

# 論文 若材齢コンクリートにおけるひび割れ挙動に関する基礎的研究

岸山 雄多佳<sup>\*1</sup>・Worapong Srisoros<sup>\*2</sup>・国枝 稔<sup>\*3</sup>・中村 光<sup>\*4</sup>

**要旨**：若材齢時にコンクリート中に生じたひび割れが、その後さらに大きな外力を受ける場合のひび割れ挙動について検討する為、本研究では、曲げ試験によって若材齢時のコンクリートに導入されたひび割れに関して、その後の養生によってどのようなひび割れ挙動を示すのかを実験的に検討した。本研究で検討した条件の範囲内では、材齢2日にひび割れ導入した供試体に関して、その後の養生によってもたらされる破壊エネルギーの増分が、ひび割れを導入しない供試体から得られた破壊エネルギーの増分に等しいことを明らかにした。

**キーワード**：若材齢, 初期ひび割れ, 水和, 破壊エネルギー, 凝固理論

## 1. はじめに

マスコンクリートの温度応力の問題にもみられるように、若材齢時に生じるひび割れは力学的な弱点になるだけでなく、耐久性低下の原因となるため、ひび割れ性状を定量的に評価することが重要である。現在では、打設後の時間の経過にもよって発現する材料特性の変化（例えば、強度や弾性係数）を組み込んだ数値解析手法が開発され、ひび割れ発生以前にコンクリートに生じる内部応力は定量的に評価されつつある<sup>1)</sup>。しかしながら、コンクリートの材料特性が時々刻々と変化していく時間領域でのひび割れ発生後の挙動（いわゆる軟化挙動）について検討された事例は少なく、とりわけ数値解析の構成則を開発するための実験データの取得が急務である。

本研究では、若材齢時に導入されたひび割れを有するコンクリートとモルタルについて、そ

の後の養生によってもたらされる力学特性の変化、特に破壊エネルギーの増加に着目した基礎的な検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験で使用したコンクリートおよびモルタルの示方配合を**表-1**に示す。セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.11g/cm<sup>3</sup>）、細骨材には密度 2.51g/cm<sup>3</sup> の山砂、粗骨材には密度 2.67g/cm<sup>3</sup>、粗粒率 7.19 の砕石、化学混和剤には、AE 減水剤（密度 1.25g/cm<sup>3</sup>、主成分：リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）を用いた。

### 2.2 作製供試体

曲げ試験用供試体には 100×100×400mm のはり供試体を用いた。打設前にあらかじめ型枠に薄い板（厚さ 1mm）を取り付け、供試体中央部

**表-1 配合表**

	W/C (%)	G <sub>max</sub> (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	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	混和剤 Ad
コンクリート	60	20.0	22.0	2.4	52.1	203	337	900	879	1.22
モルタル	60	-	-	-	100.0	283	472	1415	0	1.71

\*1 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 工修 (正会員)

\*3 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教授 博士(工) (正会員)

\*4 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士(工) (正会員)

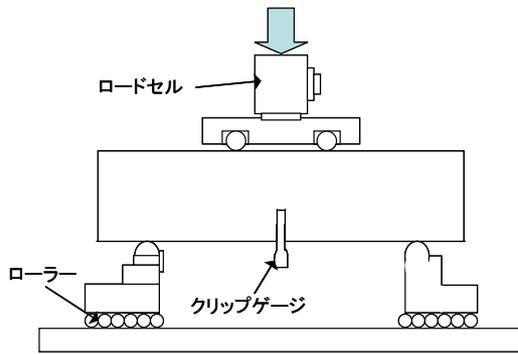


図-1 荷重試験図

に深さ 30mm の切欠きを設けた。なお、1 水準につき 3 体の供試体を作製した。すべての供試体は 20°C の恒温室内において水中養生を行った。圧縮強度ならびに弾性係数の測定には、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  の円柱供試体（1 水準につき 3 体）を用いた。はり供試体と同様に養生された円柱供試体の相対する側面（2ヶ所）にひずみゲージ（長さ 60mm）を貼付し、ひずみおよび荷重を計測し、弾性係数を求めた。なお、弾性係数の算定にあたっては、応力-ひずみ曲線でひずみが  $50\mu$  となる点と応力が圧縮強度の  $1/3$  となる点を結ぶ割線弾性係数とした。

