

論文

CO₂ 濃度の違いにおける高炉セメントコンクリートの中性化進行とそのメカニズムに関する一考察

廣杉 海琴^{*1}, 石川 英理香^{*2}, 伊代田 岳史^{*3}

Study on the Progression for Carbonation of High-volume Ground Granulated Blast Furnace Cement Concrete on Different CO₂ Concentrations and Mechanism

Mikoto HIROSUGI^{*1}, Erika ISHIKAWA^{*2} and Takeshi IYODA^{*3}

要旨：カーボンニュートラル社会の実現に向け、コンクリート業界では高置換が可能である高炉スラグ微粉末の利用が進められている。一方で、高炉高含有コンクリートは中性化抵抗性が低いことが欠点とされている。本研究では、中性化促進試験と実環境で中性化した際の中性化深さを比較し、促進試験から行う中性化照査が実環境とどの程度乖離するのかを検証した。その結果、促進環境の中性化速度係数から実環境の中性化深さを試算した推定値と、実環境の中性化深さは一致しなかったものの、近似直線で大まかに推定は可能であることがわかった。

キーワード：中性化、高炉スラグ微粉末、養生、実環境と促進環境

1. はじめに

近年、世界全体で地球温暖化への対応が必要に迫られており、日本においても、2050 年までにカーボンニュートラルの実現を目指すことが宣言されている。コンクリート業界においては、高炉スラグ微粉末(GGBS)やフライアッシュ(FA)などの混和材料を使用することで二酸化炭素排出量の削減を目指している。特に混和材料の中でも潜在水硬性のある GGBS は置換率を高く設定することが可能であること、また高炉セメントコンクリートは、長期強度の増進や塩分浸透抵抗性、ASR の抑制などの利点があることから着目されている。一方で、中性化抵抗性が低いことが欠点¹⁾とされているが、高炉セメント高含有コンクリートの適用に向けて、2017 年にコンクリート標準示方書設計編では、中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査を導入した。これは、従来の促進中性化試験においては、高炉高含有セメントを用いた硬化体では著しく中性化速度係数が早くなり、中性化照査を満足しないことを念頭に置いている。つまり、促進試験では CO₂ 濃度の低い実環境の中性化抵抗性は評価できていない可能性が示唆されている。

本研究では、促進試験結果と実環境で長期間かけてゆっくり中性化した際の中性化深さを比較することで、促進試験から行う中性化照査が実環境とどの程度乖離するのかを検証することを目的とした。そ

表-1 コンクリートの計画配合

配合名	W/C (%)	置換率 (%)	s/a	単位量 (kg/m ³)				
				W	C		S	G
					OPC	GGBS		
B0		0			330	-	826	1000
B50		50			165	165	821	993
B60	50	60	46	165	132	198	820	992
B70		70			99	231	819	990
B80		80			66	264	818	989

のために、JIS に規定されている促進中性化試験と実際に雨掛かりが生じない屋根下の実環境に長期暴露した供試体の中性化深さを比較し、促進試験の妥当性および中性化進行のメカニズムについて検討を行った。さらに、養生期間を変えることで養生を施すことによる高炉セメントコンクリートの中性化抵抗性への寄与を実験的に検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および計画配合

セメントは普通ポルトランドセメント (OPC, 密度:3.16g/cm³, 比表面積:3120cm²/g), 高炉スラグ微粉末 (GGBS, 密度:2.91g/cm³, 比表面積:4290cm²/g,

