

# 論文 SBR を添加したコンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する検討

熊野 知司\*1・井上 善彦\*2・野口 裕介\*3・矢村 潔\*4

**要旨:** コンクリートへのポリマーの添加を耐久性や乾燥収縮特性を改善するための改質技術の1つであるとしてとらえ、セメントの質量比で10%以下という比較的少ない添加量域における力学的特性ならびに乾燥収縮ひび割れに関する検討を行った。その結果、水セメント比一定、単位水量一定という配合条件でポリマーを添加しても、強度特性の増加はなく、乾燥収縮ひび割れも早期に発生するという結果となった。一方、配合条件を単位セメント量一定、スランプ一定とすると、ポリマーの添加に伴い、強度特性および乾燥収縮ひび割れの発生に関して改善効果が認められた。

**キーワード:** ポリマーセメントコンクリート, SBR, 乾燥収縮ひび割れ試験, クリープ係数

## 1. はじめに

セメント系材料へのポリマーの添加は、構造物の表面被覆材、仕上げ材、補修材や断面修復材など、その高い接着力を活かした利用が図られており、利用形態はモルタルとしての利用がほとんどとなっている。ポリマーの添加は、細孔中でのポリマーフィルム形成によって、有害物質透過の抑制や保水性の向上といった効果をもたらす。耐久性や水密性の向上という付加価値をセメント系材料に付与する<sup>1)</sup>が、ポリマーを構造体コンクリートに添加するという事例は、ほとんどなかった。大濱らは、コンクリート中へのポリマーの添加による改質について検討を行っており、強度特性<sup>2)</sup>や乾燥収縮特性<sup>3)</sup>に対する効果について報告している。しかしながら、その後のポリマーの添加に関する研究開発の多くは、先述した仕上げ材や断面修復材としての研究がほとんどとなっている。これは、高い付加価値を狙ったポリマー添加の場合には、通常、セメント質量の10~30%の添加量となるため、施工量が多くなるコンクリートへの添加ではコスト面の課題が大きくなるためであると考えられる。

一方で、持続的発展が可能な社会の創成が急務となっている現在において、構造物の長寿命化に関する検討が行われている。骨材事情の悪化やリサイクル材料への対応といった比較的品質の低い材料を用いるケースが増加している反面、建築学会<sup>4)</sup>や土木学会<sup>5)</sup>においてコンクリートの乾燥収縮ひび割れに一定の目安を設け始めている。乾燥収縮対策としては膨張材や乾燥収縮低減剤の使用などがとられているが、耐久性の向上というさらなる付加価値が期待できるポリマーの添加という方法も乾燥収縮低減対策の選択肢の1つとして存在すると思われる。

そこで、本研究では、ポリマー添加をコンクリートの

改質技術の1つと位置付け、比較的ポリマーの添加量を少なくしたポリマーセメントコンクリートの力学的特性を把握するとともに乾燥収縮ひび割れ試験を実施して、ひび割れの抑制効果に関する検討を行った。本論文は一連の検討結果を報告するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の構成

実験は、ポリマーの添加による効果を純粋に検討することを目的に水セメント比一定、単位水量一定としたシリーズA<sup>6)</sup>と、大濱ら<sup>2)</sup>が提案している単位セメント量一定、スランプ一定としたシリーズBという2種類の実験を行った。

### 2.2 使用材料および配合

表-1 に使用材料の一覧を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。ポリマーにはスチレンブ

表-1 使用材料

|       |   |
|-------|---|
| セメント  | 普通ポルトランドセメント<br>密度 3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3380cm <sup>2</sup> |
| 細骨材   | 大東産山砂(S1)<br>表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 2.66,<br>吸水率 0.92%    |
|       | 野洲産川砂荒目(S2)<br>表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 2.68,<br>吸水率 0.62%  |
|       | 野洲産川砂細目(S3)<br>表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 2.24,<br>吸水率 0.85%  |
| 粗骨材   | 高槻産碎石<br>表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> ,<br>粗骨材最大寸法 20mm               |
| SBR   | 密度 0.99g/cm <sup>3</sup> , 固形分 45.3%                                |
| AE減水剤 | リグニンスルホン酸系  |
| 消泡剤   | シリコンエマルジョン系   |

