

論文 実環境と促進環境において中性化した高炉スラグ微粉末含有コンクリートの物質移動抵抗性の把握

廣杉 海琴*¹・伊代田 岳史*²・石川 英理香*³・江口 康平*⁴

要旨：高炉スラグ微粉末を多量に含む高炉スラグ微粉末高含有コンクリートを対象に、実環境(CO₂濃度約0.05%)と促進環境(CO₂濃度 5%)において中性化した後の物質移動抵抗性を評価した。その結果、全断面中性化後の透気係数および総空隙率は、CO₂濃度によらず同程度となったが、水分占有率および水分保持率では、促進環境の方が実環境と比較して若干水分移動速度が大きくなることが確認された。また、同一配合において中性化部と未中性化部を比較した結果、中性化部は「水が入りやすく、抜けやすい」特性を示した。さらに水分移動特性の定量化を試みた。

キーワード：高炉スラグ微粉末、中性化、二酸化炭素濃度、実環境、促進環境、物質移動抵抗性

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向け、ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末（GGBS）で多量置換したコンクリート（高炉コンクリート）の普及が進められている。高炉コンクリートは長期強度発現性や塩分浸透抵抗性に優れる一方、中性化抵抗性が課題である。中性化はアルカリ性を低下させ、O₂やH₂Oの浸透により鋼材腐食を誘発する恐れがある。既往研究¹⁾²⁾では、促進試験における高濃度CO₂環境での中性化（CO₂濃度 5%）後の高炉コンクリートはGGBS置換率の増加に伴い物質移動抵抗性の大幅な低下が報告されている。しかし、CO₂濃度の低い実環境（CO₂濃度約0.05%）下での中性化とでは、濃度による中性化の進行速度が異なるため中性化後のコンクリートの物質移動抵抗性に違いがあると考えられるが、現在は十分に把握されておらず、高濃度CO₂環境との相関についても明確な知見が得られていない。そこで、GGBS高含有コンクリートを対象に、実環境と促進環境の各環境下で中性化させた際の物質移動抵抗性を評価し、環境条件の違いによる影響について検討した。

2. 実環境と促進環境で中性化したコンクリートの物質移動抵抗性

2.1 使用材料および計画配合

表-1に使用材料の諸元、表-2に計画配合を示す。実

環境での中性化には長期の時間が必要なため促進環境の試験とは別の日程で実施した。そのため、使用した材料の密度にわずかな差異はあるものの、同一の計画配合となるように設定した。セメントには、普通ポルトランドセメント（OPC）を用いた普通コンクリート（N）、およびOPCの多くを高炉スラグ微粉末（GGBS）で置換した高炉コンクリートならびに改良型高炉セメント C 種（BC'）³⁾を使用したコンクリートを対象とした。

2.2 供試体および暴露・養生条件

供試体はφ100×200mmの円柱供試体とした。目標空気量は4.5±1.5%とした。実環境暴露試験（以下、実環境）および促進環境試験（以下、促進環境）におけるそれぞれ

表-1 使用材料の諸元

材料名		諸元
水(W)	水道水	-
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(OPC)	密度:3.16g/cm ³ (実), 3.15g/cm ³ (促進), SO ₃ : 2.27%
	改良型高炉セメント C 種(BC')	密度:2.96g/cm ³ , SO ₃ : 3.49%(実), 3.54%(促進)
混和材	高炉スラグ微粉末(GGBS)	4000 ブレーン(石膏有), 密度:2.91 g/cm ³ SO ₃ : 2.1%(実), 2.09%(促進)
細骨材(S)	混合砂	表乾密度:2.62g/cm ³ (実), 2.61g/cm ³ (促進)
粗骨材(G)	碎石 2005	表乾密度: 2.7g/cm ³ , 粗粒率: 6.61

