

論文 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

尾上 幸造*1・松下 博通*2・濱田 秀則*3・佐川 康貴*4

要旨: コンクリートの静的圧縮破壊過程についてエネルギー的に考察することを目的として、気中および表面張力の異なる3種類の液体中にて、微細ひび割れ発生時の表面エネルギーと微細ひび割れ発生量の積であると考えられる「ひび割れ進展エネルギー」の変化について調べた。実験の結果、供試体が圧縮強度に達した時点におけるひび割れ進展エネルギーは浸漬液体の表面張力が高いほど直線的に低下し、また、そのとき供試体内部の微細ひび割れ発生量は乾湿状態によらずほぼ同等であることが明らかとなり、湿潤によるコンクリートの圧縮強度低下メカニズムとして「表面エネルギー低下説」が妥当であることが示された。

キーワード: 静的圧縮破壊過程, 乾湿状態, 微細ひび割れ, ひび割れ進展エネルギー, 表面エネルギー

1. はじめに

乾湿状態によりコンクリートの圧縮強度は著しく変動し、一般にコンクリートの湿潤強度は乾燥強度の10~20%程度低下する¹⁾。この含水による強度低下現象を説明するメカニズムとして、非圧縮性の水分がかみ込むことでコンクリート中の微細ひび割れ先端において分離圧(間隙水圧)が生じるとする、いわゆる「くさび作用説」や、水分が付着することにより微細ひび割れを新たに形成する際の表面エネルギーが低下するとする「表面エネルギー低下説」などが提案されている²⁾。

コンクリートの破壊は、基本的に内部微細ひび割れの発生・伝播によることは明らかであり、乾湿状態によってコンクリートの圧縮強度が変動することは、コンクリート内部に存在する水分が微細ひび割れの発生・伝播過程に影響を及ぼすことを意味している。

コンクリート内部に発生・伝播する微細ひび割れを直接的に観察し、定量化することは不可能ではないものの一般的に困難である。筆者ら^{3),4)}は、除荷を含む応力-ひずみ曲線のヒステリシスの面積で定義される損失エネルギーのうち、微細ひび割れの発生・伝播に関係していると考えられる「ひび割れ進展エネルギー」に着目し実験的な検討を行ってきた。その結果、コンクリートの静的圧縮破壊過程におけるひび割れ進展エネルギーは、ひずみの累乗関数で表現できること、同一レベルのひずみ比(ピーク時ひずみに対するひずみの比)で比較した場合、供試体の含水率が高いほどひび割れ進展エネルギーが減少すること等を明らかとした。このうち後者の結果は、水分の吸着によってコンクリート内部微細ひび割れを形成するための表面エネルギーが低下することを示していると考えられ、含水による圧縮強度低下メカニ

ズムとして「表面エネルギー低下説」の妥当性を裏付けるものと考えられる。

本論文では、内部微細ひび割れの発生・伝播過程に及ぼす表面エネルギーの影響についてより詳細に検討することを目的として、気中および表面張力の異なる3種類の液体(AE剤希釈溶液、精製水、高濃度塩水)中にて、ひび割れ進展エネルギーを定量化するための試験を行い、コンクリートの静的圧縮破壊過程について表面エネルギー的観点から考察した結果について報告する。

2. 静的圧縮力を受けるコンクリート内部で発生する各種エネルギーの定量化

コンクリートの圧縮破壊過程において外力が行った仕事は、ひずみエネルギーとして供試体内部に蓄積される。外力を増していくことでひずみエネルギーも増大していくが、ある限界値に達すると、ひずみエネルギーの一部が損失エネルギーとして解放される。一方、ひずみエネルギーのうち損失エネルギーとして解放されなかったエネルギーは、供試体内部に依然として蓄えられており、荷重を取り除いたとき変形を回復する弾性ひずみエネルギーとして解放される。すなわち、

$$E_t = E_r + E_i \tag{1}$$

ここに、 E_t : 全ひずみエネルギー[N・m]

E_r : 弾性ひずみエネルギー[N・m]

E_i : 損失エネルギー[N・m]

