

論文 高炉セメントおよび再生骨材を使用したコンクリート製品への収縮低減材料の適用に関する実験的研究

西 祐宜*1・北辻 政文*2

要旨: 昨今の循環型社会の形成に伴い、公共工事資材においてもグリーン購入法の特定調達品目に混合セメントや再生骨材が対象となり、これらの材料を使用したコンクリート製品も積極的に使用されている。本研究では、高炉セメントおよび再生骨材を使用した蒸気養生を施すコンクリート製品の耐久性状を確認した上、コンクリート製品の初期ひび割れ対策として膨張材および収縮低減剤を使用した際の収縮特性についても考察を行った。その結果、再生骨材の使用に伴う強度低下と収縮量の増大が確認された。また、収縮低減剤の使用による収縮低減効果が認められた。

キーワード: コンクリート製品, 蒸気養生, 高炉セメント, 再生骨材, 膨張材, 収縮低減剤, 耐久性

1. はじめに

環境配慮が必要とされている昨今、循環型社会の形成に伴い、コンクリート材料にも種々の副産物および廃棄物の積極的使用が期待されている。公共工事資材においてもグリーン購入法の特定調達品目に混合セメントや再生骨材が対象とされている。一方で、このような材料を用いた際のコンクリートの各種性状および管理方法は未だ確立されていないといえる。

本研究では、高炉セメント B 種および再生骨材 M を使用した蒸気養生を施すコンクリート製品に着目し、強度発現性および乾燥収縮、凍結融解抵抗性の耐久性を確認した。再生骨材は原骨材の品質が必ずしも特定できないため、アルカリ骨材反応を抑制する目的¹⁾²⁾で高炉セメント B 種等の混合セメントと併用されるケースが多い。また、耐久性以外に求められるコンクリート製品の品質としては、美観を損なうひび割れの発生がないことや寒冷地等の凍結融解作用を受ける地域での製品保管時に凍結融解による損傷を受けないことも必要な品質といえる。そこで、ひび割れ発生の低減のため、膨張材および収縮低減剤を使用した際の上記耐久性についても同時に確認を行った。

2. 実験概要

2.1 実験要因

表-1 に実験要因と水準を示す。

2.2 使用材料とコンクリートの配(調)合

表-2 に使用材料、表-3 にコンクリートの種別、表-4 にコンクリートの配(調)合を示す。再生骨材は JIS A 5022 附属書 A に該当する骨材である。使用時は 24h プレ

表-1 実験要因と水準

要因	水準
セメント	普通ポルトランドセメント 高炉セメント B 種
粗骨材	砕石・再生骨材 M
膨張材	無添加・20kg/m ³
収縮低減剤	無添加・3kg/m ³ ・6kg/m ³

表-2 使用材料

種別	記号	品質
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm ³ ,比表面積:3340cm ² /g
	BB	高炉セメント B 種 密度:3.04g/cm ³ ,比表面積:3870cm ² /g
細骨材	S1	陸砂,表乾密度:2.58g/cm ³ ,吸水率:3.81% F.M.:2.37
	S2	砕砂,表乾密度:2.65g/cm ³ ,吸水率:1.22% F.M.:2.98
粗骨材	G1	再生骨材 M1505, 表乾密度:2.57g/cm ³ 吸水率:4.84%,実積率:60.5%,F.M.6.78
	G2	青梅産硬質砂岩砕石 1505, 表乾密度:2.65g/cm ³ 吸水率:0.56%,実積率:61.5%,F.M.6.74
膨張材	EX	密度:3.16g/cm ³
収縮低減剤	SRA	炭化水素系化合物とグリコールエーテル系誘導体

表-3 コンクリートの種別

配合種別	セメント	EX	SRA	骨材
OPC+砕石	OPC	—	—	G2 (砕石)
BB+砕石	BB	—	—	
BB+砕石+EX		20kg/m ³	—	
BB+砕石+SRA3		—	3kg/m ³	
BB+再生		—	—	G1 (再生骨材 M)
BB+再生+EX		20kg/m ³	—	
BB+再生+SRA3		—	3kg/m ³	
BB+再生+SRA6	—	6kg/m ³		

