

## 論文 セメント硬化体中の水が圧縮破壊過程に及ぼす影響

尾上 幸造\*1・松下 博通\*2・鶴田 浩章\*3・佐川 康貴\*4

**要旨**：数種類の含水状態に調整したモルタル供試体について繰返し載荷を行い、応力-ひずみ曲線下の面積より得られる損失エネルギーを用いて、セメント硬化体中の水が圧縮破壊過程に及ぼす影響について考察した。その結果、損失エネルギーのうちひび割れの進展に使われたエネルギーは供試体内部のひび割れ量に直接対応した量であり、ひずみ比の増大とともに累乗的に増加すること、最大耐力点に至ったときのひび割れ進展エネルギーは供試体が高含水状態にあるほど小さくなることなどが明らかとなった。

**キーワード**：含水状態、繰返し載荷、圧縮破壊過程、ひび割れ進展エネルギー、飽和度

### 1. はじめに

一般に、セメント硬化体の強度は含水状態によって異なり、乾燥したもののほど強く、湿ったもののほど弱くなることが知られている。この理由については諸説があり、水分の存在によりひび割れ先端において分離圧が生じるためとするもの<sup>1)</sup>や、水分が付着することにより固体の表面エネルギーが低下するためとするもの<sup>2)</sup>などがあるが、未だ統一的な説明はなされていない。この問題へのひとつのアプローチとして、堀<sup>3)</sup>は種々の表面張力を持つ媒質中にてモルタル供試体の曲げ引張試験を行い、媒質の表面張力(表面エネルギー)の増大に従ってモルタル供試体の曲げ強度が低下することを報告している。筆者ら<sup>4)</sup>も、これを圧縮強度試験について行った結果、媒質の表面張力の増大に従ってモルタル供試体の圧縮強度が低下することを確認している。これらの事実は、セメント硬化体の強度に対し、水がエネルギー的に関与していることを示している。

一方、実際のコンクリート構造物中の含水状態は置かれた環境条件によって大きく異なり、決して均一ではない。水で完全に飽和された部

分とそうでない部分とでは、影響するエネルギー量も当然変わってくるはずである。したがって、水の存在量(例えば飽和度)の違いによって作用するエネルギー量がどの程度変化するかを明らかにする必要があると考えられる。

本研究では、異なる含水状態に調整したモルタル供試体について繰返し載荷を行い、その応力-ひずみ曲線(以下、載荷除荷曲線)下の面積より得られる損失エネルギーとその内訳を比較することで、セメント硬化体中の水が圧縮破壊過程に及ぼす影響について考察した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

供試体は $\phi 7.5 \times 15 \text{cm}$ の円柱とした。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 $3260 \text{cm}^2/\text{g}$ )、細骨材には海砂(表乾密度 $2.57 \text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.56\%$ 、粗粒率 $2.67$ )を使用した。

モルタルの練混ぜには容量 $20 \text{L}$ のモルタルミキサーを用いた。モルタルの配合は $W/C=0.45$ 、 $S/C=2.42$ であり、これはフロー値が $200 \pm 5$ となるよう試し練りを行って定めた。

\*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士(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)

