

論文 炭酸カルシウム硬化体の圧縮強度に及ぼす無機塩の影響

多田 真人^{*1}・三谷 裕二^{*2}・兵頭 彦次^{*2}・丸山 一平^{*3}

要旨：モルタル粉末または炭酸化したモルタル粉末と水の混合物を最大 10MPa で加圧成形した後、炭酸水素カルシウム溶液への浸漬および 105°C 炉乾燥を繰り返すことにより得た炭酸カルシウム硬化体の圧縮強度に及ぼす無機塩 (NaCl, 人工海水塩, MgSO₄) の添加の影響について検討した。無機塩を炭酸水素カルシウム溶液に添加することにより、溶液中の Ca および全炭酸イオン濃度が増加するとともに浸漬・乾燥養生後の硬化体中の CaCO₃ 生成量を増加させ、無機塩を添加しない場合よりも圧縮強度が向上することを確認した。また、MgSO₄ を添加した場合は、CaCO₃ だけでなく半水石膏の生成が強度発現に寄与した可能性が示唆された。

キーワード：炭酸カルシウム硬化体, CO₂, 圧縮強度, 無機塩, 加圧成形, 解体コンクリート

1. はじめに

近年、二酸化炭素(CO₂)をはじめとする温室効果ガスの排出量の削減が世界的な重要課題として取り組まれている。セメントは、焼成時のエネルギーおよび石灰石からの脱炭酸に由来した CO₂ が排出され、世界の人為的な CO₂ 排出量の 5~8% を占めるとされる¹⁾。セメントは主にコンクリートに使用され、インフラ構造物や建築物の構築に用いられる。コンクリートは、地球上で水に次いで2番目に多く使用されている材料であり、セメント・コンクリートセクターにおける CO₂ 削減技術の開発が、世界的に強く求められている。

従来、高炉スラグやフライアッシュなどの混合材を使用し、セメント中のクリンカ使用量を減少させる方法が、コンクリートの主な CO₂ 排出削減方法として検討されてきた。一方、セメント水和物が CO₂ を炭酸塩として固定する性質を利用して、大気中あるいは工場排ガス等に含まれる CO₂ を隔離しようとする方策が有力な手段として挙げられている²⁾。炭酸塩化には、主にカルシウムやマグネシウムが必要とされるが、供用期間を終えたコンクリートや廃棄されるスラッジ等をカルシウム源として活用することにより、新しい炭素循環と資源循環の枠組みを構築できる可能性がある。

Maruyama らは、解体コンクリートと CO₂ を使用材料とする新しい建設用材料としてカルシウムカーボネートコンクリートを提案した³⁾。これは、解体コンクリートを模擬したセメントペーストやモルタル粉末に炭酸水素カルシウム溶液を連続的に供給しながら、温度変化を与えることにより CaCO₃ を析出させ、粒子同士を結合させた硬化体である。

著者らは既報⁴⁾にて、同様の材料を使用しながら、1~10MPa の成形圧力の範囲で解体コンクリートを模擬し

たモルタル粉末を加圧成形し、炭酸水素カルシウム溶液を用いて浸漬・乾燥養生した炭酸カルシウム硬化体の圧縮強度に及ぼす影響因子について基礎的な検討を行った。この結果、養生前後の CaCO₃ の増加量と硬化体の圧縮強度の増加に強い関係があることを明らかとし、Φ1×2cm の円柱供試体で最大 16MPa を発現することを確認している。一方、炭酸カルシウム硬化体を部材や構造物に適用するためには、更なる強度の増加、寸法的大型化が求められる。

そこで本報告では、浸漬・乾燥養生に用いる炭酸水素カルシウム溶液へ無機塩を添加した場合の、硬化体の圧縮強度への影響について検討した。これは、廃コンクリートを人工海水や NaCl 溶液に浸漬し CO₂ を吹き込んだ場合に、純水を用いた場合よりも生成する CaCO₃ 量が増加するという既往の報告⁵⁾を参考に、炭酸水素カルシウム溶液に無機塩として NaCl, 人工海水塩(以下, AS), MgSO₄ を添加した場合の Φ1×2cm の硬化体の強度および炭酸カルシウム生成量の関係を調べた。さらに、硬化体の強度増進に有効と考えられた MgSO₄ については Φ10×20cm 硬化体による評価も併せて行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

