# 論文　高炉 B 種コンクリートの力学特性に及ぼす初期高温履歴と廃瓦骨材の影響

川畠　光貴[*1]・Mwangi M. MACHARIA[*2]・小川　由布子[*3]・佐藤　良一[*4]

**要旨**：高炉 B 種コンクリートの力学特性に及ぼす初期高温履歴および廃瓦骨材の内部養生の影響を実験的に検討した。W/C は 0.50 と 0.35 とし，環境温度は常温および最高温度約 70℃の高温履歴とした。この結果，廃瓦骨材無置換の圧縮強度は有効材齢 150 日において高温履歴により W/C=0.50 で 18%，W/C=0.35 で 16%低下した．しかし廃瓦骨材置換によってその低下を W/C=50 で 5%，W/C=0.35 で 10%抑制した．また廃瓦骨材無置換の自己収縮は有効材齢 200 日において高温履歴により W/C=0.50 で 25%，W/C=0.35 で 18%増加した。一方，廃瓦骨材置換によって自己収縮は W/C=0.50 で 24%大きくなり，W/C=0.35 で 21%小さくなった。

**キーワード**：高炉 B 種コンクリート，高温履歴，廃瓦骨材，強度特性，静弾性係数，自己収縮，鉄筋ひずみ

## 1. はじめに

高炉セメントを用いたコンクリートは長期強度の増進が大きいこと等の利点を持つが，マスコンクリートに使用した際に，材齢初期の水和熱による高温履歴により常温下と比較して長期の強度発現性が低下することや，20℃養生と比較して自己収縮が W/C によらず 2 倍程度になる場合があると報告されている[1)2)]。また高炉セメント B 種コンクリート(BBC)を用いた鉄筋コンクリート(RC)はりのせん断耐力は，初期高温履歴によって，常温下と比較して 8-14%低下すると報告されており[2)]，初期高温履歴を受ける BBC および BBC を用いた RC 部材の力学特性の解明が求められている。

一方で，高吸水率の人工軽量骨材や超吸水性ポリマー粒子などを内部養生材として用い，コンクリートの自己収縮低減を行う手法が提案されている[3)4)]。特に，産業廃棄物である廃瓦骨材は適度な吸水率と強度を持つ内部養生材として利用されており，硬化体組織の緻密化による強度増加，自己収縮低減および RC はりのせん断耐力向上の効果があると報告されている[2)5)6)]。しかし，初期高温履歴を受ける BBC および BBC を用いた RC 部材の力学特性の性能低下の改善策の一つに内部養生の適用は行われていないと思われる。そこで，本研究では，マスコンクリートを想定した初期高温履歴を受ける BBC に廃瓦骨材を適用し，強度特性，静弾性係数，自己収縮および鉄筋ひずみに及ぼす廃瓦骨材の内部養生の影響を把握することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 温度履歴および養生条件

環境温度は，打込み直後から屋内に静置する常温およびマスコンクリートの内部温度を想定した最高温度約 70℃の温度履歴を材齢 7 日まで与え，その後は温度制御のない屋内に静置する高温履歴の 2 条件とした。高温履歴に使用した温湿度可変制御槽内の最高温度，相対湿度の目標値はそれぞれ 70±1℃，90±5%である。打込み後は直ちにアルミ粘着テープ，湿布，ラップの順で打込み面を覆い，試験材齢まで封緘養生した。

表－1　使用材料

| 使用材料 | 種類 | 記号 | 物理特性 |
|---|---|---|---|
| セメント | 高炉セメント B 種 | BB | 密度 3.04g/cm$^3$ 比表面積 3760cm$^2$/g |
| 細骨材 | 石英斑岩砕砂 | S | 表乾密度 2.58g/cm$^3$ 吸水率 1.56% |
| | 廃瓦細骨材 | PCFA | 表乾密度 2.29g/cm$^3$ 吸水率 9.21% |
| 粗骨材 | 石英斑岩砕石 | G | 表乾密度 2.62g/cm$^3$ 吸水率 0.59% |
| | 廃瓦粗骨材 | PCCA | 表乾密度 2.26g/cm$^3$ 吸水率 9.20% |

