

# 論文 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

尾上幸造<sup>\*1</sup>・松下博通<sup>\*2</sup>・濱田秀則<sup>\*3</sup>・佐川康貴<sup>\*4</sup>

要旨：応力 - ひずみ曲線のヒステリシスの面積より算定される損失エネルギーのうち、ひび割れ進展エネルギーに着目し、静的圧縮力を受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検討した。その結果、損失エネルギーに占めるひび割れ進展エネルギーの割合は、損失エネルギーの大きさによらずつねに一定であること、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こと等が明らかになった。また、最大応力時のひび割れ進展エネルギーは供試体の含水率が高いほど小さくなり、その原因として水分の吸着による表面エネルギーの低下を挙げた。

キーワード：強度，微細ひび割れ，乾湿状態，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する。一般に、湿潤コンクリートの圧縮強度は乾燥コンクリートのそれと比較して 10 ~ 20% 低下する<sup>1)</sup>ことが指摘されている。

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・伝播を経て生じる。故に、乾湿状態によりコンクリートの圧縮強度が変動するのは、内部に存在する水分が微細ひび割れの発生・伝播に影響を及ぼすためと考えられる。

この微細ひび割れを直接的に観察し、定量化することは一般に困難であるが、除荷を含む応力 - ひずみ曲線下の面積で定義される各種エネルギーの値を用いることによって、間接的な評価は可能であると考えられる。

本研究では、応力 - ひずみ曲線のヒステリシスの面積より算定される損失エネルギーのうち、ひび割れの発生・伝播に関連すると考えられる「ひび割れ進展エネルギー」に着目することで、静的圧縮力を受けるコンクリート内部の微細ひ

び割れの進展状況について検討するとともに、それに及ぼす供試体の乾湿状態の影響について考察した。

なお本論文は、過去に報告したモルタルについての実験<sup>2)</sup>にコンクリートの実験を追加し、さらに新たな考察を加えて検討したものである。

## 2. 静的圧縮荷重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<sup>3)</sup>

外力の作用によりコンクリートは変形するが、このとき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えられる。外力を増すことでひずみエネルギーも増大するが、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、供試体に蓄えられた全ひず

\*1 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科助手 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 建設デザイン部門助教授 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手 修士(工学)(正会員)

みエネルギーは弾性ひずみエネルギーおよび損失エネルギーに変換される。

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

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 サイクル行ったときの損失エネルギー $E_i$ 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時に最も大きく、2 回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となる場合を除けば 5 回目以降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载荷除荷に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<sup>4)</sup>と考えるのが妥当である。しかしながら、現段階においてはこれらを厳密に区別する手法が確立されていないこと、また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大きいと予想されることから、本論文で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、損失エネルギーはひび割れ進展エネルギーおよび摩擦損失エネルギーに変換される。

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

ここに、 $E_{i1}$ ：初回の損失エネルギー[N・m]

$E_{crac}$ ：ひび割れ進展エネルギー[N・m]

