

# 論文 コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れ予測に関する基礎的研究

上田 賢司<sup>\*1</sup>・佐藤 嘉昭<sup>\*2</sup>・清原 千鶴<sup>\*3</sup>・永松 静也<sup>\*4</sup>

**要旨:**コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れ発生の予測手法を確立するために、JIS原案に準じて実験を行った。その結果、ひび割れ発生までの期間と引張強度比(平均引張応力/引張強度)には相関性が認められた。また、有限要素法による乾燥収縮応力解析との比較から、応力解析で求めた要素ごとの応力とコンクリートの引張強度の比(引張応力比)をもとに、引張強度を超える応力が発生する領域の全断面に対する比率(面積比)を算出したところ、面積比が0.35~0.55の間でひび割れが発生することが分かった。

**キーワード:**乾燥収縮, ひび割れ, 応力解析, 引張強度比, 面積比

## 1. はじめに

コンクリート部材に発生する乾燥収縮ひび割れを予測するには、部材内の応力分布を把握することが重要である。筆者らはこれまでに、拘束鋼材に生じるひずみ分布から拘束コンクリートに負荷される引張力を算出し、有限要素法による応力解析プログラムを用いて乾燥収縮応力解析を行ってきた<sup>1),2)</sup>。本研究では乾燥収縮ひび割れ実験の結果について、コンクリートの引張強度と乾燥収縮応力解析によって得られた部材内に生じる引張応力を比較することからひび割れ発生に関して考察を加えることにした。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験項目

JIS原案<sup>3)</sup>の「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」に準拠し、表-1に示すようにコンクリートの調合、乾燥開始材齢、拘束鋼材の種類を変化させた乾燥収縮ひび割れ実験を計画した。また、同時に脱水量および自由収縮ひずみの測定を行い、シリーズIでは割裂強度、シリーズIIでは直接引張強度の乾燥下における強度の経時変化を測定した。

表-1 実験項目

シリーズ	調合	乾燥開始材齢 (日)	拘束鋼材の種類 (mm)
I	A, B	3, 7, 28, 112, 365	100x50x50x2.3
II	C	1, 3, 7, 28	100x50x50x3.2

表-2 コンクリートの調合

調合	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad.
A	58.1	45.1	169	291	806	1033	0.349
B	39.0	38.5	183	469	614	1033	0.563
C	59.1	47.4	178	301	849	949	0.753

W:水, C:セメント, s/a:骨材率, S:細骨材, G:粗骨材, Ad.:混和剤  
**[調合A, B]**  
 セメント:普通ポルトランドセメント(比重3.16)  
 細骨材:混合砂(比重2.56, 吸水率2.83%, 粗粒率2.83)  
 粗骨材:碎石(比重2.69, 吸水率1.02%, 実績率59.7%)  
 混和剤:AE減水剤標準形  
**[調合C]**  
 セメント:普通ポルトランドセメント(比重3.15)  
 細骨材:山砂(比重2.63, 吸水率2.12%, 粗粒率2.69)  
 粗骨材:碎石(比重2.66, 吸水率0.47%, 実績率58.0%)  
 混和剤:AE減水剤標準形 I 種

### 2.2 コンクリートの調合および養生

実験には調合の異なる3種類のレディーミクストコンクリート(調合A:21-15-20N, 調合B:40-15-20N, 調合C:21-18-20N)を使用した。調合および使用材料の物理的性質を表-2に示す。供試体は材齢1日で脱型し、所定の材齢まで養生室内(温度20±1℃)で封かん養生とした。

\*1 ㈱さとうベネック建築事業本部技術開発室 工博(正会員)

\*2 大分大学教授 工学部福祉環境工学科 工博(正会員)