図-1に応力-ひずみ曲線と各エネルギーの関係を示す。

図-2は上限応力を一定として完全片振り载荷を10サイクル行った場合の損失エネルギー E_i のサイクル毎の変化を示したものである。損失エネルギーは初回繰返し

*1 宮崎大学 工学部土木環境工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門准教授 博士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教 博士(工学) (正会員)

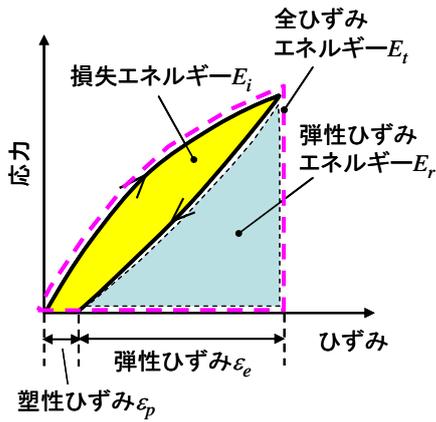


図-1 応力-ひずみ曲線と各エネルギーの関係

時に最も大きく、2 サイクル以降は大幅に減少し、上限応力が大きく低サイクル疲労となる場合を除けば5 サイクル程度ではほぼ一定値に収束する。この収束した損失エネルギーの大部分は、粘性摩擦や供試体内部に発生している微細ひび割れが荷重除荷ともなって開閉するときの摩擦によって生じる熱エネルギーであると考えられる。一般に、損失エネルギーがほぼ一定に保たれる領域であっても、縦ひずみや体積ひずみは増加することから、収束した損失エネルギーには塑性変形をともなった微細ひび割れの安定成長に消費されるエネルギーも含まれる⁵⁾と考えるのが妥当であるが、収束した損失エネルギーに占める熱エネルギーの割合は相当に大きいと予想されることから、本論文においてはこの収束した損失エネルギーを摩擦損失エネルギーと定義する。初回の繰返し時においても同様に摩擦損失エネルギーが発生しているものと仮定すれば、初回の損失エネルギーから摩擦損失エネルギーを差し引くことによって、ひび割れ進展エネルギーを算定できる。すなわち、

$$E_{crac} = E_{i1} - E_{fric} \quad (2)$$

ここに、 E_{crac} ：ひび割れ進展エネルギー[N・m]

E_{i1} ：1 サイクル目の損失エネルギー[N・m]

E_{fric} ：摩擦損失エネルギー[N・m]

3. 実験概要

3.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ，比表面積 $3260\text{cm}^2/\text{g}$ ），細骨材として海砂（表乾密度 2.56g/cm^3 ，吸水率 1.32%），粗骨材として砕石 2005（表乾密度 2.89g/cm^3 ，吸水率 1.15%）を使用した。また、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤およびアルキルアシルスルホン酸系の空気連行剤を使用した。コンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートの配合は、スランプが $10 \pm 2\text{cm}$ ，空気量が $4.5 \pm 1.0\%$ となるよう化学混和剤の量を調整することにより決定した。また、供試体の形状寸法は $\phi 75 \times 150\text{mm}$ の円柱とした。

