

混和材を使用したコンクリートの 基礎物性・環境負荷のバランスに関する研究

Balancing the mechanical and environmental performance of concrete utilizing mineral admixtures

北海道大学工学部環境社会工学科	○学生員	山内翼 (Tsubasa Yamauchi)
北海道大学大学院工学院環境フィールド工学部門	学生員	オポン・ジョエル(Joel Opon)
北海道大学大学院工学研究院環境フィールド工学部門	正員	ヘンリー・マイケル (Michael Henry)

1. 背景と目的

現在、世界的に CO₂ 排出量が増加し続けており、地球温暖化、異常気象など環境への影響が問題となっている。その要因の一部としてセメント製造時に大量の CO₂ が発生することが挙げられ、セメントの一部を混和材で置換することで CO₂ 排出量を削減しようという動きが見られている。しかし実構造物への適用を考えると CO₂ の削減だけでなく、十分な強度も必要となる。すなわち強度と環境への影響のバランスが重要である。そこで本研究ではバランスを評価するための指標として、強度あたりの CO₂ 排出量を用いて、セメントの一部をフライアッシュまたは高炉スラグ微粉末で置換した場合について分析し、強度と環境負荷のバランスを定量的に評価する方法を示す。

2. データ収集の方法

混和材を使用したコンクリートの基礎物性に関するデータを収集しデータベース化するため、2011 年から 2017 年に日本コンクリート学会が発行したコンクリート工学年次論文集から 20 編の論文のデータを引用した。抽出対象は普通ポルトランドセメントおよびその一部をフライアッシュまたは高炉スラグ微粉末で置換したものを結合材とし、細骨材には普通砕砂、粗骨材には普通碎石を用いて生成されたコンクリートとした。圧縮強度は標準養生された場合の数値を適用した。CO₂ 排出量は、JSCE が 2006 年に発行したコンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)中、表 3.2.3 に記載のインベントリデータに基づいて算出した。

3. 分析方法

混和材置換率および水粉体比が圧縮強度、CO₂ 排出量に及ぼす影響を定量的に示すため、分析には RSM(Response Surface Methodology)という手法を用いた。

この手法は、複数の要素が特性値に及ぼす影響を評価する際に用いられ、得られた実測値からモデル式を算出して要素と特性の関係を二次元あるいは三次元で視覚化することができる。今回は、独立変数にあたる要素として、水粉体比(W/B)、フライアッシュおよび高炉スラグのセメント置換率(%)、養生期間(日)の三つを設定した。そして従属変数には、圧縮強度(MPa)、CO₂ 排出量(kg/m³)に加え、CO₂ 排出量を圧縮強度で割ったものを強度あたりの CO₂ 排出量(N)として特性値として設定した。この強度あたりの CO₂ 排出量の値(以下、N 値)は単位圧縮強度を得る際に発生する CO₂ 排出量を示しており、N 値が小さいほど環境への負荷が小さいといえる。

4. 結果

(1)圧縮強度

図 1 にセメントをフライアッシュで置換した場合の圧縮強度の変化挙動のモデル曲線と実測値を、材齢ごとに示す。材齢 7 日ではフライアッシュ置換率(以下、FA 置換率)および水粉体比が大きくなるほど圧縮強度は小さくなると予測される。材齢 28 日になると FA 置換率の上昇による強度低下率が小さくなり、材齢 91 日時点では FA 置換率 50%でも、水粉体比を 0.3 以下に設定すれば 60MPa 以上の強度を得ることが期待された。これは材令を増すとともにフライアッシュのポゾラン反応が進行し強度が増加することによって考えられる。次に高炉スラグ微粉末で置換した場合の変化挙動を図 2 に示す。この図からは材齢とともに強度が増すことと、高炉スラグ置換率(以下、BS 置換率)0~約 50%の範囲では同じ水粉体比において BS 置換率の値によらずほぼ同程度の強度を得られることが予測できる。これらのモデル曲線を用いることで、任意の混和材置換率で目標の強度を得るために水粉体比をどのくらいに設定すればよいかを定量的に求めることができる。

