高炉セメント B 種にフライアッシュと膨張材を混和した高強度コンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討

BASIC STUDY ON THERMAL CRACK RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE USING BLAST FURNACE SLAG CEMENT TYPE B MIXED WITH FLY ASH AND EXPANSIVE ADDITIVE

石川伸介 — * 1 鈴木好幸 — * 2
杉山 央 — * 3

Shinsuke ISHIKAWA — * 1 Yoshiyuki SUZUKI — * 2
Hisashi SUGIYAMA — * 3

キーワード：

高炉セメント, フライアッシュ, 膨張材, 断熱温度上昇, 線膨張係数

Keywords:

Blast-furnace slag cement, Fly ash, Expansive additive, Adiabatic temperature rise, Thermal expansion coefficient

In the present study, the fundamental property related to thermal crack resistances of a high-strength concrete (BBFA) using blast furnace cement type B mixed with fly ash and heat control type expansive additive was experimentally examined. And the following results were obtained. The adiabatic temperature rise (K) of BBFA is same as or smaller than that of a low heat Portland cement concrete, and there is a possibility of remarkable restraint effects of adiabatic ascents. It is expected that excellent thermal crack resistances were obtained from restraint effects of heating values and autogenous shrinkages by heat control type expansive additive.

1. はじめに

近年, 低炭素型社会の構築に向けた様々な取組みが地球規模で進められており, 建設分野においても低炭素化に寄与する取組みがより一層求められている。筆者らは, 耐久性を確保しながら, 特殊な材料を使用せずに製造できる低炭素型コンクリートの実現を目指して, 高炉セメント B 種 (以下, BB) にフライアッシュ (以下, FA) を混合した 3 成分系コンクリートの検討を進めてきた。BB に FA を混合するような 3 成分系のコンクリートとすることで, 普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べ約 45% の低炭素化が図れるとともに, BB 単体のコンクリートと同程度の力学性能を保持したまま, 温度ひび割れ, 乾燥収縮ひび割れのリスクを低減できることが報告されている^{例え 1), 2)}。また, 水結合材比が低く, 組織が緻密な高強度領域に適用することで中性化抵抗性を確保できることを報告している³⁾。一方で, BB をベースとすることでセメントペーストの線膨張係数が大きくなることに起因して, 実部材レベルの高温履歴を受けた場合に, 温度降下に伴う収縮過程において粗骨材との線膨張係数の差異に伴う粗骨材界面の剥離が生じる可能性があり, 粗骨材との組み合わせによっては構造体強度補正值 (以下, S 値) が大きくなる懸念があることを報告している⁴⁾。さらに, その S 値の低減には膨張材が有効との報告もある⁵⁾。

そこで本報告では, マスコンクリートに高強度コンクリートが適用されるケースが増えてきていることから, BB に FA を混合した高強度コンクリートに, 水和熱の抑制および温度降下時の収縮を低減可能な水和熱抑制型膨張材⁶⁾を使用した高強度コンクリート (以下, BBFA) の断熱温度上昇特性を検討した。さらに, マスコンクリート

表 1 実験の要因と水準

項目	要因	水準
断熱温度上昇特性の検討	コンクリートの製造	室内練り
	水結合材比	45%, 30%, 22%
	打込み温度	10℃, 20℃, 30℃
マスコンクリート部材の発熱特性, 収縮挙動の検討	コンクリートの製造	実機練り
	水結合材比	45%, 30%, 22%
	打込み時期	標準期 (2018/5/27)

を想定した模擬部材を作製して, 発熱特性および温度降下時の収縮挙動について検討し, 温度ひび割れ抵抗性についての基礎データを得ることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表 1 に示す。断熱温度上昇特性の検討では, 水結合材比 45%, 30% および 22% の 3 水準, 打込み温度は 10℃, 20℃ および 30℃ の 3 水準とした計 9 種類のコンクリートを, 環境温度の制御可能な室内で製造した。柱模擬部材の発熱特性, 収縮挙動の検討では, 水結合材比 45%, 30% および 22% の 3 種類のコンクリートを, 標準期にレディーミクストコンクリート工場の実機製造設備を使用して製造した。

