

報告 SBR を添加した再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する検討

中川 佳祐*1・熊野 知司*2・井上 善彦*3

要旨：ポリマーの添加を再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性の向上を可能にする改質技術の1つとして仮定し、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および乾燥収縮ひび割れ特性に関する検討を行った。その結果、SBRを添加したコンクリートは自由収縮ひずみが減少すること、自由収縮ひずみの減少は、ポリマーの保水効果というより、単位水量の減少によるものと考えられた。再生コンクリートにSBRを添加することで、乾燥収縮ひび割れ発生日数が増大した。また、5%程度とすることで、普通骨材を用いたコンクリートと同程度の乾燥収縮ひび割れ特性を示すことが明らかになった。

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

1. はじめに

近年、天然骨材の枯渇に伴い、再生骨材などの低品質な骨材の使用が検討されている。再生骨材 H (JIS A 5021) を使用できる場合には普通骨材を用いた場合と同等の性能といえるが、再生骨材 M (JIS A 5022) や L (JIS A 5023) を用いた場合、強度の低下¹⁾、乾燥収縮の増加¹⁾や乾燥収縮ひび割れが早期に発生する²⁾ことはこれまでの研究で明らかにされてきた。その対策方法として、普通骨材と再生骨材の混合使用³⁾などが検討されているが、普通骨材を用いたコンクリートと同程度にまで性能を向上させることは困難である。したがって、再生コンクリートの性能を向上する方法が必要となる。

一方、コンクリート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利用されているのがポリマーである。セメント系材料へのポリマーの添加は、モルタルとしての利用がほとんどであり、ポリマーを構造用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。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10~20%の添加量となるため⁴⁾、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ことの一因であると考えられる。ポリマーの添加により、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⁴⁾、耐久性や水密性の向上⁵⁾という付加価値をセメント系材料に付与する⁴⁾。また、既往の研究⁶⁾において、ポリマーを添加したコンクリートは乾燥収縮ひずみが減少し、乾燥収縮ひび割れ抵抗性を有することが明らかになった。ポリマーを添加することで、このような効果が再生コンクリートにおいても発揮できれば、再生骨材を用いた場合においても、コンクリートの性能を向上させる可能性がある。

そこで、本研究では、ポリマーの添加を再生コンクリートの性能向上を可能にする改質技術の1つとして位置付け、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を作成し、そ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 使用材料および配合

既往の検討⁷⁾において、W/C一定、単位水量一定という配合条件のもとではポリマーの添加により、強度がかえって低下し、乾燥収縮ひび割れが早期に発生することを明らかにしている。一方、大濱らはポリマーセメント

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3380cm ² /g
細骨材	湖底砂 (S1) 表乾密度 2.62g/cm ³ , 粗粒率 2.43, 吸水率 0.67%
	再生細骨材M (S2) 表乾密度 2.39g/cm ³ , 粗粒率 3.23, 吸水率 6.47%
粗骨材	高槻産砕石 (G1) 表乾密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 0.87% 粗骨材最大寸法 20mm
	再生粗骨材M (G2) 表乾密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 2.90% 粗骨材最大寸法 20mm
SBR	密度 0.99g/cm ³ , 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 ピーシー橋梁 (株) (正会員)

*2 摂南大学 工学部都市環境工学科教授 工博 (正会員)

*3 前田工織 (株) 環境資材事業本部

表-2 示方配合

配合名 ※	G _{max} (mm)	スランブ (cm)		W/C (%)	空気量 (%)		s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (g/m ³)			
		設定	実測		設定	実測		W	C	S		G		SBR (固形分)	AE減水剤 (g/m ³)	消泡剤 (g/m ³)
										S1	S2	G1	G2			
N-N-0	20	20±1	20.5	54.4	6±1	5.0	45.5	185	340	510	—	942	—	—	850	—
N-N-5			19.3	47.1		5.9		160		516	—	960	—	17.0	—	3696
N-N-10			19.1	35.3		6.0		120		534	—	992	—	34	—	3696
R-N-0			20.9	54.4		5.1		185		510	—	—	904	—	850	—
R-N-5			19.8	47.1		6.0		160		516	—	—	922	17.0	—	3696
R-N-10			23.8	35.3		5.0		120		534	—	—	952	34	—	3696
R-R-0			19.5	54.4		6.4		185		—	703	—	904	—	850	—
R-R-5			20.1	47.1		6.9		160		—	712	—	922	17.0	—	3696
R-R-10			20.7	35.3		6.3		120		—	736	—	952	34	—	3696