表-2 コンクリートの計画配合

配合名	W/B (%)	GGBS 置換率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						暴露条件	Air (%)	slump (cm)	Ct (°C)	全断面中性化した供試体
				W	B			S	G					
					OPC	GGBS	BC'							
N	50	0	46	165	330	—	—	826	1000	実	5.4	16.5	24.8	
								823	999	促進	3.6	8.5	21.4	
B50		50			165	165	—	821	993	実	5.1	11.0	25.0	
								818	993	促進	4.2	10.0	21.1	
B80		80			66	264	—	818	989	実	4.0	10.0	24.6	○
								821	989	促進	4.8	14.0	19.6	○
BC'		—			—	—	330	818	989	実	3.5	11.0	25.2	○
								815	989	促進	3.2	13.0	20.6	○

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 芝浦工業大学 工学部 教授 土木工学課程担当 博士 (工学) (正会員)

*3 芝浦工業大学 工学部 マテリアルデザイン研究室 修士 (工学) (正会員)

*4 (株)竹中工務店技術研究所 建設・環境基盤研究部建設材料グループ 研究主任 博士 (工学) (正会員)

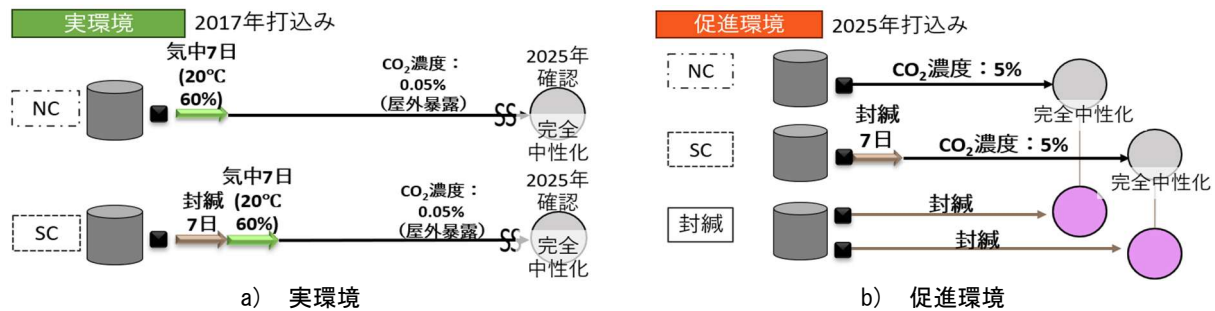


図-1 各環境の養生フロー

れの養生フローを図-1 に示す。実環境（2017 年作製）では、打込み翌日脱型し、20℃60%RH の恒温恒湿室内に 7 日間静置後、雨掛かりのない屋外（平均温度 26℃、平均湿度 65%RH、CO₂ 濃度約 0.05%）へと暴露したものを「NC」とした。また初期養生の影響を確認するため、打込み翌日に脱型し 7 日間封緘養生の後 NC 同様に恒温恒湿室で 7 日間静置後屋外環境へと暴露したものを「SC」とした。一方促進環境（2025 年作製）では、中性化槽（温度 20℃、60%RH、CO₂ 濃度 5%）にて、打込み翌日の脱型直後から中性化を開始したものを「NC」、打込みから 7 日間型枠内で封緘養生後、中性化を開始した「SC」を設定した。なお、両環境で暴露期間は異なるものの、本研究では比較のため初期養生条件の表記（NC/SC）を統一した。

また促進環境試験において、中性化を受けてない供試体として、打込み後型枠存置したまま封緘養生をし、促進中性化を施した条件の供試体が全面中性化したとき、同材齢で試験を実施したものを「封緘」とした。

2.3 試験項目

十分な期間中性化を行った後、供試体にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、全断面中性化を確認した。なお、全断面中性化した配合は表-2 に示す。その後、供試体中央部から厚さ 50mm の円盤供試体を切り出し、以下の手順で試験を行った。なお本研究では、物質移動抵抗性を評価するため、後述する一連の試験を同一の供試体を用いて実施した。