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科社会基盤学専攻 修士課程

*2 芝浦工業大学工学部マテリアルデザイン研究室 研究員

*3 芝浦工業大学工学部土木工学課程担当 教授

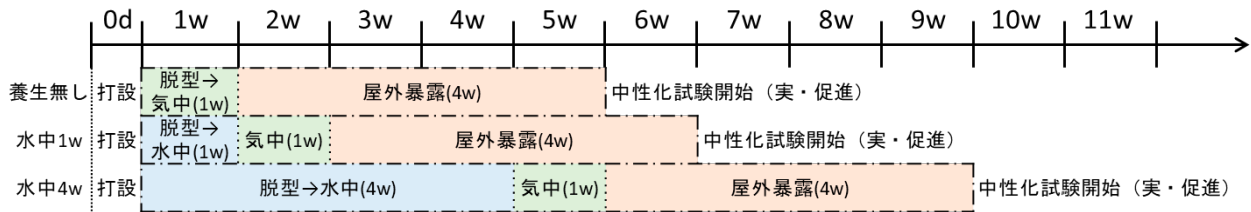


図-1 養生方法と中性化試験の開始材齢

SO₃:2.62%)を使用した。細骨材は千葉県君津市産山砂 (S, 表乾密度:2.62g/cm³, 吸水率:1.48%, 粗粒率:2.57), 粗骨材 (G, 表乾密度:2.70g/cm³, 吸水率:0.32%, 粗粒率:6.61) を用いた。

表-1 にコンクリートの計画配合を示す。水セメント比 (W/C) を 50% とし, BFS は OPC に対し, 0% (B0), 50% (B50), 60% (B60), 70% (B70), 80% (B80) で置換した。

2.2 供試体の作製および養生条件と中性化試験

図-1 に養生方法と中性化試験の開始材齢, 図-2 に中性化試験の流れを示す。供試体は 100×100×400mm の角柱のコンクリートを打込み, 翌日に脱型した。GGBS は養生の影響を受けやすいと言われていることから, 脱型後, 実施工に近い条件として恒温恒湿室(温度:20℃, 相対湿度 60%RH)で気中養生を 1 週施したものと(養生無し)と, GGBS を十分に水和させるために水中養生を 1 週もしくは 4 週(水中 1w, 水中 4w)施したものの計 3 水準で養生を行った。その後, すべて雨掛かりのない直射日光を避けた屋外環境(実測一例の平均: 温度 29℃, 湿度 64%, CO₂ 濃度 520PPM)にて 4 週静置した。

中性化深さの測定は中性化前後で行った。養生終了後, コンクリートを割裂し, 断面に濃度 1% のフェノールフタレイン溶液を噴霧し, 養生終了直後の中性化深さを計測した。その後, 打込み面を含めた 4 面をアルミテープでシールし, 側面 2 面を開放した。供試体は促進環境 (温度 20℃, 相対湿度 60%RH, CO₂ 濃度 5.0%) と実環境 (養生を行った屋外環境と同一) にて静置し, 各材齢で中性化深さを計測した。なお, 中性化深さは, 開放面から赤紫色に呈色した部分までの長さを各側面 6 点計測し, その平均値を中性化深さとした。

3. 中性化進行に関する促進と実環境の相違

3.1 中性化試験開始時の中性化深さの比較

図-3 に養生終了後の GGBS 置換率ごとの中性化深さの結果を示す。いずれの養生条件においても, GGBS 置換率が増加するに伴い, 中性化深さは大きくなった。養生方法で比較すると, GGBS 置換率によらず, 養生期間が長いほど, 中性化深さは小さく

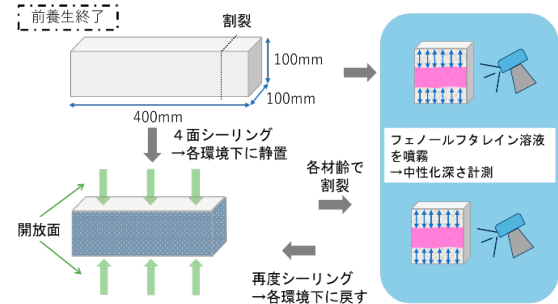


図-2 中性化試験の流れ

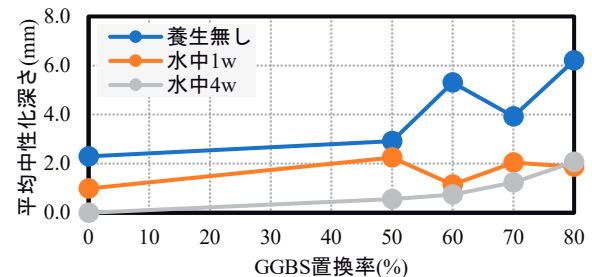


図-3 前養生終了時の中性化深さ

なった。これより, GGBS が高含有でも, 養生期間を長くすることで, 中性化を抑制できることがわかった。また, B80 では養生無しによる中性化深さが著しく大きいことがわかった。

