

論文 再生微粉の製造・炭酸化方法の違いと練混ぜ時の水分状態の違いがモルタルの物性に与える影響

竹入 陽太*1・石川 英理香*2・西岡 由紀子*3・伊代田 岳史*4

要旨：本研究では、製造方法および炭酸化方法が異なる 4 種類の炭酸化再生微粉（CP）を作製し、練混ぜ時の水分状態を変化させたモルタルの物性について検討を行った。その結果、CP のメディアン径が小さいほど 15 打フロー値は低下した。圧縮強さは CP 種類および水分状態の影響は認められなかった。乾燥収縮は、乾式炭酸化 CP が湿式炭酸化 CP より小さく、CP の水分量の増加に伴い小さくなった。凍結融解抵抗性は、湿式炭酸化 CP が 30 サイクル以降から劣化したが、乾式炭酸化 CP は劣化の進行が遅くなった。また、CP の水分が少ないほど劣化が遅くなった。

キーワード：CCUS 材料、炭酸化、再生微粉、乾燥収縮、凍結融解抵抗性

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル¹⁾実現には、建設分野、特にコンクリート製造に伴う二酸化炭素（以下、CO₂）排出削減が不可欠である。コンクリートの主要材料であるセメントは、その製造過程である石灰石の脱炭酸および焼成において大量に CO₂ を排出する。対策として鉄製造時の副産物である高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリートの検討が多く行われている^{例えは 2), 3)}。しかし、単独でカーボンニュートラルは達成できないため、排出された CO₂ を回収し利用・貯留する CCUS（Carbon Capture and Utilization and Storage）材料の利用が求められる。

本研究では、解体コンクリート塊（以下、解体ガラ）から再生骨材を製造する際に副産物として発生する再生微粉に着目した。再生微粉は、セメント硬化体由来の水酸化カルシウムなどを含み、比表面積が大きいため、炭酸化による多量の CO₂ 固定が期待される。現在、炭酸化再生微粉（以下、CP）などの CCUS 材料は、細骨材に対し 200kg/m³ 程度の置換利用が検討^{例えは 3)}されている。これにより、コンクリート中の CO₂ 固定量確保や、初期材齢の圧縮強度の向上³⁾が期待できる。通常のコンクリートの配合設計では、骨材の「表乾状態」、「吸水率」を判定して、含水状態が異なる場合でも練混ぜ水量・骨材量を補正している。一方で、CP においては微粉末であるためこれらを判定できず、補正方法が不明確である。CP は微細かつ多孔質な粒子であり粉体内部や粒子間に水分を多く保持することが考えられるため、水分量の補正は必要となる。また、CP の物性は原コンクリートの配合や、製造方法、炭酸化方法や条件などにより変化すると想定される。既往研究では CP 中の水分は練混ぜ水の一部とみなして補正している³⁾が、CP 中の水分状態の違いが硬

化体へ及ぼす影響については十分に検討されていない。特に、CP のような多孔質な構造を有する材料は、乾燥収縮の増大や凍結融解抵抗性の低下が懸念⁴⁾される。特に、CP 中の水分状態がこれらの耐久性に与える影響を明らかにすることは、実用化に向けて重要である。

そこで本研究では、製造方法および炭酸化方法が異なる 4 種類の CP を作製し、練混ぜ時の水分状態を変化させてモルタルを作製した。また、CP の影響を明確にするため、比較用として非炭酸化物かつ非多孔質で不活性な珪砂微粉末を用い、CP と同量置換したモルタルを基準とした。そして、CP の種類と水分状態がモルタルの物性、特に水分の関与する乾燥収縮や凍結融解抵抗性に及ぼす影響を把握することを目的とした。

2. CP の概要

2.1 CP の製造と炭酸化処理

本研究で使用した CP の製造・炭酸化フローを図-1 に示す。原材料となる解体ガラ、再生骨材の製造方法、再生微粉の炭酸化処理方法を組み合わせ、以下に示す 4 種類の CP を作製した。