表-1 に、モルタルおよび炭酸カルシウム硬化体の使用材料を示す。炭酸カルシウム硬化体の作製には、材齢 28 日まで水中養生したモルタルを粉砕した粉末を使用した。モルタルは、普通ポルトランドセメント、上水道水、細骨材に山砂あるいは JIS R 5201 に準じた標準砂(以下, JIS 砂)を使用して作製した。水中養生後、モルタルを 105°C で1週間乾燥し、ジョークラッシャーで 5mm 以下の全量通過する粒度まで粉砕し、公称目開き 0.6mm の

*1 太平洋セメント 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 修士 (工学) (正会員)

*2 太平洋セメント 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 博士 (工学) (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 モルタルおよび炭酸カルシウム硬化体の使用材料

種別	材料	備考
モルタル	セメント	普通ポルトランドセメント
	細骨材	JIS R 5201 セメント強さ試験用標準砂 静岡県掛川市産山砂
	水	佐倉市上水道水
炭酸カルシウム硬化体	MP-A	W/C : 0.5, S/C : 3.0, 細骨材 : 標準砂(表乾密度:2.65g/cm ³)
	CMP-A	MP-A を使用 炭酸化方法 : 炭酸化養生槽(45°C, 80%R.H., CO ₂ 濃度 80%)内で 7 日間
	MP-B	W/C : 0.5, S/C : 2.1, 細骨材 : 山砂 (表乾密度 : 2.59g/cm ³)
	CMP-B	MP-B を使用 炭酸化方法 : 炭酸化養生槽(45°C, 80%R.H., CO ₂ 濃度 80%)内で 1 日間
	水	イオン交換水

ふるいにより分級したモルタル粉末を得た。細骨材に JIS 砂を用いたモルタル粉末(MP-A)は、寸法 Φ1×2cm の円柱供試体に、山砂を用いたモルタル粉末(MP-B)は寸法 Φ10×20cm の円柱供試体に使用した。加圧成型前のモルタル粉末の炭酸化の影響を評価するため、MP-A を 45°C-80%R.H., CO₂濃度 80%, 期間 7 日で炭酸化したモルタル粉末(CMP-A), MP-B を 45°C, 80%R.H., CO₂濃度 80%, 期間 1 日で炭酸化した CMP-B も併せて用意した。なお、MP-A, MP-B, CMP-A, CMP-B の CaCO₃含有量は、それぞれ、3.8%, 3.0%, 18.8%, 17.1%であった。

炭酸水素カルシウム溶液へ添加する無機塩には、特級試薬の NaCl, 特級試薬の MgSO₄, AS を使用した。AS は既往の文献の人工海水の割合⁵⁾となるよう、塩化カルシウム無水和物、塩化ナトリウム、塩化カリウム、硫酸ナトリウム、塩化マグネシウム六水和物のいずれも特級試薬を使用して作製した。

2.2 炭酸カルシウム硬化体の成型方法および養生方法

(1) Φ1×2cm 硬化体の成型

MP-A または CMP-A に外割で 10%の水を加え、手練りで混合した後、Φ1×2cm の円筒型枠に充填し、油圧式プレス機を用いて 10MPa で加圧した。加圧終了後、ただちに脱型し 105°Cの乾燥機で 12 時間以上乾燥させた。

(2) Φ10×20cm 硬化体の成型

MP-B または CMP-B に外割で 15%の水を加え、ミキサによって混合した後、Φ10×20cm (内寸) の円柱形鋼製型枠内に練り混ぜたモルタル粉末を投入し、「転圧コンクリート舗装技術指針(案)」の円柱または角柱試験体作製方法に記載される振動締め機を用いて、2 層詰めで成形を行った。なお、水の添加量を 15%としたのは、10%では十分な流動性が得られなかったためである。成形後は耐圧試験機を用いて 5MPa で加圧し、加圧後はただちに脱型し、105°Cの乾燥機で 12 時間以上乾燥させた。

(3) 炭酸水素カルシウム溶液の作製

炭酸水素カルシウム水溶液は、イオン交換水に対してモルタル粉末を 1.25%の割合で添加し、300rpm で攪拌しながら炭酸ガスを 0.5L/min で 2 時間吹き込むことにより