2.2 コンクリートの使用材料および調査

コンクリートの使用材料を表 2 に, 調査を表 3 に示す。セメントには BB, 混和材には FA (JIS A 6201 の II 種適合品) と水和熱抑制型膨張材を使用した。水和熱抑制型膨張材は, JIS A 6202 に適合す

^{*1} 榎安藤・間技術研究所建築研究部材料グループ グループ長 / 宇都宮大学大学院工学研究科 大学院生 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1)

^{*2} 榎安藤・間技術研究所建築研究部材料グループ 研究員・博士 (工学)

^{*3} 宇都宮大学大学院工学研究科 教授・博士 (工学)

^{*1} Group Leader, Hazama Ando Corporation, Technical Research Institute / Grad. Student, Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ.

^{*2} Researcher, Hazama Ando Corporation, Technical Research Institute, Dr. Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

表 2 使用材料

材料	種類	概要および品質※
セメント (BB)	高炉セメント B 種	JIS R 5211 適合品 密度: 3.04g/cm ³ , 高炉スラグの分量: 40~45%, SO ₃ 量: 1.76%, 比表面積: 3910cm ² /g
細骨材 (S1)	砕砂 1 (石灰砕砂)	福岡県北九州市小倉南区産 表乾密度: 2.69g/cm ³
細骨材 (S2)	砕砂 2 (硬質砂岩砕砂)	茨城県笠間市箱田産 表乾密度: 2.65g/cm ³
粗骨材 (G1)	碎石 2010 (石灰石)	青森県八戸市松館産 表乾密度: 2.71g/cm ³
粗骨材 (G2)	碎石 1505 (石灰石)	青森県八戸市松館産 表乾密度: 2.71g/cm ³
混和材 (FA)	フライアッシュ II 種	JIS A 6201 フライアッシュ II 種適合品 碧南火力発電所産, 密度: 2.28g/cm ³ , 比表面積: 3440cm ² /g, 強熱減量: 2.2%
混和材 (Ex)	水和熱抑制型膨張材	エトリンガイト-石灰複合系 密度: 2.90g/cm ³ , 強熱減量: 2.2%, 強熱減量を除く各種項目は JIS A 6202 による 規定値を満足
混和剤 (SP)	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物標準形 密度: 1.02~1.10g/cm ³

※物性値は各材料試験成績書による

表 3 コンクリートの調合

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									単位結合材量※ (kg/m ³)
		W	BB	FA	Ex	S1	S2	G1	G2	SP	
45	45.6	170	286	72	20	416	410	500	500	2.27	378
30	43.0	170	438	109	20	354	349	472	472	5.10	567
22	37.8	170	602	151	20	274	270	455	455	9.28	773

※単位結合材量 P: BB+FA+Ex

る膨張材に、水和熱抑制剤を添加して製造されるため、水和熱抑制剤の影響で強熱減量が JIS A 6202 の規格値を満足しない特殊品扱いとなる⁶⁾。また、添加される水和熱抑制剤は、膨張材製造者によって性質が異なる可能性がある。このため、本研究とは異なる製造者による水和熱抑制型膨張材を用いる場合には、その性能について別途検証する必要がある。

単位 FA 量は、単位 BB 量と単位 FA 量の総和の 20% (質量比) とした。膨張材の単位量は、全ての水結合材比において一律 20kg/m³ とした。フレッシュコンクリートの目標性能は、水結合材比 45% でスランプ 21cm, 水結合材比 30% および 22% で、それぞれスランプフロー 60cm, 65cm とした。また、空気量は、いずれの水結合材比でも 2.0% とした。

2.3 試験項目

試験項目を表 4 に示す。断熱温度上昇量の測定は、空気循環式の断熱温度上昇量測定装置を使用して、コンクリートの打込み温度の目標を 10℃, 20℃ および 30℃ とし、室内練りで製造したコンクリートを試験用容器 (φ400×400mm) に打ち込み、温度上昇が認められなくなるまで実施した。

柱模擬部材の発熱特性、収縮挙動の検討では、実機練りで製造したコンクリートを用いて図 1 および写真 1 の柱模擬部材 (1000×1000×1000mm) を製作し、温度とひずみを測定した。柱模擬部材の内部

