

高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの長期耐久性に関する一考察

A Study on the Long-term Durability of High-Volume Blast-Furnace Slag Blended Cement Concretes

倉田 和 英 橋 本 学 坂 井 吾 郎

要 約

高炉スラグ微粉末を高含有したセメントおよび刺激剤として二水セッコウ 13%を添加した高硫酸塩スラグセメントを用いたコンクリートの暴露試験において、41年が経過した試験体について各種分析を実施した。その結果、高炉スラグ微粉末の含有率が70%の場合の中性化深さは7~9 mm程度であり、90%の場合は15 mm程度であった。さらに、高炉スラグ微粉末を高含有した場合であっても普通ポルトランドセメントを30%含有している場合には、未中性化部においてCa(OH)₂の残存が確認され、鉄筋防食効果を期待できるものと考えられた。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験概要
- III. 実験結果および考察
- IV. まとめ

I. はじめに

銑鉄製造の副産物である高炉スラグ微粉末（以下、BFS）は、1970年代、オイルショックに伴う燃料削減や、埋立地の減少に伴う埋立材としての利用減少を背景として、高炉セメントとしての利用需要が高まり、従来の高炉セメントより高い含有率で利用する試みが盛んに研究された。しかしながら、BFSを60%以上含有したセメントは、普通ポルトランドセメントに対するBFS置換率が大きくなるほど、初期の強度発現が遅く、中性化の進行が速くなるとされているため、適用された事例は少なく、BFS置換率40~45%である高炉セメントB種が主に用いられてきた。

一方で、近年、環境負荷低減の観点より、高炉セメントC種のようにBFS置換率の高い結合材の実構造物への適用が見直されている。この取り組みの課題となる初期の強度発現については、硬化促進剤の添加や水結合材比の低減によって改善するなどの研究¹⁾²⁾が鋭意なされている。また、中性化の進行に関しては、高炉セメントにおける中性化の進行メカニズムは促進環境と実環境で異なるという指摘³⁾や、実構造物における普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種における中性化深さに大きな違いが認められないとの報告⁴⁾

もされている。しかしながら、高炉セメントC種以上のBFS置換率におけるコンクリートでは、実環境に長期間暴露したデータはあまり報告されていない。特に、土木構造物に使用される、水結合材比が50%程度のコンクリートに関する暴露試験の事例は少ないため、実環境下における高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの諸性状に関するデータは、耐久性を適切に評価する上で重要であると考えられる。

本研究においては、1975年よりBFSの比表面積と置換率の異なる高炉セメントおよび高硫酸塩スラグセメントを用いた水結合材比50%程度のコンクリートブロック試験体の暴露試験を実施している⁵⁾。本報では、材齢41年目のコンクリートの外観や強度、中性化深さなどの基礎物性について取り纏め、セメント硬化体の物性やセメント水和物の変化と関連づけて整理することで、BFSを高含有した高炉セメントにおける実構造物への適用可能性について検討した。

II. 実験概要

1. 暴露試験概要

暴露試験体に用いられた結合材の内訳をTable 1に、比表面積3,860 cm²/gのBFSの化学組成をTable 2に示す。暴露試験体の結合材として、BFSの比表面積と含有率の異なる3種類の高炉セメントおよび高硫酸塩スラグセメント(以下、BS)を使用した。高炉セメントは、普通ポルトランドセメントに対し、68.5%、88.5%を比表面積3,860 cm²/gのBFSに置換したものを、それぞれB4-70、B4-90、また、68.5%を比表面積2,000 cm²/gのBFSに置換したものをB2-70と称す。なお、

キーワード：コンクリート、高炉スラグ微粉末、高炉セメント、長期暴露試験、中性化、Ca(OH)₂

Keywords : concrete, blast-furnace slag, blast-furnace slag cement, long-term exposure test, carbonation, Ca(OH)₂

Table 1 高炉スラグ微粉末の組成および密度・比表面積
(Chemical Compositions and Physical Property of Blast Furnace Slag)

| 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | 強熱減量 (%) | 化学組成 (%) | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|-------------|----------|------------------|------------------|--------------------------------|-----|------|-----|-----------------|-----|
| | | | Insol | SiO ₂ | AlO ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | CaO | MgO | SO ₃ | S |
| 2.90 | 3,860 | 0.1 | 0.3 | 33.6 | 17.0 | 0.8 | 1.0 | 41.6 | 4.5 | 0 | 1.0 |