作製した(以下、基準)。無機塩の割合はイオン交換水に対して、AS の場合は 5.8%⁵⁾, NaCl の場合は 6%, MgSO₄ の場合は 6%とした。

(4) 浸漬・乾燥養生

加圧成型、脱型および乾燥のプロセスを経た後、硬化体は、炭酸水素カルシウム溶液への浸漬および 105°C乾燥の組合せを 1 サイクルとする養生を行った。Φ1×2cm の場合は 3 サイクル、Φ10×20cm の場合は 10 サイクル実施した。作製した炭酸水素カルシウム溶液に、CO₂ ガスの吹込みおよび攪拌を継続しつつ、乾燥後の硬化体を 2 時間浸漬した。浸漬時間は、質量変化がほぼ一定となったことより定めた。浸漬後、硬化体を炭酸水素カルシウム溶液から取り出し、105°Cの乾燥機で質量減少が認められなくなるよう 12 時間以上乾燥を行った。

2.3 評価項目・方法

(1) 炭酸水素カルシウム溶液の液相分析

作製した溶液を 0.45μmPTFE メンブレンフィルターを用いてろ過し、ろ過後のろ液を試験用試料として用い、Ca イオン濃度および全炭酸量の測定を行った。Ca イオン濃度は JIS K 0102:2019 50.3 ICP 発光分光分析法に準拠して測定を行った。全炭酸濃度は、JIS K 0101:2017 25.2 赤外線分析法に準拠して測定を行った。

(2) 圧縮強度

Φ1×2cm 硬化体の圧縮強度は養生前および浸漬・乾燥養生後に、変位制御式万能試験機により測定した。測定時の硬化体数は 3 本とし、測定結果の平均値を圧縮強度とした。

(3) CaCO₃含有率

圧縮強度試験後、3 本の硬化体の試料片を回収して、0.15mm ふるいを全通するまでメノウ乳鉢で粉碎した。同試料を用いて、TG-DTA 測定を行い、650-800°Cの質量減少から硬化体中の CaCO₃の含有率を算出した。

(4) 寸法の影響評価

炭酸水素カルシウム溶液に MgSO₄ を添加して浸漬・乾燥養生した Φ10×20cm の硬化体を作製し、圧縮強度試験および硬化体表層部と中心部の相組成を XRD(X 線回折

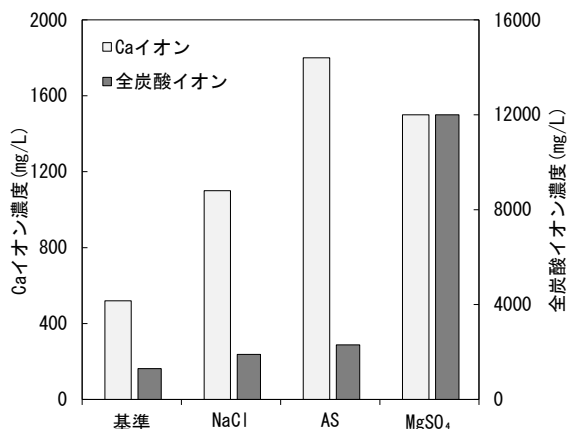


図-1 炭酸水素カルシウム溶液の Ca および全炭酸イオン濃度

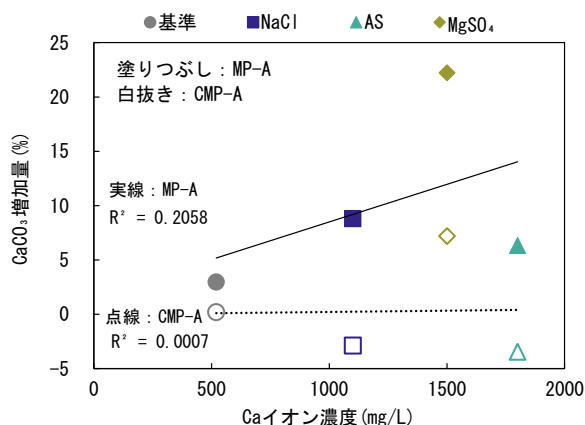


図-2 CaCO₃増加量と Ca イオン濃度の関係 (Φ1×2cm)