※ 使用粗骨材-使用細骨材-SBR 添加率

N : 普通骨材, R : 再生骨材

コンクリートに対して単位セメント量一定, コンシステンシーを一定とする配合選定手法を提案している。そこで, 本研究でもこの手法を参考とし, コンクリートの配合を選択することにした。

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使用した。粗骨材には砕石および再生骨材 M (JIS A 5022) を使用し, 細骨材には湖底砂および再生骨材 M を使用した。ポリマーにはスチレンブ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。セメント質量に対する SBR の固形分比 (以下, P/C) を 0%, 5%, および 10% 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。配合は, 単位セメント量を 340kg/m³ の一定とし, 先述したように, スランブが 20±1cm となるように各 P/C に単位水量を調整した。すなわち, P/C が変化すると W/C が変化することになる。なお, SBR を添加した場合には消泡剤を使用しても空気量が大きめの値となるため, 設定空気量を 6±1% と若干大きめの値とした。

2.2 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た。練混ぜ手順はまず, 粗骨材, 細骨材, セメントを投入して 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では, 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



写真-1 試験装置

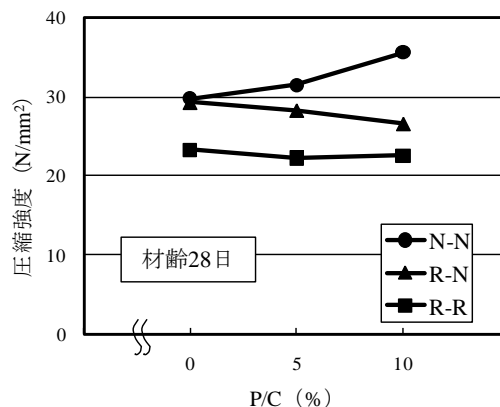


図-1 圧縮強度試験の結果

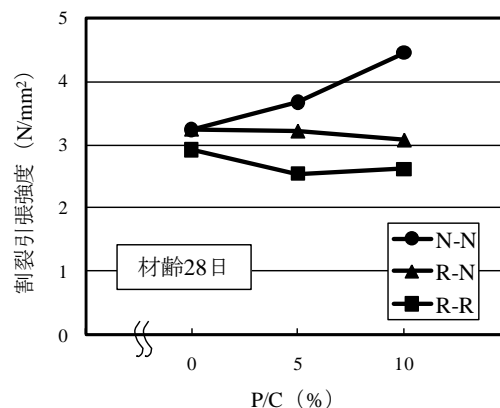


図-2 割裂引張強度試験の結果

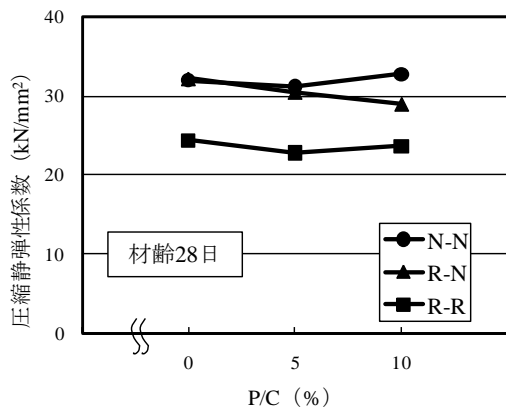


図-3 圧縮静弾性係数の結果

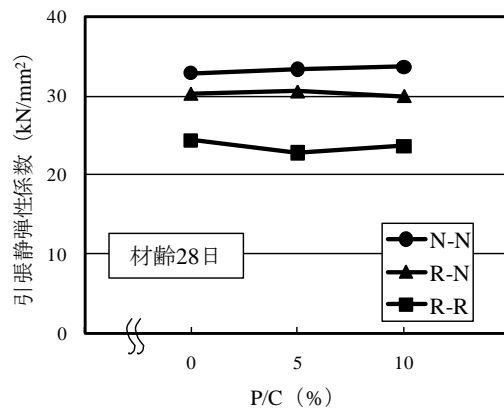


図-4 引張静弾性係数の結果