硬化促進剤として CaCl₂ を 1.50% の割合で混和した。また、13%、普通ポルトランドセメントを 2% の割合で混和した。

使用材料を Table 3、配合表を Table 4 に示す。水結合材比は、一般的な土木構造物に用いられる 50% 程度で、目標スランプ 7.0 ± 1.0 cm を満たすように、粗骨材の最大寸法 25 mm、細骨材率 43.0%、単位結合材量 320 kg/m³ が一定のもと、単位水量を調整し、決定した。水結合材比は、それぞれ B4-70 : 48.8%、B4-90 : 47.5%、B2-70 : 50.0%、BS : 50.0% とした。

また、試験体の寸法は、縦 650 mm、横 650 mm、高さ 470 mm であり、実験施設（東京都調布市）の屋上に、1975 年 7 月から 41 年間暴露した。屋上は雨掛りや日射を受ける場所であり、主な劣化の要因として中性化が考えられる環境である。暴露状況を Photo 1 に示す。

2. 測定項目および方法

φ 100 mm および φ 50 mm のコアを試験体より Fig.1 に示す位置にて採取し、Table 5 に示す試験を実施した。中性化深さは、暴露上面より採取した φ 50 mm のコア試験体 3 本を割裂し、JIS A 1152 に従い測定した。圧縮強度試験に用いた試験体は、事前に中性化深さを測定しており、中性化深さは最大で 21.3 mm であったことから、表層から 20 mm の部分を切除し未中性化部を試験に供した。ビッカース硬度の測定条件は、試験力 HV0.2 (1.961N)、保持時間 5 秒とし、表層から深さ方向に対して 2~3 mm 間隔で測定した。各測定点において 10 点のビッカース硬度を測定し、平均値を算出した。

細孔径分布と化学分析の分析箇所は、先行して測定した中性化深さの最小値が 7 mm 程度であったことを踏まえ、φ 100 mm のコア試験体の表層から 5 mm の範囲を中性化部、220~240 mm の範囲を未中性化部と区別し、細孔径分布は水銀圧入ポロシメーター（以下、MIP）にて、Ca(OH)₂ 量は示唆熱-熱重量測定（以下、TG-DTA）により測定した。MIP および TG-DTA の測定に用いた試料はモルタル部を回収後 2.5~5.0 mm に整粒し、アセトンに浸せきさせた後に、真空乾燥を行った試料にて測定した。また、TG-DTA に用いた試料は、モルタル部分の細骨材をエタノール溶液中で可能な限り取り除いて粗粉碎し、上澄み液をろ過した後、ろ紙に残った試料を分析に用いた。Ca(OH)₂ は、TG-DTA にて測定される 400~500℃ の脱水量と骨材由来の不溶残分量から、ペースト量当りに換算して算出した。

X 線回折（以下、XRD）およびフーリエ変換赤外分光光度計（以下、FT-IR）の測定用の試料は、中性化部と未中性化部より採取したコンクリート試料をハンマにて粗砕後、粗骨材を取り除き、鉄乳鉢にて骨材に付着したセメントペーストを削り取り、0.15 mm のふるいを通したものを測定試料とした。測定試料は、アセトンにて水和停止を行い、40℃ 環境にて 24 時間乾燥させた後、XRD および FT-IR の測定を行った。

Table 2 結合材の内訳

(Replacement Ratios of the Binders)

| 結合材 | 普通ポルトランドセメント (wt.%) | 高炉スラグ微粉末 | | 刺激剤 (wt.%) |
|-------|------------------------|------------------------------|---------------|---|
| | | 比表面積 (cm ² /g) | 置換率 (wt.%) | |
| B4-70 | 30 | 3860 | 68.5 | 1.5 (CaCl ₂) |
| B4-90 | 10 | 3860 | 88.5 | 1.5 (CaCl ₂) |
| B2-70 | 30 | 2000 | 68.5 | 1.5 (CaCl ₂) |
| BS | 2 | 3860 | 85.0 | 13.0 (CaSO ₄ ·H ₂ O) |