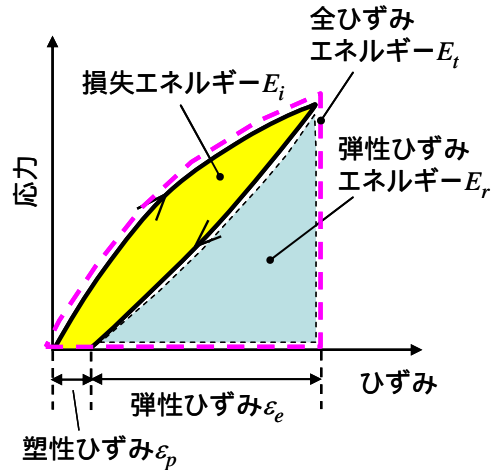


図 - 1 応力 - ひずみ曲線と各エネルギーの関係

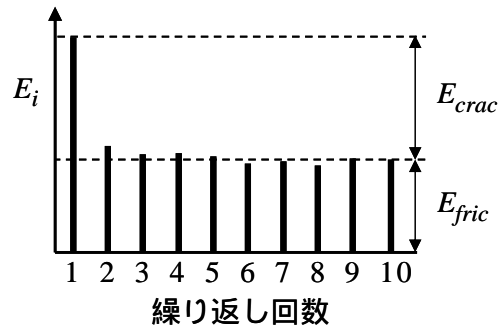


図 - 2 上限応力一定として繰返し载荷を行った際の損失エネルギーの変化

$E_{fric}$ ：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  $3.16\text{g/cm}^3$ ，比表面積  $3260\text{cm}^2/\text{g}$ ），細骨材として海砂（表乾密度  $2.59\text{g/cm}^3$ ，吸水率  $1.56\%$ ），粗骨材として碎石 2005（表乾密度  $2.86\text{g/cm}^3$ ，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を表 - 1 に示す。コンクリートの配合は、スランプが  $10 \pm 2.5\text{cm}$ ，空気量が  $4.5 \pm 1.5\%$ となるよう、化学混和剤の量を調節することにより決定した。供試体は  $7.5 \times 15\text{cm}$  の円柱である。

#### 3.2 供試体含水率の調整方法

コンクリートは打設後 24 時間で脱型し、約 90

表 - 1 コンクリートの配合条件および単位量

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 <sup>3</sup> )			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
コンクリート	C35	35	43	170	486	703	1029
	C45	45	45	170	378	776	1047

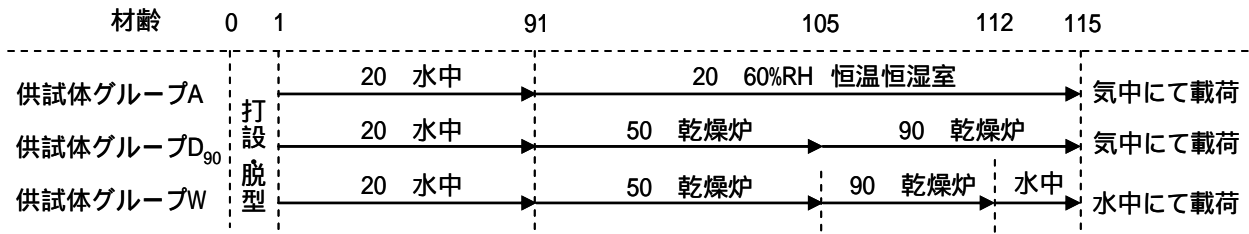


図 - 3 供試体の養生条件

日間 20 の水中にて標準養生を行った。その後、図 - 3 に示す環境条件下に計 3 週間静置し、供試体の質量が安定し試験期間中に大幅な変化がないと判断される時点で載荷試験を行った。なお、含水量の異なる供試体グループは、A、D<sub>90</sub>、W の 3 種類であり、以下図中の凡例ではこれらの記号を使用する。

### 3.3 載荷試験方法

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約 0.2N/mm<sup>2</sup>/sec.とした。載荷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 枚貼付することにより縦ひずみを測定した。

図 - 4 に載荷試験の手順を示す。まず、通常の静的載荷を行って応力 - ひずみ曲線を求めた。次に、繰返しの上限応力を数点設定（静的試験における最大応力時のひずみの約 30、50、65% のひずみに対応する応力および最大応力の約 90% の応力）し、それらを上限とする完全片振り載荷を 10 サイクル行った。このようにしてそれぞれの上限応力に対する  $E_{i1}$ 、 $E_{crac}$  および  $E_{fric}$  を算定し、静的圧縮過程における微細ひび割れの発生・伝播状況について調べた。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 応力 - ひずみ平均曲線

図 - 5 に静的載荷試験による応力 - ひずみ曲

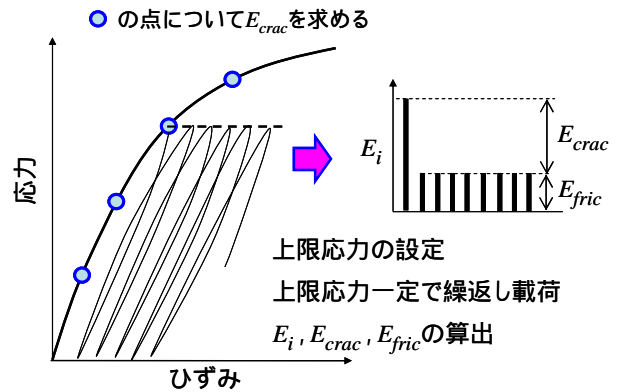


図 - 4 載荷試験の手順

線を示す。それぞれ、供試体 3 本についての結果を最知ら<sup>5)</sup>の方法によって平均化したものである。いずれの配合についても、最大応力は  $A > D_{90} > W$  の順となっている。供試体グループ D<sub>90</sub> および W については、90 乾燥による微細ひび割れの発生状況がほぼ同等であると考えられることから、最大応力の差は供試体内部に存在する水分の影響であることが推察される。供試体グループ A については、乾燥による微細ひび割れの発生量が少なかったために、供試体グループ D<sub>90</sub> よりも最大応力が増大したものと考えられる。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が湿潤状態にあるほど小さくなっていることがわかる。これは既往の知見<sup>6)</sup>と一致する。

