

平成 30 年 5 月 26 日現在

機関番号：92604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04084

研究課題名(和文) 高炉スラグ高含有セメントコンクリートの温度ひび割れ制御技術の確立

研究課題名(英文) A Study on restrained thermal cracking controlling technology for high volume blast furnace slag cement concrete

研究代表者

閑田 徹志 (Kanda, Tetsushi)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・所幹部・主席研究員

研究者番号：40416780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高炉C種セメント(BC)コンクリートの温度ひび割れ抵抗性を明らかにすべく、拘束応力を支配する見掛けの線膨張係数に注目し、炭酸カルシウムや石膏などの少量混合成分の増量により、これを大幅に低減できることを見出した。さらに、BCコンクリートの水和物の定量分析を行い、特に温度履歴ピーク後において、自己収縮を増大させ見掛けの線膨張係数を増大させるモノサルフェートの生成を抑制する材料構成を見出し、ひび割れ抵抗性をさらに高めたBCコンクリートを提案した。また、線膨張係数の時間変化について検討し、時間依存性について数式化を行い、温度応力を精度よく予測できる3次元FEM解析方法を初めて提案した。

研究成果の概要(英文)：This study focused to clarify resisting mechanism and to propose performance improving scheme of high-volume blast furnace slag cement concrete (BC concrete, hereafter) against thermal cracking. A key parameter focused is thermal expansion coefficient (TEC) which is supposed to govern development of restrained thermal stress. Higher TEC causes more restrained thermal stress, and significantly lowering TEC was found to be achieved by increasing amount of trace additives like gypsum and calcium carbonate. Furthermore, chemical analysis of hydration products in BC concrete led to finding optimum composition in binder of BC concrete to restrict transformation of Monosulfate from Ettringite, a source of extending autogenous shrinkage and resulted increasing TEC value. Finally modeling time-dependent change of TEC as formula enables us to precisely predict restrained thermal stress in mass elements involving BC concrete for the first time.

研究分野：建築構造材料

キーワード：高炉スラグ マスコンクリート 温度ひび割れ 熱膨張係数 自己収縮

1. 研究開始当初の背景

高炉セメントなど混合セメントの利用拡大は、京都議定書目標達成のため喫緊の課題で、商的流通が既に整備されている高炉セメントを建設工事へ適用拡大することが課題克服に重要である。適用拡大へ向け、高炉セメントコンクリートの特性を活かした利用方法の推進が有効で、クリンカー量を30%程度と大幅に抑制することでCO2排出量を60%削減するなど環境性能に優れることに加え、温度ひび割れ抵抗性に特長がある高炉セメントC種が注目される。しかし、高炉セメントC種にはJIS規格が既に存在するにも関わらず、これを用いたBCコンクリートの実用化はほとんど進んでいない。この阻害要因のうち重要なものとして、温度ひび割れ抵抗性の定量化と温度ひび割れ制御設計方法が確立されていないことがあり、本提案によりこれらが解決されれば、混合セメント利用促進に大きく寄与し、工事における環境負荷の低減貢献への期待が大きい。

本提案に関連し注目される重要研究成果は2つに大別される。第一は、高炉セメントB種コンクリート(BBコンクリート)の温度ひび割れに関する成果で、従来温度ひび割れ対策として用いられてきたBBコンクリートの温度ひび割れ抵抗性が実際にはポルトランドセメントよりも劣る傾向が強いことを受け、要因や対策についての研究が近年活発に行われてきた。その結果、高炉セメントの粒径が強度確保のため以前に比べ小さく(高ブレン化)、水和熱温度上昇や自己収縮の増大を招いていることが明らかになった。第二は、高炉セメントを構成するカルシウムアルミネート鉱物(C3A)と石こうの水和に関する知見で、この水和によりエトリングイトが生成され、膨張ひずみによる温度ひび割れ抵抗性の向上効果が潜在的に期待できる。しかし、多くの場合には石こうが消費され不足する状態になるとエトリングイトからモルサルフェートへの変成が起こり、強い体積収縮を生じることで、ひび割れを助長すると考えられる。一方、この変成は、石こうと炭酸カルシウムの添加量を適切に選定することで抑制できる可能性が示唆されているが、定量的にこのことを明らかにした研究例はほとんどない。