Table 3 使用材料

(Materials Used)

| 材料名 | 記号 | 摘要 |
|----------|--------------------------------------|--|
| 水 | W | |
| セメント | OPC | 普通ポルトランドセメント、密度:3.16 g/cm ³ |
| 高炉スラグ微粉末 | BFS | 密度:2.90 g/cm ³ |
| 刺激剤 | CaCl ₂ | 塩化カルシウム |
| | CaSO ₄ ·2H ₂ O | 二水セッコウ |
| 細骨材 | S | 富士川産川砂、表乾密度:2.63 g/cm ³ 、吸水率:1.6%、F.M.:3.07 |
| 粗骨材 | G | 青梅市成木産硬質砂岩砕石、表乾密度:2.64 g/cm ³ 、F.M.:7.05 |
| 混和剤 | Ad | AE 減水剤、リグソルホン酸化合物 |

Table 4 コンクリートの配合とフレッシュ性状

(Concrete Mix Proportions)

| No. | G _{max} (mm) | W/B (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | フレッシュコンクリートの物性 | |
|-------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|----------------|------------|
| | | | | W | B* | S | G | SL (cm) | Air (%) |
| B4-70 | 25 | 48.8 | 43.0 | 156 | 320 | 868 | 1078 | 8.0 | 2.3 |
| B4-90 | | 47.5 | | 152 | 320 | 812 | 1081 | 7.0 | 1.6 |
| B2-70 | | 50.0 | | 160 | 320 | 805 | 1072 | 8.0 | 2.1 |
| BS | | 50.0 | | 160 | 320 | 805 | 1072 | 3.0 | 2.0 |

*B: 結合材 (OPC+BFS+CaCl₂ または CaSO₄ · 2H₂O)



Photo 1 試験体の暴露状況

(Appearance of the Exposed Test Specimens)

III. 実験結果および考察

1. 外観調査

暴露試験体の外観を Fig.2 に示す。BFS の含有率が大きい場合、炭酸化が進行しやすく、それに伴い、表層が脆弱化する

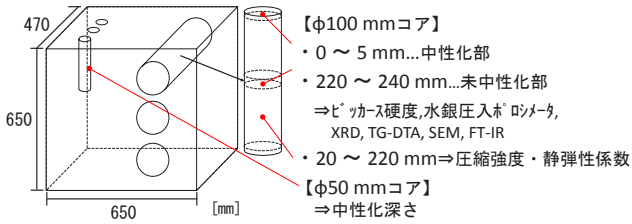


Fig.1 試料の採取位置
(Sample Specimen and Test Locations)

Table 5 試験項目
(Experiment Test List)

| 試験項目 | 測定方法 | 測定位置 |
|-------------------------|-------------------|---------------|
| 中性化深さ | JIS A 1152 | 暴露上面 |
| 圧縮強度 | JIS A1108 | 未中性化部分 |
| 静弾性係数 | JIS A1149 | 未中性化部分 |
| ピッカス硬度 | 深さ方向の微細硬度の変化を把握 | 暴露側面 |
| 細孔径分布 | 水銀圧入式ポロシメーターによる測定 | 中性化部 未中性化部 |
| Ca(OH) ₂ の定量 | TG-DTAによる測定 | |
| セメント水和物の同定 | XRDによる測定 | |
| C-S-Hの分解 | FT-RIによる測定 | |

るアブサンデン現象⁶⁾が生じ、耐久性を損なう可能性がある。B4-70, B2-70においては、表層品質が目立った低下はなく健全な状態であった。一方で、B4-90の暴露上面およびBSの暴露上面と暴露上面側の角において表層部のペーストの剥離が散見された。この傾向は、特にBSにおいて顕著であり、粗骨材が露出している箇所が確認された。魚本ら⁶⁾は、BFSを多量に含有する結合材においても普通ポルトランドセメントが10%以上の割合で含まれている場合、アブサンデン現象が生じなかったと報告している。本結果においては、10%の割合で普通ポルトランドセメントを含有している場合は、暴露上面において、ペーストの軽微な剥離が確認され、アブサンデン現象が生じたものと考えられた。一方で、30%の割合で普通ポルトランドセメントを含有する場合は表層において剥離は確認されず、健全な状態であった。