(1) 透気試験

切り出した円盤供試体を 40℃環境（相対湿度 10%RH）下で乾燥させ、前日比の質量変化率が 0.1%以下となった時点を経過時間とみなした。乾燥状態となった供試体を 0.1MPa の圧力で空気を透過させた。透過した空気量を水上置換法によりメスシリンダーを用いて計測し、式(1)に基づき透気係数を算出した。

$$K = \frac{2LP_1}{(P_1^2 - P_2^2)} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここで、K：透気係数（cm⁴/N・s）、L：供試体厚さ（cm）
P₁：載荷圧力（N/cm²）、P₂：流出側圧力（大気圧として

0.1N/cm²を使用）、Q：透気量（cm³/s）、A：透気面積（cm²）

(2) 浸漬吸水試験

透気試験終了後の供試体の側面をアルミテープでシーリングし両端面から水分吸水させた。供試体全体を水中に浸漬させ所定の時間経過ごとに吸水質量測定を行った。

(3) 空隙率試験

浸漬吸水試験終了後、試験体を水に浸し、真空環境下で飽水状態にした。飽水状態における飽水質量および水中質量を測定した。透気試験前に測定した 40℃乾燥（相対湿度 10%RH）で質量恒量になった時点の質量を絶乾質量としこれらの値を用い、式(2)のアルキメデス法に基づき総空隙率を算出した。

$$\text{総空隙率(\%)} = \frac{\text{飽水質量} - \text{絶乾質量}}{\text{飽水質量} - \text{水中質量}} \times 100 \quad (2)$$

(4) 水分逸散試験

飽水状態の供試体表面の水分をふき取った後、20℃60%RH に制御された恒温恒湿室内に静置した。所定の時間経過ごとに質量測定を行った。

2.4 各水分移動特性の定義と算出方法

前述の浸漬吸水試験および水分逸散試験により得られた質量データを用いて、コンクリート内部の空隙における水分の存在割合を評価するために、以下の 2 つの指標を定義した。

(1) 水分占有率

浸漬吸水試験より得られた吸水質量を用いて、コンクリートの空隙に対して水が占めている割合を「水分占有率」と定義する。式(3)に示す算出式を用いて、吸水過程における任意の経過時間 x(min)でのコンクリートの空隙総量に対する水の占有率を表す。

$$\text{水分占有率(\%)} = \frac{x(\text{min})\text{時の吸水質量} - \text{絶乾質量}}{\text{飽水質量} - \text{絶乾質量}} \times 100 \quad (3)$$

(2) 水分保持率

水分逸散試験より得られた逸散質量を用いて、飽水状態のコンクリートに対して水が残存している割合を「水分保持率」と定義する。式(4)に示す算出式を用いて、飽水状態から恒温恒湿環境下に静置したことでコンクリートの内部から水分が蒸発・逸散における任意の経過時間