2. 研究の目的

本研究では、高炉スラグを高含有したBCコンクリートのマス部材を対象に、高い環境性能に加え耐久性に富むRC躯体を実現すべく、物理的視点に加え化学的アプローチに基づき最適化を可能とする温度ひび割れ制御手法の構築を目的とする。同コンクリートは高い温度ひび割れ抵抗性を潜在的に有するが、実用例が限られており、特に若材齢時において温度ひび割れ挙動に不明な点が多く、国内外の研究成果の蓄積は前記目的を達成する水準から遠い。本研究の目標は、i) 温度ひび割れ抵抗機構の定量評価と構成則の提案、ii)

初期水和機構の解明と温度ひび割れ抵抗性向上に資する材料構成の最適化、iii) 温度ひび割れ制御設計法の構築とその妥当性の検証で、これらを国内外に先駆け達成することで高炉セメントの利用拡大を図り、建設工事の環境負荷低減へ効果的に貢献することが期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、BCコンクリートのマス部材を対象に次の3項目について検討する。

①温度ひび割れ抵抗機構の定量評価と構成則の提案: 図1に示す温度応力拘束試験装置(TSTM)の活用により温度・時間依存挙動を実験的に再現し、温度ひび割れ抵抗メカニズムを明らかとするに加え、新しいひび割れ解析手法を提案すべく、特に見掛けの熱膨張係数に着目して構成則を構築する。

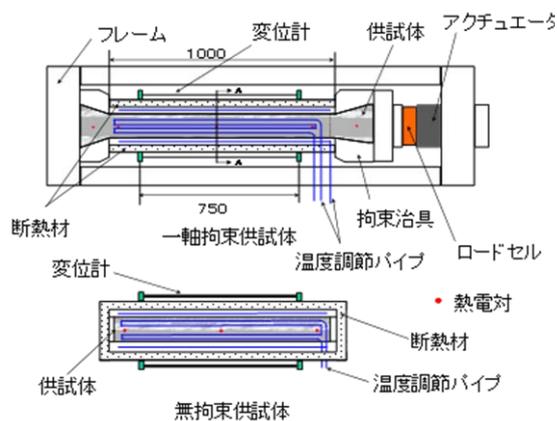


図1 温度応力拘束試験装置(TSTM)

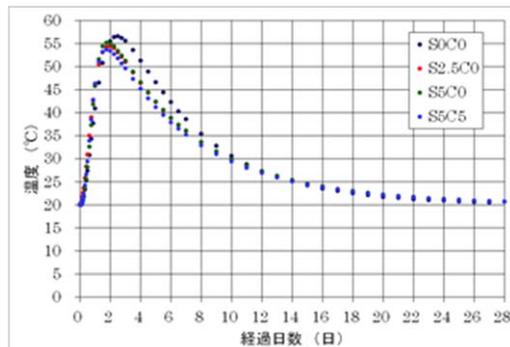


図2 TSTMによるコンクリート温度履歴

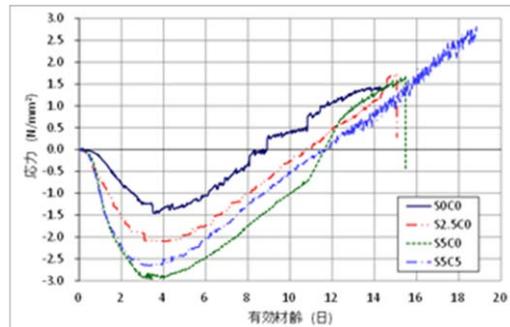


図3 TSTMによるコンクリートの拘束温度応力の履歴

②初期水和機構の解明と温度ひび割れ抵抗性向上に資する材料構成の最適化： 鈹物構成、温度、材齢がC3Aの水和反応物生成に及ぼす影響を解明し、ひび割れ抵抗性に優れた最適セメント材料構成を見出す。

