

論文 廃タイヤチップを混和材として活用した凍結融解抵抗性を有するコンクリート材料の開発に向けた基礎的研究

長谷川 雄基*1・横井 克則*2・松本 伸介*3・佐藤 周之*4

要旨：本研究では、凍結の際に生じる膨張圧の緩衝材として廃タイヤを活用することを目的とし、混和材としての廃タイヤチップの特性、廃タイヤチップを混入したモルタル供試体の基礎的性質と凍結融解抵抗性について検討した。結果として、モルタル供試体の強度と密度を確保できる廃タイヤチップの混入量は、細骨材に対する体積置換率 10%以下であることが分かった。この結果を踏まえ、粒度調整した廃タイヤチップの置換率 10%のモルタル供試体を凍結融解試験に供したところ、凍結融解抵抗性が向上することが分かった。とくに、廃タイヤチップの最大粒径が小さいほど、凍結融解抵抗性は向上する傾向を示した。

キーワード：廃タイヤ、凍結融解、モルタル、超音波伝播速度、産業廃棄物、混和材、連行空気

1. はじめに

産業廃棄物・副産物のカスケード利用は、循環型社会を形成する上で極めて重要な社会的要請の一つである。現代では、様々な産業分野で廃棄物・副産物の有効利用が促進されている。セメント・コンクリート産業では、JIS 規格のフライアッシュや高炉スラグをはじめとする副産物の混和材利用のみならず、骨材代替材として廃ガラスや廃プラスチックなどの廃棄物の使用を試みた研究事例がある^{例え 1), 2)}。また、セメントクリンカーの製造過程において、代替原料や熱エネルギーとして種々の産業廃棄物が使用されていることも広く知られている³⁾。

産業廃棄物の一つである廃タイヤは、自動車の生産台数の増加に伴い、年々排出量が増加してきた。国内の廃タイヤの年間発生量は 100 万トン以上であり、2014 年は 105 万 2,000 トン (9,900 万本) である⁴⁾。一方、そのリサイクル率は毎年 90%程度と一定であり、用途別内訳は、熱利用が約 60%、原形加工利用 (マテリアルリサイクル) が約 15%、輸出が約 10%、残りの約 15%はその他、とされている⁴⁾。廃タイヤは熱変換率が良いため、熱利用としてのリサイクル割合が最も高いが、熱利用では温室効果ガスや熱の発生により環境負荷が問題となる。また、廃タイヤを野外の集積場で保管する際に、蚊や小動物の生息場となり、周辺環境への悪影響が懸念される。さらに、廃タイヤの一部である鉄製ワイヤーの酸化に起因した大規模な火災の発生も報告されている⁵⁾。このような社会的背景を踏まえると、将来的には、利用先が確保できずに埋め立て処分する割合を減らすこと、可能な限り廃タイヤの原形加工利用のリサイクル割合を高め、自然環境への負荷を低減すること、が必要といえる。

これまでに廃タイヤを建設材料として活用するための研究事例は数多く報告されており、例えば、御手洗らは、固化処理土に廃タイヤチップを混入することで、固化処理土の靱性が向上することを確認した⁶⁾。ハザリカらは、廃タイヤチップを抗土圧構造物の裏面に緩衝材として、また裏込め地盤中に鉛直排水材として使用することで、地震時に抗土圧構造物に作用する動的荷重と残留変位の低減および地盤の液化化防止を実現する耐震補強工法を開発した⁷⁾。コンクリート分野において、若林らは、廃タイヤチップをポーラスモルタルの細骨材として使用することで、ポーラスモルタルの吸音効果が向上することを示した⁸⁾。萩原らは、廃タイヤチップを混入したモルタルの変形性能向上に注目し、衝撃音および振動の抑制が可能なことを報告した⁹⁾。これらの研究は、廃タイヤが有する優れた圧縮性、低吸水性や撥水性などといった、従来の建設材料に無い特性に着目し、機能化を図ったものである。

