.98	0.17
70	1	20041	4.30	0.83	60	1	29950	4.48	0.83	60	1	182778	5.26	0.67
	2	22545	4.35	0.67		2	57556	4.76	0.67		2	424379	5.63	0.50
	3	30593	4.49	0.50		3	69485	4.84	0.50		3	338493	5.53	0.83
	4	35402	4.55	0.33		4	97296	4.99	0.33		4	440154	5.64	0.67
	5	44442	4.65	0.17		5	110731	5.04	0.17		5	472617	5.67	0.50
65	1	41083	4.61	0.83	55	1	133938	5.13	0.83	55	1	660948	5.82	0.33
	2	52679	4.72	0.67		2	163529	5.21	0.67		2	677607	5.83	0.17
	3	82196	4.91	0.50		3	224669	5.35	0.50		3	1554634	6.19	0.86
	4	172214	5.24	0.33		4	248553	5.40	0.33		4	1577005	6.20	0.71
	5	318536	5.50	0.17		5	291952	5.47	0.17		5	1921505	6.28	0.57
60	1	61917	4.79	0.83	50	1	374388	5.57	0.83	50	1	1968828	6.29	0.43
	2	201213	5.30	0.67		2	400611	5.60	0.67		2	>2000000	-	-
	3	525042	5.72	0.50		3	518903	5.72	0.50					
	4	627433	5.80	0.33		4	661840	5.82	0.33					
	5	835498	5.92	0.17		5	817267	5.91	0.17					
55	1	393204	5.59	0.86	45	1	>2000000	-	-					
	2	653554	5.82	0.71		2	>2000000	-	-					
	3	1232407	6.09	0.57		3	>2000000	-	-					
	4	1834670	6.26	0.43										
	5	>2000000												

σ'_{max}/f'_{c-l} : 各液体中にて測定された静的強度に対する繰返しの上限度力比
 r : 疲労寿命の小さい方からの順番
 N_r : 疲労寿命
 $P(N_r)$: 生存確率の期待値
 ※下限応力比は全て10%

もし、 m 本の供試体が規定回数 N_X 回（コンクリート分野では通常、 $N_X=2 \times 10^6$ ）までに破壊しなかった場合には、 $n+1$ 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(6)で与えられる¹⁷⁾。

$$P(N_r) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (6)$$

このとき、規定回数の N_X 回で $(n-m+1)$ 番目の供試体がちょうど破壊したとして、規定回数における生存確率の期待値 $P(N_X)$ は式(7)で与えられる。

$$P(N_r) = 1 - \frac{n-m+1}{n+2} \quad (7)$$

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¹⁸⁾。本実験結果のうち、界面活性剤希釈溶液中で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-4 のようになり、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。これは、他の 2 つの実験条件（高濃度塩水中、精製水中）についても同様であった。

b) 繰返しの上限応力比と平均疲労寿命の関係

各上限応力比における疲労寿命の代表値に $P(N)=50\%$ となるときの $\log N$ をとり、平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ とする。この $\overline{\log N}$ と上限応力比 σ'_{\max}/f'_{c-l} （各液体中で測定された静的強度 f'_{c-l} に対する上限応力 σ'_{\max} の比）との関係は、 $S-N$ 線図と呼ばれ、本実験データをプロットすることにより図-5 に示す $S-N$ 線図が得られた。同図中には、既往の研究における気中データ¹⁸⁾（下限応力比 = 8%）および水中データ¹⁾（下限応力比 = 10%）の回帰直線をあわせて示している。いずれの試験環境においても、繰返しの上限応力比 σ'_{\max}/f'_{c-l} と平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ との間には直線関係が認められる。このときの線形回帰式と繰返し回数 $N=200$ 万回の際の時間疲労強度を表-5 に示す。同表より、コンクリートの 200 万回疲労強度は、浸漬液体の種類によって大きく異なり、既往の研究¹⁸⁾において気中の表面張力を 0 dyn/cm と仮定した場合、浸漬液体の表面張力が大きくなるに従って 200 万回疲労強度は低下することが分かる。また、本実験における精製水

中と既往の研究¹⁾における水中のデータとを比較すると、 $S-N$ 線図の傾きは多少異なるものの、200 万回疲労強度はほぼ一致している。

c) 下限応力比を考慮した疲労寿命の算定式

繰返しの上限応力比と平均疲労寿命との関係を表す $S-N$ 線図は、繰返しの下限応力比によっても異なり、上限応力比が一定であれば下限応力比が大きいほど、すなわち応力振幅が小さいほど疲労寿命は大きくなる。既往の研究¹⁸⁾により、繰返し回数 N 回までに疲労破壊し

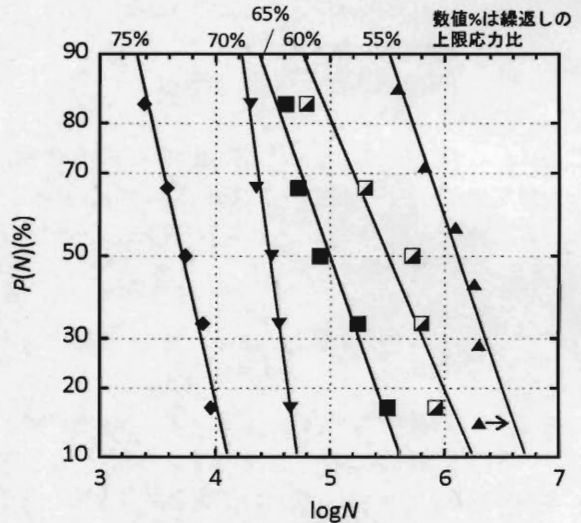


図-4 疲労寿命の対数正規分布へのあてはめ (界面活性剤希釈溶液中での試験結果)

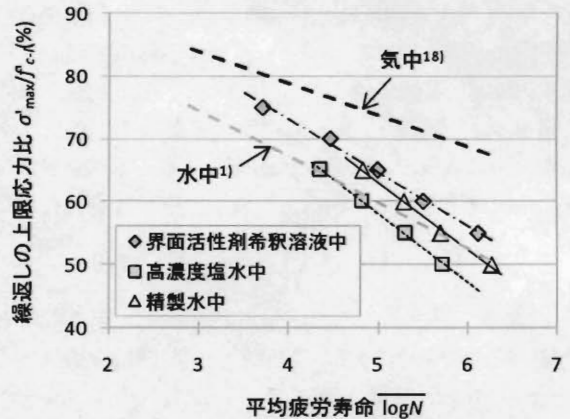


図-5 繰返しの上限応力比と平均疲労寿命の関係 (S-N 線図)

