

論文 軽質炭酸カルシウム粉末と高炉スラグ微粉末を用いた ALC の物性評価

森本 湧太*1・加藤 卓巳*2・今澤 公一*1 笠井 浩*3

要旨: 軽量気泡コンクリート製造における CO₂ 排出量削減を目指し, 代替原料として軽質炭酸カルシウム粉末と高炉スラグ微粉末を使用した場合の半硬化体の硬化速度と硬化体の圧縮強度評価を行った。軽質炭酸カルシウム粉末は硬化体の圧縮強度を低下させ, 高炉スラグ微粉末は半硬化体の硬化速度を低下させた。しかし, 湿式粉碎により微粉末化した軽質炭酸カルシウムのスラリーと高炉スラグ微粉末を併用した場合は, 半硬化体の硬化速度は増進し, 硬化体の圧縮強度も向上した。物性向上の理由として, 高炉スラグ微粉末の水和反応が増進した, または炭酸カルシウムが構造内を密実にしたと考察している。

キーワード: 軽量気泡コンクリート (ALC), 高炉スラグ微粉末, 軽質炭酸カルシウム, オートクレーブ養生

1. はじめに

オートクレーブ養生 (以降 AC 養生) を用いて製造される軽量気泡コンクリート (Autoclaved Lightweight aerated Concrete, 以降 ALC) は, 軽量性, 断熱性, 耐火性, 施工性などの優れた性能を持つ建築材料である。ALC は通常, セメントやケイ石からなる原料スラリーを型枠内で発泡させてケーキ状の半硬化体とする“保温養生工程”と, 半硬化体をピアノ線で所定寸法に切断する“切断工程”, 及び, 所定寸法に切断された半硬化体を AC 養生によって完全に硬化させて, 硬化体を得る“AC 養生工程”が順次行われる方法によって製造されている。

一方で現在, 温室効果ガスによる地球温暖化が喫緊の課題となっており, 日本においても 2030 年には 2013 年対比 46%削減, 2050 年にはカーボンニュートラルとすることが目標とされている。セメントを主原料とする建材の多くは, セメント焼成時に排出される CO₂ 量が多いため, 相関して CO₂ 排出量が多い傾向にある。ALC もセメントを主原料とする建材であるため, セメント使用量低下などによる CO₂ 排出量の削減が望まれる状況にある。

2. CO₂ 排出量削減に向けた検討

2.1 CFP (Carbon Footprint of Products) の試算

図-1 に経済産業省と環境省が示すカーボンフットプリントガイドライン¹⁾に沿って, ALC の原料調達プロセスから廃棄プロセスまでを仮定した CO₂ 排出量の試算値を示す。ALC の製造における CO₂ 排出量は, 原料調達プロセスが全体の 60%以上占めている。さらに図-2 に原料調達プロセスで排出される CO₂ 量を原料別で試算したデータを示す。ALC の原料の一つであるセメントが, CO₂ 排出量の大部分を占めている。以上のことから, ALC 製造

の CO₂ 排出量を削減するには, ALC の原料, 中でもセメント由来の CO₂ を削減することが効果的であり, “セメントに代わる CO₂ 排出量の小さい原料”へ代替することが重要となると言える。また, 使用する原料を“CO₂ を回収・固定して大気中の CO₂ 量を削減できる原料”に代替することでも, CO₂ の排出量を低減可能である。そこで筆者らは, ALC の使用原料の代替品を探し, 製造時の CO₂ 排出量の削減を目指すこととした。

