

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

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)

液体浸漬によりコンクリートの静的圧縮強度が低下する原因を明らかとするため、応力-ひずみ曲線のヒステリシスの面積より算定されるひび割れ進展エネルギーに着目し、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をおこなった。その結果、ひび割れ進展エネルギーは微細ひび割れ形成時の表面エネルギーと密接に関係しており、ひずみの増大にもなって累乗的に増加すること、さらにひずみ比が同一であれば供試体の含水率が高く浸漬液体の表面張力が大きいほど減少することが明らかとなり、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していることが示された。

Key Words : *static compressive strength, immersion of liquid, microcrack, crack propagating energy, surface energy*

1. はじめに

コンクリートは主に圧縮材として用いられるため、その圧縮強度は基本的かつ重要な指標である。しかしながら、乾湿状態の違いによりコンクリートの強度は著しく変動し、一般に湿潤時におけるコンクリートの静的圧縮強度は乾燥時のそれよりも約 10~20%程度低下する¹⁾。これは疲労強度についても同様であり、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それより約 20%程度低下する²⁾と報告されている。

湿潤によるコンクリートの強度低下現象を説明するメカニズムの代表例として、非圧縮性の水分が噛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³⁾ものの、統一的な理解には至っていない。

堀⁴⁾は表面エネルギーと破壊強度との理論的關係を指摘し、さらにモルタルの内部空隙を満たす浸漬液体の表面張力(表面エネルギー)の大きさを種々に変化させて曲げ強度試験をおこなったところ浸漬液体の表面張力とモルタルの曲げ強度との間に負の相関が認められることを報告している。大岸ら⁵⁾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、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報告している。著者ら⁶⁾はコンクリートの内部空隙を満たす浸漬液体の表面張力の大きさが静的圧縮強度および圧縮疲労強度に及ぼす影響について検討し、浸漬液体の表面張力の増大にもなってコンクリートの静的圧縮強度・圧縮疲労強度が直線的に低下することを確認している。

上述の結果より、水を含めた液体の浸漬によるコンクリートの強度低下機構として、著者らは「表面エネルギーの低下」が概ね妥当と考えているが、より詳細に検討するため、コンクリートの圧縮破壊過程に着目することとした。

コンクリートの圧縮破壊過程は基本的に内部微細ひび割れの発生・伝播過程であることは明らかであり、液体浸漬によってコンクリートの圧縮強度が低下することはコンクリート内部空隙中の液体が微細ひび割れの発生・伝播過程に何らかの影響を及ぼすことを意味する。

外力によってコンクリート内部に発生・伝播する微細ひび割れを非破壊的に検出する特殊な方法として、X線造影撮影法⁷⁾などが開発されており、微細ひび割れの発生・伝播状況を可視化するにあたって有用なツールになり得ると考えられるが、一般的には微細ひび割れの発生状況を直接的に定量評価することは難しい。

岡田ら⁸⁾は、コンクリートの圧縮破壊過程を外力によって供給されるひずみエネルギーの変換過程としてとらえ、載荷・除荷時に計測される応力-ひずみ曲線のヒステリシスの面積が「損失エネルギー」であり、さらに損失エネルギーは熱エネルギーとして系外に放出される「摩擦損失エネルギー」と内部微細ひび割れの発生・伝播時に消費される「ひび割れ進展エネルギー」とに分配されるという考え方を示している。

本研究は、岡田ら⁸⁾の考え方に示唆を得て、静的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「ひび割れ進展エネルギー」を用いて検討し、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について考察したものである。はじめに、静的圧縮応力下におけるモルタルおよびコンクリート内部微細ひび割れの発生・伝播に及ぼす含水率の影響^{9), 10)}について検討した。次に、静的圧縮応力下におけるモルタルおよびコンクリート内部微細ひび割れの発生・伝播に及ぼす浸漬液体の表面張力の影響¹¹⁾について検討した。

2. 静的圧縮応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おこなった仕事は、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、

$$E_i = E_r + E_f \quad (1)$$

ここに、 E_i : 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_f : 損失エネルギー (N・m)

図-1 に上限応力を一定として載荷除荷をおこなった際の応力-ひずみ曲線とエネルギーの関係を示す。ある1サイクルの載荷除荷曲線は ABCDE の経路をたどるが、ABCF で囲まれる面積が全ひずみエネルギー E_i 、CDEF で囲まれる面積が弾性ひずみエネルギー E_r 、ABCDE で囲まれる面積が損失エネルギー E_f となる。

図-2 は上限応力を一定として完全片振り載荷を 10 サイクルおこなった場合の損失エネルギー E_i のサイクル毎の変化例を示したものである。損失エネルギーは初回繰返し時に最も大きく、2 サイクル目以降は大幅に減少し上限応力が大きく低サイクル疲労破壊となる場合を除け

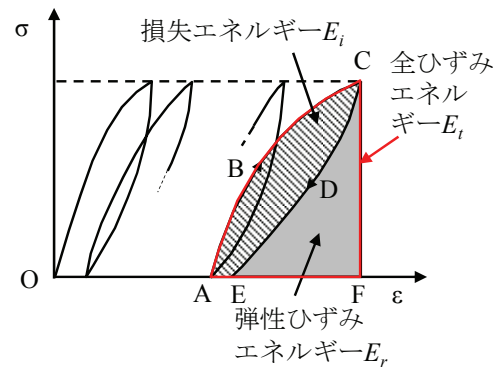


図-1 応力-ひずみ曲線とエネルギーの関係

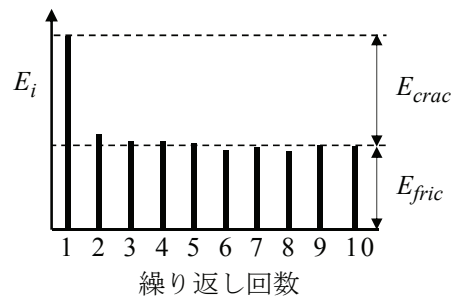


図-2 繰返し載荷時の損失エネルギーの変化例

ば5サイクル程度で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載荷除荷にもなって閉開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¹²⁾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、