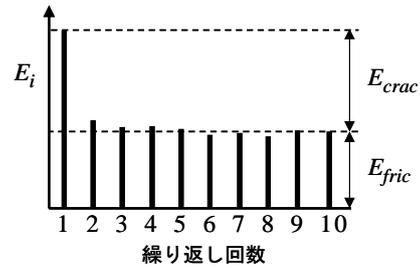


図-2 上限応力一定として繰返し荷重を行った際の損失エネルギー E_i の変化例

表-1 コンクリートの配合条件および単位量

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

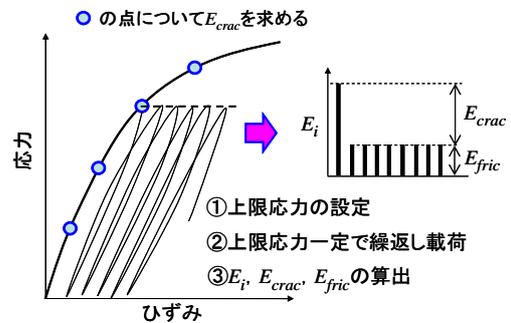


図-3 損失エネルギー E_i 、ひび割れ進展エネルギー E_{crac} および摩擦損失エネルギー E_{fric} を求めるための繰返し荷重試験の手順

3.2 供試体の調整および浸漬液体の種類

コンクリートは打設後 24 時間で脱型し、28 日間 20°C 水中にて標準養生を行った。その後、湿空養生（室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相対湿度 95%以上で 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、各液体に浸漬（14 日間）し、供試体の質量が安定した時点で荷重試験を実施した。炉乾燥の温度を低温から高温に段階的に上昇させたのは、急激な乾燥によってコンクリート供試体中に発生する微細ひび割れを極力抑えるためである。なお、気中試験については 110°C 炉乾燥後、気中に放置し室温まで冷却して荷重試験を実施した。

コンクリート内部空隙中の液体の表面張力を変化させるための浸漬液体として、AE 剤 10 倍希釈溶液（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 ）を用いた。また、気中試験については、液体の表面張力を 0dyn/cm と仮定している。

3.3 荷重試験方法およびエネルギーの定量化

荷重試験には 2000kN 耐圧試験機を使用し、荷重速度

は応力制御で約 $0.2\text{N/mm}^2/\text{sec}$ とした。試験時に供試体軸方向およびその直角方向に検長 60mm のひずみゲージを左右に各 2 枚、計 4 枚貼付し、縦ひずみおよび横ひずみを計測した。

図-3 に载荷試験手順を示す。まず、通常の静的载荷試験（供試体数 3）を行い、応力-ひずみ曲線を求めた。次に、繰返しの上限応力を数点設定し、それらを上限として下限応力を 0N/mm^2 とした完全片振り载荷を 10 サイクル行った。繰返しの上限応力は、静的载荷試験によって得られた応力-ひずみ曲線における最大応力時（ピーク時）ひずみの約 35, 50, 65% のひずみに対応する応力および最大応力の約 90% の応力とした（供試体数各 1）。

3.4 载荷試験後の供試体における超音波伝播速度の測定

载荷によって供試体内部に導入された微細ひび割れを相対的に評価することを目的として、超音波伝播速度の測定を行った。超音波の種類は縦波および横波の 2 種類である。供試体载荷軸方向については供試体断面中央部について 2 回、载荷軸方向の直角方向（供試体側面）については、側面上部、側面中央部および側面下部の 3 箇所について 3 回ずつ測定した。一般に、縦波の場合、コンクリート内部空隙中に液体が存在することによる影響を受けるが、横波の場合には液体の影響がないと言われている。そこで、今回縦波と横波の両者について測定を行った。

4. 実験結果

4.1 静的载荷試験による応力-ひずみ曲線

図-4 に静的载荷試験による応力と縦ひずみの関係を示す。それぞれ供試体 3 本についての結果を最知ら⁶⁾の方法によって平均化したものである。ピーク時ひずみについて、気中試験では約 2300×10^{-6} であるのに対し、液体中では約 $1600 \sim 1700 \times 10^{-6}$ 程度と小さい。すなわち、供試体が湿潤状態にあると最大応力時のひずみは乾燥状態時よりも著しく小さくなっているが、これは既往の知見⁷⁾と一致する。また最大応力の大きさは、気中、AE 剤希釈溶液中、精製水中、 4mol/l 食塩水中の順となり、浸漬液体の表面張力が大きくなるにつれて圧縮強度が小さくなるのが分かる。これも既往の報告⁸⁾と一致する。本研究の結果について、浸漬液体の表面張力とコンクリートの圧縮強度の関係を図-5 に示す。浸漬液体の表面張力が大きくなるにつれ、コンクリートの圧縮強度が直線的に低下することが再度確認される。

図-6 に静的载荷試験による応力と体積ひずみの関係を示す。試験条件の違いにより、応力と体積ひずみの関係は顕著に異なることが分かる。コンクリート供試体を圧縮载荷した場合、载荷初期には収縮し、あるひずみを境に膨張に転じるが、収縮から膨張に転じる時点の体

