

論文 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの基礎物性に関する実験的検討

加藤 優志*1・渡邊 悟士*2・山本 佳城*2・黒岩 秀介*3

要旨：高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（以下、BC）は環境負荷低減を目的として使用されており、水和熱が小さいことからマスコンクリートへの適用が期待できる。本研究では、BCのマスコンクリートへの適用を目的として、温度応力解析等に必要となるBCの基礎物性について検討した。その結果、BCの断熱温度上昇量は中庸熱ポルトランドセメントを用いた調合よりも小さいことを確認した。また、マスコンクリート適用の際にはBCの自己収縮低減のための手法として、膨張材の添加が有効であると考えられた。

キーワード：高炉スラグ微粉末、膨張材、断熱温度上昇、線膨張係数、無拘束ひずみ、構造体強度補正值

1. はじめに

近年、環境負荷低減を目的として高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの適用が増加している(例えば 1),2)。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは水和熱が普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも小さいため温度ひび割れを抑制できると考えられ、マスコンクリートへの適用が期待される。しかし、日本建築学会のマスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説³⁾(以下、AIJ指針)では高炉セメントB種までの範囲を対象としており、高炉セメントC種相当を使用したコンクリート(以下、BC)のマスコンクリートへの適用を考えた場合、基礎物性に関するデータが十分でない。本報ではBCをマスコンクリートへ適用することを目的として、温度応力解析等に必要となる基礎物性について検討した結果を報告する。

2. 実験計画

本検討では室内試験、模擬部材実験を行った。各試験での検討項目について表-1にまとめる。

2.1 室内試験

(1) 使用材料と調合

使用材料を表-2、高炉スラグ微粉末の物性値を表-3、調合表を表-4に示す。本検討で対象とするBCは材齢初期に高温履歴を受けた時の自己収縮が大きくなることが報告されている^{4,5)}。そのため、本実験ではBCの自己収縮低減のために膨張材を10kg/m³添加し、粉体(結合材+膨張材)に対する高炉スラグ置換率を65%、水結合材比を48%、38%(呼び強度33, 42)とした。また、膨張材の効果を確かめる目的で水結合材比38%では膨張材を使用しない調合、BCとの比較用に中庸熱ポルトランドセメントを用いた調合(以下、MC)を用意した。MCの調合は水結合材比、単位粗骨材かさ容積をBCと同じとし、膨張材の添加は行わなかった。

*1 大成建設(株) 技術センター 研究員 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 構造研究室長 博士(工学) (正会員)

表-1 各試験での検討項目

検討項目	室内試験	模擬部材実験
フレッシュ性状(経時)	—	○
断熱温度上昇量	○	○
線膨張係数	○	—
無拘束ひずみ	○	○
圧縮強度	○	○
静弾性係数	○	—
構造体強度補正值	—	○

表-2 使用材料

記号	材料種類	物性
N	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm ³
M	中庸熱ポルトランドセメント	密度 3.21 g/cm ³
BFS	高炉スラグ微粉末 4000	密度 2.89 g/cm ³
EX	石灰系膨張材(膨張材 20型)	密度 3.16 g/cm ³
SI	石灰砕砂	表乾密度 2.62 g/cm ³
S2	山砂(千葉県産)	表乾密度 2.58 g/cm ³
G	石灰砕石(北海道産)	表乾密度 2.70 g/cm ³
Ad1	高性能 AE 減水剤 遅延形	主成分: ポリカルボン酸 エーテル系化合物
Ad2*	高性能 AE 減水剤 遅延形	

*Ad1より遅延性を高めた混和剤、夏期模擬部材実験時のみ使用

表-3 高炉スラグ微粉末の物性値

品質	比表面積 [cm ² /g]	強熱減量 [%]	MgO [%]	SO ₃ [%]	Cl ⁻ [%]
BFS	4470	0.41	6.12	2.08	0.004

(2) 測定項目

断熱温度上昇試験は、打込み温度 20°Cを目標として、BC38-10のみで実施した。計測には断熱熱量計(型式 ACM-120MD, 容量約 5L, 東京理工社製)を用いた。測定は温度上昇量が終局したと考えられる材齢 14 日まで実施し、試験回数は 1 回とした。