### 2.3 曲げ荷重試験方法

図-1 に示すように、曲げ荷重試験は 4 点曲げ荷重（荷重スパン：300mm）とし、荷重ならびに切欠き部の開口変位（CMOD）を計測した。荷重には、手動メカニカルジャッキを取り付けた鋼製フレームを使用した。加力によるエネルギーをリガメント（未ひび割れ）部のモード I の破壊のみに有効に伝えるために、両支点ともローラー支持で行い水平方向の拘束を取り除いた。荷重中、最大荷重点以降に急激に破壊が進行するような場合には、必要に応じて除荷・再荷重の操作を繰り返して計測を行った。破壊エネルギーを求めるため、最終破断点まで慎重に荷重を行った。

### 2.4 実験フロー

図-2 に本実験のフローを示す。コンクリートおよびモルタルのそれぞれについて、材齢 2, 4, 7 日にて前述の曲げ荷重試験を行った（それぞれシリーズ 2, シリーズ 4, シリーズ 7 と呼ぶ）。

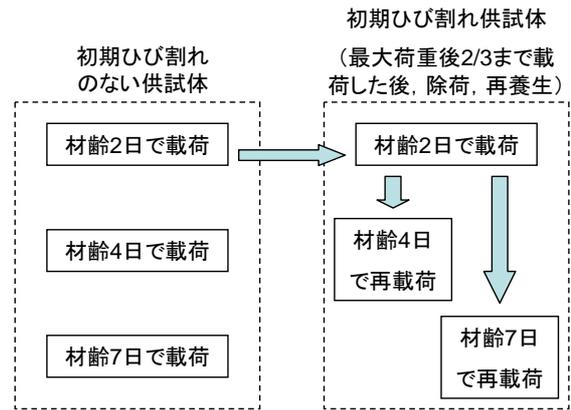


図-2 実験フロー

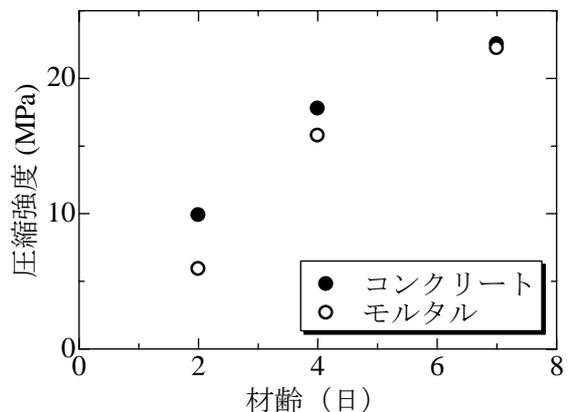


図-3 圧縮強度の経時変化

さらに、ひび割れの有無および再養生した場合のひび割れ性状の変化を確認するため、材齢 2 日の荷重試験にて、荷重が最大荷重に達した後、最大荷重に対して  $2/3$  になるまで荷重を継続し、その後除荷した供試体を作製した（初期ひび割れ供試体と呼ぶ）。初期ひび割れ供試体は、材齢 2 日（初期ひび割れ導入直後）に荷重を行うとともに（シリーズ 2-2 と呼ぶ）、再度それぞれ 2 日、5 日間水中養生し、総材齢 4, 7 日にて再荷重した（それぞれシリーズ 2-4, シリーズ 2-7 と呼ぶ）。

## 3. 実験結果

### 3.1 圧縮強度試験結果

#### (1) 圧縮強度の経時変化

材齢 2 日、4 日および 7 日での圧縮強度試験結果を図-3 に示す。材齢 2 日および 4 日の結果では、モルタルとコンクリートの強度にわずかの差が認められるが、材齢 7 日では同程度の強度となった。なお、材齢 7 日でのコンクリー