2.2 CO₂ 排出量削減に有効な代替原料

図-3 に使用セメント種を変更した場合の原料調達プロセスの CO₂ 排出量算出値を示す。使用するセメントの内割置換で高炉スラグ微粉末量が増加するにつれ, CO₂

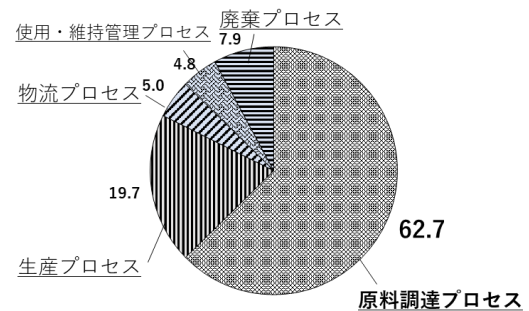


図-1 ALC のプロセス別 CO₂ 排出量算出

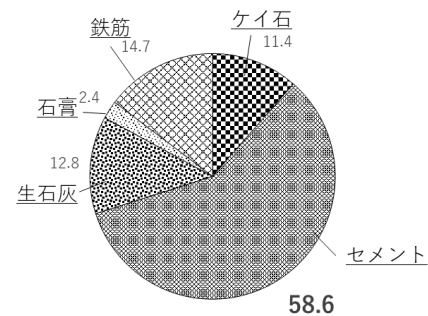


図-2 ALC の原料別 CO₂ 排出量算出 (%)

*1 住友金属鉱山シボレックス株式会社 技術部三重分室 (正会員)

*2 住友金属鉱山シボレックス株式会社 技術部三重分室

*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 CN コンクリートプロジェクトチーム 専任部長 博士 (工学) (フェロー会員)

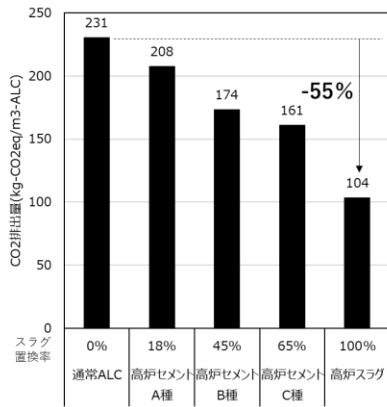


図-3 使用セメント種による原料調達プロセスのCO₂排出量推移

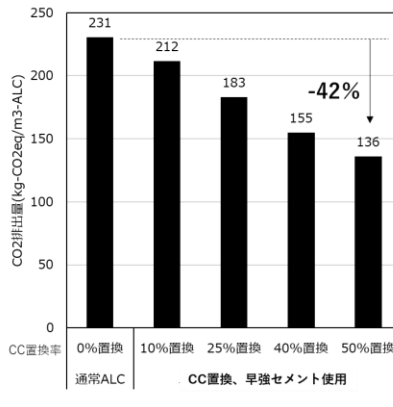


図-4 軽質炭酸カルシウム置換による原料調達プロセスのCO₂排出量推移

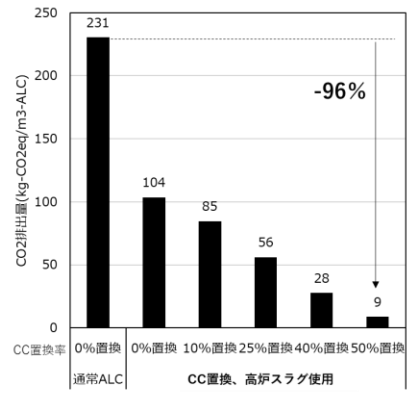


図-5 軽質炭酸化カルシウムと高炉スラグ併用によるCO₂排出量削減

排出量は低減し、セメントを全て高炉スラグ微粉末で置換した場合、排出量は50%以上削減される計算となる。このように、セメントゼロベースでALCの製造が出来れば、さらなるCO₂排出量削減が可能となる。

図-4にALCの原料として軽質炭酸カルシウム粉末を一部置換した場合の、原料調達プロセスにおけるCO₂排出量算出結果を示す。CO₂排出量削減に利用できる原料としてCCU(Carbon dioxide Capture and Utilization)材料があり²⁾、特に、再生原料からなるエコタンカルと呼ばれる軽質炭酸カルシウム粉末(以降CC)は環境負荷低減に期待される材料である。ALCの原料をCCに置換することが出来れば、原料由来のCO₂排出量を大きく減少させられる。CCを置換していく毎に、CO₂排出量は減少していき、50%置換することで約4割のCO₂排出量が削減できる計算となる。

次に、図-5に使用原料の一部をCCで置換し、更に早強セメントを高炉スラグ微粉末に代替した場合の、原料調達プロセスのCO₂排出量算出値を示す。原料の50%をCCに置換し、セメントを高炉スラグ微粉末に代替した場合、CO₂排出量が9kg/m³-ALCと、通常のALCと比較して原料由来のCO₂排出量を96%削減できる計算となる。