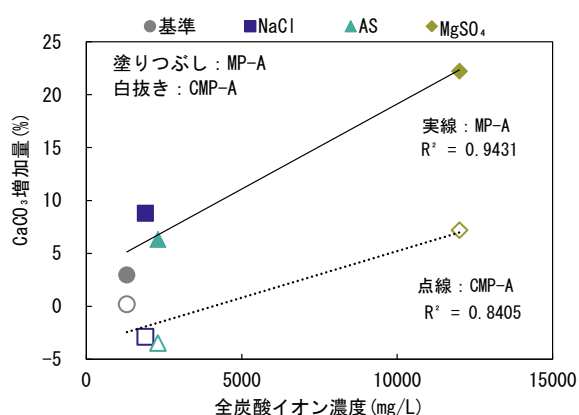


図-3 CaCO₃増加量と全炭酸イオン濃度の関係 (Φ1×2cm)

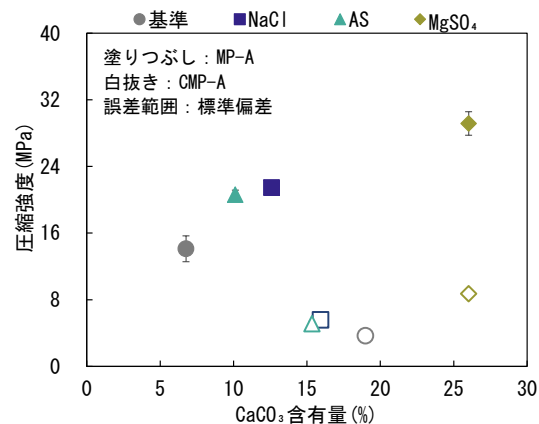


図-4 圧縮強度と CaCO₃含有量の関係 (Φ1×2cm)

法)による解析を実施した。

圧縮強度は、浸漬・乾燥養生前後に、JISA1108 に準拠し 1 本ずつ測定した。圧縮強度試験を実施した後、硬化体の中心部と表層部の試料片を回収して、0.15mm ふるいを全通するまでメノウ乳鉢で粉砕した試料を用い、XRD により結晶性生成物を同定した。

3. 実験結果

3.1 炭酸水素カルシウム溶液の液相分析

炭酸水素カルシウム溶液および炭酸水素カルシウム溶液に NaCl, AS, MgSO₄ を添加した場合の液相分析の結果を図-1 に示す。基準と比較して、いずれの無機塩を使用した場合でも Ca イオン濃度と全炭酸イオン濃度の増加が確認された。Ca イオン濃度について、基準の場合に 520mg/L であったのが AS の場合に最も高くなり 1800mg/L であった。全炭酸イオン濃度については基準の場合に 1300mg/L であったのが MgSO₄ を添加した場合に最も高くなり、12000mg/L であった。

3.2 無機塩の種類の影響 (Φ1×2cm)

(1) 液相イオン濃度

図-1 で示した各無機塩を添加した場合の炭酸水素カルシウム溶液中の Ca イオン濃度と、MP-A および CMP-A の浸漬・乾燥養生前からの CaCO₃ 増加量の関係を図-2 に示す。また、MP-A, CMP-A 毎の最小二乗回帰直線を併記する。MP-A では、Ca イオン濃度が高いほど CaCO₃ 増加量が大きくなる傾向が認められた。ただし、決定係数は 0.21 と小さく必ずしも両者の関係に線形性は認められなかった。CMP-A では、Ca イオン濃度が高くなっても CaCO₃ 増加量が大きくなる場合と減少する場合が混在していた。MP-A, CMP-A によらず MgSO₄ を添加した場合には、同一 Ca イオン濃度であっても CaCO₃ 増加量が、その他の無機塩を添加した場合よりも明らかに大きくなった。

図-1 で示した各無機塩を添加した場合の炭酸水素カルシウム溶液中の全炭酸イオン濃度と、MP-A および CMP-A の浸漬・乾燥養生前からの CaCO₃ 増加量の関係を図-3 に示す。また、MP-A, CMP-A 毎の最小二乗回帰直線を併記する。同図より、おおむね全炭酸イオン濃度が増加するほど CaCO₃ 増加量が大きくなり、決定係数は MP-A で 0.94, CPM-A で 0.84 と Ca イオン濃度の場合よ