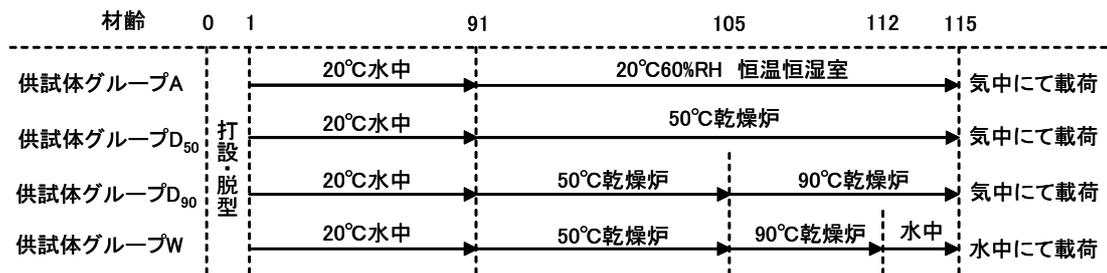


図-1 本研究で設定した環境条件

## 2.2 供試体の養生条件

供試体は材齢 1 日にて脱型後、90 日間 20°C 水中にて標準養生を行った。その後、図-1 に示す環境条件下に約 3 週間放置し、供試体の質量が安定し試験期間中に大幅に変化しないとみなされる時点で載荷を行った。なお、供試体グループは、水中養生後恒温恒湿室内 (20°C, 60%RH) で乾燥させたもの (供試体グループ A)、水中養生後 50°C 乾燥炉で乾燥させたもの (供試体グループ D<sub>50</sub>)、水中養生後 50°C 乾燥炉における乾燥を経て 90°C 乾燥炉で乾燥させたもの (供試体グループ D<sub>90</sub>)、水中養生後 50°C 乾燥および 90°C 乾燥を経て再び水中に戻し、そのまま水中で載荷を行ったもの (供試体グループ W) の 4 種類である。図-2 に材齢 91 日以後の各環境条件下における供試体の逸散水量の経時変化を示す。逸散水量は各環境条件の供試体グループ内の全ての供試体についてほぼ等しかったため、図中の曲線はそれらを平均して示した。供試体グループ W については、逸散水量が 0 に回復しておらず、乾燥あるいは水に接したことによる再水和などによって空隙構造が変化したことが推察される。

## 2.3 載荷方法

載荷には、2000kN 耐圧試験機を使用した。このとき、供試体側面軸方向に 2 枚貼付したワイヤストレインゲージ (検長 60mm) により縦ひずみを測定した。各要因 3 本の供試体については単調増加載荷を行い、最大耐力点までの応力-ひずみ曲線を求めた。得られた 3 本の応力-ひずみ曲線より、最知ら<sup>5)</sup>の方法を用いて平均的な応力-ひずみ曲線 (本論文では応力-ひず

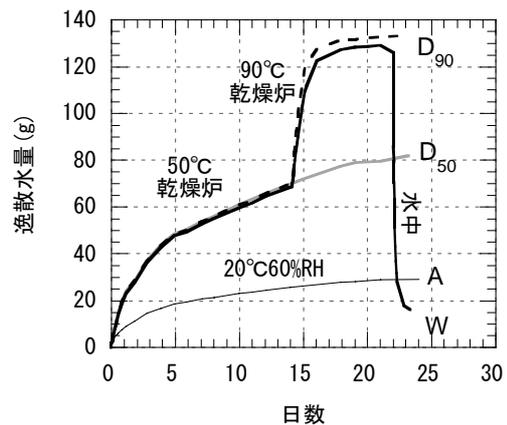


図-2 供試体の逸散水量の変化

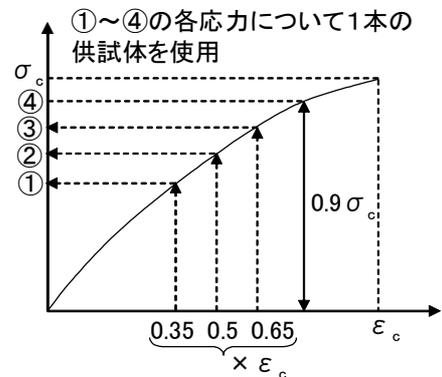


図-3 繰返し応力の設定方法

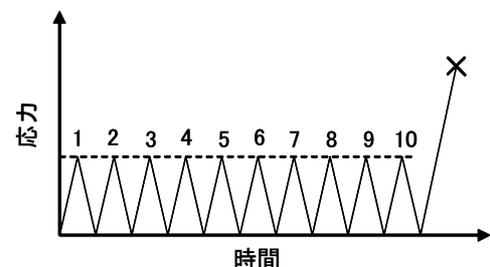


図-4 繰返し載荷時の応力と時間の関係

み平均曲線と呼ぶことにする) を求め、それより最大応力時のひずみ  $\epsilon_c$  の約 35%, 50%, 65%

となるひずみ ( $\varepsilon/\varepsilon_c=0.35, 0.50, 0.65$ ) に対応する応力および最大応力  $\sigma_c$  の約 90%となる応力 ( $\sigma/\sigma_c=0.90$ ) を特定し、これらの応力について繰返し荷重を行った (図-3 参照)。図-4 に繰返し荷重時の応力と時間の関係を示す。荷重除荷の繰返し回数は 10 回とし、10 回目終了した直後、供試体が最大耐力点に至るまで再び単調増加荷重を行った。荷重速度は応力制御とし、およそ  $0.2\text{N/mm}^2/\text{sec}$  であった。