③温度ひび割れ制御設計法の構築とその妥当性検証： 1), 2)の知見を設計システムとして3次元FEMプログラムに統合する。

#### 4. 研究成果

①温度ひび割れ抵抗機構の定量評価と構成則の提案

図1のTSTMを用い、少量混合材である石こう量と炭酸カルシウム量を変化させ、外部拘束を受けるマス部材を模擬した実験を行い、温度ひび割れ抵抗機構について検討した。石こう添加率を結合材質量の0, 2.5, 5%に変化させ(図2中のSに続く数字に相当)、さらには炭酸カルシウムを同じく0, 2.5, 5%に変化させ(図2中のCに続く数字に相当)、水結合材比W/B42%,高炉スラグ微粉末(石こうと炭酸カルシウムを含む)の使用率70%の割合を用い、完全拘束の条件にて実験を実施した。

その結果、図2に示す温度履歴を経験したコンクリート試験体は、図3に示す拘束温度応力を受けることが明らかとなった。SOC0とS5C5の比較から、拘束温度の応力履歴に及ぼすこれら少量混合材の影響は大きく、石こうと炭酸カルシウムの添加率をそれぞれ5%としたときに、温度応力が低減してひび割れ材齢が伸長し、温度ひび割れ抵抗性の向上が期待できることが明らかとなった。

BCコンクリートの温度ひび割れ抵抗性を支配する鍵となる物性のひとつは熱膨張係数であることが分かっており、その時間依存挙動に及ぼす少量混合材の影響について実験的に検討した。断熱容器中にてコンクリート供試体を初期養生する簡易断熱養生試験(図4)を実施し温度とひずみの履歴を測定した。図4の曲線の勾配が熱膨張係数を表し、温度上昇とひずみの関係に及ぼす石こう添加率の影響は大きく、同添加率を変数とするモデル化が重要であることが明らかとなった。

この結果を受け、図5に示す温度-ひずみ関係に基づく熱膨張係数の数式モデルを提案し、これを構成則として3次元FEM解析コードに組み込むことで、BCコンクリートマス部材の温度ひび割れ解析が可能となった。

②初期水和機構の解明と温度ひび割れ抵抗性向上に資する材料構成の最適化

少量混合材の添加率により、熱膨張係数の時系列変化が大きな影響を受けることについて述べた。この原因として、水和物の構成が少量混合材の添加率により異なることが挙げられる。アルミネート相が支配的な高炉スラグ微粉末では、ポルトランドセメントとの水和により、エトリンガイトが生成する。このエトリンガイトは、石こうが枯渇するとモノサルフェートに転位し、顕著な体積収縮

