

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360196

研究課題名 (和文) 表面張力の高い海水中における海洋コンクリート構造物の疲労耐力の低下機構の解明

研究課題名 (英文) Clarification of deterioration mechanism of fatigue capacity of marine concrete structure in the seawater with high surface tension

研究代表者

尾上 幸造 (ONOUE KOUZOU)

宮崎大学・工学部土木環境工学科・助教

研究者番号：50435111

研究成果の概要：

絶えず波浪による繰返し荷重を受ける海洋コンクリート構造物は、海水の持つ高い表面張力のために、疲労による被害を受けやすい過酷な環境にある。本研究課題では、港湾・海洋コンクリート構造物の疲労に対する安全性を合理的に確保するための基礎データを得ることを目的として、海水中でコンクリートの疲労強度が低下するメカニズムについて検討した。その結果、海水の持つ高い表面張力を考慮し、設計疲労強度を適切に設定することの必要性が示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2008 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート、海水、表面張力、疲労耐力、低下機構

1. 研究開始当初の背景

四方を海に囲まれたわが国にとって、港湾・海洋構造物は非常に重要であり、今後その傾向はますます強まるものと思われる。

ここで、繰返し荷重を受けるコンクリートの疲労強度は、液体中において著しく低下することが既往の研究により明らかとされている。また、その低下率は、浸漬液体の表面張力に依存し、液体の表面張力が高いほど、低下率も大きくなることが明らかとなっている。海水は水よりも大きい表面張力を有しているために、常時、湿潤状態で波浪による

繰返しを受ける港湾・海洋コンクリートは、疲労に対する耐久性という観点からは、陸上構造物と比較してかなり過酷な条件下に置かれている。

現行の土木学会コンクリート標準示方書においては、継続してあるいはしばしば水で飽和されるコンクリート構造物については、設計疲労強度を低減することでその安全性を確保されることが明記されている。しかしながら、港湾・海洋構造物のように海水の作用を受ける場合については、何ら考慮されておらず、検討の余地を残していた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、港湾・海洋コンクリート構造物の疲労に対する安全性を合理的に確保するための基礎的な知見を得ることである。コンクリートの疲労破壊が、内部微細ひび割れの発生・伝播過程を経て生じること、また、内部微細ひび割れの発生・伝播には表面エネルギー（新たな表面を形成するためのエネルギー）が必要であることを考慮して、海水中でコンクリートの疲労強度が低下するメカニズムについて、エネルギー的な観点から考察した。

3. 研究の方法

(1) 概要

コンクリートの疲労破壊は、繰返し荷重によって内部微細ひび割れが発生・伝播した結果として生じる。このとき、外力によりコンクリートに与えられたひずみエネルギーの一部が、新たな微細ひび割れを形成するための表面エネルギーに変換され、その表面エネルギーの大きさは、浸漬液体の表面張力が大きいほど小さくなると考えられている。このことを踏まえ、本研究では、圧縮応力を受けるコンクリート内部微細ひび割れの発生・伝播過程について、エネルギー的な観点から考察することとした。

コンクリートの疲労強度は、漸増荷重をおこなったときの静的強度の比で表わされるのが一般的であるが、既往の研究により、液体中においては、コンクリートの静的強度も疲労強度と同様に低下することが明らかとなっている。そこで、まず液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度低下機構についてのエネルギー的な考察をおこなった。このとき、応力-ひずみ曲線のヒステリシス面積より算定される「ひび割れ進展エネルギー」に着目し、これが浸漬液体の表面張力とどのような関係にあるか調べた。次に、表面張力の異なる数種類の液体中にて疲労試験を実施し、繰返し荷重を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線の変化について、詳細に検討した。

(2) 液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度の低下機構の解明

材料として、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ）、海砂（表乾密度 2.56g/cm^3 ）、碎石（表乾密度 2.89g/cm^3 ）、AE 減水剤および AE 剤を用いた。コンクリートの配合条件と単位量を表-1 に示す。