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

ここに、 E_{oxc} : ひび割れ進展エネルギー (N・m)

E_{i1} : 初回繰返し時の損失エネルギー (N・m)

E_{fric} : 摩擦損失エネルギー (N・m)

最知・四戸¹³⁾は、コンクリートの連続繰返し載荷に伴う変形挙動の重要な変化がほぼ5サイクルまでで収束すると報告している。本研究においても、第5サイクルで E_i が収束したものとみなし、第5～第10サイクルにおける E_i の平均を摩擦損失エネルギー E_{fric} とし、第1サイクル

の損失エネルギー E_{fl} 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、本論文では各エネルギー値(単位: $N \cdot m^2$)に供試体の体積(単位: m^3)を乗じ、供試体あたりの値に換算したエネルギー値(単位: $N \cdot m$)で表す。

3. 静的圧縮応力を受けるモルタルおよびコンクリート内部微細ひび割れの発生・伝播に及ぼす含水率の影響

(1) 実験概要

a) 使用材料、配合および供試体の形状寸法

セメントには普通ポルトランドセメント(密度 $3.16g/cm^3$, 比表面積 $3260cm^2/g$)、細骨材には海砂(表乾密度 $2.59g/cm^3$, 吸水率 1.56%)、粗骨材には砕石2005(表乾密度 $2.86g/cm^3$, 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。モルタルおよびコンクリートの配合条件と単位量を表-1に示す。供試体の形状寸法は $\phi 75 \times 150mm$ の円柱とした。

b) 供試体含水率の調整

図-3に供試体の養生条件および含水率の調整方法を示す。供試体は打設後24時間で脱型し、その後約90日間 $20^\circ C$ 水中にて標準養生を施した。その後、同図中に示す手順にて含水率を調整し、供試体の質量が安定し試験期間中に大幅な質量変化がないとみなされる時点で荷重試験を実施した。なお、供試体グループは、水中養生後恒温恒湿室内($20^\circ C$, $60\%RH$)で乾燥させた供試体グループA、水中養生後 $50^\circ C$ 乾燥炉にておける乾燥を経て $90^\circ C$ 乾燥炉で乾燥させた供試体グループ D_{90} 、水中養生後 $50^\circ C$ 乾燥および $90^\circ C$ 乾燥を経て再び水中に戻し、質量一定となるまで吸水させた供試体グループWの3種類である。表-2にそれぞれの供試体グループについて、91日

間 $20^\circ C$ 水中養生完了時の供試体質量(供試体45本の平均値)および荷重試験直前の供試体質量(供試体各15本の平均値)を示す。変動係数の大きさより、測定値にそれほど大きなばらつきはないといえる。調整前後の供試体質量の変化量はW, A, D_{90} の順に少なく、この順で含水率は高いと考えられる。

c) 荷重試験方法

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 $0.2N/mm^2/sec$ とした。荷重試験時に供試体縦方向に検長 $60mm$ のひずみゲージを左右2枚専用接着剤にて貼付し縦ひずみを測定した。水中における荷重試験はアクリル水槽に液体を満ちし、その中にコンクリート供試体を完全に浸した状態でおこなった。この際、ひ

表-2 91日水中養生後および荷重試験直前の供試体質量

供試体グループ	91日間 $20^\circ C$ 水中養生完了時の供試体質量(g)	荷重試験直前の供試体質量(g)		
		A	D_{90}	W
M45	1455 (1.2%)	1412 (0.5%)	1326 (0.7%)	1448 (1.5%)
C35	1610 (0.8%)	1600 (0.9%)	1525 (0.5%)	1600 (0.9%)
C45	1590 (0.9%)	1560 (0.7%)	1507 (1.1%)	1585 (0.9%)

(数値%)は変動係数

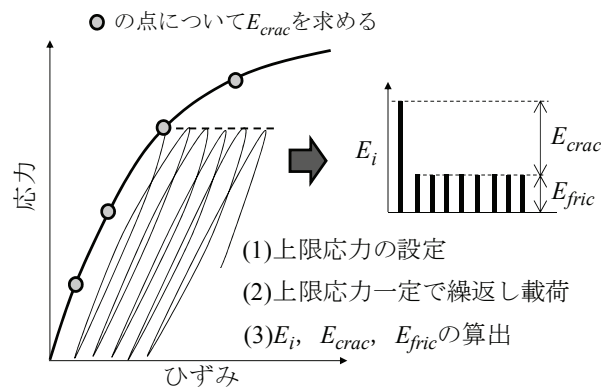


図-4 荷重試験の手順と各エネルギーの定量化方法

表-1 モルタルおよびコンクリートの配合条件と単位量

セメント硬化体の種類	記号	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m^3)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
モルタル	M45	45	-	265	589	1425	-
コンクリート	C35	35	43	170	486	703	1029
	C45	45	45	170	378	776	1047

