

論文 各種コンクリートの二酸化炭素排出量と廃棄物・副産物使用量を考慮した環境影響グレイディング設定の提案

伊代田 岳史^{*1}

要旨：カーボンニュートラル社会の実現に向けて、建設業界においても大きな変革が求められている。そのためには、コンクリートの製造・施工において二酸化炭素を直接および間接的に削減できることを定量的に示す必要がある。本研究では、二酸化炭素を削減した材料や吸収した材料を用いたコンクリートの二酸化炭素排出量および廃棄物・副産物使用量の環境グレイディングの構築を目指した。これにより、各種材料の積極的使用や環境影響を考慮したコンクリートの活用・普及につなげるとともに、今後の施工におけるコンクリートの選択の一助になるような指標を提示する目標としている。

キーワード：二酸化炭素排出量, 廃棄物・副産物使用量, 環境影響グレイディング, 環境配慮評価ツール

1. はじめに

構造物建設には欠かせないコンクリートは、使用材料であるセメント製造時の二酸化炭素排出量が大きく、地球環境へのインパクトが大きいことが指摘されている。このような中、コンクリートの二酸化炭素排出量の削減のための材料的検討や構造的検討に加え、排出量算出についても国内外で多くの検討^{例えば}がみられる。各国でインベントリデータを取得し、その積み上げによる算定は多くなされている。またそれぞれがシステムバウンダリーを設定して多くの検討結果がある。日本においても、2021年から2024年で実施したJCI-TC221A「セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会」(河合委員長_広島大学)にて、セメント・コンクリートの環境配慮評価ツール²⁾を整備し、コンクリートの環境影響を計算できるようになった。一方で、設計・施工においてはなかなか環境影響を考慮したコンクリートの採用が進まないことが問題である。大阪万博や一部のパイロット工事では積極的に採用されているが、一般工事においては実績が少ないことなどにより採用がされない現状にある。日本建築学会ではJASS5において、コンクリートの環境影響を評価するグレイディングが提案されている。この方法の特徴は構造物を評価対象としており、使用した全量のコンクリートに着目している。この考え方は大切であるが、土木構造物への適用には設定条件(例えば地下と地上躯体の比率など)が異なることから、汎用的に用いることが困難である。そこで、本研究では、各種条件に設定したコンクリートの環境影響をJCIのセメント・コンクリートの環境配慮評価ツールにより算出し、その結果を用いてコンクリート単体の環境影響グレイディングを試みた。このような取り組みは、国外においてもあまり見られないことから、このグレイディングを用いることで、コンクリートの環境評価の啓蒙活動への期

待と、コンクリート選択の一助にしたいと考えている。

2. 検討の主旨と算定結果

2.1 検討内容

様々な配(調)合、再生骨材を利用した各種コンクリートを設定し、計画配(調)合を設計の上、各種材料の使用量を決定した。その結果をもとに、JCI-TC221A委員会報告書²⁾の“コンクリートの環境配慮評価ツール”を用いて、コンクリート1m³あたりの二酸化炭素排出量と廃棄物・副産物使用量を算出した。算出に当たってのインベントリデータはソフトウェア内に格納されているものを用いており、CO₂に関しては表-1に示した通り、再生骨材に関しては、松田博士の検討による数値³⁾を利用した。

2.2 各種コンクリートの設定と算定結果

(1) 単位水量の影響

日本におけるレディーミクストコンクリートにおいては、使用する骨材の形状や物性値などの諸事情により単位水量が異なる⁴⁾ことが示されている。そこで、ここで

表-1 各種材料のインベントリデータ²⁾と密度

	投入副産物 wet-kg/t	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /t	CO ₂ 吸収量 kg-CO ₂ /t	密度 g/cm ³
Binder	ポルトランドセメント	52.44	806.51	—
	高炉セメントB種	463.06	471.12	—
	フライアッシュセメントB種	185.71	693.87	—
	高炉スラグ微粉末	1000.00	40.21	—
Fine Agg.	砕砂	—	7.09	—
	再生細骨材H	1000.00	40.98	—
	再生細骨材L	1000.00	2.20	—
	再生細骨材L(炭酸化)	1000.00	2.20	56.80
	再生微粉(炭酸化)	1000.00	2.20	71.90
Coarse Agg.	砕石	—	7.09	—
	再生粗骨材H・M	1000.00	7.47	—
	再生粗骨材L	1000.00	2.10	—
	再生粗骨材L(炭酸化)	1000.00	2.10	23.90
*骨材の密度は、表乾密度を利用				