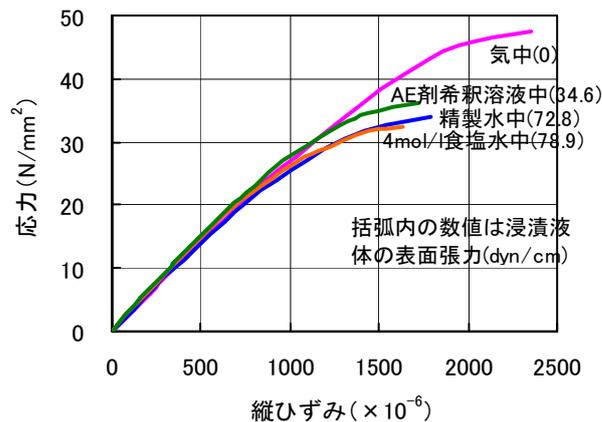


図-4 静的载荷試験による応力と縦ひずみの関係

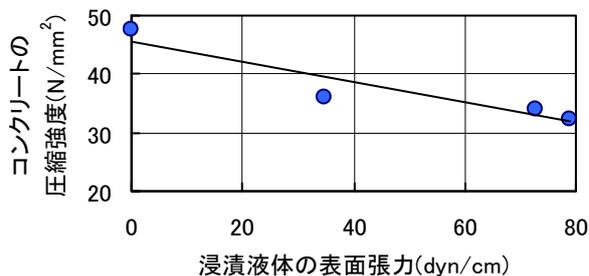


図-5 浸漬液体の表面張力と圧縮強度の関係

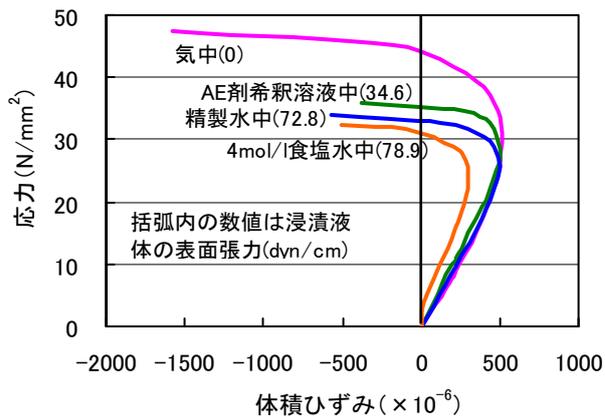


図-6 静的载荷試験による応力と体積ひずみの関係

表-2 体積ひずみの特異点ひずみ、特異点応力およびピーク時の膨張ひずみ

試験条件	浸漬液体の表面張力 (dyn/cm)	収縮から膨張に転じる時点の体積ひずみ ($\times 10^{-6}$)	収縮から膨張に転じる時点の応力 (N/mm^2)	ピーク時の体積ひずみ(膨張ひずみ) ($\times 10^{-6}$)
気中	0	512	31	-1578
AE剤希釈溶液中	34.6	507	28	-377
精製水中	72.8	493	26	-570
塩水中	78.9	291	24	-511

積ひずみ、そのときの応力、およびピーク時の体積ひずみ（膨張ひずみ）をまとめて表-2 に示す。収縮から膨張に転じる時点の体積ひずみおよび応力については、浸漬液体の表面張力が大きくなるに従って小さく現れる

傾向が読み取れる。ピーク時の膨張ひずみについては、特に傾向は認められないが、気中試験の場合に著しく大きく、他の試験条件の場合の約3倍程度の膨張量となることが分かる。最終的な膨張ひずみが微細ひび割れの発生量と何らかの関係があるとするならば、気中試験の場合には他の湿潤供試体を用いた試験の場合と比較して、より多数の微細ひび割れが導入される可能性が示唆されるが、微細ひび割れの導入幅（微細ひび割れの開口幅）等にも関係してくると考えられ、この点については今後さらに詳細な検討を要するものと思われる。

