

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630187

研究課題名(和文) 廃瓦骨材の内部養生による高炉B種マスコンクリート構造部材の性能向上

研究課題名(英文) Enhancement of structural performance of mass concrete members by internal curing with porous ceramic-roof tile waste aggregates

研究代表者

佐藤 良一 (Sato, Ryoichi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：20016702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：最高70℃の高温履歴を受ける高炉セメントB種を用いたコンクリートおよびRCはりの力学特性に対する廃瓦骨材(PCA)の内部養生効果を検討した。

その結果、高温履歴の影響で15%低下した圧縮強度は内部養生により10%程度回復した、内部養生の有無によらず温度上昇域で生じた自己収縮とそれによる鉄筋ひずみは、温度の下降域で大きく減少した。最大ひび割れ幅は高温履歴、内部養生の影響はほとんど受けず、土木学会式の値より小さかった。高温履歴無置換のRCはりのせん断耐力(V_c)は、常温無置換に比べて約5%低下したが、廃瓦細骨材の内部養生により常温無置換の V_c より大きくなった。

研究成果の概要(英文)：Internal curing effects with porous ceramic-roof tile waste aggregates (PCA) were investigated on mechanical properties of concrete as well as RC beams made of portland blast furnace slag cement type B, subjected to high temperature history at early age.

The results showed that (1) Compressive strength of concrete which decreased by 15% due to high temperature effect increased by 10% due to the internal curing, (2) Autogenous shrinkage and its resultant reinforcement strain increased significantly in temperature rise stage and decreased remarkably in temperature drop stage, which thereafter, increased again under room temperature, (3) Maximum crack width of RC beams was not affected by the internal curing and the high temperature history, (4) Shear strength of RC beams without PCA decreased by 5% due to the high temperature effect, which increased markedly with fine PCA resulting in being larger than that without PCA under room temperature.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：廃瓦骨材 内部養生 高炉セメントB種 マスコンクリート 構造性能

1. 研究開始当初の背景

高炉セメント B 種(BB)を用いたコンクリート(BBC)をマスコンクリートに適用した場合、水セメント比(W/C)によらず、20 養生下に比べて、自己収縮が2 倍程度増大する場合がある。一方、JCI のマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 (JCI 指針)では、自己収縮の抑制対策として、膨張材の適用が規定されている。しかし、膨張材は十分な湿潤養生下で膨張機能を発揮する材料であり、高温履歴下でかつ自己収縮が生じる自己乾燥下では膨張機能が十分発揮され、また所要の構造性能が得られるか疑問であった。

2. 研究の目的

水和熱により自己収縮が増大するマスコンクリートに産業廃棄物である廃瓦から製造した骨材を内部養生材として活用することにより、高温履歴下の自己収縮低減および RC はりの曲げひび割れ幅、せん断耐力等の力学性能の向上を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

W/C=0.5、0.35 の BBC とそれぞれに内部養生材として廃瓦粗骨材(PCCA)、廃瓦細骨材(PCFA)を用いた BBC の力学特性、これらのコンクリートで製造した鉄筋コンクリート(RC)はりの曲げひび割れ幅、せん断耐力に及ぼす内部養生と水和熱を模擬した高温履歴の影響を実験的に検討した。PCCA の容積置換率は W/C=0.5 の場合 0%、10%(50G10)、PCFA の置換率は 12%(50S12)、W/C=0.35 の場合 0%、10%(35G10)、PCFA の置換率は 15%(35S15)である。RC はりの寸法は 200mm × 320mm × 2300mm で、スパン長は 1700mm、等曲げ区間長 200mm、せん断スパン長 1500mm、有効高さ 250mm である。せん断スパン長/有効高さ(a/d)は 3 である。はりは各条件で 2 体ずつ製造した。測定は埋込型ひずみゲージで自己収縮、ひずみゲージで鉄筋ひずみを、高感度変位計でスパン中央たわみと曲げせん断域のせん断変位を測定した。また等曲げ区間を含む中央部 500mm の区間の曲げひび割れ幅をパイ型変位