線膨張係数の測定は後述する無拘束ひずみ測定用の供試体を用いて、材齢 28 日時点で測定を行った。測定温度範囲は 20°Cから 60°Cの往復 1 サイクルとして、恒温槽を用いて行った。供試体の中心と表面の温度差が極力生じないように昇温・降温速度は 1°C/hour として、5°C

表-4 調合表

調合名	BFS 置換率 (%)	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	B			EX	S1	S2	G
						N	M	BFS				
BC48-10	65.0	18±2.5	4.5±1.5	48.0	161	111	-	225	10	414	414	972
BC38-10	65.0	21±2.0		38.0	168	148	-	294	10	358	358	
BC38-0	66.5	21±2.0		38.0	168	148	-	294	-	362	362	
MC48	0	18±2.5		48.0	170	-	354	-	-	410	410	
MC38	0	18±2.5		38.0	170	-	447	-	-	372	372	

B : 結合材, BFS置換率[%]=BFS/(B+EX)×100

間隔で一定温度を5時間保持した。供試体の中心温度と槽内温度の差が最も小さいときの供試体のひずみと温度を用いて線膨張係数を算出した。供試体数は各調合1体ずつとした。

無拘束ひずみ測定用供試体は10×10×40cmの鋼製型枠を用いて作製した。型枠により供試体のひずみが拘束されないように型枠面にテフロンシートを貼り付け、中心部には測温機能付きの埋込み型ひずみ計（弾性係数40N/mm²）を設置した。コンクリートの打込み後、打込み面はテフロンシートにて養生を行った。供試体は脱型後、アルミテープによる封かん養生を行い、20°C環境で供試体のひずみを測定した。供試体数は各調合2体とし、うち1体は前述の線膨張係数の測定を行うため材齢28日まで、1体は材齢91日までの測定とした。実験結果は全ての調合で0.30日をひずみの初期値として整理した。

圧縮強度、静弾性係数の測定はJIS A 1108, JIS A 1149に従って行った。試験までの養生は20°C封かん養生、標準養生の2水準とし、それぞれ材齢7, 28日で試験を行った。供試体数は調合、養生方法、材齢ごとに3体ずつとした。

