

博 士 論 文

廃瓦を用いたポーラスコンクリートの製造と特徴

Production and Characteristics of the Porous Concrete
Using Waste Roof Tiles

2013年

坂口 稔

目 次

| | |
|-------------------------------------|------|
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1. 1 本研究の背景と目的 | 1-1 |
| 1. 2 本論文の構成 | 1-6 |
| 第 2 章 規格外品廃瓦に関する既往の研究 | 2 |
| 2. 1 規格外品廃瓦の物性 | 2-1 |
| 2. 1. 1 規格外品廃瓦とは | 2-1 |
| 2. 1. 2 規格外品廃瓦の安全性環境基準値 | 2-4 |
| 2. 1. 3 規格外品廃瓦の利用状況 | 2-4 |
| 2. 1. 4 規格外品廃瓦骨材の物性 | 2-4 |
| 2. 2 規格外品廃瓦を用いたコンクリート | 2-10 |
| 2. 2. 1 表乾状態の規格外品廃瓦を用いたコンクリート | 2-11 |
| 2. 2. 2 気乾状態の規格外品廃瓦を用いたコンクリート | 2-12 |
| 2. 2. 3 表面噴霧した規格外品廃瓦を用いたコンクリート | 2-12 |
| 2. 3 まとめ | 2-14 |
| 第 3 章 規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリート | 3 |
| 3. 1 ポーラスコンクリートとは | 3-1 |
| 3. 1. 1 ポーラスコンクリートの基本性状 | 3-1 |
| 3. 1. 2 ポーラスコンクリートの配合設計 | 3-3 |
| 3. 1. 3 ポーラスコンクリートの供試体作製および性能評価試験方法 | 3-3 |
| 3. 1. 4 ポーラスコンクリートの機能 | 3-5 |
| 3. 2 ポーラスコンクリートの性能評価試験の検討 | 3-6 |
| 3. 2. 1 透水試験 | 3-7 |
| 3. 2. 2 空隙率試験 | 3-7 |
| 3. 3 規格外品廃瓦ポーラスコンクリート | 3-8 |

| | | |
|---------|-------------|------|
| 3. 3. 1 | 実験概要 | 3-8 |
| 3. 3. 2 | 使用材料および配合設計 | 3-8 |
| 3. 3. 3 | 試験方法 | 3-12 |
| 3. 3. 4 | 供試体作製方法 | 3-15 |
| 3. 3. 5 | 試験結果および考察 | 3-16 |
| 3. 4 | まとめ | 3-26 |

第4章 家屋解体廃瓦を用いたコンクリートおよびポーラスコンクリート

| | | |
|---------|------------------|------|
| 4. 1 | 家屋解体廃瓦の物性 | 4-1 |
| 4. 1. 1 | 家屋解体廃瓦とは | 4-1 |
| 4. 1. 2 | 家屋解体廃瓦の発生状況 | 4-2 |
| 4. 1. 3 | 家屋解体廃瓦の物性 | 4-3 |
| 4. 1. 4 | 試験結果および考察 | 4-6 |
| 4. 2 | 家屋解体廃瓦コンクリート | 4-9 |
| 4. 2. 1 | 実験概要 | 4-9 |
| 4. 2. 2 | 使用材料および配合設計 | 4-11 |
| 4. 2. 3 | 試験項目 | 4-11 |
| 4. 2. 4 | 供試体作製方法 | 4-13 |
| 4. 2. 5 | 試験結果および考察 | 4-14 |
| 4. 3 | 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリート | 4-19 |
| 4. 3. 1 | 実験概要 | 4-19 |
| 4. 3. 2 | 使用材料および配合設計 | 4-19 |
| 4. 3. 3 | 試験項目 | 4-19 |
| 4. 3. 4 | 供試体作製方法 | 4-21 |
| 4. 3. 5 | 試験結果および考察 | 4-22 |
| 4. 4 | まとめ | 4-26 |