2050年にカーボンニュートラルの達成に向けて、原料調達プロセスのCO₂排出量は限りなく低くする必要があることから、CCU材料を主原料とし、セメントゼロベースの革新的なALC製造方法の開発が必要となる。特に、高炉スラグ微粉末には潜在水硬性があり、セメントほど迅速ではないものの、硬化反応を生じることが知られているため、セメントに代わる硬化性主原料として使用できる可能性がある。以上のことから本検討では、ALC原料に対して、CCを置換した場合や、使用するセメントを高炉スラグ微粉末へ代替した場合の影響を、AC養生前の半硬化体の硬化速度やAC養生後の硬化体の圧縮強度、生成した結晶量などの観点から評価を行った。

3. 試験方法

3.1 試験配合

ALCは通常、早強セメント、ケイ石、石灰、石膏、アルミニウム粉末を出発原料として使用している。本検討では、CCU材料であるCC(日本コンクリート工業株式会社製)を一定割合でバージン原料と置換し、AC養生前の半硬化体サンプルやAC養生後の硬化体サンプルを作製した。

試験の配合として、弊社でALC製造に用いている住友大阪セメント社製の早強セメントを用い、セメントを除く他原料に対して0~50%のCCを置換した水準(サンプルA~E)を作製した。また、サンプルA~Eに対して、早強セメントを全て日鉄高炉セメント社製の高炉スラグ微粉末である「エスメント」に代替した水準も作製した(サンプルF~J)。加えて、サンプルF~Jを用いた検討の結果から、湿式粉砕処理を施したエコタンカル(以降、CCスラリー)を用いた評価を追加検討した(サンプルK~N)。

3.2 CCの湿式粉砕処理

サンプルK~Nに使用したCCスラリーは、容量56.5Lのボールミルを用いて粉砕を行った。容器内にφ20の鉄球27.6kgとCC3.0kg、溶媒としての水を4.0kg入れ、70RPMで24時間の粉砕を行った。空気透過式ブレン測定装置を用いてブレン値を測定したところ、粉砕前のCCの

表-1 試験体作製に用いた各水準の配合表

水準名	CC置換率 (%)	早強セメント [g]	高炉スラグ [g]	けい石 [g]	生石灰 [g]	石こう [g]	ALC再生粉 [g]	CC [g]	CCスラリー [g]
A	0%	935	0	1770	147	245	1103	0	0
B	10%	935	0	1542	128	213	961	420	0
C	25%	935	0	1201	100	166	748	1050	0
D	40%	935	0	859	71	119	536	1680	0
E	50%	935	0	632	52	87	394	2100	0
F	0%	0	935	1770	147	245	1103	0	0
G	10%	0	935	1542	128	213	961	420	0
H	25%	0	935	1201	100	166	748	1050	0
I	40%	0	935	859	71	119	536	1680	0
J	50%	0	935	632	52	87	394	2100	0
K	10%	0	935	1542	128	213	961	0	420
L	25%	0	935	1201	100	166	748	0	1050
M	40%	0	935	859	71	119	536	0	1680
N	50%	0	935	632	52	87	394	0	2100

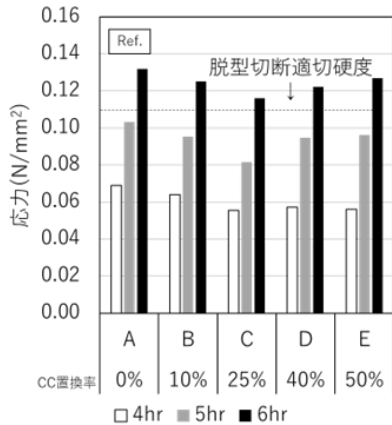


図-6 半硬化体の硬化測定結果
(早強セメント使用配合)