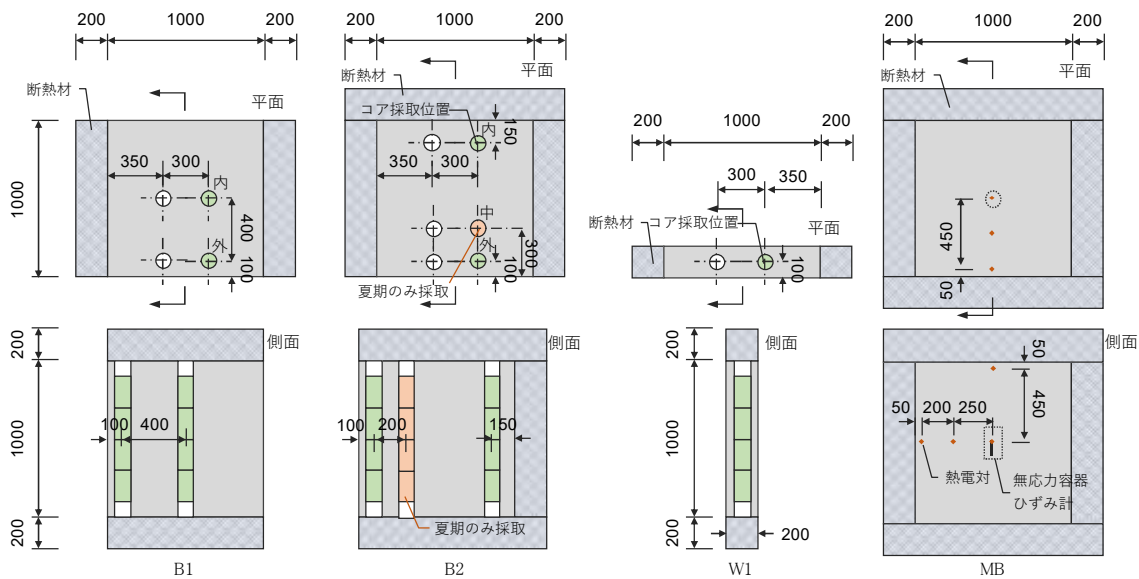
2.2 模擬部材実験

(1) 実験水準

実験水準を表-5に示す。施工時期は冬期と夏期の2水準として、冬期にはBC48-10とBC38-10、夏期には加えてBC38-0を作製した。使用材料および調合は前述した表-2, 表-4と同じである。作製した模擬部材の概要を図-1に示す。模擬部材はマスコンクリートを模擬し厚さ1mの基礎部材を想定した4面断熱のB1, 厚さ2mの基礎部材を想定した5面断熱のB2, 上部躯体（壁等）への利用を想定した厚さ20cmのW1, 6面断熱のMBを作製した。夏期の実験ではB1の作製を行わない代わりに

表-5 模擬部材実験の実験水準

記号	W/B [%]	膨脹材使用量 [kg/m ³]	時期	打設日	作製模擬部材	圧縮強度 (現場封かん養生)	圧縮強度 (標準養生)	圧縮強度 (コア)
BC48-10-W	48	10	冬期	2019/2/5	B1, B2, W1, MB	材齢3, 7, 28日	材齢28日	材齢91日
BC38-10-W	38	10						
BC48-10-S	48	10	夏期	2019/7/30	B2, W1, MB	材齢1, 3, 7, 28, 91日	材齢28日	材齢91日
BC38-10-S	38	10						
BC38-0-S	38	0						



○ 材齢28日でコア採取

図-1 模擬部材概要

に、冬期の模擬部材実験をもとに熱伝導解析を実施し、最高温度が B1 の中心位置と同程度になる B2 の表面から 30cm の位置のコアを採取した。構造体強度補正值には、材齢 28 日における標準養生供試体と材齢 91 日におけるコア供試体の圧縮強度の差である $28S_{91}$ を採用した。

(2) 測定項目

測定項目はフレッシュ性状、温度上昇量、無拘束ひずみ、圧縮強度である。工場出荷時および現場着時にフレッシュ性状試験を行った後に、型枠内にコンクリートを打ち込んだ。打込み後、アジテータ車内に残ったコンクリート（冬期約 1.1m^3 、夏期約 1.4m^3 ）を用いて、製造から 120 分後までフレッシュ性状の経時変化を確認した。6 面断熱の模擬部材 MB の中心部には無応力容器内に測温機能付きのひずみ計を設置し、打込み直後から温度と無拘束ひずみの測定を行った。圧縮強度供試体は荷卸し時に採取し、養生方法は標準養生と現場封かん養生とした。

3. 実験結果

3.1 室内試験

BC38-10 の断熱温度上昇試験結果を図-2 に示す。図中には比較用に AIJ 指針³⁾の計算式によって推定される普通（以下、N）、中庸熱ポルトランドセメント（以下、M）を使用したコンクリートの断熱温度上昇曲線を併記する。比較用の調合は呼び強度を BC38-10 と同じとし、都内生コン工場の標準配合をもとに決定した。（それぞれの単位セメント量 $427\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $443\text{kg}/\text{m}^3$ ）。BC の最終温度上昇量は N、M を使用した同じ呼び強度のコンクリートよりそれぞれ約 10°C 、 5°C 小さくなった。

線膨張係数の算出結果を図-3 に示す。本検討では 20°C から 60°C までの範囲の昇温時、降温時の温度-ひずみ関係をそれぞれ線形近似し、両者の近似直線の傾きを平均することで線膨張係数を算出した。既往の文献⁶⁾では、高炉スラグ微粉末の使用により線膨張係数が約 $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 大きくなる傾向（N： $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、BB： $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）が示されており、本実験でも同様の傾向が確認された。高炉スラグ微粉末の使用により線膨張係数が大きくなった原因については今後の検討課題である。