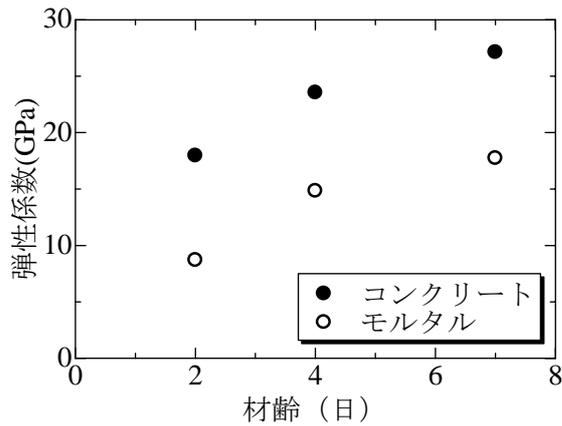


図-4 弾性係数の経時変化

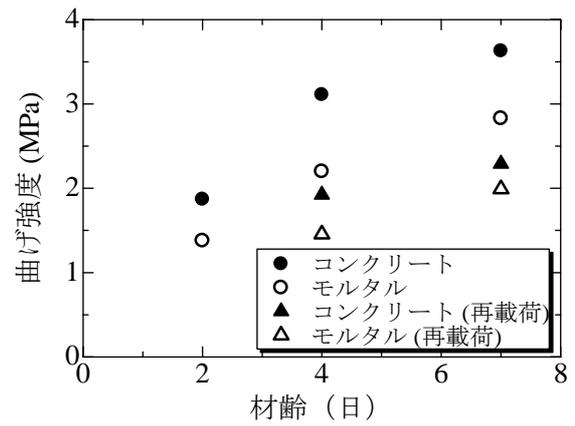


図-5 曲げ強度の経時変化

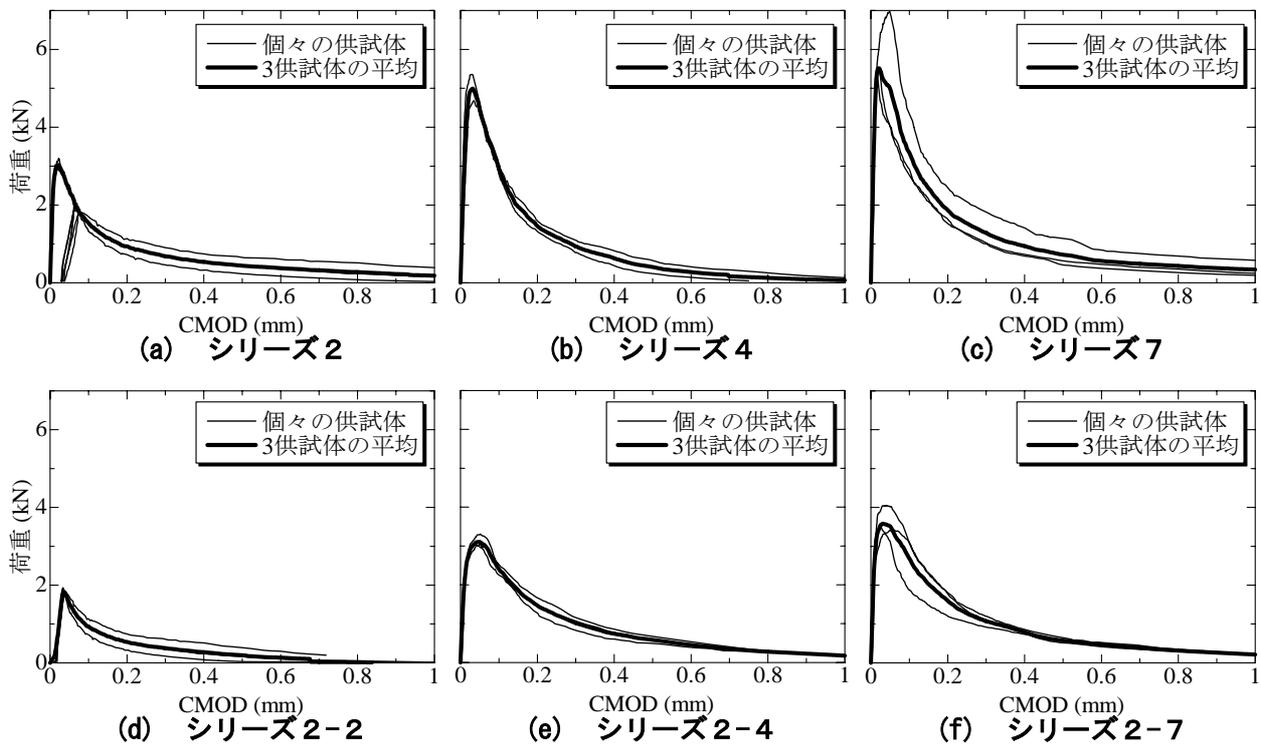


図-6 コンクリートの荷重-CMOD 曲線

トの圧縮強度は 23MPa、モルタルの圧縮強度は 22MPa であった。

### (2) 弾性係数の経時変化

圧縮試験により求められた弾性係数の経時変化を図-4に示す。材齢 7 日でのコンクリートならびにモルタルの弾性係数はそれぞれ 27GPa, 18GPa であった。

## 3.2 曲げ試験結果

### (1) 曲げ強度の経時変化

切欠きを有する供試体を用いて得られた各材齢における曲げ強度（コンクリート●，モルタル○）を図-5に示す。モルタルに比べてコン

クリートの曲げ強度が大きい結果となった。時間の経過に伴うコンクリートとモルタルの曲げ強度の差はほとんど減少せず、圧縮強度とは異なる結果となった。材齢の進行に伴って、コンクリートでは粗骨材が破壊進行領域を大きくするため、モルタルに比べて曲げ耐力が大きくなったと考えられる。

一方、材齢 2 日でひび割れを導入し、再度水中養生したシリーズ 2-4、シリーズ 2-7 の曲げ強度（コンクリート▲，モルタル△）も併せて図-5に示す。コンクリートについて、シリーズ 2-4、シリーズ 2-7 の曲げ強度は、シリーズ 4、