実験結果の整理にあたっては、岡田ら<sup>6)</sup>の方法を参考にした。荷重除荷曲線とエネルギーの関係を図-5 に示す。ある 1 サイクルの荷重除荷曲線は ABCDE の経路を辿るが、外力により与えられた総エネルギー  $E_t$  (ABCFA の面積) は、損失エネルギー  $E_i$  (ABCDEA の面積) と弾性ひずみエネルギー  $E_r$  (CDEFC の面積) に分割できる。すなわち、

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

ここに、 $E_t$  : 外力による総エネルギー

$E_i$  : 損失エネルギー

$E_r$  : 弾性ひずみエネルギー

同一応力レベルにて繰返し荷重を行い、 $E_i$  を順番に並べると、図-6 のようになるが、損失エネルギーは第 1 サイクルで最も大きく、第 2 サイクル以降は若干の変動はあるもののほぼ一定値に収束する。第 2 サイクル以降においては損失エネルギーのほぼ全てが液相における粘性摩擦や固相のずれの結果としての摩擦損失エネルギー  $E_{fric}$  として消費され、初回においても同様に  $E_{fric}$  が生じていると仮定すると、初回の  $E_{i1}$  と  $E_{fric}$  の差が主としてひび割れ進展に使われたエネルギー  $E_{crac}$  として算出できる (式(2))。

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

ここに、 $E_{i1}$  : 繰返し初回の損失エネルギー

$E_{crac}$  : ひび割れ進展エネルギー

$E_{fric}$  : 摩擦損失エネルギー

なお本論文では、荷重除荷曲線下の面積から定量化した値 [ $\text{N/mm}^2$ ] に供試体の体積を乗じ、供試体あたりの値 [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ] に換算したものを、各エネルギーとして表す。

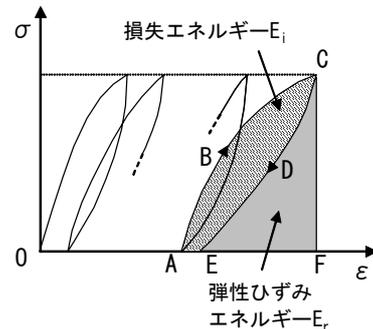


図-5 応力-ひずみ曲線とエネルギーの関係

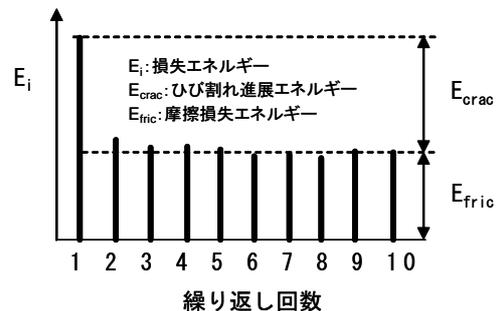


図-6 繰返し荷重時の損失エネルギーの変化

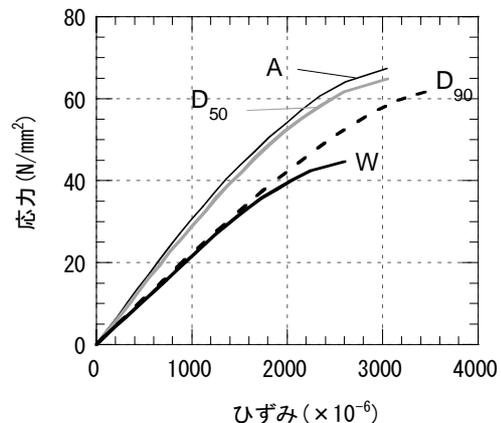


図-7 応力-ひずみ平均曲線 (単調増加荷重)

### 3. 結果および考察

図-7 に単調増加荷重により得られた応力-ひずみ平均曲線を示す。材齢は約 115 日である。最大応力に関して、供試体グループ  $D_{90}$  の方が供試体グループ A および供試体グループ  $D_{50}$  よりも小さくなっており、 $90^\circ\text{C}$  乾燥を経たことによって供試体内部に微細ひび割れが多数発生していることが考えられる。供試体グループ W と供試体グループ  $D_{90}$  では、乾燥による微細ひび