各調合の無拘束ひずみの測定結果を図-4 に示す。測定結果は全ひずみから、前述した線膨張係数を用いて温度ひずみ分を減じて整理した。BC38-0 と MC38 のひずみを比較すると、材齢 91 日において BC38-0 では約 250×10^{-6} 、MC38 では約 50×10^{-6} と BC は MC と比較して自己収縮が大きいことが確認された。このことは温度応力解析において自己収縮を考慮しない場合、BC の性能を過大評価する可能性があることを示唆している。BC において膨張材を $10\text{kg}/\text{m}^3$ 添加した調合では、初期材齢において $100 \sim 150 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみが確認された。BC38-10 と BC38-

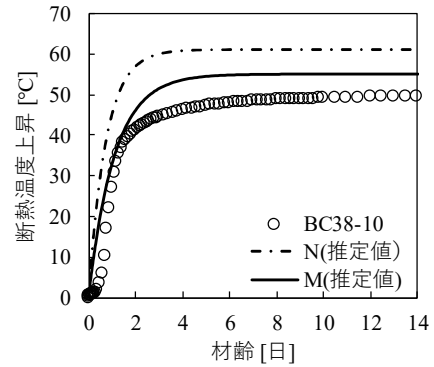


図-2 断熱温度上昇試験結果

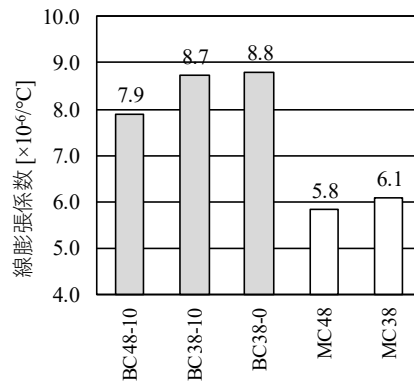


図-3 線膨張係数の比較

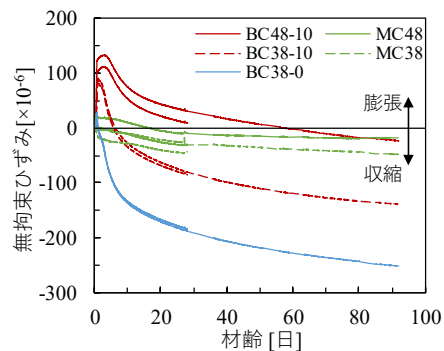


図-4 無拘束ひずみ測定結果

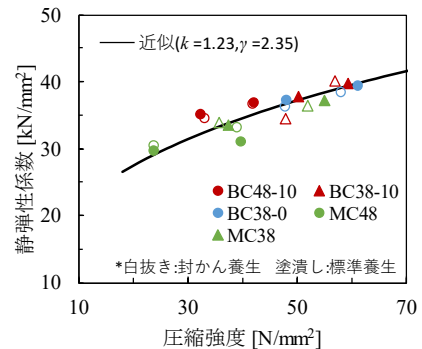


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

0 のひずみを比較すると、91 日材齢での自己収縮は膨張材の添加により約 100×10^{-6} 低減された。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5 に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は BC と MC で明確な差異が確認

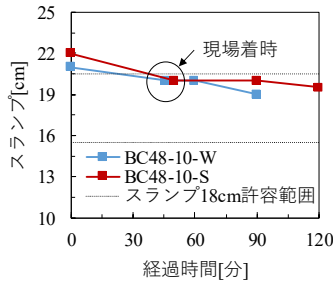


図-6 スラブの経時変化

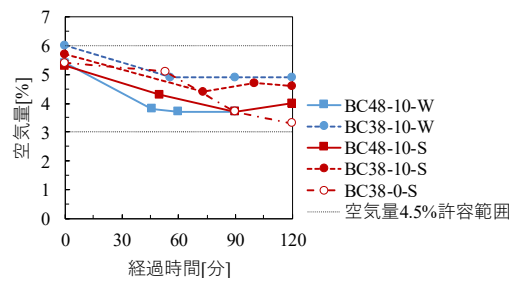
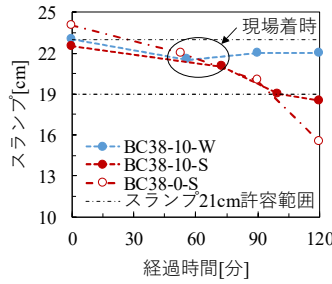