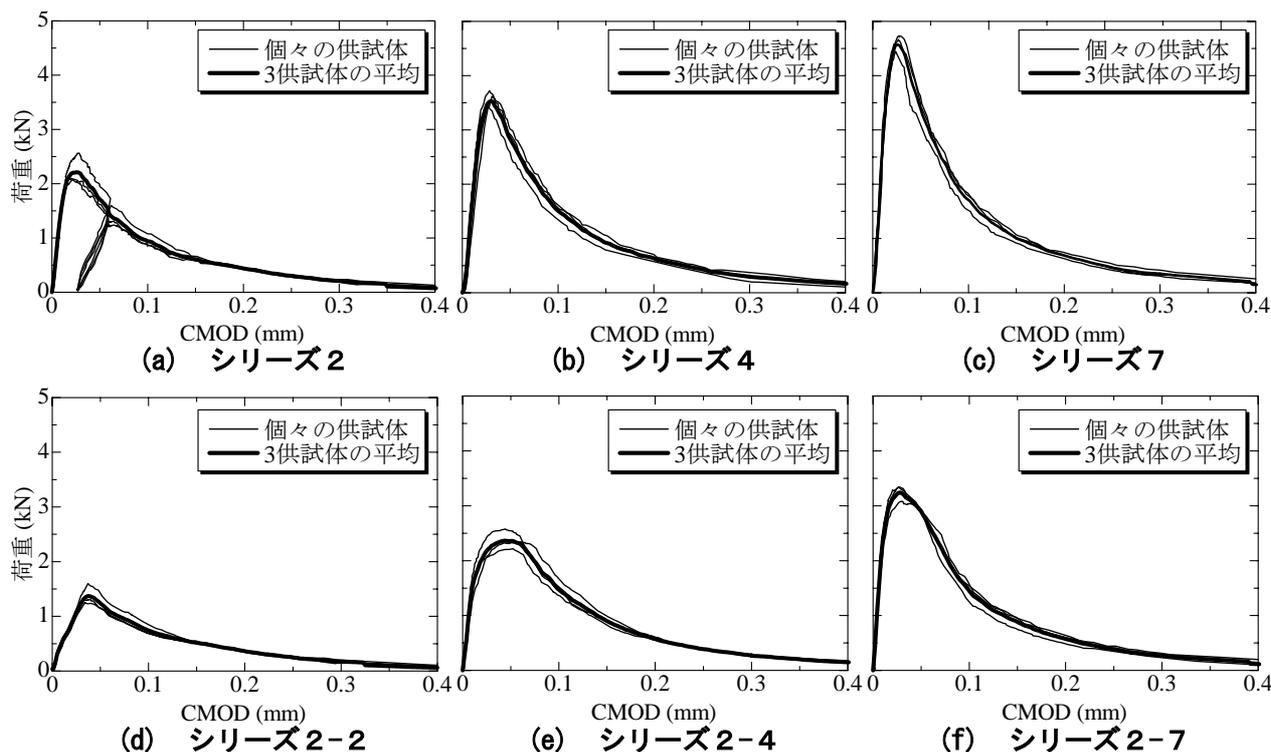


図-7 モルタルの荷重-CMOD 曲線

シリーズ7のそれらに対してそれぞれ62%, 63%であり, 同じくモルタルについてはそれぞれ66%, 71%であった。

(2) 荷重-CMOD 曲線の形状

図-6 (a)~(c), 図-7 (a)~(c)に, 材齢 2 日, 4 日および7日に実施したコンクリートおよびモルタル供試体の載荷試験 (シリーズ 2, シリーズ 4, シリーズ 7) から得られた荷重-CMOD 曲線を示す。なお, 細線は個々の供試体の荷重-CMOD 曲線であり, 太線は3体の供試体の荷重-CMOD 曲線を平均化したものである。なお, シリーズ 2 については, 最大荷重後 2/3 まで荷重が低下した段階で除荷をし, シリーズ 2-2 のデータを取得したため, 除荷曲線が描かれている。また, シリーズ 4 のコンクリート供試体では, 3体のうち 1 体は軟化域の計測中に急激に破壊したため, 平均曲線の計算から除外した。

コンクリートの試験結果では, リガメント部の粗骨材の有無に起因したと推察されるばらつきが最大荷重の値および最大荷重時の CMOD の値に認められた。これらの図より, コンクリート, モルタルのいずれにおいても材齢の増加に伴い, 最大荷重が高くなるだけでなく, 荷重-

CMOD 曲線下の面積も増加していることが分かる。

図-6 (d)~(f), 図-7 (d)~(f)に, 材齢 2 日でひび割れを導入し, 再度養生したシリーズ 2-4 およびシリーズ 2-7 の供試体から得られた荷重-CMOD 曲線を示す。なお, 材齢 2 日の載荷試験によって残留変位 (残留 CMOD) が生じていたが, ここではすべて原点に移動して表示した。これらのグラフによると, 初期ひび割れを有している場合においても材齢の増加に伴って, 最大荷重および荷重-CMOD 曲線下の面積が大きくなっていることが分かる。ただし, 図-5 においても示されたように, シリーズ 2-4 ならびにシリーズ 2-7 における最大荷重は, ひび割れを導入していないものに比べて小さい結果となった。

これらのメカニズムを, 凝固理論<sup>2)</sup>の考え方を利用して考察する (図-8 参照)。シリーズ 2-4 およびシリーズ 2-7 については, 材齢 2 日以前に生じた水和物により発揮される力学特性 (例えば応力-ひずみ関係), ならびに 3 日以降に生じた水和物により発揮される力学特性とに分離できると考える。材齢 2 日の載荷時になされた仕

