

セメント硬化体中の水が圧縮破壊過程に及ぼす影響

九州大学大学院 学生会員 福山 幹康 九州大学大学院 フェロー 松下 博通
九州大学大学院 正会員 鶴田 浩章 九州大学大学院 学生会員 尾上 幸造

1. はじめに

水分の存在によりセメント硬化体の圧縮強度が低下することは広く知られているが、その原因については諸説があり、統一的な説明はされていない。

本研究では、含水量の異なるコンクリートおよびモルタルについて繰返し載荷を行い、圧縮破壊過程における水の影響についてエネルギー的な観点から考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料、配合および養生

本研究では、セメントとして普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)、細骨材として海砂(表乾密度 2.57g/cm^3 、吸水率 1.56% 、粗粒率 2.67)、粗骨材として碎石(表乾密度 2.89g/cm^3 、吸水率 1.10% 、最大寸法 20mm)を使用した。コンクリートおよびモルタルの配合を表-1 に示す。なお、本文では供試体の分類を表-1 の記号で表す。

供試体はコンクリート、モルタルともに $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ の円柱供試体とし、打設後 24 時間で脱型、材齢 91 日まで 20°C 水中養生を行った。水中養生終了後、供試体中の水分量を調節するために種々の環境条件下に静置し、その後載荷試験を行った。環境条件を表-2 に示す。

2.2 実験方法

本実験では、 2000kN 耐圧試験機を用いて、単調増加載荷試験における最大応力時ひずみの約 35% 、 50% 、 65% 、最大応力の 90% となる応力について片振り繰返し載荷を行った。繰返し回数は 10 回とし、11 回目の載荷で供試体を破壊させた。ひずみは供試体側面 2 箇所に貼付したひずみゲージ(検長 60mm)により測定した。

エネルギーの定量化は岡田ら¹⁾の方法に従った。載荷、除荷を行った際の応力-ひずみ曲線とエネルギーの関係を図-1 に示す。外力により与えられた総エネルギー(OCABO の面積)は、損失エネルギー E_l (OCADEO の面積)と弾性ひずみエネルギー E_r (ADEBA の面積)に分けられる。同一応力で繰返し載荷を行った際の E_l を並べると図-2 のようになる。 E_l の値は初回の繰返しで最も大きく、2 回目以降では徐々に一定値に収束していく。この一定値となった E_l は、ほぼ全てが液相内での粘性摩擦や固相内でのずれを生じるための摩擦損失エネルギー E_{fric} として消費されると考えられる。 E_{fric} が初回繰返し時においても同様に生じているとすると、初回の損失エネルギー E_{il} と E_{fric} の差がひび割れを進展させるために使われたエネルギー E_{crac} となる。

表-1 コンクリートおよびモルタルの配合

供試体の分類	記号	W/C	W	C	S	G
		%	kg/m^3			
コンクリート	C35	35	170	486	703	1029
	C45	45	170	378	776	1047
モルタル	M45	45	264	587	1418	-

表-2 環境条件

材齢(日)	1	91	105	112	115	載荷試験の有無		
養生期間	91日	14日	7日	3日		C35	C45	M45
記号	20°C	温度20°C、湿度60%恒温恒湿室				○	○	○
	50°C	50°C乾燥炉				×	×	○
	90°C	50°C乾燥炉 90°C乾燥炉				○	○	○
	水中	50°C乾燥炉 90°C乾燥炉 水中浸漬				○	○	○
	大気中	大気中(室内)暴露				×	×	○

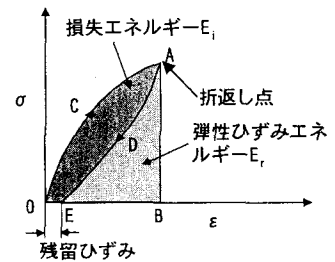


図-1 応力-ひずみ曲線とエネルギーの関係

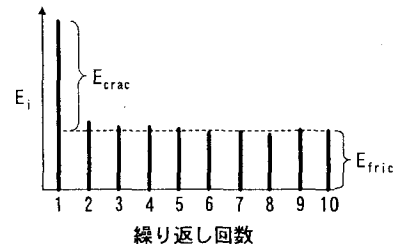


図-2 繰返し載荷時の損失エネルギーの変化

表-3 試験時における逸散水量

	逸散水量(g)				
	20°C	50°C	90°C	水中	大気中
C35	15.8	-	78.5	6.6	-
C45	25.0	-	84.8	8.0	-
M45	28.8	82.0	133.4	13.7	31.3

表-4 圧縮強度および最大応力時のひずみ

	20°C		50°C		90°C		水中		大気中	
	σ_c	ϵ_c	σ_c	ϵ_c	σ_c	ϵ_c	σ_c	ϵ_c	σ_c	ϵ_c
	(N/mm^2)	(μ)	(N/mm^2)	(μ)	(N/mm^2)	(μ)	(N/mm^2)	(μ)	(N/mm^2)	(μ)
C35	75.4	2231	-	-	70.3	2826	52.9	1907	-	-
C45	66.0	2460	-	-	52.6	2928	44.2	1998	-	-
M45	64.8	3056	62.8	3011	59.2	3627	40.6	2426	65.6	3308

本研究では応力-ひずみ曲線から定量化したエネルギーの値 (N/mm^2) を供試体体積を乗じた値 ($\text{N} \cdot \text{m}$) に換算して表す。

3. 結果および考察

表-3 に各要因の 91 日水中養生終了時を基準とした、試験時における逸散水量を示す。水中に関しては逸散水量が 0 に回復していないことから、乾燥中に細孔構造が変化したことが考えられる。