表 4 試験項目

試験項目			試験方法
室内練り (断熱温度上昇特性の検討)	フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101
		スランプフロー	JIS A 1150
		空気量	JIS A 1128
		コンクリート温度	JIS A 1156
	断熱温度上昇		空気循環式
実機練り (マスコンクリート部材の発熱特性、収縮挙動の検討)	フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101
		スランプフロー	JIS A 1150
		空気量	JIS A 1128
		コンクリート温度	JIS A 1156
	発熱特性、収縮挙動		柱模擬部材内部に設置したひずみ計 (測温機能付き) による
	圧縮強度		JIS A 1108

図 1 柱模擬部材の概要

写真 1 柱模擬部材の型枠、無応力容器、ひずみ計設置状況

には、無応力容器中に設置したひずみ計 (測温機能付き) を図 1 で示す位置に埋設し、コンクリート打込み直後から計測を行った。

フレッシュコンクリートの測定および圧縮強度用供試体の作製は、室内練りでは練上がり直後、実機練りでは柱模擬部材の打込み直前にそれぞれ実施した。圧縮強度用供試体は、JIS A 1132 に準拠して作製した標準養生による供試体に加えて、S 値の算定のため、実機練りにおいて JASS5 T-605 に基づきコア供試体を作製した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート試験および圧縮強度試験

コンクリートのフレッシュ試験結果および圧縮強度試験結果を、表 5 に示す。フレッシュ性状は、いずれの試験ケースにおいても W/P=45% でスランプ 21±2cm, W/P=30% および 22% でそれぞれスラン

表5 フレッシュ試験結果および圧縮強度試験結果

試験体		フレッシュ試験結果			圧縮強度 (N/mm ²)	
		スランプ 【スランプ フロー】 (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	標準養生 材齢 28 日	柱模擬部 材コア 材齢 91 日
室内練り 10℃	W/P=45%	21.0	1.6	8	50.6	—
	W/P=30%	【64.7】	1.3	9	84.0	
	W/P=22%	【70.9】	1.7	11	109	
室内練り 20℃	W/P=45%	22.5	2.5	20	47.9	
	W/P=30%	【68.5】	1.1	21	80.0	
	W/P=22%	【74.5】	1.3	22	103	
室内練り 30℃	W/P=45%	22.5	2.5	31	48.9	
	W/P=30%	【68.7】	1.5	31	79.8	
	W/P=22%	【67.5】	1.4	32	110	
実機練り	W/P=45%	21.5	1.8	27	50.3	54.5
	W/P=30%	【64.0】	2.2	28	82.1	77.9
	W/P=22%	【67.0】	2.7	29	97.0	85.4

図2 標準養生強度と P/W の関係

図3 S 値と P/W の関係

プフロー60±10cm, 65±10cmの目標範囲内であり、全ての調合で空気量は2.0±1.5%の目標範囲内であった。

標準養生強度と P/W の関係を図2に示す。いずれの試験ケースにおいても、一般的なコンクリートと同様に、P/W と標準養生強度には線形関係が認められるが、実機練りの W/P=22%の値が小さく、P/W が大きいほど勾配が緩やかになる傾向が認められる。この原因は定かではないが、空気量が2.7%であり、室内練の W/P=22%のケースと比べて大きいことも影響しているものと推測される。

図3に、S 値と P/W の関係を示す。なお、S 値は、実機練りで採取した標準養生供試体の材齢28日強度と柱模擬試験体から採取したコア供試体の材齢91日強度の差から算出した。標準期のみでの結果ではあるが、P/W と S 値には線形関係が認められ、W/P=22%における S

値は11.6N/mm²であった。BB と FA を使用した高強度コンクリートの S 値に及ぼす粗骨材種類の影響を検討した文献7)において、BB と FA を結合材とし、粗骨材に石灰碎石を用いた場合には S 値が大きくなるが示されており、W/P=24%の水準において標準期で14N/mm²程度の結果となっている。本研究では、W/P=22%の水準で比較しても文献7)の S 値よりも小さくなっており、水和熱抑制型膨張材を使用した影響により柱模擬試験体のコア強度の増進効果が表れたものと推察できる。これは文献5)の傾向とも一致しており、BB と FA を結合材とし、粗骨材に石灰碎石を用いた場合における高強度コンクリートの構造体強度を増進させる観点からも、水和熱抑制型膨張材が有効であると考えられる。