\*3 大分大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

\*4 大分大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

## 2.3 試験方法

### (1) 拘束ひび割れ試験

拘束ひび割れ供試体を図-1に示す。拘束鋼材はJIS G 3350の軽溝形鋼(100x50x50mm)の厚さ2.3mm(断面積:4.426cm<sup>2</sup>)と3.2mm(同:6.063cm<sup>2</sup>)の2種類を用いた。鋼材のひずみは長さ方向の中央にひずみゲージ(3mm)を貼付けて測定した。コンクリートのひずみの測定は、シリーズIでは長さ60mmの表面接着型ポリエステルゲージを中央部分に貼付け、シリーズIIでは長さ60mmの小型埋込みゲージ<sup>4)</sup>を用いて行った。なお、乾燥は恒温恒湿室(温度20±0.5°C, 湿度60±5% R.H.)内で各乾燥開始材齢で2体ずつ行った。

### (2) 脱水量および自由収縮ひずみの測定

脱水量および自由収縮ひずみ測定用の供試体は10x10x40cmの角柱供試体を用い、10x10cmの面をパラフィンでシールし、4面乾燥状態で行った。供試体は各乾燥開始材齢で3本ずつ用意し、脱水量は電子天秤(精度0.1g)により質量変化を測定した。ひずみの測定は拘束ひび割れ供試体と同様に行った。

### (3) 引張強度試験

各乾燥開始材齢ごとに拘束ひび割れ供試体と同じ条件で3体ずつ乾燥させ、乾燥期間1, 3, 7, 14, 28, 56および365日での強度およびひずみを測定した。割裂強度試験はφ10x20cmの円柱供試体を用い、JIS A 1113に準拠し行った。直接引張強度試験は10x10x65cmの角柱供試体を用い、チャック式の引張試験装置<sup>5)</sup>を用いて行った。

## 3. 実験結果および考察

表-4に各調査2体ずつの供試体を用いたひび割れ実験結果の一覧を示す。ひび割れの発生は調査Bでの乾燥開始材齢112日の1体および365日での2体以外の供試体に認められたが、ひび割れ発生までの期間と乾燥開始材齢との間には明確な相関関係は認められない。また、ひび割れ発生時の拘束率(拘束引張りひずみ/自由収縮ひずみ)はシリーズIでは40~74%程度、シリーズIIでは56~85%程度であり、ばらつきが大きい

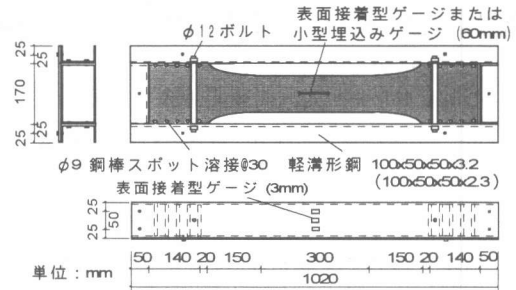


図-1 拘束ひび割れ供試体(JIS 原案による)

表-4 ひび割れ実験結果の一覧

調査	乾燥開始材齢(日)	ひび割れ発生までの期間(日)	ひび割れ発生時の拘束率(%)	ひび割れ発生時の平均応力(MPa)	引張強度比(%)
A	3	16.0;15.0	50.6;74.0	1.89;1.94	76;78
	7	15.5;14.6	40.4;58.2	1.67;2.00	73;87
	28	42.0;16.5	57.9;52.9	1.77;1.80	77;72
	112	28.5;8.2	40.5;— <sup>c)</sup>	1.49;1.51	56;54
	365	30.0;41.6	49.1;— <sup>c)</sup>	2.04;1.72	64;61
B	3	28.5;16.5	50.7;55.9	2.21;1.98	67;62
	7	19.5;60.0	55.3;64.0	2.44;2.94	64;86
	28	55.7;39.6	52.7;40.9	2.98;2.91	83;81
	112	41.7;— <sup>a)</sup>	53.7;—	2.61;—	79;—
	365	— <sup>a)</sup> ;— <sup>a)</sup>	—;—	—;—	—;—
C	1	7.6;13.6	70.6;66.7	1.51;1.95	84;111
	3	12.1;— <sup>b)</sup>	72.5;—	2.25;—	108;—
	7	9.0;11.0	84.9;78.1	1.98;2.06	83;86
	28	6.5;11.0	65.6;56.4	1.88;2.06	75;78