4.2 荷重除荷曲線と損失エネルギーの変化

図-7に繰返し荷重による荷重除荷曲線の一例（精製水中、静的試験によるピーク時ひずみの50%のケース）を示す。荷重除荷の1サイクル目の上昇部分は静的荷重試験による応力-ひずみ曲線とほぼ一致し、その後繰返しの上限ひずみおよび下限ひずみ（塑性ひずみ）はサイクル数が増えるにつれ少しずつ増加していく。この傾向は、全ての実験ケースにおいて同様であった。

荷重除荷曲線より2.で述べた方法によって損失エネルギーを定量化し、サイクル数で整理したものを図-8に示す。損失エネルギー E_i は初回の繰返し時に最も大きく、その後は大幅に低下し、およそ5サイクル目以降ではほぼ一定値に収束する。この傾向は全ての実験ケースについて同様であった。本研究では、5~10サイクルの損失エネルギーの平均値を摩擦損失エネルギー E_{fric} とし、初回の損失エネルギー E_{i1} から E_{fric} を差し引くことで、ひび割れ進展エネルギー E_{crac} を算定した。なお、本論文では各損失エネルギーの値（単位： N/m^2 ）に供試体の体積（単位： m^3 ）を乗じ、供試体あたりのエネルギー（単位： $N \cdot m$ ）に換算して示す。

4.3 各損失エネルギーの算定結果

表-3に全ての実験ケースにおける損失エネルギー、摩擦損失エネルギー、およびひび割れ進展エネルギーの算定結果を示す。なお、4mol/l塩水中のデータについては、高レベル応力となる荷重試験時に供試体が破壊したため、2データの結果を示す。

初回繰返し時のひずみ比（静的荷重試験におけるピーク時ひずみに対する比率）が増大すると全ての損失エネルギーが増大することが分かる。また、初回の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は、既往の研究⁴⁾において試験条件が同一であればひずみ比が異なってもほぼ一定値となることが明らかとなっている。今回の結果についてみると、若干の例外はあるもののひずみ比によらずそれぞれの試験条件においてほぼ一定となる傾向が認められる。