3.2 断熱温度上昇量および温度上昇速度

断熱温度上昇試験結果を図4に示す。なお、図4には、式1および式2でそれぞれ回帰した予測値1および予測値2の曲線を併せて示す。

$$Q(t) = K(1 - \exp(-\alpha t)) \quad \dots \text{式1}$$

$$Q(t) = K(1 - \exp(-\alpha t^\beta)) \quad \dots \text{式2}$$

ここに、t : 材齢(日)

Q(t) : 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (℃)

K : 終局断熱温度上昇量 (℃)

α : 温度上昇速度の定数

β : 定数

いずれの打込み温度においても、今回使用したコンクリートは、打込み直後から急激に温度が上昇するのではなく、ある程度の潜伏期間を経た後に温度上昇を開始した。そのため、式1で回帰した予

図4 断熱温度上昇曲線

測値 1 では、材齢初期の発熱速度をうまく予測できていないことがわかる。一方で、式 2 で回帰した予測値 2 では、温度上昇開始前の潜伏期間を表現できており、実測値と一定の精度で一致することが確認できた。

図 5 に単位結合材量と終局断熱温度上昇量 (K)、図 6 に単位結合材量と温度上昇速度の定数 (α) の関係を示す。図 5、図 6 では今回使用したコンクリートを BBFA として打込み温度ごとに示し、さらに一般的なセメントとの比較のため、文献 8) で示される打込み温度 20℃の各セメント (N: 普通, M: 中庸熱, L: 低熱) の終局断熱温度上昇量 (K) および温度上昇速度の定数 (α) の推定値を示している。N および BB の推定値は式 1 で、M, L および BBFA は式 2 で回帰して導出された値を示している。図 5 から BBFA の終局断熱温度上

図 5 終局断熱温度上昇量 (K)

図 6 温度上昇速度の定数 (α)

昇量 (K) は、L と同等もしくは打込み温度によっては小さいことが確認できた。単位結合材量との関係をみると 567kg/m³ 以上で打込み温度 10℃および 20℃では、終局断熱温度上昇量 (K) の上昇量が緩やかになる傾向が確認され、高強度領域では温度上昇抑制効果がより顕著になる可能性が示唆された。図 6 から BBFA の温度上昇速度の定数 (α) は打込み温度が高くなるに伴い大きくなる傾向が確認された。また、単位結合材量との関係をみると 567kg/m³ 以上で打込み温度 20℃および 30℃では、温度上昇速度の定数 (α) の上昇勾配が急になる傾向が確認されたが、打込み温度 10℃ではその傾向がみられなかった。

これは、打込み温度が高くなるほど水和速度が速くなるためと考えられ、さらにその傾向が BB でより顕著になることが影響している可能性が考えられる。

以上より、BBFA は終局断熱温度上昇量 (K) が L と同等以上の優れた温度上昇抑制効果が得られる一方で、温度上昇速度の定数 (α) については、特に高強度領域で打込み温度が高い場合では急激に大きくなる傾向を考慮した温度応力解析を実施して温度ひび割れ抵抗性を評価する必要がある。

3.3 断熱温度上昇特性に係る係数の推定

前述の断熱温度上昇試験結果を基に、BBFA の断熱温度上昇特性に係る係数である終局断熱温度上昇量 (K) および温度上昇速度の定数 (α) の推定式について検討する。各係数の推定に用いた式は、単位結合材量およびコンクリートの打込み温度を変数とした下記の式 3、式 4 を用いた。

$$K=aP+bCT+c \quad \dots \text{式 3}$$

$$\alpha=gP+hCT+i \quad \dots \text{式 4}$$

ここに、P: 単位結合材量 (kg/m³)

CT: コンクリートの打込み温度 (℃)

a, b, c, g, h, i: 係数

K, α を求めるための各係数 (a, b, c, g, h, i) の値は実験値をもとに最小二乗法により算出した。さらに、前節で示した結果から、K に関しては単位結合材量が 773kg/m³ の場合に、378, 567kg/m³ とは異なる傾向を示したことから、α に関しては、打込み温度 10℃の場合に、20℃, 30℃と異なる挙動を示したことから、それらのケースを除外した点における関係を併せて表 6 に整理した。さらに、図 7 および図 8 に断熱温度上昇試験結果に基づく実測値と、式 3 および式 4 を