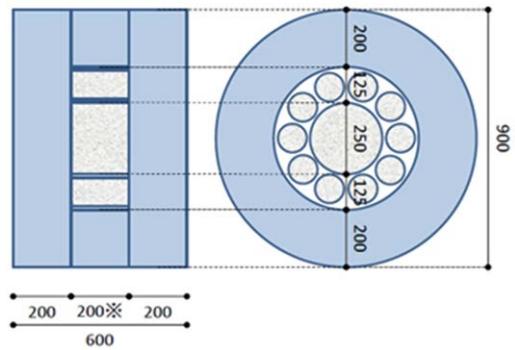


図4 簡易断熱養生試験

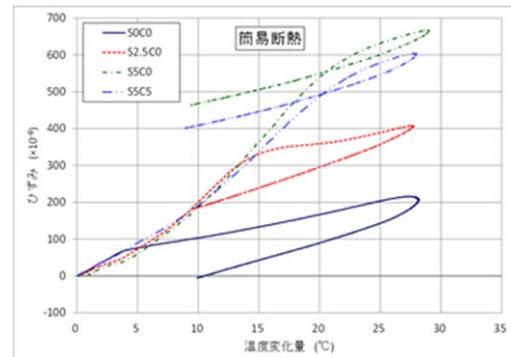


図5 簡易断熱試験の温度とひずみの履歴

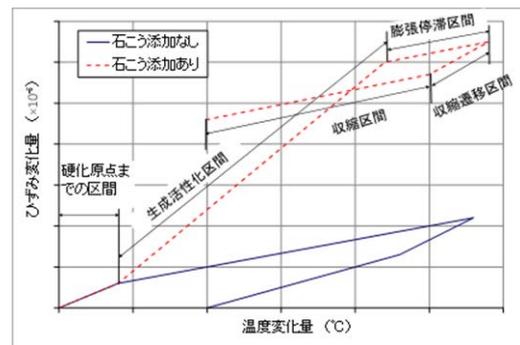


図6 熱膨張係数のモデル化

表1 少量混合材の水和生成物への影響

No	少量成分の割合(%)		水和生成物量 (%)						
	SO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CH	AR	Afm	Hc	Mc	HG	CC
1	0.0	0.0	2.4	-	3.6	-	-	4.4	-
2	2.5	0.0	1.7	2.3	8.1	-	-	0.5	-
3	5.0	0.0	1.9	14.9	1.6	-	-	0.4	-
4	3.5	3.5	2.1	8.5	4.0	3.9	3.0	0.7	3.0
5	3.5	2.5	1.8	8.7	4.3	3.1	2.9	0.5	2.0
6	3.5	0.0	1.9	7.6	6.2	-	-	0.3	0.4
7	5.0	5.0	2.1	15.6	1.0	-	-	0.5	5.2

注: CH:水酸化カルシウム, AfT:エトリンガイト, Afm:モノサルフェート, Hc:ヘミカーボネート, Mc:モノカーボネート, HG:ハイドロカーボネート, HT:ハイドロタルサイト, CC:カルサイト(炭酸カルシウム)

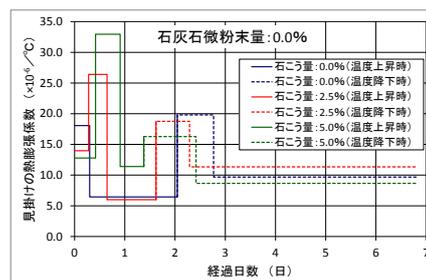


図7 熱膨張係数履歴に及ぼす少量混合材

を生じることが知られている。温度応力の増大をもたらす熱膨張係数の増加は、このモノサルフェートへの転移に起因する自己収縮に強い影響を受けると推察される。

これを受け、本研究では少量混合材の添加率が及ぼす水和物生成への影響を明らかにすべく、異なる添加率によるセメントペーストを60℃の高温で養生し、その時の水和生成物について調べた。その結果を表1に示す。また、前述の簡易断熱養生試験の結果から熱膨張係数履歴に及ぼす少量混合材の影響をまとめたのが図7である。図7で、温度上昇時には熱膨張係数が大きく、温度下降時には小さい場合には温度応力が抑制され、温度ひび割れ抑制の観点から有利であるが、石こう添加率が大きいほどこのような挙動となる傾向がある。表1では、石こう添加率が大きいほどモノサルフェートよりエトリングイトがより支配的となっており、温度ひび割れ抑制の観点から優位となる図7の熱膨張係数の傾向をもたらしていると推察される。

③温度ひび割れ制御設計法の構築とその妥当性検証

前記の熱膨張係数モデルを用い、図8のマス部材について温度および拘束温度応力の解析を新たに構築した3次元FEMにより実施した。少量混合材の添加率が異なる各ケースの温度履歴を図9に、応力履歴を図10に示す。図9から、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの場合最高温度が68.5℃、高炉セメントB種を用いたコンクリートで68.7℃であったのに対して、BCコンクリートは少量混合材の添加率に大きな影響を受けず53~56℃程度であり、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート及びBBコンクリートよりも12℃~15℃最高温度が低い結果となった。

