

# 報告 中性化が進行した高炉スラグ微粉末を高含有したモルタルの力学特性に関する基礎的研究

キム ミンジン\*1・今本 啓一\*2・李 雨彤\*3・エ ルドンオチル\*4

**要旨**：本研究では、促進炭酸化養生した高炉スラグ微粉末を高含有したモルタルの力学特性を把握することを目的に、圧縮強度および超音波伝播速度の測定を行った。その結果、促進炭酸化養生では、弾性係数が低下する傾向にあることや、促進炭酸化養生時の品質評価方法として超音波伝播速度による評価が可能であることが分かった。また、炭酸化養生を実施した試験体を再養生することにより、力学特性が回復する傾向も見られた。

**キーワード**：高炉スラグ微粉末、促進炭酸化、静弾性係数、超音波伝播速度

## 1. はじめに

環境負荷の低減を目的として、混合セメントを使用することによるコンクリート製造時のCO<sub>2</sub>排出量削減が注目されている。その混合セメントの1つとして高炉セメントがあるが、建築分野では未だ利用が拡大していない。2002年以降、20年間で東京都内に建てられた建築物の内、高炉セメントをいずれかの部材に使用した建築物の割合は38.4%で、図-1に示すようにそのほとんどが基礎や杭といった地中部材のみの適用である<sup>1)</sup>。その理由の1つが普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べて、高炉セメントは中性化の進行が速いことが挙げられる。しかしながら、JASS 5の改定<sup>2)</sup>に伴い、室内のようなコンクリート内部の相対湿度が低い非腐食環境下においては中性化対策が不要であると明言されており、高炉セメントの上部躯体への利用に際して懸念事項の1つとして考えられる中性化によるRC構造物の耐久性能低下の可能性は低く、今後、高炉セメントの上部躯体コンクリートへの適用拡大が期待される。さらに、近年では、さらなるCO<sub>2</sub>削減のため、セメントクリンカー量を低減されることだけでなく、高炉セメントをCCU (Carbon Dioxide Capture and Utilization) 材料の1つである軽質炭酸カルシウムと組み合わせてコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量を削減する研究<sup>3)</sup>や高炉セメントを使用したコンクリートを高濃度CO<sub>2</sub>環境下で促進炭酸化養生を行い、コンクリートのCO<sub>2</sub>固定によって、CO<sub>2</sub>排出量を低減させる研究<sup>4)</sup>が行われている。

このような背景の中、中性化が進行した高炉セメントを使用したコンクリートの物性を把握することは重要である。そこで、本研究では中性化が進行した高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの力学特性を把握するための基礎段階として、室内実験では促進炭酸化養生を行った

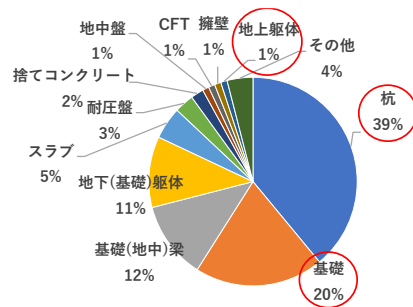


図-1 東京都における高炉セメント使用部材<sup>1)</sup>

表-1 実験水準

記号	結合材	BFS 置換率(%)	養生条件	自己修復効果
BB	高炉 B 種	40	水中(20℃) 気中(20℃, 60%) 促進炭酸化 (20℃, 60%RH, CO <sub>2</sub> : 15%)	—
BC	高炉 C 種	70		水中 60%RH 80%RH
ALL-BFS	セメントフリー	100		—

モルタル供試体を作製し圧縮強度および静弾性係数の測定を行い、促進炭酸化養生の影響について検討を行うとともに、これらの力学特性の評価として超音波法の適用について検討を行った。さらに、高炉セメント C 種が地上躯体に使用されている築 58 年の RC 造建築物の中性化部および未中性化部の物性について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験水準

実験水準を表-1に示す。モルタルの種類は高炉セメント B 種相当として高炉スラグ微粉末 (以下, BFS) を 40wt.% 使用したモルタル (以下, BB) と高炉セメント C 種相当として高炉スラグ微粉末を 70wt.% 使用したモルタル (以下, BC), クリンカーフリーの結合材として, BFS