\*1 摂南大学 工学部都市環境システム工学科准教授 博(工) (正会員)

\*2 前田工織(株) 環境資材事業本部

\*3 摂南大学 大学院工学研究科社会開発工学専攻

\*4 摂南大学 工学部都市環境システム工学科教授 工博(正会員)

表-2 示方配合

| シリーズ | SBR (%) | Gmax (mm) | SL (cm) | W/C (%) | Air (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |      | 混和剤(g/m <sup>3</sup> ) |       |       |
|------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------------------------|-------|-------|
|      |         |           |         |         |         |         | W                       | C   | S1  | S2  | S3  | G    | SBR                    | AE減水剤 | 消泡剤   |
| A    | 0       | 20        | 8±1     | 50      | 6±1     | 44.1    | 170                     | 340 | 740 | —   | —   | 1006 | —                      | 850   | —     |
|      | 5       |           | —       |         |         |         | 170                     | 340 | 722 | —   | —   | 982  | 17                     | —     | 4080  |
|      | 7.5     |           | —       |         |         |         | 170                     | 340 | 712 | —   | —   | 968  | 25.5                   | —     | 8160  |
|      | 10      |           | —       |         |         |         | 170                     | 340 | 702 | —   | —   | 958  | 34                     | —     | 13600 |
| B    | 0       | 20±1      | 54.4    | 54.4    | 6±1     | 45.5    | 185                     | 340 | —   | 510 | 255 | 942  | —                      | 850   | —     |
|      | 5       |           | 47.1    | 160     |         |         | 340                     | —   | 516 | 258 | 960 | 17   | —                      | 3696  |       |
|      | 10      |           | 35.3    | 120     |         |         | 340                     | —   | 534 | 267 | 993 | 34   | —                      | 3696  |       |

タジエンゴムラテックス（以下、SBR）を使用し、消泡剤にはシリコンエマルジョン系のものを使用した。

表-2 に示方配合の一覧を示す。シリーズ A は、W/C=50%、W を 170kg/m<sup>3</sup>としたスランブ 8cm のコンクリートを基準とし、セメント質量に対する SBR の固形分比（以下、P/C）を 0%、5.0%、7.5%および 10%の 4 水準とした。このとき、SBR の固形分は、混和材と同様にセメントの外割とし、SBR 中の水分は単位水量に含めた。一方、シリーズ B は P/C を 0%、5%、および 10%の 3 水準とした。配合は、単位セメント量を 340kg/m<sup>3</sup>と一定とし、スランブが、20±1cm となるように各 P/C 毎に単位水量を調整した。すなわち、シリーズ B では、P/C が変化すると W/C が変化することになる。

### 2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜは、パン型強制練りミキサーを用い、セメント、細骨材、粗骨材を投入して 30 秒間の空練りを行い、水、消泡剤および SBR を投入し、60 秒間練混ぜた。スランブおよび空気量（空気室圧力法）の測定後、型枠に打ち込んだ。締固めは、内部振動機により行った。

力学的特性に関する実験は、材齢 7 日と 28 日において圧縮強度（JIS A 1108）、割裂引張強度試験（JIS A 1113）および直接引張試験を行った。直接引張試験は、写真-1 に示す試験装置を用い、ボルトを埋め込んだ 10×10×30cm の角柱供試体をセットし、引張力を与え、側面に貼り付けた電気抵抗線ひずみゲージ（検長 60mm）を用いて引張ひずみの測定を行った。なお、強度特性の試験用の供試体の養生は、ポリマーセメントモルタルの養生方法（JIS A 1171）にならない、脱型後 7 日まで 20±2℃の水中養生を行い、その後、温度 20±2℃、湿度 60±10%の恒温恒湿室内で気中養生を行った。

乾燥収縮ひび割れ試験は、JIS A 1151 に準拠して行った。拘束板のひずみは検長 10mm のひずみゲージを 4ヶ所貼り付けて測定した。コンクリートの自由収縮ひずみおよびコンクリートの拘束収縮ひずみの測定には、メタルベースの電気抵抗線ひずみゲージ（検長 60mm）を使用し、湿気の影響をさけるようにした。なお、乾燥収縮