4.4 ひび割れ進展エネルギーとひずみ比の関係

図-9にひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係

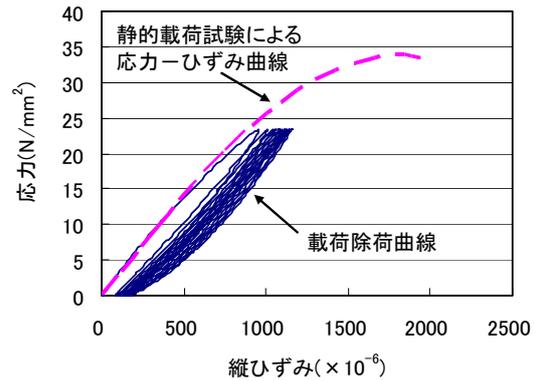


図-7 荷重除荷曲線と静的荷重試験による応力-ひずみ曲線

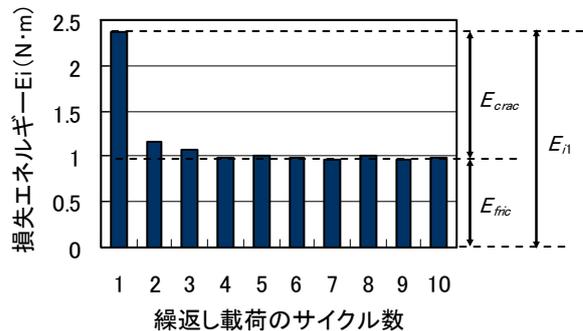


図-8 繰返し荷重のサイクル数ともなう損失エネルギー E_i の変化

表-3 損失エネルギー、摩擦損失エネルギー、およびひび割れ進展エネルギーの算定結果一覧

試験条件 (カッコ内の 数値は浸漬 液体の表面 張力)	初回繰返し 時の上限ひ ずみ比 (ピーク時 ひずみに対 する比率)	初回の 損失エ ネルギー E_{i1} ($N \cdot m$)	摩擦損 失エネ ルギー E_{fric} ($N \cdot m$)	ひび割 れ進展 エネル ギー E_{crac} ($N \cdot m$)	E_{crac}/E_{i1}
気中 (0dyn/cm)	0.47	3.19	0.46	2.73	0.86
	0.70	8.15	1.18	6.98	0.86
	0.73	8.61	1.21	7.40	0.86
AE剤希釈溶 液中 (34.6dyn/cm)	0.35	0.72	0.27	0.45	0.63
	0.50	2.14	0.84	1.30	0.61
	0.69	5.47	1.97	3.50	0.64
精製水中 (72.8dyn/cm)	0.31	0.70	0.28	0.42	0.60
	0.53	2.36	0.99	1.37	0.58
	0.60	3.90	1.81	2.09	0.53
4mol/l塩水中 (78.9dyn/cm)	0.70	6.36	2.89	3.47	0.55
	0.35	0.79	0.24	0.55	0.69
	0.52	1.92	0.73	1.19	0.62

を示す。ここで、既往の研究^{3),4)}により、ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの間には累乗関係が成立することが明らかとなっている。

$$E_{crac} = \alpha \cdot (\varepsilon_1 / \varepsilon_c)^\beta \quad (3)$$

ここに、 E_{crac} ：ひび割れ進展エネルギー ($N \cdot m$)

ε_1 ：ひび割れ進展エネルギーを求めたときのひずみ ($\times 10^{-6}$)

ε_c ：静的荷重試験によるピーク時ひずみ ($\times 10^{-6}$)

α, β ：実験定数

今回の試験結果についても、ひび割れ進展エネルギーはひずみ比の累乗関数で近似できることが分かる。

表-4に今回の試験結果による式(3)中の実験定数の一覧を示す。実験定数のうち、 α の値は、ひずみ比が1のとき、すなわちピーク時のひび割れ進展エネルギーの大きさを表している。表より、 α の値は浸漬液体の表面張力が大きくなるほど小さくなっていることが分かる。浸漬液体の表面張力と α の値（ピーク時のひび割れ進展エネルギーの推定値）の関係を図-10に示す。浸漬液体の表面張力が大きくなるにつれ、ピーク時のひび割れ進展エネルギーの推定値は直線的に減少することが明らかとなった。

ここで、次元を考慮してひび割れ進展エネルギー $E_{crac}[N\cdot m]$ は、微細ひび割れを形成するために必要なエネルギー $E_c[N/m]$ と微細ひび割れの総表面積 $A_c[m^2]$ の積であると考えられる。

$$E_{crac}=E_c \times A_c \quad (4)$$

したがって、図-10に示される実験結果は、コンクリート内部空隙に存在する液体の表面張力が大きいほど、微細ひび割れの形成に必要な表面エネルギーもしくは微細ひび割れの総表面積が減少することを示している。

4.5 荷重試験後の供試体における超音波伝播速度

図-11～図-14に荷重試験後の供試体について、微細ひび割れの発生状況を相対的に評価することを目的として超音波伝播速度を測定した結果を示す。

荷重軸方向（図-11および図-13）については、縦波・横波ともにひずみ比と超音波伝播速度との間に明瞭な傾向は認められない。

一方、荷重軸と直角方向（図-12および図-14）については、縦波・横波ともにひずみ比が増大するに従って超音波伝播速度が緩やかに低下する傾向が認められる。これは、圧縮荷重履歴を受けたコンクリート供試体内部には荷重軸方向に微細ひび割れが進展する⁵⁾ためと考えられる。なお、縦波は液体中を伝播する性質を有しており、気中供試体では超音波伝播速度が他の供試体よりも低下することが予想されたが、本実験結果からはそのような傾向を読み取ることはできず、今回の試験条件においては液体の有無による超音波伝播速度への影響は小さかったものと考えられる。

ここで、縦波・横波ともに測定値に若干のばらつきはあるものの、試験条件によらず、一本の近似曲線で近似できることが分かる。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時、その応力に対応するひずみ比（最大応力時ひずみに対する比）が同一であれば、供試体の乾湿状態にかかわらず、供試体内部に発生する微細ひび割れ量（式(4)における A_c ）は同程度である可能性が高いと考えられる。