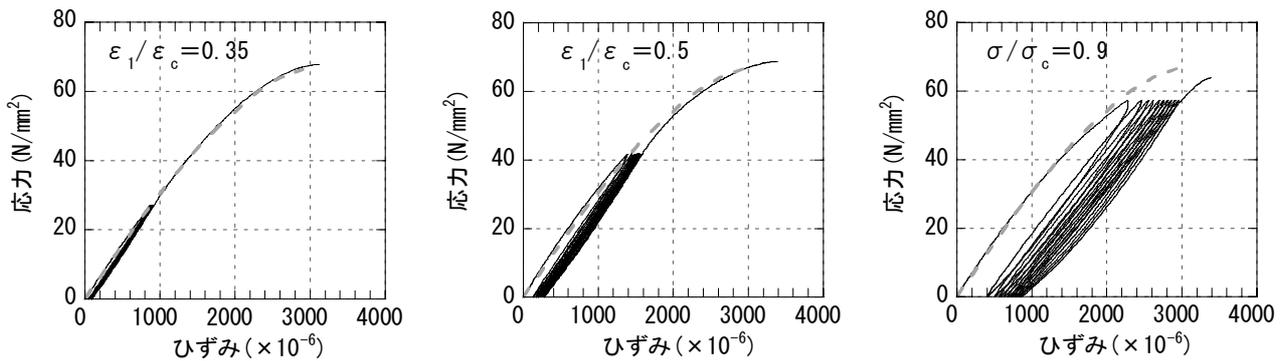


図-8 載荷除荷曲線の一例（供試体グループ A）

割れの発生状況はほぼ同等と考えられるが、前者の方が最大応力はかなり小さくなっており、水の影響が考えられる。最大応力時のひずみに関しては、乾燥の度合いが大きいほど大きい値を示す傾向にある。ただし供試体グループ A および供試体グループ D<sub>50</sub> では逸散水量が異なるにもかかわらず、最大応力時のひずみに顕著な差は認められなかった。

図-8 に載荷除荷曲線の一例を示す。図中には単調増加載荷時の曲線（灰色の破線）を併せて示した。繰返し回数が増えるにつれ、折返し点のひずみ、残留ひずみともに増加し、その大きさは折返し点の応力が高くなるほど大きくなる。繰返し載荷終了直後、供試体が最大耐力点に至るまで再び単調増加載荷を行ったときの曲線は、折返し点の応力が低い場合には単調増加載荷時の曲線とよく一致するが、折返し点の応力が高い場合には最大応力時のひずみが若干大きくなる傾向にある。

図-9 に載荷除荷曲線下の面積より算出される損失エネルギー  $E_i$  の繰返し回数に伴う変化を、供試体グループ A,  $\varepsilon_1/\varepsilon_c=0.65$  のケースについて示す。なお、 $\varepsilon_1$  は第 1 サイクル折返し点のひずみを表す。既往の知見<sup>6)</sup>通り、 $E_i$  は第 1 サイクルで最も大きく、その後は小さくなるのが分かる。これは他の全てのケースについても同様の傾向であった。最知らは連続繰返し載荷に伴う挙動の重要な変化がほぼ 5 サイクルまでで収束する<sup>7)</sup>ことを報告している。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、

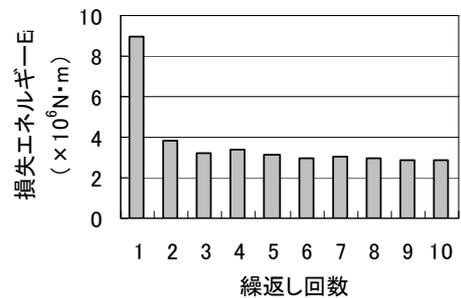


図-9 損失エネルギーの変化の一例（供試体グループ A,  $\varepsilon_1/\varepsilon_c=0.65$ ）

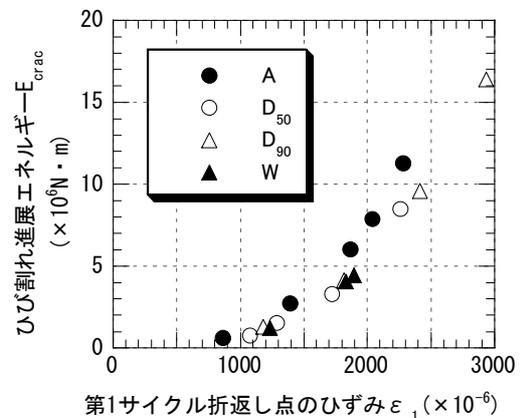


図-10 ひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  と第 1 サイクル折返し点のひずみ  $\varepsilon_1$  の関係