a) ひび割れが発生していない

b) 2体の供試体のうち、1体は測定できていない

c) 拘束コンクリートのひずみが測定できていない

い結果を示した。ひび割れ発生時の平均引張応力は拘束鋼材のひずみを用い、ひずみ分布の計算式<sup>1)</sup>より算出した。引張強度比(平均引張応力/引張強度)を算出するための引張強度は調査A, Bでは割裂強度、調査Cでは直接引張強度の乾燥を受けた供試体の経時変化より、ひび割れ発生時の強度を推定した。これによると強度試験方法の違いはあるものの、調査A, Bでは引張強度の54~87%, 調査Cでは75~108%の応力でひび割れが発生した。ひび割れ発生までの期間と引張強度比の関係を図-2に示す。ひび割れの発生していないものは、引張応力が最大となる期間での引張強度比を示している。また、シリーズIIでは、筆者らの既往の実験結果<sup>6)</sup>も併せてプロットしている。これを見るとひび割れ発生

までの期間と引張強度比の間には相関性が認められ、ひび割れ発生までの期間が長期になるほど引張強度比が大きくなる傾向にある。また、ひび割れの発生しなかったものは発生したものと比較すると引張強度比が小さくなっている。ひび割れは引張強度比が一定のレベルを超えた時に発生すると考えられるが、ひび割れ発生までの期間が長期になるほどそのレベルが大きくなる傾向にあることが分かる。

#### 4. 乾燥収縮応力解析

##### 4.1 解析方法

拘束コンクリートに生じる乾燥収縮応力の解析は、筆者らが開発した有限要素法による乾燥収縮応力解析システムを用いて行った。詳細は参考文献<sup>2)</sup>に述べている。

##### 4.2 解析結果

###### (1) 平均脱水量および平均収縮ひずみ

図-3に平均脱水量、図-4に平均収縮ひずみの解析結果および測定結果を示す。解析値は全要素の平均値を示している。両者とも乾燥開始直後に若干の差は見られるが、各調査ともすべての乾燥開始材齢において解析結果と測定結果はよく一致している。したがって、部材内の水分量および線非拘束収縮ひずみ(他から拘束を受けない微小要素に固有の乾燥収縮ひずみ)分布もほぼ予測できているものと仮定し、以後の解析を進めた。

###### (2) 平均乾燥収縮応力

図-5に平均乾燥収縮応力の解析結果および測定結果の一例を示す。解析値は前述した部材内の脱水量の分布、それに対応した線非拘束収縮ひずみの分布をもとに計算した値である。測定値は、拘束鋼材のひずみ分布より算出した値である。測定した2体の供試体のうち、測定値と解析値のズレが小さい方の結果を示しているが、両者は必ずしも一致せず、乾燥期間が進むにつれて解析値は測定値を上回る傾向を示す。また、乾燥開始材齢が長期(112, 365日)のものは、測定値と解析値のズレが大きい結果となった。これ