本研究では、モルタル、コンクリートの凍結融解現象に着目した。コンクリートの凍結融解は、内部空隙に存在する水分の凍結および未凍結水の移動に伴い内部膨張圧が生じる現象である。コンクリート内部に廃タイヤを適量混入することで、廃タイヤが上記膨張圧に対する緩衝材となり、コンクリートに凍結融解抵抗性を付与することができると考えた。本論では、廃タイヤの特性と廃タイヤをチップ化して混和材利用したモルタル供試体の基礎的性質および凍結融解抵抗性について検討した結果をまとめる。

2. 廃タイヤチップの諸性質

*1 愛媛大学大学院 連合農学研究科生物環境保全学専攻 (学生会員)

*2 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 高知大学 農学部 教授 博士(農学) (正会員)

*4 高知大学 農学部 准教授 博士(農学) (正会員)

本研究で使用した廃タイヤチップは、高知県内の廃タイヤリサイクル工場で粒径 20mm 以下に裁断されたものである。実験室にて粉砕機（回転数：25,000rpm、容量 150mL）を使用して粒径 5mm 未満となるように粉砕処理した。粉砕処理後の廃タイヤチップを図－1 に示す。廃タイヤチップの物性値として、密度は 1.05g/cm³、吸水率は 0%、粗粒率は 4.03、粒度分布は図－2 に示す通りである。同図中には細骨材の標準粒度として、「レディーミクストコンクリート用骨材（JIS A 5308-2009 附属書 A（規定））」で示される砂の粒度を併記する。

粒度分布から明らかなように、本実験に供した廃タイヤチップは、一般的な細骨材と比較すると粒度の大きいものが多い。この理由として、本実験で使用した粉砕機では、とくに粒径 1.2mm 未満程度の粒度の小さい廃タイヤを作製するのが困難だったためである。本研究では、粉砕作業の効率性を重視し、標準粒度への調整は行わず、上記粒度のまま実験に供した。

3. 実験の概要

3.1 モルタル供試体の作製方法

モルタル供試体の作製に使用した材料は、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³）、水道水、高知県産の硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.60g/cm³、吸水率 1.58%、粗粒率 2.89）である。モルタル供試体に混入する廃タイヤチップは、細骨材に対して内割で体積置換した。

モルタル供試体は、「セメントの物理試験方法（JIS R 5201-1997）」に準拠して練り混ぜ、規定のモルタル供試体成形用型（40×40×160mm）を用いて成型した。練り混ぜ時の細骨材は気乾状態である。打設後 24 時間は 20℃ 一定の恒温室内で湿布養生を実施し、脱型した後所定の

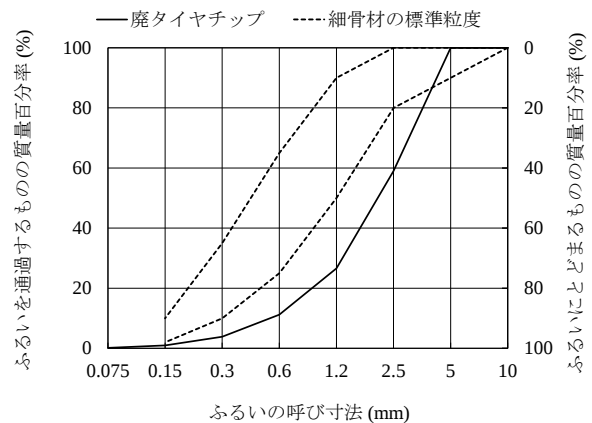
材齢まで 20℃ 一定の恒温水槽で標準水中養生を行った。

3.2 モルタル供試体の基本的性質の評価方法

本研究では、廃タイヤチップ混入モルタルの基本的性質および凍結融解抵抗性を評価するために、二つのグループを用意した。それぞれのグループにおけるモルタル供試体の配合を表－1 に示す。グループ A では、廃タイ