表 6 K, α を求める係数および決定係数

採用実験値	(式 3) $K=aP+bCT+c$				(式 4) $\alpha=gP+hCT+i$			
	a	b	c	決定係数 R^2	g	h	i	決定係数 R^2
【全条件 n=9】 打込み温度: 10, 20, 30℃ 単位結合材量: 378, 567, 773kg/m³	0.0332	0.203	38.8	0.859	0.0038	0.0630	-2.09	0.864
【単位結合材量 773kg/m³ を除く n=6】 打込み温度: 10, 20, 30℃ 単位結合材量: 378, 567kg/m³	0.0535	0.305	31.8	0.997	0.0030	0.0461	-1.38	0.920
【打込み温度 10℃を除く n=6】 打込み温度: 20, 30℃ 単位結合材量: 378, 567, 773kg/m³	0.0356	0.139	35.7	0.881	0.0049	0.0238	-1.65	0.983

図7 Kの推定値と実測値の関係

図8 αの推定値と実測値の関係

用いた推定値の関係を示しており、そこから得られた決定係数についても表6中にまとめて示す。

全条件から算出した推定値の結果と実測値の関係をみると、K、αともに決定係数が0.86程度であり、ある程度の推定誤差が見込まれる。一方で、単位結合材量が773 kg/m³を除いた条件にて推定値と実測値の関係をみるとKで決定係数0.997となり、高い推定精度が得られることがわかる。また、打込み温度10°Cを除いた条件では、αの決定係数が0.983となり高い精度で推定可能となる。これらの結果から、BBFAの断熱温度上昇特性は、単位結合材量や打込み温度のある条件によってその特性が変わる可能性があり、単位結合材量と打込み温度を変数とした推定式では条件によって誤差が大きくなる懸念がある。このような影響は、BB中の高炉スラグ微粉末の水和発熱特性の温度依存性が高いことに起因すると推察される。しかしながら、特定の条件を除外することで、推定精度が大きく改善されることが確認されたことから、さらにより多くのデータを蓄積することで、単位結合材量や打込み温度の範囲で精度が高い推定が可能になるものと考えられる。

3.4 柱模擬部材の発熱特性、ひずみ挙動

柱模擬部材の温度計測の結果を表7、図9に示す。最高温度は、中心部と端部で7.4～10.7°Cの差がみられたが、材齢初期の温度上昇の遅れなどは、いずれの水結合材比においても計測位置によらず断熱温度上昇試験と同様の傾向を示した。温度上昇量についてもW/P=45%とW/P=30%では中心部で17.2°Cの差があるのに対して、W/P=30%とW/P=22%では8.8°Cの差になっており、単位結合材量と温度上昇量の関係は、断熱温度上昇試験と同様に単位結合材量が一定量を超えると緩やかになる傾向が確認できた。

表7 柱模擬部材の温度計測結果

28日 平均 外気 温 (°C)	測定 位置	W/P=45%			W/P=30%			W/P=22%		
		最高 温度 (°C)	到達 時間 (h:m)	温度 上昇 量 (°C)	最高 温度 (°C)	到達 時間 (h:m)	温度 上昇 量 (°C)	最高 温度 (°C)	到達 時間 (h:m)	温度 上昇 量 (°C)
23.1	中心	56.0	31:50	26.8	73.0	24:10	44.0	83.0	19:50	52.8
	端部	48.6	28:30	20.0	63.9	22:40	34.7	72.3	16:20	42.2

図9 柱模擬部材の温度計測結果

図10に、柱模擬部材のひずみ計測結果を示す。図10で示したひずみは、温度変化に伴う温度ひずみ、膨張材による膨張ひずみおよび自己収縮ひずみが主な影響因子のひずみ挙動である。通常は、温

図 10 柱模擬部材のひずみ計測結果

図 11 見かけの線膨張係数の比較

度上昇量が大きいものが温度変化に伴う初期の膨張ひずみが大きくなるが、今回の測定結果では温度上昇量が最も大きい W/P=22%が W/P=30%, W/P=45%よりも膨張ひずみが小さくなっている。これは、自己収縮の影響であると推察され、水結合材比と拘束膨張ひずみの関係が整理された文献 9) で示される傾向と一致する。また、温度が概ね安定した 7 日以降でも膨張ひずみが残存しているのは、膨張材の影響と判断される。