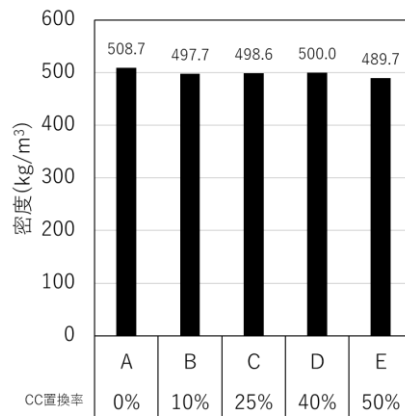


図-7 硬化体の密度測定結果
(早強セメント使用配合)

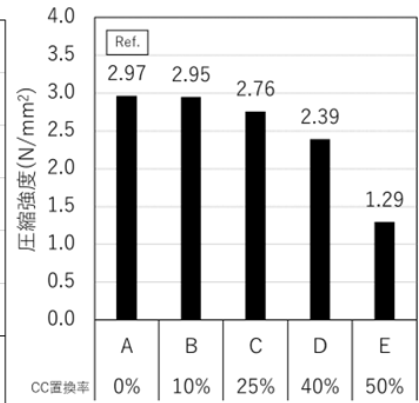


図-8 硬化体の圧縮強度測定結果
(早強セメント使用配合)

ブレン値は2800(cm²/g)で、粉砕後は66500(cm²/g)であった。

3.3 評価用試験体の作製方法

配合表(表-1)に従ってあらかじめ秤量した原料を、水と混練し、15×20×40 cmの型枠へ注ぎ込み、発泡スチロール容器内で半硬化体の保温養生を行った。半硬化体が脱型可能な硬度まで硬化したことを確認した後、180℃で6時間のAC養生を行い、測定用の硬化体を得た。

3.4 評価方法

サンプルの評価として、半硬化体の硬化測定、生成結晶測定およびリートベルト解析、圧縮強度値測定を行った。以下に、測定方法について記す。

3.4.1 半硬化体の硬化測定

型枠内で保温養生中の半硬化体に対して、プッシュアップゲージを用いて圧縮荷重の測定を行った。測定のタイミングは、混練スラリーを型枠へ注入してから4,5,6時間経過時点とし、得られた荷重値から応力値を算出した。

3.4.2 生成結晶測定およびリートベルト解析

AC養生後の硬化体から2gほど切り出し、105℃で2時間以上乾燥させ、絶乾状態にした。乾燥後、乳鉢を用いて粉砕し、株式会社リガク製のX線回折装置“MiniFlexII”を用いて結晶相の測定を行った。更に、得られたX線回折パターンに対して、リガク社製の統合粉末X線解析ソフトウェアの“PDXL”を用い、國本らの論文³⁾を参考にしてリートベルト解析を行うことで、硬化体内に含まれる結晶物の割合を算出した。

3.4.3 圧縮強度および密度の測定

AC養生後得られた硬化体を100 mmの立方体に成形し、JISA5416に従って含水率が10±2%となるように75℃以下の環境で乾燥を行った。乾燥後、硬化体に毎秒0.2N/mm²の速さで荷重を加え、破壊時の最大荷重を測定し、圧縮強度(N/mm²)を算出した。また、圧縮強度測定後の硬化体を105℃環境下で48時間以上乾燥し、重量を測

表-2 結晶含有率の算出値(早強セメント配合)

水準名	CC置換率	含有結晶種(%)			
		トバモライト	石英	カルサイト	その他
A	0%	30.3	30.1	0.9	38.7
B	10%	29.0	24.8	8.6	37.6
C	25%	25.5	18.7	23.7	32.2
D	40%	20.5	10.1	37.0	32.4
E	50%	10.3	7.4	47.4	34.9

定することで各サンプルの密度(kg/m³)を算出した。

4. 測定結果および考察

4.1 CC置換による影響評価

4.1.1 半硬化体の硬化速度への影響

図-6に、早強セメントを使用し、CCを原料一部と置換したサンプルA~Eの、半硬化体の4hr,5hr,6hr経過時の応力算出値を示す。リファレンスとなるサンプルAは6hr経過時で0.13N/mm²であり、脱型・切断に必要とされる応力値(0.11N/mm²)まで硬化が進んでいた。また、他サンプルB~Eの応力値も同程度であった。このことから、CCを原料に置換した際の硬化速度への影響は小さいことが分かった。