写真-1 試験装置

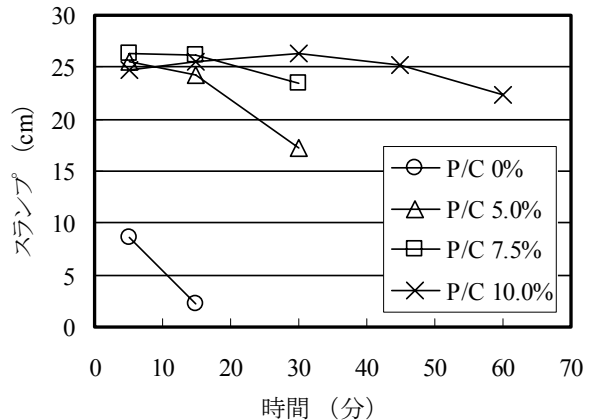


図-1 P/C ごとのスランブの経時変化

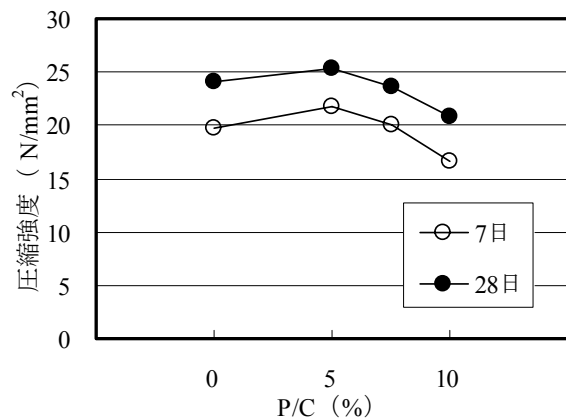


図-2 P/C と圧縮強度との関係

ひび割れ試験用供試体は、湿布および工業用ラップを用いて7日間、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の潤湿養生を行った後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 10\%$ のチャンバー内に入れ、乾燥を開始した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 シリーズA

##### (1)スランブに関する検討

図-1 にシリーズAにおけるスランブの経時変化を示す。図より、 $P/C=0\%$ のコンクリートのスランブが8cm程度であったのに対して、SBRを添加したコンクリートはいずれの場合もスランブが大きく増大していることがわかる。SBRは、合成ゴムの微粒子を水中に分散させたディスパージョンの形態をとっており、微粒子のボールベアリング作用や界面活性剤の作用がセメント粒子にまで及び、結果としてスランブが増大するものと考えられている<sup>1)</sup>。 $P/C=5.0\%$ 、 $7.5\%$ の場合は時間の経過に伴いスランブは減少しているが、 $P/C=10.0\%$ の場合は30分後まではスランブは増加し、その後は減少する傾向となった。

##### (2)力学的特性に関する検討

図-2 に圧縮強度の試験結果を示す。図より、シリーズAのW/C一定、W一定という配合条件のもとでは、SBRを添加することによって圧縮強度は同程度かむしろ低下する傾向にあることがわかる。

図-3 に割裂引張強度の試験結果を示す。図より、割裂引張強度においても圧縮強度と同様にSBRの添加によって強度が低下する傾向がみられることがわかる。SBRを添加したコンクリートでは、セメントの水和反応とポリマーフィルムの形成が同時に進行すると言われている<sup>1)</sup>。水の存在が必要な水和反応と水分の乾燥がある程度重要となるポリマーフィルムの形成という、ある意味相反する環境下での反応が同時進行しているため、配合条件によってはコンクリートとしての強度発現が低下する場合もあると解釈できる。

図-4 にP/Cと引張終局ひずみとの関係を示す。図より、P/Cが大きくなるにつれて引張終局ひずみは大きくなっている。このことより、引張伸び能力という観点では、有利になると思われる。したがって、SBRの添加によって乾燥収縮ひび割れなどの強制的なひずみにより発生するひび割れの抑制には、効果がある可能性があるといえる。