\*1 東京理科大学 工学部 建築学科 4年 (学生会員)

\*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京理科大学 工学部建築学科助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 静岡理工科大学理工学部建築学科講師 博士 (工学) (正会員)

と刺激材を用いたモルタル（以下、ALL-BFS）の3水準である。養生条件として水中養生(温度 20°C), 気中養生(温度 20°C, 相対湿度 60%), 促進炭酸化養生(温度 20°C, 相対湿度 60%, CO<sub>2</sub>濃度 15%)の3種類とした。

## 2.2 使用材料および調合

モルタルの使用材料を表-2に、BFSの化学組成を表-3に示す。使用したBFSは粉末度4000のJISA6206に適合する。モルタルの調合を表-4に示す。調合は、既往研究<sup>5)</sup>のコンクリートの調合から粗骨材を除いたモルタル部とした。水結合材比(W/B)は、BBおよびBC調合で50%とし、ALL-BFS調合では既往研究<sup>6)</sup>を参考にW/B:50%と同等の強度を得ることのできる水結合材比として30%に設定した。また、ALL-BFS調合の刺激剤として、既往研究<sup>6)</sup>において強度発現性が高かった消石灰(CH)をBFSの3.5%添加した。

## 2.3 試験体作製および実験方法

練混ぜはモルタルミキサーで行い、結合材、細骨材の投入後30秒間空練りを行い、かき落とし後、練混ぜ水、混和剤を投入し、60秒間練混ぜを行った。その後かき落としを行い、120秒間練り混ぜを行った。

実験の流れを図-2に示す。本実験では、短期間で全面中性化を達成することを目的に、φ30×60mmの試験体を作製した。塩化ビニル管(内径31mm)を高さに合わせて切断し、塗装合板にシリコンを用いて固定することにより型枠を作製した。セメント種類および養生方法ごとに3体の試験体を作製し、練り混ぜたモルタルを型枠に打ち込み、7日間封かん養生を行った後脱型した。その後、水中養生および気中養生(20°C, 60%RH)を行い、炭酸化試験体は7日間気中養生を経て、20°C, 60%RH, CO<sub>2</sub>濃度15%の環境下で促進炭酸化を開始した。

再養生の対象試験体は、材齢28日で圧縮強度試験を実施した気中養生試験体および材齢56日で圧縮強度試験を実施した促進炭酸化養生試験体である。再養生条件として、水中養生、20°Cの相対湿度60%環境、20°Cの相対湿度80%環境(飽和水酸化カルシウム水溶液を用いて調湿)とした。それぞれの環境下に28日間静置した。

## 2.4 実験方法

### (1) 力学特性実験

材齢28, 56日において、圧縮強度試験(JISA1108)および静弾性係数試験(JISA1149)を実施した。キャッピングは石膏キャッピングとし、強度試験前に実施した。

### (2) 超音波伝播速度

超音波伝播速度の測定は、試験体内部構造の変化を評価する目的で測定を行った。超音波測定装置は、発信周波数54kHzの送受信プローブをそなえており、試験体の直径方向に超音波を伝播させて測定を行った。測定は、圧縮強度試験の前に実施した。

表-2 使用材料

材料	名称	記号	特性
水	上水道水	W	密度: 1.00g/cm <sup>3</sup>
結合材	普通ポルトランドセメント	OPC	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 3340cm <sup>2</sup> /g
	高炉スラグ微粉末	BFS	密度: 2.92g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 4090cm <sup>2</sup> /g
	刺激材: 消石灰	CH	
細骨材	陸砂	S	表乾密度: 2.57g/cm <sup>3</sup>
混和剤	高性能AE減水剤	Ad	—

表-3 高炉スラグ微粉末の化学組成

結合材	密度(g/cm <sup>3</sup> )	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	MgO(%)	SO <sub>2</sub> (%)	強熱減量(%)
BFS	2.92	4090	5.42	2.10	0.10