(1) Dd

1988 年に埼玉県で竣工した構造物の解体ガラを用いて、乾式自生ブラスト装置⁵⁾にて再生骨材を製造した。この際得られた再生微粉の含水率を 17%程度に調整し、CO₂ 濃度 100%の乾式炭酸化装置にて攪拌しながら 20 日間炭酸化させた。ここで得られた CP を Dd とする。

(2) Ww1

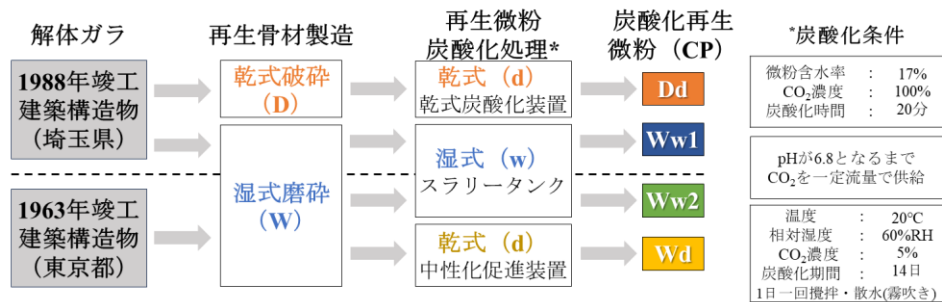
湿式磨砕方式の再生骨材工場にて Dd と同一の解体ガラから再生骨材を製造した。この際得られた微粉を含むスラリーはタンクに一時保管しタンク内の pH が 6.8 に

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻 修士課程 （学生会員）

*2 芝浦工業大学 工学部 マテリアルデザイン研究室 修士（工学） （正会員）

*3 （株）竹中工務店 技術研究所 建設・環境基盤技術研究部 研究主任 （正会員）

*4 芝浦工業大学 工学部 教授 土木工学課程担当 博士（工学） （正会員）



図－1 CPの製造・炭酸化フロー

なるまでCO₂を一定流量で供給し続けた。炭酸化後にフィルタープレスを行い、乾燥後に手作業で凝集塊を解砕し、均一に分散させ得られたCPをWw1とする。

(3) Ww2

1963年に東京都で竣工した建築物から発生した解体ガラを用いて、Ww1と同様に湿式磨砕方式の工場にて再生骨材の製造、再生微粉の炭酸化を行った。ここで得られたCPをWw2とする。

(4) Wd

Ww2と同一の方法で得られた再生微粉を、炭酸化前に一部抜き出し、中性化促進装置(温度20℃、湿度60%RH、CO₂濃度5%)にて14日間乾式炭酸化させた。なお1日1回、攪拌と霧吹きによる加水を行った。ここで得られたCPをWdとする。

2.2 CPの性状

各CPの性状を表－1に示す。真密度(Wdは未測定)は、絶乾状態の試料を用いてヘリウムによる気相置換法により測定した。いずれも2.5~2.6g/cm³程度の値を示し、顕著な差は認められなかった。

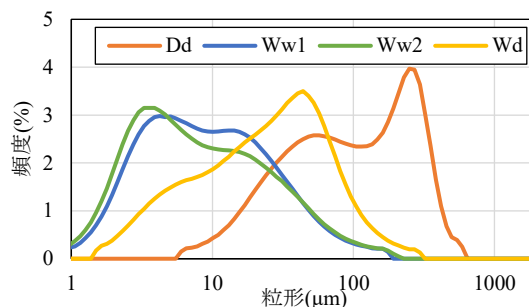
不溶残分(Wdは未測定)は、試料約1gを塩酸HCl(1:4)で溶解し、未溶解分を0.2N-KOHで溶解した。KOH溶解後の未溶解分を不溶残分(骨材成分)とした。Ww1とWw2は35%程度、Ddは53%となり、Ww1およびWw2のセメントペースト量が多いことが示された。

