

CO₂ 排出量削減を実現するセメントコンクリートの開発と評価

ライフサイクル工学分野
鈴木南都

セメントコンクリート 低炭素 産業副産物
環境影響評価 C-A-S-H

1. はじめに

世界でカーボンニュートラルの達成が目標とされている現在、建築材料として最も普及しているが、CO₂排出量の多いセメントコンクリートについては、従来通り使用することに疑問の声もある。そのため、セメントを使用しないジオポリマーコンクリートや木構造への転換など、セメントを使用しない技術開発が活発に行われており、その期待も大きい。この一方で、ジオポリマーコンクリートや木材への完全な代替が進み、もし仮にセメントがまったく作製されなくなった場合には、産業廃棄物の受け入れが停止し、これらの多くは最終処分場に送るようにならざるを得ない。セメント工場の産業廃棄物の受け入れが停止すると、最終処分場の残余年数は 17.4 年から 5.5 年まで短くなると試算されている。すなわち、セメント工場は最終処分場の残余年数を延ばす観点からも重要な役割を果たしている。

これらの背景から、本論文ではセメントを最小限使用しつつもCO₂排出量を大きく削減可能なコンクリートの開発を目指す。

2. 実験概要

2.1 使用材料と調合

結合材として、セメントに低熱ポルトランドセメント (C)、混和材にフライアッシュ (FA)、高炉スラグ微粉末 (GGBS) およびシリカフェーム (SF) を使用した。骨材は、細骨材に砕砂と陸砂を混ぜ合わせたもの (S)、粗骨材に碎石 (G) を使用した。また、アルカリ刺激剤 (AA) として水酸化ナトリウムを水にとかした水溶液を、混和剤 (SP) として高性能減水剤を使用した。

コンクリートの調合表を表 1 に示す。まず、圧縮強度および CO₂ 排出量の基準として、混和材を用いないセメントのみで作製した圧縮強度 30 MPa クラス (C100_30w、W/C = 0.4) および 60 MPa クラス (C100_60w、W/C = 0.34) のコンクリートを準備した。セメント使用量を大きく削減したセメントコンクリートとして、水結合材比 (W/B) を 0.2、結合材にセメントを 3~4 %、混和材を 96~97 % の割合で用いたもの (C3~C4) を設定した。また、ジオポリマーコンクリート (GPC) として、アルカリ水モル比を 0.288 mol/mol、単位水量を 141 kg/m³、結合材にフライアッシュ 75 %、高炉スラグ微粉末 20 %、シリカフェーム 5 % を用いたものを作製した。ただし、GPC については、CO₂ 排出量を C3~C4 シリーズと同程度に設定するために、アルカリ水モル比を 0.04 mol/mol まで小さくした LGPC を別途設定した。

2.2 圧縮強度とCO₂排出量による環境影響評価

圧縮強度試験とCO₂排出量試算値の結果から環境影響評価を行った。以下の式(1)から力学性能評価値 (MI_x) を、式(2)から環境負荷評価値 (EI_y) を算出し、それぞれ縦軸、横軸とした。これらの値は、基準となる力学性能・環境負荷との相対比較を行うもので、いずれの値も大きいほど優れた評価となる²⁾。

$$MI_x = MI / MI_{inf} \quad (1)$$

$$EI_y = EI_{sup} / EI \quad (2)$$

ただし、MI_{inf} : 基準圧縮強度 (C100、30 MPa)

MI : 圧縮強度 (MPa)

EI_{sup} : 基準 CO₂ 排出量 (C100、320 kg/m³)

EI : CO₂ 排出量 (kg/m³)

表 1 試験体の調合表 (シリーズ末尾の w は蒸気養生を行わないもの)

シリーズ	単位質量 (kg/m ³)								
	C	FA	GGBS	SF	S	G	W	AA	SP
C100_30w	410				700	1090	165		0
C100_60w	490				700	1055	155		0
C4 (C4w)	15.9	167	119	95.3	794	1191	79.4		6.0
C3	11.9	171	119	95.2	794	1191	79.4		6.0
C4+AA	15.9	167	119	95.3	794	1191	79.4	90.1	6.0
GPC (GPCw)		264	70.4	17.6	704	1056	141	90.1	0
LGPC		274	73.1	18.3	731	1096	146	12.8	0