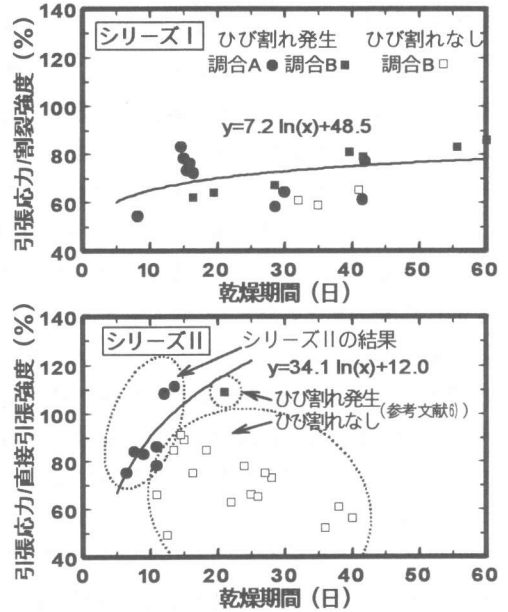


図-2 ひび割れ発生までの期間と引張強度比の関係

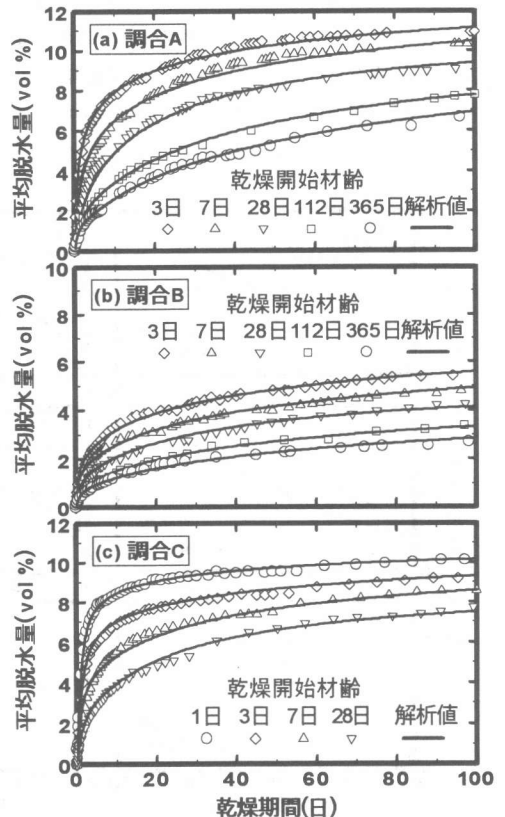


図-3 平均脱水量の経時変化

は、現時点での筆者らの乾燥収縮応力解析システムでは、ひずみ構成式においてコンクリートのクリープの影響は取り込んでいるが、塑性変形やひび割れの発生・進展の影響は考慮されていないこと、また、応力解析のためには各種材料定数が必要になるが、水和の進行程度や乾燥の程度などに影響される材料定数のすべてを的確に把握できていないこと、などによるものと考えられる。また、調合Bの場合、乾燥開始直後に応力が急激に大きくなる。これは、図4(b)に示す平均乾燥収縮ひずみの解析値は乾燥期間全般を通しては測定値を十分によく近似できているように見えるが、乾燥開始直後(3日以内)では測定値より50%程度大きくなっているためである。線非拘束収縮ひずみの分布が応力の発生源となるため、収縮応力の解析値は収縮ひずみ量に大きく影響を受ける。

### (3) ひび割れ発生時期の検討

部材内で引張応力が不均一に分布する場合、最大引張応力がコンクリートの引張強度に達してもひび割れは発生しない。これは破壊条件に応力勾配が影響するため、応力勾配の影響を具体的に考慮してひび割れ発生を予測すること