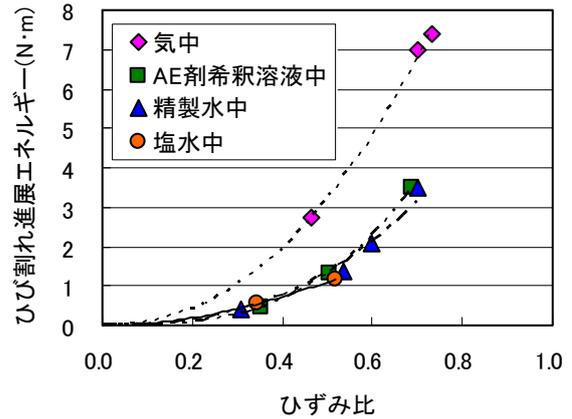


図-9 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係

表-4 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係式(3)中における実験定数の一覧

試験条件	浸漬液体の表面張力 (dyn/cm)	式(3)中の α	式(3)中の β	重回帰係数 R^2
気中	0	15.1	2.29	0.998
AE剤希釈溶液中	34.6	10.7	3.04	0.999
精製水中	72.8	7.66	2.52	0.987
4mol/l塩水中	78.9	4.14	1.91	1.000

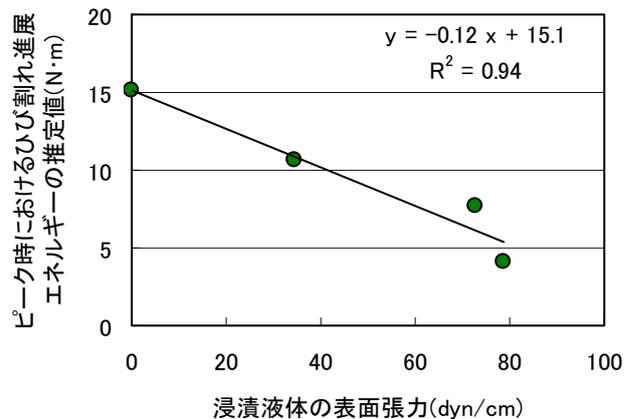


図-10 浸漬液体の表面張力とピーク時のひび割れ進展エネルギーの推定値の関係

したがって、圧縮強度に達した供試体内部に発生している微細ひび割れ量は、乾湿状態によらず同程度であると推察され、ひび割れ進展エネルギーの変化は同程度の微細ひび割れを形成するための表面エネルギー（式(4)における E_c ）の変化を表していることとなる。よって、図-10に示したようにピーク時のひび割れ進展エネルギーが浸漬液体の表面張力の増大にともなって直線的に低下したことは、湿潤状態においてはコンクリートの静的圧縮破壊に必要な微細ひび割れが、より少ないエネルギー量で形成されることを意味する。

以上のことより、湿潤によるコンクリートの圧縮強度の低下メカニズムとして「表面エネルギー低下説」が妥当であると考えられる。

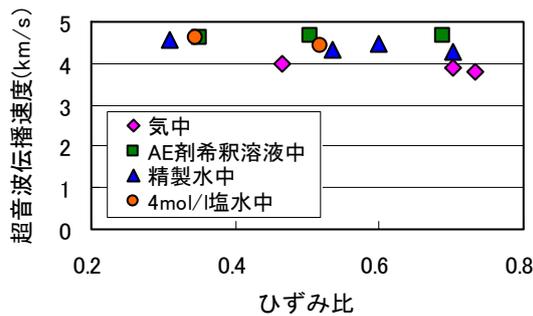


図-11 ひずみ比と超音波伝播速度の関係
(载荷軸方向, 縦波)