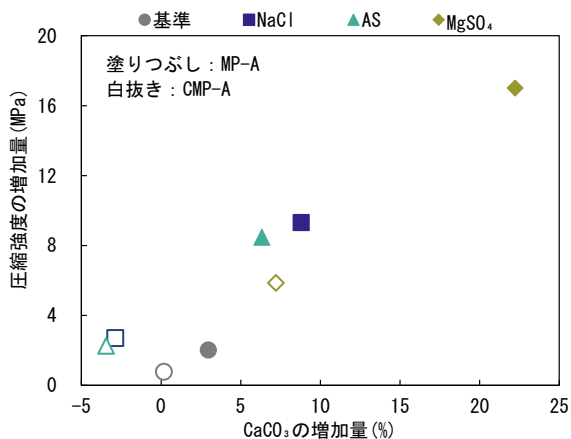


図-5 圧縮強度の増加量と CaCO₃ 増加量の関係
(Φ1×2cm)

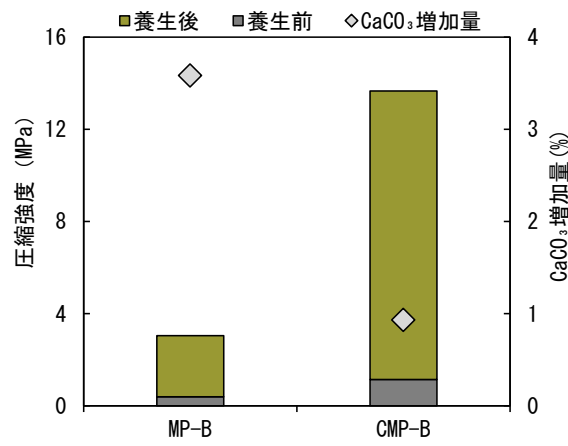


図-6 圧縮強度および CaCO₃ 増加量
(Φ10×20cm)

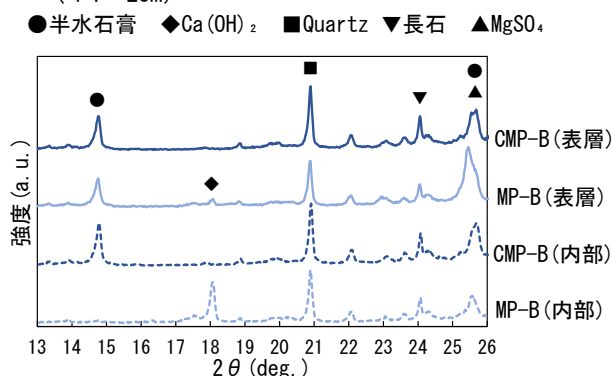


図-7 内部および表層の XRD チャート (Φ10×20cm)

りも高くなった。これは、MgSO₄を添加した炭酸水素カルシウム溶液中の全炭酸イオン濃度が、他の無機塩を添加した場合に比べて5~6倍程度と高いことが、MgSO₄を添加した場合の硬化体のCaCO₃増加量が大きいことを良く説明できたためである。

(2) 圧縮強度

浸漬・乾燥養生後のMP-AおよびCMP-AのCaCO₃含有量と圧縮強度の関係を図-4に示す。MP-Aではいずれの無機塩を使用した場合においても圧縮強度は基準の14.1MPaを上回り、NaClの場合は21.5MPa、ASの場合は20.6MPa、MgSO₄の場合は29.2MPaであった。CMP-Aでも同様に、基準の3.7MPaに対して、NaClの場合は5.6MPa、ASの場合は5.1MPa、MgSO₄の場合は8.7MPaであった。また、養生前後のCaCO₃増加量と圧縮強度の増加量の関係を図-5に示す。同図より、CaCO₃の増加量が多いほど圧縮強度の増加量が多くなる傾向が認められ、両者には良好な相関関係が認められた。一方、一部の硬化体においては、浸漬・乾燥養生後に圧縮強度は増加しているもののCaCO₃含有量が減少しているものが認められた。これについては、4.2で後述する。