表-4 モルタルの調合

記号	W/B(%)	BFS置換率(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混合剤添加量(B×%)
			W	OPC	BFS	CH	S	
BB	50	40	170	204	136	—	824	0.1
BC	50	70	170	102	238	—	824	0.2
All-BFS	30	100	170	0	567	20	824	0.5

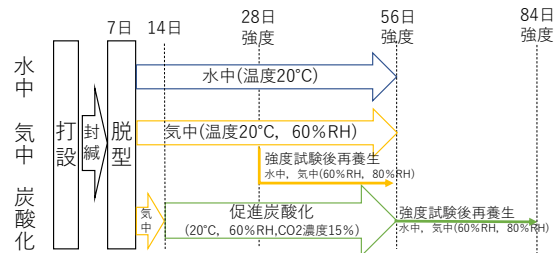


図-2 実験の流れ

表-5 フレッシュ性状

記号	目標フロー値(mm)	フロー値(mm)		温度(°C)	空気量(%)
		0打	15打		
BB	200	106	191	24.2	3.7
BC	220	117	224	23.8	2.2
ALL-BFS		106	143	23.7	2.7

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュ性状および中性化深さ

フレッシュ試験結果を表-5に示す。目標フロー値をBBは200mm、BCおよびALL-BFSは220mmとして混和剤量を設定したが、ALL-BFSは目標値を下回る結果となった。

中性化深さの結果を図-3に示す。なお、水中養生では、全ての条件で中性化が進んでいないことが確認された。気中養生では、BB>BC>ALL-BFSの順で中性化が進み、促進炭酸化の環境下では、材齢56日時点で、全面中性化していることを確認した。

### 3.2 圧縮強度および静弾性係数

図-4にモルタルの圧縮強度を示す。なお、いずれの圧縮強度の変動係数は10%以下である。BFSの置換率で

比較した場合、BFS 置換率が少ない BB>BC>ALL-BFS の順に強度発見が高い結果となった。養生方法の違いによる結果を見てみると、BC および ALL-BFS において水中>気中>促進炭酸化養生の順に強度発見が高い結果となった。BB および BC においては材齢の経過とともに圧縮強度が増加しているが、ALL-BFS は養生条件によらず、材齢 28 日から 56 日における強度の増加がほとんど見られていない。なお、BB における気中養生の強度低下は打設時の締固め不良により生じた表面の空洞(長さ 15mm, 深さ 3mm)などの影響が関与している可能性が考えられるが、この詳細な原因については今後の課題としたい。

図-5 に静弾性係数の測定結果を示す。圧縮強度と同様に BFS 置換率が少ないほど静弾性係数が大きく、また水中>気中>促進炭酸化養生の順で静弾性係数が小さくなっている。また、圧縮強度に比べて気中養生と促進炭酸化養生時の静弾性係数の差が大きい。

図-6 は圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度の増加に伴い、静弾性係数も大きくなっているが、同一圧縮強度時の静弾性係数を比較すると促進炭酸化養生の試験体の静弾性係数が他の養生を行った試験体に比べて値が小さい傾向となった。

水中養生では十分な水分供給により水和反応が効率的に進行し、多量の C-S-H が生成され、緻密な内部構造が形成されたことで、圧縮強度および静弾性係数が他の養生条件と比較して高い値を示した。一方、気中養生では、乾燥により水和反応が停滞し、生成される水和生成物が不足したため、内部構造の緻密化が不十分となり強度や剛性が低下したことが考えられる。促進炭酸化養生では、気中養生と同様に乾燥の影響を受けるとともに、CO<sub>2</sub>の影響で Ca(OH)<sub>2</sub>が CaCO<sub>3</sub>に変化し、さらに C-S-H の炭酸化により細孔構造が粗大化したほか、既往の研究によると、炭酸化収縮による内部応力が微小ひび割れを誘発していることが示されており、これらの要因でさらなる強度低下や弾性係数の低下が引き起こされた可能性が考えられる。促進炭酸化養生による BFS を高含有したモルタル試験体の静弾性係数の低下の要因については今後の検討する必要がある。