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) にならい、脱型後 7 日まで $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行い、その後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 10\%$ の恒温恒湿室内で気中保存を行った。

乾燥収縮ひび割れ特性に関する実験は、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、湿気の影響を避けるようにした。これらのひずみの測定は 6 時間ごとに行った。なお、乾燥収縮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、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の湿潤養生を行った後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 10\%$ の恒温恒湿室内に入れ、乾燥を開始した。

3. 実験結果および考察

3.1 力学的特性に関する検討

図-1 に材齢 28 日における圧縮強度試験の結果を示す。図より、圧縮強度は普通骨材を使用した N-N シリーズ、粗骨材に再生骨材を使用した R-N シリーズ、粗骨材と細骨材の両方に再生骨材を使用した R-R シリーズの順に低下する傾向となった。また、N-N シリーズの場合には、P/C の増加に伴って若干、圧縮強度が増加する傾向が見られ、R-R の場合には、同程度となった。一方、R-N の場合は P/C の増加に伴って、圧縮強度が若干減少する傾向となった。骨材の品質が最も低いと考えられる R-R の圧縮強度が P/C が変化しても同程度であることを考えると R-N に関しては再検討が必要と思われる。なお、いずれのシリーズにおいても P/C=5% の場合、水セメント比が 47.1%、また、10% の場合は、水セメント比が 35.3% と、かなり小さい割に圧縮強度が $30 \sim 40 \text{N/mm}^2$ 程度とポリマーを添加しない普通コンクリートの標準的な強度に比べて、強度発現が小さくなる傾向にあることがわかる。

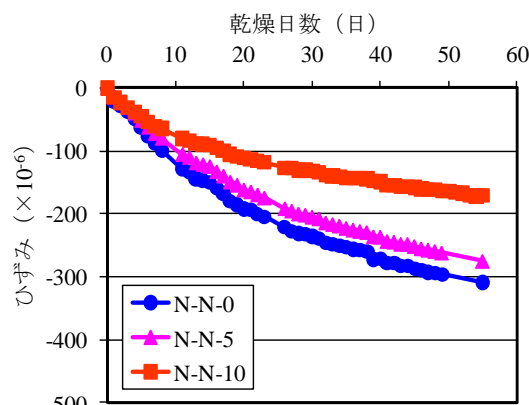


図-5 自由収縮ひずみ (N-N)

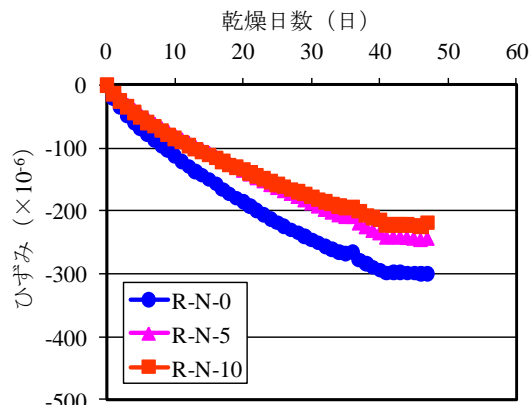


図-6 自由収縮ひずみ (R-N)