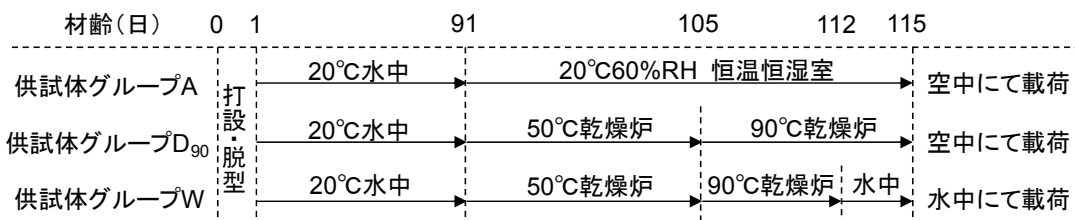


図-3 供試体の養生条件および含水率の調整方法

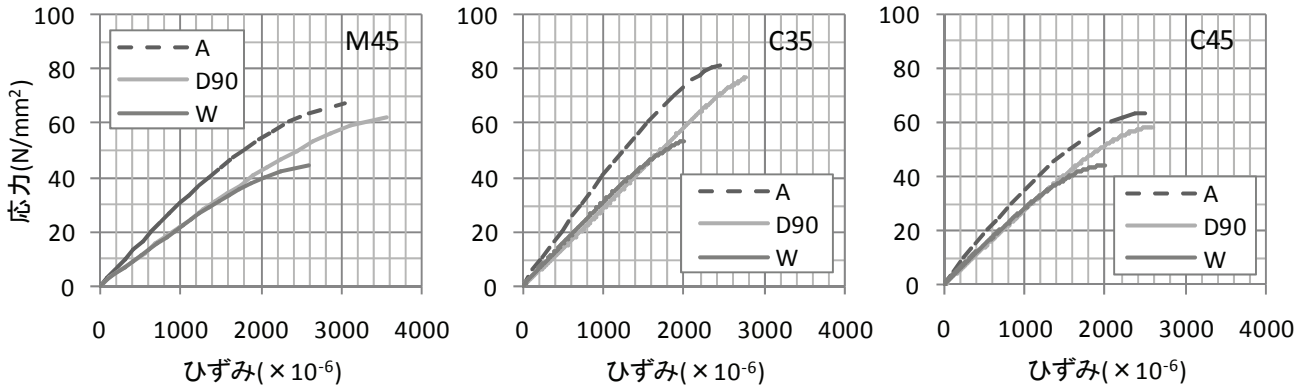


図-5 静的漸増荷荷による応力-ひずみ曲線

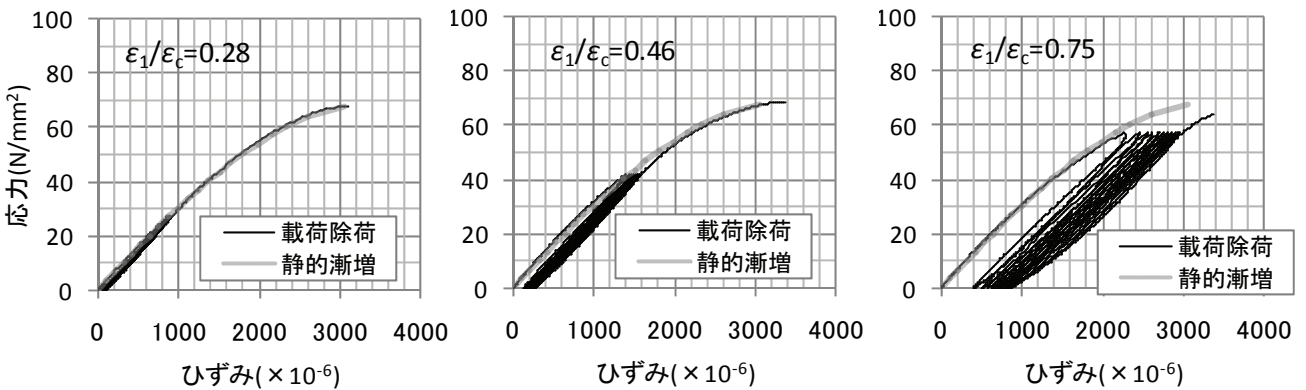


図-6 載荷除荷曲線 (M45, 供試体グループ A)

ずみゲージの露出した金属部が水分と接することでひずみの計測値が影響を受けることを避けるため、貼付したひずみゲージの表面をろうで完全にコーティングした。

図-4に載荷試験の手順と各エネルギーの定量化方法を示す。まず、通常の静的漸増荷荷を行って応力-ひずみ曲線を求め(供試体本数: 3)、最知・四戸¹⁴⁾の方法(複数の応力度-ひずみ度曲線を平均化する方法)によって平均化した。平均化された応力-ひずみ曲線を基に繰返しの上限応力を数点設定(静的漸増荷荷試験における最大応力時ひずみの約30, 50, 65%のひずみに対応する応力および最大応力の約90%となる応力)し、それらを上限とする完全片振り繰返し載荷(下限応力=0N/mm²)を10サイクルおこなった(供試体本数: 各上限応力につき1)。このようにしてそれぞれの上限応力に対する E_{t1} , E_{frc} および E_{orc} を算定し、静的圧縮過程におけるコンクリート内部の微細ひび割れの発生・伝播状況について調べた。

(2) 実験結果および考察

a) 静的漸増荷荷による応力-ひずみ曲線

図-5にモルタル (M45), コンクリート (C35, C45)の静的漸増荷荷による応力-ひずみ曲線(最知・四戸¹⁴⁾の方法により平均化したもの)を示す。最大応力すなわ

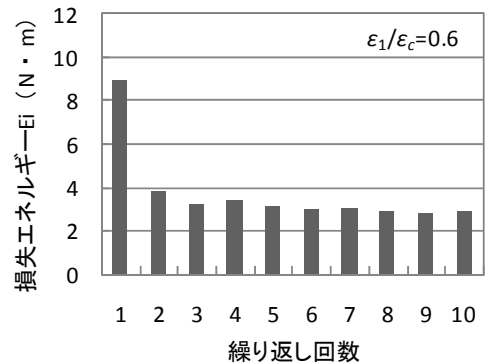


図-7 繰返し回数による損失エネルギー変化の一例 (M45, 供試体グループ A)

ち圧縮強度は $A > D_{90} > W$ の順となっている。供試体グループ D_{90} と W と比較すると、乾燥条件が同一であることから乾燥による微細ひび割れの発生状況はほぼ同等であると推察され、最大応力の差異は供試体内部の水分の有無によるものと考えられる。一般に、供試体の含水率が高いほど最大応力は低下するが、本実験結果において、供試体グループAは供試体グループ D_{90} よりも含水率が高いにもかかわらず最大応力がやや大きくなっている。この理由として、供試体グループAは乾燥炉による強制的な乾燥を受けていないために、乾燥による微細ひび割れの発生量が少なかったことが考えられる。これは、応力-

ひずみ曲線の傾きが、供試体グループD₉₀とWではほぼ同程度であるのに対し、供試体グループAではそれらと比べて急勾配になっていることから推察される。また、最大応力時のひずみは、いずれの配合についても供試体の含水率が高いほど小さくなっていることがわかる。このことは既往の知見¹⁵⁾と一致する。

b) 載荷除荷による応力-ひずみ曲線 (載荷除荷曲線)