##### (3)乾燥収縮ひび割れに関する検討

図-5 に乾燥日数と自由収縮ひずみとの関係を示す。図より、 $P/C=7.5\%$ の場合の自由収縮ひずみが $P/C=0\%$ の場合のひずみの約3/4程度になっていることがわかる。これは、ポリマーの保水効果によりコンクリートの乾燥収縮が抑制されたことによると思われる。

図-6 および図-7 に乾燥日数とコンクリートの拘束

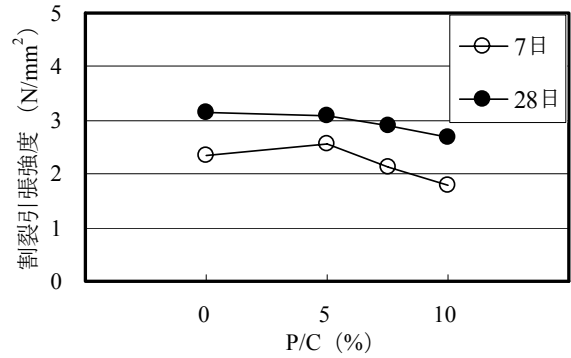


図-3 P/Cと割裂引張強度との関係

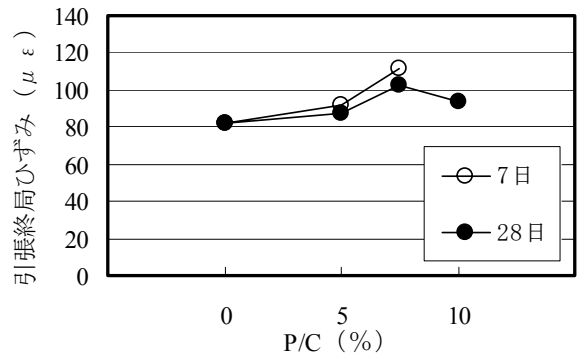


図-4 P/Cと引張終局ひずみとの関係

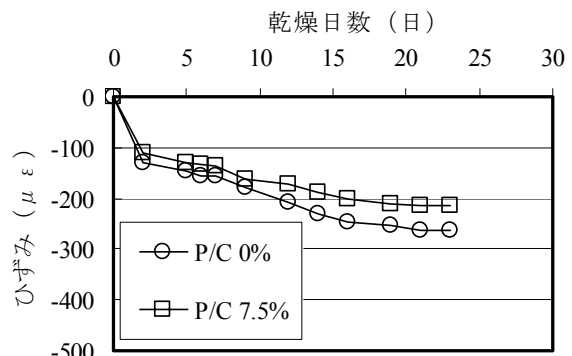


図-5 乾燥日数と自由収縮ひずみとの関係

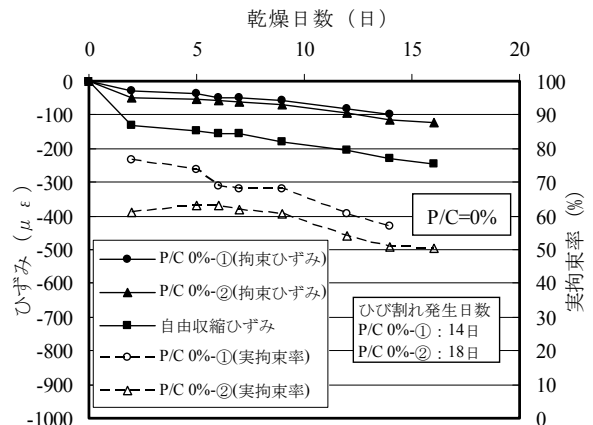


図-6 乾燥日数とコンクリートの拘束収縮ひずみ、自由収縮ひずみおよび実拘束率との関係

収縮ひずみ  $\varepsilon_c$ , 自由収縮ひずみ  $\varepsilon_f$  および実拘束率  $K$  との関係を示す。ここで、実拘束率  $K$  は、式(1)によって算定される。

$$K = \frac{(\varepsilon_f - \varepsilon_c)}{\varepsilon_f} \quad (1)$$

引張終局ひずみの傾向から、収縮によるひび割れ発生は 0% の場合よりも遅くなる可能性も考えられたが、図に示すように、むしろ早期に乾燥収縮ひび割れが生じる結果となった。図-3 より、割裂引張強度は  $P/C=7.5$  の場合に約 10% 低下しており、この強度の低下が収縮ひび割れの発生に影響を与えた可能性があると思われる。