*1 広島大学　工学部第四類社会基盤環境工学プログラム　(学生会員)
*2 広島大学大学院　工学研究科社会基盤環境工学専攻　(学生会員)
*3 広島大学大学院　工学研究院社会基盤環境空間部門助教　博士（工学）　(正会員)
*4 広島大学大学院　工学研究院名誉教授　工博　(正会員)

表－2　配合表

| 配合名 | 水セメント比 | 目標値 | | 測定値 | | | 細骨材率 | 単位量 (kg/m$^3$) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | スランプ (cm) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 打込み温度 (°C) | | 水 W | セメント C | 細骨材 | | | 粗骨材 | | |
| | | | | | | | | | | 計 | S | PCA | 計 | G1505 | G2015 | PCA |
| 50BBC | 0.50 | 8±2 | 4.5±1.5 | 8.5/10.0※ | 5.1/5.0※ | 23.7/15.5※ | 0.446 | 170 | 340 | 775 | 775 | 0 | 977 | 391 | 586 | 0 |
| 50G10 | | | | 8.0 | 4.2 | 17.0 | | | | 775 | 775 | 0 | 964 | 352 | 528 | 84 |
| 50S12 | | | | 9.5 | 3.7 | 8.6 | | | | 764 | 680 | 84 | 977 | 391 | 586 | 0 |
| 35BBC | 0.35 | 18±2 | | 18.0 | 4.5 | 24.6 | 0.403 | | 486 | 650 | 650 | 0 | 978 | 391 | 587 | 0 |
| 35G10 | | | | 19.5 | 4.9 | 25.0 | | | | 650 | 650 | 0 | 964 | 352 | 528 | 84 |
| 35S12 | | | | 20.0 | 4.4 | 23.1 | | | | 639 | 555 | 84 | 978 | 391 | 587 | 0 |

※50BBC のみ常温と高温履歴の打込み日が異なる．フレッシュ性状の測定値は(常温/高温履歴).

### 2.2 使用材料および配合

本研究において使用した材料とその物理的性質を**表－1** に示す。セメントには高炉セメント B 種を使用し，細骨材には石英斑岩砕砂，廃瓦細骨材，粗骨材には石英斑岩砕石，廃瓦粗骨材を使用した。内部養生材として用いる廃瓦骨材は十分に吸水させるため 7 日間以上水に浸漬し，その後表乾状態になるまで屋外で乾燥させた。コンクリートの配合を**表－2** に示す。W/C は 0.50 と 0.35 の 2 水準とした。廃瓦骨材の混入は無置換，粗骨材 10vol.%および細骨材 12vol.%(粗骨材と細骨材の表乾密度の違いによる吸水量の差をなくした)の 3 水準とし，配合名は W/C=0.50 で順に 50BBC，50G10，50S12，W/C=0.35 で順に 35BBC, 35G10, 35S12 と示した。細骨材比は W/C=0.50 で 0.446，W/C=0.35 で 0.403 とし，単位水量は 170kg/m$^3$ とした。スランプの目標値は W/C=0.50 で 8±2cm，W/C=0.35 で 18±2cm とし，空気量の目標値は W/C によらず 4.5±0.5%と設定した。スランプと空気量は W/C=0.50 で AE 減水剤標準形 I 種を，W/C=0.35 で高性能 AE 減水剤標準形 I 種を用いて調整した。

### 2.3 検討項目

#### 2.3.1 強度特性および静弾性係数

強度特性および静弾性係数の測定のため，圧縮強度試験，割裂引張強度試験および静弾性係数測定試験を実施した。各試験はそれぞれ JIS A 1108，JIS A 1113 および JIS A 1149 に準拠した。試験材齢は圧縮強度および静弾性係数の場合は 1，3，7，28，91 日とし，割裂引張強度の場合は 3，7，28，91 日とした。

#### 2.3.2 自己収縮ひずみ

供試体寸法は後述の RC はりと同断面の 200×320×1000mm とし，供試体中心部に熱電対内蔵型の埋込みひずみゲージを設置し打込み直後から長手方向の自己収縮ひずみを測定した。