^{*1} 芝浦工業大学 工学部教授 博士(工学) (正会員)

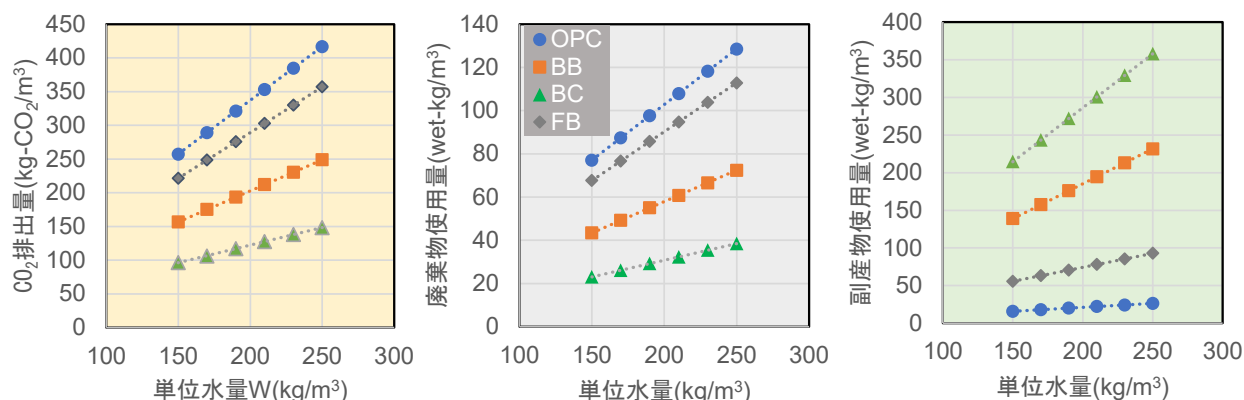


図-1 各種コンクリートの単位水量の違いによる二酸化炭素排出量と廃棄物・副産物使用量

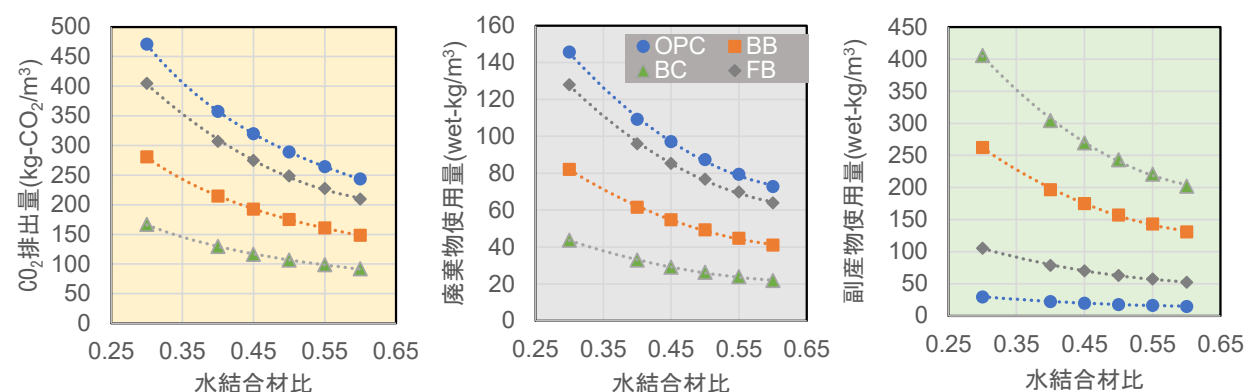


図-2 各種コンクリートの水結合材比の違いによる二酸化炭素排出量と廃棄物・副産物使用量

は水結合材比 (W/B) 0.5 で一定として、単位水量 (W) が 150kg/m³ から 250kg/m³ と変化した場合における各種影響について評価した。使用したセメントを普通ポルトランドセメント (OPC), フライアッシュセメント B 種 (FB), 高炉セメント B 種 (BB), 高炉セメント C 種 (BC: 高炉スラグ微粉末にて 70%にて置き換え) とした。