### 3.2 シリーズ B

#### (1) 力学的特性に関する検討

表-3 にシリーズ B におけるスランプおよび空気量の測定結果を示す。

図-8 に、シリーズ B における圧縮強度試験の結果を示す。図より、スランプを一定とした本シリーズにおいては、 $P/C$  が増加するにつれて圧縮強度が増加する傾向となった。これは、主には、 $P/C$  を増加させるにつれて  $W/C$  が小さくなることに起因していると思われる。

図-9 に割裂引張強度の試験結果を示す。図より、シリーズ A とは異なり、割裂引張強度においても圧縮強度と同様に  $P/C$  が増加するにつれて割裂引張強度が増加する傾向となった。ただし、材齢 7 日における場合に比べて材齢 28 日の方が  $P/C$  の増加による強度の増加の程度が大きくなっている。材齢 7 日までの養生は水中養生であり、以降は気中養生されていることを考えると  $P/C$  の増加による引張強度の増加には、乾燥に伴うポリマーフィルムの形成も影響を与えている可能性があると思われる。SBR を添加したコンクリートの引張強度発現にはセメントの水和反応とポリマーフィルムの形成との間で複雑な影響をうけているものと推察される。

図-10 に  $P/C$  と材齢 28 日における  $P/C$  と引張終局ひずみとの関係を示す。図より、 $P/C=0\%$  のものと  $P/C=5\%$  のものとは、引張終局ひずみは大差ないが、 $P/C=10\%$  の場合には大きく増加していることがわかる。同様の傾向は、 $W/C$  を一定とした実験シリーズ A (図-4) でも表れており、SBR を添加することによる特徴の一つと考えられる。

図-11 に引張静弾性係数の比較を示す。引張静弾性係数は、圧縮と同様の考え方で 1/3 割線弾性係数を用いた。図より、引張静弾性係数は、 $P/C$  の増加に伴い若干増加する傾向が見られた。

#### (2) 乾燥収縮ひび割れに関する検討

図-12 に乾燥日数と自由収縮ひずみとの関係を示す。図より、 $P/C$  を大きくするにつれて自由収縮ひずみは小

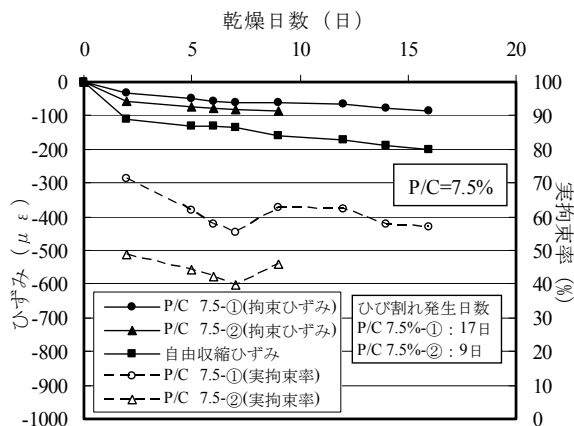


図-7 乾燥日数とコンクリートの拘束収縮ひずみ、自由収縮ひずみおよび実拘束率との関係

表-3 スランプおよび空気量

| P/C | スランプ (cm) | 空気量 (%) |
|-----|-----------|---------|
| 0   | 20.5      | 5.0     |
| 5   | 19.3      | 5.9     |
| 10  | 19.1      | 6.0     |