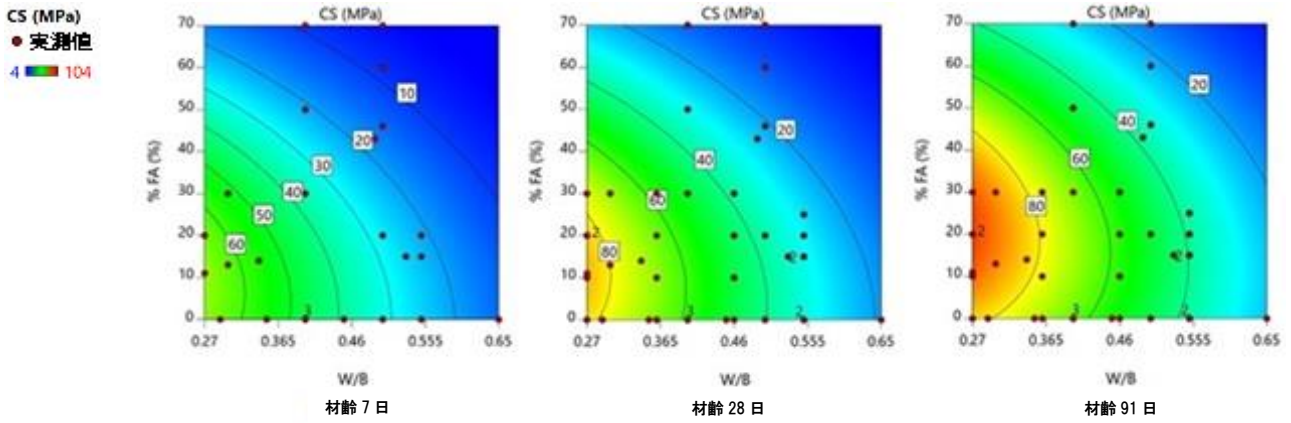


図 1. フライアッシュで置換する場合の圧縮強度変化のモデル曲線

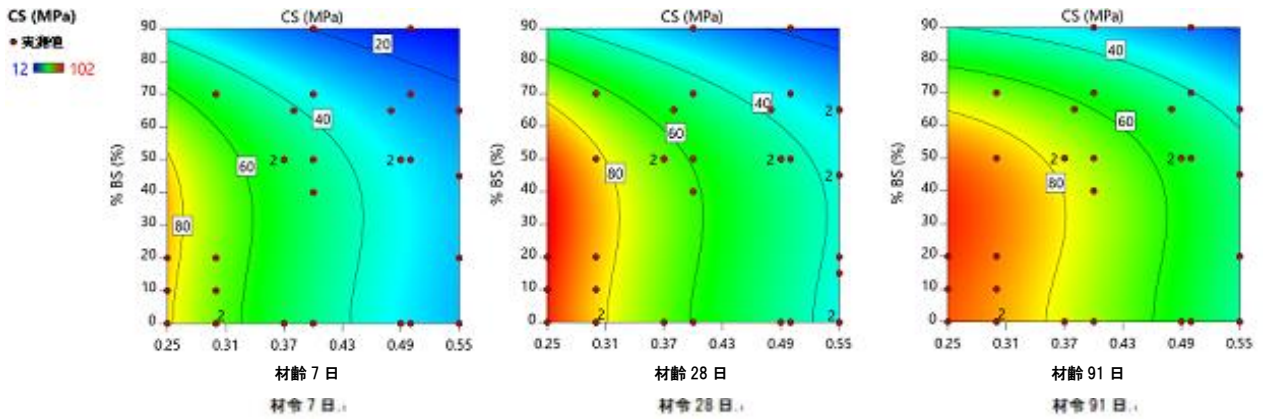


図 2. 高炉スラグ微粉末で置換した場合の圧縮強度変化のモデル曲線

(2) CO₂ 排出量

図 3,4 にそれぞれの場合の CO₂ 排出量の変化のモデル曲線を示す。ここでの CO₂ 排出量はコンクリート生成時に発生する量のみを指しており材齢によって不変であるため、モデル式には時間の関数は含まれていない。フライアッシュ、高炉スラグのいずれの場合でも、置換率が大きくなるほど、また水粉体比が大きくなるほど CO₂ 排出量は小さくなることが予測される。また、このモデル曲線を用いて任意の混合材置換率で目標の CO₂ 排出量に抑えるために水粉体比をどれくらいに設定すればよいかを求めることができる。

