

論文 原材料とセメント硬化体に含まれる固定二酸化炭素量の比較

横川 勇輝*1・横関 康祐*2

要旨: 使用材料そのものが含有している固定二酸化炭素量からセメント硬化体の固定二酸化炭素量が推定可能か検討を行った。各使用材料および硬化体を無機炭素分析機(クーロメーター)により炭素量を分析し、二酸化炭素量を換算して求めた。硬化体の養生は水中養生と炭酸化養生とした。その結果、全てのセメント硬化体で材料由来の固定二酸化炭素量から水中養生を行った硬化体の固定二酸化炭素量を推測できることが示唆された。また、材料由来と炭酸化養生の固定二酸化炭素量を合算すると、セメント硬化体の内、モルタルが最も二酸化炭素を固定することが分かった。

キーワード: 固定二酸化炭素量, クーロメーター, 元素分析, 炭酸化養生, 石灰石, CO₂原単位

1. はじめに

近年、コンクリートや骨材を用いたカーボンリサイクル技術や低炭素型セメントが注目されており、多くの研究がなされている^{1) 2)}。また、そのような技術を評価するために、コンクリート中の固定二酸化炭素量を評価する研究も多くおこなわれている^{3)~12)}。これらの研究では、コンクリートの固定二酸化炭素量を指示薬³⁾や空隙率⁴⁾、供試体の重量変化^{5) 6)}から簡易に評価可能か検討を行った例や、分析機器を用いてコンクリートの固定二酸化炭素量を評価した例^{4) 7)~12)}がある。

機器分析では、これまで熱分析による炭酸カルシウムの脱炭酸量から固定二酸化炭素量を計算する手法が主流であった⁷⁾。しかし、近年では、試料を燃焼させ、その際に発生する二酸化炭素を検出する有機炭素分析(TOC)^{9) 10)}や試料中の炭酸塩を塩酸で溶解させ、生成された二酸化炭素を分析する無機炭素分析(クーロメーター)を用いた^{4) 8) 9) 11) 12)}研究が行われている。

コンクリート中にはカーボンリサイクル技術由来の二酸化炭素だけではなく、様々な炭素が混入していると思われる。セメントには廃棄物処理のため、生産過程において汚泥やスラッジを混入させている。また、骨材に使用される可能性がある堆積岩は生物の死骸が堆積してきたものであるため、炭素が混入していると思われる。化学混和剤は有機化合物であるため、炭素が含まれている。このように、カーボンニュートラル技術を使用した際には、原材料由来により硬化体内部に取り込まれる炭素と炭酸化養生等を行った際に外部から供給される炭素の2種類がある。

TOCやクーロメーターといった機器分析によってコンクリートの固定二酸化炭素量を算出する際には、コンクリート中の炭素を二酸化炭素に変換して検出している。そのため、コンクリートの固定二酸化炭素量を分析する

際には、カーボンリサイクル技術由来の二酸化炭素と元々含有されている原材料由来の二酸化炭素を分けて考える必要がある。

また、固定二酸化炭素量を機器分析によって求めている研究^{4) 11) 12)}では、供試体の炭酸化箇所から試料を採取し、計測した固定二酸化炭素量から水中養生を行った供試体や、供試体の未炭酸化部位から採取した試料の固定二酸化炭素量を減算して求めている。この手法で固定二酸化炭素量を算出する際には、試料の固定二酸化炭素量から供試体の炭酸化部全体の固定二酸化炭素量を推測するため、試験結果に密度を乗じる必要がある。

しかし、密度は配合設計時、フレッシュ時、硬化後、炭酸化養生前後と様々に変化する恐れがある。そのため、既往の研究におけるコンクリート中の固定二酸化炭素量は、真の材料由来の固定二酸化炭素量を算出できていない可能性がある。

そこで、本研究では各材料の固定二酸化炭素量の合算が、水中養生を行った供試体の固定二酸化炭素量と等しくなるかを検討する。また、炭酸化養生を行った供試体の固定二酸化炭素量が各材料の固定二酸化炭素量の合算より増加しているかを固定二酸化炭素分布にて分析し、確認した。