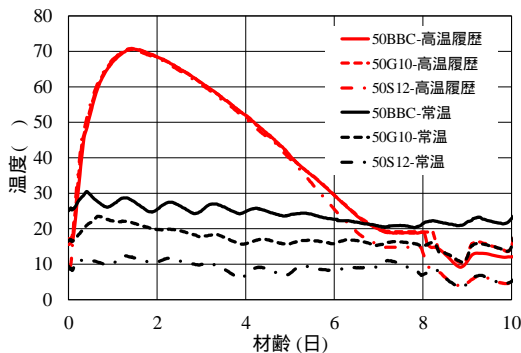


図-1 温度履歴の一例

計で測定した。温度履歴の一例を図-1 に示す。全ての供試体は、温湿度自動制御可能な環境室で打込みから材齢7日まで図-1に示す最高温度 70 の温度履歴、相対湿度 90%下に、その後は載荷試験日まで室内にそれぞれ静置した。供試体は全期間封緘養生した。

4. 研究成果

4.1 強度

図-2 は圧縮強度に及ぼす高温履歴と内部養生の影響の一例を示したものである。図中には双曲線による近似曲線を示している。この図より高温履歴は内部養生の有無によらず圧縮強度を低下させることがわかる。

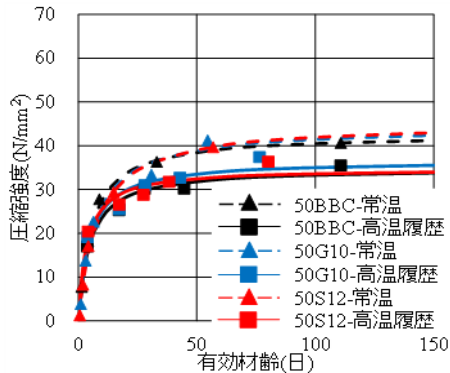


図 2 圧縮強度に及ぼす温度履歴の影響の一例 (W/C=0.5)

図-3 は W/C=0.5 と W/C=0.35 の双曲線近似曲線から求めた有効材齢 150 日における圧縮強度に及ぼす高温履歴と内部養生の影響を示したものである。各強度は常温無置換の圧縮強度で正規化している。この図によれば、常温下であれば W/C によらず内部養生効果が認められ圧縮強度は増加するが、高温履歴により低下する。高温履歴下の内部養生の効果は W/C=0.5 の場合ほとんど認められないが W/C=0.35 では内部効果が認められ高温無置換に比べ 10%程度大きくなる。

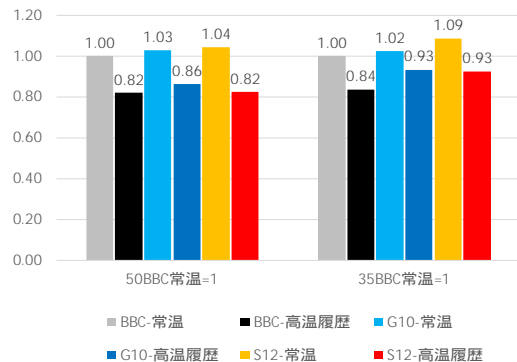


図 3 有効材齢 150 日における圧縮強度に及ぼす温度履歴と内部養生の影響

4.2 自己収縮および自己収縮による鉄筋ひずみ

図 4および図 5はW/C=0.5、W/C=0.35 の自己収縮ひずみを示したものである。自己収縮ひずみは、実測ひずみから有効材齢 190 - 200 日の間の熱膨張係数 $11 \times 10^{-6}/$ を用いて求めた温度ひずみを差し引いて求めた。ひずみの原点は鉄筋応力の発生時とした。これらの図によれば、高温履歴下の自己収縮ひずみは、廃瓦置換の有無に拘らず、温度上昇域に大きく収縮したが、温度降下域での収縮ひずみ減少も著しく、常温下のそれと全く異なった性状を示した。また JCI マスコン指針 2008 の高温履歴下の予測式による値とも定性的に異なる傾向を示した。常温に達した有効材齢 7 日の自己収縮ひずみは常温下のそれらと同等以下になったが、それ以降の進行速度は速い。有効材齢 170 日において、W/C=0.5 の場合高温履歴の影響により内部養生しても S12 では高温無置換 50BBC より大きかった。