表-5 S-N線図の線形回帰式と200万回疲労強度

浸漬液体	表面張力 (dyn/cm)	繰返しの下限応力比 σ'_{\min}/f'_{c-l} (%)	S-N線図の線形回帰式	重相関係数 R^2	200万回疲労強度 (%)
なし(気中) ¹⁸⁾	0	8	$\sigma'_{\max}/f'_{c-l} = -5.07 \log N + 99.1$	0.96	67.2
界面活性剤希釈溶液	63.0	10	$\sigma'_{\max}/f'_{c-l} = -8.52 \log N + 107.2$	0.99	53.5
精製水	72.8	10	$\sigma'_{\max}/f'_{c-l} = -10.5 \log N + 115.7$	0.99	49.5
水中 ¹⁾	72.8	10	$\sigma'_{\max}/f'_{c-l} = -7.25 \log N + 96.2$	0.99	50.5
高濃度塩水	90.1	10	$\sigma'_{\max}/f'_{c-l} = -10.8 \log N + 112.3$	0.99	44.2

ない上限応力比の限界値と下限応力比の関係を表す耐久線図(図-6)は、下限応力比が60%以下の実用範囲内においては、 $(S_{min}, S_{max})=(100, 100)$ を通る直線で近似でき、修正 Goodman の関係が成立することが明らかとされている。このような場合、 $S-N$ 線図において下限応力比一定のもとで上限応力比と平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ が直線関係にあり、さらに耐久線図で $\overline{\log N}$ 一定のもとで上限応力比と下限応力比が直線関係にあることより、繰返しの上限応力比 σ'_{max}/f'_{c-l} 、下限応力比 σ'_{min}/f'_{c-l} および平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ の関係は式(8)で表わされる。

$$\overline{\log N} = K_1 \frac{1 - \sigma'_{max}/f'_{c-l}}{1 - \sigma'_{min}/f'_{c-l}} + K_2 \quad (8)$$

ここに、 K_1 および K_2 は繰返し応力比や疲労寿命に独立な実験定数である。一般に、定数項 K_2 は0に近い値となることから $K_2=0$ とおき、さらに右辺第一項の分子に f'_{c-l} を乗じて整理すると、

$$\overline{\log N} = K \frac{f'_{c-l} - \sigma'_{max}}{f'_{c-l} - \sigma'_{min}} \quad (9)$$

ここに、 K は実験定数であり、供試体の乾湿状態やコンクリートの種類などにより異なる値をとる。

本実験結果について、式(9)の関係をプロットしたものを図-7に示す。実験結果は原点を通る直線で近似でき、回帰直線の傾きは式(9)における K 値を表すが、気中¹⁹⁾で最も大きく、界面活性剤希釈溶液中、精製水中(水中¹⁾)、高濃度塩水中の順に次第に小さくなっていく傾向が読み取れる。つまり、浸漬液体の表面張力が大きいほど、 K 値が減少する傾向にあるといえる。

図-8に、浸漬液体の表面張力と K 値との関係を示す。両者の間には負の一次関係が認められる。本実験および既往の研究¹⁹⁾の結果を包括し、以下の実験式が得られた。

$$K = -0.077\gamma_l + 17.5 \quad (10)$$

式(10)より、浸漬液体の表面張力が1dyn/cm高くなると、 K 値は約0.077減少する。同式の適用範囲は浸漬液体の表面張力が0~90.1dyn/cmの場合に限られるが、実用的にはコンクリートの置かれる液体環境の大部分をカバーできるものと考えられる。

以上より、コンクリートの圧縮疲労強度は、浸漬液体の表面張力と負の相関関係にあることが示された。

(3) 標準圧縮強度を基準とした時間耐久線図

下限応力比を考慮した疲労寿命の算定式(式(9))は、気中疲労強度は気中での静的強度を基準とし、水中疲労強度は水中での静的強度を基準として導かれたものである。しかしながら、土木学会コンクリート標準示方書

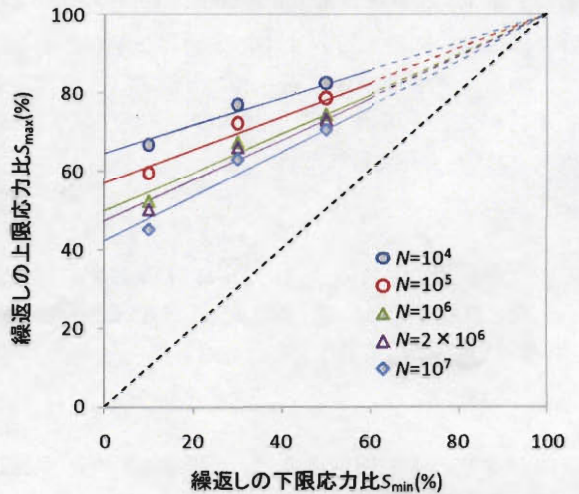


図-6 任意繰返し回数に対する時間耐久線図¹⁹⁾

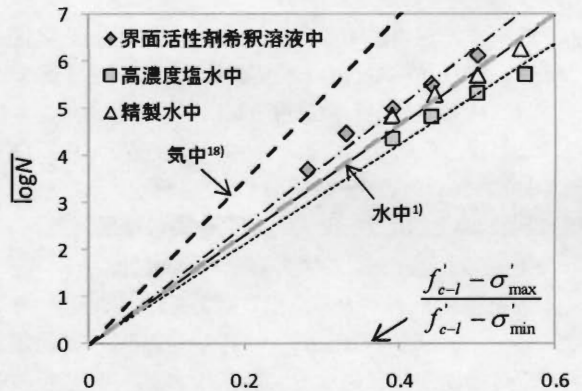


図-7 下限応力比を考慮した $S-N$ 線図

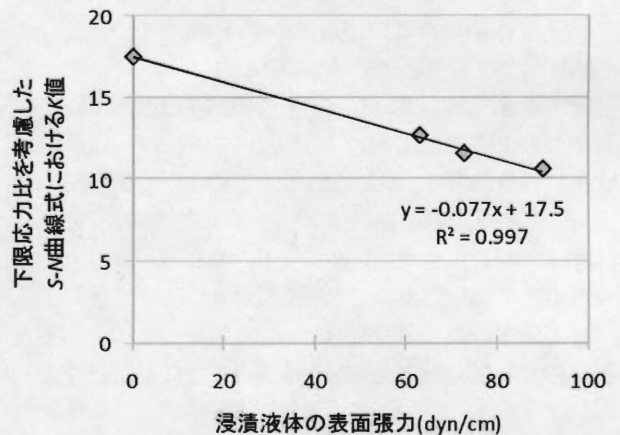


図-8 下限応力比を考慮した $S-N$ 曲線式における K 値と浸漬液体の表面張力との関係

[設計編]¹⁹⁾では、コンクリートの静的強度の特性値は、あくまで湿潤状態での試験結果に基づいて定めることを原則としている。そこで、湿潤状態でのコンクリートの静的強度、すなわち標準圧縮強度を基準とした疲労強度の大きさについて検討した。