2. 試験方法

2.1 クーロメーター

クーロメーター(日本アンス社製, M-3000A型)の塩酸は濃度30%で行った。クーロメーターの原理は以下のとおりである。クーロメーターは、試料を塩酸で溶解させ、試料中の炭酸塩を気化させる。その気化させ、生成した二酸化炭素を指示薬が入った溶液に吸着させることで、溶液が変色する。この変色をモニタリングし、電気分解を発生させ、この際に印加した電流値から炭素量を

*1 東洋大学 理工学研究科 都市環境デザイン専攻 (学生会員)

*2 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 結合材の化学分析結果

試料名	化学組成(mass%)							密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)
	lg.loss	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
BB	1.35	25.80	1.73	8.90	55.58	3.15	1.55	3.04	3930
γC ₂ S	0.1	35.0	0.06	1.68	61.9	0.5	-	2.85	1500

倍で、1試料当たり30点の点分析を行った。点分析では

表-2 配合およびフレッシュ試験結果

配合名	W/B (%)	目標フロー(mm) 又はスランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	BB	γ	S1	S2	G
P-30	30	-	-	472	1101	472	-	-	-
P-40	40	-	-	544	952	408	-	-	-
P-50	50	-	-	598	837	359	-	-	-
M-45	45	180±30	7.0±1.5	268	417	179	1072	119	-
M-50	50	180±30	7.0±1.5	288	403	173	1037	115	-
M-55	55	180±30	7.0±1.5	307	391	167	1005	112	-
C-45	45	12±2.5	4.5±1.5	175	272	117	658	71	996
C-50	50	12±2.5	4.5±1.5	175	245	105	671	73	1016
C-55	55	12±2.5	4.5±1.5	175	223	95	682	74	1032

表-3 フレッシュ試験結果

配合名	単位容積質量(配合)(kg/m ³)	フロー(mm)またはスランプ(cm)	空気量 (%)	単位容積質量(フレッシュ)(kg/m ³)
P-30	2106	110	2.2	2045
P-40	2014	99	1.2	1904
P-50	1925	109	0.1	1794
M-45	2055	172	6.8	2226
M-50	2016	157	8.4	2150
M-55	1982	197	6.7	2226
C-45	2289	10.0	4.7	2283
C-50	2285	11.0	3.8	2257
C-55	2281	12.5	3.4	2289

算出する機器である。試験は3回行った後に平均値を算出した。平均値から10%以上外れた結果が出た際にはその結果を棄却し、残りの2回の結果の平均を試験結果とした。試験結果は試料中の炭素量が測定されるため、試料中の固定二酸化炭素量の換算式は式(1)を用いた。

$$x = A \times y \times z \quad (1)$$

x: 1m³当たりの固定二酸化炭素量(kg/m³)

A: 換算係数(CO₂の分子量(100.1)/Cの原子量(12.01))

y: 試料中の炭素割合(%)(試験結果/試料重量)

z: 単位容積質量(kg/m³)

2.2 元素分析

元素分析はキーエンス社製、レーザー元素分析ヘッド EA-300 VHX シリーズを使用した。レーザーの種類は YAG レーザー、スポットサイズ 10μm、観察倍率は 300

15 点の分析が終了後、元素分析の傾向が平均と 20%以上異なる分析結果は棄却した。30 点の元素分析を行った後、元素分析の結果を平均化した。

3. 実験概要

3.1 使用材料

(1) 練混ぜ水

埼玉県川越市の上水道水(W)を使用した。

(2) 結合材

セメントは高炉セメント B 種(BB)を使用した。また、二酸化炭素と反応して硬化する特殊混和材、γC₂S(γ)を使用した。化学組成、密度、比表面積を表-1に示す。

(3) 細骨材

本試験では細骨材を2種類使用した。それぞれ S1, S2 と表記する。S1 は西多摩産の石灰岩砕砂(密度 2.66g/cm³, 吸水率 1.54%, F.M.3.06)を使用した。S2 は木更津産の山砂(密度 2.56 g/cm³, 吸水率 2.16%, F.M.1.44)を使用した。