図-6に載荷除荷曲線の一例を、M45の供試体グループAについて示す。同図中、 ϵ_1 は初回繰返し時の上限ひずみを、 ϵ_c は静的漸増載荷試験における最大応力時のひずみを表し、本論文では ϵ_1/ϵ_c をひずみ比と称する。図中には静的漸増載荷時の応力-ひずみ曲線を併せて示した。繰返しのサイクル数が増えるにつれ、上限ひずみ、残留ひずみともに増加し、その大きさは上限応力が高くなるほど大きくなっている。また、繰返し載荷の後、供試体が最大応力に達するまで再び漸増載荷をおこなったときの曲線は、上限応力が低い場合には静的漸増載荷時の曲線とよく一致するが、上限応力が高い場合には最大応力

時ひずみが若干大きくなる傾向にある。上記の傾向は、全ての実験ケースについて同様であった。

c) 繰返し回数にともなう損失エネルギーの変化

図-7に載荷除荷曲線より損失エネルギー E_i を算定してサイクル順に並べた結果の一例を示す。既往の知見⁸⁾と同様に E_i は初回繰返し時に最も大きく、その後は小さくなるのがわかる。これは、全ての実験ケースについて同様であった。

d) 各エネルギーの算定結果

表-3に各エネルギーの算定結果の一覧を示す。ひずみ比 ϵ_1/ϵ_c が増大すると、全ての損失エネルギーが増大することがわかる。また、初回繰返し時の損失エネルギー E_{i1} に占めるひび割れ進展エネルギー E_{crac} の割合は、同一の供試体グループであればひずみ比が異なってもほぼ一定値をとり、供試体の含水率が高いほどその割合は小さくなっている。これは、含水率の低いコンクリートでは水分子の吸着が減ることによりひび割れ進展に必要な表面エネルギーが増加すること、あるいは固相間からし

表-3 初回繰返し時の損失エネルギー、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

M45						C35						C45					
供試体グループ	ϵ_1/ϵ_c	E_{i1}	E_{fric}	E_{crac}	E_{crac}/E_{i1}	供試体グループ	ϵ_1/ϵ_c	E_{i1}	E_{fric}	E_{crac}	E_{crac}/E_{i1}	供試体グループ	ϵ_1/ϵ_c	E_{i1}	E_{fric}	E_{crac}	E_{crac}/E_{i1}
		N・m						N・m						N・m			
A	0.28	0.9	0.3	0.6	0.68	A	0.33	1.2	0.4	0.8	0.69	A	0.34	2.0	0.6	1.5	0.72
	0.46	4.1	1.3	2.7	0.67		0.46	3.3	1.0	2.3	0.69		0.56	6.3	2.0	4.4	0.69
	0.61	9.0	2.9	6.0	0.67		0.50	3.6	1.2	2.5	0.68		0.67	10.9	3.2	7.7	0.70
	0.67	11.7	3.8	7.9	0.67		0.63	6.2	2.1	4.0	0.65		0.70	11.2	3.5	7.8	0.69
	0.75	17.4	6.1	11.3	0.65		0.76	12.5	4.1	8.4	0.67		0.80	16.1	4.7	11.4	0.71
D ₉₀	0.33	1.7	0.4	1.3	0.78	D ₉₀	0.35	1.9	0.4	1.5	0.79	D ₉₀	0.32	1.2	0.3	0.9	0.79
	0.51	5.0	0.9	4.2	0.83		0.36	1.7	0.4	1.3	0.78		0.47	3.1	0.6	2.5	0.81
	0.68	11.4	1.8	9.6	0.84		0.47	3.1	0.6	2.5	0.81		0.66	7.8	1.2	6.7	0.85
	0.82	19.5	3.1	16.4	0.84		0.50	3.9	0.7	3.2	0.81		0.71	9.3	1.8	7.6	0.81
	0.47	2.1	0.9	1.2	0.59		0.64	8.5	2.5	6.0	0.71		0.85	16.1	2.7	13.3	0.83
W	0.70	6.8	2.7	4.1	0.60	D ₉₀	0.77	13.3	2.2	11.1	0.84	W	0.34	0.8	0.3	0.4	0.56
	0.73	7.5	3.1	4.4	0.59		0.80	12.7	2.5	10.2	0.80		0.50	1.8	0.6	1.2	0.65
							0.35	1.0	0.4	0.7	0.65		0.69	4.0	1.5	2.5	0.63
							0.46	1.8	0.6	1.1	0.66		0.74	6.2	2.8	3.4	0.54
							0.64	4.5	1.7	2.8	0.62		0.80	6.6	3.3	3.3	0.50
					0.71	6.0	2.2	3.8	0.63	0.86	7.6	3.5	4.0	0.54			
					0.79	7.8	3.0	4.9	0.62								

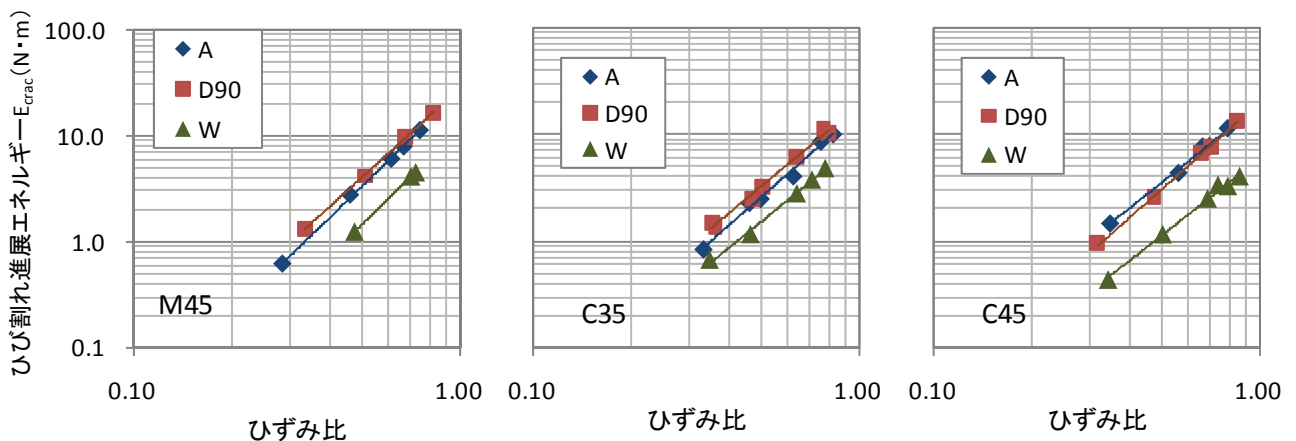


図-8 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係 (両対数グラフ)