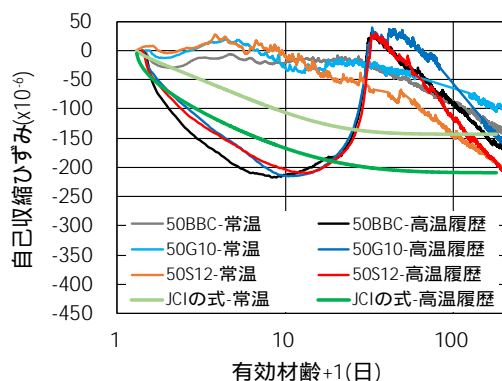


図 4 自己収縮ひずみに及ぼす温度履歴と内部養生の影響 (W/C=0.5)

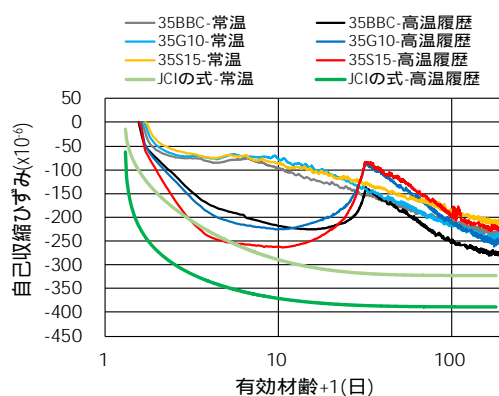


図 5 自己収縮ひずみに及ぼす温度履歴と内部養生の影響 (W/C=0.35)

しかし、W/C=0.35 の場合には、高温履歴により 18%増大した 35BBC の自己収縮ひずみは廃瓦置換により低減し、特に細骨材置換 35S15 では、高い内部養生効果が認められた。

図-6、図-7 は W/C=0.5、W/C=0.35 の自己収縮により生じた鉄筋ひずみを示したものである。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。図-6 の W/C=0.5 の場合、高温履歴を受けた場合、内部養生の有無によらず、温度降下域

の鉄筋ひずみ減少は著しく常温に達した有効材齢 7 日以降常温の場合より明らかに小さくなった。また内部養生効果は高温履歴の有無に拘らずみられず、常温では 50S12 は無置換より大きくなった。しかし、図-7 に示す W/C=0.35 の場合には、BBC 常温が最も大きい一方 BBC 高温が最も小さかった。内部養生効果は常温下で認められたが、高温履歴下ではほとんど認められなかった。自己収縮と鉄筋ひずみは必ずしも対応しなかったが、その理由は今後の課題とした。

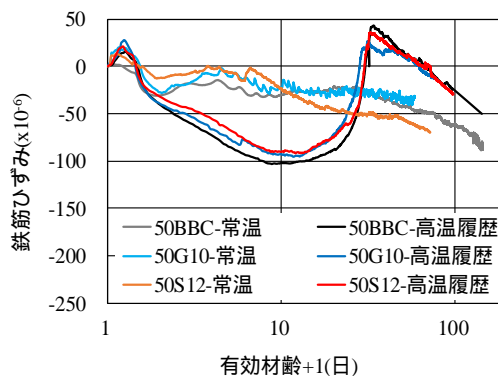


図 6 自己収縮による鉄筋ひずみに及ぼす温度履歴と内部養生の影響 (W/C=0.5)

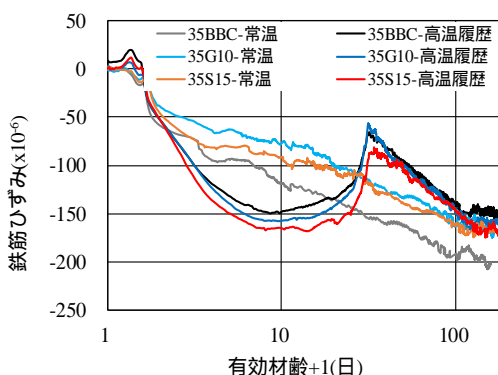


図-7 自己収縮による鉄筋ひずみに及ぼす温度履歴と内部養生の影響 (W/C=0.35)