炭酸カルシウム(以下CaCO₃)量は、絶乾状態の試料をTG-DTAを用いて測定を行い、550-850℃の質量減少から算出した。Ddは23.2%と他のCPと比較して小さい値を示した。Ddはセメントペースト量が少ないためCO₂の固定量も小さくなったと考えられる。一方、Ww1、Ww2、Wdは35%前後となり、DdよりもCO₂固定量が大きくなった。

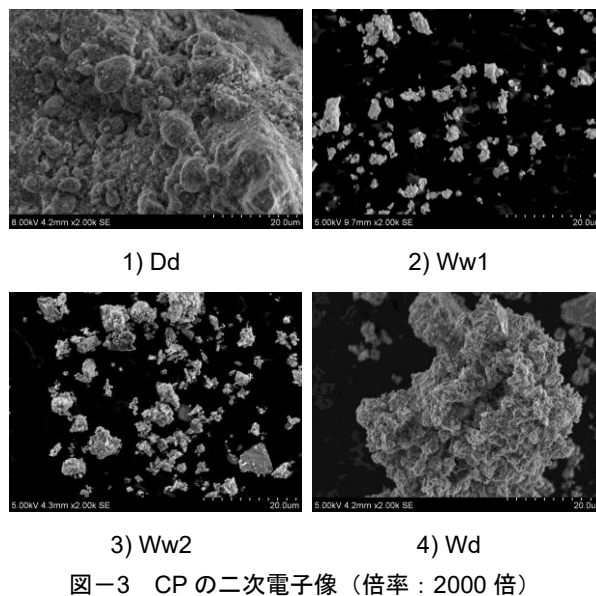
メディアン径および図－2に示す粒度分布は、絶乾状態の試料を用いてレーザー回折・散乱法により測定した。Ddのメディアン径は93.3μmと粗大になり、粒度分布は50μm付近と250μm付近にピークが確認された。一方Ww1とWw2のメディアン径は12.5μm前後の値を示し、粒度分布についても4μmおよび10μm前後にピークを持つ類似した分布を示した。Wdのメディアン径は26.5μm

表－1 CPの性状

CP種類	真密度(g/cm ³)	不溶残分(%)	CaCO ₃ 量(%)	メディアン径(μm)
Dd	2.59	53.0	23.2	93.3
Ww1	2.59	36.4	34.6	12.8
Ww2	2.54	33.1	40.5	12.4
Wd	-	-	38.2	26.5



図－2 CPの粒度分布



図－3 CPの二次電子像(倍率:2000倍)

となり、粒度分布は45μm付近にピークが見られた。

走査電子顕微鏡(SEM)を用いて測定した倍率2000倍の二次電子像を図－3に示す。Ddでは100μm前後の粗大な粒子の周りに比較的丸みを帯びた微細な粒子が凝集している様子が確認された。これは湿った状態で連続的

に攪拌しながら炭酸化したことで、再生微粉表層に比較的緻密に炭酸カルシウムの層が生成したためだと考えられる。Ww1 および Ww2 では、5μm 程度の角張った微細粒子が単独で分散している様子が多く確認された。これは湿式磨砕により微細となった粒子が、水中でも分散した状態で炭酸化したためと考えられる。Wd では5μm 前後の微細な粒子が凝集し、全体として 50μm 程度の角張った形状であった。また、Dd 同様凝集していたが、Wd の方がより角張った不定形な形状であった。これは炭酸化前の微粉自体の粒子径や、炭酸化時の攪拌および加水のタイミングなどに起因すると考えられる。