既往の研究¹⁾において、W/C=63%のコンクリートを用い、材齢 100 日まで 20°C、95%RHにて湿空養生し、さらに 2 週間水中浸漬したのち気中に取り出して、および水中に浸けた状態で静的強度を測定した結果、両者に有意な差は認められないと報告されている。気中に取り出して試験を行った場合、供試体は湿潤状態にあることから、湿潤状態におけるコンクリートの静的強度は、水中での静的強度と大差ないといえる。そのため、以下、湿潤状態でのコンクリートの静的強度には水中での静的強度を用いることとする。

式(9)を変形すると、

$$\frac{\sigma'_{\max}}{f'_{c-l}} = 1 - \frac{\log N}{K} \left(1 - \frac{\sigma'_{\min}}{f'_{c-l}} \right) \quad (11)$$

ここで、湿潤状態における静的強度を f'_{c-w} とし、式(11)の両辺に f'_{c-l}/f'_{c-w} を乗じると、

$$\frac{\sigma'_{\max}}{f'_{c-w}} = \frac{f'_{c-l}}{f'_{c-w}} \left\{ 1 - \frac{\log N}{K} \left(1 - \frac{\sigma'_{\min}}{f'_{c-l}} \right) \right\} \quad (12)$$

式(12)は、標準圧縮強度を基準とした疲労強度の算定式である。

いま、表面張力の異なる液体として、表-6 に示すような 4 種類を考える。ケース(A)は浸漬液体がない場合

で、気中試験を想定している。ケース(C)は水中（このとき $f'_{c-l} = f'_{c-w}$ ）を、ケース(D)は高濃度塩水中を想定している。なお同表中、静的強度 f'_{c-l} は式(4)より、 K 値は式(10)より求めた。

表-6 の数値を式(12)に代入し、さらに疲労寿命 $N=2 \times 10^6$ として、下限応力比が 60%までの実用範囲内で時間耐久線図を描くと、図-9 のようである。この時間耐久線図は、任意の疲労寿命 N と下限応力比 σ'_{\min}/f'_{c-w} に対しコンクリートが破壊しない上限応力比 σ'_{\max}/f'_{c-w} の限界値すなわち疲労強度を与えるもので、原点を通り 1:1 を表す線と時間耐久線との縦方向の距離が応力振幅を表す。

標準圧縮強度 f'_{c-w} を疲労強度の基準値にとることにより、時間耐久線図は $(\sigma'_{\min}/f'_{c-w}, \sigma'_{\max}/f'_{c-w}) = (f'_{c-l}/f'_{c-w}, f'_{c-l}/f'_{c-w})$ を通る直線で表わされ、浸漬液体の表面張力の大きさに応じて枠の大きさが変化することが分かる。

表-6 浸漬液体の表面張力、静的強度 f'_{c-l} および K 値

ケース	浸漬液体の表面張力 (dyn/cm)	f'_{c-l} (N/mm ²)	K 値
(A)	0	39.4	17.5
(B)	40	35.0	14.4
(C)	72.8	31.3 (= f'_{c-w})	11.9
(D)	90	29.4	10.6

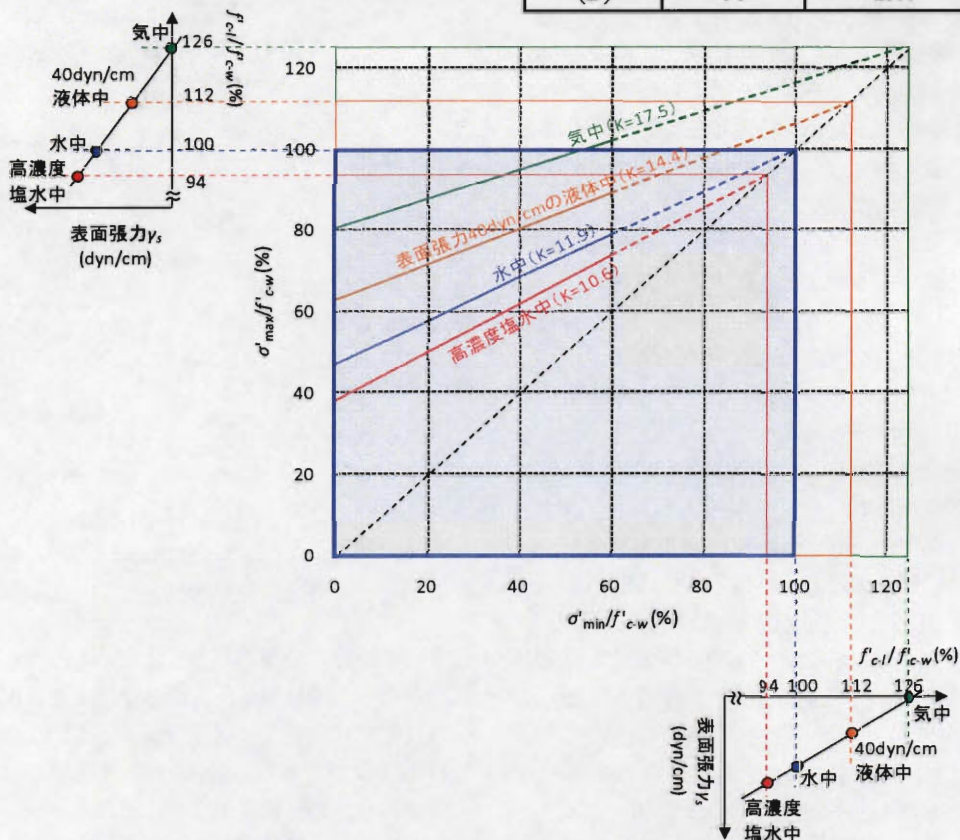


図-9 標準圧縮強度を基準とした時間耐久線図 ($N=2 \times 10^6$)