2. 力学的特性

圧縮強度と材齢の関係を Fig.3 に示す。全ての水準において、材齢 91 日から 11 年にかけて圧縮強度が増加した。その後は、B4-70 および BS においては 21 年から 41 年で、わずかに圧縮強度が増加し、B4-90 および B2-70 においては 21 年よりわずかに低下したものの、同程度の圧縮強度が保持されていることを確認した。また、材齢 41 年における圧縮強度は、B4-70 と比較して BFS 高含有である B4-90 は、圧縮強度の絶対値は小さいものの、91 日から 41 年目の強度増加率が大きくなり、BFS の潜在水硬性による強度発現の影響が大きいものと考えられた。B2-70 の材齢 41 年の強度は B4-70 より小さく、これは B2-70 に含有される BFS の比表面積が小さいため、潜在水硬性による反応領域が小さくなったことによるものと考えられた。さらに、BS の圧縮強度は、ほかの水準と比較して 20~30 N/mm² ほど大きい結果であった。これについては、未中性化部の細孔径分布および生成されるセメント水和物の測定結果を踏まえて後述する。

次に、圧縮強度と静弾性係数の関係を Fig.4 に示す。なお、

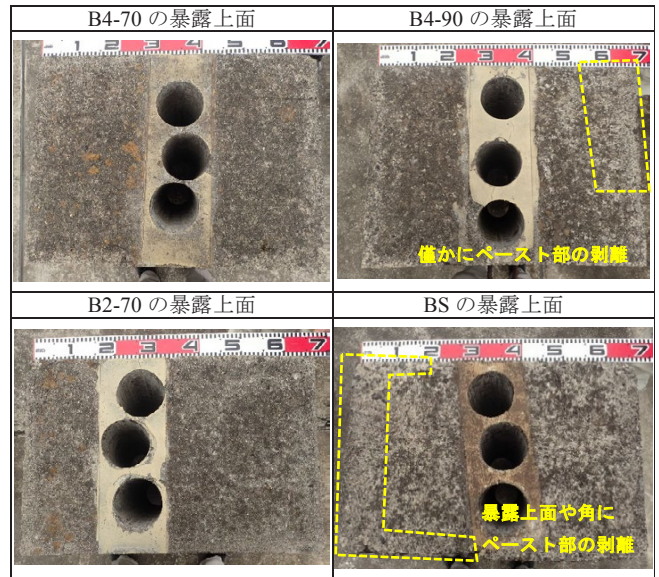


Fig.2 41年間暴露した試験体の外観
(Physical Appearance of the Test Specimens)

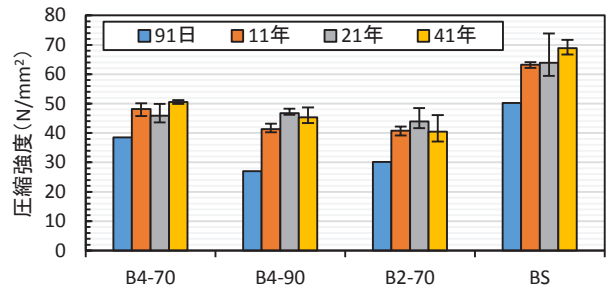


Fig.3 圧縮強度と材齢の関係
(Test Results of Compressive Strength)

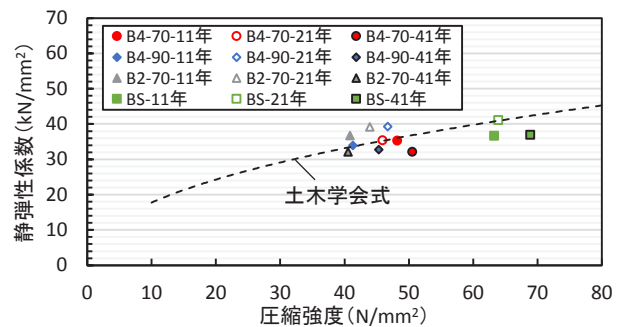


Fig.4 圧縮強度と静弾性係数の関係
(Relationship between Compressive Strength and Modulus of Elasticity)