図－1 粉砕処理後の廃タイヤチップの状態



図－2 実験に供した廃タイヤチップの粒度分布

表－1 モルタル供試体の配合表

グループ	供試体名称	セメント (g)	水 (g)	細骨材 (g)	廃タイヤチップ の置換率 (%)	廃タイヤチップ (g)	廃タイヤチップ の粒径
A	Control	450.0	225.0	1350.0	0	0	—
	TC-5-10	450.0	225.0	1215.0	10	53.7	5mm 未満
	TC-5-20	450.0	225.0	1080.0	20	107.4	5mm 未満
	TC-5-30	450.0	225.0	945.0	30	161.1	5mm 未満
	TC-5-50	450.0	225.0	675.0	50	268.5	5mm 未満
B	Control	450.0	225.0	1350.0	0	0	—
	TC-1.2-10	450.0	225.0	1215.0	10	53.7	1.2mm 未満
	TC-2.5-10	450.0	225.0	1215.0	10	53.7	2.5mm 未満
	TC-5-10	450.0	225.0	1215.0	10	53.7	5mm 未満

※供試体名称の TC は Tire Chip を示しており、一つ目のハイフン以下の数字は、廃タイヤチップの粒径が当該数値未満であることを示し、二つ目のハイフン以下の数字は廃タイヤチップの置換率を示す。

ヤチップの混入量がモルタルの基本的性質に及ぼす影響の評価を目的としており、粒径は 5mm 未満で統一、置換率は 10, 20, 30, 50%の四水準とした。廃タイヤチップの混入量がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響を評価するために、「セメントの物理試験方法 (JIS R 5201-1997)」のフロー試験を実施した。フローテーブルの打数は 15 回とし、所定の練り混ぜ終了後、直交する二軸方向の直径を測定した。加えて、硬化後のモルタル供試体の特性評価として、密度と強度特性について検証した。強度特性の評価では、材齢 7, 28, 91 日における圧縮および曲げ強度を指標とした。各試験水準における供試体数は三本とした。

3.3 モルタル供試体の凍結融解抵抗性の評価方法

グループ B のモルタル供試体を対象として、「コンクリートの凍結融解試験方法 (JIS A 1148-2010)」の B 法を参考に、凍結融解試験を実施した。本試験では、試験槽の設定温度や温度管理方法は規格に準拠したが、使用した供試体寸法が同規格で記述されているものよりも小さかったことから、凍結融解の一サイクルに要する時間のみ、規格と異なる設定となった。具体的には、規格では一サイクルに要する時間は 3 時間以上、4 時間以内としているが、本試験では概ね 2, 3 時間程度であった。

一般に、凍結融解抵抗性の評価指標としては、相対動弾性係数が用いられる。しかし、予備実験を行ったところ、廃タイヤチップを混入したモルタル供試体においては、供試体のたわみ振動の一次共鳴振動数を正確に捉えることが困難であった。既往の研究では、超音波伝播速度は動弾性係数と非常に強い相関関係を有していることが示されており、コンクリートの凍害劣化の評価指標として用いられる事例が報告されている¹⁰⁾。そこで本研究では、超音波伝播速度を評価指標として、モルタルの凍結融解抵抗性を評価した。

グループ B では、廃タイヤチップの粒径の違いが凍結融解抵抗性に及ぼす影響を評価することを目的として、廃タイヤチップの粒径を 5mm 未満、2.5mm 未満、1.2mm 未満、の三水準とした。廃タイヤチップの置換率は、後述するモルタルの基本的性質の評価結果および混和材としての実利用を考慮し、10%の一水準とした。供試体数は一水準につき三本であり、材齢 28 日が経過した時点で凍結融解試験を開始した。

4. 結果と考察

4.1 フレッシュモルタルの流動性

廃タイヤチップの混入量がモルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響を検証した。グループ A のモルタル供試体のフロー値を図-3 に示す。図中のエラーバーは、各供試体の 3 バッチの標準偏差を示す。廃タイヤチップを混