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	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE剤
(%)			(kg/m ³)				(ml/m ³)
55	45	175	318	782	1079	0.994	6.36

供試体は、 $\phi 75 \times 150\text{mm}$ の円柱とした。打設後 24 時間で脱型し、28 日間水中養生を施した。その後、湿空養生 (20°C 、相対湿度 95% で 28 日間)、 40°C 炉乾燥 (3 日間)、 60°C 炉乾燥 (4 日間)、 90°C 炉乾燥 (14 日間)、 110°C 炉乾燥 (14 日間) を経て、室温まで冷却後、表面張力の異なる 3 種類の液体に 14 日間浸漬し、液体中にて荷重試験を実施した。本実験で使用した表面張力の異なる浸漬液体は、AE 剤希釈溶液（表面張力 34.6dyn/cm ）、精製水（表面張力 72.8dyn/cm ）、および 4mol/l 食塩水（表面張力 78.9dyn/cm ）の 3 種類である。液体を浸漬しない気中試験も実施しており、この場合は表面張力を 0dyn/cm と仮定した。

荷重試験には 2000kN 耐圧試験機を使用し、荷重速度は $0.2\text{N/mm}^2/\text{sec}$ とした。供試体にはひずみゲージを貼付し、荷重試験時の応力とひずみを計測した。荷重試験後、微細ひび割れ発生状況の評価のため、供試体の縦横方向（図-1）の超音波伝播速度を測定した。

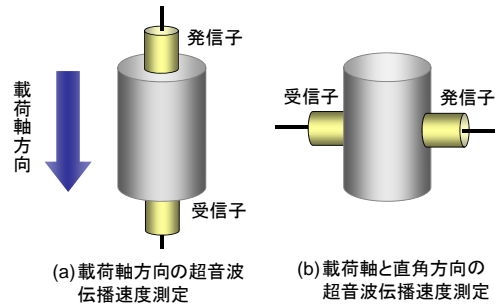


図-1 超音波伝播速度の測定

(3) 液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度の低下機構の解明

材料として、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、海砂（表乾密度 2.59g/cm^3 ）、碎石（表乾密度 2.86g/cm^3 ）、AE 減水剤および AE 剤を用いた。コンクリートの配合条件と単位量を表-2 に示す。

表-2 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	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE剤
(%)			(kg/m ³)				(ml/m ³)
55	47	165	300	846	1054	0.938	300

供試体は、 $\phi 75 \times 150\text{mm}$ の円柱とした。打設後 24 時間で脱型し、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60%以上の室内で、約 3 カ月間にわたり湿空養生を施した。その後、恒温恒湿室（温度 20°C 、相対湿度 60%で 3 日間）、 60°C 炉乾燥 (3 日間)、 90°C 炉乾燥 (7 日間) を経て、室温まで冷却後、表面張力の異なる 3 種類の液体中に 14 日間浸漬し、液体中にて疲労試験を実施した。本実験で使用した表面張力の異なる浸漬液体は、AE 剤希釈溶液（表面張力

63.0dyn/cm)、精製水(表面張力72.8dyn/cm)、および高濃度塩水(表面張力90.1dyn/cm)の3種類である。

疲労試験には、電気油圧サーボ式の疲労試験機を用いた。載荷波形は正弦波形とし、載荷速度は繰返し100回までは1Hz、100~200回までは1Hz~5Hz、200回以上は5Hzとした。繰返しの下限応力比は、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。上限応力比は、液体の種類によって異なるが、各液体中におけるコンクリートの静的強度の45~75%(5%間隔)に設定した。供試体には縦方向にひずみゲージを添付し、疲労試験時の応力とひずみを計測した。