*1 (株)フローリック 技術本部 コンクリート研究所 (正会員)

*2 宮城大学 食産業学部建設環境材料学研究室教授 農博 (正会員)

表－4 コンクリートの配(調)合

W/C	s/a	設計 Air (%)	単位量 (kg/m ³)	
			W	B*
0.45	0.44	5.0	160	356

*B=OPC, BB, BB+EX

ウェットニングを行ったものを使用した。膨張材は結合材の一部としてセメント質量内割りで添加した。また、収縮低減剤は、単位水量の一部として添加した。コンクリートの目標品質は、スランプ 10±2.5cm, 空気量 5.5±0.5%とし、ポリカルボン酸系の減水剤(Ad)および AE 剤(AE)の添加量にて調整した。

2.3 蒸気養生条件

蒸気養生の条件は、前養生 2～4 時間後、20～65℃に 18℃/h で昇温し 65℃で 5h 保持した後、蒸気養生槽内で自然に徐冷させた。

2.4 測定項目

(1) 圧縮強度

材齢 1 日～28 日において JIS A 1108:2006 に準拠し試験を実施した。供試体寸法はφ10×20cm とし、打設後 24h で脱型を行い、所定の材齢まで 20℃RH.60%の環境で保管した。材齢 1 日の供試体は脱型後直ちに試験を行った。また、参考として蒸気養生を行わず、材齢 28 日まで標準養生した供試体の試験も行った。

(2) 乾燥収縮

蒸気養生を行った後、材齢 24h で脱型し、直ちに基長を測定した。乾燥条件は 20℃RH.60%の環境とし、JIS A 1129:2001 に準じて所定の乾燥期間で測定を行った。

(3) 凍結融解

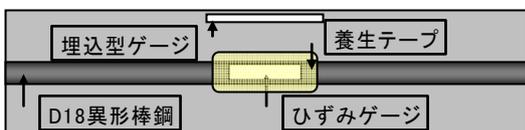
蒸気養生を行った後、材齢 24h で脱型した。前養生条件は、20℃RH.60%で気中養生を 2W 行った後、標準養生を 2W 行い、JIS A 1148:2008 に準じて凍結融解試験を開始した。

(4) ひずみ履歴

テフロンシートを供試体外周部に配し、型枠との付着を遮断したφ10×20cm の型枠の中央にコンクリート埋込型ひずみゲージを埋設し、蒸気養生下の自由収縮ひずみ履歴を測定した。

(5) 鉄筋拘束試験

図－1 に試験概要を示す。10×10×40cm の型枠の中央に配した D18 異形棒鋼のひずみを測定した。D18 異形棒鋼のひずみ測定部は平滑化し、ひずみゲージを貼り付けた後、養生テープで保護をした。また、鉄筋に貼り付けたゲージの同位置の上部、供試体打設面から 10mm 下に



図－1 鉄筋拘束試験の概要

十分に吸水させた埋込型ゲージを平行に設置した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート

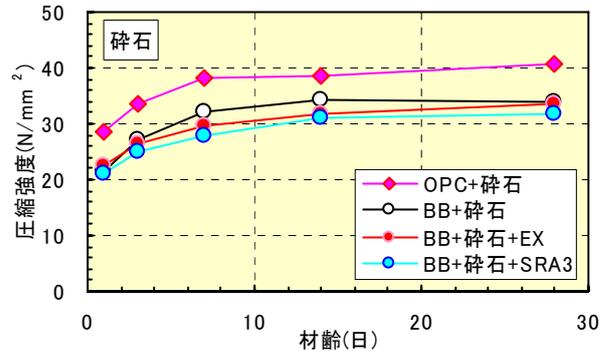
表－5 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。表に示す通り、目標品質のスランプとするために、砕石を用いた場合は、再生骨材 M を使用した際より 0.5(Cmass%)減水剤の添加率が増加した。また、SRA を用いた場合、SRA 添加に伴い目標空気量となる AE 剤添加率は増加し、その増加傾向は表－5 に示すように骨材種により異なった。