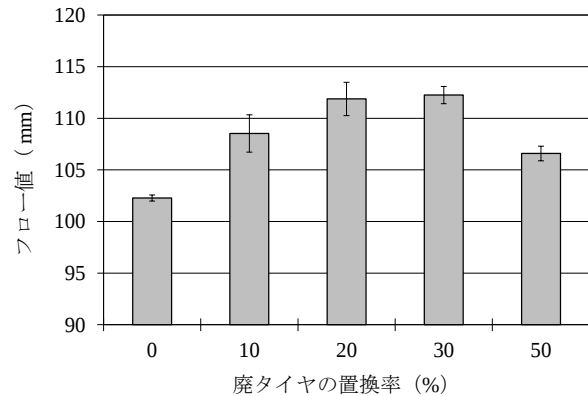


図-3 モルタル供試体のフロー値の測定結果

入したすべての供試体のフロー値は、標準供試体と比較して増加することが確認できる。この理由として、廃タイヤチップが有する低吸水性や撥水性が影響したと考えられた。つまり、一般的な骨材と比較して著しく吸水性の小さい廃タイヤチップを混入したことにより、骨材全体としての吸水量が低下し、相対的にセメントペースト部の水分量が増加した可能性がある。

一方、既往の研究では、細骨材とセメントの割合が同一であれば、廃タイヤチップの置換率の増加に伴いモルタルのフロー値は低下することが報告されている⁹⁾。山下らは、廃タイヤチップの置換率の増加はコンクリートのスランプを低下させることを指摘した¹¹⁾。これらの実験データと本研究結果とでは、使用した廃タイヤチップの最大粒径や粒度分布、水セメント比をはじめとする種々の配合条件が異なる。とくに、本実験で使用した細骨材は ISO 標準砂などと比較して吸水率が大きく、砕砂特有の粗い形状であることから、標準とした供試体のフロー値が小さい。これに起因して、上述した廃タイヤチップの低吸水性や撥水性によるフロー値の増加が生じやすかったと考えられた。

図-3 を見ると、廃タイヤチップの置換率が 30% までであれば、置換率とフロー値は比例関係にあるが、置換率 50% の供試体のフロー値は、置換率 10~30% の供試体と比較して小さいことが分かる。これは、廃タイヤチップの不均一かつ不規則な形状が流動性を低下させたことが原因と考えられた。したがって、廃タイヤチップの置換率が著しく増加した場合は、低吸水性や撥水性による流動性の増加作用よりも廃タイヤチップの形状に起因した流動性の阻害作用が卓越すると推察された。

以上から、廃タイヤチップを混入したモルタルの流動性は、廃タイヤチップの最大粒径、粒度分布、配合条件により大きく変化することが示唆された。

4.2 廃タイヤチップの置換率とモルタルの密度の関係

廃タイヤチップの混入によるモルタル供試体の密度の

変化を検討した。材齢 28 日におけるグループ A のモルタル供試体の密度を置換率ごとに図-4 に示す。廃タイヤチップの置換率の増加に伴いモルタル供試体の密度の低下することが確認できる。廃タイヤチップの混和材としての実利用を想定した場合、混入量と密度の低下量を確実に把握しておく必要がある。本研究では、凍結融解抵抗性を有するコンクリート構造物の開発を最終的な目的としており、軽量コンクリートの開発を目的とするように、骨材の軽量性は長所とはならない。よって、本研究の利用目的では、強度の確保が可能な範囲で、置換率は最少となることが望ましいと考えられた。

4.3 廃タイヤチップ混入モルタルの強度特性

廃タイヤチップの混入がモルタル供試体の強度特性に及ぼす影響を評価した。グループ A のモルタル供試体の圧縮強度および曲げ強度の経時変化を図-5, 6 にそれぞれ示す。図中のエラーバーは標準偏差を示す。