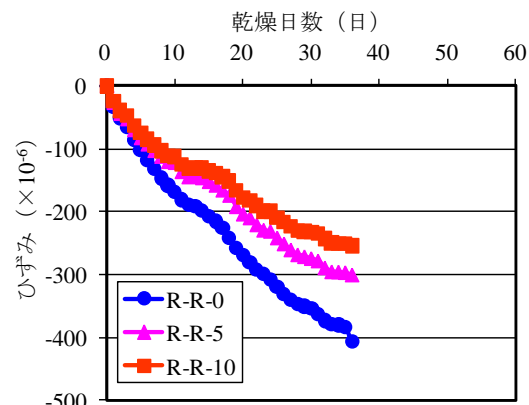


図-7 自由収縮ひずみ (R-R)

図-2に材齢28日における割裂引張強度試験の結果を示す。図より、割裂引張強度は再生骨材を使用した影響とSBRを添加した影響ともに圧縮強度と同じような傾向となった。

図-3に材齢28日における圧縮静弾性係数の結果を示す。図より、N-Nシリーズに比べて、R-N、R-Rの場合は圧縮静弾性係数が低下する傾向となった。また、P/Cが増加するにしたがってR-Nの場合は若干、圧縮静弾性係数が低下したが、N-N、R-Rの場合は変化はほとんど見られなかった。

図-4に直接引張試験によって求めた引張静弾性係数の結果を示す。図より、再生骨材を使用すると引張静弾性係数は低下した。一方、圧縮静弾性係数と同様にP/Cの増加に伴う引張静弾性係数の変化はほとんど見られなかった。

3.2 乾燥収縮ひび割れ特性に関する検討

図-5~図-7に自由収縮ひずみの経時変化を示す。これらの図より、例えば、乾燥日数35日で比較してみると、自由収縮ひずみがN-N-0の場合 254×10^{-6} 、R-N-0が 268×10^{-6} 、R-R-0が 383×10^{-6} とN-N、R-N、R-R順に自由収縮ひずみが大きくなっていることがわかる。これは、再生骨材には、旧ペースト分が含まれているため、吸水率が大きく、コンクリート中の水分量が多くなり、それに伴い、乾燥に伴うひずみが大きくなったものと考えられる。また、それぞれSBRを添加することで自由収縮ひずみが減少していることがわかる。SBRを添加することによる単位水量の減少やSBR自身の保水効果⁵⁾が関係しているものと考えられる。

麓ら⁸⁾は再生骨材の性能評価に際して、コンクリート中の全水量を用いることで乾燥収縮特性との間に直線関係があることを見出している。そこで、本研究においても、この考え方を適用することを試みた。全水量TWは式(1)により算出される。

$$TW = W + \frac{G}{\gamma_{sg}} \times \gamma_{dg} \times w_g + \frac{S}{\gamma_{ss}} \times \gamma_{ds} \times w_s \quad (1)$$

ここに、TW：全水量 (kg)

W：水量 (kg)

G：粗骨材量 (kg)

γ_{sg} ：粗骨材表乾密度 (g/cm^3)

γ_{dg} ：粗骨材絶乾密度 (g/cm^3)

w_g ：粗骨材の吸水率 (%)

S：細骨材量 (kg)

γ_{ss} ：細骨材表乾密度 (g/cm^3)

γ_{ds} ：細骨材絶乾密度 (g/cm^3)

w_s ：細骨材の吸水率 (%)