### 4.2 載荷除荷曲線と損失エネルギーの変化

図 - 6 に繰返し載荷による載荷除荷曲線の一

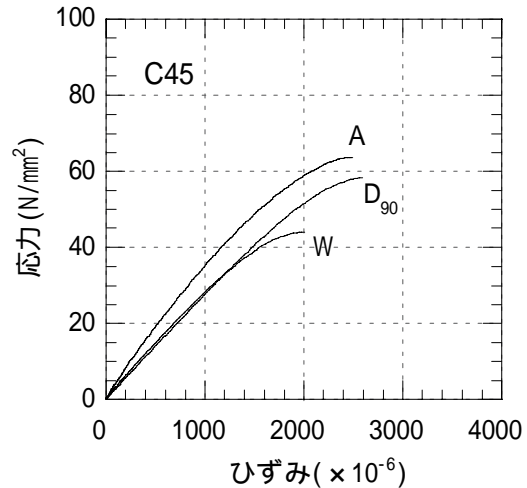
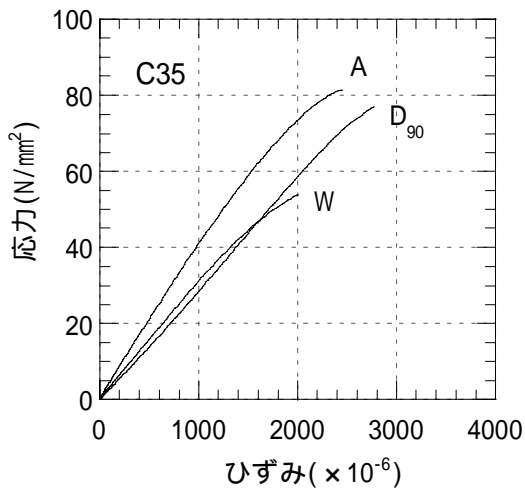


図 - 5 静的載荷試験による応力 - ひずみ曲線

例を示す。載荷除荷の繰返しにともない、塑性ひずみが少しずつ増加していることが分かる。これは 2. で述べたように、塑性変形をともなった微細ひび割れの安定成長によるものと思われる。また、このときの損失エネルギー  $E_i$  の変化を図 - 7 に示す。先に 2. で述べたように、損失エネルギーは初回で最も大きく、その後は大幅に低下していることが読み取れる。これは他のケースでも同様であった。本研究では、繰返し 5 回目で損失エネルギーが収束したとみなし、5 ~ 10 回目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  $[N/m^2]$  に供試体の体積  $[m^3]$  を乗じ、供試体あたりのエネルギー  $[N \cdot m]$  に換算した値で示す。

#### 4.3 損失エネルギーに占めるひび割れ進展エネルギーの割合

図 - 8 に繰返し初回の損失エネルギー  $E_{i1}$  とひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  の関係を示す。損失エネルギーが大きくなるとひび割れ進展エネルギーもそれにともなって大きくなっており、両者は比例関係にある。また、損失エネルギーに占めるひび割れ進展エネルギーの割合は、損失エネルギーの大きさによらずつねに一定であり、

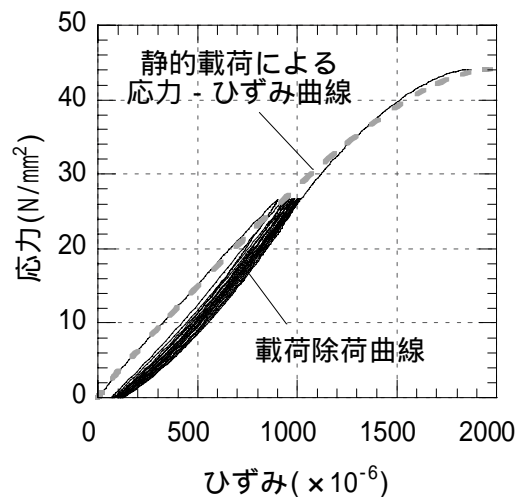


図 - 6 載荷除荷曲線の一例  
(C45, 供試体グループ W)