完全片振り（下限応力比 $\sigma'_{min}/f'_{c-w}=0\%$ ）の場合、各ケースにおける時間疲労強度は、それぞれ(A)80.6%、(B)62.9%、(C)47.1%、(D)38.1%となる。また、死荷重を考慮して下限応力比 $\sigma'_{min}/f'_{c-w}=20\%$ とした場合、各ケースにおける時間疲労強度は、それぞれ(A)87.8%、(B)71.6%、(C)57.6%、(D)50.0%となる。

標準圧縮強度を基準とした時間耐久線図より、浸漬液体の表面張力の大きさによってコンクリートの時間疲労強度は大幅に異なることが示唆される。特に、高濃度塩水中などのように浸漬液体の表面張力が水よりも大きい場合には、疲労強度が大きく低下するため、常時海水と接する海洋コンクリート構造物などについては、一般的な環境に置かれる構造物と比較して、疲労破壊に対する安全性に関しより一層慎重な検討が必要と考えられる。

4. 浸漬液体の表面張力の大きさがコンクリートの疲労破壊過程に及ぼす影響

コンクリートの圧縮疲労強度に及ぼす浸漬液体の表面張力の影響は大きく、下限応力比を考慮した $S-N$ 曲線式 (式(9)) における K 値は、浸漬液体の表面張力の増大とともに直線的に減少することが明らかとなった。これは、浸漬液体の表面張力の増大ともなって界面エネルギーが減少し、繰返し応力比が同等であっても微細ひび割れがより一層進展し易くなり、結果的に疲労寿命が低下することを示唆しているものと考えられる。このことをより詳細に把握するため、繰返し圧縮応力を受けるコンクリートの変形特性（ひずみ特性）およびエネルギー吸収特性について考察した。

なお、本論文において「ひずみ」とは、載荷軸方向ひずみ、すなわち縦ひずみのことを指す。

(1) 繰返し回数にもなう応力-ひずみ曲線の変化

繰返し圧縮応力を受けるコンクリートの載荷過程（下限応力から上限応力に至る過程）における応力-ひずみ曲線は、当初上に凸であるが、次第に直線形となり、さらに繰返し回数を重ねることで下に凸な形状に変遷していくことが、Van Ornum²⁰⁾によって最初に指摘され、その後、数多くの研究者によって確かめられている。図-10に、本実験で得られた繰返し回数にもなう応力-ひずみ曲線の変化の一例を示すが、他の実験ケースも含めて上述の一般的傾向と同様であることが確認された。

(2) 定常領域におけるひずみ速度と疲労寿命の関係

一般に、繰返し回数と上限応力時のひずみの関係を表す曲線（回数-ひずみ曲線）は、図-11に示されるよう

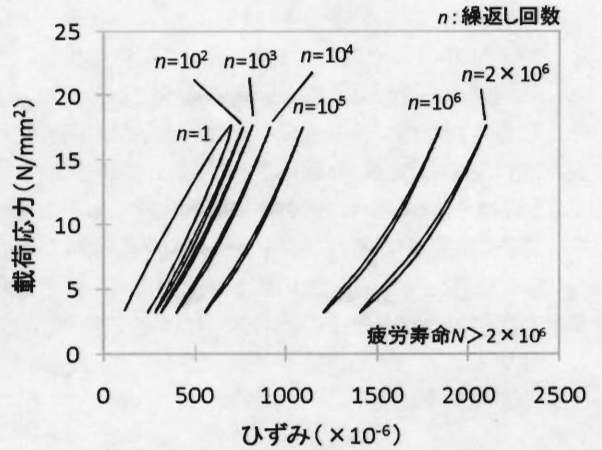


図-10 繰返し回数にもなう応力-ひずみ曲線の変化 (界面活性剤希釈溶液中、応力比 10~55%)

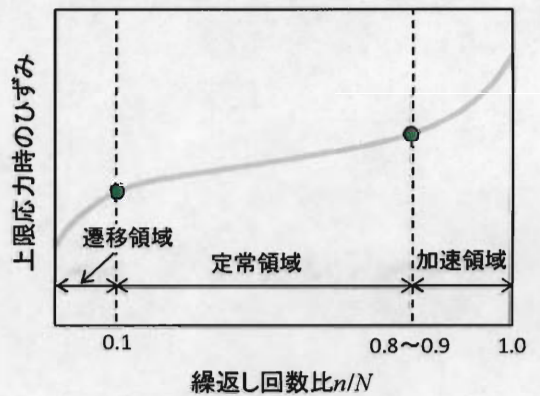


図-11 疲労破壊の3つの段階

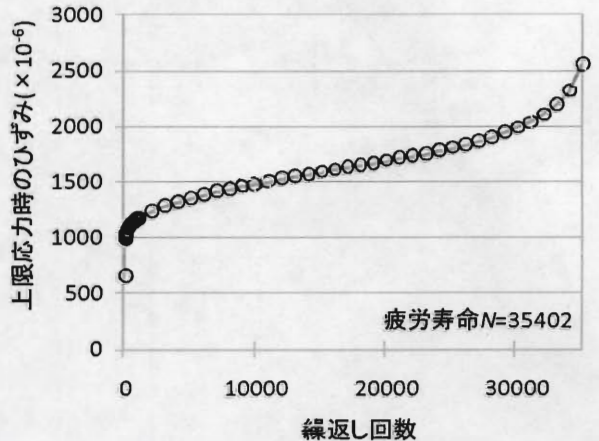


図-12 繰返し回数と上限応力時のひずみの関係 (界面活性剤希釈溶液中、応力比 10~70%)

な3つの段階に分類される。すなわち、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段階である。図-12に、本実験で得られた回数-ひずみ曲線の一例を示すが、他の実験ケースも含めて上述のような一般的傾向とほぼ一致した。

このように、繰返し圧縮応力下におけるコンクリートの回数-ひずみ曲線は3つの段階に分類されるが、このことは「ひずみ速度」を求めることでより明確となる。ひずみ速度とは一般にひずみの時間的変化を意味し、その単位は (s⁻¹) で表わされる。コンクリートの疲労においては、サイクル毎のひずみ増加量をしばしばひずみ速度と呼ぶため、本論文でもこの表記に従う。

図-13に、繰返し回数にともなうひずみ速度 de/dn の変化の一例を示す。なお、横軸には繰返し回数 n を疲労寿命 N で正規化した繰返し回数比 n/N をとっている。ひずみ速度は、遷移領域においては繰返し回数とともに減少し、定常領域で一定値をとり、加速領域で再び増加する。また、繰返しの上限応力比が大きく疲労寿命が小さいほどひずみ速度は大きくなる。この傾向は他の実験ケースについても同様であった。