4. 研究成果

(1) 液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度の低下機構の解明

① 静的漸増載荷による応力-ひずみ曲線

図-2に静的漸増載荷試験による応力とひずみの関係を示す。浸漬液体の種類により、応力とひずみの関係は大きく異なることが示されている。最大応力、すなわちコンクリートの静的圧縮強度は、気中、AE剤希釈溶液中、精製水中、4mol/l食塩水中の順で大きくなっており、これは浸漬液体の表面張力が小さい順に並んでいる。

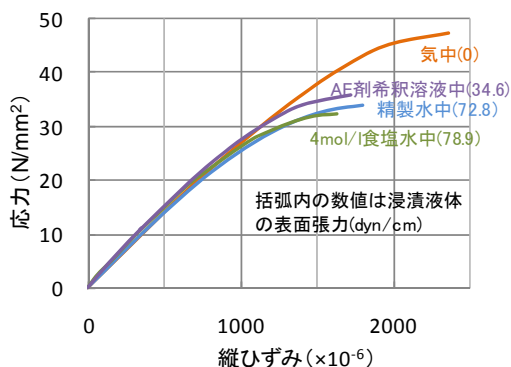


図-2 静的漸増載荷による応力とひずみの関係

図-3に、浸漬液体の表面張力とコンクリートの静的圧縮強度の関係を示す。両者の間には負の直線関係が認められ、既往の研究と同様に、浸漬液体の表面張力がコンクリートの静的圧縮強度に強く影響を及ぼすことが再確認された。

② 繰返し載荷除荷試験によるひび割れ進展エネルギーの算定

岡田・小柳・六郷(土木学会論文報告集、1976)の考え方にもとづき、静的圧縮応力を受けるコンクリート内部の微細ひび割れ発生・伝播仮定について、ひび割れ進展エネルギーを算定した。

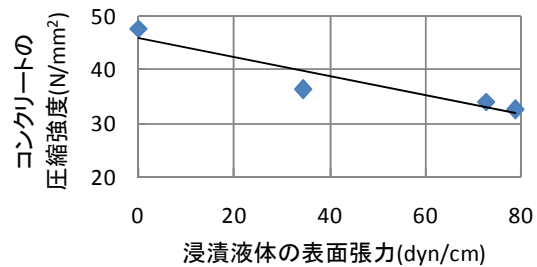


図-3 浸漬液体の表面張力とコンクリートの静的圧縮強度の関係

図-4に上限応力を一定として載荷・除荷をおこなったときの応力-ひずみ曲線と各エネルギーとの関係を示す。ヒステリシスで囲まれる面積が損失エネルギー E_i であり、微細ひび割れの進展に消費されるひび割れ進展エネルギー E_{crac} と摩擦損失エネルギー E_{fric} の総和であると考えられる。

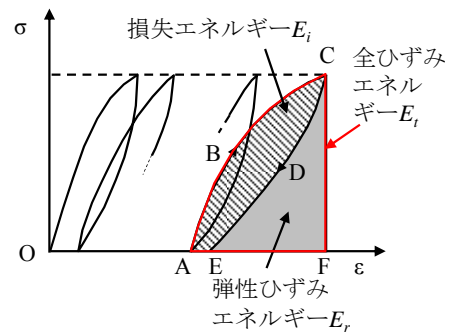


図-4 応力-ひずみ曲線と各エネルギーの関係

繰返し載荷・除荷を10サイクル繰返したとき、損失エネルギー E_i は図-5のように変化する。 E_i は初回繰返しの際に最も大きく、2回目以降は小さくなり、5回目程度ではほぼ一定値に収束する。この収束したエネルギーは、微細ひび割れが開閉する際の摩擦によって生じる熱エネルギー、すなわち摩擦損失エネルギー E_{fric} であり、初回繰返し時にも同様の摩擦損失が生じていると仮定して、初回繰返し時の損失エネルギー E_{i1} から E_{fric} を差し引くことにより、ひび割れ進展エネルギー E_{crac} を算定できる。