図-7 空気量の経時変化

できず、同一の近似式で評価できると考えられる。各供試体の単位容積質量、圧縮強度、静弾性係数を用いて式(1)で最小二乗法により近似を行うと、本検討では $k=1.23$ の時に精度よく近似できることを確認した。

$$E(t) = 3.35 \times 10 \times k \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{f_c(t)}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここに $E(t)$: 静弾性係数 [kN/mm²] , k : 使用材料による係数[-] , γ : 単位容積質量[t/m³] , $f_c(t)$: 圧縮強度[N/mm²] , t : 材齢[日] である。

3.2 模擬部材実験

(1) フレッシュ性状

スラブ、空気量の測定結果を図-6、図-7に示す。スラブは適切に混和剤を選定(夏期ではAd2を使用)することによって出荷時から90分まで目標性能を満足した。120分ではBC38-0-Sにおいて大きく低下しているが、これはアジテータ車内の積載量が少なく、試験実施時の外気温が高い(現着14:01, 外気温32.4℃)この影響と考えられる。空気量は出荷から徐々に低下していく傾向が見られるが、120分まで目標値を満足した。

(2) 断熱温度上昇式の各係数の算出

本項では温度応力解析に必要なBCの断熱温度上昇式の各係数を算出した。断熱温度上昇式の近似には打込み温度により式中の各係数を変化させる下式⁷⁾を用いた。なお、既往文献における本式の適用範囲は単位結合材量300~500kg/m³の範囲である。

$$Q(t) = K[1 - \exp\{-\alpha(t - t_0)\}] \quad (2)$$

$$K = p(aB + b) \quad (3)$$

$$\alpha = q(gB + h) \quad (4)$$

$$t_0 = r(mB + n) \quad (5)$$

ここに、 $Q(t)$: 断熱温度上昇量[℃] , K : 終局断熱温度上昇量[℃] , α : 断熱温度上昇速度係数[-] , t_0 : 発熱開始材齢 [日] , t : 材齢 [日] , B : 単位結合材量[kg/m³] , p, q, r : 打込み温度による補正係数[-] , a, b, g, h, m, n : 定数である。

BC38-10の打込み温度20℃の時の断熱温度上昇式は図-2の断熱温度上昇試験の結果から式(2)を用いて最小二乗法で近似して求めた。冬期および夏期の実験時の断熱温度上昇式は、比較的断熱状態に最も近いMBの温度履歴を近似して求めた。近似の方法を以下に示す。なお温度解析にはJCMAC 3 ver4.3.3を用いた。

A) コンクリートの各熱物性、断熱材の熱伝達係数は既往文献^{3),6)}を参考に表-6のように仮定し、式(2)を用いて温度解析を実施する。なお、熱伝達係数は事前の試験解析における最高温度到達後の温度降下速度から妥当な値として0.2と設定した。外気温の設定は実測値を2時間間隔で設定した。

B) 式(2)の各係数を実測値に合わせるように変化させる。まず t_0 は温度の実測値が打込みから2℃以上となった時間とした。次に係数 K を0.5℃間隔、 α は0.05間隔で変化させた。

C) B)の計算結果と実測値の決定係数 R^2 を算出する (R^2 の算出区間は材齢7日までの範囲)。 R^2 は0.98を閾値とし、0.98以上となった後はその時の係数 (K, α) を中心値とした大小で係数 (K, α) を変化させ、相対的に R^2 が最大となる係数 (K, α) を算出した。

温度解析結果と実験値の比較を図-8にまとめる。解析結果は実験値を概ねよく近似できており、最高温度到達後の温度降下速度から表-6に示した熱伝導率、比熱、

表-6 温度解析に用いた諸条件

記号	コンクリート				断熱材
	打込み温度 [℃]	熱伝導率 [W/m ² ℃]	比熱 [kJ/kg℃]	密度 [kg/m ³]	熱伝達係数 [W/m ² ℃]
BC48-10-W	12	2.7	1.15	2299	0.2
BC38-10-W	14			2287	
BC48-10-S	32			2293	
BC38-10-S	32			2288	