応力履歴に関しては、図10に示すようにSOC0およびS2.5C0のBCコンクリートは最大圧縮応力が普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート及びBBコンクリートに比べて小さく、最大引張応力はBBコンクリートよりも小さいものの、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートとほぼ同等な値となった。一方、S5C0およびS5C5の場合最大圧縮応力が普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの場合とほぼ同様な値を示し、最大引張応力が2.4N/mm<sup>2</sup>で普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの最大引張応力の60%程度となった。拘束温度応力の発現は、少量混合材の添加量に大きな影響を受け、石こう添加率を5%とすることで、BCコンクリートは普通コンクリートに比べ温度ひび割れ抵抗性の顕著な向上が見込まれることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

1) J. Arai, K. Ishizeki, T. Kanda, M. Kojima,

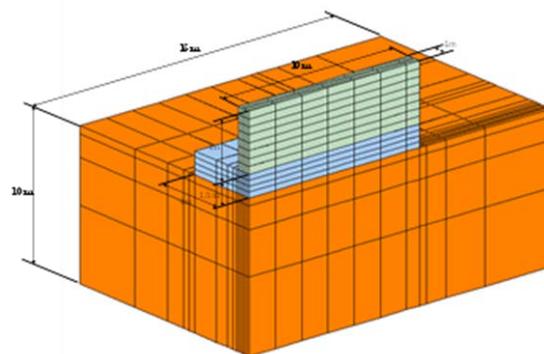


図8 温度、拘束温度応力解析の対象モデル

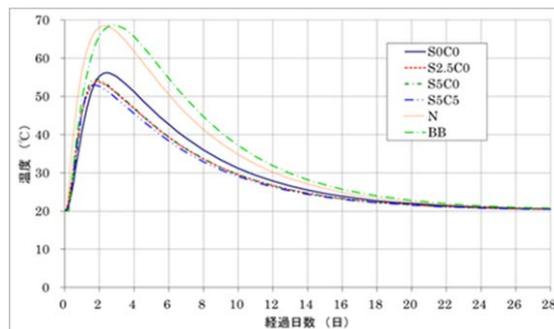


図9 温度履歴の解析結果

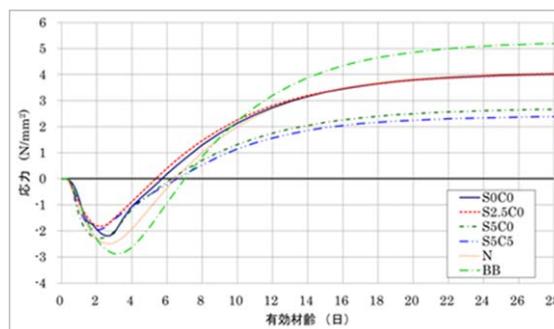


図10 拘束温度応力の解析結果

and T. Mizobuchi: Study on Resistant for Cracking Caused by Shrinkage with Volume Change of Concrete with High Volume Blast Furnace Slag Cement, Proc. of 4<sup>th</sup> International Conference in Sustainable Construction Materials and Technologies, 2016

2) K. Ishizeki, T. Kanda, K. Yoda, M. Kojima, and T. Mizobuchi: Experimental Study of Structural Concrete Strength in Massive Concrete Elements Made of New High-Volume BFS Cement, Proc. of 4<sup>th</sup> International Conference in Sustainable Construction Materials and Technologies, 2016

3) T. Kanda, H. Momose, K. Imamoto et al.: Quantitative Evaluation of Crack Resistance Mechanism of Blast Furnace Slag Blended Cement Concrete via Restrained Shrinkage Stress Analysis, J. of Advanced Concrete Technology, vol. 13, 421-437, 2015