定常領域におけるひずみ速度と疲労寿命との間には、強い負の相関がある^{21), 22)}ことが報告されている。そこで本実験の結果について、繰返し回数比が約0.1~0.8の範囲を定常領域とし、定常領域におけるひずみ速度の平均値を求め、疲労寿命との関係をプロットしたものを図-14に示す。既往の研究と同様に、定常領域におけるひずみ速度と疲労寿命との間には両対数グラフ上で負の一次関係が成立することが確認できる。また、両者の関係は、浸漬液体の種類によらず一本の回帰直線で近似可能であることが、本実験によりはじめて明らかとなった。この事実は、コンクリートの疲労寿命にとって定常領域におけるひずみ速度が支配的であり、これをモニタリングすることによって、浸漬液体の種類によらず、コンクリートの疲労寿命をある程度予測できることを示している。

(3) 疲労過程における供試体のエネルギー吸収特性

コンクリート内部に発生する微細ひび割れの進展過程は、外部より与えられるひずみエネルギーの変換過程としてとらえることができる。

図-15に、繰返し応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線とエネルギーとの関係を示す。ある1サイクルCaDbCに着目したとき、面積ECaDFEは外部より与えられる全ひずみエネルギー E_i である。全ひずみエネルギー E_i のうち、ヒステリシスで囲まれる面積CaDbCは供試体内部で消費される損失エネルギー E_l であり、残りの面積ECbDFEは変形の回復に使われる弾性ひずみエネルギー E_r である。

岡田ら²³⁾によれば、損失エネルギー E_l には、微細ひび割れの進展として消費されるひび割れ進展エネルギー E_{crac} と、微細ひび割れの開閉の際の摩擦熱として消費される摩擦損失エネルギー E_{fric} が含まれる。すなわち、

$$E_l = E_{crac} + E_{fric} \quad (13)$$

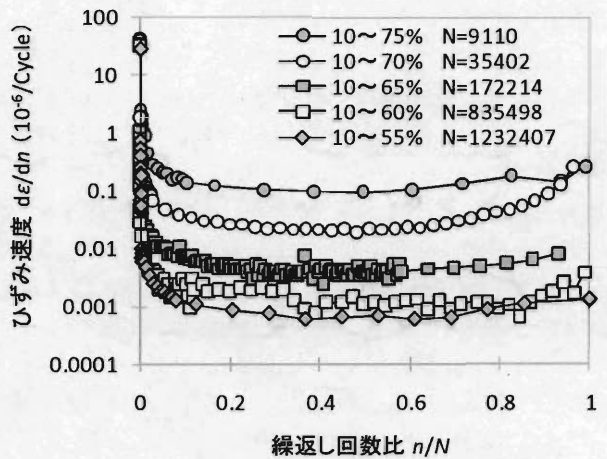


図-13 繰返し回数にともなうひずみ速度の変化 (界面活性剤希釈溶液中)

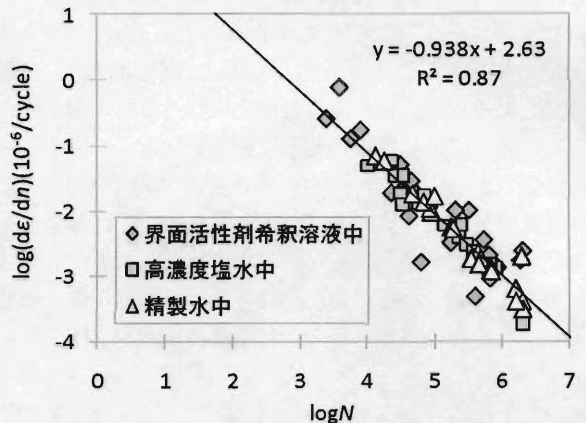


図-14 定常領域におけるひずみ速度と疲労寿命との関係

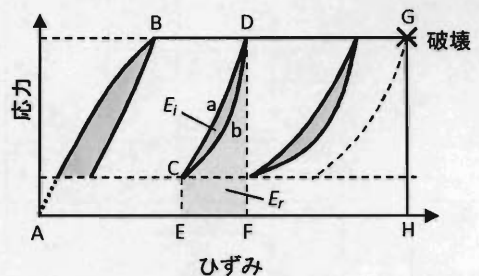


図-15 繰返し応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線とエネルギーとの関係

定常領域において、ひび割れ進展にともなう塑性変形により、点Cは1サイクルの繰返し後に若干右側に移動するが、その移動量は一般のごく僅かである。これは、定常領域においては、損失エネルギーのうち大部分が摩擦損失エネルギー E_{fric} に変換されることを示している。

図-16に、繰返し回数 n にともなう損失エネルギーの変化の一例を示す。損失エネルギーは初回繰返し時に最も大きく、10サイクル以降はほぼ一定値をとり、破壊近傍で再び増加する。また、上限応力比が大きく疲労寿命が

短いほど、損失エネルギーは大きい。これらの傾向は、他の実験ケースについても同様であった。

初回繰返し時の損失エネルギー E_{i1} 、定常領域において一定値となる損失エネルギーの平均値 E_{ic} 、および疲労寿命 N をまとめて表-7に示す。なお、図-16に示すように損失エネルギー E_i は $\log n$ の値が増えるごとに算定しており、 E_i がほぼ一定値となる範囲 ($\log n = 1$ を起点とし、 E_i が上昇する直前まで) の E_i の平均値を E_{ic} として求めた。繰返し回数上限応力比と浸漬液体の種類が同じであっても、供試体間で E_{i1} および E_{ic} にはばらつきが存在する。静的強度の基準値 f'_{c-1} として各グループより抽出した5本の供試体における静的強度の平均値をとっているものの、個々の供試体の静的強度には材料特性としてのばらつきが存在するため、実際の応力比は表中の値とは異なることが原因の一つとして挙げられる。

コンクリートの疲労破壊過程が微細ひび割れの発生・伝播過程であること、また、 E_{i1} および E_{ic} は微細ひび割れ量のある程度反映した値と考えられることから、それらのエネルギー値が疲労寿命に影響を及ぼしていることも予想される。そこで、疲労寿命と E_{i1} および E_{ic} との関係をプロットして図-17と図-18に示す。いずれの場合も、エネルギー値が増大すると疲労寿命は概ね低下する傾向にあることが分かる。また、同等となるエネルギー値に対し、疲労寿命は小さい方から高濃度塩水中、精製水中、