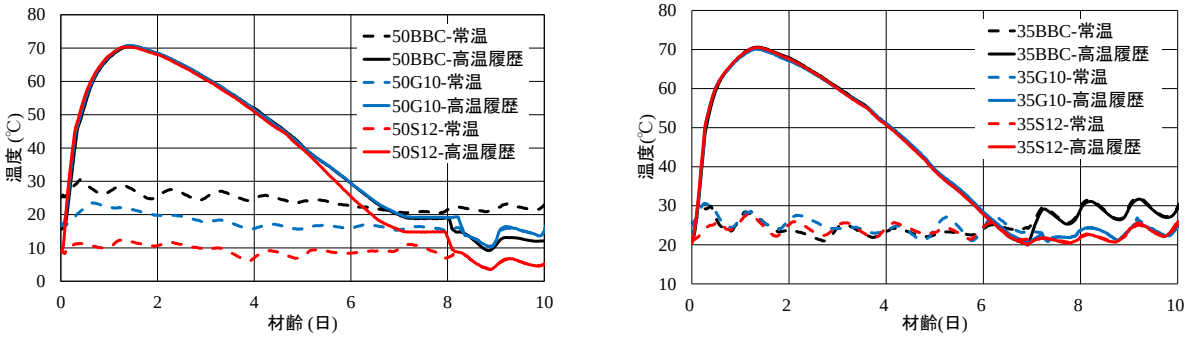
#### 2.3.3 RC はりの鉄筋ひずみ

RC はりの寸法は 200×320×2300mm，有効高さは 250mm とし，引張鉄筋には異形鉄筋の D16 を使用した。各鉄筋には中心点，中心から 475mm 地点，600mm 地点の上下に計 10 個のひずみゲージを設置した。各 RC はりに 2 本の鉄筋を設置し，各配合で供試体 A，B の 2 体を作製した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 強度特性および静弾性係数

材齢 10 日までの円柱供試体内部の温度を W/C ごとに**図－1** に，コンクリートの圧縮強度，割裂引張強度および静弾性係数と有効材齢 [7]の関係を**図－2~図－4** にそれぞれ示す。強度特性および静弾性係数は各材齢 3 体の試験を行い，全材齢の結果を用いて以下のマスコン指針(2008)[8]の双曲線近似式(1)~(3)を用いて配合別で比較検




図－1 材齢初期の円柱供試体内部の温度(左:W/C=0.50，右:W/C=0.35)

討した。図のプロットは測定値の平均値である。

$$f_c'(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f_c'(t_n) \quad (1)$$

$$f_t(t_e) = C_1 \times f_c'(t_e)^{C_2} \quad (2)$$

$$E_c(t_e) = C_3 \times f_c'(t_e)^{C_4} \quad (3)$$

$t_e$：有効材齢(日)

$t_n$：管理材齢(日)(=28)

$f_c'(t_e)$：有効材齢$t_e$における圧縮強度(N/mm²)

$S_f$：硬化原点に対応する有効材齢(日)

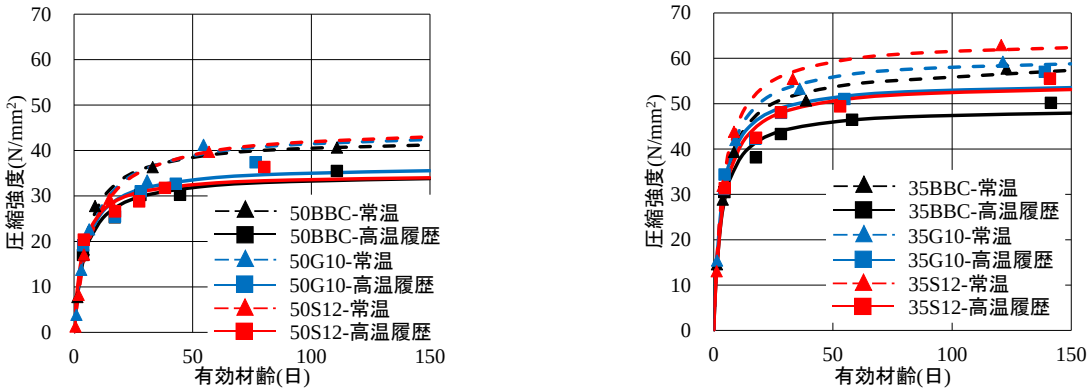
$f_c'(t_n)$：有効材齢$t_n$における圧縮強度(N/mm²)