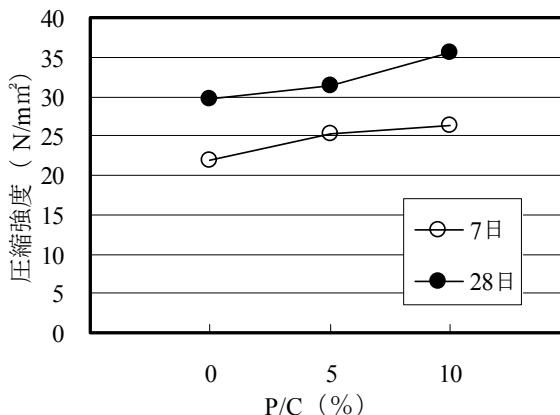


図-8  $P/C$  と圧縮強度との関係

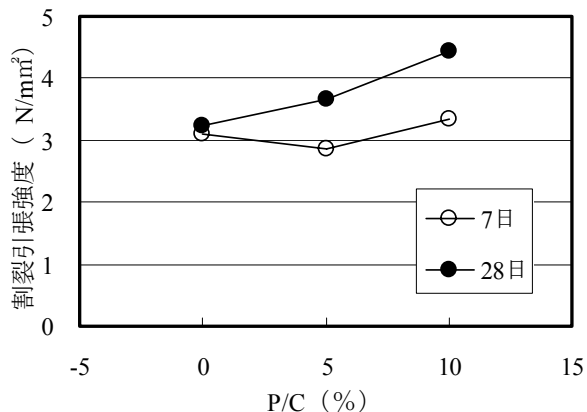


図-9  $P/C$  と割裂引張強度との関係

さくなり、P/C=10%の場合にはP/C=0%の場合の半分程度となっていることがわかる。これは、シリーズAで見られたようにポリマーの保水効果に加えて、Wが120kg/m<sup>3</sup>と小さくなっていることが要因となっていると思われる。

図-13～図-15に乾燥日数とコンクリートの拘束収縮ひずみ、自由収縮ひずみおよび実拘束率との関係を示す。図より、P/C=0%の場合には乾燥開始後15日および18日でひび割れが発生したのに対し、P/C=5%の場合には22日および28日となり明らかな差が生じた。また、P/C=10%の場合には、乾燥開始後55日(約8週間)が経過してもひび割れが発生しなかったため、自由収縮ひずみの増加がほぼ収束していると判断し、ひび割れ発生なしと評価して測定を打ち切った。Aシリーズと異なり、乾燥収縮ひび割れ試験においてこのような大きな差が生じたのは、SBRの添加により自由収縮ひずみが抑制されたこと、SBRの添加によってW/Cが小さくなり、引張強度が増加したことが大きな要因になっていると考えられる。単位セメント量一定、スランプ一定としたBシリーズの場合にはSBRの添加によって、乾燥収縮ひび割れに対する抵抗性が向上するものと考えられる。

ここで、コンクリートの自由収縮ひずみ  $\epsilon_f$  と拘束収縮ひずみ  $\epsilon_c$  との差である  $\epsilon_f - \epsilon_c$  は引張弾性ひずみとクリープひずみとの和で示されると仮定できる。したがって、測定結果より、式(2)、(3)を用いることにより、見掛けのクリープひずみ  $\epsilon_{creep}$  および見掛けの引張クリープ係数  $\phi$  を求めることができる。図-16に乾燥収縮ひび割れ試験の結果から求めた乾燥日数と見掛けの引張クリープ係数との関係を示す。なお、コンクリートの引張静弾性係数は、厳密には材齢によって変化する値を用いるべきであるが、本研究では、試験期間中の代表値として材齢28日の値を用いた。

$$\epsilon_{creep} = \epsilon_f - \epsilon_c - \epsilon_{ct} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{\epsilon_{creep}}{\epsilon_{ct}} \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon_{ct}$ : 引張弾性ひずみ  $\left( = \frac{\epsilon_s E_s A_s}{E_{ct} A_c} \right)$   
 $\epsilon_s$ : 拘束板のひずみ  
 $E_s$ : 拘束板のヤング係数 (=200kN/mm<sup>2</sup>)  
 $A_s$ : 拘束板の断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $A_c$ : コンクリートの断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $E_{ct}$ : 材齢28日におけるコンクリートの引張静弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

図-16より、SBRを添加していない場合に比べて、SBRを添加したコンクリートは、見掛けの引張クリープ係数  $\phi$  が大きくなる傾向を示していることがわかる。ま