4.3 最大曲げひび割れ幅

図-8 は、最大ひび割れ幅と鉄筋応力変化量の関係を示したものである。鉄筋応力変化量は自己収縮により生じた鉄筋応力の供試体ごとの相違が最大ひび割れ幅評価に及ぼす影響を除去するために取り入れた考え方であり、鉄筋位置のコンクリート応力が 0 の時から所定の荷重までに生じる鉄筋応力の変化量を意味する 引用文献。これによれば、高温履歴、内部養生の影響は明確に認められず、いずれの供試体の場合も土木学会示方書式による値よりかなり小さい。

図 9 は、W/C=0.35 の場合の最大ひび割れ幅と鉄筋応力変化量の関係を示したもので

ある。この場合も $W/C=0.5$ の場合と同様高温履歴、内部養生の影響は明確でない。いずれの供試体の場合も土木学会示方書式による値よりかなり小さく、実務上の問題はない。

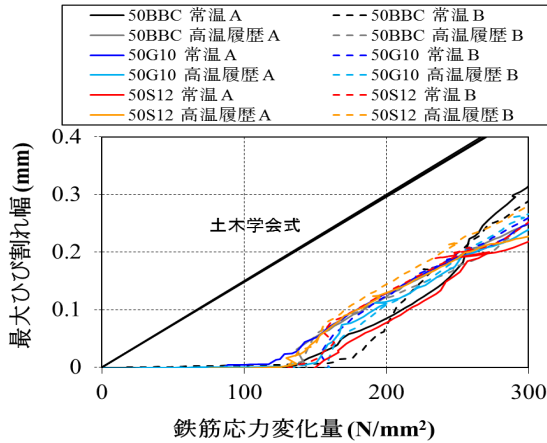


図 8 最大ひび割れ幅と鉄筋応力変化量の関係 ($W/C=0.5$)

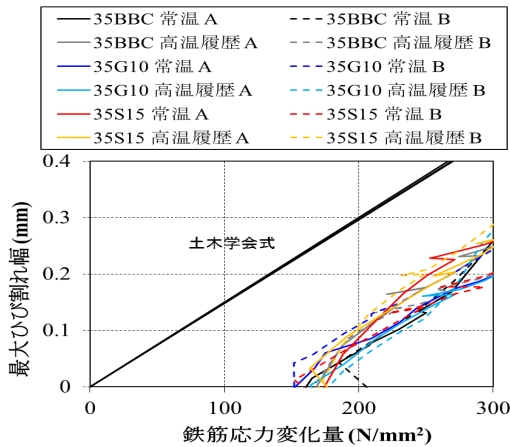


図 9 最大ひび割れ幅と鉄筋応力変化量の関係 ($W/C=0.35$)

図-8と図-9を比較すれば、 $W/C=0.35$ の方が同一鉄筋応力変化量における最大ひび割れ幅は小さい。これは付着特性が優れていることが理由の一つと考えられる。いずれにしても留意すべきことは廃棄物であっても適切に用いれば、ひび割れ幅の制御は設計上可能といえることである。

4.4 せん断耐力

図-10、図-11は、 $W/C=0.5$ の代表例として廃瓦骨材無置換と廃瓦細骨材置換した場合の荷重 たわみ関係に及ぼす高温履歴の影響を示したものである。これらの図に示すように、荷重 たわみ関係に及ぼす高温履歴の影響は大きくはないが、斜めひび割れ発生荷重 (V_c) は廃瓦骨材置換によらず高温履歴により若干低下する傾向がある。なお、 V_c は荷重 たわみ関係では明確でないので必要に応じてせん断力 - せん断変位関係から定めた。