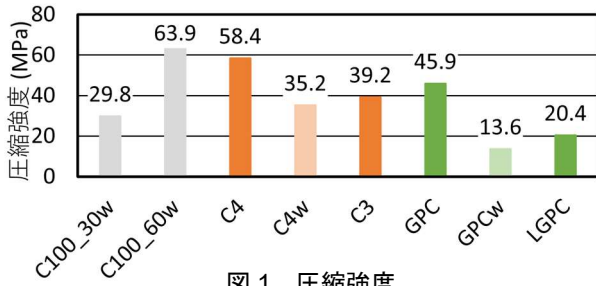


図1 圧縮強度

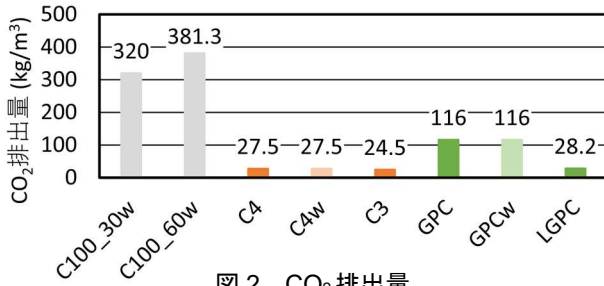


図2 CO₂ 排出量

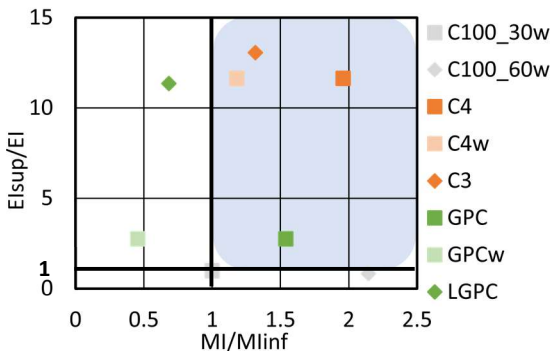


図3 環境影響評価 (C100_30w を基準)

2.3 化学分析による反応機構の調査

XRDによってX線のピークをもとに試料に含まれる成分を調べた。試料には、C4にAAを加えたコンクリート(C4+AA)を含めた4種類 (C4、C4+AA、GPC、C100_30w) のコンクリートについて、骨材を除いたペースト部分を乳鉢で細かくしたものをXRDに使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度とCO₂排出量による環境影響評価

各シリーズの圧縮強度を図1に、CO₂排出量を図2に示す。これらの結果から、特にC4は58.4 MPaの圧縮強度を極めて少ないCO₂排出量で実現している。また、図3に示す環境影響評価では、C3・C4・C4wとGPCは右上に位置し、特にC4はC100_30wの2倍近い圧縮強度を確保しつつ、同レベルの強度のC100_60wと比較してCO₂排出量を約14分の1まで削減している。また、C4wとGPCwを比較すると、C4wは水中養生での強度発現を確認できる。LGPCの強度は、GPCの半分以下の結果であった。GPCは、強度発現にアルカリ水モル比を確保する必要があるため、CO₂排出量の大きな削減は困難であると考えられる。したがって、C4は環境面、力学面の両側面において非常に優れており、セメントを使用してもCO₂排出量削減を目指すことが可能であると考えられる。

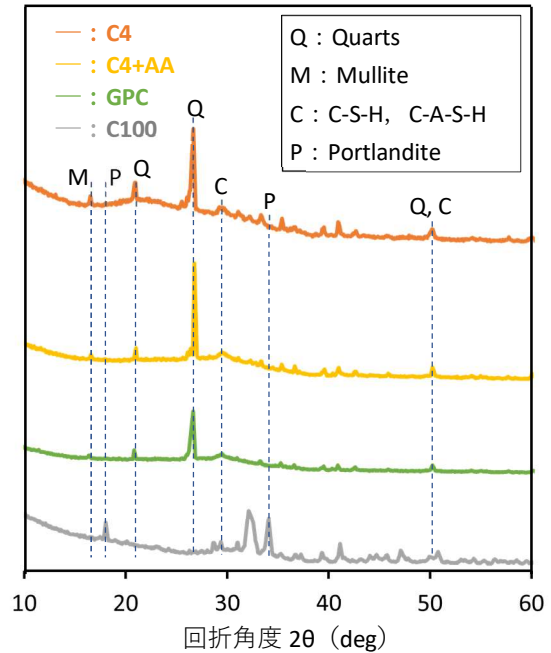


図4 XRDによる分析結果⁴⁾

3.2 化学分析による反応機構の調査

図4について、C4とGPCのグラフのピークが概ね一致している一方で、回折角度15 deg~25 degの間でC4のハローがGPCよりも山なりである。表1に示すように、水の代わりにAAを加えたC4 (C4+AA) を作製し、分析を行った結果、C4+AAではグラフが平らに変化したことから、AAに反応する成分がC4内に残存していたことを確認した。すなわち、C4はGPCに近いセメントコンクリートであると考えられる。また、高炉スラグ微粉末のCaはSiの一部がAlに置換されたC-S-H (以下、C-A-S-H) が生成すること³⁾、C-S-HとC-A-S-Hが29 deg付近のピークに存在すること⁴⁾が知られている。したがって、C4はC-S-Hに加えてC-A-S-H水和物が生成されたコンクリートと考えられる。

4. まとめ

カーボンニュートラルの達成に向け、国内の最終処分場の現状を考慮したCO₂排出量を大きく削減したセメントコンクリートの開発のため、セメント4%のコンクリートを作製し、環境影響評価及び化学分析を用いた実験を行った。

今後は、C4のような低CO₂排出量の材料の実用化に向けた検討を行い、2050年でのカーボンニュートラル達成に貢献できる材料開発に繋げる必要がある。

[参考文献]

- 1) 新見龍男ら: コンクリート工学, Vol.60, No.10, pp.909-915, 2022.10
- 2) Fantilli, A. P. et al.: Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.282-290, 2013
- 3) 上原元樹ら: コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1987-1992, 2015.1
- 4) 湊大輔ら: セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.53-60, 2015