4.1.2 含有結晶への影響

表-2に、XRD測定結果から算出したリートベルト解析結果を示す。CCの置換率増加に伴い、カルサイト(炭酸カルシウム)量は多くなった。また、カルサイト含有量は、CC置換率25%のサンプルCのカルサイト量が23.7%であることや、置換率50%のサンプルEのカルサイト量が47.4%であることなどから、おおそ置換したCC量と同程度の値になっている。この傾向から、CCは、保温養生およびAC養生中にほとんど化学的応を示さず、安定した状態を保っていると考えられる。

次に、ケイ酸カルシウム水和物であるトバモライト(5CaO・6SiO₂・5H₂O)について確認する。トバモライトはオートクレーブ養生コンクリートの圧縮強度⁴⁾の発現において重要な役割をもつケイ酸カルシウム水和物とさ

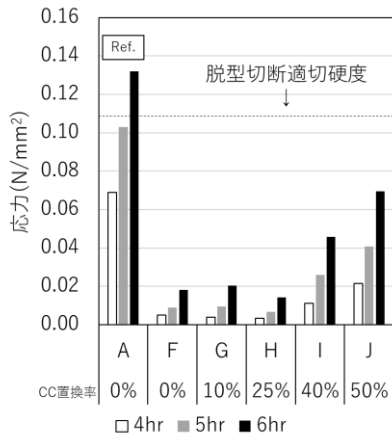


図-9 半硬化体の硬化測定結果
(高炉スラグ微粉末使用配合)

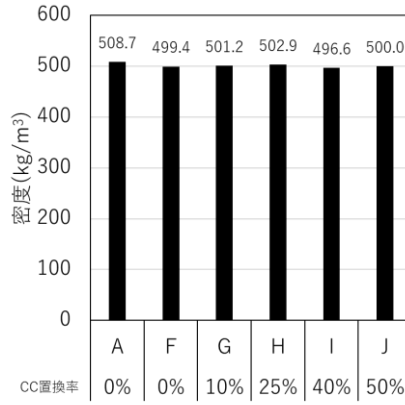


図-10 硬化体の密度測定結果
(高炉スラグ微粉末使用配合)

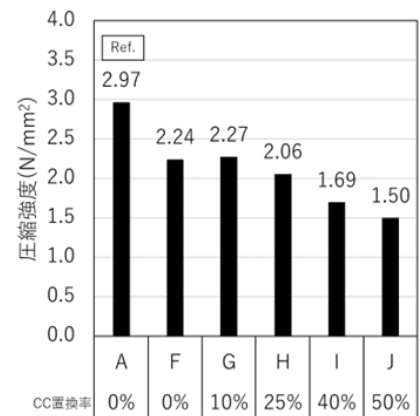


図-11 硬化体の圧縮強度測定結果
(高炉スラグ微粉末使用配合)

れており,ALC の強度発現においても重要視されている。サンプル A のトバモライト含有率は 30.3%であったが,CC の置換量増加に伴いトバモライト量は減少し,CC 置換率 50%のサンプル E のトバモライト含有率は 10.3%まで低下していた。このように,トバモライトの生成が減少した理由として,未反応物質である CC の置換量が増加し,トバモライトの形成に必要な Ca 源や Si 源を溶出する他原料が減少したことが原因と考えられる。

4.1.3 密度および圧縮強度への影響

図-7 に AC 養生後の硬化体の密度測定結果を,図-8 に圧縮強度試験の測定結果を示す。各サンプルを比較して,密度の値は約 500kg/m³ でほぼ一定である。しかし,リファレンスであるサンプル A が圧縮強度値 2.97N/mm²であるのに対し,CC の置換率が増加するに伴い,圧縮強度値は低下していく傾向を示し,50%置換のサンプル E は 1.29N/mm²まで低下した。これは強度要因とされているトバモライトの生成量が減少していることが原因と考えられる。このことから,CC を ALC の原料として使用した場合,トバモライトの生成の低下に起因する ALC 母材の圧縮強度低下が課題となると判明した。