3.2 圧縮強度

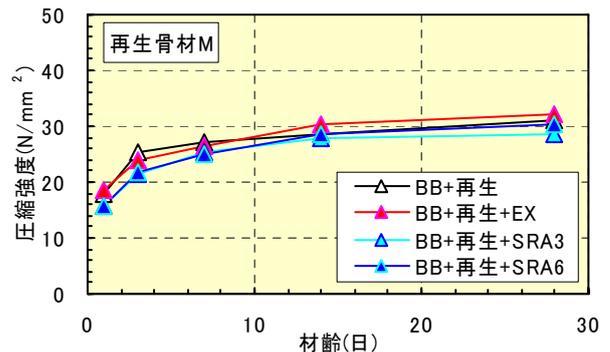
図－2 および図－3 に材齢と圧縮強度の関係、図－4 に BB+砕石の圧縮強度を基準とした際の圧縮強度比を示す。セメント種別で比較すると OPC+砕石、BB+砕石では、材齢 14 日で約 13%、OPC の方が圧縮強度は高い

表－5 フレッシュコンクリートの試験結果

配合種別	Ad (Cmass%)	AE (Cmass%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
OPC+砕石	1.5	0.004	8.0	4.6	21.0
BB+砕石		0.006	9.0	5.5	21.0
BB+砕石+EX		0.006	11.5	5.8	21.0
BB+砕石+SRA3		0.030	10.5	4.9	21.0
BB+再生	1.0	0.007	11.5	5.5	20.5
BB+再生+EX		0.007	12.5	5.7	20.5
BB+再生+SRA3		0.020	12.5	6.0	20.5
BB+再生+SRA6		0.025	11.5	5.3	21.0



図－2 材齢と圧縮強度の関係(砕石)



図－3 材齢と圧縮強度の関係(再生骨材M)

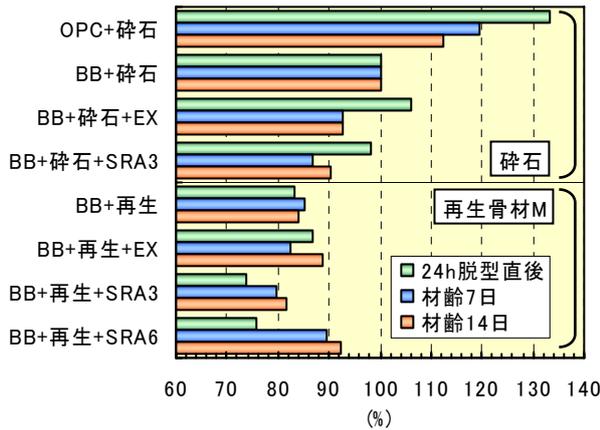


図-4 圧縮強度比 (BB+碎石基準)

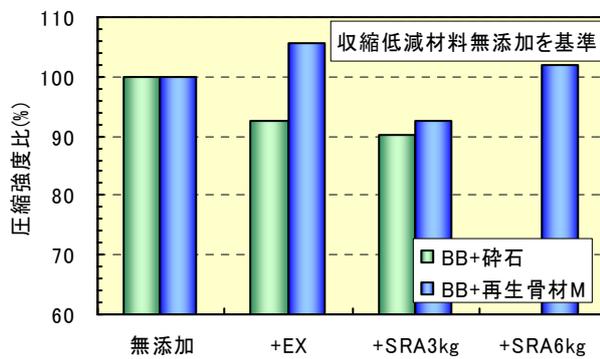


図-5 圧縮強度比試験結果 (BB)

結果となった。また、図-4に示すように骨材種に着目した場合、砕石を再生骨材Mに変更することで圧縮強度は著しく低下する。本実験では圧縮強度比で10~20%程度、使用材料に関らず再生骨材Mを使用したコンクリートの圧縮強度は低下した。標準養生においても圧縮強度の低下傾向は蒸気養生と同様の結果であった。

収縮低減材料である膨張材および収縮低減剤が圧縮強度に与える影響は、図-5に示す通り骨材種により異なることが分かる。即ち、砕石では収縮低減材料の混入に伴い若干の強度低下が確認できるが、再生骨材Mを使用したものには、ばらつきがあり、傾向的な強度低下は確認できない。これは、再生骨材自体が圧縮強度に支配的な影響を及ぼしているからと推察される。