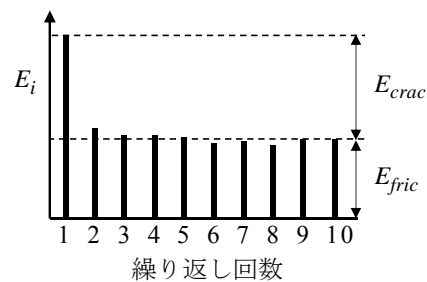


図-5 繰返しに伴う損失エネルギー E_i の変化

図-6に、本実験で得られたひずみ比とひび割れ進展エネルギー E_{crac} との関係を示す。ここでひずみ比とは、静的試験による最大応力（ピーク）時のひずみに対する、ひび割れ進展エネルギーを求めた時点のひずみの比のことである。既往の研究より、ひずみ比とひび割れ進展エネルギー E_{crac} の間には、両対数グラフ上で直線関係が認められること、すなわち E_{crac} はひずみ比の累乗関数で近似できることが明らかとなっている。本研究結果についても、両者は累乗関数で良好に近似できることが確認された。

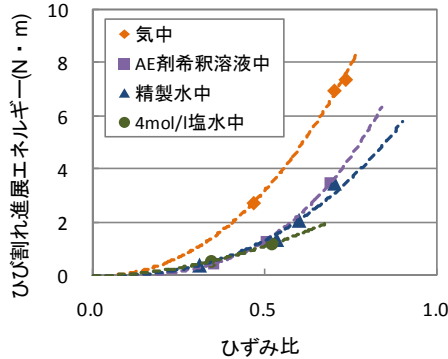


図-6 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係

ここで、最大応力時、すなわちコンクリートが静的圧縮強度に達したときのひび割れ進展エネルギーの推定値は、図-6においてひずみ比が1のときであり、近似曲線を外挿して得られる。この推定値を浸漬液体の表面張力の大きさと整理して図-7の関係を得た。浸漬液体の表面張力が増大すると、それともなって静的圧縮強度に達するためのひび割れ進展エネルギーが直線的に低下することが明らかとなった。

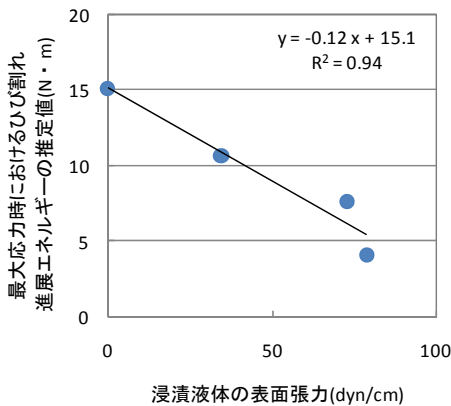


図-7 浸漬液体の表面張力と最大応力時のひび割れ進展エネルギーの推定値との関係

図-8に、繰返し载荷除荷試験後の供試体で測定された超音波伝播速度の一例を示す。測定値に若干のばらつきはあるものの、浸漬液体の種類によらず、超音波伝播速度とひずみ

比の関係は、1本の近似曲線で近似できることが読み取れる。このことから、コンクリートがある大きさの圧縮応力を受けるとき、その応力に対応するひずみ比が同一であれば、浸漬液体の種類によらず、供試体内部に発生する微細ひび割れ量は同程度である可能性が高いことが判明した。

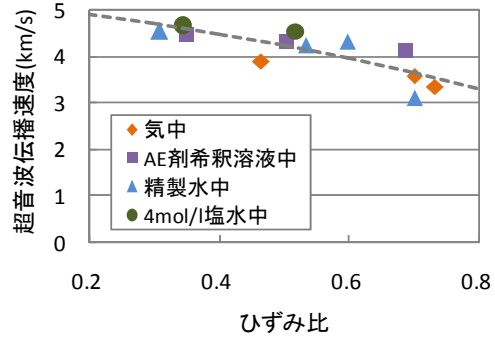


図-8 ひずみ比と超音波伝播速度の関係 (载荷軸と直角方向、縦波)