4.2 高炉スラグ微粉末使用配合の評価

4.2.1 半硬化体の硬化速度への影響

図-9 に早強セメントに代わり高炉スラグ微粉末を使用した配合の,半硬化体の硬化測定結果を示す。高炉スラグ微粉末を使用したサンプル F~J は,全体の傾向として時間経過と共に応力値が増加していた。これは,高炉スラグ微粉末がアルカリ環境下において潜在水硬性による硬化反応⁵⁾を示すため,徐々に応力値が増加しているためである。しかし,リファレンスであるサンプル A と比較して,高炉スラグを使用したサンプル F~J は,どれも応力値が低く,6hr 経過時点では,脱型・切断に必要な応力値へ達していない。この硬化速度の低下は,セメント未使用で ALC の製造をする場合に大きな課題になることが予想

表-3 結晶含有率の算出値 (高炉スラグ微粉末配合)

水準名	CC置換率	含有結晶種 (%)			
		トバモライト	石英	カルサイト	その他
F	0%	21.2	43.5	2.5	32.8
G	10%	19.5	38.9	12.8	28.8
H	25%	17.9	27.5	22.0	32.6
I	40%	14.7	18.7	37.5	29.1
J	50%	10.0	16.3	48.4	25.4

される。

ここで,CC を 40%置換したサンプル I や,50%置換したサンプル J は 6hr 経過時点の応力値が 0.05N/mm²,0.07N/mm² と他のスラグ使用サンプルと比較して高い値をとっていた。早強セメントを原料に使用したサンプル A~E では CC 置換量による硬化速度の差異は見られず,スラグを原料とするこれらのサンプルで,硬化が促進していることから,CC の量が増加するにつれ,スラグの水和反応が増進した可能性がある。ここで,佐川らは,高炉セメントに石灰石微粉末(ブレン値 5040cm²/g)を添加することで,クリンカ鉱物ではなく,スラグそのものの反応を促進させることを報告している⁶⁾。本検討においても,文献と同様の現象がサンプル I や J でも生じている場合,応力値が他サンプルより高くなった理由の一つとして考えることが出来る。また,後述するが,サンプル F~J においても,前項 3.1.2 と同様に,カルサイトの結晶はほとんど未反応のまま AC 養生後も存在している。そのため未反応カルサイトが細骨材のように作用し,半硬化体の応力値を底上げして見かけ上の硬さが向上した可能性もあるが,どちらの理由であってもより詳細な検討が必要であるため,今後の課題として硬化増進メカニズム解明の検討を進めていく。

4.2.2 含有結晶への影響

高炉スラグ微粉末を使用したサンプル F~J の,AC 養生後の含有結晶の解析結果を表-3 に示す。表-2 と表-3 を比較すると,スラグを使用した配合は,セメント使用配合よりも石英の含有量が多いことから,養生時の反応量が小さいことが分かる。ここで,一般的にセメントの化学組

成内の CaO は 60%以上であるのに対し、高炉スラグは 35～40%ほどとされている⁷⁾。スラグ配合では、Si と化学反応しうる Ca が不足したことにより、化学平衡的に反応が遅くなったことが考えられる。また、トバモライト含有率を比較すると、スラグ配合の方が少ない。これは、石英の反応量が少なかったことも踏まえると、原料内の Ca 分が不足し、AC 養生中に CaO-SiO₂-H₂O から成る結晶を形成しきれなかったと考えられる。このことから、高炉スラグ微粉末を主原料とする ALC の配合を設計する際には、Ca 分を消石灰などの他原料から供給させる必要があると言える。

4.2.3 硬化体の密度および圧縮強度

図-10 にスラグを配合したサンプル F~J の密度測定結果を、図-11 に圧縮強度測定結果を示す。どのサンプルにおいても、密度の値は同程度である。しかし、圧縮強度の結果では、リファレンス A と比較して、同じく CC 無置換のサンプルである F の値が低い結果となった。また、他のスラグ配合のサンプルに関しても、ほとんどがセメント配合サンプルと比較して、圧縮強度値が低下する結果となった。一方で、50%置換のサンプル E と J は、同程度の圧縮強度値をとっていた。

ここで、表-2 および表-3 を確認すると、ALC の強度要因であるトバモライトの生成量は、0～40%置換品ではスラグ配合の方が小さく、50%置換品では同程度であるといったように、圧縮強度値の差異の傾向と同じであることが分かる。このことから、スラグを配合に用いたサンプルの圧縮強度値が低下した理由は、トバモライトの生成が減少したこと由来すると考えられる。