蒸気養生を施すコンクリート製品には、OPCからBBへのセメント種の変更、砕石から再生骨材Mへの骨材の変更は強度が低下する傾向が認められるため留意が必要である。

3.3 乾燥収縮

図-6および図-7に乾燥期間と長さ変化の関係、図-8および図-9に乾燥期間と長さ変化比の関係を示す。図-6に示すようにセメント種をOPCからBBに変更することで、乾燥期間26Wで 2×10^{-4} 程度長さ変化が増大する。また、ひび割れの耐力となる引張強度の発現

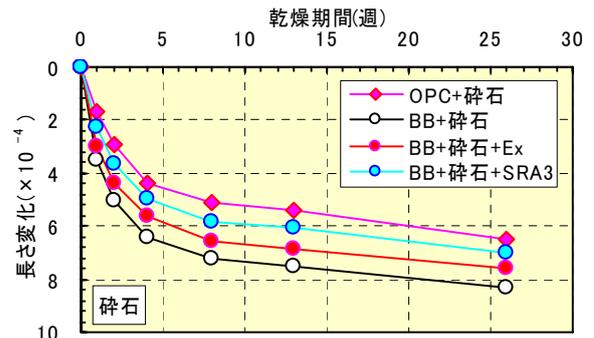


図-6 乾燥期間と長さ変化の関係 (砕石)

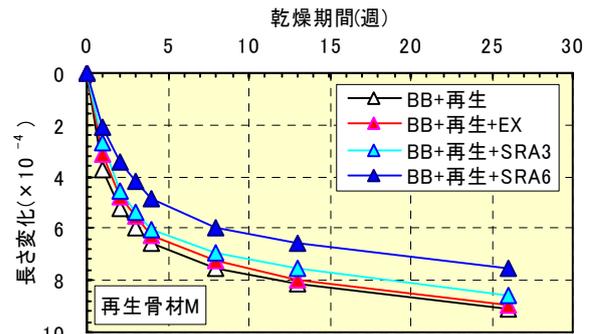


図-7 乾燥期間と長さ変化の関係 (再生骨材M)

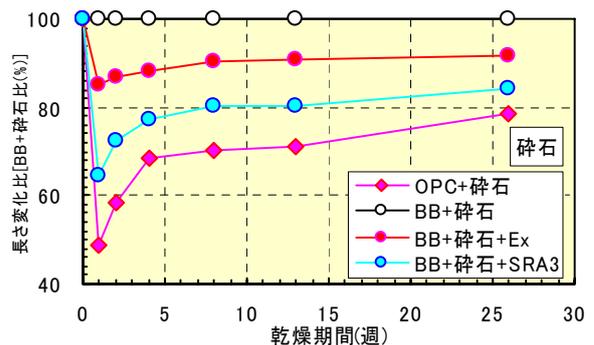


図-8 乾燥期間と長さ変化比の関係 (砕石)

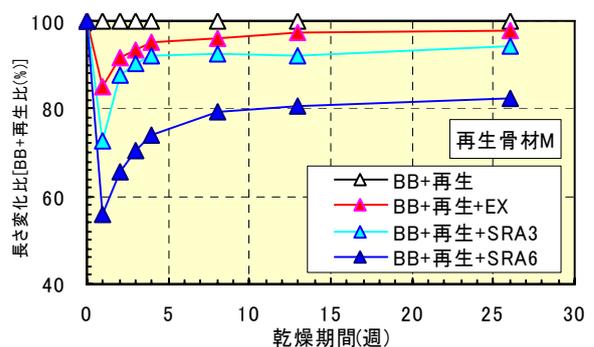


図-9 乾燥期間と長さ変化比の関係 (再生骨材M)

が小さい若材齢(初期乾燥材齢)時の長さ変化はBBの方が大きく、乾燥収縮によるひび割れ抵抗性と云う点においてはOPCよりもBBは劣ると考えられる。

図-6および図-7に示すように、砕石から再生骨材Mに骨材を変更した場合、乾燥材齢26Wで 1×10^{-4} 程度長さ変化が増加する。原骨材の品質や付着モルタル量に