ここで、次元を考慮して、 E_{crac} (N·m) は、式1で表わされると考えられる。

$$E_{crac} = E_c \times A_c \quad (式1)$$

ここに、 E_c は微細ひび割れを形成するために必要な表面エネルギー (単位: N/m)、 A_c は微細ひび割れの総表面積 (単位: m^2) である。図-8より、微細ひび割れの総表面積 A_c は浸漬液体の表面張力によらず一定と考えられることを考慮すると、図-7のようにひび割れ進展エネルギー E_{crac} が浸漬液体の表面張力の増大にともなって低下することは、式1において E_c が低下することに他ならない。

以上より、液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度の低下は、微細ひび割れ形成時の表面エネルギーの低下に起因することが示された。

(2) 液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度の低下機構の解明

① 圧縮応力の繰返しにともなう応力-ひずみ曲線の変化

図-9に、圧縮応力の繰返しにともなう応力-ひずみ曲線の変化の一例 (AE剤希釈溶液中、応力比10~55%、疲労寿命 $N=200$ 万回 over)

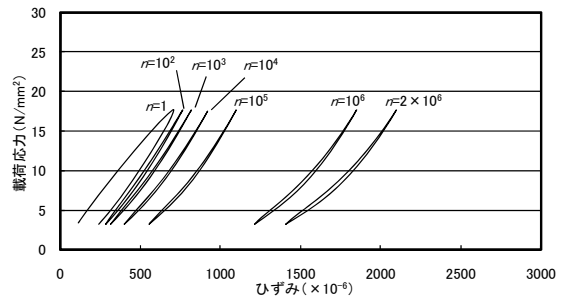


図-9 繰返し回数にともなう応力-ひずみ曲線の変化の一例

を示す。従来の知見と同様に、応力-ひずみ曲線は、繰返し初期では上に凸であるが、次第に直線となり、その後下に凸に変化することを全ての実験ケースで確認した。

② 圧縮応力の繰返しにともなう上限応力時ひずみの変化とひずみ速度

図-10 に、圧縮応力の繰返しにともなう上限応力時ひずみの変化の一例（高濃度塩水中、応力比 10~65%、疲労寿命 $N=33218$ ）を示す。従来の知見と同様に、繰返し回数と上限応力時ひずみの関係は、繰返し初期で上に凸な曲線（遷移領域）を描き、やがて直線となり（定常領域）、破壊近傍では下に凸な曲線（加速領域）に変化することがわかる。

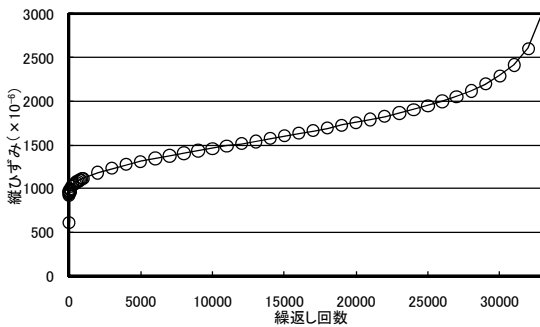


図-10 繰返し回数にともなう上限応力時ひずみの変化の一例

上限応力時ひずみの応力繰返し 1 サイクルあたりの変化量を「ひずみ速度」と呼ぶ。図-11 に、繰返し回数とひずみ速度の関係の一例（AE 剤希釈溶液中）を示す。横軸には、繰返し回数 n を疲労寿命 N で正規化した n/N をとっている。ひずみ速度は、繰返しの初期で大きく、その後一定値となり、破壊近傍では再び増大する傾向を示す。