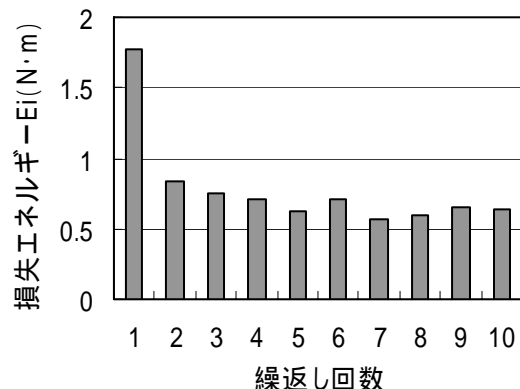


図 - 7 繰返し回数にともなう損失エネルギーの変化 (C45, 供試体グループ W)

図中の回帰直線式の係数より、供試体が高含水状態にあるほど小さくなっているといえる。こ

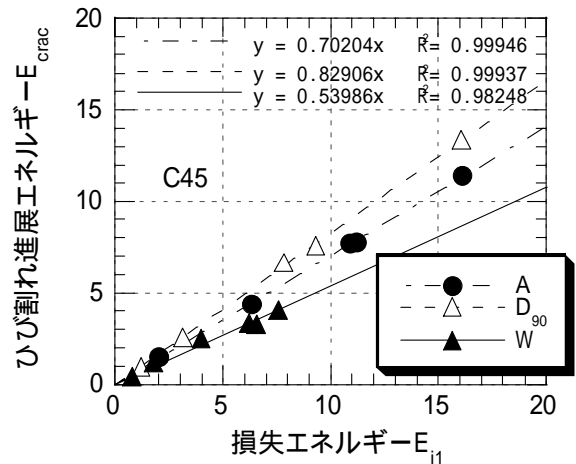
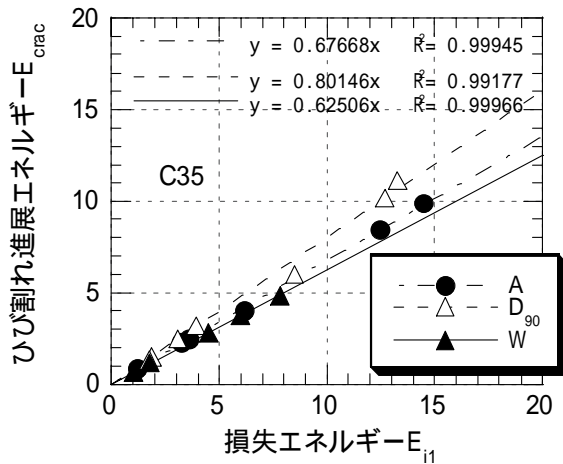


図 - 8 損失エネルギーとひび割れ進展エネルギーの関係

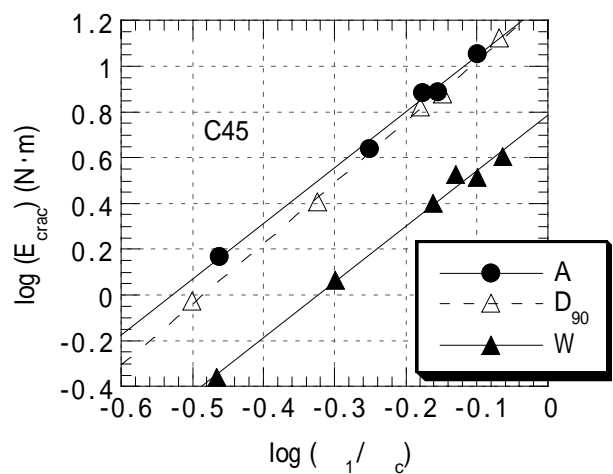
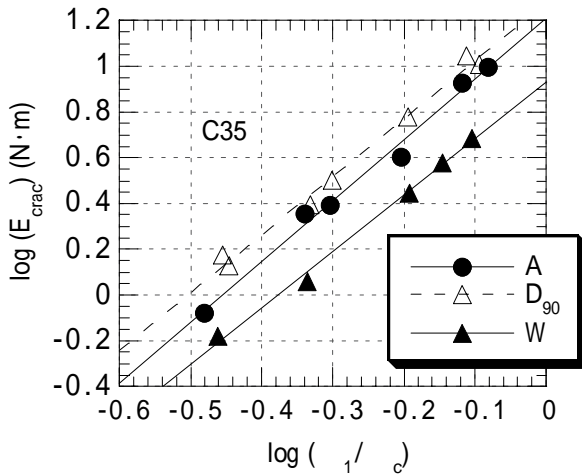