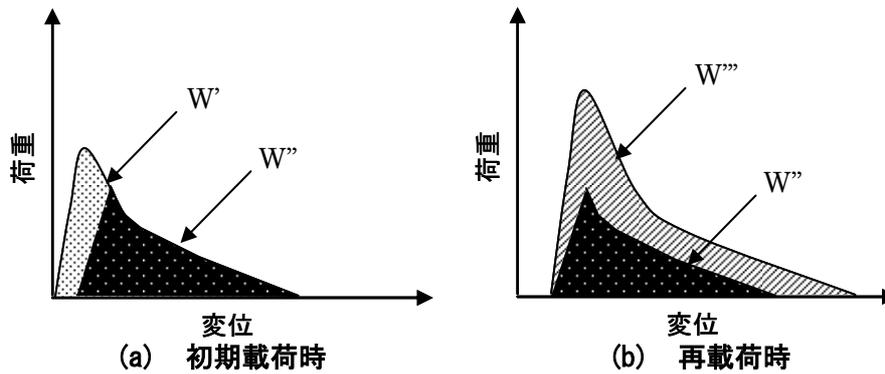


図-8 凝固理論に基づいて整理したエネルギー

事量は、それまでに生成された水和物によって消費された仕事量であり、今回の実験のように途中で除荷した場合には、除荷過程までに消費された仕事量  $W'$  と引き続き荷重をすれば消費することができる仕事量  $W''$  が存在することとなる (図-8 (a) 参照)。一方、除荷後の再養生によって供試体内部に生成した水和物によって発揮される力学特性 (例えば応力-ひずみ関係) は除荷時を基準に新たに発揮され、新たに生成した水和物により行われる仕事量を  $W'''$  とする (図-8 (b) 参照)。再養生後の供試体が発揮する力学特性は、除荷直後の再荷重により行われる仕事量  $W''$  と新たに生成した水和物による仕事量  $W'''$  とにより表現されるため、 $W'''$  を推定することにより、再養生後のひび割れ挙動が推定できるものと考えられる。この考え方が、曲げを受けるコンクリートやモルタルにて適用できるかを次節にてエネルギー的に検証する。

(3) 破壊エネルギーの経時変化

材齢 2 日にてひび割れ導入を行わないシリーズ 2, シリーズ 4 およびシリーズ 7 の荷重-CMOD 曲線から求められた破壊エネルギーを図-9 に示す。なお、破壊エネルギーの計算では、供試体が両支点を回転中心にしてひび割れの進展とともに剛体変形するものと仮定した際の CMOD と荷重点変位 (Disp) の関係 (次式(1)参照) をもとに仕事量  $W$  を求め (コンクリートの場合は  $0.5\text{mm}$  の変位まで、モルタルの場合は  $0.2\text{mm}$  の変位までの荷重-荷重点変位曲線下の面積とした)、リガメントの面積  $A_{lig}$  (約

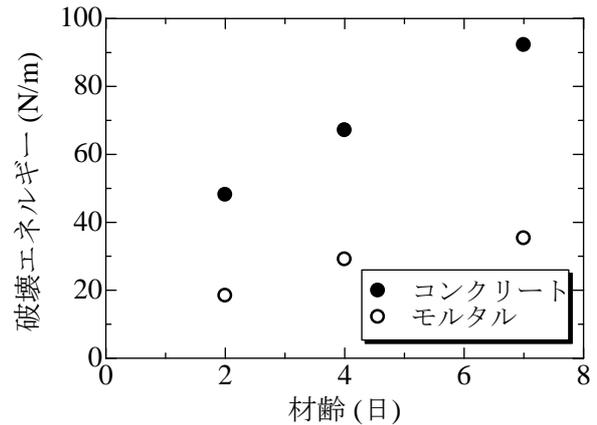


図-9 破壊エネルギーの経時変化 (シリーズ 2, 4, 7)

$7000\text{mm}^2$ ) で除した値を破壊エネルギー  $E$  と定義した。

$$\text{Disp} = 0.5 \times \text{CMOD} \quad (1)$$

図-9 より、材齢 7 日の結果であるが、コンクリートおよびモルタルの破壊エネルギーはそれぞれ  $92\text{N/m}$ ,  $35\text{N/m}$  となっており、通常のコンクリートやモルタルの破壊エネルギーの値の範囲に入っている<sup>3)</sup>。

初期ひび割れ供試体と初期ひび割れのない供試体の破壊エネルギー増分の比較を表-2 に示す。なお表-2 中の値を算定するにあたって、特に材齢 2 日と 7 日の関係を用いた概念図を図-10 に示す。シリーズ 7 またはシリーズ 4 の破壊エネルギー (それぞれ  $E_7$ ,  $E_4$ ) からシリーズ 2 の破壊エネルギー ( $E_2$ ) を引いた値  $E_7 - E_2$ ,  $E_4 - E_2$  が再養生によって生じた水和物によってもたらされたエネルギーと読み替えることができる。それぞれの値は、コンクリートでは  $E_7 - E_2 = 43\text{N/m}$ ,