以上のように、製造方法と炭酸化方法の違いにより、CP に含まれる骨材量や CaCO₃ 量、粒度分布、粒子形状が異なることが明らかとなった。

3. 試験概要

3.1 使用材料

使用材料を表-2 に示す。セメントには、セメント使用量削減による CO₂ 排出量削減を目的に、試製高炉セメント C 種 (BC) を用いた。CP には前章で示した Dd, Ww1, Ww2, Wd を用いた。各 CP は得られた際の水分状態が異なるため、バットに広げて 40℃乾燥炉にて 24 時間の質量変化率が 0.1%以下となるまで 5~10 日乾燥させた。その後、CP に散水にて加水し表-3 の加水率 (105℃乾燥質量に対する水の質量比) に調整した。なお、加水率は、骨材の含水率測定を参考に 105℃乾燥質量を用いた。また、CP との比較用に珪砂微粉末を 150μm 以下にふるい分けした珪砂微粉末 (以下、NP) を用いた。細骨材を CP で置換した場合、強度向上などが生じる³⁾ことは既に報告されている。本研究では、CP を微粉末無添加のモルタルと比較するのではなく、非炭酸化物、非多孔質、不活性で粒度を近づけた NP を CP と同量添加したものを基準とした。これにより、CP の特徴である多孔質構造や炭酸化による影響を評価することを目的とした。

3.2 モルタルの配合

モルタルの計画配合を表-3 に示す。水セメント比

(W/C) は 60%, 細骨材とセメントの比率 (S/C) を 2.0, CP および NP の添加は細骨材の質量に対して 20%で全 CP 同一とした。水粉体比 (W/P) は 43%である。なお、本研究では、種類や加水率が異なる CP の添加がモルタルの物性に与える影響把握を目的としたため、化学混和剤は不使用の Non-AE モルタルとした。CP の加水率分は、練混ぜ水の一部として全量を補正し、CP の加水率の増加に応じて、練混ぜ水量を減じることにより、系全体の総水量および CP 量 (絶乾) が同等となるようにした。配合名は「CP (NP) 種類_加水率」とした。モルタルの練混ぜは、JIS R 5201 に準拠して実施し、CP および NP は細骨材と同時に投入した。なお、CP は加水から 24 時間以上経過したものを使用した。練混ぜ後の供試体は温度 20℃、湿度 60%RH の環境下に静置し、24 時間後に脱型を行った。その後各試験材齢まで温度 20℃で封緘養生を行った。

3.3 試験概要

(1) フロー試験

フロー試験は JIS R 5201 に準拠して実施した。

(2) 圧縮強さ試験

40×40×160mm の角柱供試体を用いて、JIS R 5201 に準拠し、材齢 7,28 日に圧縮強さ試験を実施した。

(3) 乾燥収縮試験

40×40×160mm の角柱供試体を用いて、材齢 7 日まで封緘養生を行った後、JIS A 1129-3 に準拠して実施した。

表-2 使用材料

使用材料	記号	銘柄	物性
水	W	上水道水	-
セメント(C)	BC	試製高炉セメントC種	密度: 2.98g/cm ³ , 比表面積: 3769cm ² /g SO ₃ 量: 2.17%
細骨材	S	混合砂	表乾密度: 2.61g/cm ³ 吸水率: 1.77%
珪砂微粉末	NP	珪砂 8 号	密度: 未測定 150μm 以下
炭酸化 再生微粉 (CP)	Dd	乾式製造・乾式炭酸化処理	真密度: 2.59g/cm ³
	Ww1	湿式製造・湿式炭酸化処理	真密度: 2.59g/cm ³
	Ww2	湿式製造・湿式炭酸化処理	真密度: 2.54g/cm ³
	Wd	湿式製造・乾式炭酸化処理	真密度: 未測定

表-3 モルタルの計画配合

CP・NP 加水率(%)	CP・NP 種類					W/C (%)	S/C	W/P (%)	単位量 (kg/m ³)			
	NP	Dd	Ww1	Ww2	Wd				W	C	S	CP・NP
0	○					60	2.0	43	353	588	940	235
2.3		○							347			240
5		○	○	○	○				341			247
12		○	○	○	○				324			263
20		○	○	○	○				306			282
32		○	○	○					277			310
50			○	○					235			353