第 5～第 10 サイクルの損失エネルギーの平均を摩擦損失エネルギー  $E_{fric}$  とした。

図-10 にひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  と  $\varepsilon_1$  の関係を、また、図-11 に摩擦損失エネルギー  $E_{fric}$  と  $\varepsilon_1$  の関係を示す。 $E_{crac}$ ,  $E_{fric}$  とともに  $\varepsilon_1$  が大きくなるほど増大するが、 $E_{crac}$  では含水状態による違いがそれほど認められないのに対し、 $E_{fric}$  は高含水状態のものほど上方に分布するこ

とが読み取れる。これは  $E_{crac}$  が供試体の巨視的な不可逆変形に直接対応する量であり含水状態に依存しないのに対し、 $E_{fric}$  は液相の粘性摩擦や固相のずれに起因する摩擦損失であるために、高含水状態のものほど大きくなったと考えることができる。

図-12 にひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  と第1サイクル終了時の残留ひずみとの関係を示す。残留ひずみは供試体内部で起こる不可逆的な変形の表れと考えられるが、これと  $E_{crac}$  との間には直線関係が認められる。

供試体の巨視的な不可逆変形が、载荷による内部ひび割れの蓄積の結果であるとするれば、 $E_{crac}$  は内部ひび割れ量に直接関連した量であると考えてよいと思われる。

図-13 にひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  とひずみ比  $\varepsilon_1/\varepsilon_c$  (最大耐力点におけるひずみに対する第1サイクル折返し点のひずみの比) の関係を両対数目盛にて示す。ここで、最大耐力点のひずみは、応力-ひずみ平均曲線における最大耐力点のひずみである。 $E_{crac}$  と  $\varepsilon_1/\varepsilon_c$  は両対数紙上で直線関係となり、ひずみ比の増大に伴ってひび割れ進展エネルギーが累乗的に増加することが明らかとなった。回帰曲線を外挿してひずみ比が1となる  $E_{crac}$  は供試体が最大耐力点に至ったときのひび割れ進展エネルギーであると予想されるが、供試体グループ A を除き、高含水状態のものほど小さくなっている。これは、水分が付着することで供試体内部に発生するひび割れの界面エネルギーが低下し、ひび割れの進展が促進される<sup>8)</sup> ために、より少ないエネルギーで最大耐力点に至るだけのひび割れが形成されることを示していると考えられる。供試体グループ A が他と異なる挙動を示した理由として、乾燥過程で入る微細ひび割れが比較的少なかったことが考えられる。