単位水量と各種計算結果を図-1 に示す。水結合材比を一定としているため、単位水量が増加すると使用セメント量が増加し、二酸化炭素排出量が増加することがわかる。また OPC を使用するほど、セメント製造時の二酸化炭素排出量が増加することから、コンクリート製造における数値も大きくなる。その反面、クリンカ製造に伴う廃棄物使用量が増加することから OPC の廃棄物使用量が増加している。副産物使用量は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の使用量が増加する FB, BB および BC ほど大きくなるのがわかる。つまりいずれの数値においても、セメント使用量の増加に比例することがわかる。

(2) 水結合材比の影響

次に各種セメントを用いた場合の水結合材比の影響を比較する。ここでは、先ほど同様 OPC, FB, BB, BC を用いて水結合材比を 0.3 から 0.6 まで変動させた。なお、単位水量 W は 170kg/m³ とした。図-2 にその計算結果を示す。この結果からも水結合材比が減少することにより使用セメント量が増加するために、二酸化炭素排出量

が顕著に増加することがわかる。その傾向はクリンカ使用量に依存するため OPC で大きくなる。一方で、廃棄物使用量はクリンカ量が多いほど大きい。副産物使用量については、セメント使用量が増加することで、混合セメントにおける混和材料の使用量が増加するため、副産物使用量が増加している。

(3) 再生骨材および CCUS 材料使用時の影響

資源循環性を考慮するために、再生骨材および CCUS 材料利用の影響を評価した。ここでは、セメント種類を OPC で水結合材比を 0.5, 単位水量 W を 170kg/m³ と固定し、使用する骨材とその使用量を変化させた配 (調) 合を設定した。骨材使用量はそれぞれ普通骨材に対して 0,20,50,70,100%置換した。骨材には Case1 においては再生細骨材のみ, Case2 では再生粗骨材のみ, Case3 では細骨材および粗骨材の両者を利用する検討を行った。なお、使用した再生骨材は、再生骨材 H, 再生骨材 L および再生骨材 L に二酸化炭素吸収を行った CCUS 材料³⁾を用いている。図-3 にコンクリートの二酸化炭素排出量の計算結果を示す。図よりいずれの Case においても再生骨材 H を使用することで二酸化炭素排出量は増加していることがわかる。これは再生骨材製造時に加熱すりもみ等の使用電力が大きくなることが原因である。一方で、再生骨材 L を使用すると若干ではあるが二酸化炭素排出量が減少することがわかる。これは、H に比べ L は再生骨材