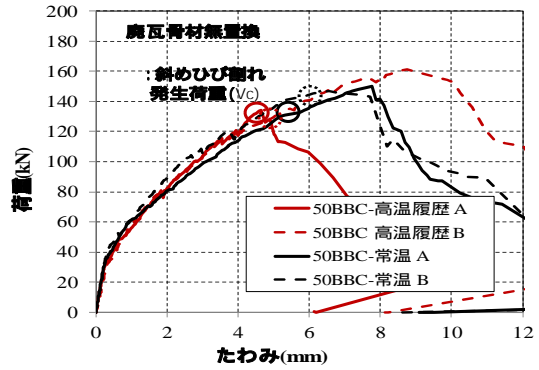


図-10 荷重 たわみ関係($W/C=0.5$ 、廃瓦骨材無置換)

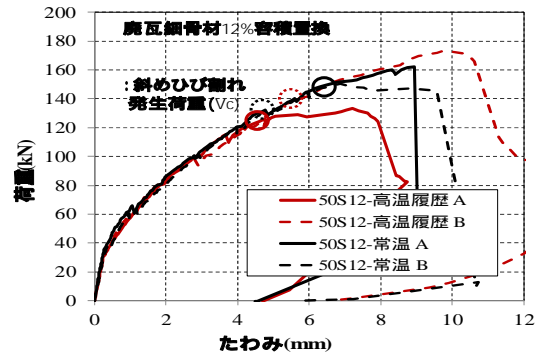


図-11 荷重 たわみ関係($W/C=0.5$ 、廃瓦細骨材置換)

図-12、図-13は、 $W/C=0.5$ の場合と同様に、 $W/C=0.35$ の場合の荷重 - たわみ関係に及ぼす高温履歴の影響の一例を示したものである。この場合は、 $W/C=0.5$ の場合と異なる

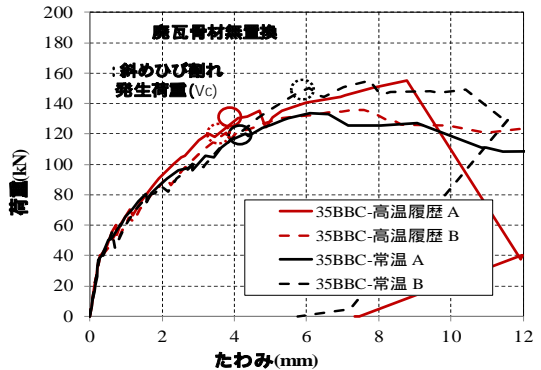


図-12 荷重 たわみ関係($W/C=0.35$ 、廃瓦骨材無置換)

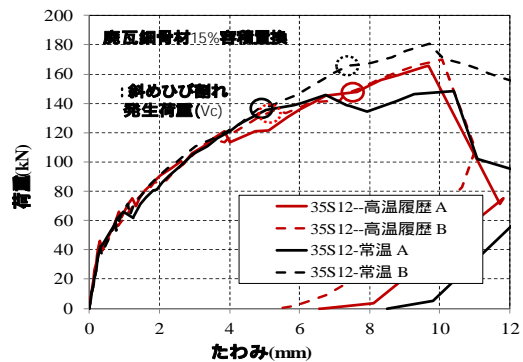


図-13 荷重 たわみ関係($W/C=0.35$ 、廃瓦細骨材置換)

り、廃瓦骨材無置換では、Vcに至る過程で荷重が大きくなると常温の方が、また廃瓦細骨材置換では高温履歴を受けた方が、それぞれたわみが大きくなる傾向を示した。その理由は不明ではつきによる可能性もある。

図 - 14、図 - 15 は、W/C=0.5、W/C=0.35 それぞれの場合のせん断耐力 (Vc) に及ぼす高温履歴、廃瓦骨材の影響を取りまとめたものである。図中左には各配合の高温 Vc/常温 Vc を、図中央は常温および高温における廃瓦 Vc/無置換 Vc を、図中右には各条件の Vc/常温無置換の Vc、それぞれの比を示している。これにより高温履歴により低下した Vc が廃瓦骨材の内部養生でどの程度回復するかが明らかになる。

W/C=0.5 の場合、いずれのはりの Vc も高温履歴により 5 % 程度低下する。廃瓦骨材の内部養生は常温、高温履歴のいずれの条件下であっても数 % 程度の Vc 増加効果をもたらす、その効果は細骨材の方が大きくなる傾向にある (図中央)。高温履歴により低下した Vc は内部養生により数 % 回復するが、その程度は廃瓦粗骨材、廃瓦細骨材ともに同程度である (図中右)。