図-14 に最大耐力点における  $E_{crac}$  の予想値と供試体の飽和度の関係を示す。飽和度は式(3)により求めた。

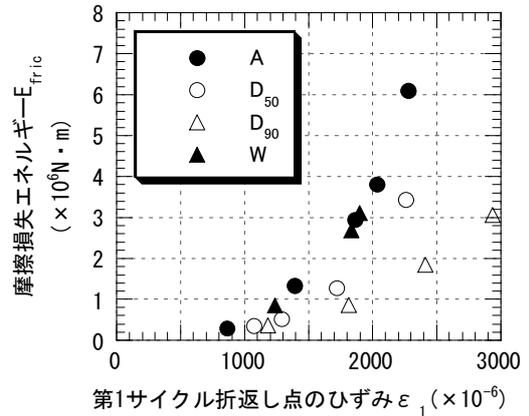


図-11 摩擦損失エネルギー  $E_{fric}$  と第1サイクル折返し点のひずみ  $\varepsilon_1$  の関係

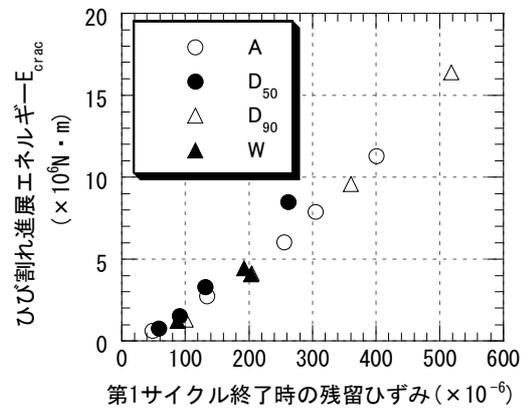


図-12 ひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  と第1サイクル終了時の残留ひずみの関係

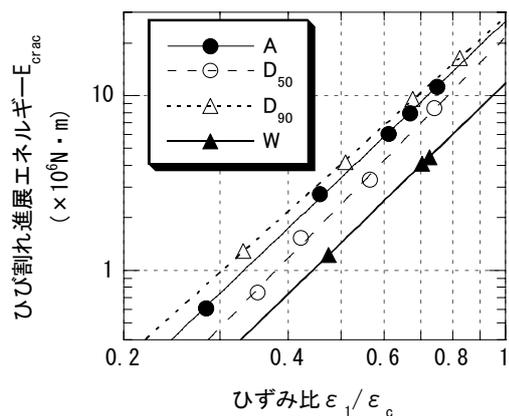


図-13 ひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  とひずみ比  $\varepsilon_1/\varepsilon_c$  の関係

$$\text{飽和度}(\%) = \frac{m_1 - m_3}{m_2 - m_3} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $m_1$ ：同一の乾燥過程を経た処女供試体を割裂しハンマーで 5mm 角程度に砕いて採取した試料の質量  
 $m_2$ ：試料を真空ポンプにより減圧吸水させて飽水状態にした質量  
 $m_3$ ：試料を 105 °C の乾燥炉で 24 時間乾燥させた質量

なお、試料採取位置は供試体高さ中央における中心部と側面近傍であり、各々より得られた値の平均をその供試体グループの飽和度とした。図より飽和度が高くなるにつれ、最大耐力点における  $E_{crac}$  の予想値は直線的に減少することが分かる。供試体グループ A のプロットが直線から外れたのは、前述した通り、炉乾燥させた供試体と比較して微細ひび割れの発生が少なかったためと考えられる。

#### 4. 結論

- (1) 損失エネルギーのうちひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  は供試体内部のひび割れ量に直接対応した量であると考えられる。
- (2) ひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  はひずみ比の増大とともに累乗的に増加した。
- (3) 最大耐力点におけるひび割れ進展エネルギー  $E_{crac}$  の予想値は供試体の飽和度が高くなるにつれ直線的に低下した。

今後の課題として、一般環境下におけるセメント硬化体中の水の平衡形態と、各水分（自由水・ゲル水）の強度に寄与する際の役割を明らかにする必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、九州大学大学院修士課程の福山幹康君（現：九州旅客鉄道株式会社）には多大なるご尽力をいただきました。ここに付記し、厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) G.Pickett : Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and a Hypothesis Concerning

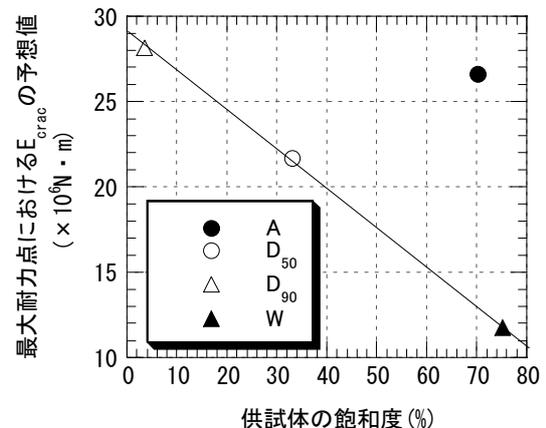


図-14 最大耐力点における  $E_{crac}$  と供試体の飽和度の関係

Shrinkage, J. ACI, pp.581-590, Jan. 1956

- 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.20-24，1994.9
- 3) 堀素夫：表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ，窯業協会誌，Vol.70，No.7，pp.54-59，1962
- 4) 松下博通，尾上幸造：コンクリートおよびモルタル中の水分が強度・弾性係数に与える影響，第30回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.37-42，2003.11
- 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) 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
- 7) 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, Aug. 1995
- 8) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊，学献社，p.47，1990.7