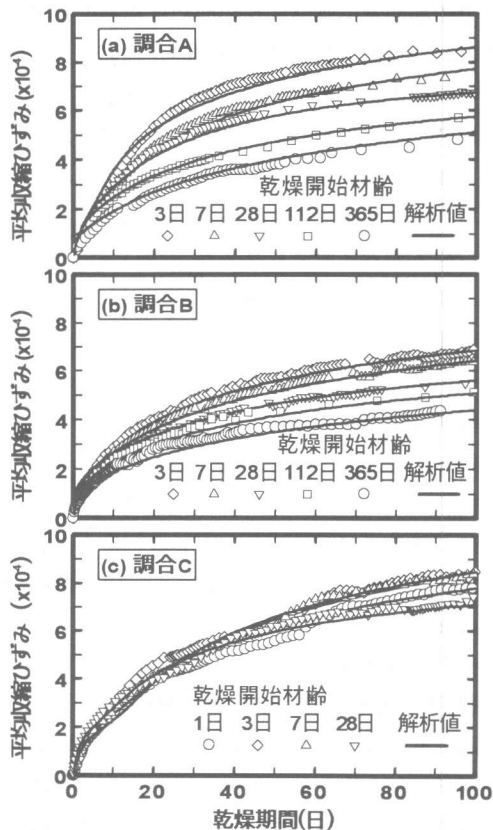


図-4 平均収縮ひずみの経時変化

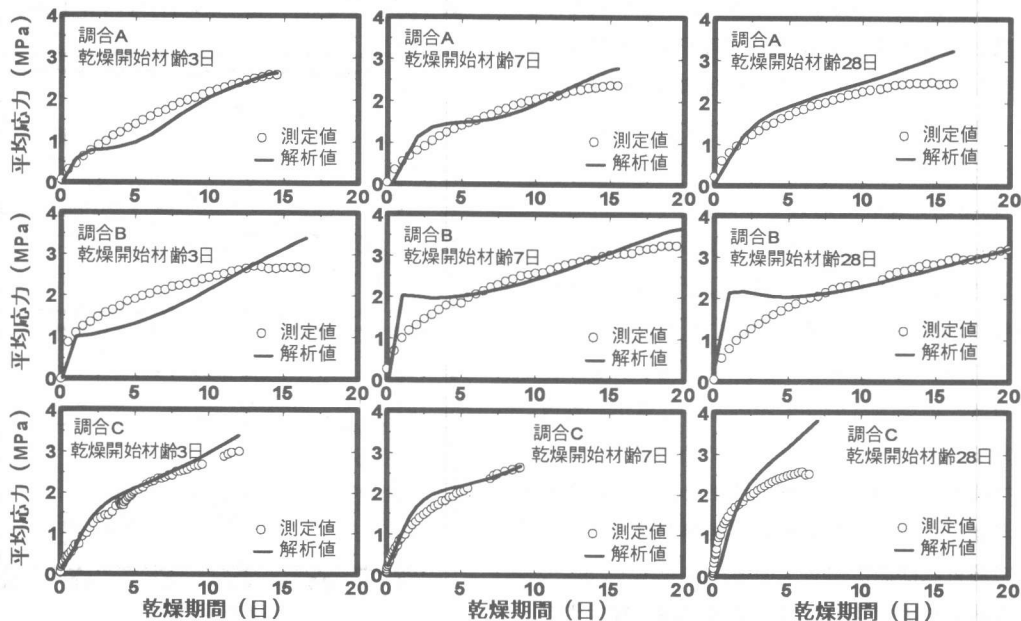


図-5 応力解析結果

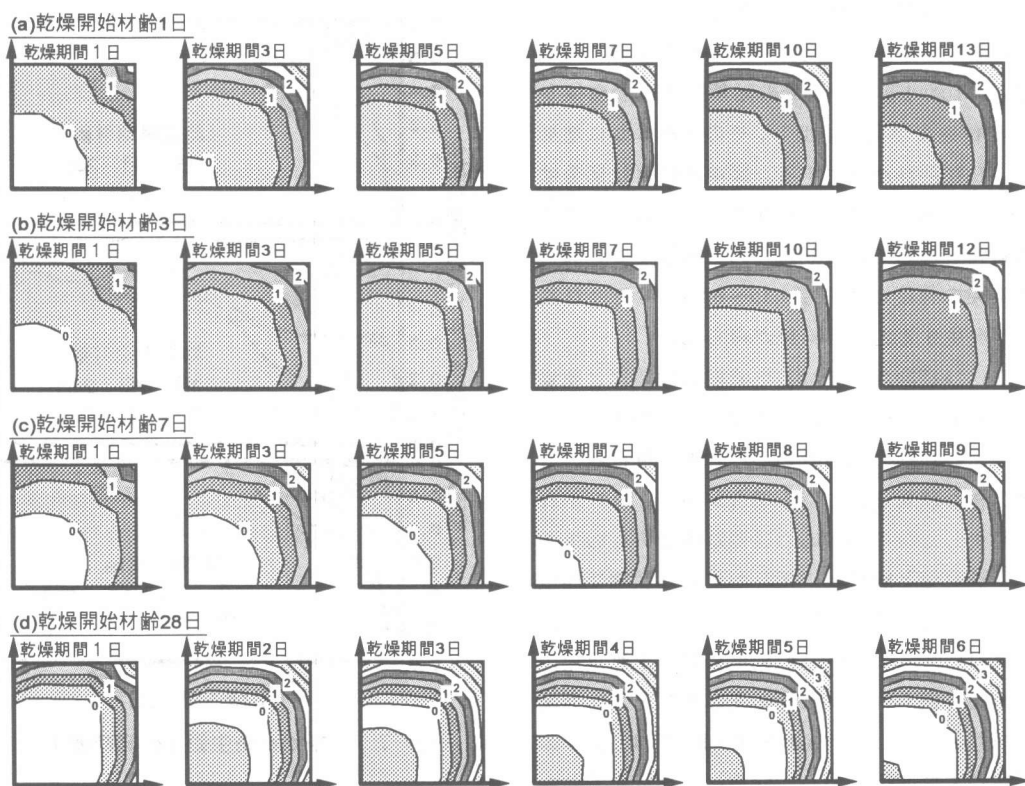


図-6 引張応力比の分布の経時変化(調合Cの解析結果)

は極めて難しい問題である。そこでここでは、ひび割れが発生した時の応力に着目し、発生時期との関係を考察することにした。その方法として、応力解析で求めた要素ごとの応力とその時点の要素の引張強度との比(引張応力比)を全断面について求め、引張強度を超える応力が発生する領域を全断面に対する比率(面積比)として算出し、面積比と部材のひび割れ発生時期との関係に対して検討を加えることにした。これについては解析値と測定値のズレが比較的小さい乾燥開始材齢が28日以内の実験結果を対象とし、調合Cの乾燥開始材齢に統一した。

図-6は調合Cの各乾燥開始材齢における引張強度比の分布を等値線図で示したものである。図中の等値線は比率を0.5間隔で示しており、数値1は応力と強度が等しいことを示している。したがって、この等値線より外側の部分は応力が強度を上回っている領域であり、ひび割れが発