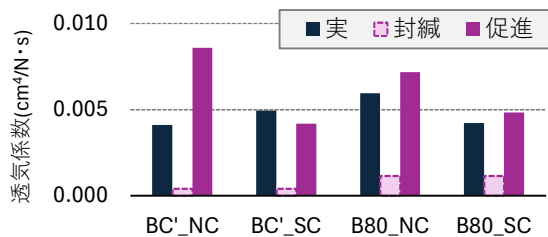


図-2 透気係数

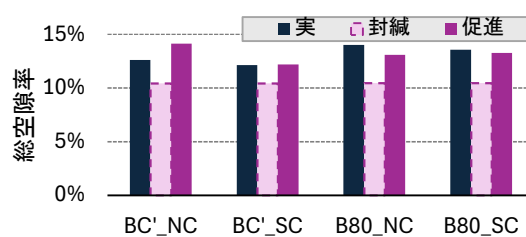
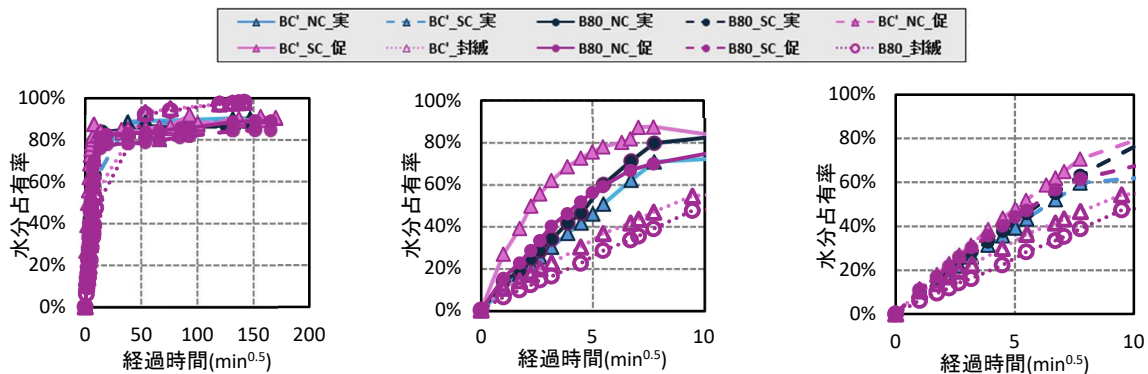
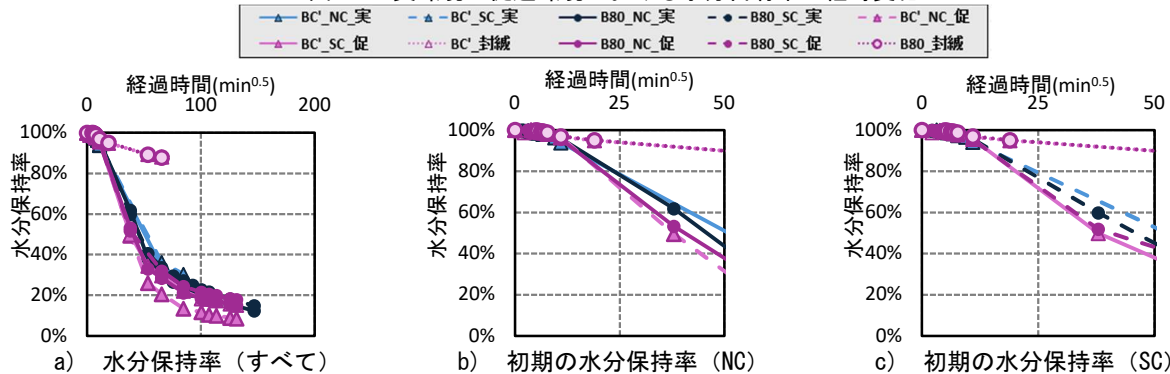


図-3 総空隙率



a) 水分占有率 (すべて) b) 初期の水分占有率 (NC) c) 初期の水分占有率 (SC)

図-4 実環境と促進環境における水分占有率の経時変化



a) 水分保持率 (すべて) b) 初期の水分保持率 (NC) c) 初期の水分保持率 (SC)

図-5 実環境と促進環境における水分保持率の経時変化

$x(\text{min})$ でのコンクリートが保持している水分量を表す。

$$\text{水分保持率}(\%) = \frac{x(\text{min})\text{時の逸散質量} - \text{絶乾質量}}{\text{飽水質量} - \text{絶乾質量}} \times 100(4)$$

2.5 試験結果と考察

(1) 透気試験

図-2に透気試験の結果を示す。封緘と比較して実環境も促進環境も透気係数は増加することが分かった。実環境と促進環境を比較すると、BC'_NCは促進環境の透気係数は実環境の約2倍になっているが、封緘養生1週間施したBC'_SCでは同程度であった。一方GGBSの置換率が増加したB80では養生条件に依らず、実環境と促進環境の透気係数は同程度であった。BC'_NCが実環境と促進環境で大きな差ができた要因は今後検討する。次に、養生条件の影響に着目すると、NCはSCよりも透気係数が大きくなった。初期養生の有無は中性化後の透気抵抗性に影響を与えていることが示された。このことから、高炉コンクリートが中性化すると、中性化していない場合と比較し、CO₂濃度によらず透気抵抗性が低下するこ