界面活性剤希釈溶液中の順となっており、浸漬液体の表面張力が大きいほど疲労寿命が低下する傾向にある。

コンクリートの疲労破壊過程において、その大部分を占める定常領域での微細ひび割れの進展状況が疲労寿命に強く影響する。このことは、微細ひび割れの進展状況を表す指標の一つとしてひずみ速度があり、図-14に示されるようにひずみ速度と疲労寿命との間には負の相関関係が存在することから明らかである。一方、微細ひび割れの進展状況を表す別の指標として、前述のひび割れ進展エネルギー E_{crac} が挙げられる。次元を考慮して、

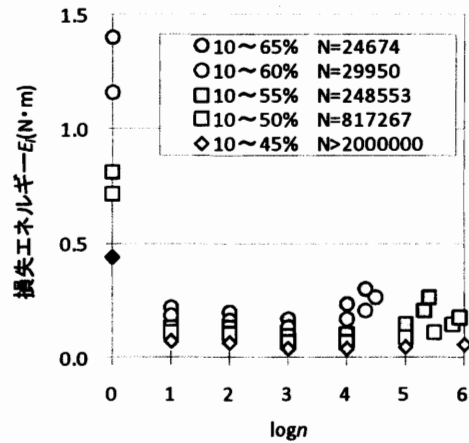


図-16 繰返し回数にともなう損失エネルギーの変化例 (高濃度塩水中)

表-7 初回繰返し時および定常領域における損失エネルギーと疲労寿命の一覧

界面活性剤希釈溶液中					高濃度塩水中					精製水中				
σ'_{max}/f'_{c-1} (%)	E_{i1}	E_{ic}	N	$\log N$	σ'_{max}/f'_{c-1} (%)	E_{i1}	E_{ic}	N	$\log N$	σ'_{max}/f'_{c-1} (%)	E_{i1}	E_{ic}	N	$\log N$
	(N·m)					(N·m)					(N·m)			
75	3.35	0.42	2422	3.38	65	1.59	0.24	9801	3.99	65	1.65	0.24	45163	4.65
	3.98	0.45	3796	3.58		1.75	0.25	21964	4.34		1.79	0.27	65722	4.82
	4.40	0.48	5550	3.74		1.42	0.23	24674	4.39		1.51	0.23	82269	4.92
	3.67	0.44	7813	3.89		1.68	0.20	32624	4.51		1.70	0.26	84552	4.93
	3.32	0.43	9110	3.96		1.54	0.24	33218	4.52		1.37	0.20	96125	4.98
70	2.53	0.32	20041	4.30	60	1.15	0.18	29950	4.48	60	1.29	0.18	182778	5.26
	2.14	0.29	22545	4.35		0.53	0.18	57556	4.76		1.08	0.13	424379	5.63
	2.12	0.31	35402	4.55		1.14	0.20	69485	4.84		0.85	0.14	338493	5.53
65	1.77	0.25	41083	4.61	55	1.27	0.14	133938	5.13	55	0.61	0.12	440154	5.64
	1.57	0.24	52679	4.72		0.83	0.14	224669	5.35		0.83	0.13	472617	5.67
	1.38	0.22	82196	4.91		0.80	0.14	248553	5.40		0.70	0.13	660948	5.82
	1.53	0.21	172214	5.24		1.13	0.14	291952	5.47		0.81	0.10	677607	5.83
	1.20	0.21	318536	5.50		0.39	0.12	374388	5.57		0.92	0.11	1554634	6.19
60	1.40	0.20	61917	4.79	50	0.73	0.10	518903	5.72	50	0.60	0.10	1577005	6.20
	1.66	0.17	201213	5.30		0.73	0.10	661840	5.82		0.62	0.10	1921505	6.28
	1.15	0.19	525042	5.72		0.72	0.11	817267	5.91		0.68	0.12	1968828	6.29
	1.21	0.18	627433	5.80	45	0.44	0.07	>2000000	-		0.67	0.11	>2000000	-
	0.99	0.17	835498	5.92		0.36	0.07	>2000000	-					
55	1.08	0.15	393204	5.59										
	0.86	0.13	653554	5.82										
	0.84	0.14	1232407	6.09										
	0.89	0.13	1834670	6.26										
	1.03	0.16	>2000000	-										

σ'_{max}/f'_{c-1} : 各液体中にて測定された静的強度に対する繰返しの上限応力比
 E_{i1} : 初回繰返し時の損失エネルギー
 E_{ic} : 定常領域において一定値となる損失エネルギー
 N : 疲労寿命
 ※下限応力比は全て10%

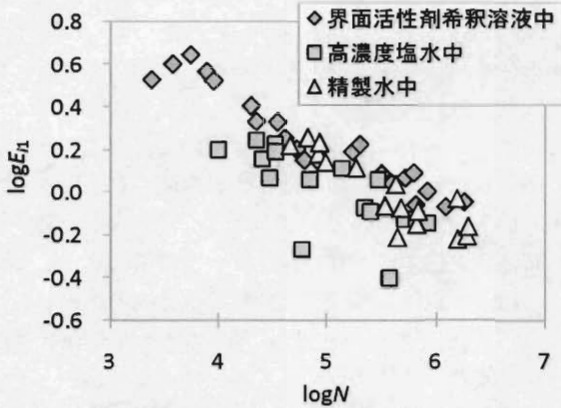


図-17 初回繰返し時の損失エネルギーと疲労寿命との関係

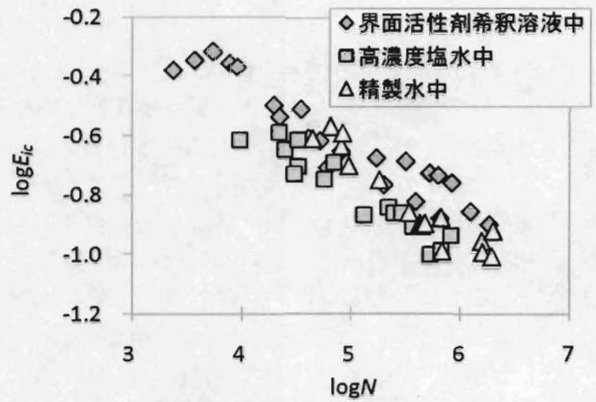


図-18 定常領域における損失エネルギーと疲労寿命との関係



図-19 繰返し载荷による損失エネルギーの変化

ひび割れ進展エネルギー E_{crac} (単位: $N \cdot m$) は、微細ひび割れの進展に必要な表面エネルギー E_c (単位: Nm) と微細ひび割れの進展量 A_c (単位: m^2) の積であると考えられる²⁰⁾。すなわち、