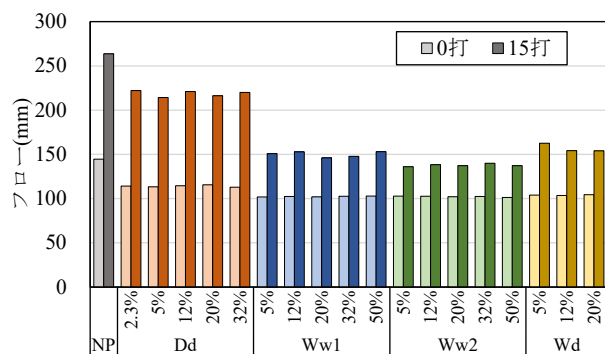


図-4 フロー値

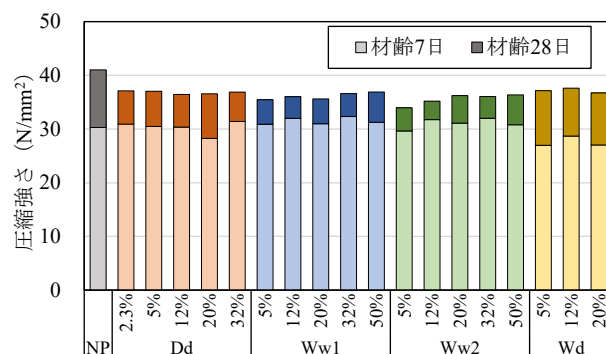


図-5 圧縮強度

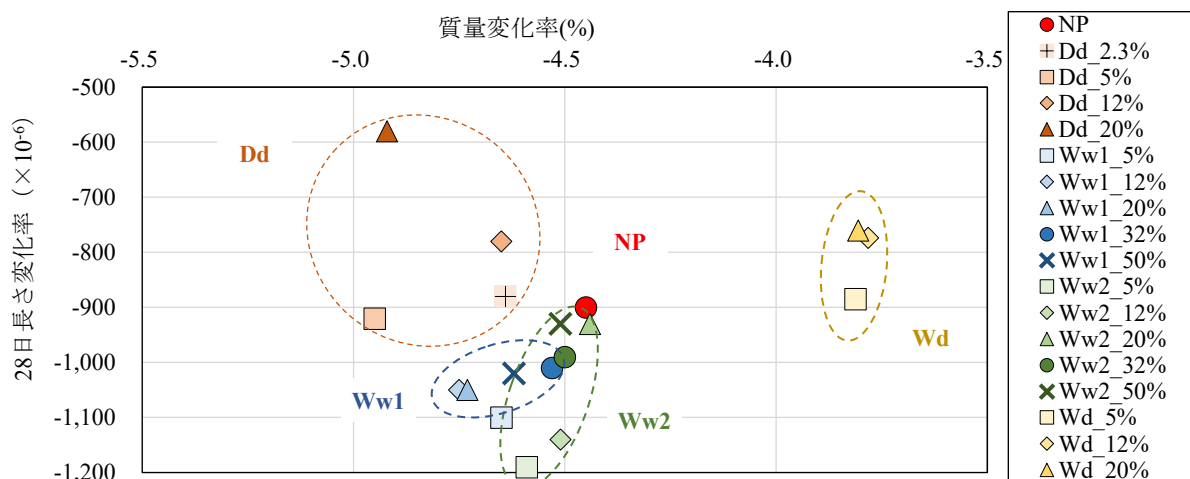


図-6 養生終了から28日後の質量変化率と長さ変化率の関係

(4) 小片凍結融解試験

凍結融解試験は、既往の研究⁷⁾にて提案されている、モルタルの小片供試体を用いたスケリング試験方法を参考に実施した。まず、モルタルを16×16×16mmのシリコン型枠に成型し、24時間後に脱型し材齢7日まで封緘養生を行った。養生後、供試体をイオン交換水に2日間浸漬させ事前吸水させたのち、供試体表面の水分を拭き取り表乾質量の測定をした。次に、容量100mLのプラスチック製の容器に試験体を6個、凍結水としてイオン交換水を60ml程度入れた。この容器をプログラム恒温槽に静置し、-20℃で16時間凍結、温度+20℃で8時間融解を1サイクルとする凍結融解作用を与えた。5サイクル毎に5mmのふるいにとどまるものの表乾質量を測定し、初期質量に対する質量残存率を算出した。