4.3 湿式粉砕 CC の使用

項 3.1 および項 3.2 の結果から、物性確保のためにも高炉スラグではなく高炉セメント (A 種) などを使用することや、消石灰などの Ca 分を多く含む他原料の割合を増やし、CC の置換量を一定量までに制限するような方針で配合を設定し、ALC サンプルを作製・評価するべきであると考えられる。しかし、本検討では CO₂ 排出量削減を目標としており、セメントは使用せず、CC の置換量も可能な限り大きくできる条件で ALC の作製を目指す必要がある。そのため、上記に書いたアプローチとは別の方法として、湿式粉砕により微粉砕化した CC と高炉スラグを用いた配合のサンプル評価を行った。

湿式粉砕した CC のスラリー (以降 CC スラリー) を使用した理由として、項 3.2.1 にて高炉スラグ微粉末+CC 系のサンプルの硬化速度が増加することが確認されたことから、より細かな CC を使用することで、高炉スラグ微粉末の硬化速度をさらに増加させることが可能ではないかと予想したためである。

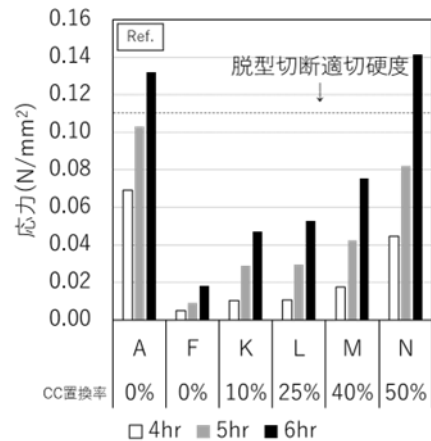


図-12 半硬化体の硬化測定結果
(CC スラリー+高炉スラグ微粉末使用配合)

表 4 結晶含有率の算出値
(CC スラリー+高炉スラグ微粉末配合)

水準名	CC置換率	含有結晶種 (%)			
		トバモライト	石英	カルサイト	その他
K	10%	17.6	31.8	8.2	42.5
L	25%	17.9	28.5	25.2	28.4
M	40%	13.0	15.2	37.5	34.3
N	50%	9.0	13.4	47.0	30.6

4.3.1 CC スラリーサンプルの硬化速度評価

図-12 に、湿式粉砕した CC スラリーを用いたサンプルの半硬化体の応力値測定結果を示す。CC スラリーを用いたすべてのサンプルにおいて、未処理の CC を用いたサンプル F~J (図-9) よりも応力値が高くなった。50%置換配合であるサンプル N は、6hr 時点での応力値が 0.14N/mm² と、リファレンスサンプル A の 0.13N/mm² を超える結果となった。この結果から、スラグ代替配合であっても、微粉砕処理を行った CC を用いることで、セメント使用品と同等の硬化速度を発揮できる可能性が示唆された。

4.3.2 CC スラリーサンプルの含有結晶

表-4 に CC スラリーを用いたサンプルの含有結晶量を示す。未処理の CC を使用したもの (表 4) と比較して、トバモライトの生成量やカルサイトの残存率に大きな差異は無かった。このことから、石灰などの Ca 分を含む原料を用いて配合を設定することは、CC スラリーを用いた場合においても必要であると思われる。

4.3.3 CC スラリーサンプルの密度および圧縮強度

図-13 に CC スラリーを用いたサンプルの密度測定結果を、図-14 に圧縮強度測定結果を示す。項 3.1 および項 3.2 の試験では、CC の置換率が增加するにつれて圧縮強度値が低下する傾向にあったが、CC スラリーを使用したサンプルでは密度に大きな差異が無いに関わらず、圧縮強度値が 40%置換まで増加する傾向にあった。圧縮強度値が増加した理由として、微粉末化した CC が、ALC 母材内の結晶構造内に密実に配置され、細骨材のような働きを見せたのではないかと予想しているが、詳細は不明

である。今後、走査型電子顕微鏡（SEM）やエネルギー分散型 X 線分光法（SEM-EDX）などを用いて構造内の CC の状態に関する測定を行い、圧縮強度増加に関する調査を行っていく予定である。