$E_4-E_2=18\text{N/m}$ , モルタルでは  $E_7-E_2=17\text{N/m}$ ,  $E_4-E_2=11\text{N/m}$  であった。一方, 初期ひび割れ供試体について, 再養生期間にもたらされたエネルギーは, シリーズ 2-7 の破壊エネルギー( $E_{2-7}$ )およびシリーズ 2-4 の破壊エネルギー( $E_{2-4}$ )からシリーズ 2-2 の破壊エネルギー( $E_{2-2}$ )を引いたものと考えられる。よって  $E_{2-7}-E_{2-2}$ ,  $E_{2-4}-E_{2-2}$  は, コンクリートについてはそれぞれ  $35\text{N/m}$ ,  $18\text{N/m}$ , モルタルについてはそれぞれ  $15\text{N/m}$ ,  $12\text{N/m}$  となる。これによると,  $E_7-E_2$  は  $E_{2-7}-E_{2-2}$  とほぼ同じであり,  $E_4-E_2$  と  $E_{2-4}-E_{2-2}$  が同じ値となっており, 荷重-CMOD 曲線の形状は異なるが, 消費されるエネルギーは養生期間が同じであれば同程度であることが分かった。以上のように, ひび割れの有無によらず養生によって得られるエネルギーが一定であることは, ひび割れを有する若材齢コンクリートの引張構成則を構築する上で貴重な手がかりとなるものと考えられる。

#### 4. 結論

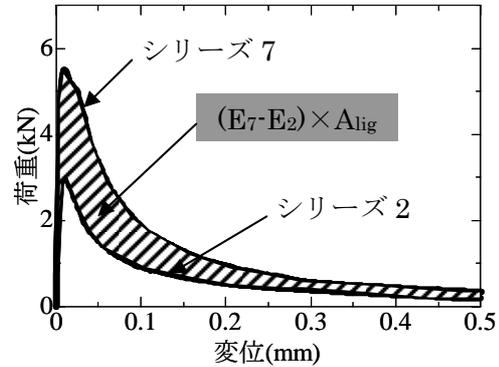
本研究では, コンクリートとモルタルについて, 若材齢時に導入されたひび割れの有無がその後のひび割れ性状に与える影響について検討する為, 切欠きを有する供試体の曲げ載荷試験を行い, 特にエネルギーに着目して検討した結果, 以下の結論を得た。

- 1) 材齢 2 日でひび割れを導入した供試体を 2 日および 5 日間再養生した結果, 初期ひび割れの無い供試体の曲げ強度の 60%~70% 程度の強度まで発揮した。
- 2) 荷重-変位関係から求められたエネルギーに着目すると, 再養生によって得られるエネルギー増分は, 初期ひび割れの有無によらずほぼ一定となった。このことは, ひび割れを有する若材齢コンクリートの引張構成則を構築する上で貴重な手がかりとなるものと考えられる。

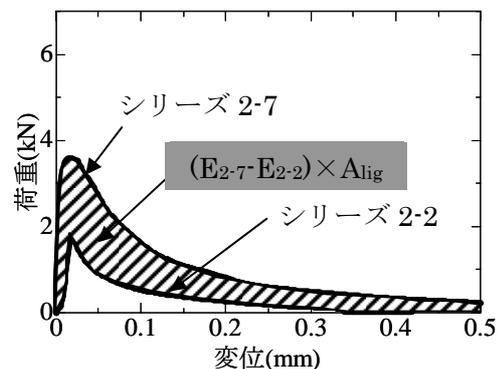
以上, 本研究で行われた実験条件での結果ではあるが, 初期損傷の程度や養生期間等がさら

表-2 破壊エネルギーの比較 (平均値)

	コンクリート	モルタル
$E_7-E_2(\text{N/m})$	43	17
$E_{2-7}-E_{2-2}(\text{N/m})$	35	15
$E_4-E_2(\text{N/m})$	18	11
$E_{2-4}-E_{2-2}(\text{N/m})$	18	12



(a) 初期ひび割れなし



(b) 初期ひび割れあり

図-10 破壊エネルギーの増分  
(材齢 2 日, 7 日)

に異なる実験を行い, データを収集していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 田辺忠顕：遷移材齢時コンクリートの構成則研究事始め, コンクリート工学, vol.40, No.1, pp.106-108, 2002
- 2) Bazant, Z. P. and Prasanna, S. : Solidification theory for concrete creep I : Formulation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1691-1703, 1989
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造的な性能照査編], p.28, 2002