(4) 粗骨材

本実験の粗骨材(G)は東京都青梅産砕石(最大寸法 20mm, 密度 2.67g/cm³)を使用した。

(5) 混和剤

AE 減水剤(AD), AE 剤(AE)を使用した。AD は水で4倍希釈, AE も同様に100倍希釈を行ったものを使用した。AD, AE の主成分はそれぞれリグニンスルホン化合物とポリオール複合体, アニオン及びノニオン系特殊界面活性剤である。

3.2 供試体作製

配合を表-2, フレッシュ試験の結果を表-3に示す。

配合名のアルファベットはペースト(P),モルタル(M),コンクリート(C)を表しており,数字は水結合材比を示している。単位容積質量(フレッシュ)はエアメーターにセメント硬化体を詰めた際の質量,容積から求めた。

本実験では各セメント種に対して原材料由来の固定二酸化炭素量と水中養生を行った硬化体の二酸化炭素含有量を比較するため,ペースト,モルタル,コンクリートを3配合ずつ作製した。作製した供試体はペーストが4×4×16cmの角柱供試体,モルタル,コンクリートはそれぞれφ5×10cm,φ10×20cmの円柱供試体である。

セメント,モルタル,コンクリートを型枠に打設後,2日間,温度20℃,湿度60%RHで封緘養生を行い,脱型した。その後,一部の供試体は水中養生5日,残りは炭酸化養生を行った。炭酸化養生の条件は温度20℃,湿度50%RH,二酸化炭素濃度80%とした。ペーストは5日,26日,モルタルは5日,コンクリートは26日炭酸化養生を行った。炭酸化養生を行った供試体は養生槽に入れる前にペーストは5面を,モルタル,コンクリートは円柱の側面にアルミテープを巻いた。

3.3 原材料の二酸化炭素含有量の測定

クーロメーターで各使用材料の二酸化炭素含有量を測定した。また,AD,AEは元素分析を行った。AD,AEはそれぞれ希釈しているため,大部分が水である。そのため,元素分析を行う際には水以外の元素量が微量になり,分析が困難となると考えた。そこで,ピーカーに200ml計量後,105℃±5℃の環境下で28日間放置し水分を蒸発させた。その後残った固形分を秤で計量して固形分に対して元素分析を行い,固形分の結果から試料全体の元素含有量を推測した。

3.4 硬化体の固定二酸化炭素量の測定

材齢に達した水中養生を行った供試体はタガネを用いて4分割した後,ハンマーで全粉碎した。その後四分法で縮分し,分析試料とした。

炭酸化養生を行った供試体は割裂後,割裂面の片側にフェノールフタレイン溶液を噴霧し表面から呈色部までの距離をノギスで6点計測し,中性化深さを確認した。その後,中性化深さの位置で供試体をペースト,モルタルは3回,コンクリートは1回切断した。モルタルの供試体の一部は中性化の進行により,3回切断できなかった供試体も存在した。切断後試料を全粉碎し,四分法で縮分した。

水中養生の供試体,炭酸化養生の供試体のそれぞれの工程が終了後,乳鉢で試料の粒径が0.6mm以下になるまですりつぶした。全ての作業は大気雰囲気下で行い,作製した試料は逐次,密封容器(大気雰囲気)に保存した。

表-4 各材料中の二酸化炭素含有量(mass%)

W	BB	γ	S1	S2	G	AD	AE
0.00	1.76	0.07	43.6	0.00	1.58	0.00	0.00

表-5 AD, AEの元素分析結果

試料名	元素割合(mass%)	
	C	Na
AD	6.00	1.38
AE	0.07	0.02

4. 実験結果と考察

4.1 使用材料の分析

各材料の二酸化炭素含有量を表-4に示す。BB,γ,S2,Gには二酸化炭素が含有されていた。BBにはスラッジ由来の無機炭素やスラグに混入した炭酸カルシウム等が含まれており,それらを検出したと思われる。また,γは産業副産物を主原料としているため,そこに混入していた無機炭素を検出したものと考えられる。

S1は石灰岩砕砂であり,主原料はCaCO₃である。CaCO₃の分子量は100.01であり,CO₂の分子量は44.01であるため,純度100%のCaCO₃中には44.01%の二酸化炭素が混入している。S1の純度は不明であるが,試験結果より,S1は高純度の石灰岩砕砂であり,クーロメーターは石灰岩砕砂中の二酸化炭素を分析できていると思われる。