とがわかった。

(2) 空隙率試験

図-3に総空隙率の結果を示す。封緘と比較して、中性化後の実環境と促進環境の総空隙率は大きく、CO₂濃度に依らず同程度になることが示された。

(3) 浸漬吸水試験

図-4に浸漬吸水試験による水分占有率の結果を示す。150min^{0.5}までの水分占有率に着目すると、封緘と中性化したNC、SCを比較し、封緘の方が質量恒量時の水分占有率が100%近くまで増加した。図-4(b)、(c)の吸水開始から10min^{0.5}までの初期挙動に着目すると、中性化したNC、SCは封緘と比較し、水分占有率の増加速度が大きい傾向を示した。実環境と促進環境を比較すると、促進環境の方が若干飽水速度は大きいことがわかった。また、NCとSCを比較すると、実環境と促進環境の差はSCの方が小さくなっていることがわかった。つまり、初期養生を施すことで中性化後の水分の浸透速度の増大を抑制することが可能であることが確認できた。

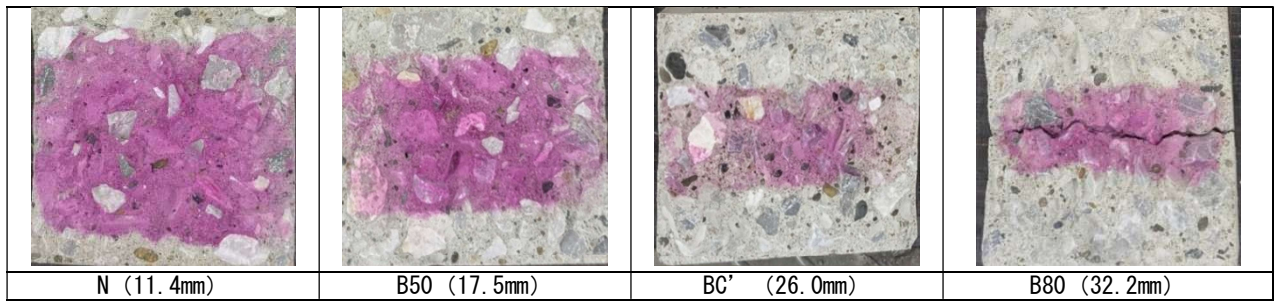


写真-1 中性化した断面の様子 (平均中性化深さ)

(4) 水分逸散試験

図-5 に水分逸散試験による水分保持率の結果を示す。なお、封緘の供試体はまだ質量恒量にはなっておらず、測定継続中である。質量恒量になった中性化した NC と SC の収束値は、環境によらず同程度であることがわかる。ここで図-5 (b), (c) の逸散開始から 50min^{0.5} までの初期の水分保持率の経時変化に着目すると、中性化した NC と SC は封緘と比較し、水分保持率の減少速度が大きいことがわかった。また促進環境は実環境と比較して、水分保持率の減少速度が若干大きいことがわかった。

以上の結果より、実環境と促進環境において全面中性化後の高炉コンクリートの物質移動抵抗性を比較すると、透気抵抗性は同程度であるが、水分移動特性は促進環境のほうが実環境と比較し、若干水が浸透やすく、抜けやすいことが確認された。また、封緘のように中性化していない高炉コンクリートは、水が浸透しにくく、抜けにくいことも確認された。

3. 中性化部および未中性化部における物質移動抵抗性の比較

3.1 供試体概要

本章では、実環境で中性化した同一試験体において中性化域と未中性化域を切り分けて物質移動抵抗性を評価した。

供試体は、2.1 の配合と 2.2 の養生フローに示した実環境暴露時と同様に作製した 100×100×400mm の角柱供試体で初期養生条件は「SC」を用いた。「SC」の初期養生終了後、打込み面を含む 4 面をアルミテープでシーリングし、それ以外の 2 面を開放した状態で屋外環境にて静置した。