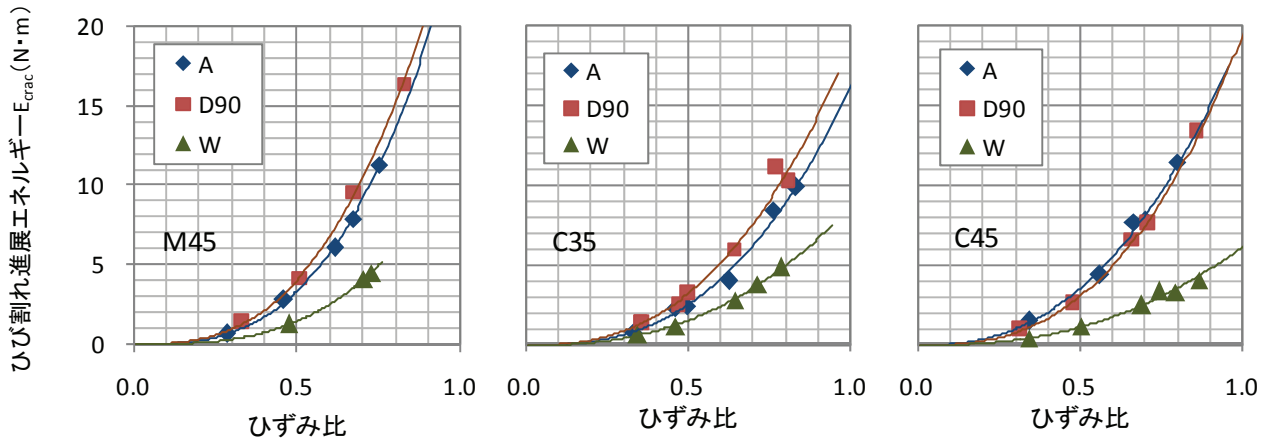


図-9 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係 (線形グラフ)

より出される吸着水が少ないことなどによって、水分の移動に基づく変形よりも微細ひび割れの進展に基づく変形が卓越する⁸⁾ことを示していると考えられる。

e) ひび割れ進展エネルギーとひずみ比の関係

図-8にひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係について、両対数グラフ上にプロットしたものを示す。全ての実験ケースについて、ひずみ比の対数とひび割れ進展エネルギーの対数は直線関係にあり、ひび割れ進展エネルギーはひずみ比の累乗関数で表すことができる。

$$E_{crack} = \alpha \cdot (\epsilon_1 / \epsilon_c)^\beta \quad (3)$$

ここに、 E_{crack} : ひび割れ進展エネルギー (N・m)

ϵ_1 : 初回繰返し時の上限ひずみ

ϵ_c : 静的載荷試験による最大応力時のひずみ

α, β : 実験定数

なお、図-8 の関係を線形グラフ上にプロットすると図-9 のようである。

式(3)中の実験定数の大きさについて最小二乗法で求めた結果の一覧を表-4 に示す。実験定数のうち、 β 値はM45で2.8~3.2, C35で2.5~2.7, C45で2.4~2.7であり、配合ごとにほぼ一定値をとることがわかる。モルタルはコンクリートと比較してやや β 値が大きいですが、コンクリートでは水セメント比によらずほぼ同等である。一方、 α 値はM45で11.8~28.2, C35で8.5~18.8, C45で6.1~19.5であり、同一配合であっても供試体の含水率が異なることで大きな幅が生じている。

ここで、 α 値はひずみ比が1のとき、すなわち最大応力時のひび割れ進展エネルギー E_{crack} の大きさを表すものと考えられるが、供試体の含水率が高いほど、すなわちW, A, D₉₀の順に小さくなっている。また、次元を考慮してひび割れ進展エネルギー E_{crack} (N・m) 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 E_c (N/m) と微細ひび割れの総表面積 A_c (m²) の積であると考えられる。

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

したがって α 値が供試体の含水率の増大とともに低下し

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

供試体グループ	M45			C35			C45		
	α	β	重相関係数R ²	α	β	重相関係数R ²	α	β	重相関係数R ²
A	26.6	3.0	0.999	16.1	2.7	0.991	19.4	2.4	0.995
D ₉₀	28.2	2.8	0.999	18.8	2.5	0.990	19.5	2.7	0.998
W	11.8	3.0	0.999	8.5	2.5	0.995	6.1	2.4	0.993

たことは「コンクリート内部に存在する水分の吸着により微細ひび割れの形成に必要な表面エネルギーが減少した」あるいは「微細ひび割れの総表面積が減少した」ことを表していると考えられるが、ここでは断言できない。

4. 静的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・伝播に及ぼす浸漬液体の表面張力の影響

ひび割れ進展エネルギー E_{crack} は供試体の含水率によって変化し、同一ひずみ比では含水率が高いほど小さくなることが明らかとなった。このことは微細ひび割れを形成するための表面エネルギーが水分の吸着によって減少することを表しているとも考えられるが、確認には至らなかった。そこで、静的圧縮応力を受けるコンクリート内部における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実験を実施した。

(1) 実験概要

a) 使用材料, 配合および供試体の形状寸法

セメントには普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³, 比表面積3260cm²/g), 細骨材として海砂(表乾密度2.56g/cm³, 吸水率1.32%), 粗骨材として碎石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リ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条件および単位量を表-5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。供試体の形状寸法は $\phi 75\times 150\text{mm}$ の円柱とした。

b) 供試体の養生方法と浸漬液体の種類

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施した。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載荷試験を実施した。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載荷試験を実施した。