$f_t(t_e)$：有効材齢$t_e$における割裂引張強度(N/mm²)

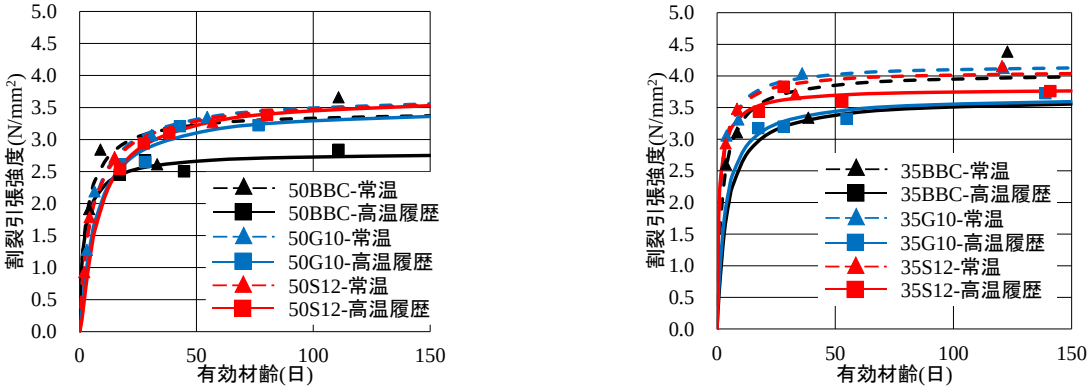
$E_c(t_e)$：有効材齢$t_e$における静弾性係数(kN/mm²)

$a, b, C_1 \sim C_4$：係数

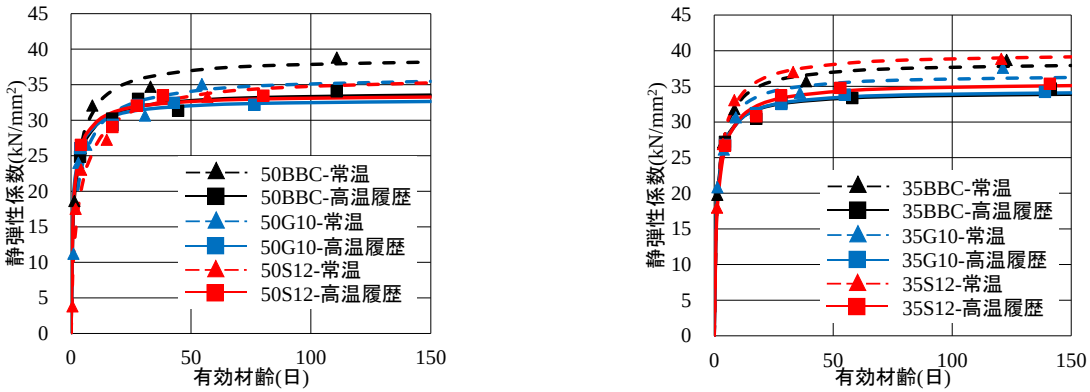
コンクリートの圧縮強度，割裂引張強度および静弾性係数の有効材齢 150 日の値による結果のまとめを**図－5~図－7** に示す。図では，高温履歴の影響を各配合の常温に対する比で表し，廃瓦骨材の影響を各温度履歴の廃瓦骨材無置換に対する比で表した。廃瓦骨材無置換の圧縮強度，割裂引張強度および静弾性係数は高温履歴により常温と比べてそれぞれ 16-18%，11-18%，11-12%低下した。これは初期に高温履歴を受けた影響で，細孔構造が粗になったためと考えられる [9]。一方，廃瓦骨材置換によって圧縮強度は増加傾向を示し，特に 35G10, 35S12 の




図－2 圧縮強度と有効材齢の関係(左:W/C=0.50，右:W/C=0.35)




図－3 割裂引張強度と有効材齢の関係(左:W/C=0.50，右:W/C=0.35)