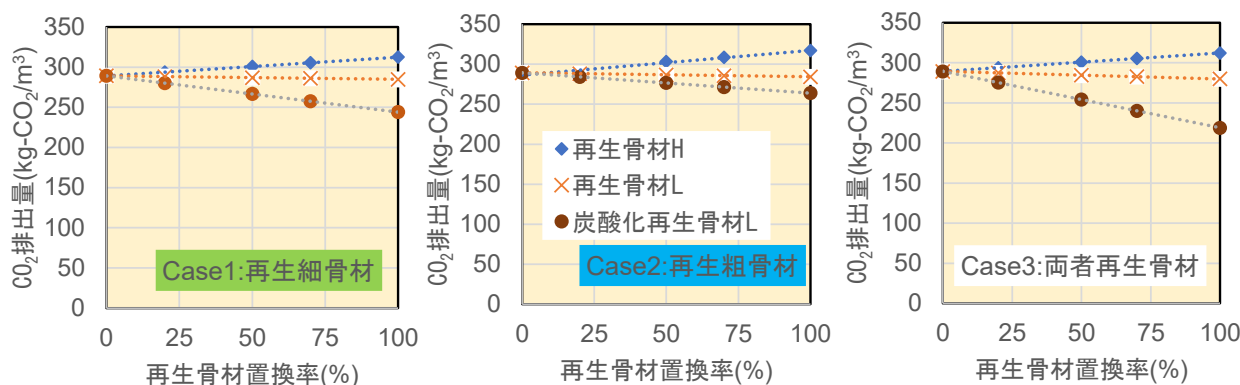


図-3 異なる再生骨材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出量

製造時の二酸化炭素排出量が少ないことに依存する。しかしながら、再生骨材を活用した場合においても、コンクリート全体に対する二酸化炭素排出量削減効果は小さいことが明らかである。一方で、二酸化炭素を吸収固定している炭酸化再生骨材を利用することでコンクリート全体の二酸化炭素排出量も減少させることができる。これは固定している二酸化炭素分の効果であるが、前述のセメントの種類やセメント量の削減による効果に比べて大きくないことがわかる。廃棄物使用量に関しては、使用するセメントおよびその量が同じであることから同一であった。次に、図-4 は副産物使用量をまとめた結果である。ここで副産物使用量については、再生骨材を副産物とみなすことから使用量の増加に伴い増加し、細骨材および粗骨材の両者に再生骨材を利用することで著しく大きくなることが示された。

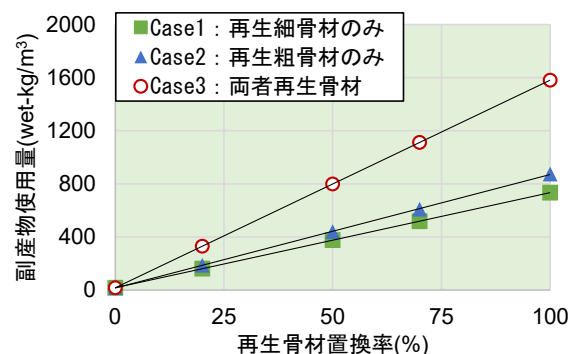


図-4 再生骨材コンクリートの副産物使用量

図-5 左は Case3 : 両者再生骨材利用における、BC セメントを利用したコンクリートについて検討を行った結果を示している。結果としては、OPC を用いたコンクリートと同様であるが、高炉セメント C 種相当に二酸化炭素を吸着固定した骨材を全量用いることで、カーボンゼロのコンクリートにかなり近づいていることがわかる。

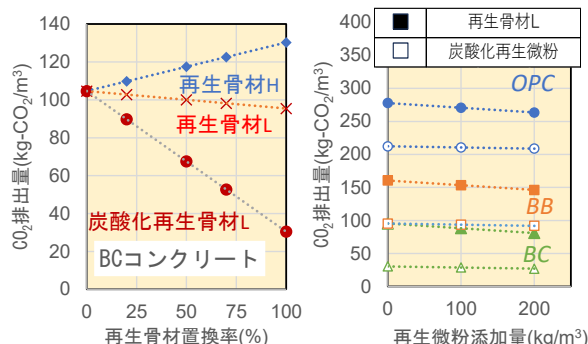


図-5 CCUS 材料コンクリートの二酸化炭素排出量
(左：炭酸化再生骨材，右：再生微粉)

加えて、再生骨材製造時に発生する再生微粉を細骨材に置換して、コンクリート中に 100kg/m³ および 200kg/m³ 混和した場合⁵⁾の二酸化炭素排出量の結果を図-5 右に示す。ここで骨材は、再生骨材 L または CCUS 骨材を全量用いた。なお廃棄物使用量はセメント製造由来、副産物使用量はセメント中の混和材量および再生骨材・再生微粉使用量に依存することから、配(調)合ごとに同等となったため省略する。高炉セメントの利用により二酸化炭素排出量は削減され、また CCUS 材料である再生微粉の使用量に応じて、コンクリート中に取り込まれた二酸化炭素分だけ排出量削減に寄与することがわかる。ただし再生微粉で固定できる二酸化炭素は、再生細・粗骨材を炭酸化させたものと比べ若干多いものの、その使用量が多くないためにコンクリート全体としての二酸化炭素排出量には大きな差が生じない。