Gの採取地である青梅は泥岩や珪質泥岩,石灰岩やチャートを含む混在岩が分布している¹³⁾。また,東京都から採取する骨材は全て砂岩であり¹⁴⁾,砂岩には微量の炭素質が含まれていることが報告されている¹⁵⁾。そのため,この炭素質を検出したと思われる。

一方,W,S2,AD,AEには二酸化炭素が含まれない結果となった。AD,AEはリグニンスルホン酸等に炭素が含まれているが,これらが検出されなかった。これはクーロメーターが無機炭素分析であるため,リグニンスルホン酸等の炭素由来の二酸化炭素を計測できなかったのではないと思われる。

表-5にAD,AEの元素分析結果を示す。また,それぞれの固形分の重量は28.16g,0.25gであった。AEの固形分が少ないのは100倍希釈の溶液を使用しているためであると思われる。この結果より,AD,AEそれぞれに炭素が混入していることが判明した。

クーロメーターは試料を塩酸で溶解させ,試料中の炭酸塩を二酸化炭素に変換させ,その二酸化炭素を計測する分析機器である。高分子の化合物を塩酸で溶解させるには高温が必要になる。しかし,クーロメーターは常温で試料を溶解させているため,高分子の炭素を二酸化炭素に変換できず,試料中に二酸化炭素が混入していない

表-6 各セメント硬化体中の二酸化炭素含有量の比較

配合名	二酸化炭素含有量(kg/m ³)			配合-材料 材料 (%)	フレッシュ-材料 材料 (%)
	材料の積算	水中養生の試験結果			
		材料	配合		
P-30	19.5	27.3	28.1	39.8	44.1
P-40	16.9	23.7	25.1	40.3	48.6
P-50	14.8	25.0	29.9	68.4	102
M-45	473	432	451	-8.5	-4.7
M-50	458	421	451	-8.0	-1.6
M-55	443	443	484	0.0	9.1
C-45	306	295	295	-3.6	-3.8
C-50	312	333	329	6.7	5.4
C-55	316	363	364	14.7	15.1

試験結果を示したと思われる。

4.2 供試体の固定二酸化炭素量の測定

(1) 原材料由来の二酸化炭素含有量と水中養生硬化体の二酸化炭素含有量の比較

表-6 に各セメント硬化体の材料と水中養生を行った供試体の二酸化炭素含有量の比較の結果を示す。材料は表-4 にて判明した各原材料の二酸化炭素含有量を、配合に含まれる使用量で乗算、積算して求まる二酸化炭素含有量を示している。また、配合は、水中養生の結果から、式(1)の係数の z を配合計算から求められる単位容積質量で乗算したものである。フレッシュは、配合と同様の手法で、式(1)の係数の z をフレッシュ試験時の単位容積質量とし、二酸化炭素含有量を算出した。それぞれ配合、フレッシュと記した。また、AD、AEの二酸化炭素含有量をクーロメーターでは検知できなかったため、材料の二酸化炭素含有量を算出する際には考慮をしなかった。

表-6 より、ペーストの配合またはフレッシュの密度を用いた算出結果と原材料の積算による二酸化炭素含有量の差が極めて大きい結果となった。これは空気量の影響ではないかと思われる。ペーストの配合設計では空気量を考慮していないが、実際に練混ぜを行った際には連行空気が入ってしまう。また、ペーストには増粘剤を使用していないため、ブリーディング水が大量に発生した。本実験では、ブリーディング水が出なくなるまで30分に1回手練りを行った。しかし、30分経過ごとに、表面に大量のブリーディング水が発生していたため、この水が蒸発し、供試体の単位容積質量が変化したものと考えられる。配合の方がフレッシュの結果よりも材料の二酸化炭素含有量に近いのは、このブリーディング水の影響だと思われる。ブリーディング水はW/Bが大きくなるに従い、増加した。そのため、W/Bが増加するほど材料からの積算値との差が大きくなったものと考えられる。

しかしながら、ペーストの材料由来の二酸化炭素含有

量はモルタルやコンクリートに比べて小さい。また、結合材の使用量が極めて多いため、炭酸化養生を行った際の固定二酸化炭素量は大きくなることが予想される。筆者らは高炉セメントB種を用いたセメントペースト(W/B=50%)を7日間、温度20°C、湿度50%RH、二酸化炭素濃度80%で炭酸化養生を行ったところ、最大で315kg/m³の二酸化炭素を固定していた¹²⁾。