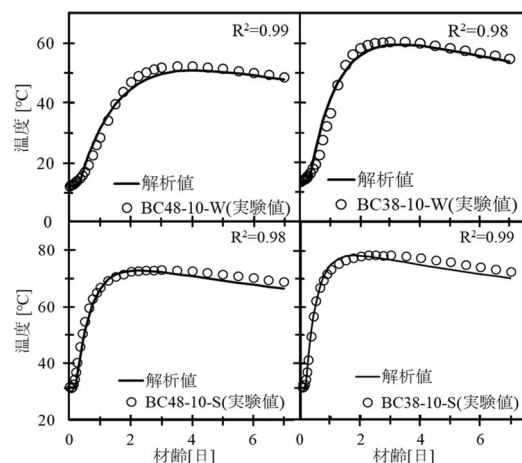


図-8 各模擬部材の温度解析結果

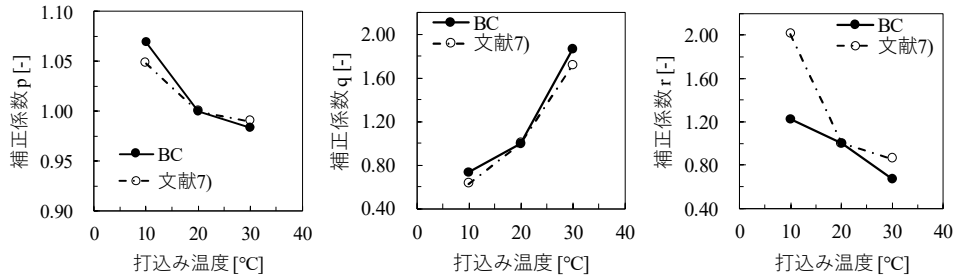


図-9 打込み温度による補正係数の比較

表-7 算出された断熱温度上昇式の各係数

$K=aB+b$		$\alpha=gB+h$		$t_0=mB+n$		打込み温度による補正係数			
a	b	g	H	m	n	打込み温度	10°C	20°C	30°C
0.058	24.4	0.0030	0.007	-0.0002	0.460	p (K の補正係数)	1.069	1.000	0.983
						q (α の補正係数)	0.728	1.000	1.868
						r (t_0 の補正係数)	1.225	1.000	0.676

熱伝達係数の仮定は妥当であると判断した。

得られた BC38-10 の断熱温度上昇式の各係数 (K , α , t_0) と打込み温度の関係は、20°C以下および20°C以上の各範囲で線形と仮定し、打込み温度 10°C (外挿), 30°Cにおける補正係数 (p , q , r) を算出した。算出した打込み温度による補正係数と、既往⁷⁾の高炉セメント C 種相当の補正係数の比較を図-9 に示す。打込み温度 10°Cの補正係数は外挿で算出したが p , q は既往文献とほとんど変わらず、本算出方法に大きな問題はないと考えている。発熱開始材齢 t_0 の補正係数の既往文献との差異の原因としては使用材料の違いによる影響等が考えられる。

AIJ 指針³⁾においても打込み温度による補正係数 (p , q) は単位セメント量に依存しない値として与えられているため、本検討における補正係数 (p , q , r) は単位結合材量に依存しないと仮定した。得られた BC38-10 の補正係数 (p , q , r) をもとに BC48-10 の 20°C時の K , α , t_0 を推定した。推定には図-8 に示す解析結果から得られた BC48-10-W, BC48-10-S の K , α , t_0 を用いた。BC38-10 の補正係数をもとに、BC48-10-W, BC48-10-S のそれぞれから 20°C時の K , α , t_0 を推定し、両者の平均値を BC48-10 の 20°C時の K , α , t_0 とした。BC48-10, BC38-10 の 20°C時の K , α , t_0 の単位結合材量との関係をもとに各定数 (a , b , g , h , m , n) を算出した。算出した各定数を表-7 にまとめる。これにより本検討の範囲である単位結合材量 336~442 kg/m³において、任意の調査における断熱温度上昇式を予測することが可能となった。