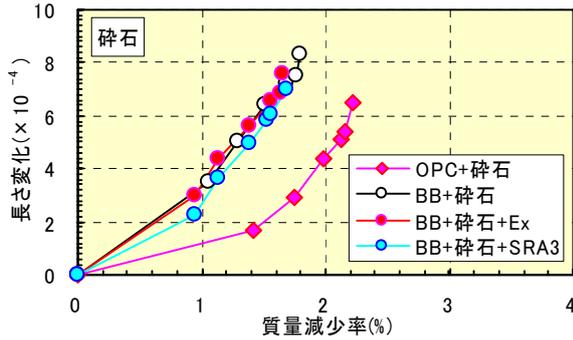


図-10 質量減少率と長さ変化の関係(砕石)

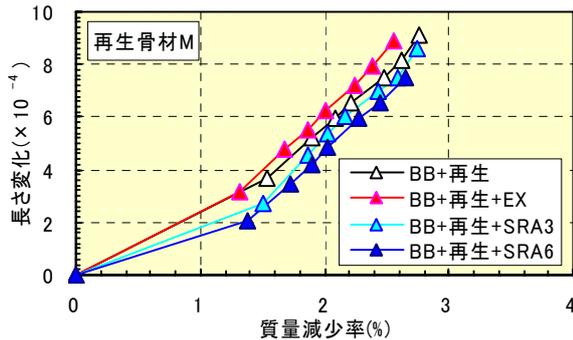


図-11 質量減少率と長さ変化の関係(再生骨材M)

依存すると考えられるが、再生骨材 M を使用することで収縮量は増加する傾向である。

収縮低減材料を用いた場合、膨張材は初期膨張の測定を行っていないものの、若干の収縮抑制効果が確認できる。また、収縮低減剤については、蒸気養生に影響を受けることがなく、添加量の増加に伴い収縮を抑制していることが分かる。BB+再生のケースでも収縮低減剤を 3kg/m^3 添加すれば、BB+砕石と同程度の収縮に収まり、更に 6kg/m^3 以上添加することで OPC+砕石の収縮量に近づく (1×10^4 の差) ことは可能であるといえる。

図-8 に示すようにセメント種別と長さ変化比を考察した場合、初期乾燥時は OPC の長さ変化比が非常に小さく、乾燥期間の延長と共に長さ変化比が BB に近接してくる。この現象からも、BB は初期乾燥時の収縮速度が速く、ひび割れ抵抗性に劣る一要因が伺われる。

図-10 および図-11 に質量減少率と長さ変化の関係を示す。図-10 に示すようにセメント種類により両者の関係性は大きく異なる。これは生成される水和物のキャラクターの違いによるものと考えられる。また、砕石から再生骨材 M への変更により、同一質量減少率の長さ変化は、再生骨材 M の方が小さくなる。骨材のキャラクターや再生骨材 M 自体の吸水率が高いため供試体のイニシャルの含水率が異なり、骨材による質量減少率と長さ変化の関係性の変化が起きていると推察される。

3.4 凍結融解

図-12 にサイクル数と相対動弾性係数の関係を示

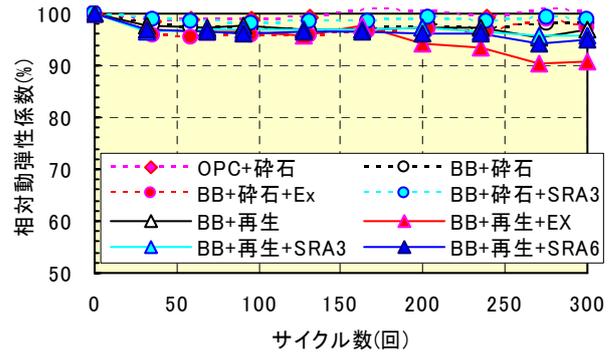


図-12 サイクル数と相対動弾性係数の関係

す。従来、収縮低減剤を用いたコンクリートは凍結融解抵抗性が著しく低下するとされてきたが、凍結融解抵抗性向上タイプの新しい収縮低減剤や、吸水率が高く凍結融解抵抗性の低下が懸念される再生骨材 M においても本実験では良好な凍結融解抵抗性を示した。