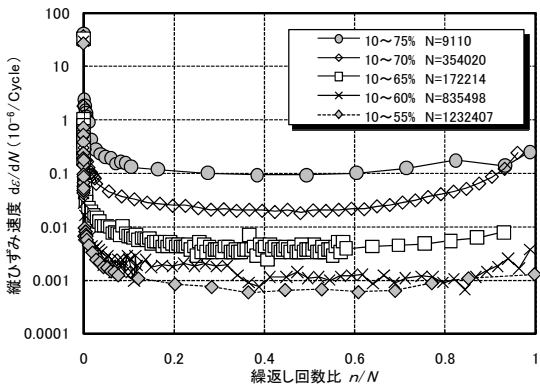


図-11 繰返し回数にともなうひずみ速度の変化

遷移領域、定常領域および加速領域のうち、定常領域は微細ひび割れの安定成長にともなう緩やかな変形過程である。この定常領域における微細ひび割れの発生・伝播過程は、最終的な疲労寿命に大きく影響を及ぼすと考えられている。そこで、横軸に疲労寿命の

対数 $\log N$ をとり、ひずみ速度の対数との関係を調べてみた（図-12）。その結果、浸漬液体の種類によらず、ひずみ速度と疲労寿命との関係は、1本の近似曲線で近似できることが明らかとなった。このことは、ひずみ速度をモニタリングすることにより、含水状態や液体環境の違いによらず、コンクリートの疲労寿命を一義的に予測することが可能であることを意味している。

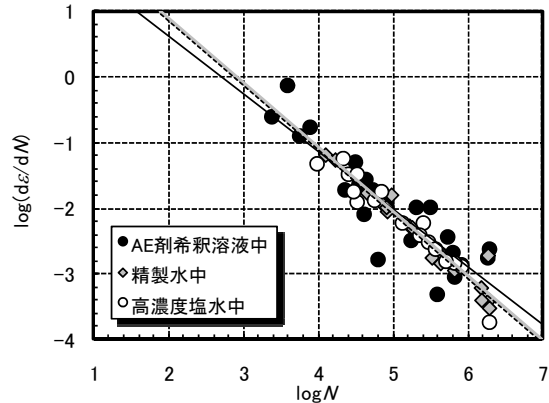


図-12 ひずみ速度と疲労寿命の関係

③ 圧縮応力の繰返しにともなう応力-ひずみ曲線のヒステリシス面積の変化

図-13 に、圧縮応力の繰返しにともなう応力-ひずみ曲線のヒステリシス面積の変化の一例（AE 剤希釈溶液中）を示す。ここで、ヒステリシス面積は、損失エネルギー E_i であり、微細ひび割れの進展に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時に熱として消費される摩擦損失エネルギー E_{fric} の和であると考えられる。損失エネルギーは、初回繰返し時に最も大きく、その後一定値となり、破壊近傍で再び増大する。これは、本実験の全てのケースについて同様であった。

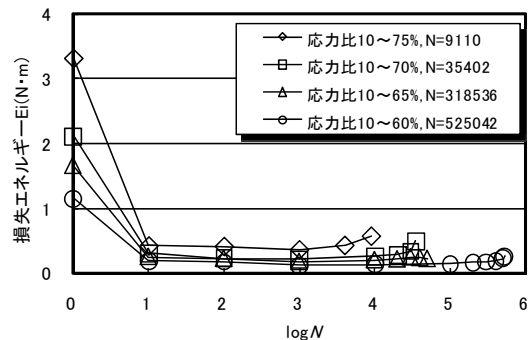


図-13 繰返し回数にともなう損失エネルギー E_i の変化

図-14 に、定常領域の損失エネルギー E_{ic} と定常領域のひずみ速度との関係（両対数）を示す。同程度の E_{ic} であっても、ひずみ速度は異なり、浸漬液体の表面張力が高いほど