表-6の結果より、材料と配合の二酸化炭素含有量の差が最も大きいのはW/B=50%であり、その差は10kg/m³程度である。これは既往の研究¹²⁾のペーストの固定二酸化炭素量の3%程度と無視できる範囲であると考えられる。そのため、配合から材料由来の二酸化炭素含有量を推測可能と思われる。

ペーストに対してモルタル、コンクリートの場合では配合、フレッシュはどちらも材料の二酸化炭素含有量の差は小さくなった。しかし、W/B=55%のコンクリートはそれぞれの差が大きい。これは、粗骨材の影響であると思われる。モルタルの場合はコンクリートに比べ、組成が一様である。しかし、コンクリートの場合には粗骨材の存在により、クーロメーターの試料として供試体の組成を完全には縮分できていない可能性がある。

モルタル、コンクリートでは配合、フレッシュの差に特異な傾向は見られなかった。そのため、算出が容易な密度を使用することが良いと考察する。

モルタル、コンクリートでもペーストと同様にW/Bが大きくなるにつれて原材料とフレッシュ試験時の単位容積質量を用いた硬化体の二酸化炭素含有量の差が大きくなった。これはペーストと同様にブリーディング水の影響があるものと思われる。

これらより、ペーストでは原材料の試験結果の積算値、モルタル、コンクリートでは単位容積質量を用いた算出結果により、硬化体に含まれる二酸化炭素含有量を推測することが可能であると思われる。

