

GGBS 高含有コンクリートの炭酸化による強度特性とその対応策の検討

芝浦工業大学 大学院理工学研究科社会基盤学専攻

○野口 優理香

芝浦工業大学 工学部土木工学科

石川 英理香

芝浦工業大学 工学部土木工学課程

伊代田 岳史

株式会社竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部

江口 康平

1. はじめに

日本では2050年までにCO₂排出量と吸収量の総和を、実質ゼロにすると宣言した。コンクリート業界ではセメント製造時のCO₂排出量を削減する取り組みとしてセメントの代替材料であり、産業副産物である高炉スラグ微粉末（以下 GGBS）などを用いたコンクリートの開発が進められている。さらに GGBS は潜在水硬性により長期強度の増進や耐久性の向上が期待できる。一方で GGBS 高含有コンクリートは周囲の環境に敏感であり、また炭酸化しやすいことで知られており、このような環境における GGBS 高含有コンクリートの物理的性質を把握しておく必要がある。本検討では、強制炭酸化が GGBS 高含有コンクリートの強度発現性に与える影響の把握とその対応技術の模索を目的とした。

2. GGBS 高含有コンクリートの炭酸化による圧縮強度発現性の把握

GGBS 高含有コンクリートを静置する環境の CO₂ 濃度が圧縮強度に与える影響を把握するために、長期間炭酸化環境に静置したコンクリート供試体の圧縮強度を、同一期間他の環境に静置したものと比較をした。

2. 1 試験概要

コンクリートの計画配合を表1に、コンクリートの炭酸化条件を図1に示す。まず本検討では(A)の配合を用いた。コンクリートを作製後、標準水中養生(W)と気中環境(A)(温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 0.04%)と炭酸化環境(C)(温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 5%)に供試体を静置した。また、初期の養生環境がその後に及ぼす影響の把握のために、材齢 28 日まで標準水中養生を施した供試体を気中環境に静置した(WA)。材齢 91 日に JIS A 1108 に準拠し圧縮強度試験を実施した。

2. 2 試験結果および考察

図2に圧縮強度の結果を示す。また、数字は各配合の水中養生に対する比率を示す。N では各養生の圧縮強度に大きな差は認められなかった。一方で、GGBS 高含有である B70、B80 では水中養生を施したものと比較し脱

表1 コンクリートの計画配合

	No.	WB (%)	sa (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	OPC	GGBS (SO ₂ %)	γ-C ₂ S	S	G
A	N	55	50	168	305	-	-	897	932
A	B70			165	90	210(4%)	-		
A	B80			164	60	239(2%)	-		
B	B70(2%)	50	170	102	102	238(2%)	-	871	905
B	B70(4%)					238(4%)	-	870	904
B	B70(6%)					238(6%)	-	869	903
C	B70					238(4%)	-	836	941
D	B70 _γ	48		71	167(4%)	102	-		

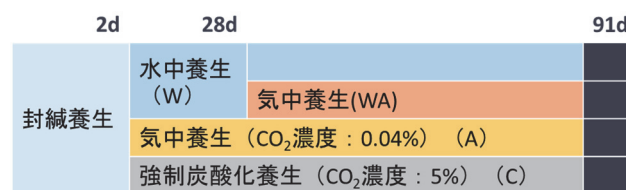


図1 コンクリートの炭酸化条件

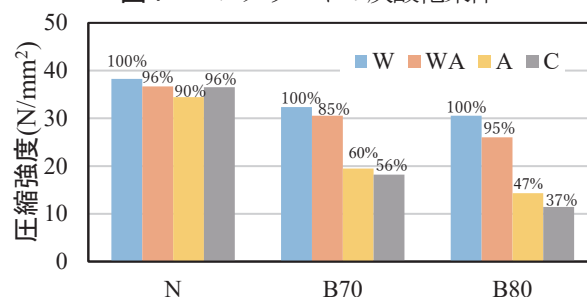


図2 材齢 91 日における圧縮強度結果

型直後から乾燥環境に静置したものは圧縮強度の発現が低下した。

(1) GGBS 含有量の影響

B70 と B80 を比較すると、いずれの養生方法においても B80 の圧縮強度が小さい結果が得られた。しかし、水中養生に対する割合から比較すると、B70 では炭酸化環境においても 56% の強度発現が得られたのに対し、B80 では気中環境においても 47% の強度発現であった。既往の研究により GGBS の置換率が 70% 以上の場合、炭酸化時にモルタルの空隙が増大することが報告されている¹⁾ことから、コンクリートでも同様の現象が生じていると推察される。

(2) CO₂濃度の影響

GGBS 高含有コンクリートの気中養生と強制炭酸化養生を比較すると、強制炭酸化養生のほうがより水中養生と比較した割合が小さい結果が得られた。CO₂濃度が高いほど中性化しやすいことから、中性化領域が大きいほど圧縮強度への影響を強く受けると推察される。