生することになる。数値0以下は応力が圧縮応力状態の領域である。ここでの解析は、数値が1を超えた場合、すなわちひび割れが発生すると考えられる場合でも、その影響は考慮せずに計算を進めている。これによると、乾燥開始材齢1, 3日の場合、圧縮応力領域は乾燥後3日前後で消滅するが、7, 28日の場合はこの状態が長期間継続し、28日ではひび割れの発生した材齢でも圧縮領域は広範囲に及んでいることが分かる。また、乾燥開始材齢が長期になるほど等値線の間隔は密になり、このことは部材内部で応力勾配が急であることを示している。調合A, Bの場合についても引張応力比の分布を求めたが、ほぼ同様の状況を示すことが分かった。

図-6より算出したひび割れ発生までの面積比の経時変化を図-7に全調合について示す。図-5に示したように平均応力の解析結果が実験結果を完全に捉えられていないため、この結果

は実際の状況とは厳密には異なることになる。しかしながらある程度の傾向は示しており、引張応力比が1以上の領域の面積比は乾燥直後から0.3付近まで急に増加し、その後緩やかに増加し、ひび割れが発生する。図中の網掛け部分は各調合においてひび割れが発生した時の面積比の範囲を示しているが、今回の解析では、調合や拘束の程度によらず0.35~0.55程度でひび割れが発生するという結果が得られた。