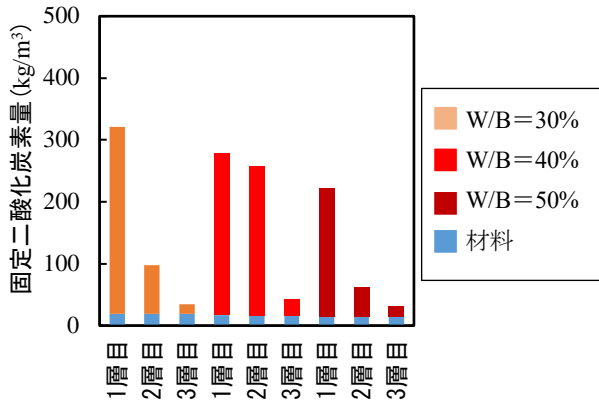


図-1 材齢 7 日のペーストの固定二酸化炭素量

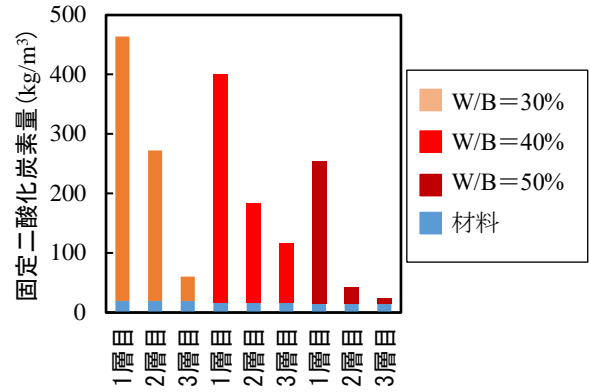


図-2 材齢 28 日のペーストの固定二酸化炭素量

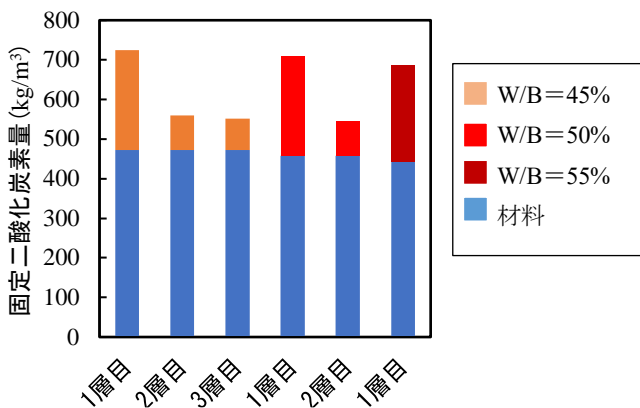


図-3 材齢 7 日のモルタルの固定二酸化炭素量

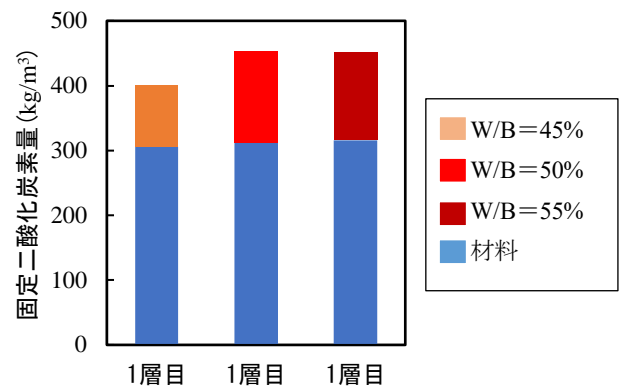


図-4 材齢 28 日のコンクリートの固定二酸化炭素量

(2) 真の固定二酸化炭素量の分布

図-1~4 にペースト、モルタル、コンクリートの表層からの各層の固定二酸化炭素量を示す。ペーストの固定二酸化炭素量を算出する際の単位容積質量は配合計算時のものを、モルタル、コンクリートはフレッシュ試験時のものを使用した。固定二酸化炭素量は炭酸化養生起因の、外部からの固定二酸化炭素量と材料由来の内部の二酸化炭素含有量をそれぞれ分けて示した。

図-1、2 のペーストの結果から、炭酸化養生期間が増加するごとに全ての W/B において固定二酸化炭素量が増加したことが分かる。また、W/B が増加すると固定二酸化炭素量は減少した。これは W/B が増加すると結合材量が大きく減少するためだと考える。

全ての供試体で 1 層目と 2 層目の中間に中性化深さが存在するが、全ての W/B において中性化深さで深でも二酸化炭素を固定していた。これは既往の研究⁴⁾ 12)と同様である。また、3 層目でもわずかに二酸化炭素量を固定していた。図-1 の 2 層目の W/B=40%、図-2 の 3 層目の W/B=40%の固定二酸化炭素量が極めて大きい。これは密封容器のふたが完璧に閉じられておらず、試料が分析前に炭酸化してしまったものだと考えられる。また、

1 層目の材料の固定二酸化炭素量は全体の 5%程度であった。

図-3 のモルタルの結果では、W/B=50%は中性化深さが 23mm、W/B=55%では全面が中性化していたため、それぞれ 2 層、1 層の試料を採取した。モルタルの 1、2 層目では W/B が大きくなるにつれて固定二酸化炭素量が若干増加したが、大きな変化は見られなかった。これはペーストと違い、モルタルでは W/B が異なる場合でも結合材の使用量に大きな減少が生じないためだと思われる。また、ペーストと同様に 3 層目でも二酸化炭素を固定化していた。

モルタルでは材料の固定二酸化炭素量の割合が非常に大きな結果となった。これは石灰岩砕砂を使用した影響である。表-4 の結果からわかるように石灰岩砕砂は重量の 43%程度が二酸化炭素量のため、このように材料由来の固定二酸化炭素量が大きくなった。全ての W/B において、1 層目の固定二酸化炭素量のうち炭酸化養生によって固定された二酸化炭素量は 250kg/m³程度であり、材料由来の固定二酸化炭素量は 450kg/m³程度であった。そのため、全ての固定二酸化炭素量のうち 65%程度が材料由来の固定炭素量であった。

現在、カーボンニュートラル技術の研究の1つに、スラッジ水と二酸化炭素を反応させ、石灰石微粉末を作製する研究¹⁶⁾が行われている。本実験では天然の石灰岩砕砂を使用した。石灰岩砕砂がカーボンニュートラル関連の技術を使用した骨材や結合材として使用された場合、大量に二酸化炭素が固定されることが期待できる。

図-4のW/B=45%は他のW/Bに比べ固定二酸化炭素量が少なかった。これは本節(1)項で記したように粗骨材の縮分の影響だと思われる。W/B=50%、W/B=55%では固定二酸化炭素量には大きな差はなかったが、モルタルと同様、結合材料に大きな差がないことが理由であると思われる。