### 3.3 超音波伝播速度・動弾性係数

各試験体における超音波伝播速度を図-7 に示す。いずれの調査においても水中養生において超音波伝播速度が速い。気中養生、促進炭酸化養生になると超音波伝播速度が遅くなっており、乾燥などの影響により、空隙が増加し内部構造が脆弱化することで速度の低下がみられたと考えられる。また、促進炭酸化養生では、調査ごとに速度低下の程度が異なり、BFS 置換率が低い BB および中程度の BC では速度の低下が抑えられたが、ALL-BFS では速度が大幅に低下した。C-S-H の炭酸化による

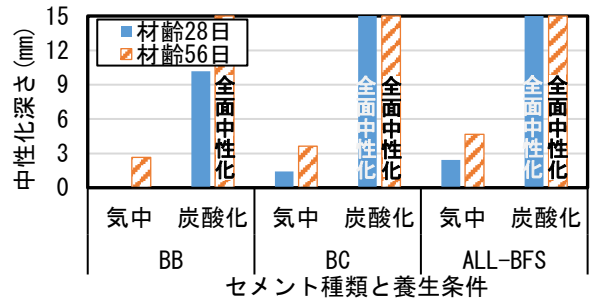


図-3 中性化深さ測定結果

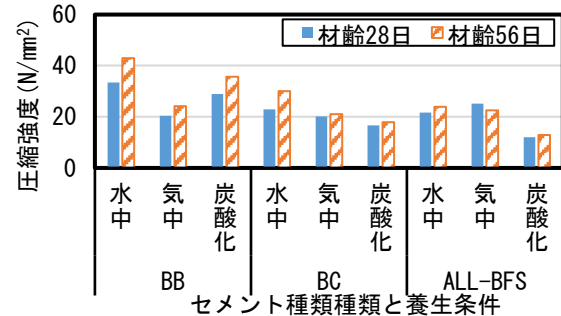


図-4 圧縮強度試験結果

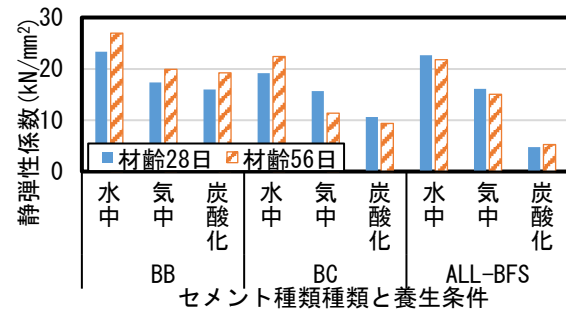


図-5 静弾性係数測定結果

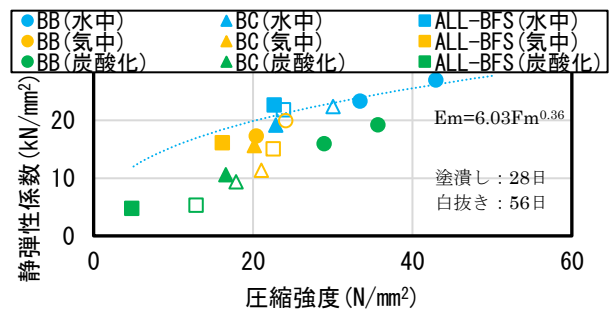


図-6 圧縮強度 ( $F_m$ ) と静弾性係数 ( $E_m$ ) の関係

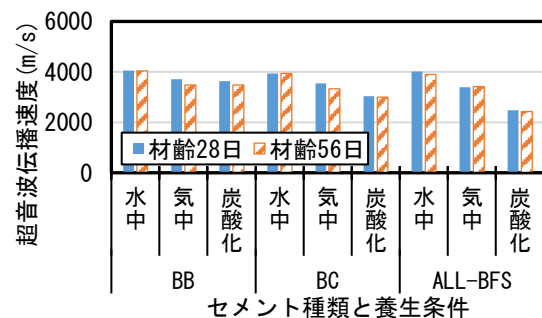


図-7 超音波伝播速度

細孔構造の粗大化は、Ca/Si 比の低い C-S-H の炭酸化において顕著であり、Ca/Si 比は BFS の置換により低下すると指摘<sup>9)</sup>されている。そのため、ALL-BFS において超音波伝播速度の低下を引き起こしたと考えられる。