3.2 促進環境における中性化

図-4 に促進環境における養生条件ごとの中性化深さの経時変化を示す。まず GGBS 置換率で比較すると, 置換率が高くなるにつれて, 中性化深さは大きくなることがわかった。次に, 養生方法で比較すると, 養生期間が長くなるにつれて, 中性化深さは小さくなった。

次に GGBS 置換率と中性化速度係数の関係を図-5 に示す。なお, 中性化速度係数は以下の式(1)から算出した。

$$A = X / \sqrt{t} \quad (1)$$

ここで, A : 中性化速度係数 (mm/√week),

X : 中性化深さ (mm)

t : 経過時間 (week)

GGBS 置換率が高くなるに伴い, 中性化速度係数も大きくなることがわかった。養生方法に着目すると, 養生期間が長くなるほど, 置換率による中性化

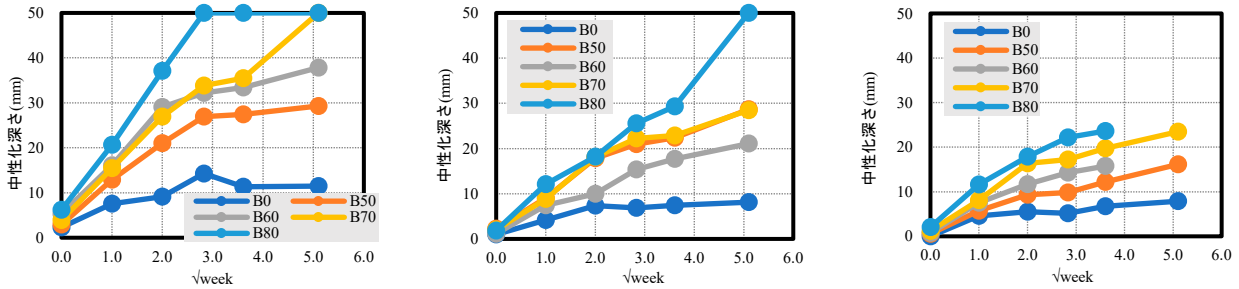


図-4 促進環境における中性化深さの経時変化

(左：養生無し 中：水中 1w 右：水中 4w)

速度係数の差は抑えられていることがわかった。これらのことから、GGBS の置換率を大きくしても、養生期間を長めに設定すれば、中性化の抑制が可能であることが考えられる。

3.3 実環境における中性化

図-6 に材齢 400 週前後の中性化深さの経時変化の結果を示す。GGBS 置換率が高いほど、中性化深さが大きいことがわかる。また、養生が長期になるほど、中性化深さは小さくなることもわかった。これらは、促進環境でも確認されたことから、CO₂ 濃度に関係なく、GGBS を多く置換するにつれ、中性化しやすいが、長く養生することで、中性化を抑制することが可能であることが考えられる。

3.4 促進試験から推定した中性化深さと実環境の比較

促進環境で得た中性化速度係数を魚本・高田式²⁾をもとに、以下の式(2)および式(3)、式(4)を用いて二酸化炭素濃度の換算³⁾を行い、実環境下の二酸化炭素濃度における中性化速度係数に変換した。

$$K_c^* = (2.804 - 0.847 \log C) \sqrt{C} \quad (2)$$

$$K = K_5^* / K_{0.05}^* \quad (3)$$

$$A_t = A_a \cdot K \cdot \sqrt{7/365} \quad (4)$$

ここで、

K_c^* : CO₂ 濃度が C のときの中性化速度

K: 実環境の CO₂ 濃度 (C=0.05%) に対する促進環境の CO₂ 濃度 (C=5%) の時の係数

C: CO₂ 濃度 (%)