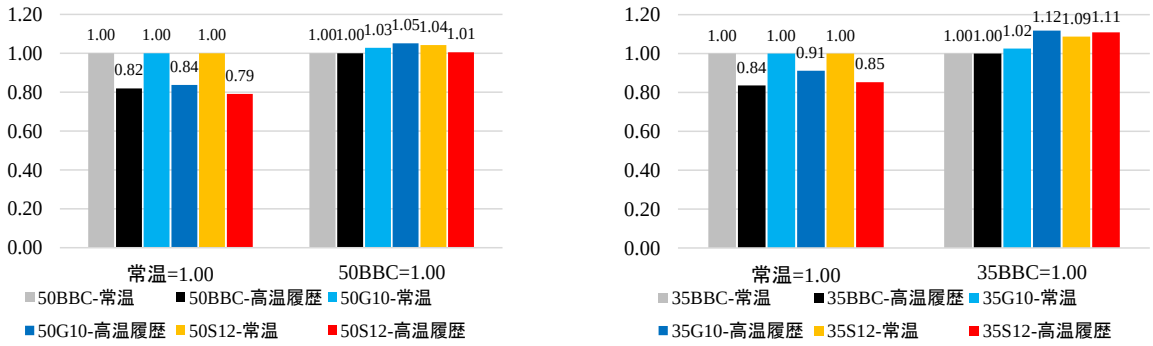

図－4 静弾性係数と有効材齢の関係(左:W/C=0.50，右:W/C=0.35)

高温履歴が 35BBC の高温履歴と比べて 11-12%増加した。これは廃瓦骨材の内部養生効果でセメントペーストに水分が供給され，水和反応が促進し組織が緻密化したことによると考えられる。割裂引張強度では 50G10, 50S12 の高温履歴が 50BBC の高温履歴と比べて 22-28%増加した。これは，35BBC に比べ比較的に粗骨材界面の遷移帯が形成されやすいと推測される [10]50BBC においては，高温履歴によりその遷移帯に微細なひび割れが生じる可能性が報告されている [9]が，廃瓦骨材の内部養生により遷移帯が緻密化したことによると思われる。なお，W/C=0.35 においては遷移帯が形成されにくくなるため，内部養生効果は小さかったと思われる。これらのメカニズムの解明については，今後の課題としたい。静弾性係数においては廃瓦骨材を置換したものが無置換と比べて同等以下となっている。これは廃瓦骨材が多孔質であり，一般の骨材よりも静弾性係数が小さいことが影響している [2]と考えられる。以上をまとめると，BBC の圧縮強度，割裂引張強度および静弾性係数は初期高温履歴により常温と比べて低下するが，圧縮強度および割裂引張強度は廃瓦骨材の内部養生によりこの低下を抑制することができる。静弾性係数においては廃瓦骨材を置換した供試体は無置換と比べて同等以下となる傾向を示した。

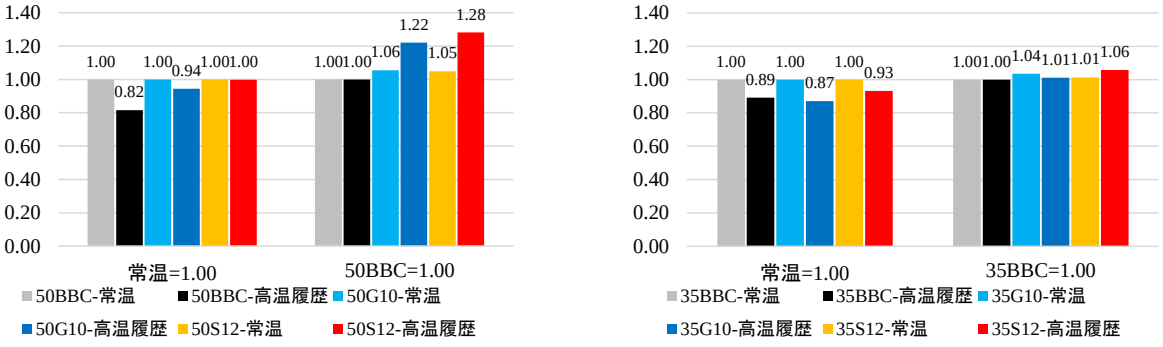
### 3.2 自己収縮ひずみ

コンクリートの自己収縮ひずみと有効材齢の関係を**図－8** に示す。図にはマスコン指針 [8]に示されている自己収縮ひずみ予測式による値も併せて記した。自己収縮は有効材齢 190 日-200 日の期間の実測熱膨張係数を用いて求めた温度ひずみを実ひずみから差し引いて求めた。また自己収縮の起点はコンクリートが凝結したと考えられる鉄筋応力発生点とした。