超音波伝播速度と圧縮強度の関係を図-8 に、超音波伝播速度と静弾性係数の関係を図-9 に示す。超音波伝播速度と圧縮強度の関係には、調合や養生条件の影響を受けることが指摘<sup>9)</sup>されており、本実験の範囲内においては、超音波伝播速度と圧縮強度の関係において両者の間には相関性は見られなかった。一方で、調合や養生条件の違いによらず超音波伝播速度と静弾性係数の間には高い相関性が見られ、超音波伝播速度が速いほど静弾性係数も大きい値を示す。以上より、超音波伝播速度は静弾性特性の評価指標として有効であると考えられる。

動弾性係数は、超音波伝播速度を用いて以下の式(1)により算出した<sup>10)</sup>。一般的なコンクリートのポアソン比( $\nu=0.2$ )を用いた場合を参考に、ここではポアソン比の項を近似的に 1.0 として簡易的に評価した。ポアソン比の影響については今後検討を行う予定である。

$$E_d = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+2\nu)(1-\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

ここに、 $E_d$  : 動弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

$V_p$  : 超音波伝播速度 (m/s)

$\rho$  : 密度,  $\nu$  : ポアソン比

超音波伝播速度から算出した動弾性係数の結果を図-10 に示す。動弾性係数は、静弾性係数の測定結果と同様に水中>気中>促進炭酸化養生の順で動弾性係数が小さくなっている。また、BFS の置換率が大きいほど気中養生と促進炭酸化養生時の動弾性係数の差が大きい。

図-11 に動弾性係数と静弾性係数の関係を示す。動弾性係数は静弾性係数より高い値を示すが、養生条件や調合の違いによらず両者には相関性があり、動弾性係数によって静弾性係数を評価可能であることが示唆された。

### 3.4 再養生による自律治癒効果

材齢 28 日まで気中養生を行った BC 試験体および材齢 56 日まで促進炭酸化養生を行った BC 試験体において、圧縮強度試験を行った後の損傷を受けた試験体に対し、水中養生、相対湿度 80%、60%の環境下で再養生を実施した。

図-12 は再養生期間中の超音波伝播速度比(再養生期間中/強度試験後)を示す。超音波伝播速度比は最初の強度試験後の超音波伝播速度を分母とした比率である。その比率が 1.0 を超えると圧縮強度時に受けた損傷が自律治癒により回復していることを意味する。図-12 より材齢 28 日まで気中養生を行った試験体で、全ての再養生条件において比率が 1.0 を超えた結果から、治癒効果が期待できる。特に効果が大きいのは水中養生であり、こ