3.5 蒸気養生中のひずみ履歴

蒸気養生を施したコンクリート製品のひび割れ発生の要因は、前養生時間と温度上昇速度の影響、後養生の影響、供試体中心および表面付近のひずみ差とされ³⁾、それらの要因を基としてひび割れが発生すると考えられる。上記要因は、骨材とペーストの剥落や気泡を起点としたクラックの架橋、コンクリート内外部の温度差によるひずみ差および強い鉄筋拘束によってひび割れが発生する。本実験では、収縮低減材料を使用した際の自由収縮ひずみおよび拘束条件下のひずみを測定することで、定性的にコンクリート製品の材料によるひび割れ抵抗性を確認した。

図-13 に供試体中心部および蒸気養生槽内の蒸気養生時の温度履歴を示す。降温時に若干、槽内温度よりも供試体中心温度の方が高いが、供試体温度はほぼ槽内温度に依存していることがわかる。図-14 に蒸気養生中の自由収縮ひずみを示す。供試体温度履歴が供試体

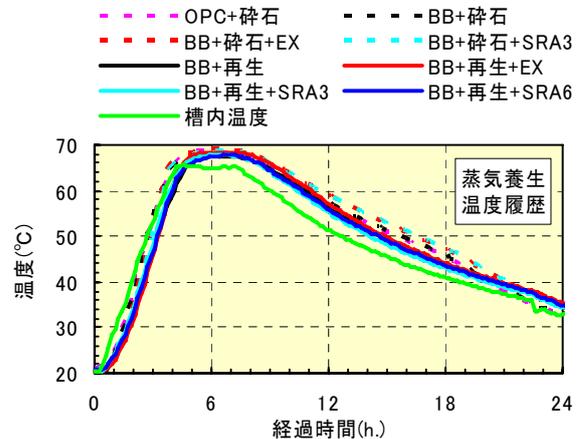


図-13 蒸気養生温度履歴

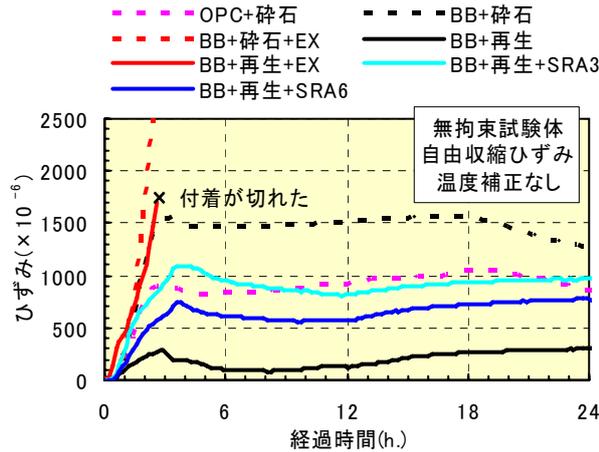


図-14 経過時間と無拘束ひずみの関係

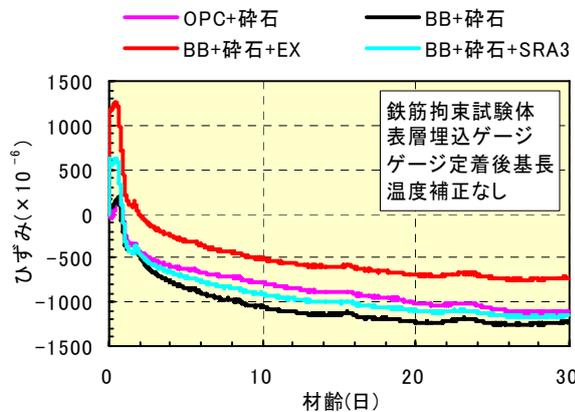


図-15 材齢とひずみの関係(表層部:砕石)