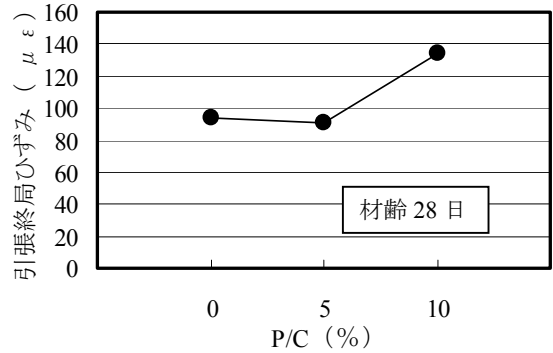


図-10 P/Cと引張終局ひずみとの関係

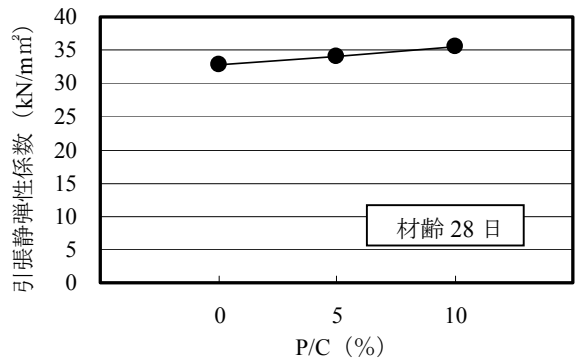


図-11 P/Cと引張静弾性係数との関係

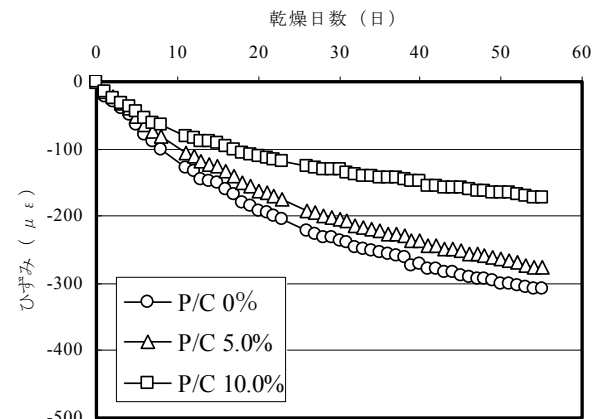


図-12 乾燥日数と自由収縮ひずみとの関係

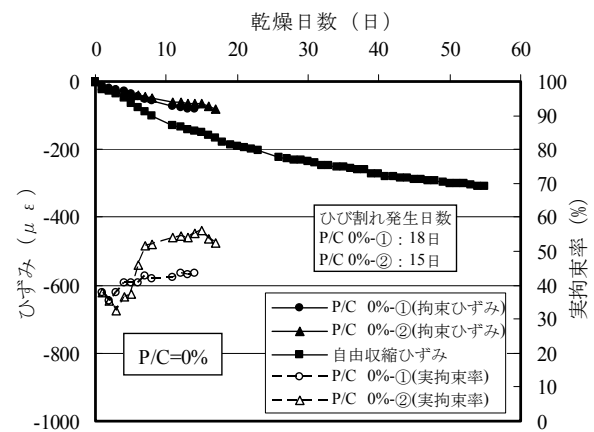


図-13 乾燥日数とコンクリートの拘束収縮ひずみ、自由収縮ひずみおよび実拘束率との関係

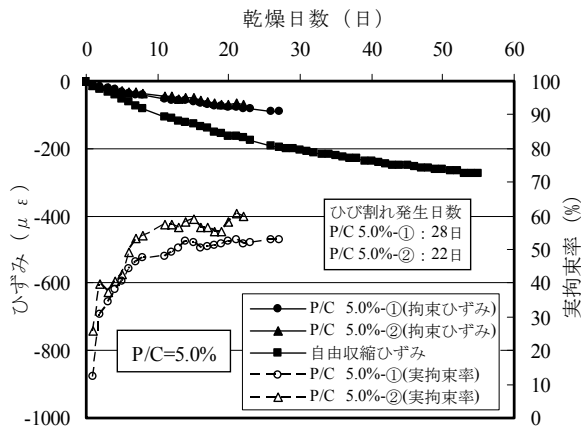


図-14 乾燥日数とコンクリートの拘束収縮ひずみ、自由収縮ひずみおよび実拘束率との関係

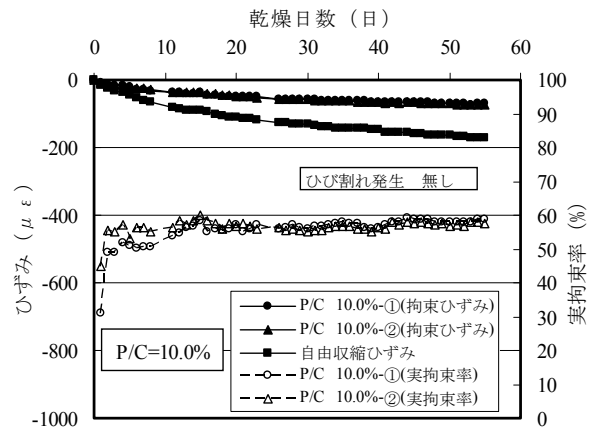


図-15 乾燥日数とコンクリートの拘束収縮ひずみ、自由収縮ひずみおよび実拘束率との関係

た、この傾向は、乾燥開始後数日間が特に顕著になっている。このことは、SBR を添加することによって持続的に作用する応力下でのコンクリートの引張伸び能力が大きくなることを示しており、特に乾燥開始直後にこの傾向が大きくなるものと考えられる。すなわち、SBR を添加することによる乾燥収縮ひび割れ抵抗性の改善には、単位水量の減少やポリマーの保水効果に加えて、引張伸び能力の変化も関係している可能性があると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究は、ポリマー添加をコンクリートの改質技術の1つと位置付け、P/Cを10%以下と比較的少量としたSBR添加コンクリートの力学的特性ならびにひび割れの抑制効果に関する検討を行ったものである。以下に、本実験で得られた知見を列挙する。

- (1) 配合条件を水セメント比一定、単位水量一定としたAシリーズの実験では SBR を添加するとスランプが著しく増大した。