廃タイヤチップの置換率の増加に伴い、圧縮強度および曲げ強度はともに低下することが確認できる。とくに、置換率の大きい供試体ほど試験期間を通した強度発現は小さくなり、置換率 30, 50%においては、材齢 7 日経過時点の強度と 91 日経過時点の強度が同程度であることが分かる。一般的なコンクリートでは、水セメント比を一定として空気量を増加させると、空気量 1%につき圧縮強度は 4~6%低下する¹²⁾。加えて、コンクリートに AE 剤を使用して空気量を 4~5%にすると、凍結融解抵抗性が向上することが知られている¹²⁾。つまり、凍結融解抵抗性の高い AE コンクリートでは、同一配合で AE 剤無混入のコンクリートと比較して、圧縮強度は最大で 30%程度低くなると推察できる。ここで、図-5 より、置換率 10%の供試体の圧縮強度は、標準供試体と比較して約 30%低下することが分かる。よって、廃タイヤチップ混入による圧縮強度の低下率が約 30%以内になることを目安とすると、本研究目的で利用可能と想定される廃タイヤチップの置換率は、10%程度が上限と考えられた。

既往の研究では、廃タイヤチップを混入することにより、モルタル供試体の変形性能の向上することが確認されており、曲げ強度と圧縮強度の比を評価指標として、変形性能の向上が報告されている¹³⁾。ここで、本実験より得られたモルタル供試体の曲げ強度と圧縮強度の比を図-7 に示す。すべての試験材齢において、廃タイヤチップの置換率の増加に伴い、曲げ強度と圧縮強度の比は増加することが確認できた。一般的なコンクリート材料においては、曲げ強度と圧縮強度の比は 0.125~0.200 (1/8 ~1/5) 程度とされる¹⁴⁾が、本実験結果においては、ほとんどの供試体でこの範囲より大きくなった。加えて、モルタル供試体の曲げ試験を行った際に、廃タイヤチップを混入した供試体は、破断面に存在する廃タイヤチップ