図中に土木学会コンクリート標準示方書[設計編]⁷⁾の関係式を併せて示す。材齢 11~41 年における圧縮強度と静弾性係数の関係は、土木学会の関係式上に概ねプロットされる結果であり、一般的な土木構造物に用いられるコンクリートと同等の関係が得られた。

3. 中性化の進行に関する考察

一般的に BFS を高含有した結合材は、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合よりも中性化の進行が早いとき

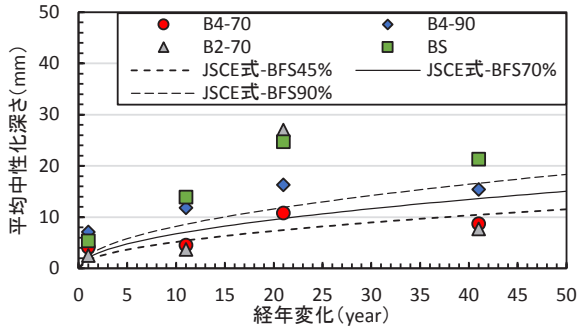


Fig.5 中性化深さの経年変化

(Changes in Carbonation Depth Results with Exposure Age)

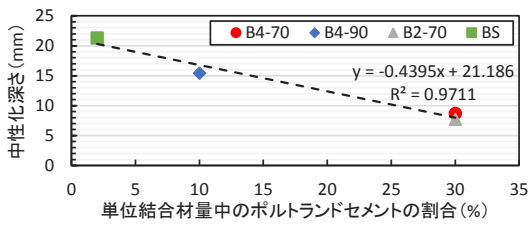


Fig.6 中性化深さと

結合材中のポルトランドセメントの割合の関係

(Relationship between Carbonation Depth and Ordinary Portland Cement Replacement Ratio)

れており、中性化の進行速度を踏まえた上で、実構造物への適用方法を検討する必要がある。そこで、コンクリート標準示方書[設計編]の中性化速度推定式⁷⁾(以下、JSCE式)より算出される中性化深さと実測値の関係について検討した。JSCE式は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを実環境に暴露した時の中性化深さに基づき求められており、材料定数 $k = 0.7$ を用いることで BFS を用いる場合の中性化の進行を推定している。各材齢における中性化深さを Fig.5 に示す。また、JSCE式より算出した中性化進行曲線を図中に併せて示す。推定式の条件を以下に示す。

$$\text{JSCE式} \quad X = -3.57 + 9.0W / (C_p + k \cdot A_d) \quad (1)$$

$$C_p = B \cdot (1 - P_{BFS}) \quad (2)$$

$$A_d = B \cdot P_{BFS} \quad (3)$$

ここに、 X : 中性化速度係数(mm/√年)、 W : 単位体積当たりの水の質量(kg/m³)=160 kg/m³、 C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量(kg/m³)、 k : 混和材の種類により定まる定数、BFSの場合 $k=0.7$ 、 A_d : 単位体積あたりの混和材質量、 B : 単位結合材量(kg/m³)=320 kg/m³、 P_{BFS} : 結合材に対する BFS の置換率 ($P_{BFS}=45\%$, 70% , 90% とした。)

JSCE式- $P_{BFS}70\%$ による推定中性化深さは、B4-70の経年的な中性化深さの実測値に対し、ほぼ同程度か3~5mm大きく評価する結果であった。また、JSCE式- $P_{BFS}90\%$ は、B4-90に対して材齢41年ではほぼ同程度の値であり、それ以前の材齢においては、3mm程度小さく評価する結果が得られた。

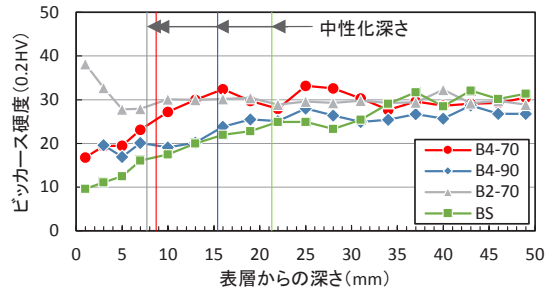


Fig.7 ビッカース硬度と中性化深さの関係

(Relationship between Vicker's Hardness and Carbonation Depth Test Results)