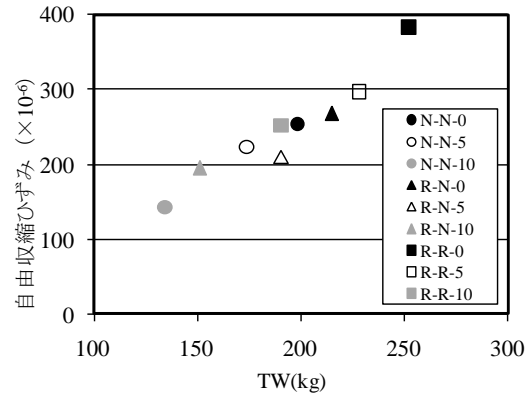


図-8 全水量と自由収縮ひずみとの関係

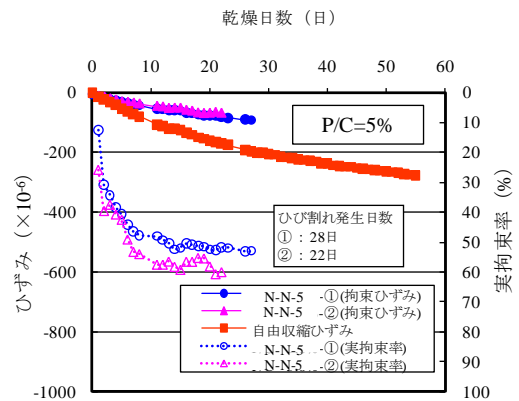


図-9 乾燥収縮ひび割れ試験の結果 (N-N)

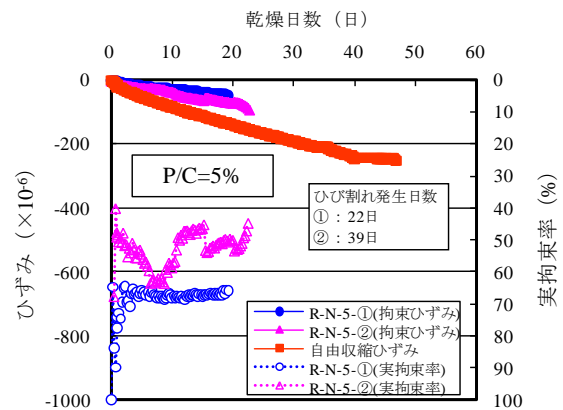


図-10 乾燥収縮ひび割れ試験の結果 (R-N)

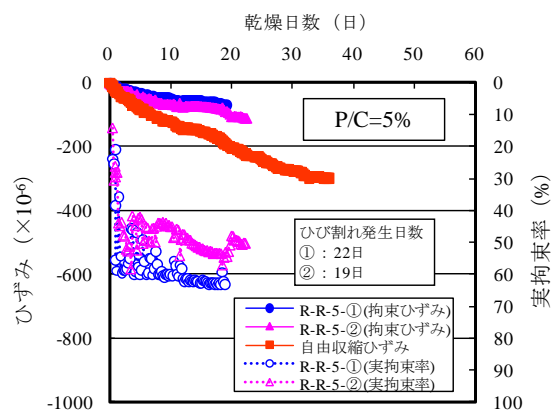


図-11 乾燥収縮ひび割れ試験の結果 (R-R)

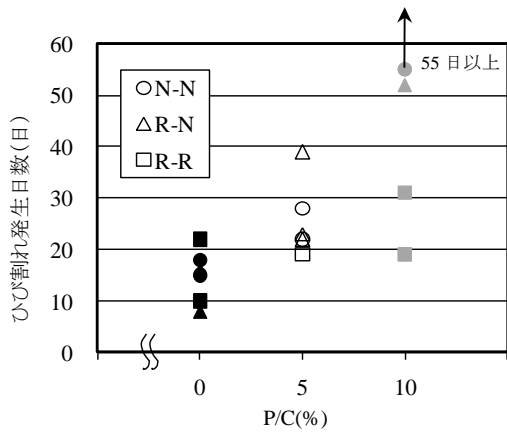


図-12 ひび割れ発生日数

図-8 に全水量と自由収縮ひずみとの関係を示す。図より、若干のばらつきはあるが、どの配合においても全水量が増加すると自由収縮ひずみも増加し、同一の直線上に位置する結果となった。SBR の添加に伴う保水効果が自由収縮ひずみに関係しているならば、SBR を添加した場合には同一の TW において自由収縮ひずみが小さくなるという減少が見られると思われる。しかし、図-8 に示すように SBR を添加した場合にもほぼ同一の直線上に位置し、明確な差は見られなかった。このことより、SBR を添加することによる自由収縮ひずみの減少は、コンシステンシーを一定としたことによる単位水量の減少が、主な要因になっていると考えられる。

図-9～図-11 に一例として P/C=5%における、乾燥収縮ひび割れ試験の結果を示す。ここで、実拘束率 K は、式(2)によって算定される。

$$K = \frac{(\varepsilon_f - \varepsilon_c)}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