4. 試験結果および考察

4.1 フロー試験結果

モルタルのフロー試験の結果を図-4に示す。NPと比較して、CPの添加により15打フロー値の低下が確認された。CPが多孔質なため、自由水量が減少したことによる影響と考えられる。CP種類に着目するとDdが最も大きく、次いでWd、Ww1、Ww2の順となった。表-1で

述べたメディアン径との関係を見ると、粒径が小さいほど15打フロー値が低下する傾向が確認された。既往の研究^{7,8)}によると、微粉末を添加したモルタルやコンクリートでは、粒子の比表面積が大きい、つまり粒径が小さくなるほど粒子表面への水分の吸着量が増加し、流動性が低下することが確認されている。本研究においても、Ww1とWw2のメディアン径は12.5μm程度と微細であり、さらに図-3のSEM画像から確認されるように粒子表面が凹凸に富む角張った形状を呈しているため、比表面積が大きくなり、フロー値が小さくなったと考えられる。一方Ddは、メディアン径が大きく、粒子表面も比較的丸みを帯びた形状であるため比表面積が小さくなり、フロー値が大きくなったと推察される。Wdは、メディアン径がWw1、Ww2とDdの中間的な値を示し、フロー値も中間的な結果となった。CP加水率に着目すると、いずれのCPにおいても多少差はあるものの、明確な影響は確認されなかった。本検討では水セメント比60%と比較的高く、化学混和剤を用いずに練混ぜ可能な水分量であったため、加水率の影響が顕在化しなかった、あるいは、練混ぜ直後であったことから影響がみられなかった可能性が考えられる。一方で、化学混和剤を必要とする低水セメント比の条件下では、加水率の影響が現れる

可能性も考えられる。

4.2 圧縮強さ試験結果

モルタルの圧縮強さ試験の結果を図-5 に示す。材齢 7, 28 日ともに多少差はあるものの、CP 種類・加水率の違いによる影響は認められなかった。今回の試験においては CP 添加量（絶乾状態）が 235kg/m^3 と多く、微粉末添加による強度増進効果が頭打ちになっていた可能性も考えられる。NP と CP を比較すると、材齢 28 日では NP が上回った。これは NP 自体が非多孔質でモルタル自体も密な組織となり、CP は内部に空隙を多く含む多孔質構造となっており、モルタル自体の空隙率が増加したためだと考えられる。一方、材齢 7 日では NP と CP で同程度の圧縮強さを示した。CP は多孔質であるため強度には不利に作用と考えられるのにもかかわらず、初期材齢において NP と同程度の圧縮強さであったことから、CP 添加により初期の水和が促進されたためだと考えられる。

4.3 乾燥収縮試験結果

図-6 に各 CP における養生終了から 28 日後の質量変化率と長さ変化率の関係を示す。図中では、CP 種類ごとに異なる色で示し、加水率の違いは記号の違いと塗りつぶし濃度で区別している。

まず、NP と比べ、湿式炭酸化を行った Ww1 と Ww2 の長さ変化率は大きくなったが、乾式炭酸化を行った Dd と Wd の長さ変化率は小さくなり、収縮が抑制されることが確認された。乾式炭酸化による再生微粉表層の緻密な炭酸カルシウムの層が収縮抑制に寄与した可能性が考えられる。また、質量変化率については、NP, Ww1, Ww2, Dd は -4.5% ~ -5.0% 、Wd は -3.8% 程度と小さくなった。表-1 に示すように、Ww1 および Ww2 は微細粒子であり、比表面積が著しく大きいと推測される。既往の研究^{9),10)}では比表面積の大きい微粉末を用いたモルタルほど乾燥収縮が大きくなることが報告されておりその影響と考