$$E_{crac} = E_c \times A_c \quad (14)$$

ここに、 E_c は固液界面エネルギー γ_{sl} と同義である。よって、式(14)において $E_c = \gamma_{sl}$ とし、さらに式(2)を代入すると、

$$E_{crac} = (\gamma_s - \gamma_l) \cdot A_c \quad (15)$$

既往の研究²⁴⁾で、静的漸増载荷過程におけるひび割れ進展エネルギー E_{crac} の変化を調べることを目的に上限応力一定のもとで10サイクルの繰返し载荷を行い、図-19に示されるような損失エネルギーの変化において一定となった損失エネルギーを摩擦損失エネルギー E_{fric} 、初回損失エネルギー E_{i1} から E_{fric} を差し引いたものをひび割れ進展エネルギー E_{crac} として定量化した。損失エネルギーが一定となった領域においても荷重を除去した際の残留ひずみは微増していたため、 E_{fric} の一部には E_{crac} が含まれていたと考えられるが、その大きさは初回繰返し時の E_{crac} の大きさに対して無視できるほど小さいと判断し、考慮していなかった。しかしながら、疲労破壊過程は微細ひび割れが徐々に蓄積する過程であり、定常領域において一定となる損失エネルギー E_{ic} に含まれると考えられる E_{crac} の大きさを考慮する必要がある。このことを図-20に模式的に示す。

現段階では、定常領域における E_{crac} を定量化できな

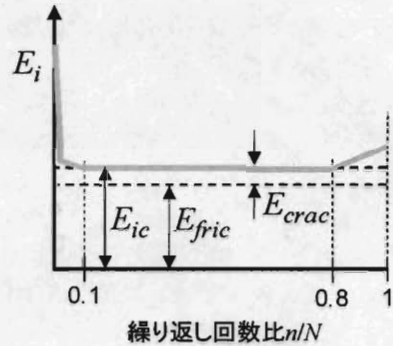


図-20 定常領域における各種損失エネルギー

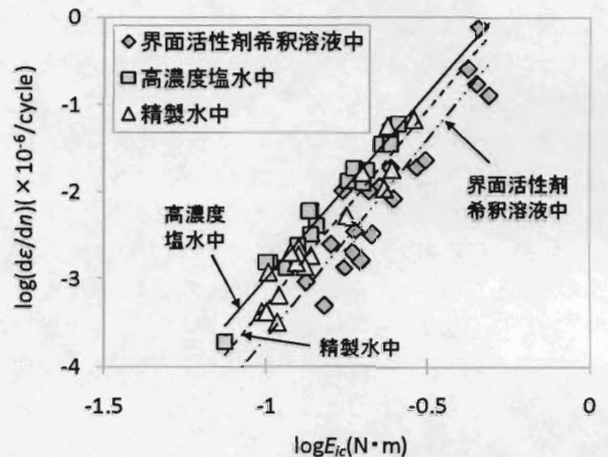


図-21 定常領域における損失エネルギーとひずみ速度との関係

い。そこで、 E_{crac} の代替として E_{ic} をとり、 E_{ic} と定常領域におけるひずみ速度 $d\epsilon/dn$ との関係プロットして図-21に示す。定常領域におけるひずみ速度は、損失エネルギー E_{ic} とともに増大するが、両者の関係は浸漬液体の種類によって異なることが分かる。同等となる E_{ic} に対し、ひずみ速度は大きい方から高濃度塩水中、精製水中、界面活性剤希釈溶液中の順となっており、これは浸漬液体の表面張力の大きさの順と一致している。

ひずみ速度は、微細ひび割れの進展量 A_c と相関があると予想される。そこで、式(15)を変形して、

$$A_c = \frac{E_{crac}}{\gamma_s - \gamma_l} \quad (16)$$

式(16)をもとに、図-21に示されるように定常領域において同等の E_{ic} に対するひずみ速度が浸漬液体の表面張力の大きさに応じて増大した理由について考える。同式において、 γ_s はコンクリートの表面エネルギーであるため、ある一定の値をとる。よって、 A_c は E_{crac} と γ_l の大きさによって様々に変化すると考えられるが、 γ_l は液体の表面張力であるので大小関係は既に明らかである。そのため、 E_{crac} の大きさをどのようにとらえるかが問題となる。

まず、浸漬液体の表面張力の大きさにかかわらず、 E_{crac} の大きさが同等であると仮定した場合（仮定1）、式(16)より浸漬液体の表面張力 γ_l が大きくなるにしたがって微細ひび割れの進展量 A_c は増大し、結果的にひずみ速度が増大すると説明される。

次に、浸漬液体の表面張力の大きさによって E_{crac} の大きさが異なると仮定する。浸漬液体の表面張力とともに E_{crac} が増大する場合（仮定2）には、仮定1と同様に微細ひび割れの進展量 A_c は増大し、ひずみ速度も増大すると説明される。一方、浸漬液体の表面張力とともに E_{crac} が減少する場合（仮定3）には、式(16)から A_c の傾向を判断することは単純ではない。

既往の研究²⁴⁾より、初回損失エネルギーに対するひび割れ進展エネルギーの割合 E_{crac}/E_{i1} は、液体で飽和される場合には浸漬液体の表面張力によらずほぼ同等となることが明らかとなっている。このことを踏まえると、上記の仮定1が妥当であろう。

一方、図-14に示されるように、ひずみ速度の増大は疲労寿命の低下に帰結する。なお、コンクリートの疲労強度は、一定の繰返し回数（一般には200万回）で破壊しない最大の応力比（静的強度に対する上限応力比）で表わされるため、疲労寿命の低下は疲労強度の低下を意味する。以上より、液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度の低下には、界面エネルギーの低下が大きく関与していると考えられる。

5. まとめ

液体浸漬によりコンクリートの圧縮疲労強度が低下する機構について、既報¹⁵⁾を踏まえ新たに供試体の変形特性とエネルギー吸収特性に関する実験結果を追加して考察した。本研究により得られた知見を要約すると、以下の通りである。