材齢 8 年が経過した供試体を割裂し、その断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した結果と中性化深さの平均値を写真-1 に示す。中性化深さは、GGBS 置換率の増加に伴い中性化範囲が拡大する傾向が視認できる。

3.2 試験概要

中性化範囲を確認した供試体からフェノールフタレイン溶液で未呈色部分の中性化部 (C) および呈色部分の

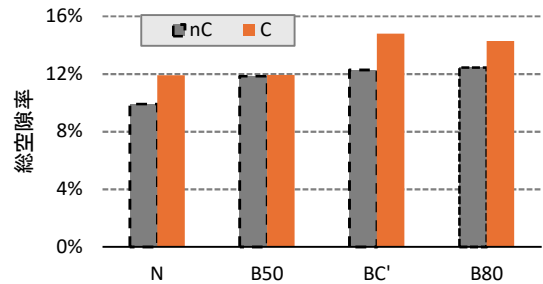


図-6 中性化有無における総空隙率

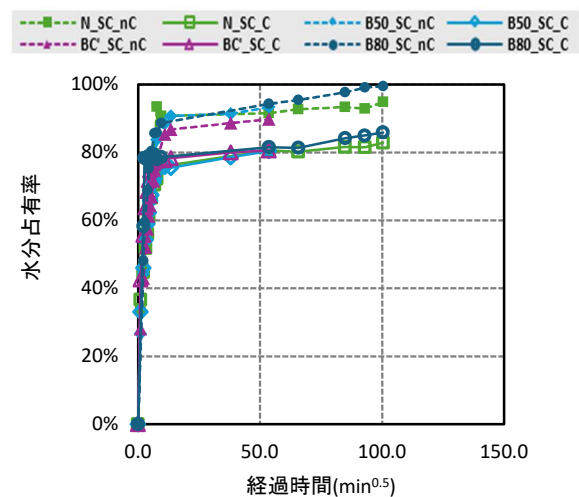


図-7 中性化有無における水分占有率の経時変化

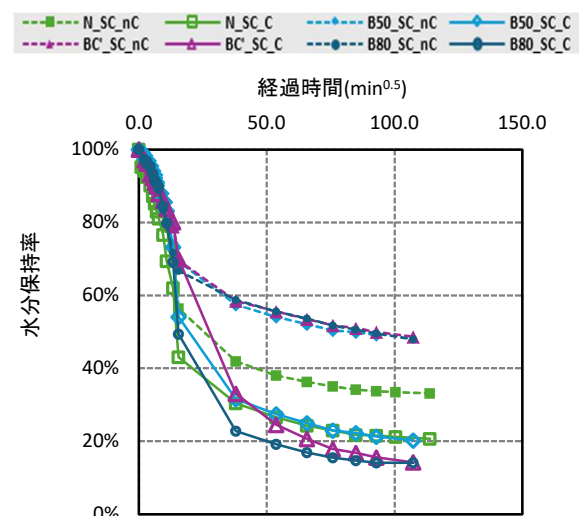


図-8 中性化有無における水分保持率の経時変化

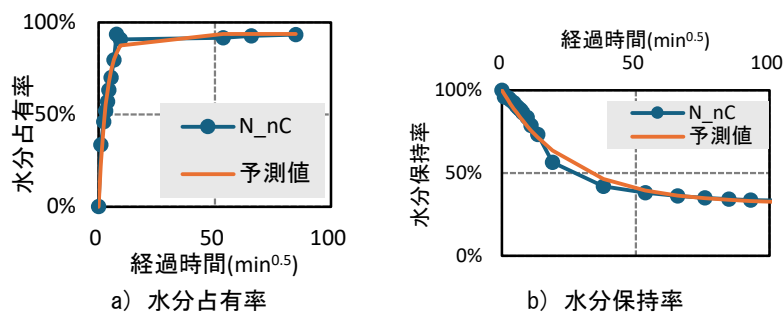


図-9 データフィッティングの結果例 (N_nC)