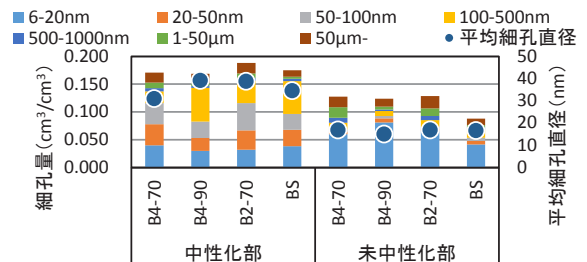


Fig.8 細孔径分布

(Pore Size Distribution Results)

また、材齢41年のB4-70、B2-70の中性化深さは、JSCE式- $P_{BFS}45\%$ よりも小さい値となり、本実験の範囲では、実環境下において BFS を70%と高含有したコンクリートの中性化は比較的緩やかに進行するものと考えられた。ここで、既往の知見⁸⁾によると、結合材に対する BFS の置換率が大きくなると、生成される Ca(OH)_2 の量は線形的に減少することが報告されている。また、 Ca(OH)_2 はコンクリートの pH を高アルカリに維持する働きがあり、炭酸化によって Ca(OH)_2 を消費した箇所から中性化が進行していくとされている。Fig.6で示すように、暴露41年目の中性化深さと各結合材に占める普通ポルトランドセメントの割合の関係には相関性が確認でき、本結果においても BFS の置換率に伴う普通ポルトランドセメントの減少による Ca(OH)_2 量の低下が中性化の進行に対して支配的であったと推測される。なお、21年目のB2-70において、中性化深さが極端に大きくなった理由は明確ではないが、中性化部の細孔量が最も大きい結果となっており、物質透過に対する抵抗性が低下した箇所では、より中性化が進行した可能性が考えられた。

4. 中性化進行に伴うセメント硬化体の物理的特性の変化

(1) ビッカース硬度

表層からの深さ方向に対するビッカース硬度と中性化深さの関係を Fig.7 に示す。未中性化領域のビッカース硬度は、全水準において深さ方向に一定に推移するのに対し、B2-70を除き、中性化領域は表層に近くなるに従い連続的にビッカース硬度が低下する傾向が確認された。中性化部を切除したコア試験体の圧縮強度が、11~41年の間に安定して推移していることを踏まえると、中性化の影響の及ばない領域のセメント水和物は長期間において健全な状態で存在するものと

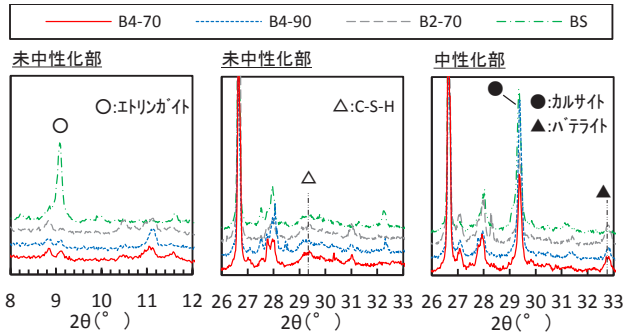


Fig.9 XRD 分析結果
(Results of XRD Spectrum)

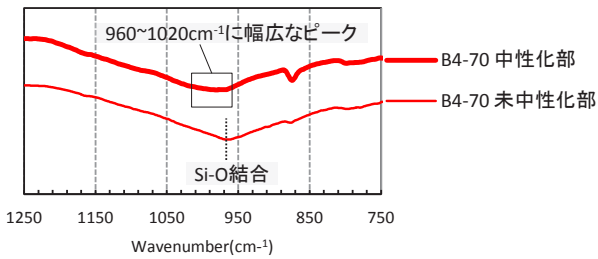


Fig.10 FT-IR 分析結果
(Results of FT-IR Spectrum)

Table 6 未中性化部における Ca(OH)₂ の定量結果
(Amount of Ca(OH)₂ by TG-DTA)

| | B4-70 | B4-90 | B2-70 | BS |
|-------------------------|-------|-------|-------|----|
| Ca(OH) ₂ (%) | 3.2 | - | 3.1 | - |

考えられる。一方で、中性化領域については、セメント水和物の炭酸化に伴い、疎な細孔構造に変化したことによりピッカース硬度がやや低下したものと考えられる。なお、B2-70のみ炭酸化により組織が緻密化した可能性が考えられるが、ほかの配合と異なる傾向となった理由は定かではない。