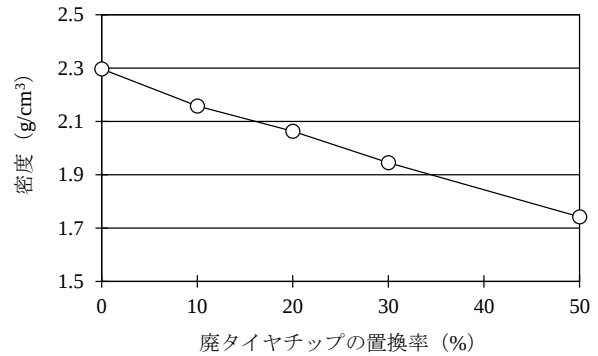


図-4 材齢 28 日におけるモルタル供試体の密度

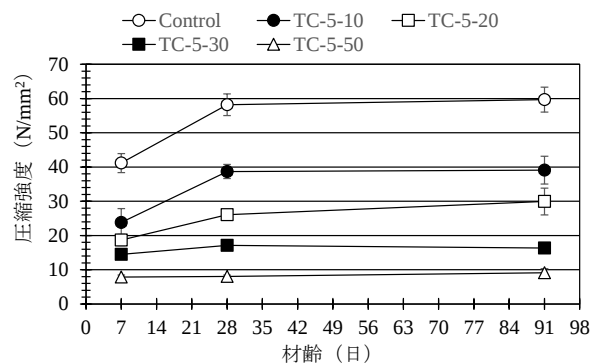


図-5 モルタル供試体の圧縮強度の経時変化

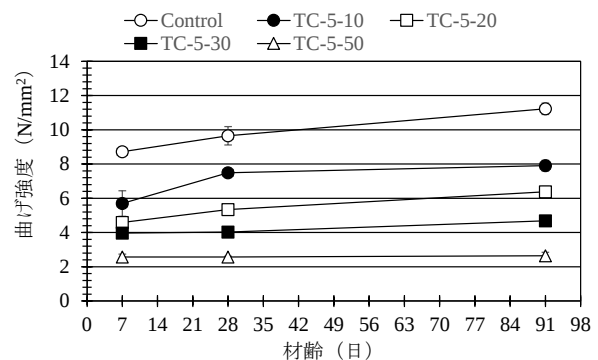


図-6 モルタル供試体の曲げ強度の経時変化

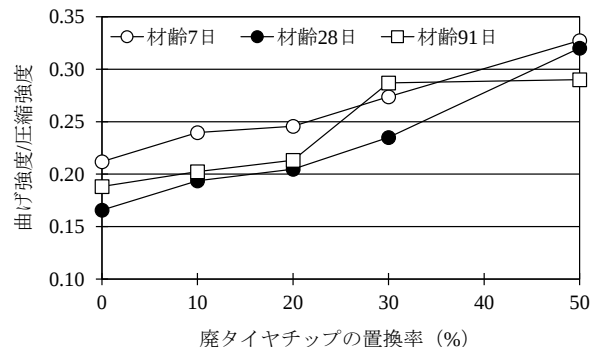


図-7 モルタル供試体の曲げ強度と圧縮強度の比

の伸びにより、靱性が向上したことを目視で確認できた。

以上のことから、本実験条件においても、廃タイヤチップの混入により、モルタル供試体の変形性能の向上効果が発揮されたことを確認できた。

4.4 廃タイヤチップの混入による凍結融解抵抗性の向上効果の検証

(1) 廃タイヤチップ混入モルタルの超音波伝播速度

本研究では、超音波伝播速度を指標として、モルタル供試体の凍結融解抵抗性を評価した。そこで、まず凍結融解試験開始以前の材齢 28 日までを対象として、廃タイヤチップ混入モルタルの超音波伝播速度の特性について検証した。グループ B のモルタル供試体の超音波伝播速度の経時変化を図-8 に示す。

すべてのモルタル供試体の超音波伝播速度は、継時的に増加することが確認できる。つまり、一般的な骨材とは大きく物性の異なる廃タイヤチップを混入した供試体においても、内部を伝播する超音波は例外的な挙動を示さないことが分かる。したがって、超音波伝播速度を評価指標として供試体の内部状態を評価可能であり、凍結融解による供試体の劣化程度を推定できると結論付けた。

各モルタル供試体の超音波伝播速度に着目すると、廃タイヤチップを混入した供試体の超音波伝播速度は、無混入の標準供試体と比較して小さいことが分かる。この理由は、廃タイヤチップを透過する超音波伝播速度が、骨材を透過するものと比較して著しく減衰するためと考えられた。加えて、廃タイヤチップとセメントペーストは物理的性質が大きく異なることから、両者の接着力が小さくなり、内部組織が全体的に粗になった可能性が考えられた。図-8 を見ると、廃タイヤチップの最大粒径の小さい供試体ほど、超音波伝播速度は小さいことが確認できる。これは、廃タイヤチップの比表面積の違いが影響していると推察された。具体的には、同一の置換率であれば、廃タイヤチップの粒径が小さいほど、廃タイヤチップの比表面積は増加する。よって、上述の廃タイヤチップとセメントペーストとの接着力の低下が生じやすく、超音波伝播速度の低下につながったと考えられた。

(2) モルタル供試体の凍結融解抵抗性の評価

グループ B のモルタル供試体を対象として、凍結融解試験を実施した。評価指標は供試体の超音波伝播速度変化率とした。同指標は、凍結融解開始時（材齢 28 日経過時）の超音波伝播速度 V_0 とサイクルごとの超音波伝播速度 V_x の比（ $=V_x/V_0 \times 100$ ）である。結果を図-9 に示す。

標準供試体の超音波伝播速度変化率は試験期間を通して低下傾向にあるのに対して、廃タイヤチップを混入した供試体の超音波伝播速度変化率は試験期間を通じて比較的安定していることが分かる。よって、廃タイヤチップの混入により、モルタル供試体の凍結融解抵抗性は向上することが明らかとなった。廃タイヤチップの混入がモルタルの凍結融解抵抗性の向上に寄与した理由としては、以下が複合的に作用した可能性が考えられた。