表-3 フィッティングの相関係数

相関係数	水分占有率	水分保持率
N_nC	0.98	0.99
N_C	0.99	0.99
B50_nC	1.00	0.99
B50_C	0.99	0.99
BC'_nC	1.00	1.00
BC'_C	0.99	0.99
B80_nC	1.00	0.99
B80_C	0.97	0.99



図-10 水分占有率における係数比較

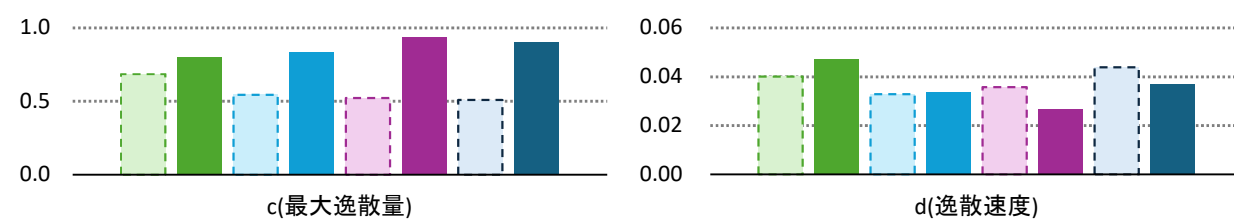


図-11 水分保持率における係数比較

未中性化部 (nC) を試験片として切り出した。試験片は、2.3 に準じて総空隙率、水分占有率、水分保持率の物質移動抵抗性を評価した。なお、切り出した試験片は中性化範囲が異なることより、配合ごとに形状が一定ではないため、側面シーリングは施さず全面開放状態で試験した。また、試験の順序として、試験片の水分状態が一定ではなかったため、まず飽水処理を施した後に、飽水質量と水中質量の測定を実施した。次に、水分逸散試験を行い、その後に 40℃環境下で乾燥（質量恒量を確認）させ、最終的に浸漬吸水試験を行う手順とした。

3.3 中性化有無における水分移動の違い

図-6 に切り出した試験片の総空隙率を示す。未中性化部は N を除いて 12%程度であることがわかった。一方中性化部は、BC', B80 である GGBS 置換率の多い配合ほど総空隙率が大きいう結果であった。

図-7 に吸水試験による水分占有率の経時変化を示す。いずれの配合も、未中性化部（破線）は時間経過とともに、水分占有率が 100%近くまで緩やかに増加するのに対し、中性化部（実線）は吸水開始後急速に平衡状態に達し、質量恒量時の水分占有率は 85%程度にとどまった。

図-8 に水分逸散試験による水分保持率の経時変化を示す。中性化部は未中性化部と比較して、逸散開始後から急激な減少速度を示した。最終的な水分保持率に関しても、未中性化部は 30%程度であるのに対し、中性化部は 10%程度まで減少していることが示された。

以上の結果から、中性化部は未中性化部と比較して、水分移動に関して、「水が入りやすく、抜けやすい」特性を有していることが確認された。野口らの報告では⁴⁾、炭酸化することで連結した空隙構造を形成することで水分逸散が多く生じると述べていることから、今回も同様の可能性を示している。

4. 物質移動抵抗性の定量評価

4.1 定量評価に向けた手法

各コンクリートの吸水・逸散特性を数値化して定量的に取り扱えるようにするため、水分占有率および水分保持率の経時変化に対して非線形最小二乗法によるデータフィッティングを行い、得られた係数を用いて比較した。

(1) 水分占有率のモデル

水分占有率 y の経時変化に対し、式(5)を用いた。

$$y = 100 \cdot a(1 - e^{-bx}) \quad (5)$$

ここで、係数 a は収束値であり、供試体が吸水可能な吸水量を指す。係数 b は速度係数であり、飽水状態に達するまでの吸水速度を表している。

(2) 水分保持率のモデル

水分保持率 y の経時変化に対し、開始点を 100% に固定した式(6)を用いた。

$$y = 100 \cdot (1 - c(1 - e^{-dx})) \quad (6)$$

ここで、係数 c は収束値であり、20℃60%RH 環境下においてコンクリート内部から水分が逸散し平衡状態に達したときの水分保持率、すなわち最大逸散量を指す。係数 d は水分占有率と同様、平衡状態に達するまでの逸散速度を表している。