- (2) Aシリーズの実験では、P/Cの増加に伴い、強度は若干低下する傾向となり、乾燥収縮ひび割れの発生時期も若干早くひび割れが発生した。
- (3) 配合条件を単位セメント量一定、スランプ一定としたBシリーズの実験では P/Cの増加に伴い、圧縮・引張強度は増加する傾向となった。
- (4) Bシリーズの乾燥収縮ひび割れ試験の結果、SBRの添加によって乾燥収縮ひび割れの発生日数が増大し、P/C=10%の場合は、55日を経過してもひび割れの発生はなかった。
- (5) SBRを添加したコンクリートの乾燥収縮ひび割れの抑制効果には、SBR添加に伴う単位水量の減少や保水性の向上に伴う乾燥収縮ひずみの減少に加えて引

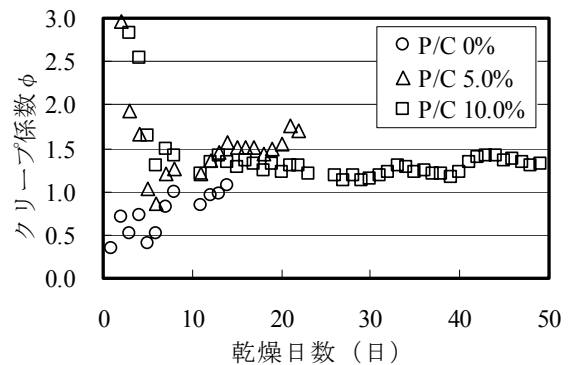


図-16 乾燥日数と見掛けのクリープ係数の関係

張伸び能力の変化も関与している可能性がある。

本研究は、(社)近畿建設協会の平成20年度研究助成により実施したものである。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) (社)日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック，エヌ・ティー・エス，pp.446-450，2004
- 2) 橋本寛，大濱嘉彦：ポリマーセメントコンクリートの強度性状，コンクリート工学，Vol.15，No.11，pp.117-124，1977
- 3) 大濱嘉彦，出村克宣：ポリマーセメントコンクリート／ポリマーコンクリート，シーエムシー出版，2002
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007
- 6) 熊野知司，井上善彦，矢村潔：ポリマーセメントコンクリートの力学的特性に関する一実験，平成20年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，p.V-17，2008