(3) 高温履歴を受けた部材の無拘束ひずみ

各調査の MB のひずみ測定結果を図-10 に示す。各調査の無拘束ひずみは MB の温度-ひずみ関係から算出した見かけの線膨張係数を用いて温度ひずみを除去した。

温度ひずみ除去後のひずみに着目すると調査、打込み時期に関わらず膨張材により自己収縮を低減できており、膨張ひずみは図-4 の 20°C環境で測定した場合より大き

くなった。膨張材を添加したコンクリートの膨張ひずみは部材の温度履歴によって変化することが報告されている⁸⁾。そこで本検討では、各部材の最高温度と最大膨張ひずみの関係に着目し整理を行った。なお、ここでの最大膨張ひずみは温度ひずみを除去したひずみの最大値であり、初期の自己収縮の影響を含む見かけの膨張ひずみである。最高温度と最大膨張ひずみの関係を図-11 に示す。図中には図-4 の試験結果を併記する。最高温度と最大膨張ひずみには相関が確認でき、最高温度から最大膨張ひずみを概ね推定できると考えられる。このことが

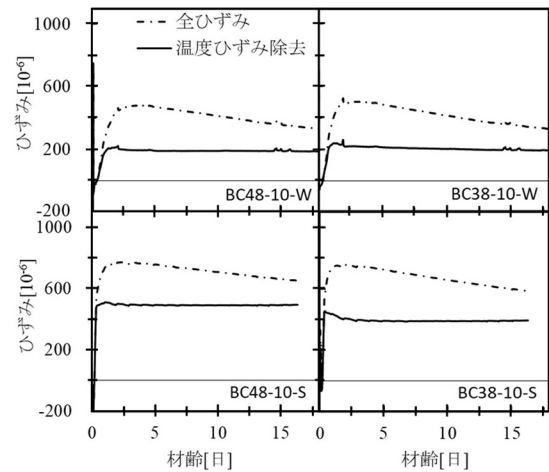


図-10 MB のひずみ測定結果

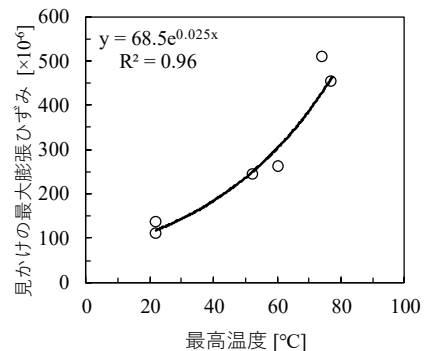


図-11 最高温度と見かけの最大膨張ひずみ

ら、高温履歴を受けるマスコンクリート部材に BC を適用する際に、膨張材を添加することは自己収縮低減のために有効な方法であると考えられる。

(4) 圧縮強度発現、構造体強度補正值

現場封かん養生供試体の圧縮強度発現を図-12 に示す。圧縮強度発現は温度 20°C を基準として、温度の影響を等価な材齢として評価する式(6)の有効材齢で整理した。

$$t_e = \sum_{i=0}^n \Delta t_i \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (6)$$

ここに、 t_e : 有効材齢(日)、 Δt_i : 温度が $T(^{\circ}\text{C})$ の期間(日)、 $T(\Delta t_i)$: 期間 Δt_i の温度($^{\circ}\text{C}$)、 T_0 : 定数 ($=1^{\circ}\text{C}$) である。

なお、供試体の温度履歴は外気温と同一と仮定して整理を行った。傾向として、夏期に採取した供試体では冬期に比べて初期の強度発現は速いが長期の強度発現が停滞しており、今後打込み時期が異なる場合の BC の長期強度発現の予測手法について検討する必要がある。