(4) 再生骨材コンクリートの実配(調)合における検討～骨材種類の整理～

実際にレディーミクストコンクリート工場において出荷する場合には、呼び強度における製造・出荷となることが想定される。ここでは、セメント種類(OPC, BB および BC)ごとに同一強度(同一呼び強度の強度値)となる実配(調)合における二酸化炭素排出量、廃棄物および副産物使用量を比較した。配(調)合設計は、松田の論文⁹⁾から抽出し、改めて環境影響評価ツールにて算出している。単位水量 W は 175kg/m³ とし、骨材は普通砕石・砕砂もしくは再生骨材 L を全量用いる設計としている。算出結果を図-6 に示す。松田らの論文でも指摘している通り、再生骨材 L を用いることで強度低下が懸念

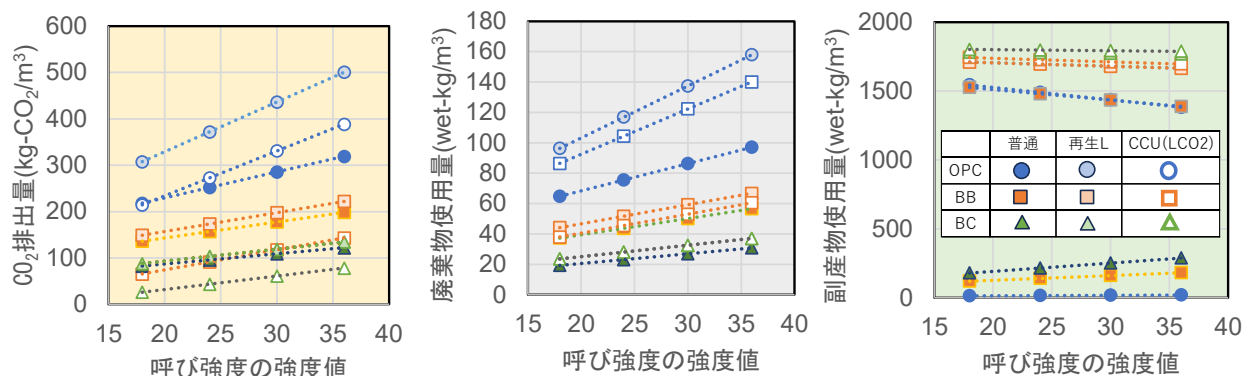


図-6 呼び強度の強度値ごとの各種再生骨材コンクリートの二酸化炭素排出量と廃棄物・副産物使用量

されることから、同一強度を得るためには、低い水セメント比を設定する必要がある。特に OPC を用いたコンクリートにおいてはその影響が大きく、高い強度レベルにおいては水セメント比が著しく低くなり、使用するセメント量が増大するために、コンクリート全体としての二酸化炭素排出量が増大することが確認できた。一方で、高炉セメントを用いた場合には、再生骨材使用時の強度低下が抑えられ、さらにクリンカ比率が低いことから、二酸化炭素排出量の著しい増大は抑制できる。加えて、二酸化炭素を吸着した再生骨材（CCUS 材料）を用いることで、二酸化炭素排出量を抑制できている。これは、骨材強度が再生骨材と比較して強くなることから、水セメント比の低下割合を低くできることに依存している。同様に、クリンカ比率に応じて廃棄物使用量が增大すること、また副産物使用量は再生骨材の使用割合の増大で大きくなることを確認できた。ただし、再生骨材を用いた場合で強度を確保するためには、水セメント比の低減つまりセメントペースト量の確保が必要不可欠となり、呼び強度値の増加に伴い、副産物使用量が低下する結果となった。

(5) 再生骨材コンクリートの実配（調）合における検討～再生骨材置換率の影響～

(4)の検討に加え、使用する骨材を普通骨材に炭酸化した再生骨材を 0 から 100%置換した場合における二酸化炭素排出量の検討を行った。なお、配（調）合における考え方は、松田らの提案する手法⁹⁾に従った。具体的には設置した置換率から算出される骨材全体の相対吸水率から推定した強度算定式から逆算して、呼び強度の強度値ごとの水結合材比を算出して求めている。算出結果のうち、廃棄物使用量および副産物使用量については、セメントの種類ならびに使用した再生骨材量に依存して決定されるため、省略する。呼び強度ごとの二酸化炭素排出量の算出結果を図-7 に示す。使用セメントに応じて二酸化炭素排出量が異なることは既知であるが、炭酸化した再生骨材を活用することで、高炉セメントであれば