5. まとめ

ALC に使用する代替原料として、新たに軽質炭酸カルシウムと高炉スラグ微粉末を用い、半硬化体の硬化速度、硬化体内の含有結晶物および圧縮強度の評価を行った。以下に知見をまとめる。

- 1) 早強セメントを使用した配合では、軽質炭酸カルシウム粉末の置換量増加に伴いオートクレーブ養生後のトバモライトの生成量および硬化体の圧縮強度値は低下した。しかし、半硬化体の硬化速度への影響は無かった。
- 2) 早強セメントの代わりに高炉スラグ微粉末を用いた配合では、半硬化体の硬化速度や硬化体の圧縮強度が大きく低下した。しかし、軽質炭酸カルシウム粉末の置換率が大きい配合では半硬化体の硬化速度が増加する傾向が見られた。
- 3) 湿式粉砕により微粉末化した軽質炭酸カルシウムを用いたサンプルは、半硬化体の硬化速度が増加する傾向が見られた。また、硬化体についても、一定量の軽質炭酸カルシウム微粉末の置換により、圧縮強度値が増加する傾向が見られた。
- 4) 高炉スラグ微粉末と軽質炭酸カルシウム微粉末を使用することでサンプルの物性向上が見られたが、この理由として、高炉スラグ微粉末の水和反応が増進した、または微粉末化した軽質炭酸カルシウムが細骨材のように構造内で密実となり、硬度が増したと考察した。

6. 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)の委託事業(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) カーボンフットプリント ガイドラインの公表について : https://www.env.go.jp/press/press_01409.html, (閲覧日 : 2023 年 11 月 2 日)
- 2) 野原珠華:CO₂ 有効利用 (CCU) の国内外の動向,みず

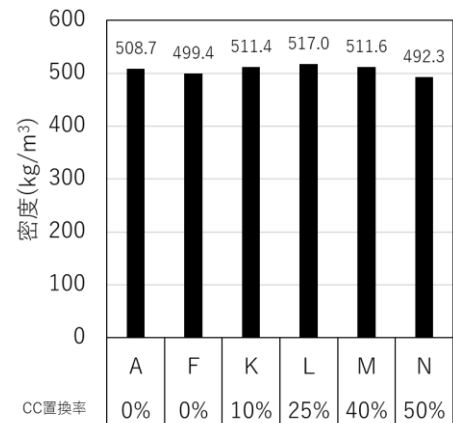


図-13 硬化体の密度測定結果
(CC スラリー+高炉スラグ微粉末使用配合)

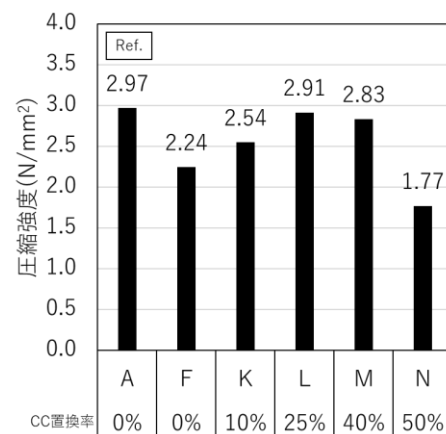


図-14 硬化体の圧縮強度測定結果
(CC スラリー+高炉スラグ微粉末使用配合)

ほ情報総研レポート, Vol.20, 2020

- 3) 國本恒平, 今澤公一, 山下泰介: リートベルト解析による軽量気泡コンクリート (ALC) の炭酸化和 Tobermorite 含有量の関係, 日本建築学会技術報告集, Vol.29, pp.615-620, 2023.6
- 4) 須藤儀一: オートクレーブ養生の高強度発生機構, コンクリート工学会誌, Vol.14, No.3, pp.20-24, 1976.3
- 5) 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート, コンクリート工学会誌, Vol.52, No.5, 2014.5
- 6) 佐川孝広, 名和豊春: 高炉セメントの水和反応に及ぼす石灰石微粉末の影響, コンクリート工学会年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
- 7) 荒井康夫: セメントの材料化学, 大日本図書株式会社出版, 1984.3