W/C=0.35 の場合も高温履歴による Vc の低下は 5 % 程度で、廃瓦細骨材置換の低下率は若干小さい (図中左)。廃瓦骨材による内部養生効果は、常温下、高温履歴下いずれも W/C=0.5 の場合より高く、特に廃瓦細骨材の効果が高い (図中央)。W/C=0.35 程度に W/C が小さくなれば、同一温度条件であれば内部養生効果は明確に認められる。常温無置換と比べ、高温履歴により廃瓦粗骨材 (G10) の場合では Vc が若干小さくなるが、廃瓦細骨材 (S15) では 5 % 程度大きくなる (図中右)。このように、廃棄物であっても W/C が小さくなれば、高温履歴の影響を受けても Vc が常温無置換より大きくなることもある。この理由の説明は今後の課題とした。

4.5. まとめ

高温履歴の影響を受けやすい BBC の強度、自己収縮、それに起因する鉄筋ひずみおよび

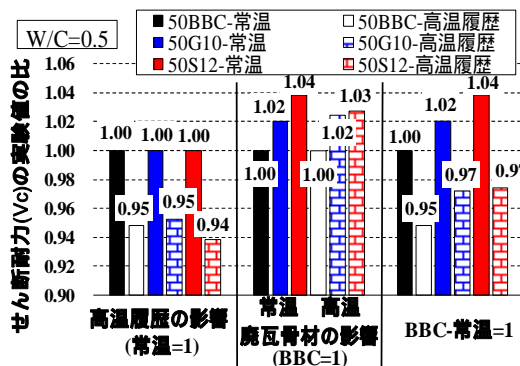


図-14 せん断耐力に及ぼす高温履歴と廃瓦骨材の影響 (W/C=0.5)

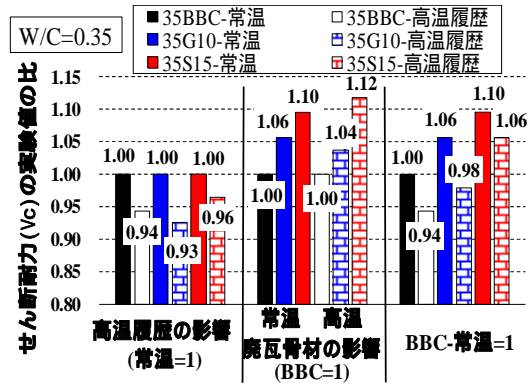


図-15 せん断耐力に及ぼす高温履歴と廃瓦骨材の影響 (W/C=0.35)

BBC で製造した RC はりの最大ひび割れ幅、せん断耐力 (Vc) に及ぼす廃瓦骨材による内部養生効果を検討した。主な結果は以下のようであった。

- (1) 高温履歴で 15% 強低下した圧縮強度は最大、廃瓦細骨材の内部養生で約 10% 増大した。
- (2) 自己収縮、それによる鉄筋ひずみは廃瓦置換の有無に拘らず、温度上昇域に大きく増大したが、温度降下域で大きく減少した。
- (3) 最大ひび割れ幅は高温履歴、廃瓦骨材の影響はほとんど認められなかったが土木学会の設計式による値よりかなり小さかった。
- (4) RC はりのせん断耐力 (Vc) は高温履歴により 5 % 程度低下したが、廃瓦細骨材の内部養生効果で常温無置換より大きくなった。
- (5) 以上より、廃棄物であっても廃瓦骨材は内部養生機能を有する有用な構造材料であり、環境負荷低減にも貢献することを示した。

引用文献

- [1] Makoto Tanimura, Ryoichi Sato and Yoichi Hiramatsu, Serviceability Performance Evaluation of RC Flexural Members Improved by Using Low Shrinkage-High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, No. 2, pp.1-13, 2007.6

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. 川島光貴, MACHARIA Martin Mwangi, 小川由布子, 佐藤良一, 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、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.38、2016、掲載決定
2. 藤山堯大, マチャリアマーティンムワンギ, 小川由布子, 佐藤良一, 高炉セメント B 種 RC はりのせん断耐力に及ぼす初期高