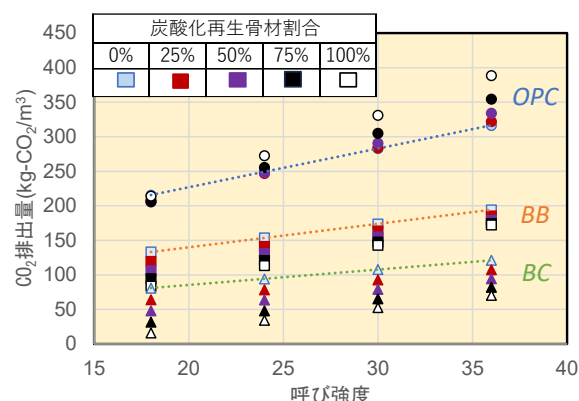


図-7 炭酸化再生骨材を用いたコンクリートにおける呼び強度ごとの二酸化炭素排出量

二酸化炭素排出量が抑制され、さらに貧配（調）合であるほどその効果が高く、ネットゼロに近づくことが明確となった。一方で、OPC を用いることで富配（調）合となるほど、クリンカ使用量が増大し、CCUS 材料を用いることによる効果が薄れることが分かった。

3. コンクリートの環境負荷評価を表現する環境影響グレイディングの検討

3.1 二酸化炭素排出量

これまでの検討の結果より、二酸化炭素排出量にはセメントの種類とセメント使用量が大きく影響していることが推測される。そこで、2章の検討から(1)単位水量、(2)水結合材比、(4)呼び強度ごとの再生骨材コンクリートの結果をもとにセメント種類とセメント使用量ごとにコンクリートの二酸化炭素排出量を整理して図-8 に示した。これより、二酸化炭素排出量はセメント種類ごとに単位セメント量との相関が認められた。つまり、二酸化炭素排出量については、配（調）合における単位セメント量で一義的に決定することが可能であることを示している。そこでセメント種類ごとの単位セメント量からの二酸化炭素排出量推定式を導出した。

また図-9 に CCUS 材料総量と二酸化炭素吸収量の関係を示している。今回設定した CCUS 材料の二酸化炭素

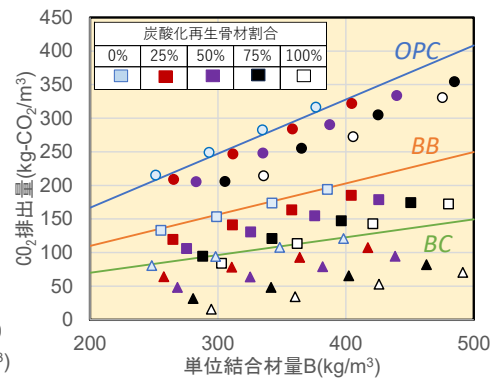
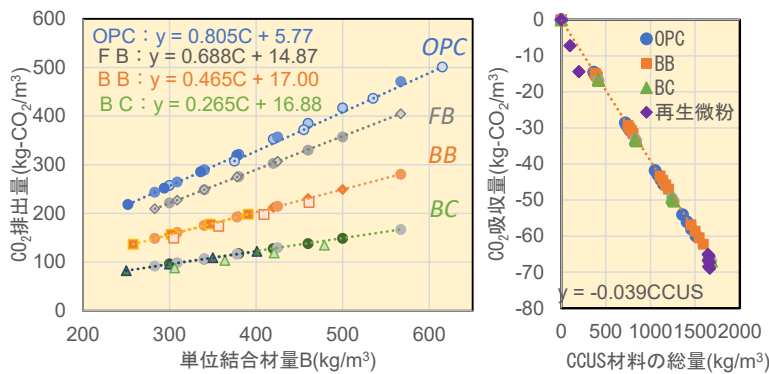


図-8 単位結合材量と CO₂ 排出量 図-9 CCUS 材料と吸収量 図-10 CCUS 材料を用いた CO₂ 排出量

吸収量がある程度一定であることから一定の関係性が得られた。また(5)で検討した炭酸化再生骨材を普通骨材に置換した結果を図-10に示す。図中の直線は、図-8より得られたセメント種類での近似式である。図-9の効果のように炭酸化した再生骨材を利用することで、強度を確保するために水セメント比を低く設定することとなり、単位セメント量が増大するが、二酸化炭素排出総量が抑えられる結果がえられた。別途検討の通り、再生骨材Hを用いた場合には、再生骨材を用いない場合と比較して、同一単位セメント量よりも二酸化炭素排出量が若干増加し、一方再生骨材Lを用いた場合には若干減少させることができるが、そのインパクトが大きくないことが示された。

3.2 廃棄物・副産物使用量

3.1 同様に、廃棄物使用量ならびにセメントにおける副産物使用量を単位セメント量で整理した結果を図-11に示す。いずれの使用量においても、セメント製造時の廃棄物・副産物のみを評価していることから、セメント種類ごとに単位セメント量からの推定式を導出した。

上記算出した廃棄物使用量と再生骨材や炭酸化した再生微粉などの副産物使用量との合算値である廃棄物・副産物使用量と単位セメント量との関係を図-12に示す。これより、高炉セメントおよび再生骨材などを多く用いるほど使用量が顕著に増加すること、一方で単位セメント量との相関が認められず、基本的にはセメント種類と再生骨材使用量で決定されることが明らかとなった。

3.3 コンクリートごとのグレイディングの提案

これまでの算出結果をもとに、二酸化炭素排出量はセメントの種類と単位セメント量、廃棄物・副産物使用量はセメント種類と再生骨材などの使用量によりグレイディングが可能であると考えた。そこで、表-2に現状のコンクリート 1m³あたりの平均二酸化炭素排出量 (250kg-CO₂/m³程度)を2050年でゼロになるように直線的に減少させていくシナリオを実現させるため、まずは5年間で50kg-CO₂/m³程度削減できる場合を評価でき

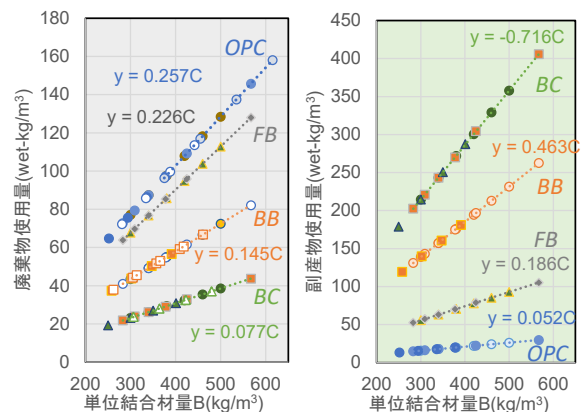


図-11 セメント由来の廃棄物・副産物使用量

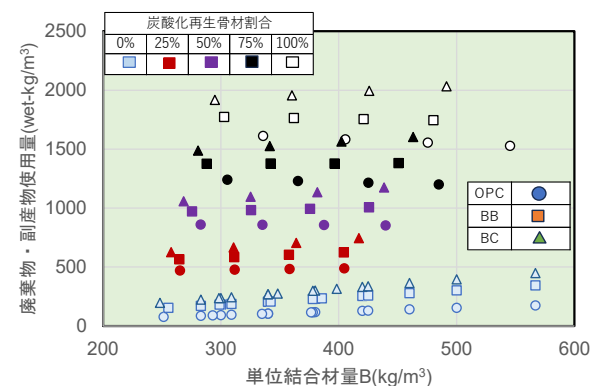


図-12 再生骨材を用いた廃棄物・副産物使用量

るようにグレイディングを試みた。

(1) 使用するコンクリートの配(調)合が既知の場合

使用するコンクリートが決定している場合には、セメント種類、単位セメント量、CCUS材料の使用量および再生骨材の使用量が計画配(調)合表より入手できるものとすれば、表-3の計算式を用いて、直接的に算出して表-2に基づいたグレイディングが可能となる。