A_t : 換算後の中性化速度係数 (mm/√year)

A_a : 促進環境で得た中性化速度係数 (mm/√week)

図-7 に促進試験から求めた中性化速度係数から換算した約 400 週での中性化深さの推定値と実環境での中性化深さとの比較を示す。今回の結果は、いずれの養生方法ならびにセメント種類においても促進環境から推定した中性化深さは実環境の中性化深さと高い相関関係が認められる。このことから、この方法により実環境における中性化深さを推測できるように考えられる。しかしながら、いずれの養生・セメント種類においても実環境の中性化深さが推定

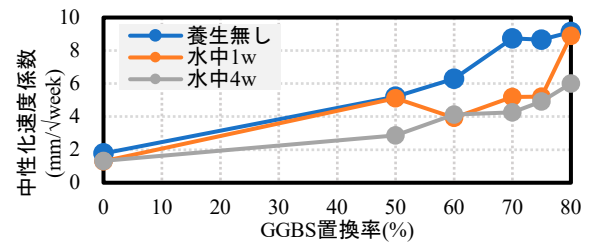


図-5 GGBS 置換率と中性化速度係数

中性化深さを上回っている。詳細をみると、養生無しの条件においては、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、推定中性化深さが小さく見積もられている。養生を施すことで、セメント種類ごとの影響が著しく小さい傾向にあるといえる。そこで、図-8 にすべての養生・セメント種類における推定中性化深さと実環境での中性化深さの関係をまとめた。普通コンクリート (B0) の方が、高炉セメントコンクリートに比べてさらに、推定中性化深さが実際よりも過少に見積もられている。一般的には、促進環境においては CO₂ 濃度が高いため、CH が少なくアルカリ量が低い高炉セメントでは、CO₂ が奥に浸透しやすい状態であると考えられる。一方で、普通セメントにおいては、促進環境では CH を完全炭酸化しないままに、CO₂ が奥に浸透する結果となると想定される⁴⁾。また、既往の研究を参考にすると、普通コンクリートにおいては、CH の炭酸化によりカルサイトが析出し、空隙を緻密にするが、高炉セメントコンクリートでは、CSH の崩壊を伴い、空隙の粗大化が生じることが示されている⁵⁾。これは、CSH により形成していた複雑な空隙構造が、単純な空隙構造となる可能性を示唆しており、CO₂ の浸透をさらに助長することが考えられる。そのため、促進環境の方が高炉セメントコンクリートにおいて二酸化炭素の浸透が大きくなり、推定が困難であると考えていた。本検討においては、実環境は雨水がかからない屋外の屋根の下であったが、湿度は高い状態に保たれるところであり、さらに気温の変化のみならず、エアコン室外機による雰囲気温度が高い状況に設置

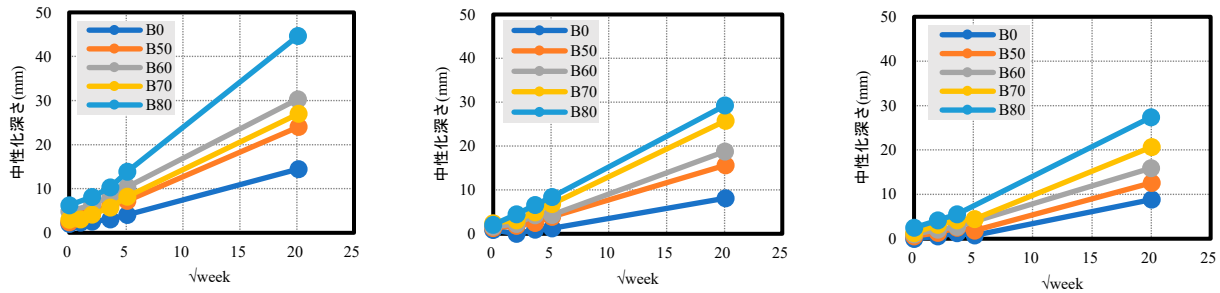


図-6 実環境における中性化深さの経時変化
(左：養生無し 中：水中 1w 右：水中 4w)