3.3 MgSO₄の影響 (Φ10×20cm)

(1) 圧縮強度

MgSO₄を使用した浸漬・乾燥養生10サイクル後のMP-BとCMP-Bの養生前後の圧縮強度およびCaCO₃増加量を図-6に示す。MP-Bの圧縮強度は、養生前が0.4MPa、養生後が3.1MPaであり、養生前後の増加量は2.7MPaであった。一方、CMP-Bの圧縮強度は、養生前が1.1MPa、養生後が13.7MPaであり、養生前後の増加量は12.5MPaと、最大強度、養生前後の強度増加量ともMP-Bよりも大きくなった。Φ1×2cmの圧縮強度とCaCO₃含有量および増加量の関係を示した図-4および図-5からわかるように、同じ種類の無機塩であれば最大圧縮強度や養生前後の圧縮強度の増加量はCMP-AよりもMP-Aを使用した硬化体のほうが大きく、Φ10×20cmの結果は逆の傾向を示した。養生前後のCaCO₃増加量は、Φ1×2cmの場合と同様にCMP-BよりMP-Bのほうが大きく、硬化体の寸法の違いによって養生前後のCaCO₃と圧縮強度の増加量の関係が異なる結果となった。これについては、4.3で後述する。

(2) 生成鉱物

3.3.(1)に使用した浸漬乾燥10サイクル後のΦ10×20cm硬化体のそれぞれ中心部と表層部のXRDチャートを図-7に示す。表層では粉末ごとの差は小さく、MP-BとCMP-Bどちらも半水石膏のピークが確認された。一方で、内部ではCMP-Bでは半水石膏のピークが確認されたものの、MP-Bでは半水石膏のピークがなく、Ca(OH)₂のピークが確認された。

4. 考察

4.1 無機塩がCaCO₃生成量に及ぼす影響

本試験における炭酸水素カルシウム溶液の作製にはモルタル粉末を用いているため、モルタル粉末中に残存しているCa(OH)₂やC-S-Hと各無機塩が反応する可能性が考えられる。その場合の化学反応は式(1)、式(2)のように進むと考えられる。

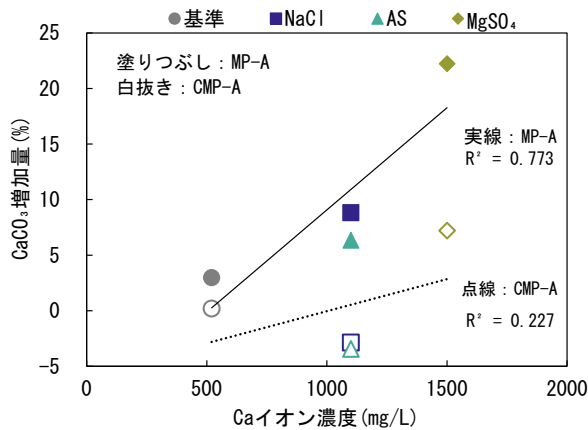
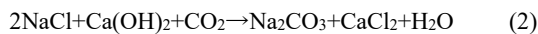
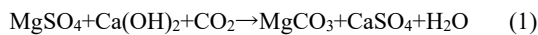


図-8 CaCO₃ 増加量と CaCl₂ 量を考慮した Ca イオン濃度の関係 (Φ1×2cm)



ここで、MgCO₃、CaSO₄、Na₂CO₃、CaCl₂の溶解度は水 20°Cにおいてそれぞれ 0.01、0.2、18.1、75g/100g であり、CaCO₃の溶解度 0.0015g/100g よりも高い⁶⁾⁷⁾⁸⁾。したがって基準の場合よりも液相中の Ca および全炭酸イオン濃度が上昇したことは、これらの Ca 塩や炭酸塩が溶解したことによると考えられる。一方、基準の場合では、液相が CaCO₃ で飽和していることで、CO₂ との反応によって生成する CaCO₃ が液相に溶解しないため、無機塩を使用した場合のように液相の Ca イオンおよび全炭酸イオン濃度が上昇しないと考えられる。