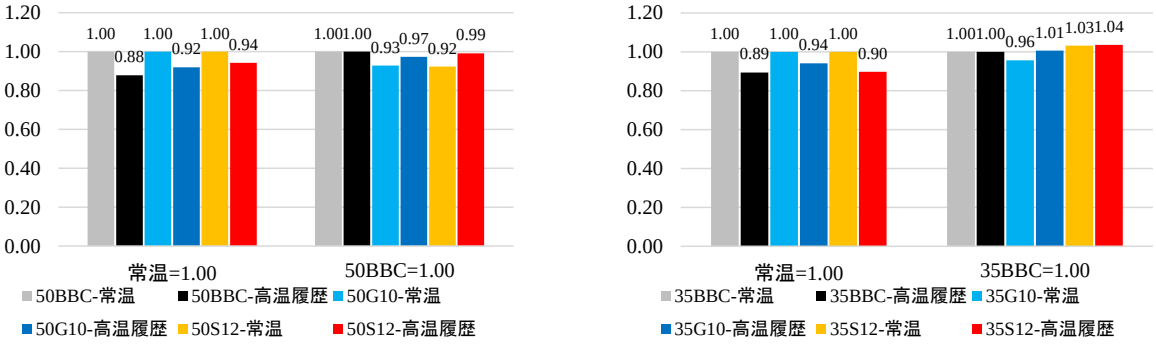
**図－8** より，初期高温履歴を受けた供試体は，温度上昇による水和促進とそれによる自己乾燥の促進により




図－5 圧縮強度の結果まとめ(左:W/C=0.50，右:W/C=0.35)




図－6 割裂引張強度の結果まとめ(左:W/C=0.50，右:W/C=0.35)




図－7 静弾性係数の結果まとめ(左:W/C=0.50，右:W/C=0.35)

W/C と廃瓦骨材の有無によらず温度のピークである有効材齢約 10 日までの自己収縮が大きくなった。その後は温度の低下とともに供試体内部の相対湿度が上昇することにより，自己収縮ひずみが減少したと思われる。高温履歴後に常温下に置いてからは，再び自己乾燥が生じて収縮ひずみが増大したと推定される。その進行速度が常温下の場合より速いのは，高温から常温に戻った時の供試体中の相対湿度が常温の場合に比べて高いことにより，自己乾燥が促進したためと思われる。

コンクリートの自己収縮の有効材齢 200 日の値による結果のまとめを**図－9** に示す。図では，高温履歴の影響を各配合の常温に対する比で表し，廃瓦骨材の影響を各温度履歴の廃瓦骨材無置換に対する比で表した。**図－9** に示すように，自己収縮は W/C と廃瓦骨材の有無によらず高温履歴により常温と比べて増加傾向を示した．特に 50G10 の自己収縮は 52%増加した。この傾向は既往の研究と同様である [1)]。一方，廃瓦を置換した殆どの供試体の自己収縮は，無置換と比べて低下傾向を示し，特に 50G10 の常温，35S12 の高温履歴は 23%，21%低減した。しかし，廃瓦骨材を置換しても 50S12 のように高温履歴の有無によらず，廃瓦骨材無置換の場合に比べ自己収縮が同等かそれ以上になる供試体があった。これは 50S12 の打込み温度が 10℃と他の供試体と比べ低かったことによると考えられる [11)]。