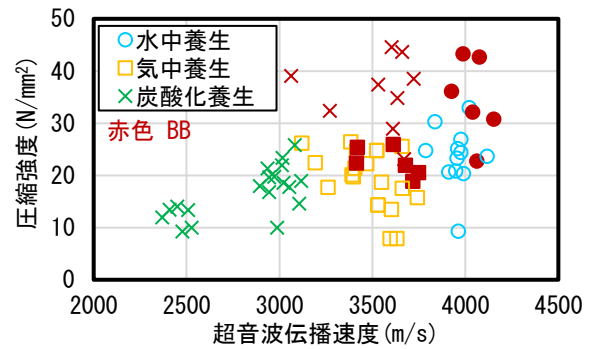


図-8 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

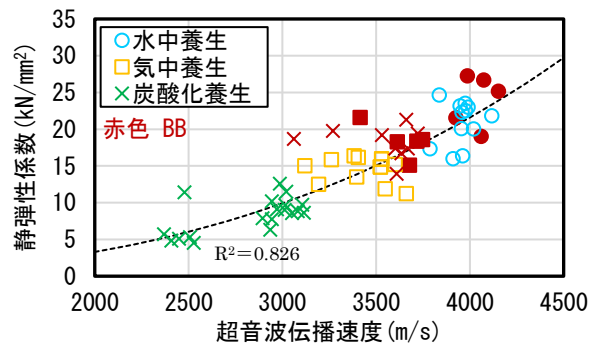


図-9 超音波伝播速度と静弾性係数の関係

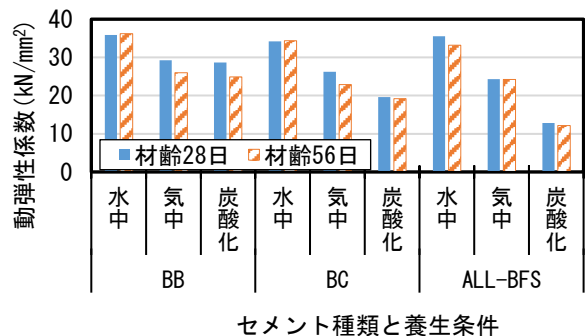


図-10 動弾性係数の算出結果

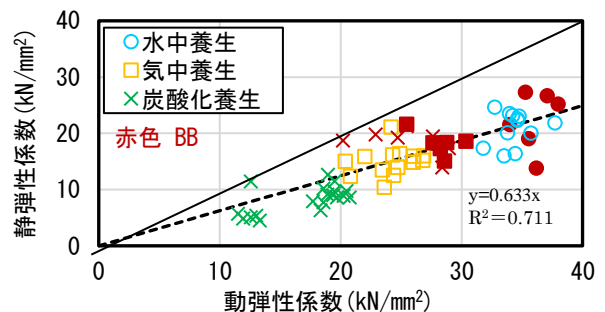


図-11 動弾性係数(x)と静弾性係数(y)の関係

のことから水分供給が多いほど、自律治癒効果が高いことが示唆された。

材齢 56 日まで促進炭酸化養生を行った試験体では、水中養生において超音波伝播速度比が直線的に向上し、高い治癒効果が確認された。また、湿度 60%養生では、初期値を上回る回復が認められた。一方、湿度 80%養生を行った試験体では、他の試験体と比較して強度試験時

に大きなひび割れが生じたため、その影響により自律治癒の効果が遅れたものと推測される。これらのことから、本実験の範囲内においては、高炉スラグ微粉末を高含有モルタルにおいて気中養生および炭酸化養生を行った試験体においては水分を積極的に共有することで治癒効果が期待されることが示唆された。

図-13 に、再養生 28 日後の再養生による圧縮強度の比を示す。気中養生を行った試験体では、28 日間再養生を実施した後の圧縮強度は、圧縮強度試験時より高い結果が出た。一方、促進炭酸化養生を行った試験体では、再養生後も圧縮強度試験時まで回復しなかった。二酸化炭素濃度が高い環境下で炭酸化養生を行った試験体は細孔組織が粗大化することが指摘<sup>8)</sup>されており、促進炭酸化養生試験体は再養生による自律治癒効果が気中養生試験体より低くなったものと考えられる。

#### 4. 実構造物調査

##### 4.1 調査概要

調査対象の構造物は、1961 年に竣工した地上 6 階建ての RC 造であり、地上躯体に高炉セメント C 種が使用されて、地下部分は高炉セメント B 種が使用されている。コンクリートの詳細は不明であるが依田らの調査結果<sup>10)</sup>により、表-6 の設計条件が示されている。また佐川らの調査結果<sup>11)</sup>により、地上躯体コンクリートは水セメント比:53%、スラグ置換率:61.1%と推定されることが示されており、現在の高炉セメント C 種の規格に適合する。

採取したコアの中性化および圧縮強度を表-7 に示す。コアの採取位置は、地上 6 階（高炉セメント C 種を使用）および地下 1 階（高炉セメント B 種を使用）の梁部である。BC-被覆はコア両端に仕上材が施されていた。採取したコアの寸法は直径 150mm、長さ 340mm である。