MgSO₄ を使用した浸漬・乾燥養生後の硬化体では CaCO₃ の増加が確認されており、XRD 分析において、MgCO₃ の生成は確認されなかった。これは CaCO₃ の溶解度が MgCO₃ よりも高いことで乾燥過程に CaCO₃ と元の無機塩の化合物が生成するためと考えられる。したがって MgSO₄ は炭酸水素カルシウム溶液において CaCO₃ を生成する触媒として作用していると推察される。なお、NaCl や AS については XRD での分析はしていないものの、Na₂CO₃ あるいは AS 中の塩化カリウムとの反応によって生成する K₂CO₃ の溶解度は MgCO₃ よりも高い。したがって、NaCl や AS を使用した場合でも CaCO₃ 以外の炭酸塩は生成せず、MgSO₄ と同様に CaCO₃ を生成する触媒の作用を有すると推察される。

次に無機塩ごとに Ca イオンおよび全炭酸イオン濃度が異なった理由について考察する。MgSO₄ と NaCl を比較すると Ca イオン濃度および全炭酸イオン濃度は MgSO₄ を使用した場合に倍以上多くなった。これは式(1)および式(2)のとおり炭酸塩を 1mol 生成するのに MgSO₄ は 1mol であるのに対して、NaCl は 2mol 必要になるためと推察される。AS においては MgSO₄ よりも Ca イオン濃度が高くなったにもかかわらず、CaCO₃ の増加量は

NaCl と同程度であった。AS には CaCl₂ が 3%含まれており、この CaCl₂ 含有量分の Ca 量を AS の Ca イオンから除き図-2 に加えたものが図-8 である。この結果からわかるように CaCl₂ 含有量を考慮すると AS の Ca イオン濃度が AS の主成分である NaCl と同等になり、Ca イオン濃度と CaCO₃ 増加量の決定係数が高くなることが確認された。すなわち、CaCO₃ の生成に、液相中の全炭酸イオンおよび Ca イオンどちらも寄与しているものの、CaCl₂ のような Ca 塩は CaCO₃ の生成に寄与しないと考えられる。

4.2 無機塩が圧縮強度に及ぼす影響

既報の結果では CaCO₃ の増加量が多くなるほど圧縮強度が増加する傾向が認められており、本報においても CaCO₃ の増加量が多くなるほど圧縮強度が増加する傾向にあった。つまり、既報の結果⁴⁾と同様に浸漬・乾燥養生後の硬化体の強度発現の主たる因子は CaCO₃ の生成であると考えられる。

一方、図-5 で示したように、NaCl や AS を添加した CMP-A は、CaCO₃ が減少していたにもかかわらず、強度の増加が確認された。これは、浸漬・乾燥養生期間に硬化体中の CaCO₃ が液相に溶解しつつも、NaCl や AS には CaCO₃ の生成以外に硬化体の強度向上に寄与する因子があった可能性が考えられる。すなわち、既往の文献⁹⁾では、5%NaCl 溶液へのモルタルの浸漬による圧縮強度の増加が報告されており、同様の機構が作用することにより結果的に圧縮強度が増加した可能性がある。これらの機構については本研究では明らかにできなかったため、今後 XRD での生成物の解析や、硬化体浸漬前後の溶液中のイオン濃度の測定などにより検討する必要があると考えられる。

4.3 MgSO₄ の影響

図-5 で示したように、Φ1×2cm 硬化体では浸漬・乾燥養生前後の硬化体中の CaCO₃ と圧縮強度の増加量に良好な相関関係が認められ、MP-A の方が CMP-A よりも強度が大きくなったにもかかわらず、Φ10×20cm 硬化体では異なる傾向を示した。すなわち、CMP-B の CaCO₃ の増加量が MP-B よりも少なかったにもかかわらず圧縮強度は MP-B よりも高くなった。これについては、図-7 に示した炭酸水素カルシウム溶液中の SO₄²⁻イオンの浸透により生成したと考えられる半水石膏が強度増進に寄与したと推察される。半水石膏のピークを見ると、MP-B の表層には生成が認められるものの、内部では認められていない。一方、CMP-B では表層、内部によらず半水石膏の生成が認められる。これは、MP-B の場合、CO₃²⁻や SO₄²⁻と反応できる Ca 量が養生前の硬化体内に多く含まれているため、浸漬を開始した早期から表層に CaCO₃ や CaSO₄ が生成され、その後の MgSO₄ の内部への浸透を抑

制した¹⁰⁾可能性が考えられる。逆に CMP-B では、養生前にすでにモルタル粉末が炭酸化されていることから、MgSO₄ の硬化体内部への浸透を妨げる因子が少なかったものと考えられる。