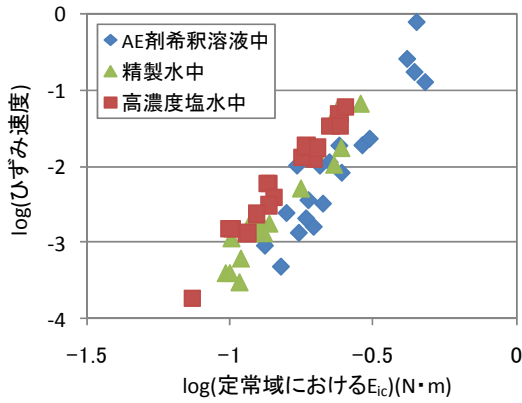


図-14 定常領域における損失エネルギー E_{ic} とひずみ速度の関係

(すなわち、高濃度塩水中>精製水中>AE 剤希釈溶液中) ひずみ速度が大きくなることを示されている。これは、浸漬液体の表面張力が高いほど、微細ひび割れ形成のための表面エネルギーが低下するために、ひび割れが進展しやすくなり、ひずみ速度が大きく現れることを示しているものと考えられる。

破壊時までの損失エネルギー E_i を累計し、その累計値と浸漬液体の表面張力との関係を調べてみた(図-15)。図中、凡例は繰返しの上限応力比を表わす。繰返しの上限応力比が同程度であっても、浸漬液体の表面張力の大きさにより、破壊時までの損失エネルギーの累計値は異なっており、浸漬液体の表面張力が大きいほど、より少ないエネルギーでコンクリートが疲労破壊する。これは、浸漬液体の表面張力が高いほど、微細ひび割れ形成のための表面エネルギーが低下するためと考えられる。

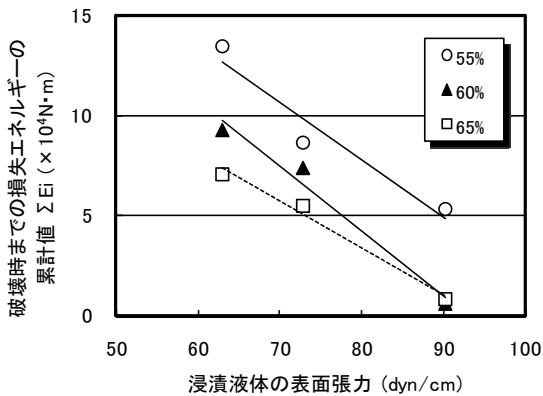


図-15 浸漬液体の表面張力が破壊時までの損失エネルギーの累計値に及ぼす影響

(3) 結論

本研究により、水や海水を含めた液体の浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度、ならびに圧縮疲労強度の低下には、微細ひび割れ形成時の表面エネルギーの低下が大きく関係していることが明らかとなった。このことは、浸漬液体の表面張力を考慮することで、任意の液体環境に置かれるコンクリートの強度を適切に評価できる可能性を示唆している。また、水よりもさらに高い表面張力を有する海水中においては、コンクリートの静的強度・疲労強度が水中におけるよりもさらに低下するおそれがあり、港湾・海洋コンクリート構造物の安全性の確保にあたっては、海水の表面張力を考慮し、設計疲労強度を適切に低減するなど、慎重な検討が必要であるといえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

①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 年(査読有) URL : <http://ir.lib.miyazaki-u.ac.jp/dspace/handle/10458/1592>

②尾上幸造、松下博通、濱田秀則、佐川康貴：コンクリートの静的圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察、コンクリート工学年次論文集、Vol. 30、No. 1、pp. 369-374、2008 年(査読有)

[学会発表] (計 1 件)

①濱本真吾、松下博通、濱田秀則、尾上幸造：液体中におけ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、土木学会西部支部研究発表会、2008 (長崎大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾上 幸造 (ONOU KOUZOU)

宮崎大学・工学部土木環境工学科・助教

研究者番号：50435111

(2) 研究分担者

園田 佳巨 (SONODA YOSHIMI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40304737

濱田 秀則 (HAMADA HIDENORI)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70344314

貝沼 重信 (KAINUMA SHIGENOBU)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00262874

佐川 康貴 (SAGAWA YASUTAKA)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：10325508