(2) 細孔径分布

中性化部および未中性化部の細孔径分布を Fig.8 に示す。全ての配合において、未中性化部と比較して中性化部の細孔径分布は、6~20 nm の細孔量の減少、および 20~500 nm の細孔量の増加、さらに細孔全体量の増加が確認された。上記のような、中性化に伴う細孔量の増減は、高炉セメント由来の Ca/Si 比の低い C-S-H の炭酸化に伴う C-S-H の多孔化⁹⁾によるものと考えられ、中性化領域におけるピッカース硬度の低下は細孔構造の多孔化によって生じたものと考えられる。また、未中性化部の全細孔量は、BS が最も小さい値であり、緻密な空隙構造を有していることから、圧縮強度がほかの水準と比較して大きくなったものと考えられた。

5. 中性化の進行に伴うセメント水和物の変質

(1) コンクリートの物理特性とセメント水和物の関係

XRD により同定した主なセメント水和物を Fig.9 に示す。全配合の未中性化部においてエトリングライトが確認され、また、結晶性が乏しいため明確ではないものの C-S-H のピークが確認された。また、エトリングライトのピークは特に BS で

大きく、ほかの水準と比較して特異な組成であった。このエトリングライトの生成は、13%と多量に混和された二水セッコウに由来するもの¹⁰⁾と考えられ、BS における未中性化部の空隙構造の緻密化や圧縮強度の増加に寄与したものと推察される。

次に、中性化部においては、全ての配合においてカルサイトの生成、また、B4-70, B4-90, B2-70 においてバテライトの生成が確認された。カルサイトとバテライトは結晶構造の異なる CaCO₃ であり、カルサイトは Ca(OH)₂ の炭酸化により、また、バテライトは C-S-H を由来として主に生成したものと考えられる。BFS を高含有する場合は、普通ポルトランドセメントのみから生成される C-S-H よりも Ca/Si 比が小さく、炭酸化により組織が多孔化する恐れがある。そこで、C-S-H の炭酸化程度を把握する目的として、FT-IR の測定を行った。B4-70 の分析結果を Fig.10 に示す。未中性化部では、C-S-H に起因する 960 cm⁻¹ 付近のピークが確認され、中性化部では、960~1020 cm⁻¹ 付近にかけてブロードなピークが確認された。C-S-H は炭酸化によって完全に分解されるとシリカゲルとなり、1080 cm⁻¹ にピークを示すとされている¹¹⁾。また、佐川ら¹²⁾は、自然環境に 52 年暴露された高炉セメント C 種を用いたコンクリートにおいて、980~1080 cm⁻¹ にかけてブロードなピークを示すことから、中性化領域の C-S-H は炭酸化によって完全に分解しているわけではなく、Ca/Si 比の低下した C-S-H と健全部が混在すると結論づけている。B4-70 以外の水準においても、佐川らと同様の傾向が確認され、以上の知見を踏まえると、BFS を 70%以上含有した材齢 41 年のコンクリートにおいても、中性化領域で C-S-H が完全に分解されるわけではなく、C-S-H が残存するものと考えられた。

(2) Ca(OH)₂ の残存に関する考察

Ca(OH)₂ はコンクリート中の pH を高アルカリ性に保持する働きがあるため、その残存量はコンクリート構造物中の鉄筋の防食効果を評価する上で重要である。Ca(OH)₂ の定量結果を Table 6 に示す。BFS の含有率が 85%以上である B4-90 および BS は、未中性化部において Ca(OH)₂ は検出されず、エトリングライトなどのセメント水和物の生成の過程で使用される Ca(OH)₂ 量が、普通ポルトランドセメント由来の Ca(OH)₂ 生成量を上回ったものと考えられる。一方で、B4-70 および B2-70 では、未中性化部において、それぞれ 3.2%、3.1%の Ca(OH)₂ が残存することが確認された。また、材齢 41 年の中性化深さは、B4-70 および B2-70 では、10 mm 以下であり、推定された高炉セメント B 種の中性化深さよりも小さい値であった。これらの結果を踏まえると、本研究の範囲では、BFS を 70%含有した高炉セメントを用いた場合においても、水結合材比が 50%程度で、結合材に対する普通ポルトランドセメントの含有率が 30%のコンクリートにおいては、中性化は比較的緩やかに進行し、未中性化部において Ca(OH)₂ が残存することで鉄筋防食効果を期待できるものと考えられ、実構造物に適用できる可能性が考えられた。