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。括弧内の表面張力は界面張力計によって測定された液温 20°C における数値である。ただし、気中試験については液体の表面張力を 0dyn/cm と仮定した。

c) 載荷試験方法およびエネルギーの定量化

載荷試験には 2000kN 耐圧試験機を使用し、載荷速度は応力制御で $0.2\text{N/mm}^2/\text{sec}$ とした。供試体縦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枚専用接着剤にて貼付し、縦ひずみおよび横ひずみを計測した。液体中における載荷試験はアクリル水槽に液体を満たし、その中にコンクリート供試体を完全に浸した状態でおこなった。このとき、ひずみゲージの露出した金属部が液体と接することでひずみの計測値が影響を受けることを避けるため、貼付したひずみゲージの表面をろうで完全にコーティングした。エネルギー定量化の手順は3. (1)c)で述べた方法と同様である。

d) 載荷試験後の供試体における超音波伝播速度の測定

載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、上限応力一定のもとで繰返し載荷を10サイクルおこなった供試体を用いて超音波伝播速度の測定をおこなった。なお、本実験では10サイクルの繰返し載荷の後、同一供試体による静的漸増載荷は実施していない。

超音波の種類は縦波および横波の2種類であり、超音波伝播速度測定装置(印加電圧: 1kV , 振動子周波数:

表-5 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

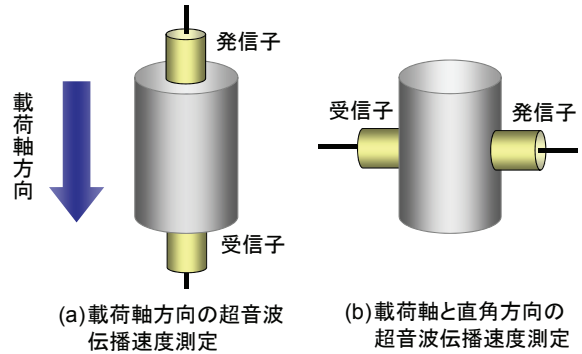


図-10 超音波伝播速度の測定方向

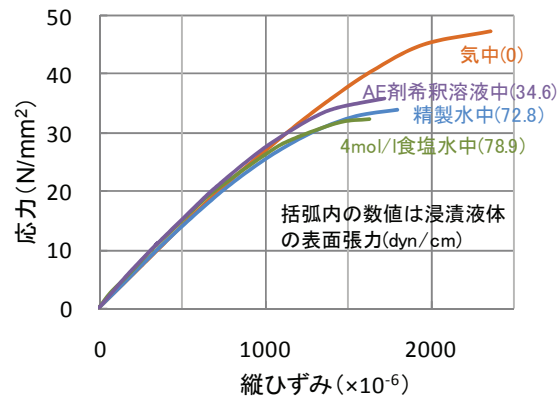


図-11 静的漸増載荷による応力と縦ひずみの関係

50kHz)を用いて測定した。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した。

図-10に超音波伝播速度の測定方向を示す。供試体載荷軸方向については断面中央部にて2回ずつ、載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箇所にて3回ずつ測定した。

圧縮載荷履歴を受けるコンクリート内部の微細ひび割れは載荷軸方向と平行な方向により多く発生し、微細ひび割れの発生量は載荷軸方向と直角方向(図-10における(b)で示される方向)の超音波伝播速度の低下として現れる¹⁰⁾ことが予想される。

(2) 実験結果および考察

a) 静的漸増載荷による応力-ひずみ曲線

図-11に静的漸増載荷試験による応力と縦ひずみの関係を示す。供試体各3本についての結果を最知・四戸¹⁴⁾

の方法によって平均化したものである。最大応力時のひずみについて、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ことで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¹⁵⁾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わかる。これも既往の報告⁶⁾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-12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確認される。

図-13に静的漸増荷試験による応力と体積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・四戸¹⁴⁾の方法を参考にして平均化したものである。体積ひずみ ϵ_{vol} は次式により求めた。

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_v + 2\epsilon_h \quad (5)$$

ここに、 ϵ_v は縦ひずみ（正值）であり、 ϵ_h は横ひずみ（負値）である。浸漬液体の表面張力の違いにより、応力と体積ひずみの関係は顕著に異なる結果となった。

コンクリート供試体を圧縮荷した場合、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積ひずみ、および最大応力時の体積ひずみの大きさをまとめて表-6に示す。収縮から膨張に転じる時点の体積ひずみは、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。最大応力時の体積ひずみについては、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のがわかる。最終的な体積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、微細ひび割れの開口幅やそれぞれの長さ等にも関係すると考えられ、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考えている。

b) 繰返し荷除荷試験による各エネルギーの算定結果

繰返し荷除荷試験を実施し、エネルギーの定量化をおこなったところ、荷除荷曲線の形状、損失エネルギーの変化とともに図-6および図-7で示される傾向と同様であることを確認した（ただし、繰返し荷を10サイクルおこなった後の静的漸増荷は実施しなかった）。

表-7に全ての実験ケースにおける各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試験時に供試体が破壊したため、2データのみ結果を示す。ひずみ比 ϵ_1/ϵ_c が増大すると全

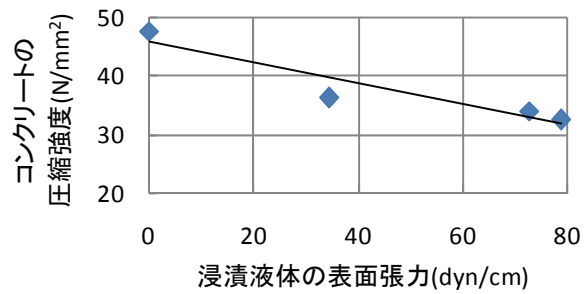


図-12 浸漬液体の表面張力とコンクリートの圧縮強度の関係

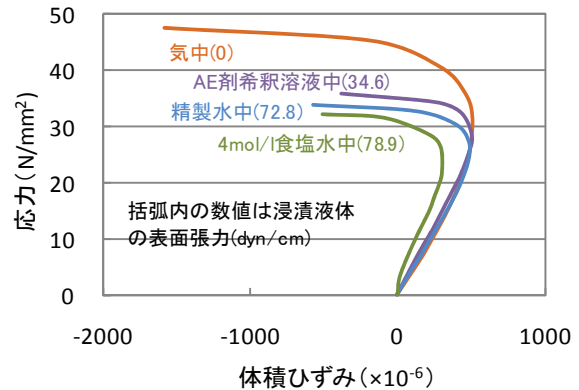


図-13 静的漸増荷による応力と体積ひずみの関係

表-6 収縮から膨張に転じる時点および最大応力時における体積ひずみ

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 ($\times 10^{-6}$)	最大応力時の体積ひずみ ($\times 10^{-6}$)
気中	0	512	-1578
AE剤希釈溶液中	34.6	507	-377
精製水中	72.8	493	-570
塩水中	78.9	291	-511