模擬部材実験より得られた BC の構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$) を図-13 に示す。 $_{28}S_{91}$ は打設時期 (冬期, 夏期)、想定する部材 (基礎 B, 壁 W1)、調合 (3 水準) を組み合わせた計 10 水準とした。基礎の $_{28}S_{91}$ は冬期の水準では B1 と B2 から得られた $_{28}S_{91}$ の最大値を用い、夏期の水準では B2 の内側と外側のコアから得られた $_{28}S_{91}$ と、中間と外側のコアから得られた $_{28}S_{91}$ のうち最大値を用いた。既往の文献⁹⁾ではマスコンクリート以外の一般仕様のコンクリートにおける BC の $_{28}S_{91}$ は材齢 28 日までの平均気温 15°C 以下、暑中期間で 6 N/mm² と示されており、本検討の打込み冬期・夏期の材齢 28 日までの平均気温はそれぞれ、7.9°C、30.1°C であった。本検討では特にマスコンクリートを想定した基礎 B の水結合材比 38% で $_{28}S_{91}$ が大きくなる傾向があるが、全ての水準において $_{28}S_{91}$ は既往の文献⁹⁾の 6 N/mm² 以下となることを確認した。

4. まとめ

本検討では BC のマスコンクリートへの適用を目的として、温度応力解析等に必要となる基礎物性について検討した。本検討で得られた結果を以下に示す。

- (1) BC の断熱温度上昇量は N, M を使用したコンクリートと比較して小さくなることを確認した。
- (2) BC (W/B38%) の 20°C 環境での自己収縮ひずみは膨張材を 10 kg/m³ 添加することで約 100×10^{-6} 小さくなり、自己収縮低減に効果があることを確認した。
- (3) BC の線膨張係数は MC と比較して約 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 大きくなっており、既往の検討と同様の傾向を示した。
- (4) 本研究において、膨張材を用いた BC の最大膨張ひずみは最高温度に従い大きくなった。このことから、マスコンクリートに BC を適用する際の、膨張材の添加は自己収縮低減に有効な方法であるといえる。

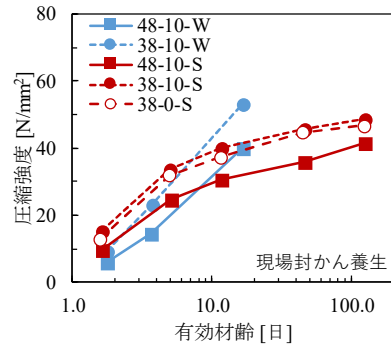


図-12 圧縮強度発現 (現場封かん養生)

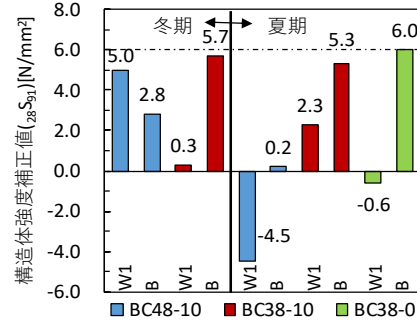


図-13 BC の構造体強度補正值

謝辞

本実験では BASF ジャパン(株)の関係各位にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小林利充, 並木憲司, 一瀬賢一: 環境配慮型のコンクリートの適用拡大, 大林組技術研究所報, No.82, pp.1-8, 2018
- 2) 辻大二郎ほか: 高炉スラグ高含有コンクリートの建築物全躯体への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.57-58, 2017.8
- 3) 日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説, 2019.11
- 4) 白井達哉, 宮原茂禎, 丸屋剛, 大友健: 異なる養生温度条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性, 土木学会論文集, Vol.70, No.1, pp.92-103, 2014
- 5) 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, pp.465-470, 2008
- 6) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016
- 7) 大塚勇介, 辻大二郎, 植木康知, 小島正朗: 高炉スラグ高含有セメントを使用したコンクリートの断熱温度上昇特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.87-88, 2016.8
- 8) 三谷裕二, 谷村充, 佐久間隆司, 佐竹紳也: 膨張コンクリートのマス養生温度履歴を考慮した膨張応力算定法, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1141-1146, 2005
- 9) 日本建築学会: 高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針 (案)・同解説, 2017.9