図 - 9 ひずみ比とひび割れ進展エネルギーの関係 (両対数)

のことは、含水量の少な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ぼ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<sup>3)</sup>ことを示していると考えられる。

#### 4.4 ひび割れ進展エネルギーとひずみ比の関係

図 - 9 にひび割れ進展エネルギーの対数とひずみ比の対数の関係を示す。ひび割れ進展エネルギーの対数とひずみ比の対数は直線関係にあり、ひずみ比の増大にともなってひび割れ進展エネルギーが累乗的に増加するといえる。これは既往の研究<sup>2)</sup>でモルタルについて報告した結果と同様である。この実験的事実より、ひび割

れ進展エネルギーはひずみ比の累乗関数として式(3)のように表すことができる。

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

ここに、 $\varepsilon_1$ ：ひび割れ進展エネルギーを求めた点のひずみ

$\varepsilon_c$ ：静的試験での最大応力時のひずみ

$\alpha, \beta$ ：実験定数

式(3)中の実験定数の大きさについて、本研究および既往の研究<sup>2)</sup>の結果をまとめて表 - 2 に示す。なお、既往の研究におけるモルタルの配合は水セメント比が45%であり、表中ではM45と表記している。実験定数のうち、 $\beta$ 値はC35で2.5~2.7, C45で2.4~2.7, M45で2.8~3.2であり、モルタルはコンクリートと比較してやや $\beta$ 値が大きい、コンクリートの $\beta$ 値は水セメント比

表 - 2 ひび割れ進展エネルギーとひずみ比の関係式中における実験定数

$E_{crac} = \alpha \cdot (\varepsilon_1 / \varepsilon_c)^\beta$		C35		C45		M45 <sup>2)</sup>	
供試体グループ	A	16.1	2.7	19.4	2.4	26.6	3.0
	D <sub>50</sub>	-	-	-	-	21.7	3.2
	D <sub>90</sub>	18.8	2.5	19.5	2.7	28.2	2.8
	W	8.5	2.5	6.1	2.4	11.8	3.0

によらずほぼ同等となっている。一方、 $\alpha$ 値はC35で8.5~18.8, C45で6.1~19.5, M45で11.8~28.2で、同一配合であっても大きな幅が生じている。ここで $\alpha$ 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の大きさを表すが、供試体が高含水状態であるほど小さくなっている。これは、コンクリート内部に存在する水分が吸着すること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することを示していると考えられる。また、 $\alpha$ 値はC35とC45では大差なく、M45ではそれらよりも大きい値となっている。これは、粗骨材の周辺に形成される脆弱な遷移帯の影響により、コンクリートの方がモルタルよりも微細ひび割れを形成するためのエネルギーが小さくなることを示していると考えられる。

## 5. 結論

静的圧縮過程においてコンクリート内部に発生・伝播する微細ひび割れを間接的に表現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、その累積過程に及ぼす供試体含水量の影響について実験的検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 損失エネルギーが増大するとひび割れ進展エネルギーもそれとともに比例的に増大するが、両者の割合は、配合および乾湿状態が同一である場合、損失エネルギーの大きさによらずつねに一定であり、供試体の含水量が少ないほど大きくなる。
- (2) 静的圧縮過程において、ひび割れ進展エネ

ルギーはひずみの増大とともに累乗的に増加する。

- (3) 最大応力時におけるひび割れ進展エネルギーは、供試体の含水量が多いほど小さい。これは、水分の吸着により、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る。

## 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) 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
- 3) 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, 1976.4
- 4) 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, pp.198-199, 1980.6
- 5) 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, 1999.5
- 6) 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