表-7 初回繰返し時の損失エネルギー、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	ϵ_1/ϵ_c	E_{i1}	E_{fric}	E_{crac}	E_{crac}/E_{i1}
		N·m			
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

てのエネルギーが増大することがわかる。また、表-3より初回繰返し時の損失エネルギー E_{il} に占めるひび割れ進展エネルギー E_{oxc} の割合は、コンクリートの配合および含水率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。本章の実験結果についても、ひずみ比によらずそれぞれの試験条件において E_{oxc}/E_{il} がほぼ同程度となる傾向が認められる。

c) ひび割れ進展エネルギーとひずみ比の関係

図-14にひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係を示す。図-9で示される結果と同様に、ひび割れ進展エネルギーはひずみ比の累乗曲線で良好に近似できる。

表-8に本章の実験により算定された式(3)中の実験定数の一覧を示す。実験定数のうち、 β 値は1.91~3.04の範囲で変動しているが特に規則性は認められない。一方 α 値は、式(3)からわかるようにひずみ比が1の時点（すなわち最大応力時）のひび割れ進展エネルギー E_{oxc} の大きさを表すが、浸漬液体の表面張力が大きくなるほど小さい値を示した。

浸漬液体の表面張力と α 値（最大応力時におけるひび割れ進展エネルギーの推定値）の関係を図-15に示す。浸漬液体の表面張力が大きくなるにつれ、最大応力時における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。

d) 载荷試験後の供試体における超音波伝播速度

図-16~図-19に上限応力を一定として繰返し载荷を10サイクル実施した供試体について、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。

载荷軸方向（図-16および図-18）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、载荷軸と直角方向（図-17および図-19）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、圧縮応力を受けるコンクリート供試体内部には載

表-8 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	重相関係数 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

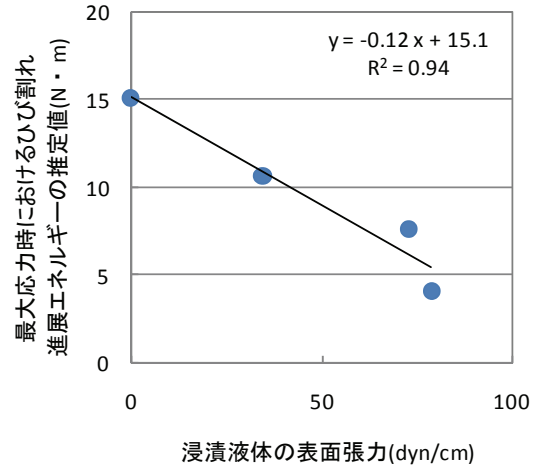


図-15 浸漬液体の表面張力と最大応力時のひび割れ進展エネルギーの推定値の関係

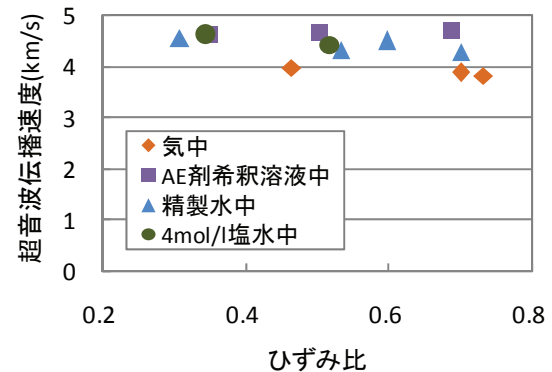


図-16 ひずみ比と超音波伝播速度の関係 (载荷軸方向, 縦波)

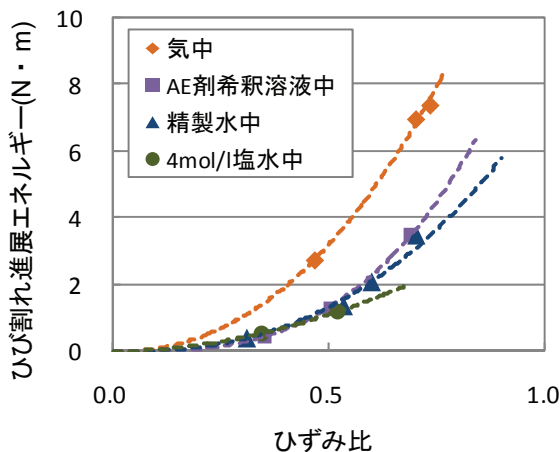


図-14 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係

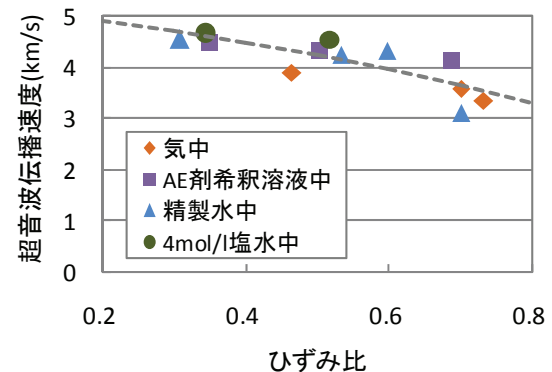


図-17 ひずみ比と超音波伝播速度の関係 (载荷軸と直角方向, 縦波)

荷軸方向に微細ひび割れが進展する¹⁶⁾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いるため、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は読み取れず、今回の試験条件下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と考えている。