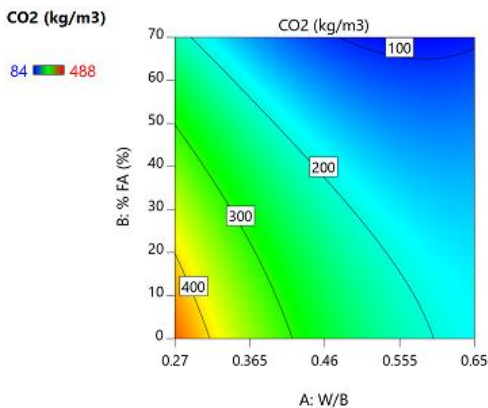


図 3. フライアッシュで置換した場合の CO₂ 排出量変化のモデル曲線

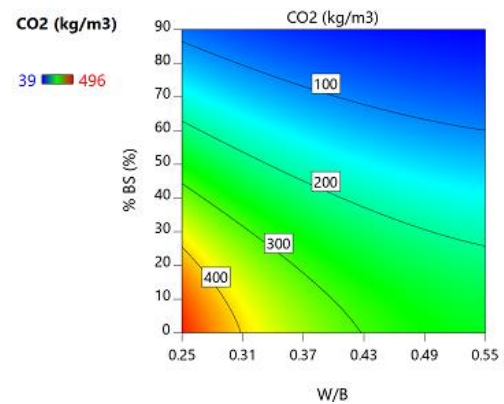


図 4. 高炉スラグ微粉末で置換した場合の CO₂ 排出量変化のモデル曲線

(3) 強度あたりの CO₂ 排出量

図 5 にフライアッシュで置換した場合の強度あたりの CO₂ 排出量 N の変化モデルを材齢ごとに示す。材齢 7 日では FA 置換率が高い領域では N 値がかなり大きく、FA 置換率が低い領域での N 値と最大 15 以上の大きな差が出て見られる。これは前述したように FA 置換率が高いと初期強度が小さいことによると考えられる。材齢 28 日になると、高い FA 置換率でも N 値が小さくなる範囲が大きくなり、最大 N 値と最小 N 値の開きも 7~8 程度になっている。そして材齢 91 日では N 値はほとんどすべての領域で 4~6 程度となることがわかる。この結果から、短期の材齢で見ると FA 置換率が高

いと環境への影響と強度のバランスはとれていないようにみえるが、長期の材齢でみると FA 置換率が高くても環境への影響と強度のバランスがとれているといえる。また、FA 置換率約 10%~40%、水粉体比約 0.3~0.45 の領域では N 値が 4 以下になり、環境への影響が小さく強度が高いといえる。このようにモデル曲線を用いることで環境への影響を低減しつつ十分な強度を得る配合を定量的に決めることができる。

次に図 6 に高炉スラグ微粉末で置換した場合の強度あ

たりの CO₂ 排出量 N の変化モデルを材齢ごとに示す。高炉スラグの場合、材齢 7 日の時点で BS 置換率が大きくなるほど N 値が小さくなっている。そして材齢が長期になるにつれ N 値が全体的に低下傾向を示した。そして材齢 91 日についてみると、BS 置換率をおよそ 40%以上に設定すれば水粉体比の大小によらず N 値を 3 以下にする、環境への影響を抑えつつ強度も兼ね備えたコンクリートを作ることができることがわかる。