(1) コンクリートの圧縮疲労強度は、浸漬液体の表面張力の大きさに強く依存する。本実験条件下において浸漬液体の表面張力が1 dyn/cm 高くなると、下限応

力比を考慮した疲労寿命の算定式におけるK値は約0.077減少することが明らかとなった。

(2) 標準圧縮強度を基準とした時間耐久線図を提案した。同図より、浸漬液体の表面張力の大きさによってコンクリートの時間疲労強度は大幅に異なることが示唆された。特に、浸漬液体の表面張力が水よりも大きい場合には、疲労強度が大きく低下するため、常時海水と接する海洋コンクリート構造物などについては、一般的な環境に置かれる構造物と比較して、疲労破壊に対する安全性に関しより一層慎重な検討が必要と考えられる。

(3) 既往の研究^{21) 22)}と同様に、定常領域におけるひずみ速度（サイクル毎のひずみ増加量）と疲労寿命との間には両対数グラフ上で負の一次関係が存在することが確認された。また、本実験により、両者の関係は浸漬液体の種類によらず一本の回帰直線で近似可能であることがはじめて明らかとなった。この事実は、コンクリートの疲労寿命にとって定常領域におけるひずみ速度が支配的であり、これをモニタリングすることによって、浸漬液体の種類によらず、コンクリートの疲労寿命をある程度予測できることを示している。

(4) 初回繰返し時の損失エネルギー E_{i1} および定常領域において一定値となる損失エネルギーの平均値 E_{ic} の増大にともない、疲労寿命は低下する。

(5) 定常領域において一定値となる損失エネルギーの平均値 E_{ic} が増大するとひずみ速度も増大する。ただし、両者の関係は浸漬液体の種類によって異なり、浸漬液体の表面張力が大きいほどひずみ速度も大きくなる。これは、微細ひび割れの進展に必要な界面エネルギーが低下することにより、同等のエネルギーに対するひび割れの進展量が増大することを示していると考えられる。

(6) 液体浸漬により微細ひび割れ進展に必要な界面エネルギーが減少し、定常領域におけるひずみ速度が増大する。これによりコンクリートの疲労破壊過程が促進され、結果的に疲労寿命が低下するものと考えられる。

コンクリートの疲労破壊過程のうち、急激に破壊に至る加速領域においては、静的破壊過程におけるポストピーク領域で観察されるような破壊の局所化²⁹⁾が生じ、本研究で取り扱ったような安定的な微細ひび割れの進展以外の要因も問題となり得ることが予想される。しかしながら、疲労破壊過程の大部分を占める定常領域での安定的な微細ひび割れの進展状況が最終的な疲労寿命（あるいは疲労強度）に影響を及ぼすことは、既往の研究^{21) 22)}や本実験結果（例えば、図-14）から明らかであり、本

論文においては破壊の局所化などの問題については考慮しなかった。今後の課題としたい。

謝辞：本論文の執筆にあたり、有益な指摘を与えて下さった査読者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 六車照，渡辺史夫，光枝良，紺谷修：水中コンクリートの低サイクル疲労に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，pp.281-284，1984.
- 3) 尾崎昶，菅田紀之，渡辺洋一：シリカフェームを用いたコンクリートの中水疲労について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.75-80，1987.
- 4) 菅田紀之，尾崎昶，細川潮，Rosales, D. M.：真空処理コンクリートの中水疲労強度，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.293-298，1989.
- 5) 林宏信，高木宣章，児島孝之：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.
- 6) 土木学会：2007年度制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，p.37，2008.
- 7) Arthur, P. D., Earl, J. C. and Hodgkiess, T.：Fatigue of reinforced concrete in seawater, *Concrete*, pp.26-30, May 1979.
- 8) 西林新蔵，井上正一，吉野公，井上祥一：海水中におけるRCはりの疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.2，pp.279-284，1992.
- 9) Brown, R. D. and Baker, A. F.：Performance of Concrete in Marine Environment, *Developments in Concrete Technology-2*, Applied Science Publishers, p.133, 1979.
- 10) 堀素夫：表面エネルギーからみたセメント硬化体の強さ，*窯業協会誌*，Vol.70，No.7，C268-C273，1962.
- 11) Benedicks, C.: *Comptes Rendus*, 232, p.2435, 1951.
- 12) Antonoff, G.：Surface tension of solids and methods of measuring the same, *Journal of Physical and Colloid Chemistry*, Vol. 52, No. 6, pp. 969-975, 1948.
- 13) 大岸佐吉，小野博宣，棚橋勇：セメントモルタルの強度，変形に及ぼす含浸液体の表面張力の影響，第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.101-104，1981.
- 14) 松下博通，尾上幸造：セメント硬化体内部空隙中の液体の表面張力が圧縮強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.9-18，2006.
- 15) 松下博通，尾上幸造：コンクリート内部空隙中の液体の表面張力が圧縮疲労強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.19-30，2006.
- 16) Gumbel, E. J. (河田竜夫訳)：極値統計学，pp.45-51，廣川書店，1963.
- 17) 浜田純夫，中川建治，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.
- 18) 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.
- 19) 土木学会：2007年度制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，p.34，2008.
- 20) Van Ornum, J. L.：Fatigue of Concrete, *Transactions, ASCE*, V.58, pp.294-320, 1907.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 岡田清，小柳治，六郷恵哲：含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察，土木学会論文報告集，No.248，pp.129-136，1976.
- 24) 尾上幸造，松下博通：液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮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.64, No.4, pp.515-525, 2008.
- 25) コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用，日本コンクリート工学協会，2003.

(2009. 10. 6 受付)

ENERGY CONSIDERATION ON DECREASE IN COMPRESSIVE FATIGUE STRENGTH OF CONCRETE DUE TO IMMERSION OF LIQUID

Kouzou ONOUE and Hiromichi MATSUSHITA

The design fatigue strength formula specified in the JSCE standard specifications for concrete structures reflects the effect of moisture condition of concrete; however, the effects of liquids other than water are not considered. Therefore, safety against fatigue failure of concrete structures in a marine environment or of slab concrete through which anti-freezing agents permeate requires more consideration. To ensure safety against fatigue failure, a mechanism for lowering the fatigue strength of concrete immersed in liquids has to be clarified. In this study, the fatigue strength of concrete under compression was investigated from the viewpoints of deformation and energy absorption properties of the concrete specimen. It was observed that the increment of strain per cycle becomes greater with an increase in the surface tension of the liquid, due to the decrease in the interfacial energy between solid and liquid. This strain increment led to the shortening of the fatigue life of concrete. Herein, a modified Goodman diagram in which the static strength of concrete in the wet condition is set as a standard value of stress ratio is proposed.