- 4) T. Kanda, H. Momose, K. Imamoto et al.: Impacts of trace additives and early-stage curing conditions on the shrinkage cracking resistance of blast-furnace slag cement concrete, vol. 14, 474-487, 2016
- 5) 依田和久, 全振煥, 閑田徹志, 百瀬晴基, 田中秀樹: 高炉スラグ高含有結合材を用いたコンクリートの圧縮強度特性, 日本建築学会技術報告集, vol. 23, pp. 363-368, 2017
- 6) 石関浩輔, 閑田徹志, 全振煥, 溝渕利明: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートのクリープ係数予測式の一提案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 39, pp. 1327-1332, 2017
- 7) 溝渕利明, 石関浩輔, 佐川孝広, 閑田徹志: 高炉スラグ高含有セメントに含まれる少量混合材がマス養生下でのコンクリートの熱特性に与える影響に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 39, pp. 1327-1333, 2017
- 8) 佐川孝広, 門間永悟: 高炉スラグ高含有セメントの水和反応と空隙構造特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 40, 2018(in Print)
- 9) D. Qiao, A. Ogawa, M. Kojima, D. Tsuji: Apparent Coefficient of Thermal Expansion for Evaluating Volume Change of Early-age Concrete, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 40, 2018(in Print)
- 10) 閑田徹志, 百瀬晴基, 石関浩輔, 佐川孝広: 高炉スラグセメントコンクリートの収縮特性に水和生成物が及ぼす影響に関する実験検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 40, 2018(in Print)
- 11) T. Kanda, H. Momose, K. Ishizeki and T. Sagawa: Experimental Study for Effects of Hydrate Products on Shrinkage Behavior in Low Volume Blast Furnace Slag Cement Concrete, The 14th International Conference on Concrete Engineering and Technology, 2018 (in Print)
- 12) T. Mizobuchi K. Ishizeki, T. Sagawa and T. Kanda: Study on the Influence of Minor Constituents in Blast Furnace Slag Rich Cement on the Thermal and Mechanical Properties of Concrete, J. of Advanced Concrete Technology, 2018 (Accepted)

〔学会発表〕(計8件)

- 1) 石関浩輔: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートのクリープ特性に関する基礎検討, 日本建築学会大会, 2016
- 2) 依田和久, 高炉スラグ含有セメントを用いたコンクリートの夏期の構造体強度補正值, 日本建築学会大会, 2016
- 3) 小島正朗: 高炉スラグ微粉末・高炉セメントを用いたコンクリートの特性に関する実験(その5) 結合材の種類が及ぼす影響, 日本建築学会大会, 2016
- 4) 閑田徹志: 高炉スラグ微粉末・高炉セメ

ントを用いたコンクリートの特性に関する実験(その6) 構造体コンクリート中のひずみ特性, 日本建築学会大会, 2016

5) 依田和久: 高炉スラグ含有セメントを用いた高強度コンクリート(Fc36N/mm<sup>2</sup>)の水セメント比の一検討, 日本建築学会大会, 2017

6) 小島正朗: 高炉スラグ高含有コンクリートの特性に及ぼす高温履歴と湿分供給の影響に関する研究その1: 室内実験, 日本建築学会大会, 2017

7) 佐川孝広: 高温履歴下での水和反応に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響, セメント技術大会, 2017

8) D. Qiao: Variations of internal strain and relative humidity of concrete member made with slag cement, 日本建築学会大会, 2018

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

閑田 徹志 (KANDA TETSUSHI)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・主席研究員

研究者番号: 40416780

(2) 研究分担者

溝渕 利明 (MIZOBUCHI TOSHIAKI)

法政大学デザイン工学部・教授

研究者番号: 60339504

濱 幸雄 (HAMA YUKIO)

室蘭工業大学・工学(系)研究科・教授

研究者番号: 70238054

小島 正朗 (KOJIMA MASARO)

株式会社竹中工務店 技術研究所・その他部局等・その他

研究者番号: 80507244

佐川 孝広 (SAGAWA TAKAHIRO)

前橋工科大学・工学部・准教授

研究者番号: 90621045

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし