

フレッシュコンクリートにCO₂を固定化する 「カーボキャッチ®」システムの開発

太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム 石井 祐輔
太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム 黒川 大亮
太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム 七尾 舞
太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム 田場 祐道
太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム 池田 周生
太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チームリーダー 早川 隆之

1. はじめに

セメント産業がセメントの製造工程において排出するCO₂は、世界の全産業が排出するCO₂に対して約7%¹⁾を占めています。太平洋セメントグループでは、2021年度に「カーボンニュートラル戦略2050」を掲げ、サプライチェーン全体として2050年までのカーボンニュートラルの実現を目指しており、CO₂の回収・有効利用に関する技術開発を進めています。

CO₂の有効利用に関して、コンクリートの練混ぜ時にドライアイスを注入することでフレッシュコンクリートにCO₂を固定化させる技術²⁾などがありますが、その場合、大半のCO₂が大気中に放出されるためCO₂を効率的に固定できないと推察されます。そこで著者らはセメント工場のキルン排ガスから分離回収したCO₂をセメントスラリー中に固定化させるシステム（カーボキャッチ[®]）を開発しました³⁾。このシステムにて製造されるCO₂を固定化し

たセメントスラリー（カーボキャッチスラリー）は、コンクリートの構成材料の一部に置き換えることでコンクリート中にCO₂を効率良く固定化することが可能となります。本稿ではカーボキャッチの技術の概要について示すとともに、カーボキャッチスラリーを適用した舗装コンクリートの施工事例を紹介し、今後想定される本技術の活用例を示します。

2. カーボキャッチシステムの概要

2-1 カーボキャッチスラリーを適用したコンクリートの製造

カーボキャッチスラリーを適用したコンクリートの製造概要を図-1に示します。普通ポルトランドセメントと上水道水を混合したセメントスラリーを、CO₂が充填された密閉反応槽内に循環させることで、スラリー中にCO₂を固定化します。カーボキャッチスラリー製造時の、セメントスラリーへのCO₂注入量とスラリーのpHおよびCO₂固定量の関係を図-2に示します。スラリーのpHは、CO₂注入量が350kg/t-cemを超えると7.0を下回って平衡状態となります。CO₂注入量が350kg/t-cem時点においては、注入量の93% (324kg/t-cem) がセメントスラリー中に固定化されていることがわかります。カーボ

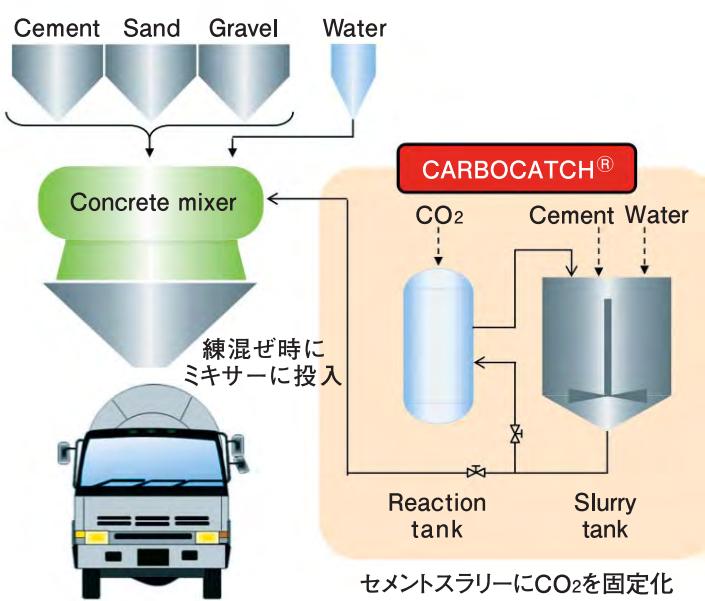


図-1 カーボキャッチスラリーを適用したコンクリートの製造

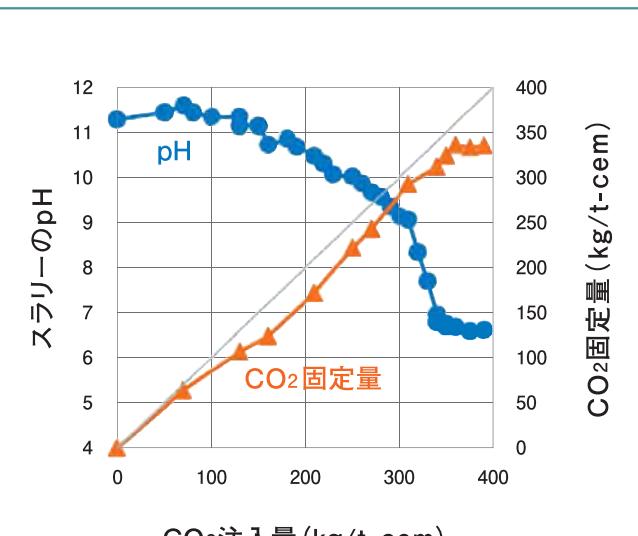


図-2 セメントスラリーへのCO₂注入量とスラリーのpHおよびCO₂固定量の関係

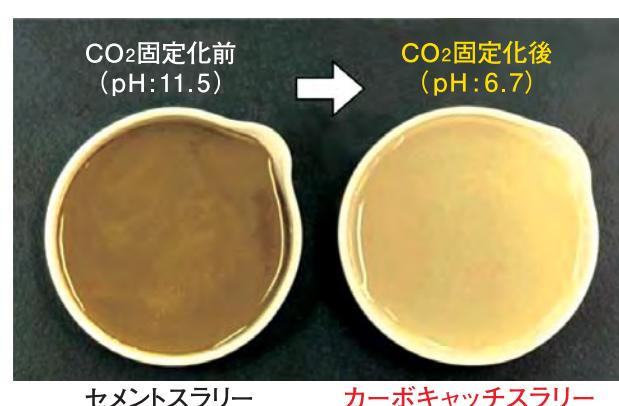


図-3 カーボキャッチスラリーの外観

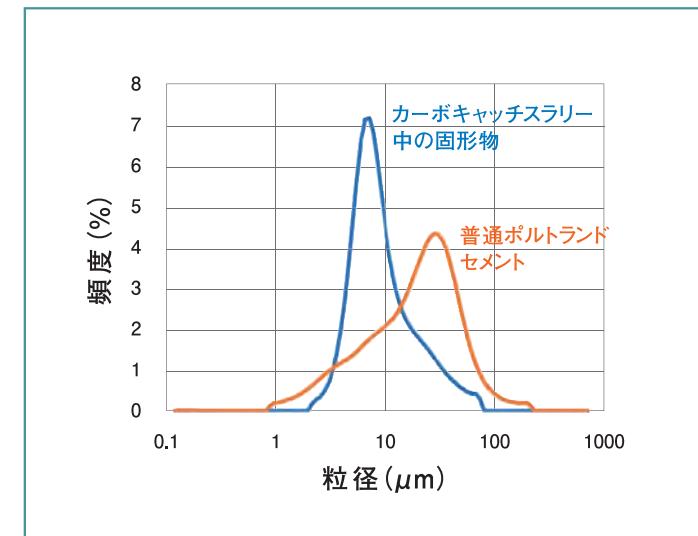


図-4 カーボキャッチスラリー固形物の粒度分布

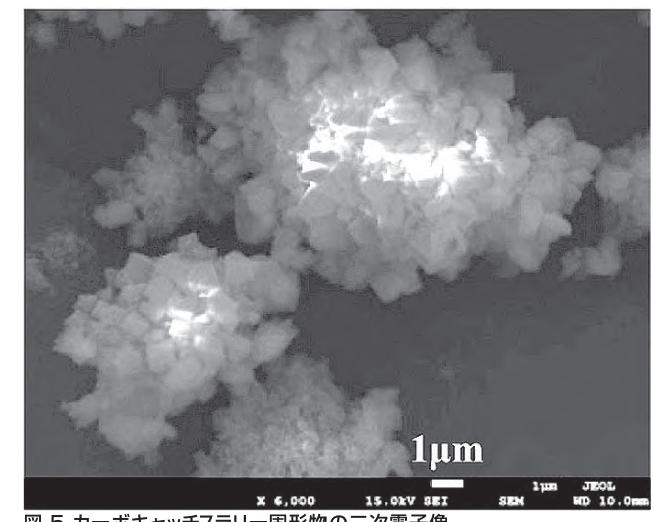


図-5 カーボキャッチスラリー固形物の二次電子像

2-2 カーボキャッチスラリー中の固形物

カーボキャッチスラリーの外観を図-3、スラリー固形物の粒度分布を図-4、スラリー固形物の二次電子像を図-5に示します。CO₂の固定化によって、スラリーの外観は灰白色に変化します。カーボキャッチスラリーを乾燥して得られた固形物を粉末X線回折で分析した結果、主成分は炭酸カルシウム（カルサイト）であり、残りは未反応鉱物等で構成されていることが確認されました。固形物のブレーン比表面積は13,810cm²/gであり、普通ポルトランドセメントの3,360cm²/gに対して約4倍を示します。また、図-4に示す粒度分布より、カーボキャッチスラリーの固形物の粒径は約7μmにピークを示し、普通ポルトランドセメントに比べ微細な粒子で構成されていることがわかります。カーボ

キャッチスラリーの固形物を二次電子像（図-5）で観察すると、1μm以下の微細な粒子の析出が確認されました。

2-3 コンクリートへのCO₂の固定方法

カーボキャッチスラリーを適用したコン

クリート配合のイメージを図-6に示します。カーボキャッチスラリーをコンクリート配合の一部として置換することで、コンクリートにCO₂を固定化させます。

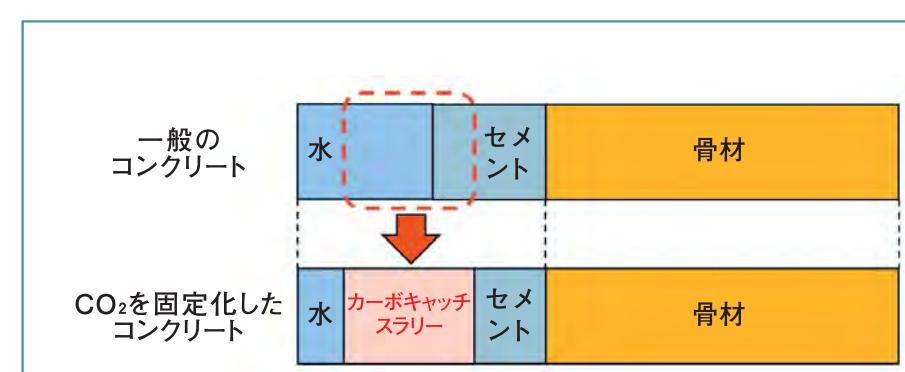


図-6 カーボキャッチスラリーを用いたコンクリートの配合イメージ

2-4 コンクリート製品への適用事例

カーボキヤッチは既にコンクリート製品への適用事例がいくつかあります。1点目の適用事例では、生コンプレントにて27-18-20Nのコンクリート配合を対象に、固形物がセメントの内割13%となるようにカーボキヤッチスラリーを混合して練混ぜを行い、消波ブロックを作製しました。コンクリート中のCO₂の固定量は7.7kg/m³であり、セメントあたりに換算すると23kg/t-cemでした(写真-1)。2点目はコンクリート製品工場にて水セメント比43%のコンクリートに、固形物がセメントの内割15%となるようにカーボキヤッチスラリーを混合して練混ぜ、ガードレール用連続基礎ブロックを作製しました。コンクリート中のCO₂の固定量は9.2kg/m³であり、セメント1tあたりに換算すると22kg/t-cemでした(写真-2)。

表-1 コンクリートの使用材料

材料名	種類および産地	記号	密度(g/cm ³)
水	上水道水	W	1
セメント	普通ポルトランドセメント	C	3.16
細骨材	粗目砂	S*	2.60(表乾)
	細目砂		2.59(表乾)
	碎砂		2.65(表乾)
粗骨材	碎石2005	G	2.68(表乾)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系(標準形)	SP	-
	ポリカルボン酸エーテル系(遅延形)	SP-R	-

*S1:S2:S3=35:15:10(質量比)

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	Bcs/B (%)	単位量(kg/m ³)					
				W		B			
				W1	Wcs*	Bcs**	C		
標準品	35	39.4	-	175		500	640	1010	
CO ₂ 品	40	39.4	8.0	120	55	35	403	662	1042

*Wcs:カーボキヤッチスラリーに含まれる水分 **Bcs:カーボキヤッチスラリーに含まれる固形物

表-3 荷卸時のコンクリートのスランプおよび空気量

	配合名	標準品		CO ₂ 品		
		目標値	2台目	4台目	2台目	4台目
スランプ(cm)		21±1.5	21.5	21.5	20.0	19.5
空気量(%)		4.5±1.5	5.4	5.5	4.0	4.0

3. 生コンクリート(舗装)への適用検討

3-1 コンクリートの配合

コンクリートの使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示します。CO₂品は太平洋セメント熊谷工場のキルン排ガスから分離回収⁴⁾した液化CO₂を用いました。配合は、カーボキヤッチスラリーを混合しないコンクリートを標準品、カーボキヤッチスラリーを混合したコンクリートは

CO₂品としました。CO₂品では、先行してカーボキヤッチスラリー、セメントおよび骨材の練混ぜを行い、その後、残りの水(W1)と混和剤を投入する分割練混ぜ方式を採用しました。また、CO₂品は標準品に対して粘性が高く流動性の低下が比較的大きかったため、目標強度を満足する範囲で施工性が良好となるW/Bを設定し、標準品では高性能AE減水剤

3-2 コンクリート舗装の試験施工

生コンプレントにて製造したコンクリートを用いて、太平洋セメント熊谷工場内のコンクリートの舗装を施工しました。生コンプレントから施工現場までア



写真-1 カーボキヤッチスラリーを適用したコンクリート消波ブロック



写真-2 カーボキヤッチスラリーを適用したガードレール用連続基礎ブロック

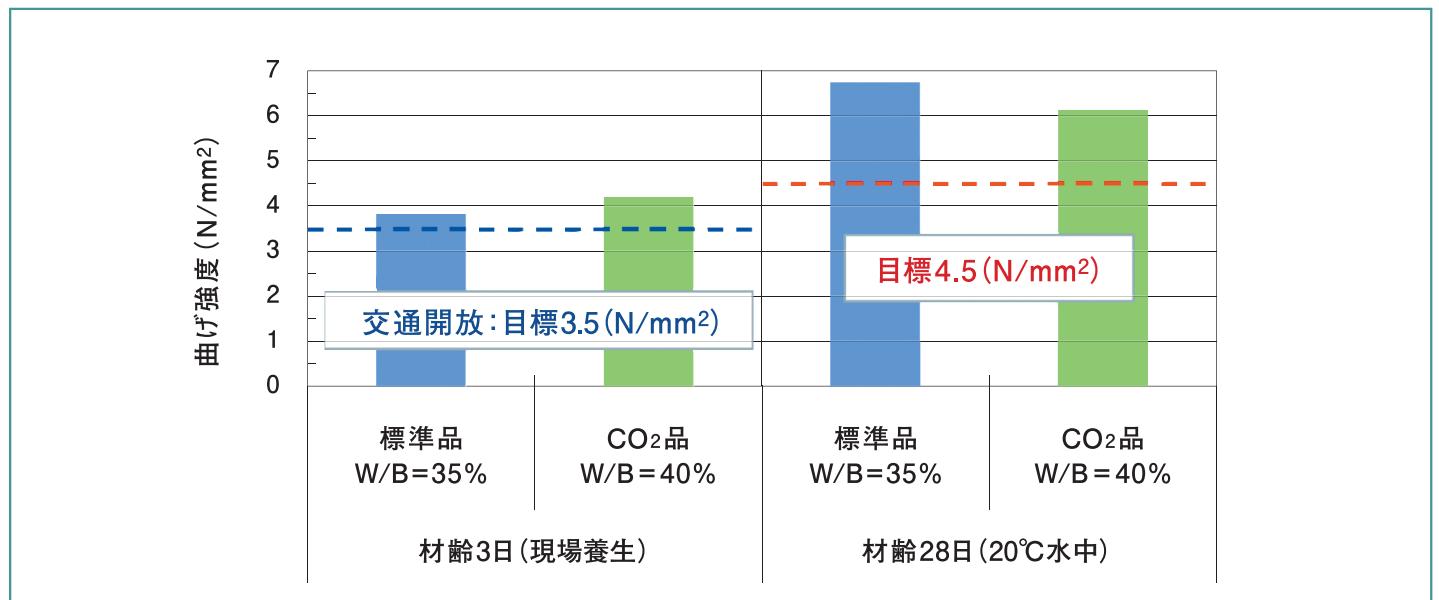


写真-3 カーボキヤッチスラリーを適用したコンクリート舗装の施工状況



写真-4 供用時のコンクリート舗装(CO₂品)

テータ車5台にて約17.5m³分を運搬し、コンクリートの運搬時間は約40分間でした。コンクリート荷卸時の目標スランプ、目標空気量は設計値を満足し、CO₂品においても標準品と同等の施工性を確保できました(表-3、写真3・4)。施工時に採取したテストピースの曲げ強度は、いずれの配合も目標強度(交通開放材齢3日:3.5N/mm²、材齢28日:4.5N/mm²)を満足しました(図-7)。テストピースを用いて分析したコンクリート中のCO₂の固定量は8.4kg/m³であり、セメントあたりに換算すると19kg/t-cemでした。このCO₂の固定による効果に加えてカーボキヤッチスラリーの混合に伴うコンクリートの配合設計上の効果も加えると、標準品に対するCO₂の削減効果は37kg/t-cemと試算されています。



コンクリートの炭酸化

4. カーボキヤッチによるCO₂

カーボキヤッチによるCO₂削減効果について、ここでは仮に配合が水セメント比50%、単位セメント量165kg/m³のコンクリートを対象として試算しました(表-4)。CO₂固定量はカーボキヤッチスラリー中の固形物をセメントの内割で8~20%混合する場合、19~49kg/t-cemとなります。また、配合設計上カーボキヤッチスラリーを混合すること自体により、無混合の場合と比較してCO₂の削減効果が期待できます。さらに、カーボキヤッチスラリーを製造するための原料として生コンラッジやプレキャスト製品の端材などの廃棄物を活用した場合、原料由来のCO₂をゼロと考えるとCO₂を固定化したカーボキヤッチスラリーはカーボンニュートラルなCO₂削減効果は大幅に増加すると考えられます。

5. おわりに

本稿では、セメント工場のキルン排ガスから分離回収したCO₂をセメントスラリー中に固定化させるカーボキヤッチの技術の概要を示しました。また、カーボキヤッチスラリーを適用したコンクリートを生コン工場にて製造し、これを用いてコンクリート舗装の試験施工を実施しました。カーボキヤッチによるCO₂削減効果はコンクリート中へのCO₂固定化による効果に加え、配合設計の工夫や原料に廃棄物を活用することにより、さらなるCO₂削減効果の増加が期待できると考えられます。

本技術を広く活用していく上では、製造量の多い生コンクリートに適用することが効果的と考えられます。課題としては、規格面での対応が重要となります。JIS A 5308では、レディーミキストコンクリートの練混ぜに用いる水としてスラッジ水を活用する場合のスラッジ固形分率の上限値を3%と規定しており、今後は6%への引上げも検討されています。スラッジ水にカーボキヤッチを適用した際に回収水の品質を満足する場合、

表-4 カーボキヤッチによるコンクリートのCO₂削減効果

カーボキヤッチによる コンクリートへの CO ₂ の固定量	カーボキヤッチスラリー 混合に伴う配合設計上の CO ₂ の削減量	原料に廃棄物を活用した 場合のCO ₂ の削減量
19~49kg/t-cem	18~45kg/t-cem	40~103kg/t-cem

*カーボキヤッチスラリー中の固形物をセメントの内割8~20%混合する場合

JISのフレッシュコンクリートとして出荷できる可能性があります。一方、カーボキヤッチの適用分野の拡大については本稿で示した生コンクリートやプレキャストコンクリート製品に加え、地盤改良材や建材製品など広く可能性が期待されます。

今後もカーボキヤッチのさらなる技術の深化と用途展開を模索しつつ、社会実装に向けた実績を積み重ねていくことでカーボンニュートラルの実現に貢献していきます。

【参考文献】

- Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry, IEA and WBCSD, 2018
- Sean Monkman, Mark MacDonald, R.Doug Hooton, Paul Sandberg: Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture, Cement and Concrete Composites, Vol.74, pp.218-224, 2016
- 太平洋セメント株式会社:CO₂をフレッシュコンクリートに固定化する製造システム「カーボキヤッチ」の開発に成功,太平洋セメントニュースレター(2023.3.15)
- 中村充志, 川之上太志, 中居直人, 一坪幸輝:化学吸収法によるセメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収技術の開発, 太平洋セメント研究報告, 第183号(2022)

いしい・ゆうすけ

【著者略歴】
2010年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム

くろかわ・だいすけ

【著者略歴】
2004年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム

ななお・まい

【著者略歴】
2015年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム

たば・ひろみち

【著者略歴】
2021年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム

いけだ・しゅうせい

【著者略歴】
2019年 小野田ケミコ株式会社入社
現在 太平洋セメント株式会社中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チーム

はやかわ・たかゆき

【著者略歴】
1999年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部固化・不溶化技術チームリーダー

コンクリート構造物の耐久性において重要であり、カーボンニュートラルの観点からも注目されているコンクリートの炭酸化について解説します。

Q1

コンクリートの炭酸化とはどういった現象ですか。

A1

コンクリート中のセメント水和物が大気中の二酸化炭素と反応し、炭酸化合物とその他の物質に分解する現象です¹⁾。

解説

コンクリート硬化体の細孔内に侵入した二酸化炭素は細孔溶液中に溶解し、炭酸イオンもしくは炭酸水素イオンとなります。これらのイオンと各種セメント水和物との反応が炭酸化反応です²⁾。セメント水和物として代表的な水酸化カルシウム、C-S-H、エトリンガイト、モノサルフェート等は、いずれもカルシウムを含んでおり、炭酸イオンとの反応で表-1のように炭酸化します。これら水和物の中では、水酸化カルシウムが最も炭酸化しやすいと言われています¹⁾。近年、炭酸化反応を積極的に利用することで、二酸化炭素を炭酸塩として固定化する技術がカーボンニュートラルの観点から注目されています。

Q2

中性化と炭酸化の違いは何ですか。

A2

中性化はセメント硬化体のアルカリ性が低下する現象であり、炭酸化はその要因の一つです¹⁾。

解説

中性化はアルカリ性が低下する現象であり、アルカリ性を保持する役割を果たしている水酸化カルシウムの存在が重要となります³⁾。中性化と炭酸化の関係を図-1に示します。中性化の要因として、炭酸化以外に酸性雨や酸性土壌との接触、火害が挙げられます⁴⁾。酸性雨や酸性土壌との接触ではコンクリート中に酸が浸入することで、酸の作用により水酸化カルシウムが分解され、アルカリ性が低下します²⁾。火害ではコンクリートの昇温により水酸化カルシウムが酸化カルシウムに熱分解されることで、アルカリ性が低下します²⁾。

Q3

コンクリートの炭酸化速度に影響する要因は何ですか。

A3

コンクリートの組織の緻密さ、細孔溶液および反応生成物の組成、環境条件がコンクリートの炭酸化速度に影響を与えます¹⁾。

中性化

セメント硬化体のアルカリ性が低下する現象

【発生因】
・二酸化炭素の侵入
・酸性物質の侵入
・火災による昇温

炭酸化

セメントの水和物が二酸化炭素と反応し、炭酸化合物などに変質する現象

【発生因】
・二酸化炭素の侵入

図-1 中性化と炭酸化の関係⁴⁾

表-1 水和生成物の炭酸化反応式¹⁾

- (1) $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
水酸化カルシウム
- (2) $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}^+ + 3\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{SiO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
C-S-H
- (3) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}^+ + 3\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4 + 32\text{H}_2\text{O}$
エトリンガイト
- (4) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}^+ + 3\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{CaSO}_4 + 12\text{H}_2\text{O}$
モノサルフェート
- (5) $3\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}^+ + 3\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4 + 29\text{H}_2\text{O}$

解説

コンクリートの炭酸化は大気中の二酸化炭素がコンクリートへ拡散する現象であるため、その速度はコンクリートの空隙量および空隙構造に依存します。コンクリートの空隙構造は材料、配合、養生の影響を受けます。例えば、水セメント比が低い緻密なコンクリートでは二酸化炭素の浸透が困難となり、炭酸化速度は減少します²⁾(図-2)。なお、炭酸化速度とは時間に対する炭酸化深さの増加量のことです。炭酸化深さを確認する方法として、フェノールフタレン溶液の噴霧による呈色現象を利用する方法が挙げられます。

フライアッシュや高炉スラグ微粉末といった混和材を用いたコンクリートでは、セメントの水和により生成される水酸化カルシウムと反応して混和材の水和が進行すること、セメント内割で使用されたためセメント量が少なくなることにより、コンクリート中の水酸化カルシウムの存在量が

減少します。炭酸化は主に表-1(1)の反応が段階的に生じることで進行するため(図-3)、水酸化カルシウムの減少は炭酸化の抑制に対して不利となります。一方で、混和材の水和による緻密化は炭酸化速度の低減に有効であるため、炭酸化速度はこれらのバランスによって決まります²⁾。

コンクリートが置かれる環境条件によつても炭酸化速度は影響を受け、炭酸化の進行する速度は環境温度の上昇と共に増加すること⁷⁾(図-4)、二酸化炭素濃度が高い環境では二酸化炭素の拡散が促進されるため炭酸化速度は増加すること⁸⁾(図-5)が確認されています。また、二酸化炭素の液相中の拡散速度は気相よりも著しく小さいため、相対湿度が高く細孔が水で満たされている場合は二酸化炭素の拡散が阻害されます。相対湿度が低い場合は炭酸化に必要な水が供給されず炭酸化が進行しやすくなります。そのため、炭酸化の進行しやすい相対湿度は中程度であることが知られています⁹⁾。ただし、コンクリート中

確認されています⁷⁾(図-6)。

Q4

炭酸化によってコンクリートに悪影響はありますか。

A4

コンクリート自体に炭酸化は必ずしも悪影響を及ぼすものではないと考えられています。

解説

水酸化カルシウムより炭酸カルシウムの方がモル体積が大きいため、炭酸化されたコンクリートは空隙率が低くなります。また、炭酸化時に放出される水が未水和セメントの水和に寄与すること、劣化因子の移動抵抗性の向上をもたらすことが知られています⁹⁾。ただし、コンクリート中

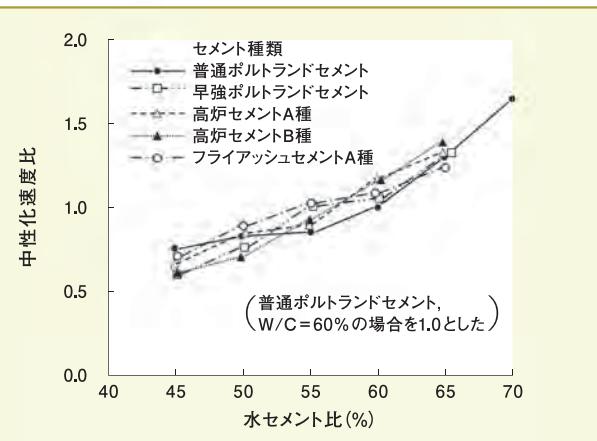


図-2 水セメント比が中性化速度に及ぼす影響⁵⁾

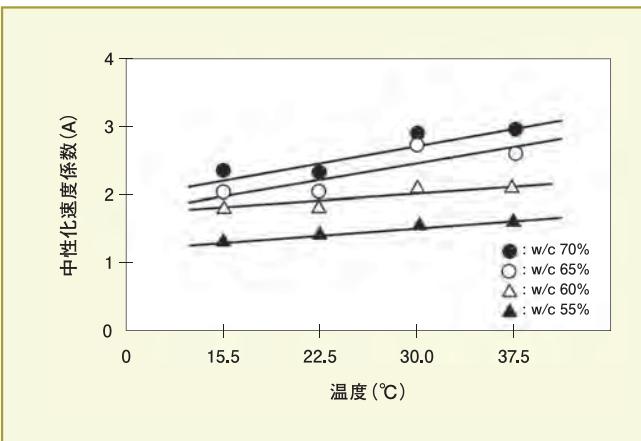


図-4 中性化進行速度に及ぼす温度の影響⁷⁾

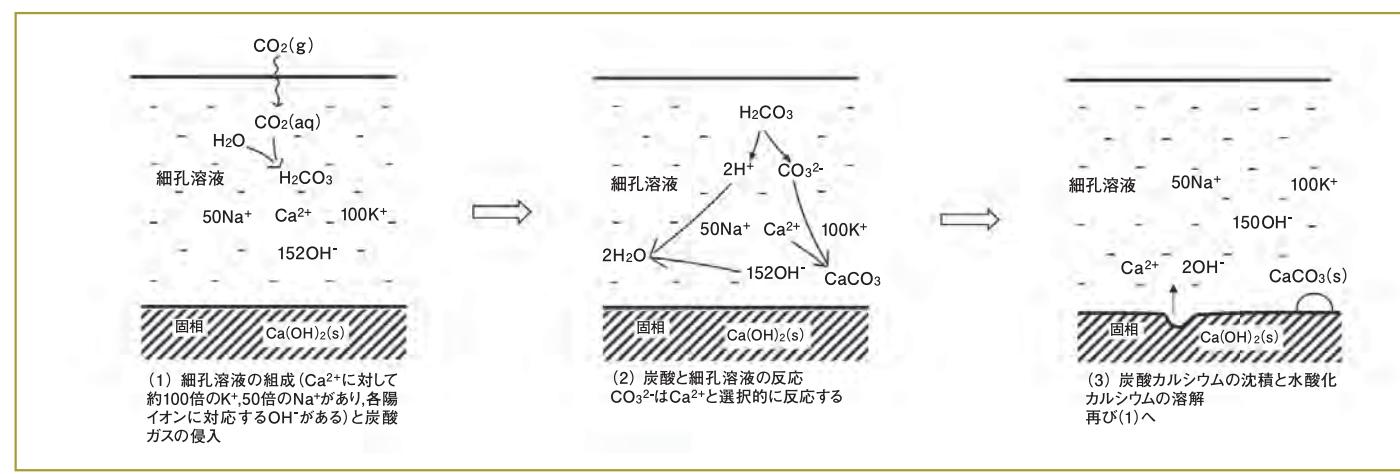


図-3 炭酸化の化学的進行過程の模式⁶⁾

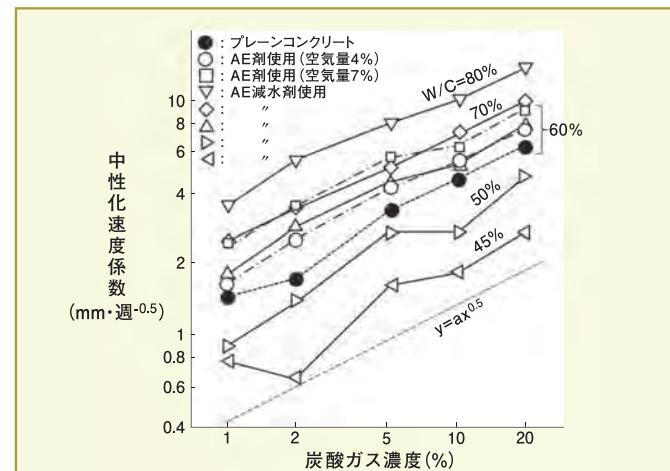


図-5 中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度の影響⁸⁾

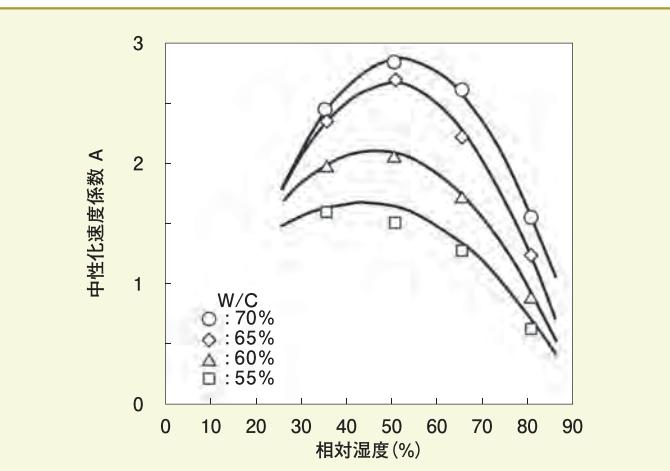


図-6 中性化速度係数と相対湿度の関係⁷⁾

の鋼材には悪影響を及ぼす場合があります。セメントの水和反応により生成された水酸化カルシウムの存在により、コンクリート中は強アルカリ性を示すことが知られています。この強アルカリ下において、コンクリート中の鋼材表面には不動態により強制的に炭酸化させることで、短期間で強度を発現することができます。カーボンリサイクルの観点より回収された二酸化炭素を資源として有効活用する技術として注目されており¹¹⁾、二酸化炭素を吸収して硬化するセメントを用いることで、コンクリート中に多くの二酸化炭素を固定することができます。

表-2に二酸化炭素を吸収して硬化するセメントを示します。これらのセメントは高い二酸化炭素濃度環境を保持できる装置により強制的に炭酸化させることで、短期間で強度を発現することができます。カーボンリサイクルの観点より回収された二酸化炭素を資源として有効活用する技術として注目されており¹¹⁾、二酸化炭素を吸収して硬化するセメントを用いることで、コンクリート中に多くの二酸化炭素を固定することができます。

Q5

最近注目されている炭酸化で硬化するコンクリートとは何ですか。

A5

水和反応ではなく、主に炭酸化反応によって硬化する二酸化炭素の固定能力に優れたセメントを用いることで、多くの二酸化炭素を固定することができるコンクリートです。

太平洋セメント株式会社中央研究所セメント・コンクリート研究部コンクリートソリューションチーム 茨木 泰介

表-2 二酸化炭素を吸収して硬化するセメントの一覧¹¹⁾

企業	国	商品/技術名	CO ₂ 利用技術の概要
Solidia Technologies	米国	Solidia Cement™	原料の石灰石を減らした低Caセメント。ウォラストナイト($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、ランキナイト($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$)を主成分としCO ₂ を吸収して硬化する
太平洋セメント	日本	CARBOFIX® CEMENT	原料の石灰石を減らし廃棄物使用量を増やした低Caセメント。 $\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$ を主成分としCO ₂ を吸収して硬化する
鹿島建設、デンカ、中国電力、ランデス	日本	CO ₂ -SUICOM®	高炉スラグ微粉末、石炭灰、 $\gamma\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 等から構成されるセメント。CO ₂ を吸収して硬化する

参考文献

- 1) コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 1993
- 2) コンクリートの診断技術'23[基礎編], 日本コンクリート工学会
- 3) 小林一輔:コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.1-14, 1991.8
- 4) 和泉意登志, コンクリートの劣化と補修がわかる本, セメントジャーナル社, 2005
- 5) 和泉意登志ほか:コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類、調合および養生条件の影響について, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.117-120, 1985
- 6) 小林一輔ほか:コンクリートの炭酸化のメカニズム, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.37-49, 1990.1
- 7) 郷載東ほか:モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 第1巻第1号, pp.85-94, 1990
- 8) 阿部道彦ほか:コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.409, pp.1-10, 1990
- 9) Neville A.M.著, 三浦尚訳:ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版, 2004
- 10) コンクリート構造物の劣化および補修事例集, 日本コンクリート工学協会, 1996
- 11) 一坪幸輝, 吉川知久:太平洋セメントのカーボンニュートラルに向けた研究開発 第4回セメント・コンクリート分野におけるCO₂有効利用技術の開発, 太平洋セメント株式会社, CEM'S, No.96, pp.12-19, 2023.4
- 12) 取達剛ほか:炭酸化したセメント系材料におけるCO₂固定量の評価手法および物性変化に関する研究, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.177, No.2, 37-54, 2021