まず、廃タイヤが AE 剤による連行空気の代替機能を

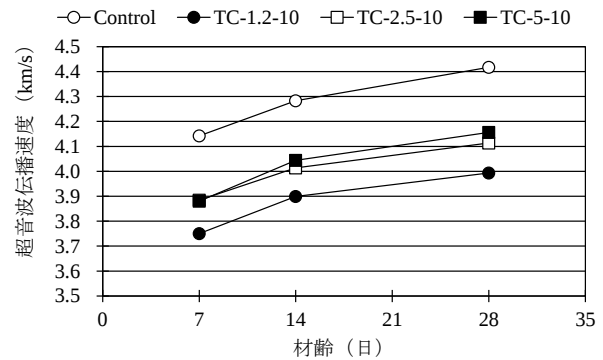


図-8 モルタル供試体の超音波伝播速度の経時変化

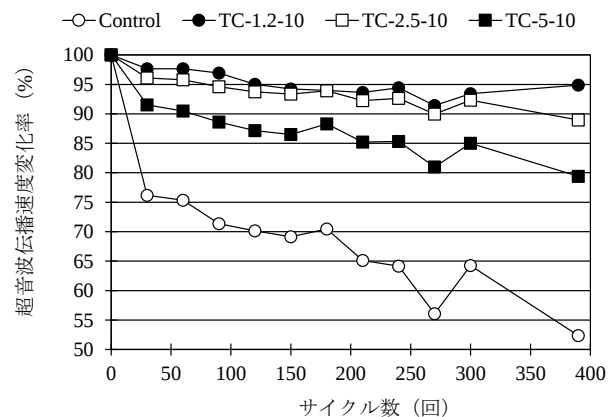


図-9 凍結融解試験におけるモルタル供試体の超音波伝播速度変化率

発揮し、凍結時に供試体内部で生じる膨張圧を緩和したことである。これは、廃タイヤチップの優れた圧縮性に由来するものである。ここで、圧縮性とは圧力変化に対して容易に体積が変化する性質、と定義する。仮に廃タイヤチップの混入量を空気量と置き換えて、本研究で使用した標準供試体 1 バッチ分の体積を算出すると 887cm^3 となり、廃タイヤの置換率が 10% の供試体 1 バッチ分のセメント、水、細骨材の体積は 835cm^3 となる。この差分に加えて、AE 剤を使用していない一般的なモルタルの空気量を 2% と仮定すると、廃タイヤの置換率が 10% の供試体の空気量はおよそ 8% と推定できる。この増加した空気量が凍結融解抵抗性を向上させたと考えられた。

続いて、廃タイヤチップ自体の吸水性が小さいことから、標準供試体と比較して、試験中に供試体が含有する水分量が少なかった可能性である。供試体全体として含有する水分量が少なくなったことにより、結果として凍結融解による劣化の進行を低減できたと考えられた。最後に、練り混ぜの際に廃タイヤチップが気泡を連行し、その気泡により凍結融解作用を緩和できたことである。既報では、廃タイヤチップを混入したフレッシュコンクリートの空気量は、無混入のものよりも増加すると報告されている¹¹⁾。本研究においても、同様の現象により、廃タイヤチップの混入により、凍結融解の緩和が可能な

気泡を連行できた可能性がある。

現段階では、上記三つの理由のうち、どの影響が最も卓越したのかを断言することはできない。今後、廃タイヤチップが有する各特性について詳細な実験・分析を進めることで、廃タイヤチップによる凍結融解抵抗性の向上効果に関するメカニズムを解明する必要がある。

図-9 より、廃タイヤチップの粒径に着目すると、全体として、最大粒径の小さいものを使用した供試体の方が超音波伝播速度変化率は安定していることが確認できる。したがって、凍結融解抵抗性を向上させるためには、廃タイヤチップの粒径は小さい方が有利と考えられた。今後の展開として、モルタルやコンクリートとしての基本的性質と凍結融解抵抗性の向上効果を備える廃タイヤチップの最適な最大粒径、粒度、配合について、様々な実験条件でデータ蓄積を行い、検討を進める必要がある。