### 3.3 鉄筋ひずみ

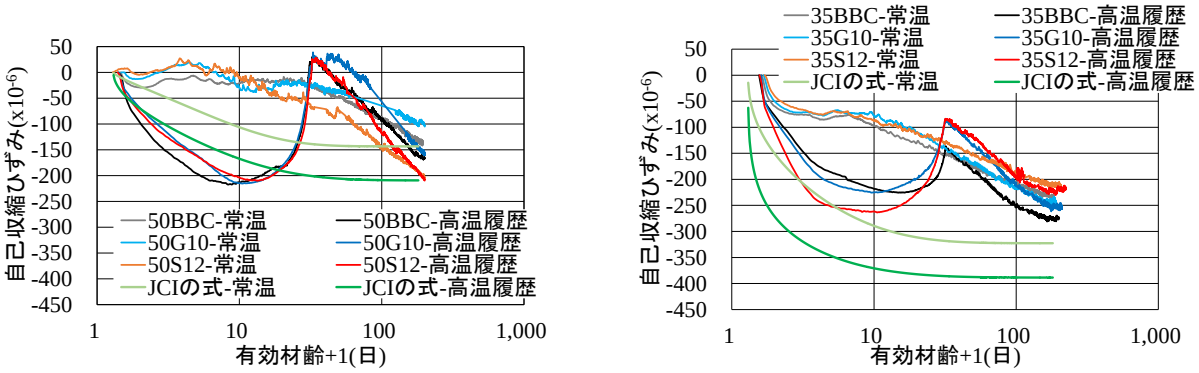
RC はりの鉄筋ひずみと有効材齢の関係を**図－10** に示す。なお，ひずみは各配合 2 供試体合計 40 本のひずみゲージの平均値を用いた。

**図－10** によると，初期に高温履歴を受けた供試体の鉄筋ひずみの挙動は自己収縮と同様の傾向を示した。

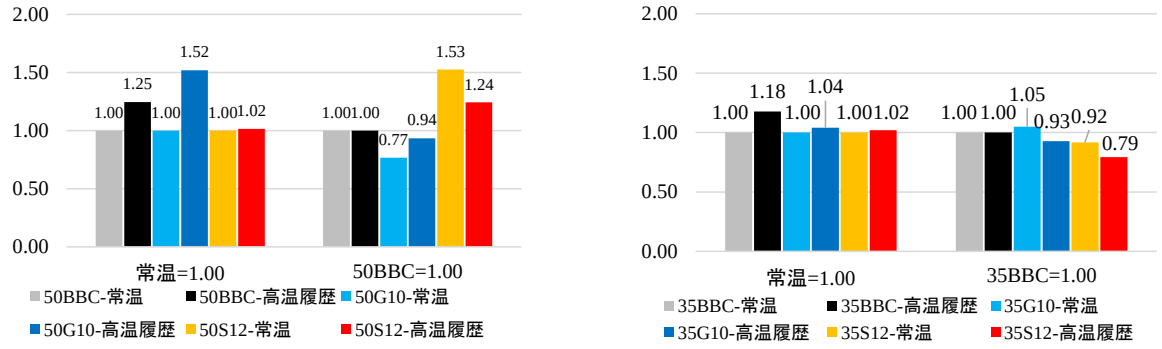
W/C=0.50 の場合，有効材齢 100 日で高温履歴を受けた供試体の鉄筋ひずみが 50%程度小さくなった。また高温履歴および常温の 50G10，50S12 の鉄筋ひずみは 50BBC と同程度となった。W/C=0.35 の場合，有効材齢 100 日で高温履歴を受けた 35BBC の鉄筋ひずみは常温と比べて 25%程度小さくなった。一方高温履歴を受けた 35G10，35S12 の鉄筋ひずみは常温と同程度となった。また，常温の 35G10，35S12 の鉄筋ひずみは常温の 35BBC と比べて 15%程度小さくなった。一方高温履歴を受けた 35G10，35S12 の鉄筋ひずみは高温履歴を受けた 35BBC と同程度となった。以上の結果より，廃瓦骨材の内部養生は W/C=0.35 の常温においてある程度の効果を示したが，全体で見ると鉄筋ひずみにはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。その原因については現段階で判明しておらず，今後の検討課題とする。