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、荷軸と直角方向の超音波伝播速度とひずみ比の関係は一本の近似曲線で近似できる。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、供試体の乾湿状態や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（式(4)における A_c ）は同程度である可能性が高い。したがって、最大応力時に供試体内部に発生している微細ひび割れ量も乾湿状態や浸漬液体の種類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 ）の変化を表すといえる。よって、図-15に示されるように最大応力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減少することは、液体浸漬によりコンクリートが最大応力（静的圧縮強度）に達するために必要な微細ひび割れが乾燥時よりも少ないエネルギー量で形成されることを意味しており、その結果として液体中におけるコンクリートの静的圧縮強度が低下すると考えられる。

5. 結論

液体浸漬によりコンクリートの静的圧縮強度が低下する原因を明らかとするため、圧縮破壊過程に関してエネルギー的に考察した。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) ひび割れ進展エネルギー E_{oxc} は初回繰返し時の損失エネルギー E_{il} に比例して増加するが、 E_{il} に占める E_{oxc} の割合 E_{oxc} / E_{il} は、配合、含水率および浸漬液体の表面張力が同一であれば、ひずみ比の大きさによらず常に一定であり、 E_{oxc} / E_{il} の値は供試体の含水率が高いほど、また浸漬液体の表面張力が高いほど小さくなる。
- (2) コンクリートの静的圧縮破壊過程において、ひび割れ進展エネルギーはひずみの増大にともなって累乗的に増加する。
- (3) 次元を考慮して、ひび割れ進展エネルギー（N・m）は微細ひび割れ形成時の表面エネルギー（N/m）と

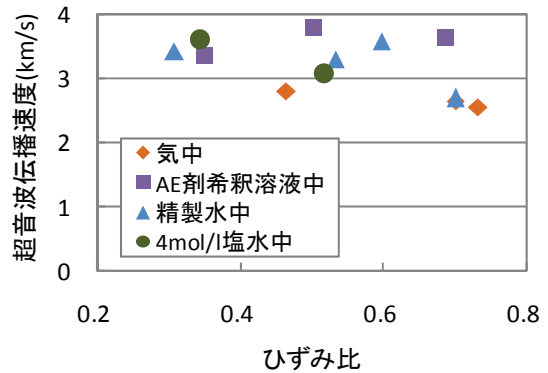


図-18 ひずみ比と超音波伝播速度の関係
(荷軸方向, 横波)

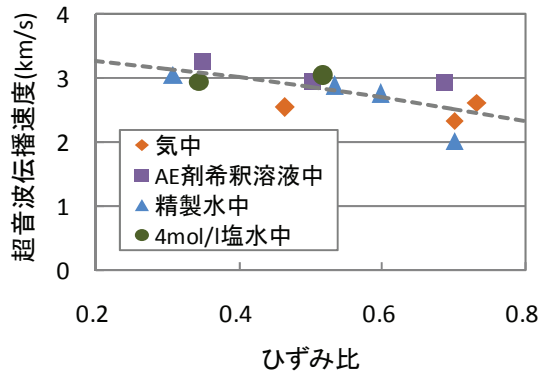


図-19 ひずみ比と超音波伝播速度の関係
(荷軸と直角方向, 横波)

総表面積（ m^2 ）の積であると考えられる。

- (4) ひび割れ進展エネルギーはひずみ比が同一であればコンクリートの含水率が高いほど、また浸漬液体の表面張力が高いほど減少する。
- (5) 供試体内部に発生している微細ひび割れの総表面積は、ひずみ比が同一であれば浸漬液体の表面張力の大きさによらず同程度と推察される。
- (6) (3)および(5)の結論より、ひび割れ進展エネルギーの変化は微細ひび割れ形成時の表面エネルギーの変化を表しており、(4)の結論を踏まえると、液体浸漬によって微細ひび割れ形成時の表面エネルギーが低下し、その結果としてコンクリートの静的圧縮強度の低下が生じると考えられる。

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の低下には、表面エネルギーの低下が大きく関係している。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、水よりも高い表面張力を持つ海水中においてはコンクリートの静的圧縮強度が水中におけるそれよりもさらに低下する可能性があり、海洋コンクリート構造物の安全性の確保にあたっては慎重な検討が必要である。

謝辞：本研究の一部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。ここに付記し謝意を表します。

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，Vol.36，pp.211-213，1982.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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[7]，C268-C273，1962.
- 5) 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.
- 6) Matsushita, H. and Onoue, K. : Influence of Surface Energy on Compressive Strength of Concrete under Static and Dynamic Loading, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.3, pp.409-421, 2006.
- 7) 大塚浩司，武田三弘：X線造影撮影によるコンクリート構造物内部のひび割れ検出技術の開発に関する研究，土木学会論文集，No.725/V-58，pp.143-156，2003.
- 8) 岡田清，小柳洽，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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Saichi, M. and Shinohe, H. : Elastic Modulus Variation of Concrete Subjected to Low Number Cyclic Loadings, *Proceedings Concrete under Severe Conditions : Environment and Loading*, Vol. 2, pp. 1675-1683, 1995.
- 14) 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.
- 15) 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，土木学会論文報告集，No.245，pp.65-76，1976.
- 16) 松下博通，牧角龍憲：繰返し圧縮応力を受けるコンクリートの変形状，第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.77-80，1979.

(2008. 2. 26 受付)

ENERGY CONSIDERATION ON STRENGTH DECREASE OF CONCRETE DUE TO IMMERSION OF LIQUID

Kouzou ONOUE and Hiromichi MATSUSHITA

In order to clarify the lowering effect of immersion liquid on the compressive strength of concrete, nucleation of internal cracks under static compression was investigated on the basis of surface energy. The energy consumed in the nucleation of cracks is calculated from the area of hysteresis loop on stress-strain relation in the compression test. As a result, it is found that the calculated energy is closely related to the surface energy in the nucleation of cracks. It is also found that the energy increases exponentially with the increase of strain, and decreases with the increase of moisture contents or surface tension of immersion liquid under the same strain ratio. Consequently, it can be concluded that the decrease of compressive strength of concrete due to immersion of liquid results from the decrease of surface energy consumed in the nucleation of internal cracks.