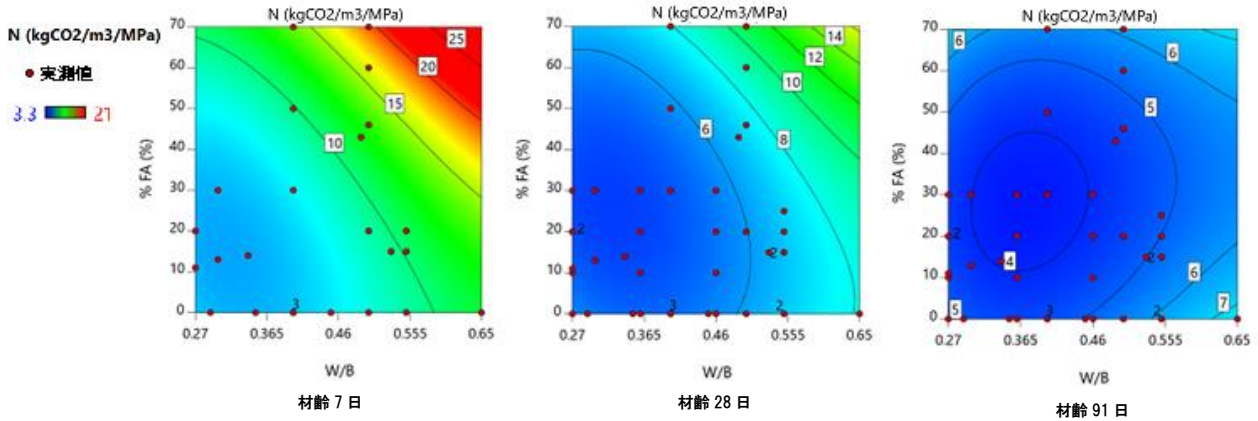


図 5. フライアッシュで置換した場合の強度あたりの CO₂ 排出量変化のモデル曲線

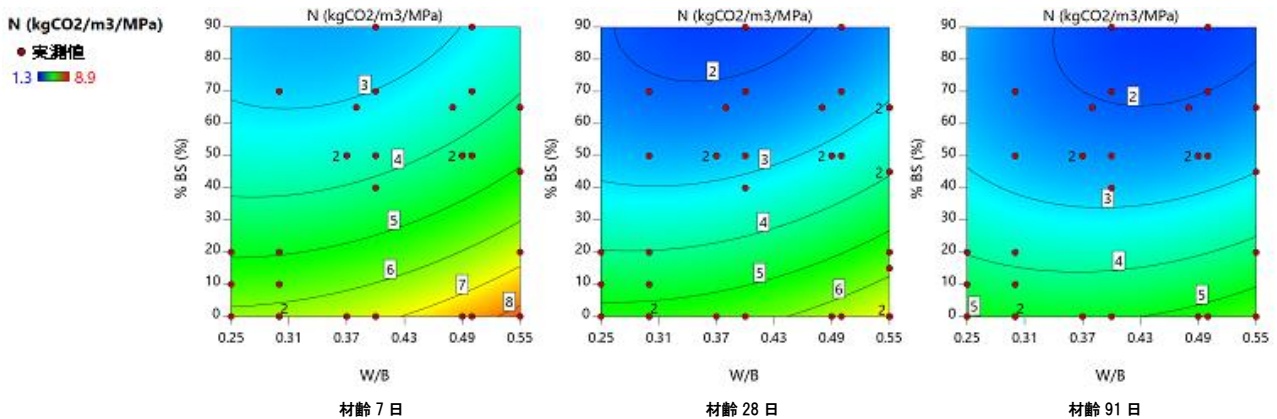


図 6. 高炉スラグ微粉末で置換した場合の強度あたりの CO₂ 排出量変化のモデル曲線

5. 結論

今回の結果から、フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末の置換率、水粉体比を変化させたときの圧縮強度、CO₂ 排出量の変化を具体的に示すことができた。そして強度あたりの CO₂ 排出量を算出して変化をグラフで表すことで、各材齢、配合において環境への影響と強度のバランスがとれているかを明確に示すことができた。今回適用した RSM 分析によってモデル化されたグラフを用いることで、任意の混和材置換率で、目標の圧縮強度、CO₂ 排出量を得るために水粉体比をどれくらいに設定すればよいかを具体的に決めることができる。本研究では混和材を用いた際に強度、CO₂ 排出量がどのような値になるのかを具体的に求めることができ、強度と環境負荷のバランスを定量的に評価することができた。

6. 参考文献

堺孝司,「講座コンクリート関連産業におけるサステナビリティ ①コンクリート関連産業にサステナビリティ思考を」,コンクリート工学 Vol.55, No.6, 2017. 6, p529-536