コンクリートでもモルタルと同様に30%程度が炭酸化養生由来の固定二酸化炭素量であり、70%が材料由来の固定二酸化炭素量であった。

各セメント硬化体の中で、炭酸化養生ではペースト>モルタル>コンクリートの順で二酸化炭素を固定していた。これは結合材の使用量によって二酸化炭素と反応可能なカルシウム量が決定するためだと思われる。しかし、全体の固定二酸化炭素量は、モルタル>コンクリート>ペーストの順となっていた。これは石灰岩砕砂の使用量によって順序が変動したものと考えられる。また、各セメント硬化体はW/Bが大きくなることにより固定二酸化炭素量が増加することも判明した。

5. まとめ

本研究では各セメント硬化体の原材料起因の固定二酸化炭素と未炭酸化部位の固定二酸化炭素量の比較を行った。その結果、ペーストではそれぞれの結果に大きな差があったが、モルタル、コンクリートでは近い数値を分析することが可能であることが分かった。

各セメント硬化体のうち、原材料由来の固定二酸化炭素量と炭酸化養生の固定二酸化炭素量を合算した結果、石灰岩砕砂を用いた場合にはモルタルが最も二酸化炭素を固定できることが分かった。

謝辞：本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP21014)を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果である。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション, 2021.6
- 2) 一般社団法人セメント協会:セメント・コンクリート, No.900, 2022.2
- 3) 取違剛, 木村彩永佳, 関健吾, 横関康祐, 吉岡一郎, 中本健二, 庄司慎:炭酸化したコンクリートのCO₂

固定量評価方法に関する一考察, 土木学会第68回年次学術講演会, pp505-506, 2013.9

- 4) 取違剛, 横関康祐, 吉岡一郎, 盛岡実: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, Vol.77, No.2, pp37-54, 2021
- 5) 荒渡光貴, 関健吾, 取違剛, 渡邊賢三, 向俊成, 田口翔也, 樋川孝治, 貝森英樹:炭酸化養生前後における質量変化に基づく炭酸化の進行評価に関する検討, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術大会, V-450, 2022
- 6) 湯屋蓮, 池尾陽作, 伊代田岳史:セメントペースト硬化体におけるCO₂吸着量の簡易測定方法の一検討, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術大会, V-513, 2022
- 7) たとえば, 黒田泰弘, 菊池俊文:解体コンクリートによる二酸化炭素の固定, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.1, pp15-22, 2009
- 8) T. Higuchi, M. Morioka, I. Yoshioka, K. Yokozeki: DEVELOPMENT OF A NEW ECOLOGICAL CONCRETE WITH CO₂ EMISSIONS REDUCED TO BELOW ZERO, First International Conference on Concrete Sustainability, p816~821, 2013
- 9) 安田僚介, 島崎大樹, 七澤章, 森泰一郎:炭酸化を受けたセメント系材料中のCO₂含有率評価に向けた分析手法の検討, Cement Science and Concrete Technology, Vol.75, pp.442-447, 2021
- 10) 梅津真見子, 黒川大亮, 森泰一郎, 坂井悦郎:セメント硬化体のCO₂吸収と生成物の変化, Cement Science and Concrete Technology, Vol.75, pp.34-41, 2021
- 11) 横川勇輝, 横関康祐:炭酸化養生を行ったペーストの固定炭素量の測定方法に関する研究, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術大会, V-460, 2022
- 12) 横川勇輝, 横関康祐:炭酸化ペーストの固定炭素量分布に関する研究, 第76回セメント技術大会, 2022.5
- 13) 植木岳雪, 酒井彰:青梅地域の地質, 地域地質研究報告5万分の1地質図編, 東京(8), Vol.50, 平成19年
- 14) 丸章夫:コンクリートの鉱物化学, 森北出版会社, pp.30, 2022.1
- 15) 丸章夫:コンクリートの鉱物化学, 森北出版会社, pp.47, 2022.1
- 16) 佐々木猛, 八木利之:エコタンカル:CO₂を原料とした環境にやさしい軽質炭酸カルシウム, 土木施工, No.62(11), pp.87-90, 2021.11