(2) 使用するコンクリートの配(調)合が未知あるいは決定していない場合

コンクリートに使用するセメントの種類および単位セメント量の範囲がある程度想定できる場合には、二酸化炭素排出量については、図-9に基づいて表-4のよう

な簡易版のグレイディングを提案する。なお、CCUS 材料を活用している場合には、特記することとし明確にする。セメント種類しか決定できていない場合には、例えば呼び強度に対応する全国の単位セメント量の平均値などを参考にグレイディングが可能であると考ええる。一方、廃棄物・副産物使用量については、再生骨材の置換率に基づいてセメント種類ごとのグレイディングを提案する。

(3) 数種類のコンクリートを用いる工事に対して
複数の工場からコンクリートを利用したり、異なる配（調）合のコンクリートを用いたりする場合には、使用するコンクリート量の割合に基づいて、数値を按分して、環境影響グレイディングが算定可能である。

4. まとめ
- 本研究では JCI の環境影響評価ツールに基づき算出した二酸化炭素排出量および廃棄物・副産物使用量をもとにしたコンクリートの環境影響グレイディングを試みた。
- (1) JCI でリリースした環境影響評価ツールを用いることで、想定したコンクリート（例えば、異なるセメント種類、単位水量、水結合材比、再生骨材使用、CCUS 材料活用など）の環境影響を算出することができた。
- (2) 二酸化炭素排出量は、使用するセメント種類と使用量に大きく依存する。また CCUS 材料の活用によりコンクリート全体の排出量を抑制可能である。廃棄物・副産物使用量は、セメント種類および再生骨材などの資源循環材料の活用により、大きくできる。
- (3) 使用するコンクリートならびに複数工場からのコンクリートを利用する場合の環境影響グレイディングは、セメント種類、単位セメント量ならびに再生骨材利用率により提示することができた。
- このようなコンクリートの環境影響グレイディングを用いることで、より積極的に環境負荷の小さな材料を活用できることを願う。

参考文献

1) Mahria Rafi, Kiran Kumar Poloju, Marwarid Tarin, Adil Nadeem Hussain: Low-Carbon Concrete: A Comprehensive Review of Strategies for Reducing the Construction Industry's Environmental Impact, Journal of Building Material Science, Vol.7 Issue04, 2025

2) セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 2024

3) 松田信広, 伊代田岳史: 再生骨材コンクリートによる CO2 削減効果の可能性に関する検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.46, No.1, pp.1093-1098, 2024

表ー2 コンクリートの環境影響グレイディング

二酸化炭素排出量 グレイディング		廃棄物・副産物使用量 グレイディング	
排出・固定量総和 (kg-CO ₂ /m ³)	Grade	廃棄・副産物使用 (wet-kg/m ³)	Grade
~100	S	1500~	S
100~200	A	1000~1500	A
200~300	B	500~1000	B
300~400	C	0~500	C
400~	D		

表ー3 環境影響グレイディング算出式一覧

二酸化炭素排出量(kg-CO ₂ /m ³)					
Cement		+	CCUS		
OPC	0.805C+5.77	+	-0.039CCUS		
FB	0.688C+14.87				
BB	0.465C+17.00				
BC	0.265C+16.88				
廃棄物・副産物使用量 (wet-kg/m ³)					
廃棄物		+	副産物	+	再生骨材
OPC	0.257C	+	0.052C	+	使用量
FB	0.226C		0.186C		
BB	0.145C		0.463C		
BC	0.077C		0.716C		

表ー4 コンクリート簡易環境影響グレイディング

二酸化炭素排出量 グレイディング					廃棄物・副産物使用量 グレイディング				
単位セメント量 (kg/m ³)	OPC	FB	BB	BC	再生骨材 置換率	OPC	FB	BB	BC
500以上	D	C	B	A	0%	C	C	C	C
400-500	C	C	B	A	25%	B	B	B	B
350-400	C	B	A	A	50%	B	B	B	A
300-350	B	B	A	A	75%	A	A	A	S
200-300	B	B	A	S	100%	S	S	S	S

4) フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定及び管理システム調査研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2004

5) 朝井達也, 江口康平, 辻大二郎, 小島正郎: CO2 固定再生微粉を混合した高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの圧縮強度特性と CO2 排出量に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, pp.192-197, 2025

6) 松田信広: CCU 材料化した再生骨材を用いたコンクリートの性能並びに環境性に関する研究, 芝浦工業大学博士論文, 2024