えられる。また、Dd については、質量変化率は大きいものにも関わらず、長さ変化率が小さくなった。この原因は空隙構造に起因すると考えられるが、今後検討を行う。

次に各 CP の加水率の違いに着目すると、図中の破線円で囲った領域に示すように、加水率が大きい場合に長さ変化率が小さくなる傾向が確認された。特に Ww2 と Dd では顕著に差が表れ、加水率の高い場合と比べて加水率が低い場合は 300×10^{-6} 程度小さくなった。また、Ww1, Ww2 については質量変化率が大きいほど長さ変化率も大きくなる傾向が確認された。一方で、Dd では質量変化率と長さ変化率の間に相関は認められず、Wd についてはいずれの加水率でも同程度の質量変化率だった。加水率が大きい場合に長さ変化率が小さくなった理由として、CP 内部に保持された水分による影響と考えられる。桑原¹¹⁾によると、多孔質材料内部の水分が周囲へ緩やかに供給され乾燥収縮を抑制することが報告されている。CP も多孔質構造を呈しており、加水率が高い場合には内部空隙に多くの水分が保持され、乾燥時に周囲のセメントペーストへ供給されることで毛細管張力の発生を抑制し、収縮が低減されたと推察される。

4.4 小片凍結融解試験結果

図-7 に小片凍結融解試験における質量残存率を示す。なお Wd については測定期間の関係上、記載していない。NP は質量残存率 100%を維持し、劣化しなかった。これは NP が非多孔質であり、内部に凍結可能な水分を含まないためと考えられる。Ww1 および Ww2 では CP 加水率によらず、30 サイクル以降から劣化が進行し、早期に質量残存率は 0%となり消失した。Dd では Ww1,2 と比べ劣化の進行が遅くなった。表-1 で示したように、Dd は Ww1 および Ww2 よりも不溶残分が多くセメントペースト量が少なかったことで、凍結時に膨張する脆弱部が減少したためと推察される。

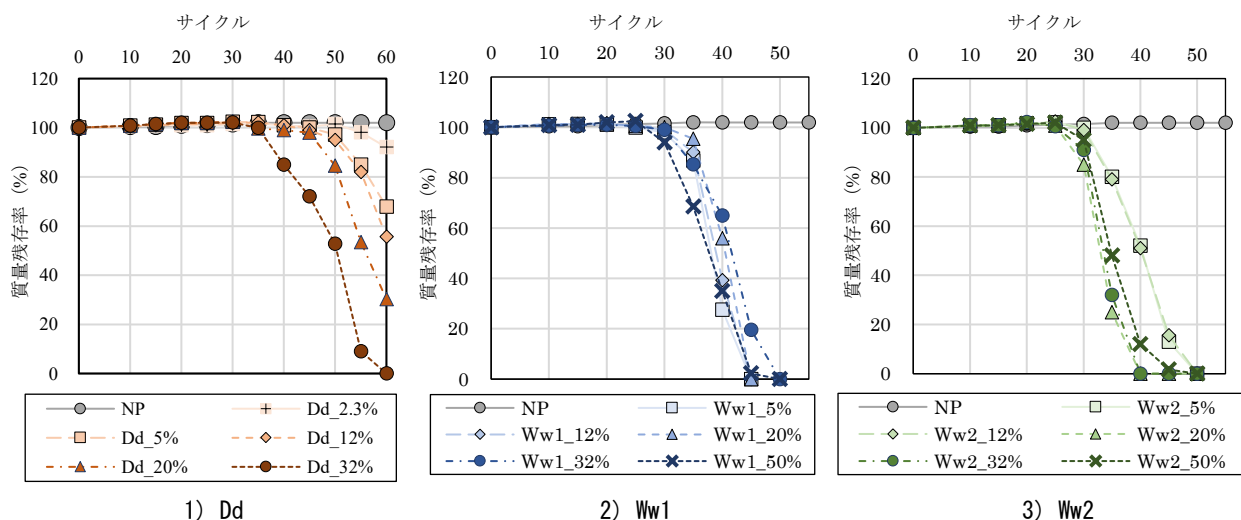


図-7 小片凍結融解試験における質量残存率

また、Ww2 について、加水率 20,32,50% と比べ、加水率 5,12% は劣化の進行がわずかに遅くなることが確認された。Dd においても加水率が低いほどに伴い劣化の進行が遅くなり、特に加水率 2.3% は 60 サイクル時点ではほとんど劣化しなかった。この原因としては、加水率が低いことで粉体内部に凍結可能な水分量が少なくなったことや、加水率が異なることで、凍結融解抵抗性を左右する空隙構造¹²⁾が変化した可能性が考えられる。