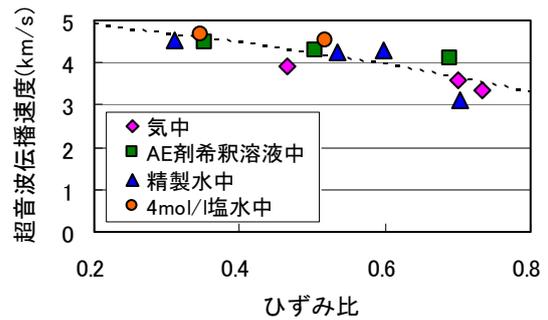


図-12 ひずみ比と超音波伝播速度の関係
(载荷軸と直角方向, 縦波)

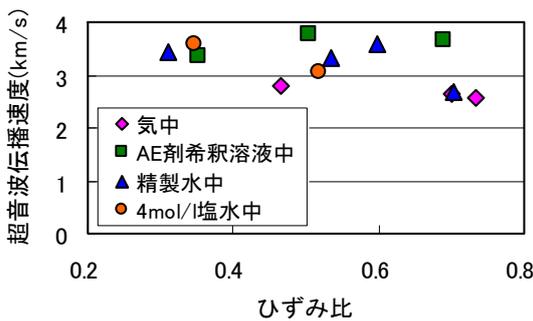


図-13 ひずみ比と超音波伝播速度の関係
(载荷軸方向, 横波)

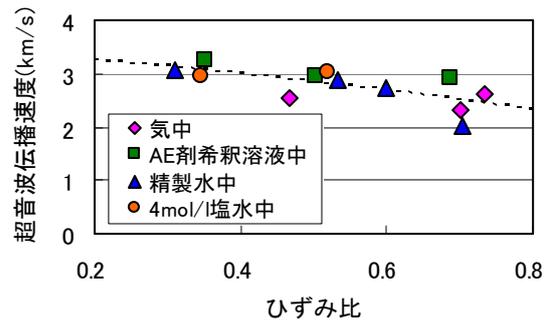


図-14 ひずみ比と超音波伝播速度の関係
(载荷軸と直角方向, 横波)

5. 結論

- (1) 静的载荷試験におけるピーク時のひび割れ進展エネルギーは、浸漬液体の表面張力の増大にともなって直線的に低下する。
- (2) 载荷履歴を受けた供試体の超音波伝播速度測定結果から、同一ひずみ比となる圧縮応力を受けたコンクリート供試体内部に発生する微細ひび割れ量は、乾湿状態にかかわらず同程度であると推察される。
- (3) ピーク時の微細ひび割れ量が乾湿状態によらず同程度であるならば、ひび割れ進展エネルギーの変化は同程度の微細ひび割れを形成するためのエネルギーの変化と考えることができ、(1)の結論を踏まえると、湿潤によるコンクリートの圧縮強度低下メカニズムとして「表面エネルギー低下説」が妥当であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、科学研究費補助金基盤研究(B)(研究代表者 九州大学 松下博通、課題番号: 19360196)および前田記念工学振興財団平成19年度研究助成(研究代表者 宮崎大学 尾上幸造)の助成を受けました。ここに深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岡島達雄, 一瀬賢一: コンクリートの強度および弾

性定数の含水率依存性, セメント技術年報, 36, pp.211-213, 1982

- 2) 岡島達雄: コンクリートの強度・ヤング係数と水分の関係, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.20-24, 1994
- 3) 尾上幸造, 松下博通, 鶴田浩章, 佐川康貴: セメント硬化体中の水が圧縮破壊過程に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.441-446, 2004
- 4) 尾上幸造, 松下博通, 濱田秀則, 佐川康貴: 圧縮力を受けるコンクリート内部の微細ひび割れ発生伝播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.28, No.1, pp.491-496, 2006
- 5) 松下博通: 繰返し応力を受けるコンクリートの疲労強度および疲労破壊機構に関する研究, 九州大学学位論文, 1980
- 6) 最知正芳, 四戸英男: 応力度-ひずみ度平均曲線によるコンクリートのダメージ評価, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.2, pp.73-82, 1999
- 7) 例えば田政範, 島田静雄: 水で飽和されたモルタルの圧縮破壊および疲労特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.245, pp.65-76, 1976
- 8) 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, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, pp.9-17, 2006