温履歴と廃瓦骨材の影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.38、2016、掲載決定

3. マチャリアムワンギ、藤山堯大、小川由布子、佐藤良二、高炉セメント B 種 RC はりの曲げせん断特性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、査読有、Vol.37、No.2、2015、pp.241-246
4. 村岸祐輔、小川由布子、大石浩史、佐藤良二、ごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いた高炉セメント B 種コンクリートの塩分浸透性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.37、No.1、2015、pp.1513-1518
5. Mwangi M. MACHARIA、小川由布子、山口克己、佐藤良二、廃瓦骨材を活用した RC はりのせん断強度、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.36、No.2、2014、pp.481-486

〔学会発表〕(計 9 件)

1. Fujiyama Akihiro, Macharia Martin Mwangi, Ogawa Yuko, Kawai Kenji, and Sato Ryoichi, Effects of Roof Tile Waste-Coarse Aggregate and High Temperature History at Early Ages on Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Made of Portland Blast-furnace Slag Cement Type B, Proceedings of the Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4), 7-11 Aug 2016, Las Vegas (USA), 発表決定
2. 川島光貴、藤山堯大、藤原浩幸、小川由布子、河合研至、佐藤良二、高炉セメント B 種コンクリートの力学特性および RC はりのせん断強度に及ぼす初期高温履歴と廃瓦骨材の影響、第 68 回土木学会中国支部研究発表会、2016 年 5 月 21 日、広島工業大学五日市キャンパス(広島県広島市)
3. Akihiro Fujiyama, Martin Mwangi Macharia, Yuko Ogawa and Kenji Kawai, Effects of Porous Ceramic Coarse Aggregate on Autogenous Shrinkage and Mechanical Properties of Portland Blast-Furnace Slag Cement Type B Concrete under High Temperature History, Proceedings of the 14th International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8-11 Nov 2015, Taoyuan, (Taiwan).
4. Mwangi Martin Macharia, Yuko Ogawa, Katsumi Yamaguchi, Kenji Kawai, and Ryoichi Sato, Flexural Crack Width of Reinforced Concrete Beams with Roof Tile Waste Aggregate, Proceedings of the

Thirteenth International Conference Ottawa, 14-17 Jul 2015, Ottawa (Canada).

5. 藤山堯大、Mwangi M. Macharia、小川由布子、河合研至、佐藤良二、高温履歴を受ける高炉セメント B 種コンクリートの自己収縮および力学特性に及ぼす廃瓦粗骨材の影響、第 67 回土木学会中国支部研究発表会、2015 年 5 月 23 日、山口大学常盤キャンパス(山口県宇部市)
6. Mwangi M. Macharia、小川由布子、山口克己、佐藤良二：廃瓦骨材で内部養生した RC はりのせん断強度について、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014 年 9 月 10～12 日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)
7. 村岸祐輔、古賀洋平、小川由布子、M.M.Mwangi、半井健一郎、河合研至、佐藤良二、若材齢時から刑事変化する熱膨張係数の測定装置開発とこれを用いた収縮および温度変化の影響の分離、第 66 回土木学会中国支部研究発表会、2014 年 5 月 31 日、松江工業専門学校(島根県松江市)
8. Macharia Martin Mwangi、小川由布子、山口克己、佐藤良二、廃瓦骨材で内部養生した高炉 B 種 RC はりのひび割れ幅について、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013 年 9 月 4～6 日、日本大学生産工学部(千葉県習志野市)
9. Macharia Martin Mwangi, Ogawa Yuko, Kawai Kenji, Sato Ryoichi and Wasaki Masanori, Mechanical properties of portland blast furnace cement type B concrete cured internally with porous ceramic aggregate, The first international conference on concrete sustainability, 27-19 May 2013, Tokyo

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 良一 (SATO RYOICHI)
広島大学・大学院工学研究院・名誉教授
研究者番号：20016702

(2) 研究分担者

河合 研至 (KAWAI KENJI)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：90224716

(3) 研究分担者

小川 由布子 (OGAWA YUKO)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：30624564