4.2 フィッティング精度の確認

データフィッティングの例として、配合「N_nC」の結果を図-9 に示す。どの配合においても実測値とモデル式から得られた予測値は極めて良好に一致している。全配合の実測値と予測値の相関係数を表-3 に示す。概ね 0.99 程度であることを確認したため、本モデルによってコンクリートの水分移動特性を相関係数上、高い精度で近似可能であることが示された。

4.3 係数比較による定量評価と考察

配合ごとの水分占有率の係数比較を図-10、水分保持率の係数比較を図-11 に示す。水分占有率の係数において、最大吸水量を表す係数 a は、中性化部 (C) は未中性化部 (nC) と比較すると、配合に依らず C は nC よりも小さくなることがわかった。吸水速度を表す係数 b に着目すると、C は nC よりも大きいことがわかった。また C では GGBS 置換率が増加するに伴い、吸水速度は大きくなることがわかった。水分保持率の係数において、最大逸散量を指す係数 c は、C は nC と比較して、配合によらず大きいことがわかった。一方逸散速度を表す係数 d は、いずれの配合においても同程度であった。図-8 の水分保持率の経時変化を示した実測データでは nC はゆるやかに減少するのに対し、C は急速に減少していることが確認できる。係数 d では実測データの傾向が表現されなかった。今回水分保持率のモデル式が逸散速度を表す係数 d と実測データに乖離が表れたため、今後モデル式を精査する必要がある。

5. まとめ

これまでの結果よりわかったことを以下にまとめる。

- (1) 実環境と促進環境において中性化した後のコンクリートの物質移動抵抗性を測定した結果から、中性化後のコンクリートは CO₂ 濃度に依らず、同程度の総空隙率と透気係数ではあるが、水分移動特性につい

ては、促進環境の方が実環境と比較して、吸水速度と逸散速度が急速であるため、CO₂ 濃度が高いほど水が入りやすく、抜けやすいことが確認された。

- (2) 同一コンクリートで中性化部と未中性化部を切り出し、水分移動特性を測定した結果、中性化部は未中性化部と比較して、総空隙率が大きく、水が入りやすく、水が出やすいことがわかった。このことから、中性化することで「水は入りやすく、抜けやすい」特性を有することが明らかになった。
- (3) 水分占有率・水分保持率から水分移動の最大容量と速度を定量的に評価するため、それぞれの経時変化に対しデータフィッティングを行い、吸水と逸散の特性を数値として抽出した。その結果、中性化部は未中性化に比べ、吸水量は小さいが、吸水速度は大きくなることがわかった。なお、この傾向は GGBS 置換率増加に伴っていた。

これらの結果から、中性化した高炉コンクリートは、GGBS 置換率が多くなるにつれ、水が浸透しやすく、実測の結果からは水が逸散しやすいことが明らかになった。これはつまり、高炉コンクリートは中性化することで、コンクリート内部が連結した空隙構造の⁴⁾ため、水は入りやすくなるが、水分逸散時に水が出ていきやすいということである。

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務にて得られたものです。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 水野博貴, 末木博, 伊代田岳史: 炭酸化した高炉セメント硬化体の空隙構造変化が水分浸透性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.665-670, 2019
- 2) 三坂岳広, 末木博, 伊代田岳史: 高炉コンクリートの炭酸化が物質移動抵抗性に与える影響, 第 72 回セメント技術大会講演要旨, pp.248-249, 2018
- 3) 小島正朗, 辻大二郎, 依田和久, 橋本学: エネルギー・CO₂ ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.776-781, 2021.9
- 4) 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