ここに、 ε_c : 拘束収縮ひずみ
 ε_f : 自由収縮ひずみ

図-9～図-11 より、いずれの場合においても実拘束率が 60%程度であったことから、ほぼ妥当な試験が行えたと考えられる。

図-12 に各 P/C における乾燥収縮ひび割れ発生日数を示す。N-N-10 は乾燥開始後 55 日で測定を打ち切った。図より、P/C の増加により、ひび割れ発生日数は増大し、再生骨材を使用すると早期にひび割れが発生する結果となった。なお、再生コンクリートに対して、P/C を 5%程度とすることで、普通骨材を使用したコンクリートと同程度のひび割れ発生日数となっていることがわかる。

図-13 に全水量とひび割れ発生日数との関係を示す。図より、ばらつきはあるが若干、全水量の増加に伴い、ひび割れ発生日数が減少する傾向が見られた。これは、図-8 に示すように、全水量が増加するにつれ、自由収

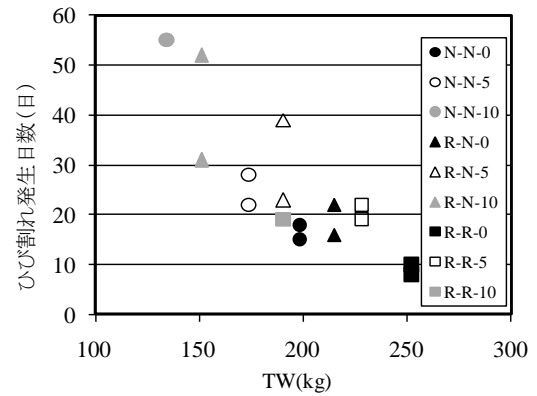


図-13 全水量とひび割れ発生日数との関係

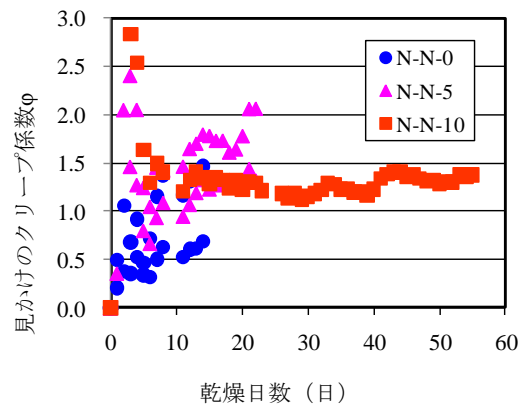


図-14 見かけのクリープ係数 (N-N)

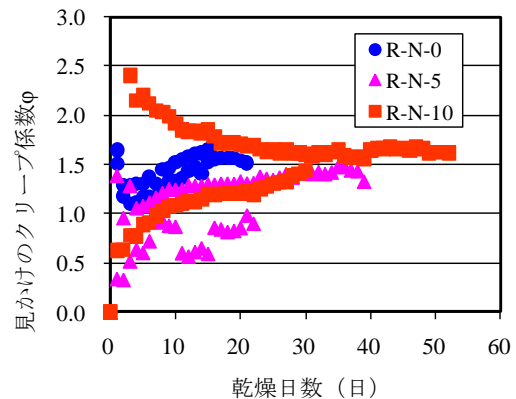


図-15 見かけのクリープ係数 (R-N)

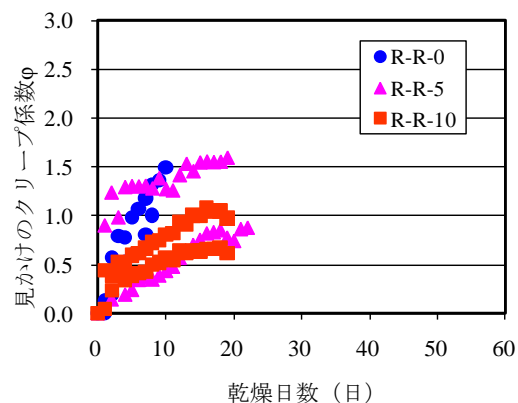


図-16 見かけのクリープ係数 (R-R)