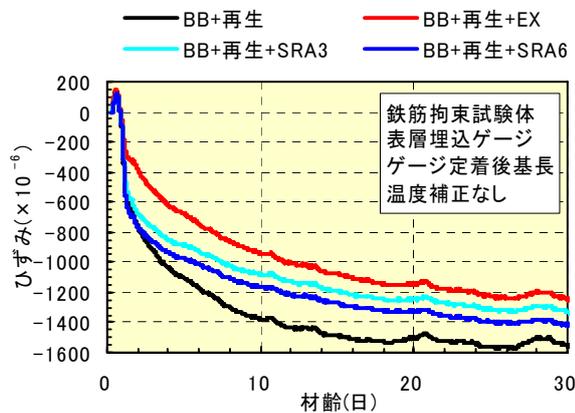


図-16 材齢とひずみの関係(表層部:再生骨材M)

に関らず同等であるため、昇温時のひずみの増加傾向が供試体(使用材料)により異なることは、ゲージがコンクリートと付着していることを意味している。全体的な傾向として、再生骨材 M を使用したものより砕石を使用したものの方が、昇温時の膨張量は大きいことがわかる。また、膨張材を使用したコンクリートに蒸気養生を施した際は、昇温時に非常に大きな膨張を示し、埋込型ひずみゲージが周囲との付着が切れてしまった。このことから、導入するケミカルプレストレスが過剰となる可能性

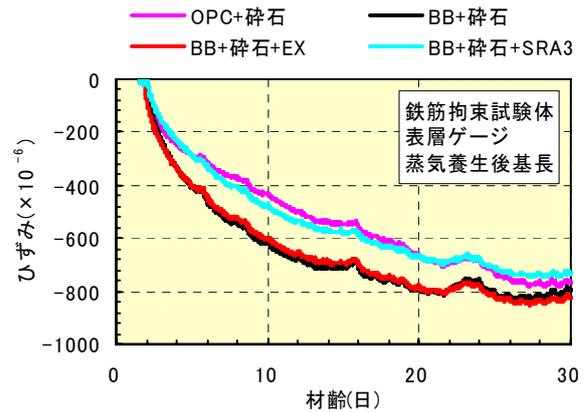


図-17 乾燥収縮試験結果(表層部:砕石)

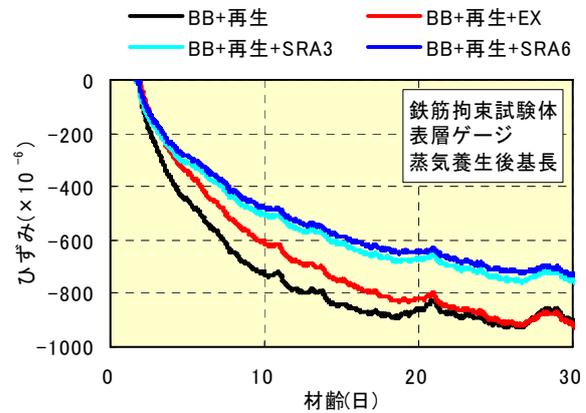


図-18 乾燥収縮試験結果(表層部:再生骨材M)

があるため、蒸気養生を行なう際は、膨張材の添加量を低減できる可能性がある事を示唆する結果といえる。

図-15および図-16に鉄筋拘束試験体の表層部のゲージが定着した後のひずみ履歴を示す。図-6および図-7に示した長さ変化試験結果と同様に、鉄筋拘束試験においても OPC より BB の方が、また、砕石よりも再生骨材の方が拘束試験においても当然ながら収縮ひずみが大きい結果となった。収縮低減材料を用いた場合、膨張材を使用することで非常に大きな膨張ひずみを確保でき、長期乾燥期間において、最も収縮ひずみが小さい結果となった。また、収縮低減剤に関しては、無添加よりも収縮速度を遅延させ、収縮低減効果が確認できた。

図-17および図-18に鉄筋拘束試験体の乾燥収縮試験結果を示す。基長の設定は乾燥条件になり、供試体温度が外部温度と同温度になった時点を経長とした。図-17に示すように、OPC より BB の方が収縮ひずみは大きい、BB に収縮低減剤を 3kg/m^3 添加することで OPC と同程度の収縮ひずみとなる。また、図-18に示すように、乾燥スタート時を基長とした場合、膨張材の使用による収縮低減効果は軽微であり、収縮低減剤は良好な収縮低減効果を発揮していることがわかる。