5. まとめ

本研究では、製造方法および炭酸化方法が異なる 4 種類の炭酸化再生微粉(CP)を作製し、それらの加水率を変化させてモルタルを作製した。そして、CP の種類と加水率がモルタルの物性に及ぼす影響について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) CP の添加により 15 打フロー値は低下した。CP 種類では、メディアン径が小さい Ww1 と Ww2 でフロー値が最も小さくなり、粒径が大きい Dd で最も大きくなった。これは粒径が小さいほど比表面積が大きくなり、粒子表面への水分吸着量が増加したためと考えられる。加水率の影響は本検討の範囲では明確に確認されなかった。
- (2) 材齢 7, 28 日ともに、CP 種類および加水率の違いによる圧縮強さへの明確な影響は認められなかった。また、材齢 28 日の圧縮強さは NP が各 CP を上回ったが、材齢 7 日では同程度の圧縮強さであった。これは CP 添加により初期の水和が促進されたためと考えられる。
- (3) 乾式炭酸化を行った Dd と Wd の長さ変化率は小さくなり、湿式炭酸化を行った Ww1 と Ww2 では大きくなった。これは比表面積の差や炭酸化による粒子構造の違いに起因すると考えられる。また、CP の加水率の増加に伴い長さ変化率は小さくなる傾向が確認された。これは CP 内部に保持された水分が周囲のセメントペーストへ供給され、毛細管張力の発生を抑制したためと考えられる。
- (4) NP は質量残存率 100% を維持したが、Ww1 と Ww2 は 30 サイクル以降から劣化が進行し早期に消失した。一方で Dd は Ww1, Ww2 と比べて、劣化の進行が遅くなった。また、加水率が小さいほど劣化が遅くなった。

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 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

参考文献 (記載例)

- 1) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長

戦略, 参照: https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf (閲覧日: 2026 年 1 月 12 日)

- 2) 小島正朗, 辻大二郎, 依田和久, 橋本学: エネルギー・CO₂ ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.776-781, 2021.9
- 3) 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
- 4) 桜井邦昭, 近松竜一, 入矢桂史郎, 十河茂幸: 再生微粉の多量混入がコンクリートの諸性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.373-378, No.2, 2007
- 5) 高品質再生骨材製造システム Resco, 参照: https://www.kemco.co.jp/pro_machinery/machinery_resco_top.html (閲覧日 2026 年 3 月 30 日)
- 6) 小山田哲也, 羽原俊祐, 高橋拓真, 高橋俊介: スケーリング劣化を考慮した新しい凍結融解試験法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.935-940, 2011
- 7) 鈴木麻里子, 松家武樹, 横山瑞海, 松下晴彦: 比表面積の異なる砕石粉が砕砂モルタルの流動性に及ぼす影響. 農業農村工学会論文集, 87 巻 2 号, p. I_143-I_148, 2019
- 8) 友寄篤, 野口貴文, 袖山研一, 東和朗: コンクリート用火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの基本特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.255-260, 2018
- 9) 藤原了, 二戸信和, 丸岡正知, 藤原浩巳: シングルミクロン高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの収縮特性の改善, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.122-129, 2019
- 10) 陶山裕樹, 小山智幸, 高巢幸二, 小山田英弘: 使用材料の粒度および充填率がモルタルの物性に与える影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.139-146, 2016
- 11) 桑原寛司, 五十嵐心一, 横田光一郎: 超吸水性ポリマーおよび軽量骨材を用いたモルタルの収縮挙動の比較, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, pp.171-178, 2014
- 12) 新大軌, 濱幸雄, 澁谷将, 青野義道: 環境変化養生によるモルタルの細孔構造と耐凍害性の変化, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, pp.155-162, 2009