| | | |
|---------|----------------------------|------|
| 第 5 章 | 廃瓦ポーラスコンクリートの温熱特性 | 5 |
| 5. 1 | 実験概要 | 5-1 |
| 5. 1. 1 | 屋外試験環境 | 5-2 |
| 5. 1. 2 | 平板供試体作製方法 | 5-2 |
| 5. 2 | 晴天時における廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化 | 5-4 |
| 5. 2. 1 | 試験条件 | 5-4 |
| 5. 2. 2 | 試験結果および考察 | 5-6 |
| 5. 3 | 降雨後における廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化 | 5-11 |
| 5. 3. 1 | 試験条件 | 5-11 |
| 5. 3. 2 | 試験結果および考察 | 5-11 |
| 5. 4 | 定時散布給水した廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化 | 5-19 |
| 5. 4. 1 | 試験条件 | 5-21 |
| 5. 4. 2 | 試験結果および考察 | 5-21 |
| 5. 5 | 未明に散布給水した廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化 | 5-27 |
| 5. 5. 1 | 試験条件 | 5-27 |
| 5. 5. 2 | 試験結果および考察 | 5-27 |
| 5. 5 | まとめ | 5-30 |
| 第 6 章 | 結論 | 6 |
| 謝辞 | | 7 |

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

現在我が国では「持続可能な社会」の形成を目指して、環境、経済、資源の観点から様々な施策が講じられている。環境面においては、環境負荷低減を目指した低炭素社会、自然共生社会および循環型社会の形成実現を掲げ、そのうち循環型社会の実現に対して、平成12年に循環型社会形成推進基本法が施行されている。また平成20年には第二次循環型社会形成推進基本計画が閣議決定されており、3R (Reduce Reuse Recycle) の理念の徹底などを掲げて、国を挙げて循環型社会への移行を推進している。

持続可能な社会の形成を目指すに至った背景のひとつには、現在、各地域において発生している様々な環境問題の連鎖が挙げられる。例えば、名古屋や東京のような都市部においては、ヒートアイランド現象が大きな問題となっており、ヒートアイランド現象による都市部の高気温化や熱帯夜の増加、さらに上昇気流が発生することに起因したゲリラ豪雨による洪水被害等、様々な影響を広範囲にもたらしている。その結果、各都市においてヒートアイランド現象対策として様々な策を講じる必要が生じている¹⁾。ここで図1-1にヒートアイランド現象の概念図を示す。ヒートアイランド現象の原因のひとつに、建築物の増加による緑地・河川面積等の減少や人工舗装面積の増加による裸地面積の減少などにより、大気中への水の蒸発散量が減少したことによる熱消費量の減少が挙げられる。このようなことから、屋上や壁面の緑化義務・推奨や高反射率塗料の採用、ドライミストや打ち水、舗装の改良などがヒートアイランド現象対策として考えられている。その対策のうちのひとつとして考えられている舗装の改良は、保水性舗装の採用が挙げられ、保水性舗装を採用することにより舗装に蓄えられた水を大気中に放出させることで熱量を消費させ、路面温度上昇を抑制することを目的としている。一般的な保水性舗装は、開粒度アスファルト等の多孔質構造の