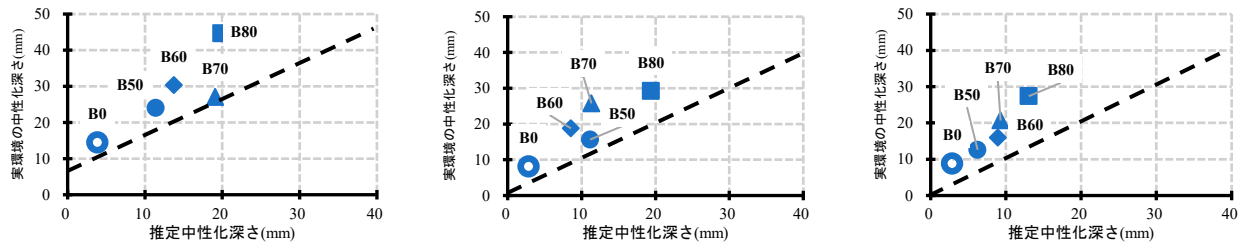


図-7 推定値と実環境との中性化深さの関係
(左：養生無し 中：水中 1w 右：水中 4w)

されていたことを考えると、通常よりも炭酸化速度が速く進行する条件であったのではないかと考えられる。今後は、この原因究明に加え、促進環境で生じる空隙の粗大化など、炭酸化による影響が実環境でも生じるかを検証していく予定である。

4. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 養生期間を長くすることで中性化進行は大幅に抑制された。GGBS の置換率が高いほどその傾向は強くなった。
- (2) OPC のみ (B0) の場合は中性化材齢の経過に伴い中性化進行が停滞する傾向が見られた。一方で、GGBS 置換率が高く、養生短い場合においては中性化進行が加速する傾向が見られた。
- (3) 促進試験から求めた中性化速度係数から実環境の中性化深さを試算した推定値と、実環境の中性化深さとは一致しなかったものの、近似直線で大まかに推定は可能であることが伺えた。しかし、OPC のみの場合と GGBS を添加した場合で分けてみると、GGBS を添加した場合の方が、推定深さが小さく算出される傾向が見られた。

参考文献

- 1) 豊村恵理, 伊代田岳史: 異なる二酸化炭素濃度環境下における炭酸化メカニズムに関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.769-774, 2013

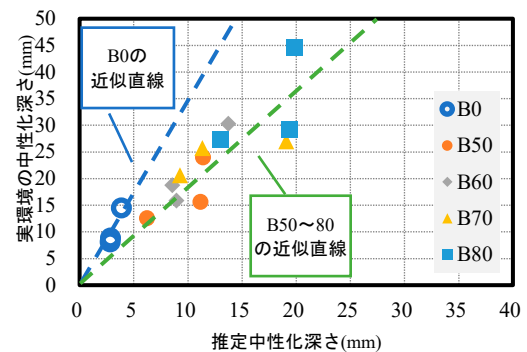


図-8 推定値と実環境との中性化深さの関係
(全養生方法)

- 2) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.451, V-17, pp.119-128, 1992.8
- 3) 井出朋孝, 濱崎仁, 尾上稀一, 松沢晃一: 環境区分ごとのコンクリートの中性化速度予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.509-514, 2020
- 4) 伊代田岳史, 中村絢也, 後藤誠史: セメント硬化体の炭酸化機構の検討—実環境と促進環境の相違について—, セメント・コンクリート論文集, 72 巻 (2018), pp. 225-232, 2019
- 5) 野口優理香, 伊代田岳史: 材齢初期の強制炭酸化が高炉高含有硬化体の強度発現に与える影響とそのメカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, pp.2028-2033, 2025