##### 4.2 超音波伝播速度の測定方法

室内実験結果を基に、実環境下で中性化が進行した高炉セメントコンクリートの剛性を評価するため、超音波伝播速度の測定を実施した。測定位置(図-14)は、筒元から 20, 40, 60, 115, 170, 315mm の 6 か所で、各位置で 5 回測定を行った。測定には、尖塔型超音波探触子(周波数 54kHz)を用い、測定時には被覆を剥がし、鉄筋が近接している場合、位置を調整して測定を行った。

##### 4.3 超音波伝播速度の測定結果

図-15 は、各コアの超音波伝播速度の分布を示す。図の赤ハッチ部は中性化部 (50mm 程度) である。これによると、実構造物においても中性化部の超音波伝播速度が未中性化部よりも遅くなることが確認でき、高炉セメント B 種 (BB) に比べて、高炉セメント C 種 (BC) の方が未中性化と中性化部の超音波伝播速度の差が大きい。このことから実環境下においても、BFS の置換率が高い

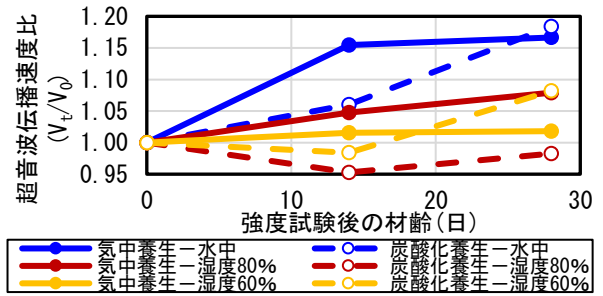


図-12 再養生期間における超音波伝播速度比

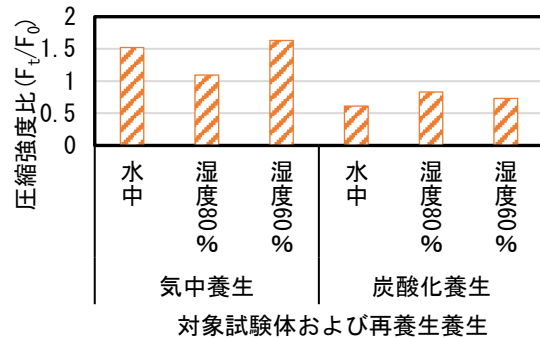


図-13 再養生による圧縮強度比(強度試験後 28 日)

表-6 設計条件<sup>10)</sup>

セメント種類	設計基準強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
高炉 C 種	180	16	4.5	60 以下	300	2.0×10 <sup>5</sup>
高炉 B 種				55 以下		

表-7 コアの中性化および圧縮強度

調査	採取箇所	記号	仕上げ材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	中性化深さ (mm)	かぶり厚さ (mm)
高炉 C 種	6 階梁 (屋内)	BC	紙製被覆	2.29	18.9	20.5	50.5	筒元 32 筒先 44
		BC	無	2.27	24.6	23.6	55.3	筒元 27 筒先 53
高炉 B 種	地下 1 階梁 (屋内)	BB	無	2.32	16.8	22.7	53.0	筒元 38 筒先 47

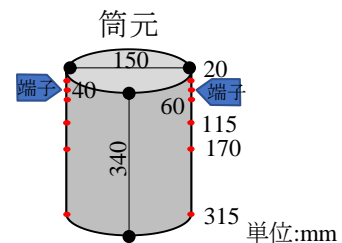


図-14 超音波測定位置

ほど、中性化によって内部組織が粗になる可能性が示唆された。未中性化部の超音波伝播速度において、BC が BB よりも高く、また被覆がない方がある方よりも高いことが確認された。しかし、これらの差異を引き起こした明確な要因は本研究では特定できなかった。今後、実環境における細孔構造や水和生成物の違いに着目した