次にひび割れが発生した時期の面積比と乾燥開始材齢の関係について検討する。前述したように、ひび割れ発生時の平均応力は解析値の方が大きな値を示している場合が多い。ひび割れが発生した時の平均応力は測定値そのものであり、測定値と解析値にズレが生じた状態で面積比の比較をしても意味がない。そこで、このズレに対応するように、解析値に対する測定値の比率を、得られた面積比に乗じることで、面積比を修正した。その結果を図-8に示す。図中の実線は近似曲線を示している。これによると、乾燥開始材齢と面積比の間には、調合によっては必ずしも明確な関係は得られていないが、乾燥開始材齢が長期になるほどひび割れ発生時の面積比が小さくなる傾向にあることが分かる。

## 5. あとがき

ひび割れの発生時期を的確予測することは極めて難しい問題で、部材内の応力状態をできる限り正確に把握することが不可欠である。その上で適切な構成式やひび割れ発生条件を導入できれば、ひび割れ発生時期を予測することはできなくても、ひび割れの発生のし易さは予測ができるようになると思われる。

## 謝辞

本研究の一部は平成9年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)、課題番号09650633)によって行った。

## 参考文献

1) 上田賢司・佐藤嘉昭・清原千鶴・永松静也: コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ実験における拘束鋼材のひずみ分布, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 703-708, 1997

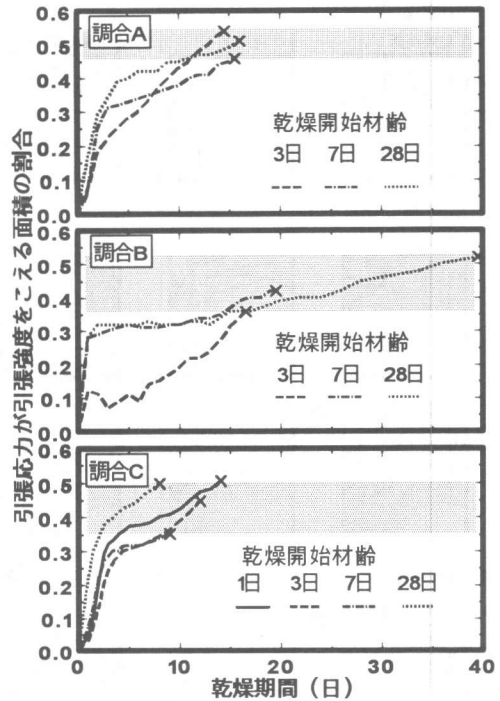


図-7 ひび割れ発生領域の経時変化

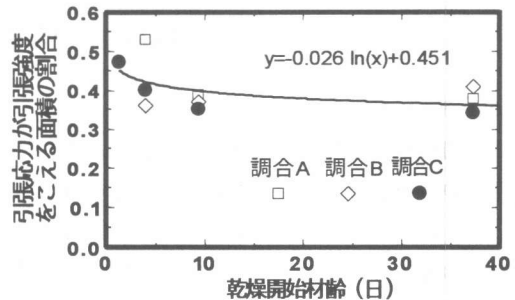


図-8 乾燥開始材齢と面積比の関係

- 2) 上田賢司・佐藤嘉昭・清原千鶴・永松静也: コンクリート部材に生じる乾燥収縮応力の解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 637-741, 1998
- 3) 仕入豊和ほか: コンクリートのひび割れ試験方法(案) - 乾燥収縮ひび割れ・温度ひび割れ, コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.40-50, 1985.3
- 4) 佐藤嘉昭・清原千鶴ほか: コンクリート用小型埋め込みゲージの開発(その1,その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 635-638, 1997. 9
- 5) 上田賢司ほか: コンクリートの直接引張強度に及ぼす乾燥の影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 51, pp. 828-833, 1997
- 6) 上田賢司・村上卓ほか: コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れの予測に関する研究(その2, その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.101-104, 1997. 9