## 4. 結論

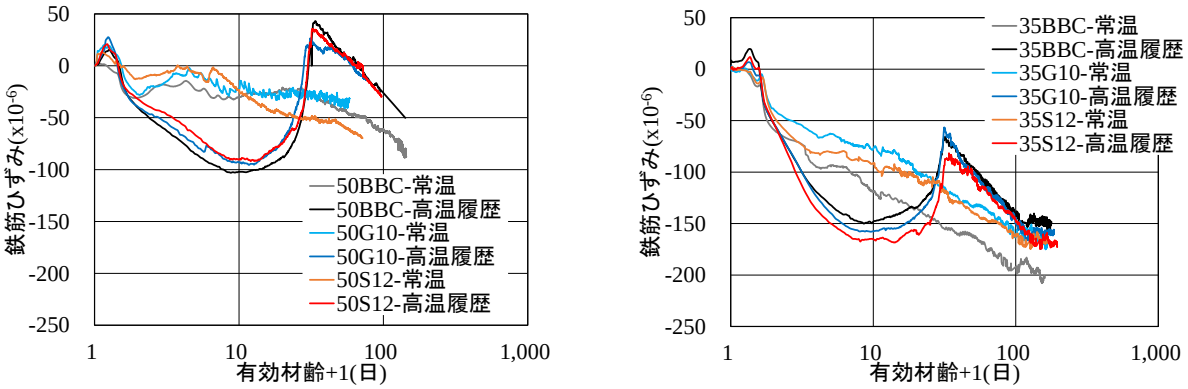
本研究の範囲内で明らかになった事項を以下にまとめる。




図－8 自己収縮ひずみと有効材齢の関係（左：W/C=0.50，右：W/C=0.35）




図－9 自己収縮の結果まとめ（左：W/C=0.50，右：W/C=0.35）




図－10 鉄筋ひずみと有効材齢の関係(左:W/C=0.50, 右:W/C=0.35)

(1) 高炉 B 種コンクリートの圧縮強度，割裂引張強度および静弾性係数は初期高温履歴により常温と比べて低下した。しかし圧縮強度および割裂引張強度は廃瓦骨材の内部養生によりこの低下を抑制することができる。一方静弾性係数において廃瓦骨材を置換した供試体は無置換と比べて同等以下となる傾向を示した。

(2) 初期に高温履歴を受けた供試体の自己収縮および鉄筋ひずみは，W/C と廃瓦骨材の有無によらず温度のピークまでのひずみが大きくなった。その後は温度の低下とともにひずみが膨張した。高温履歴後は再びひずみが収縮し，常温に比べて自己収縮の増加速度が大きくなった。

(3) 高炉 B 種コンクリートの自己収縮は初期高温履歴により常温と比べて増加した。一方で廃瓦骨材を置換することで無置換に対し自己収縮の増加を抑制することができる場合があった。

(4) 高炉 B 種コンクリートはりの鉄筋ひずみは初期高温履歴による影響は見られなかった。また廃瓦骨材の影響もほとんどなかった。

**謝辞**

本研究の一部は，JSPS 科研費 25630187(代表：佐藤良一)の助成を受けたものです。記して謝意を表します。

**参考文献**

1) 宮澤伸吾，佐藤良一，杉山淳司：高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp465-470，2008

2) Mwangi M. MACHARIA，藤山尭大，小川由布子，佐藤良一：高炉セメント B 種 RC はりの曲げせん断耐力に対する初期高温履歴の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp241-246，2015

3) Arnon Bentur, Shin-ichi Igarashi, Konstantin Kovler: Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, Cement and Concrete Research 31, pp1587–1591, 2001

4) Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen: Water-entrained cement-based materials II. Experimental observations, Cement and Concrete Research 32, pp973-978, 2002

5) 鈴木雅博，丸山一平，川畑智亮，佐藤良一：廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp651-656，2007

6) 重松明，温品達也，木村守，佐藤良一：廃瓦骨材の内部養生による高炉 B 種コンクリートの性能向上について，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp205-210，2009

7) JSCE(2012): コンクリート標準示方書設計編，pp35-39，p107

8) Japan Concrete Institute: Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete 2008, pp26-27, 2008

9) 伊代田岳史，兼安真司，檀康弘，前田悦孝：高炉スラグ微粉末を高含有したセメントの温度依存特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp139-144，2005

10) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.33，No.9，pp.5-17，1995

11) 鈴木雅博，丸山一平，中瀬博一，佐藤良一：超高強度コンクリート RC 柱の膨張材と収縮低減剤を用いた初期応力・初期欠陥低減に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.635，pp.1-10，2009