追加の分析が必要である。

図-15の結果に基づき作成した中性化部と未中性化部の超音波伝播速度の比を図-16に示す。なお、中性化部は、筒本から20, 40, 315mmの3か所、未中性化部は115, 170mmの2か所の平均値を用いた。図中には、3章で行った室内実験において全面中性化している炭酸化養生と全く中性化していない水中養生の比も示している。室内実験の結果はモルタル試験体による実験のため純粋な比較にはならないが、室内実験および実構造物調査における結果においてもBFSの置換率が高いほど中性化と未中性化部の差は大きく、中性化による影響を受けやすいことが言える。なお、仕上げが施されていたコアは、仕上げ無のコアよりも比率の値が高くなっており、仕上げの存在が中性化の進行を抑制するだけでなく、内部構造の劣化を緩和する可能性も考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、中性化が進行した高炉スラグ微粉末を高含有したモルタルの力学特性についての基礎的な実験を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

- 1) 室内実験においては、高炉スラグ微粉末の置換率が高い試験体ほど静弾性係数の低下が大きいことが確認できた。
- 2) 中性化が進行した高炉スラグ微粉末を高含有したモルタルの静弾性係数は超音波伝播速度および動弾性係数で評価が可能であることを示唆した。
- 3) 中性化が進行した試験体を再養生を行った場合、相対湿度60%の一般環境下においては高炉スラグ微粉末による自律治癒の効果は明確には現れなかった。一方で、水分を積極的に共有することで治癒効果が得られる可能性を示唆した。
- 4) 実構造物においても未中性化部に対して中性化部の超音波伝播速度が遅くなることが確認した。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、日鉄高炉セメント株式会社の関係者各位にご協力をいただきました。末筆ながら、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：建築物における高炉セメントの使用状況 2017
- 2) 日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022.11
- 3) 佐々木猛, 八木利之：エコタンカル（軽質炭酸カルシウム）とその可能性, セメント・コンクリート, No.900, pp.58-62, 2022.2

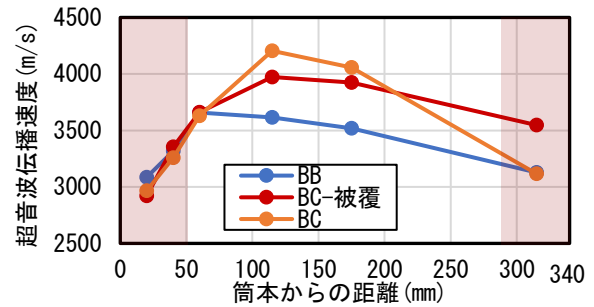


図-15 超音波伝播速度分布

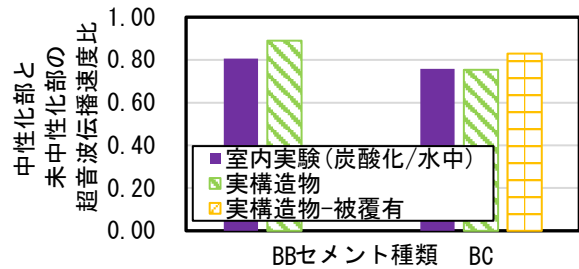


図-16 未中性化部に対する中性化部の超音波伝播速度比

- 4) 西岡由紀子ほか：革新的カーボンネガティブコンクリートCUCOの実現に向けた研究開発, その1 高炉スラグ微粉末を高含有し $\gamma$ -C2Sを添加したモルタルの高濃度炭酸化養生に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.1305, pp.609-610, 2023.9
- 5) 百瀬晴基, 平田真佑子ほか：高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する研究 その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.117-120, 2023.7
- 6) 江詩唯ほか：全量産業副産物としたクリンカーフリーコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.69-74, 2018
- 7) M. Auroy et al., "Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials," Cem. Concr. Res., vol. 74, pp. 44-58, 2015
- 8) 原沢蓉子ほか：異なる炭酸化環境が空隙特性および炭酸化生成物に与える影響, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, pp.808-813, 2014
- 9) 松戸雄紀ほか：超音波を用いたコンクリートの力学的特性の推定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1721-1726, 2010
- 10) 鎌田敏郎, 内田慎哉：コンクリートの非破壊試験の理論と実際-③弾性係数(超音波法・衝撃弾性波法)の理論と実際, コンクリート工学, p.340-337, Vol.51, No.4, 2013
- 11) 佐川孝広ほか：高炉セメントC種を用い52年経過した構造物の長期耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, p.47-89, 2017