IV. まとめ

41年間暴露された各種 BFS 高含有セメントを使用したコンクリートについて、種々の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- ① B4-70, B2-70 においては、目立った表層品質の低下はなく健全な状態であった。一方で、B4-90 の暴露上面、BS の暴露上面および暴露上面側の隅角部において表層部のペーストの剥離が散見された。
- ② 全水準において、材齢 91 日から 11 年にかけて圧縮強度が増加した。11 年から 41 年にかけては、著しい強度低下はなく健全であることが確認された。
- ③ 材齢 41 年目の中性化深さと各結合材に占める普通ポルトランドセメントの割合の関係は強い相関があり、普通ポルトランドセメントの BFS への置換に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の低下が中性化の進行に対して支配的であったと推測された。
- ④ 材齢 41 年の高炉セメント C 種相当の結合材を使用したコンクリートにおいて、普通ポルトランドセメントを 30%含有し、水結合材比が 50%の場合には、中性化が比較的緩やかに進行し、未中性化部の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が残存することで鉄筋の防食効果を期待できるものと考えられ、実構造物へ適用できる可能性が考えられた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、日鉄住金高炉セメント株式会社 大塚勇介氏に多大なご協力を頂きました。ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 米澤敏男ほか；エネルギー・ CO_2 ・ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム，コンクリート工学，Vol.48, No.9, 2010, pp.69-73.
- 2) 石井泰寛ほか；高炉セメント C 種を用いたコンクリートの初期材齢に与える膨張材の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.71, 2017, pp.81-86.
- 3) 伊代田岳史ほか；コンクリート構造物の炭酸化進行における雨掛り等の環境条件の影響とその進行メカニズムの検討，コンクリート工学論文集，Vol.28, 2017, pp.113-122.
- 4) 松田芳範ほか；実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, 2010, pp.629-634.
- 5) 中原康ほか；スラグセメントコンクリートの研究（その 2），鹿島建設技術研究所年報，Vol.24, 1976, pp.19-24.
- 6) 魚本健人ほか；高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの劣化，コンクリート工学年次論文集，Vol.2, 1980, pp.69-72.
- 7) 土木学会；コンクリート標準示方書[設計編]，2017.
- 8) 郭度連ほか；高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの中性化進行速度の評価，土木学会論文集，No.802/V-69, 2005.5, pp.49-59.
- 9) 坂井悦郎ほか；高炉スラグセメント硬化体の炭酸化反応による多孔化の抑制方法，セメント・コンクリート論文集，No.41, 1995, pp.714-719.
- 10) 安齋剛史ほか；高炉スラグ高含有セメントの水和反応解析，セメント・コンクリート論文集，No.63, 2009, pp.22-27.
- 11) 鈴木一孝ほか；Ca/Si 比の異なる C-S-H の炭酸化，セメント・コンクリート論文集，No.43, 1989, pp.18-23.
- 12) 佐川孝広ほか；高炉セメント C 種を用いた 52 年経過した構造物の長期耐久性に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.28, 2017, pp.47-59.

A Study on the Long-term Durability of High-Volume Blast-Furnace Slag Blended Cement Concretes

Kazuhide Kurata, Manabu Hashimoto and Goro Sakai

In this study, we investigated the durability of high-volume blast furnace slag (BFS) blended cement concrete containing over 70% of BFS for possible general structural applications. The concrete specimens used were exposed to natural outdoor conditions for 41 years on a building rooftop. It was found that the carbonation depth of concrete specimens containing 70% blast furnace slag was about 7 to 9 mm, and about 15 mm for specimens containing 90% blast furnace slag. Despite the high volume of blast furnace slag content (70%) in the concrete specimens, traces of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ which is used in the chemical reaction of blast furnace slag were found in parts which remained uncarbonated. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ increases the alkalinity of the specimen and is thus considered to have a rebar corrosion-inhibiting effect.