以上の温度とひずみ計測を用いて、文献 10) で示される方法を参考に、温度応力の発現に大きな影響を与える温度降下時の見かけの線膨張係数を計算した結果を図 11 に示す。同定に際しては、中心位置での温度とひずみの測定結果を使用して、温度とひずみの関係に線形性が強まる最高温度に達してから 24 時間後以降の温度降下域で回帰した。図 11 には、文献 10) で示される BB と M の結果を参考に示す。水結合材比や使用材料などの条件の違いはあるものの、BB や M に比べて BBFA の見かけの線膨張係数が小さい傾向にあることが確認できる。これにより、BBFA では高強度領域であっても温度応力の発現に大きな影響を与える温度降下時の収縮ひずみを抑制されることで、温度ひび割れに対して優れた抵抗性が得られることが示唆される。

4. まとめ

本研究では、高炉セメント B 種 (BB) にフライアッシュと水和熱抑制型膨張材を混和した結合材を使用した高強度コンクリート (BBFA) の温度ひび割れ抵抗性に関する基礎性状について実験的に検討し、次の結論を得た。

(1) BBFA の終局断熱温度上昇量 (K) は、低熱ポルトランドセメン

トを使用したコンクリートと同じ単位結合材量では同等もしくは小さく、高強度領域で温度上昇抑制効果がより顕著になる可能性が示唆された。

(2) 温度上昇速度の係数 (α) については、特に高強度領域で打込み温度が高い場合では急激に大きくなる傾向があることを考慮した温度応力解析を実施して温度ひび割れ抵抗性を評価する必要がある。

(3) 終局断熱温度上昇量 (K) および温度上昇速度の係数 (α) の推定式を示した。本研究の範囲では、ある程度の推定誤差が発生したが、今後データを蓄積し、単位結合材量や打込み温度の影響を詳細に考慮することにより精度の高い推定が可能になると考えられる。

(4) 柱模擬部材では、上記の発熱量の抑制効果に加えて、膨張材による自己収縮の抑制効果に伴って見かけの線膨張係数が小さくなる傾向にあることから、温度下降時の急激な温度変化に伴う温度応力を抑制できるため、優れた温度ひび割れ抵抗性が得られることが期待される。

謝辞

本実験を行うにあたり、住友大阪セメント、日本シーカ、フローリックおよび生コン工場に多大なご協力を賜りました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 齋藤, 堺, 鈴木, 榎原: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの評価方法の一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1853~1857, 2014
- 福井県建設技術公社: フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート (温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート) 配合・製造および施工指針 (案), 産学官共同研究報告書, pp. II-31~37, 2007
- 鈴木, 濱, 石川, 小田部, 宮原: 高炉セメント B 種にフライアッシュを混合した低炭素型高強度コンクリートに関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 17 号, pp. 339~344, 2017
- 宮原, 小田部, 鈴木, 石川: 高温履歴を受けた高炉スラグ混合高強度コンクリートの強度性状, セメント・コンクリート論文集, Vol. 70, No. 1, pp. 488~493, 2016
- 小田部, 宮原: 高炉セメントを使用した高強度コンクリートの S 値改善に関する一考察 (その 1 強度性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 347~348, 2017
- 安藤, 五味, 宇田川, 玉木: 水和抑制型膨張材のマッシュなコンクリートの適用, コンクリート工学年次論文集, Vol. 3, pp. 1~4, 1981
- 鈴木, 石川, 安部, 小田部, 福田: 高炉セメントとフライアッシュを使用した高強度コンクリートの構造体強度補正値に及ぼす粗骨材種類の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 709~710, 2018
- セメント協会: 各種セメントを用いた コンクリートの断熱温度上昇に関する研究, コンクリート専門委員会報告 F-59, 2014
- 松本, 片平, 渡辺: 膨張材によるコンクリートの収縮低減, 土木研究センター土木技術資料, 53-9, pp. 36~39, 2011
- 閑田, 稲葉, 石関, 小島: 高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1720~1725, 2014

[2019 年 6 月 5 日原稿受理 2019 年 7 月 26 日採用決定]