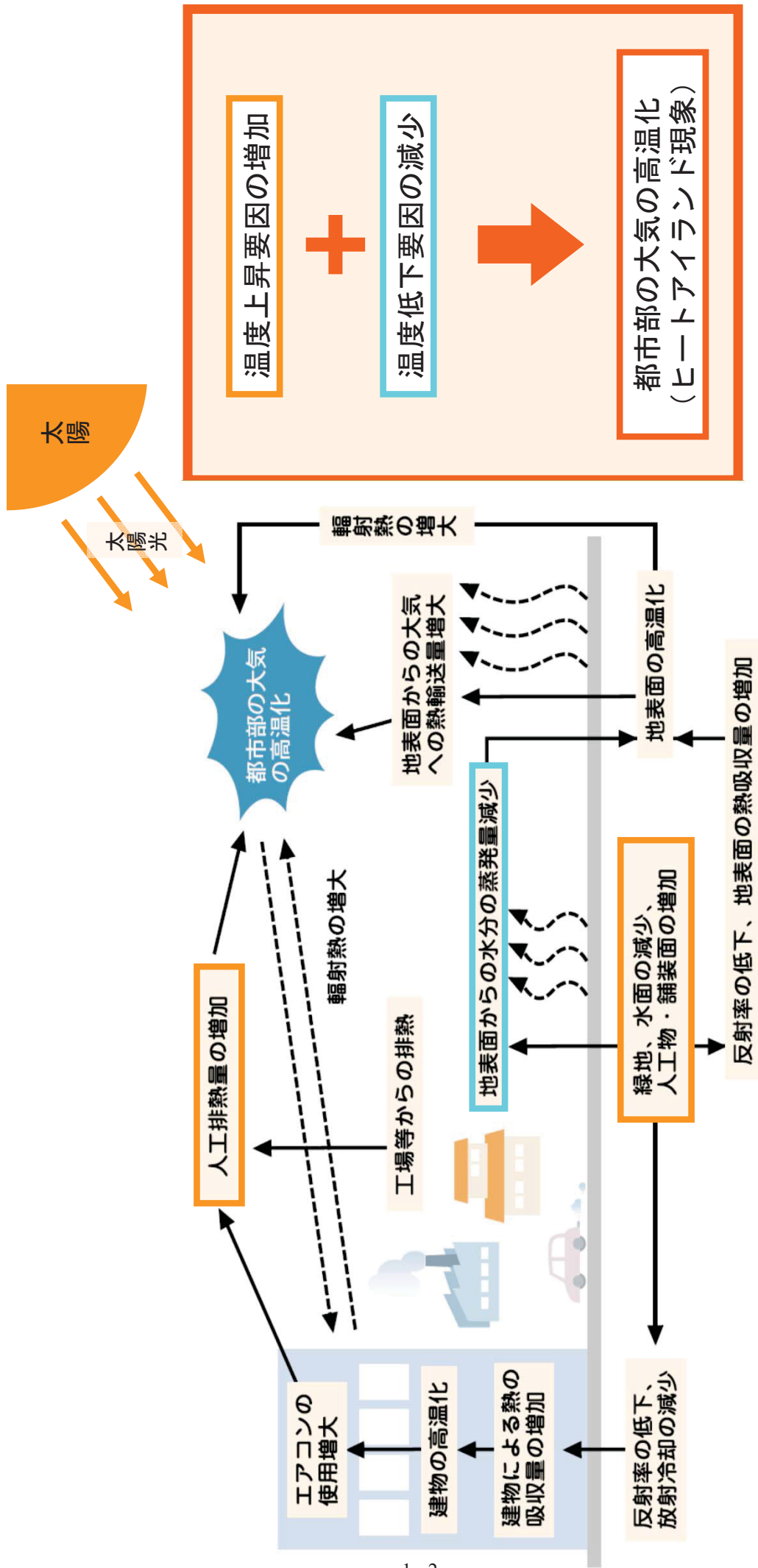


図1-1 ヒートアイランド現象概念図

※環境省ホームページより引用・改編

材料の間隙に、保水性材料を充填する構造となっており、保水性材料に水を蓄える構造となっている。

ここで、多孔質構造の材料のひとつにポーラスコンクリートがある。ポーラスコンクリートとは、写真 1-1 に示すようなオコシ状のコンクリートであり、その特徴として連続した空隙を持つことから、透水・保水・水質浄化など多くの機能を備えたコンクリートである。ポーラスコンクリートを路面舗装に適用した場合、その保水性能により路面の温度低減が期待されることから、近年、ポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果に関する研究が取り組み始められ、実際に、ポーラスコンクリートは路面温度の上昇抑制に効果があるという報告も見られる²⁾³⁾。

ところで、愛知県三河地方では、近郊で良質な粘土が採取されることから、古くから陶器産業が盛んである。西三河地方で生産される三州瓦もそのひとつであり、日本の屋根瓦総生産量の約 6 割を占める一方、高水準の品質管理ゆえに、その生産工程において規格外品（以下、規格外品廃瓦）が大量に発生し、その処理方法が問題となっている。さらに、近年の瓦生産工程のオートメーション化によって、今後も一定量の規格外品廃瓦が発生することは避けられず、規格外品廃瓦の安定的に有効利用可能な用途先や再利用技術の確立が求められている。