3. GGBS 高含有コンクリートの強制炭酸化による圧縮強度低下への緩和技術の模索

GGBS 高含有コンクリートの強制炭酸化による圧縮強度低下への対応策として、材料的なアプローチとして

(1) GGBS 中の SO₃ 量の増加、(2) CO₂ と反応し硬化する γ -C₂S を主成分とした特殊混和材（以下 γ -C₂S）添加、ならびに炭酸化前の硬化体の骨格の形成を目指し、(3) 前養生日数の増加について検討を行った。ここでは炭酸化の影響を大きくすることを考え、強制炭酸化養生（CO₂ 濃度 20%）とし、コンクリートが完全に炭酸化（割裂した供試体にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、呈色しない状態）時の強度を同一材齢まで封緘養生を施した供試体の圧縮強度との比較を行った。結果の整理のために封緘養生に対する強度比を図中に数値で示した。

3. 1 GGBS 中の SO₃ 量の影響

コンクリートの計画配合を表 1 (B)、炭酸化条件は図 3 の赤枠とした。圧縮強度試験結果を図 4 に示す。封緘養生を施した場合には SO₃ の添加量が多いほど、圧縮強度が大きい結果が得られたが、完全炭酸化した供試体では添加量が 4% の場合に炭酸化による影響が小さかった。

3. 2 炭酸化前の養生日数による影響

コンクリートの計画配合を表 1 (C) とし、前養生日数を変化させた。炭酸化条件を図 3 の緑枠に示し、圧縮強度試験結果を図 5 に示す。いずれの場合においても、供試体の完全炭酸化時の圧縮強度は封緘養生を施したものと比較して小さくなった。しかし、前養生を延長することで完全炭酸化時の強度の低下を抑制することが認められた。一方で前養生 5 日と 28 日完全炭酸化時の圧縮強度は概ね同一であり、事前に 5 日間の前養生期間を設けることで圧縮強度の低下抑制に寄与すると考えられる。

3. 3 γ -C₂S の使用の有無

コンクリートの計画配合を表 1 (C、D) とし、図 6 に前養生日数を変化させたコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。 γ -C₂S をセメントの 3 割を内割置換することで完全炭酸化時の圧縮強度は大きくなり、また前養生を延長することで完全炭酸化時の強度に改善の効果が認められた。

4. 空隙率と圧縮強度の比較

図 7 に上記すべての配合の空隙率と圧縮強度の関係を

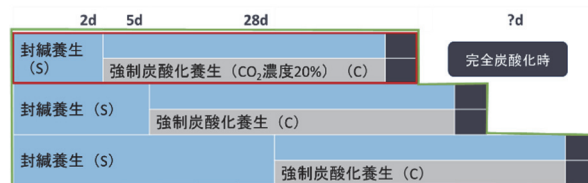


図3 コンクリートの炭酸化条件

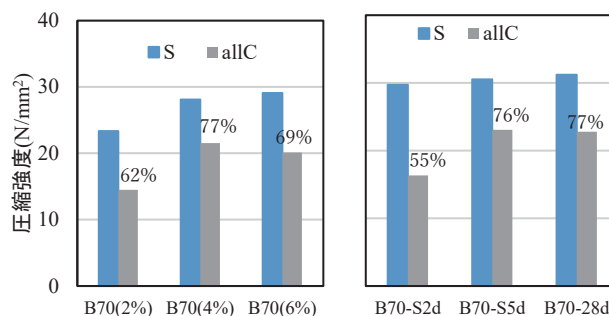
図4 SO₃量の影響

図5 養生日数の影響

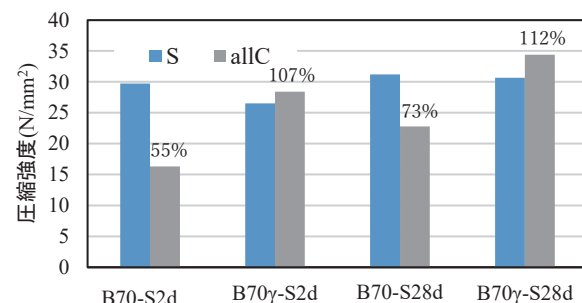
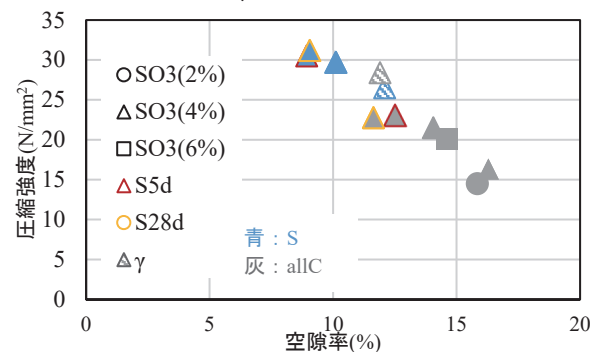
図6 γ -C₂Sの添加の影響

図7 圧縮強度と空隙率の関係

示す。圧縮強度と空隙率は相関の関係があり、完全炭酸化した状態においても、空隙率を減少できれば強度および他の物理的特性の改善も期待できると考える。

謝辞：本成果は、NEDO の委託業務（JPN21014）にて得られたものであり、関係各位に感謝する。

【参考文献】

- 1) 水野博貴ほか：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、Vol4, No.1, pp.665-670 (2019)