同様に図-7 より、MgSO₄ の硬化体内部への浸透は MP-B, CMP-B によらず確認されている。それにもかかわらず、半水石膏の生成に違いが生じた理由は、MP-B よりも CMP-B のほうが事前の炭酸化により C-S-H の Ca/Si 比が低かったことが影響した可能性がある。MgSO₄ 浸漬による耐硫酸塩性に関する既往の検討では、Ca/Si の低い C-S-H の方が MgSO₄ との反応が生じやすいことが報告¹¹⁾されている。上述した硬化体内部への MgSO₄ の浸透性の影響と相まって半水石膏の生成の有無に違いが生じ、ひいては圧縮強度の違いにつながったものと考えられる。

最後に、浸漬・乾燥養生は Φ1×2cm では3サイクル、Φ10×20cm では10サイクルと異なるサイクル数であり、CMP-A を使用した Φ1×2cm 硬化体の浸漬・乾燥養生のサイクル数を増加することで MP-A よりも強度が向上する可能性も考えられる。また、CMP-A と CMP-B の炭酸化養生期間も異なるためその点についても考慮が必要である。MgSO₄ を使用した場合の浸漬・乾燥養生の最適なサイクル数については硬化体の寸法やモルタル粉末の炭酸化の程度を考慮して今後、更に検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、モルタル粉末あるいは炭酸化させたモルタル粉末と水を用いて加圧成形し、浸漬・乾燥養生の炭酸水素カルシウム溶液への無機塩として NaCl, 人工海水塩, MgSO₄ の使用した場合に、それらの無機塩が硬化体の圧縮強度に及ぼす影響について基礎的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 無機塩を添加することにより、添加しない場合よりも硬化体の圧縮強度が増加した
- (2) 浸漬・乾燥養生中の CaCO₃ 増加量と硬化体の圧縮強度の増加量には良好な相関関係が認められた。
- (3) MgSO₄ や NaCl は炭酸水素カルシウム溶液において CaCO₃ を生成する触媒として作用している可能性が示唆された。
- (4) MgSO₄ を使用した場合、CaCO₃ だけでなく半水石膏の生成が強度増加に寄与している可能性が示唆された。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技

術総合開発機構のムーンショット型事業である「C4S (Calcium Carbonate Circulation System for Construction) 研究開発プロジェクト(PM:野口貴文)」により得られたものである。実験の実施、結果の考察にあたっては、東京大学の野口貴文教授、東京理科大学の兼松学教授および両研究室の皆様にご貴重なご意見を頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) International Energy Agency: Cement sustainability intensity, Technology roadmap, Low-carbon transition in the cement industry, 2018
- 2) International Energy Agency: Energy and technology perspective 2020
- 3) I. Maruyama et al.: A New Concept of Calcium Carbonate Concrete using Demolished Concrete and CO₂, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.1052-1060, Oct.2021
- 4) 高野美育, 林建佑, 兵頭彦次, 平尾宙: 炭酸カルシウム硬化体の圧縮強度に及ぼす影響因子の検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.44, No.1, pp.1654-1659,2022
- 5) 小嶋芳行, 安江任, 荒井康夫: 海水利用によるコンクリート廃材の再資源化, Inorganic Materials, Vol.3, pp.293-302,1996
- 6) 大木道則, 大沢利昭, 田中元治, 千原秀昭: 化学大辞典, 東京化学同人,p.1372, 1989
- 7) 蔵重勲, 畑中菜穂子, 魚本健人: 各種酸によるセメント硬化体侵食に関する実験的検討, 土木学会第57回年次学術講演会, pp1083~1084, 2002
- 8) 小林一輔, 宇野祐一: 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, pp.37-49, 1990
- 9) 山路徹, 審良善和, 濱田秀則, 山田一夫: 海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.21-37, 2010
- 10) 鳥居和之, 川村満紀, 山田正弘: NaCl および CaCl₂ 溶液中におけるモルタルの劣化, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.504-509, 1992
- 11) D.Bonen and D.Cohen:Magnesium sulfate attack on Portland cement paste-II. Chemica and mineralogical analysis, Cement and Concrete Research, Vol.22, pp.707-718,1992