5. まとめ

本論では、廃タイヤの特性と廃タイヤを混和材として使用したモルタル供試体の基礎的性質および凍結融解抵抗性について検討した。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 廃タイヤチップの混入量とモルタルの流動性との関係は、廃タイヤチップの最大粒径、粒度分布、配合条件により大きく変化することが示唆された。
- (2) 本実験条件の範囲においては、モルタル供試体の強度と密度を確保できる廃タイヤチップの混入量は、細骨材に対する体積置換率 10%以下、空気量換算で約 8%であることが分かった。
- (3) 廃タイヤチップの混入により、モルタル供試体の凍結融解抵抗性は向上することが明らかとなった。
- (4) 廃タイヤチップの最大粒径が小さいほど、凍結融解抵抗性の向上に寄与する可能性が示された。

なお、本研究で使用した廃タイヤは、紫外線などによる劣化の生じていないものを選定した。今後は、前述した廃タイヤチップ混入供試体の各種特性の詳細評価のみならず、混和材として利用可能な廃タイヤの品質についても併せて検討する必要がある。さらに、廃タイヤの粉碎方法や、それに伴う廃タイヤチップの形状の違いなどについても検証が必要である。

謝辞

本研究は、科研費・特別研究員奨励費(26・5970)と基盤研究 C(24580356)の助成を受けたものである。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高田龍一、野中資博、服部久二雄：廃ガラスを利用したモルタルの特性に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集, Vol.54, pp.490-495, 2001.2

- 2) 小出英夫、外門正直、佐々木 徹：廃プラスチック製骨材を用いた軽量骨材コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No. 2, pp. 295-300, 2000.6
- 3) 一般社団法人 セメント協会：セメントの常識, pp. 60-63, 2013. 4
- 4) 一般社団法人 日本自動車タイヤ協会：廃タイヤ（使用済みタイヤ）のリサイクル状況, (<http://www.jatma.or.jp/environment/report01.html>, 2015 年 12 月確認)
- 5) 危険物安全保安協会：最近の企業火災に対応した新たな消化方法の開発・普及に関する調査研究～タイヤ・RDF に係る消化のあり方に関する調査検討報告書～, p.3, 2005.3
- 6) 御手洗義夫、安原一哉、菊池喜昭, KARMOKAR Ashoke Kumar：古タイヤゴムチップを固化処理土に混合した新しい地盤材料の開発と力学的特性, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.881-900, 2007
- 7) ハザリカ ヘマンタ、安原一哉、菊池喜昭、岸田隆夫、御手洗義夫、菅野高弘：廃タイヤリサイクル材による新耐震補強技術 (SAFETY 工法), 地盤工学会誌, Vol.60, No.9, pp.30-31, 2012.9
- 8) 若林 学、丸山武彦：コンクリート分野における廃タイヤの再利用に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.3, pp.39-45, 2004.9
- 9) 萩原昌宏、丸山武彦、若林 学：ゴムチップ混入モルタルを積層した床版の衝撃音および振動の抑制効果, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp. 949-950, 2003.9
- 10) 緒方英彦、服部久二雄、高田龍一、野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002
- 11) 山下大道、ヘンリー マイケル、西村次男、加藤佳孝、勝木 太：ゴムチップの混入量が廃棄物を大量に含んだコンクリートの基礎物性/環境負荷に及ぼす影響, 生産研究, Vol.62, No.4, pp.21-25, 2010
- 12) C&C エンサイクロペディア [セメント・コンクリート化学の基礎解説], 社団法人セメント協会, pp.166-168, 1996.7
- 13) 湯浅 昇、笠井芳夫、松井 勇、西谷伸介：廃タイヤのコンクリートへの有効利用に関する研究—その 1 廃タイヤの骨材代替率と強度、変形性状の関係—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.943-944, 2002.8
- 14) 宮川豊章、六郷恵哲 編：土木材料学, 朝倉書店, pp.141-142, 2012