縮ひずみが増加することによるものと思われる。しかしながら、ひび割れの発生にはコンクリートの引張強度や引張クリープ特性に関与する、引張伸び能力が関係すると考えられ、単純に全水量 TW のみではひび割れ発生日数を評価できるものではないと考えられる。

ここで、コンクリートの自由収縮ひずみ ε_f と拘束収縮ひずみ ε_c との差である $\varepsilon_f - \varepsilon_c$ 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考えられる。したがって、測定結果より、式(3)、(4)を用いることで、見掛けのクリープひずみ ε_{creep} および見掛けの引張クリープ係数 ϕ を求めることができる。図-14～図-16 に乾燥収縮ひび割れ試験の結果から求めた見掛けの引張クリープ係数の経時変化を示す。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。

$$\varepsilon_{creep} = \varepsilon_f - \varepsilon_c - \varepsilon_{ct} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\varepsilon_{creep}}{\varepsilon_{ct}} \quad (4)$$

ここに、 ε_{ct} : 引張弾性ひずみ $\left(= \frac{\varepsilon_s E_s A_s}{E_{ct} A_c} \right)$
 ε_s : 拘束板のひずみ

E_s : 拘束板のヤング係数 (=200kN/mm²)

A_s : 拘束板の断面積 (mm²)

A_c : コンクリートの断面積 (mm²)

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/mm²)

図-14～図-16 より、P/C=0%における再生骨材を使用する上では、見かけのクリープ係数が 1～1.5 の位置で推移しており、ばらつきが多く明確な差は見られなかった。また、SBR を添加すると、若干見かけのクリープ係数が大きくなっているのが見受けられるが、明確に引張伸び能力が変化しているとは断言できない結果となった。乾燥収縮ひび割れ試験において、SBR の添加により明確な差が生じたのは、配合上、単位水量が減少し、自由収縮ひずみが抑制されたことによるものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、ポリマーの添加を再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性の向上を可能にする改質技術の 1 つとして位置付け、P/C を 10%以下と比較的少量とした SBR を添加した再生コンクリートの力学的特性ならびに乾燥収縮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) 圧縮強度は N-N および R-R 場合には SBR の添加によ

って、増加もしくは同程度となったが R-N の場合は若干低下する傾向を示した。

- (2) 静弾性係数は R-N の場合には SBR の添加によって若干低下したが、N-N、R-R の場合にはほとんど変化はなかった。
- (3) SBR を添加することで自由収縮ひずみが減少したが、この自由収縮ひずみの減少には、ポリマーの保水性というより、単位水量の減少に起因していると思われる。
- (4) 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た。
- (5) 再生コンクリートに SBR を 5%程度添加することで、普通骨材を用いたコンクリートと同程度の乾燥収縮ひび割れ特性にすることが可能である。
- (6) 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、引張伸び能力というより、SBR の添加に伴う、単位水量の減少による自由収縮ひずみの減少が関与していると考えられる。

本研究は、(社)近畿建設協会の平成 22 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) 新井暢, 中村成春, 榎田佳寛, 阿部道彦: 再生細骨材コンクリートの強度及び変形性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.1081-1086, 1997
- 2) 中川隆夫, 大野義照, 林田都芳, 山崎順二: 再生コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.217-222, 1999
- 3) 猪口泰彦, 佐伯竜彦, 川田賢, 長瀧重義: 混合骨材コンクリートの乾燥収縮特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.49-54, 1999
- 4) (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
- 5) 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
- 6) 中川佳祐, 熊野知司, 井上善彦, 高見新一: SBR を添加したコンクリートの耐久性に関する実験的検討, 材料, Vol.59, No.10, pp.763-768, 2010, 10
- 7) 熊野知司, 井上善彦, 野口裕介, 矢村潔: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1621-1626, 2009
- 8) 麓隆行, 山田優: 再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について, 土木学会論文集, No.767, V-64, pp.61-73, 2004.