表-4 に単調増加荷試験時の圧縮強度 σ_c および最大応力時のひずみ ϵ_c を示す。逸散水量が多いものほど最大応力時ひずみが大きくなる傾向にある。また、圧縮強度は高温で乾燥させたものほど小さくなる傾向にある。これは、高温で乾燥させた際に供試体内に微細なひび割れが発生したためと考えられる。

図-3 に M45 について繰返し初回の損失エネルギー E_{il} と初回折り返し点のひずみ ϵ_1 の関係を示す。 ϵ_1 と E_{il} は比例関係にあり、より大きなひずみを生じるとより大きなエネルギーが失われることが分かる。なお、90℃のプロットは若干下方へずれた。C35、C45 についても同様の傾向が確認された。

M45 について図-4 にひび割れ進展エネルギー E_{crac} と ϵ_1 の関係を、図-5 に摩擦損失エネルギー E_{fric} と ϵ_1 の関係を示す。 E_{crac} は供試体の含水状態に関係なく全ての要因で、ほぼ一本の曲線上に分布している。一方、 E_{fric} は供試体が高含水状態のものほど、より大きな値を示している。この傾向は C35 および C45 でも確認された。 E_{crac} はセメント硬化体の巨視的な変形に直接対応しているエネルギーであり含水状態の影響を受けないが、 E_{fric} は液相の粘性摩擦や固相のずれに対応したエネルギーであるため、高含水状態のものほど E_{fric} も大きくなったと考えられる。

図-6 に M45 について E_{crac} と ϵ_1/ϵ_c の関係を示す。図中の直線は 90℃の回帰直線、点線は水中の回帰直線である。含水状態に関係なく $\epsilon_1/\epsilon_c = 0.3$ 程度までは $E_{crac} = 0$ となっており、最大応力時のひずみに対して 3 割程度のひずみまでは顕著なひび割れが発生しておらず、弾性域にあると考えてよい。また、回帰直線を外挿して $\epsilon_1/\epsilon_c = 1$ となる点の E_{crac} は供試体が破壊する際のひび割れ量に対応していると考えられるが、高含水状態のものほど小さくなる傾向にある。これは、水分の存在で固体の表面エネルギーが引き下げられることにより、少ないひび割れ量によって供試体が破壊に至ることを示していると考えられる。

4. まとめ

- 1) ひび割れ進展エネルギー E_{crac} は供試体の含水状態に関係なくひずみと比例関係を示しており、セメント硬化体中のひび割れの発生・進展とよく対応した量であると考えられる。
- 2) 摩擦損失エネルギー E_{fric} は含水量が多いものほど大きな値を示しており、液相の粘性摩擦を表現していると思われる。
- 3) E_{crac} と ϵ_1/ϵ_c の関係から、水分によって固体の表面エネルギーが減少し、少ないひび割れ量で供試体が破壊に至る考えられる。

【参考文献】 1) 岡田清ら：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の考察，土木学会論文報告集，No.248，pp.109-119，1976

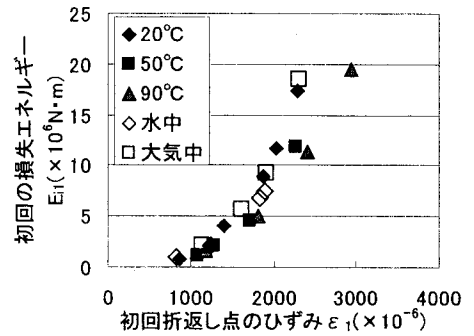


図-3 初回の損失エネルギーと初回折返し点のひずみの関係 (M45)

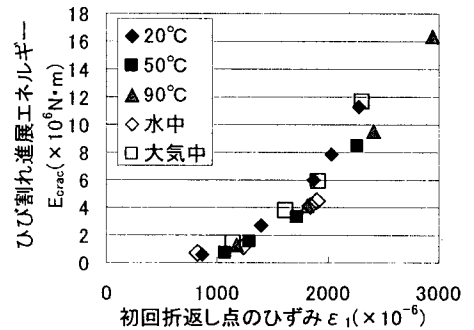


図-4 ひび割れ進展エネルギーと初回折返し点のひずみの関係 (M45)

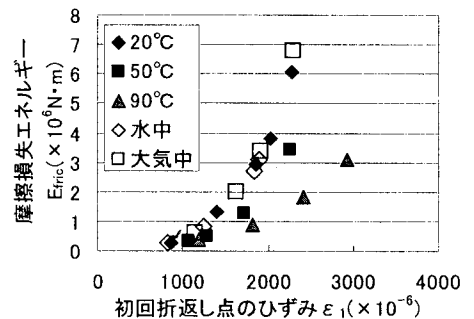


図-5 摩擦損失エネルギーと初回折返し点のひずみの関係 (M45)

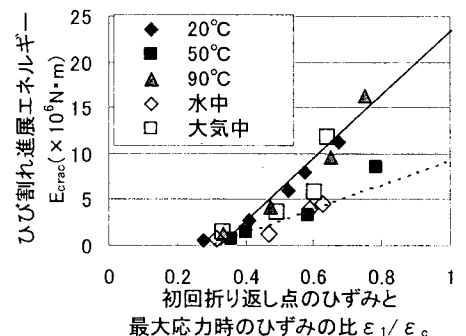


図-6 ひび割れ進展エネルギーと初回折返し点のひずみ比の関係 (M45)