図-19および図-20に表層部のひずみから鉄筋

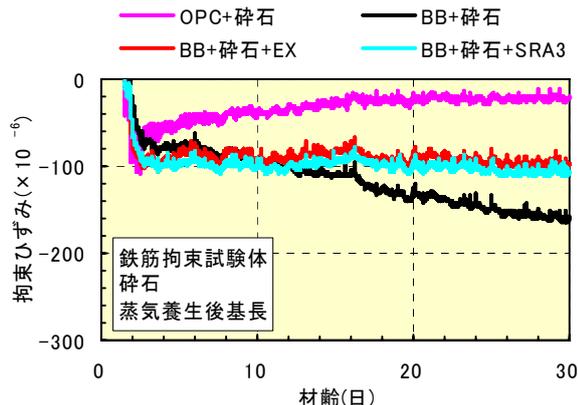


図-19 材齢と拘束ひずみの関係(碎石)

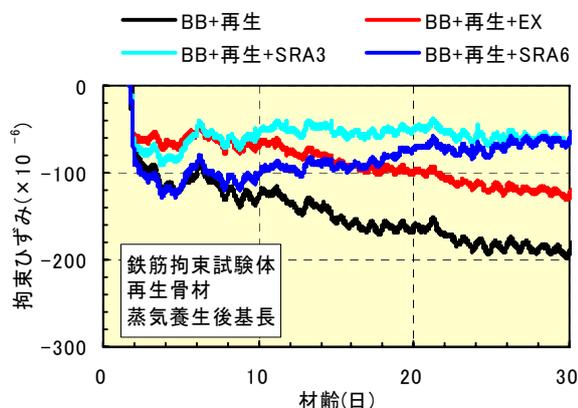


図-20 材齢と拘束ひずみの関係(再生骨材M)

のひずみを減じた拘束ひずみを示す。拘束ひずみは鉄筋により拘束された、鉄筋および表層部のひずみ差である。ここでの拘束ひずみは、クリープの影響も包含されている。拘束ひずみの増大はひび割れ発生リスクの増加と捉え、図-19に示すように碎石を使用した系では、OPCが最も拘束ひずみが小さい上に経時的に拘束ひずみが減少している。また、収縮低減剤を使用することで拘束ひずみの低下が確認できる。図-20に示すように再生骨材Mを使用した場合は、膨張材や収縮低減剤のような収縮低減材料を使用することで顕著に拘束ひずみが減少する結果となり、ひび割れのリスクが低減されているといえる。

4. まとめ

高炉セメントB種と再生骨材Mを使用し、蒸気養生を施したコンクリート製品の諸特性および収縮低減材料の効果等を以下に集約する。

- (1) 本実験条件下では高炉セメントB種を使用することで、普通ポルトランドセメントよりも圧縮強度が低下し、乾燥収縮は大幅に増大する。
- (2) 再生骨材Mを使用することで、圧縮強度は碎石よりも低下し、乾燥収縮は増大する。ただし、収縮低減剤の使用量に応じて収縮量は低減する。
- (3) 膨張材を使用したコンクリートに蒸気養生を施した場合、通常のコンクリートよりも昇温中に非常に大きな膨張を示すことが分かった。この特性を考慮した膨張材使用量の選定を含めたコンクリートの配(調)合設計が必要であると考えられる。
- (4) 蒸気養生を施したコンクリート製品であっても、収縮低減剤は収縮を抑制し、ひび割れ発生リスクを低減するものと考えられる。
- (5) 環境を配慮して高炉スラグや再生骨材Mを使用することでコンクリート製品の品質が低下する可能性は否めないが、膨張材や収縮低減剤の使用により、損なわれた品質を補うことは可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 鳥居和之ほか：アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張挙動に及ぼすセメントと反応性骨材の組合せの影響，土木学会論文集，No.739，V-60，pp.251-263，2003.8
- 2) 清水和博ほか：再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性の評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007
- 3) 阿波稔ほか：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひび割れ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.567-572，1993