このような状況を受け、これまでに著者らは規格外品廃瓦をコンクリート用骨材へ適用するための研究に取り組んできた⁴⁾。その結果、規格外品廃瓦を用いたコンクリート（以下、規格外品廃瓦コンクリート）の配合方法や製造方法の確立、およびその物性把握がなされてきた。ただし、瓦の一番の特性とも言える、その多孔質構造に由来する「優れた吸・保水性能」は、規格外品廃瓦コンクリートの施工性や耐久性に悪影響を与えることが明らかとされ、既往の研究においては廃瓦コンクリートを製造するにあたり、瓦廃材の吸・保水性能を抑制することにより、施工性や耐久性の向上を図っている。このように、瓦の「優れた吸・保水性能」は規格外品廃瓦コンクリート



写真1-1 ポーラスコンクリート

製造上においては、負の要素として認識されているのが現状であった。そこで著者らは、廃瓦コンクリート製造時においては負の要素として現れていた瓦廃材の優れた吸・保水性能は、瓦廃材をポーラスコンクリート用骨材として用いることにより、ポーラスコンクリートの持つ保水能力の向上につながる有利な点になり得ると考え、より高い温度上昇抑制効果の発揮が期待されることから、規格外品廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材へ適用するための研究に取り組み始めた。その結果、規格外品廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材に用いた実験で、標準的な骨材を用いた場合と比較して、温度が低減することが確認され、瓦の「優れた吸・保水性能」がポーラスコンクリートの温度上昇抑制に寄与することが明らかとされてきた⁵⁾。

ここで、これまでに研究対象としてきた規格外品廃瓦は、既に述べたとおり生産時に発生する規格外品（未使用品）であるが、瓦は日本各地で生産・消費されており、家屋の建替え等に伴う家屋解体時に使用済みの瓦（以下、家屋解体廃瓦）が大量に発生している。その量は年間 100 万 t 以上になるといわれているが、その大半は建設廃棄物として埋め立て処理されているのが現状である。そこで、家屋解体廃瓦も規格外品廃瓦と同様に、コンクリートおよびポーラスコンクリート用骨材として利用可能であれば、廃棄物として処理されていたものが再資源化でき、循環型社会および持続可能な社会の実現へ貢献できると考えられる。

以上のことを踏まえ本研究では、廃瓦の有効利用可能な用途開発を目的に、廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材に適用する際の課題解決を図り、その適用の優位性を検討した。多孔質な副産物である廃瓦は、品質にばらつきがあることに加え、通常の骨材と比べ吸水性が高い特徴がある。そこで、「規格外品廃瓦」、「家屋解体廃瓦」を用いたポーラスコンクリートを製造して、使用する廃瓦がその物性や特性に与える影響の把握を目的に、各種試験を実施した。さらに、これら廃瓦を用いたコンクリート平

板での屋外試験を実施し乾燥・湿潤環境下での温熱特性の把握を行った。

ここで、今後本論文において取り扱う廃瓦についての定義を示す。

○「規格外品廃瓦」

瓦の生産工程において発生する規格外品を破砕処理したもの

○「家屋解体廃瓦」

家屋等の建て替えに伴う解体時に発生する使用済み瓦を破砕処理したもの

また、これらを併せて本論文中では「廃瓦」と表記する。

1. 2 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成されている。本論分の構成を図 1-2 に示す。

「第 1 章 序論」では、本研究の背景および目的、構成について述べた。

「第 2 章 規格外品廃瓦に関する既往の研究」では、規格外品廃瓦についてこれまでに取り組んできた研究で得られた知見を整理してまとめた。

「第 3 章 規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリート」では、規格外品廃瓦を粗骨材として用いたポーラスコンクリート(以下、規格外品廃瓦ポーラスコンクリート)について、規格外品廃瓦がポーラスコンクリートへ与える影響の把握を試みた。

ここで、ポーラスコンクリートの製造方法および性能評価試験が、日本コンクリート工学協会(以下、JCI)における研究委員会において、案として提案されてはいる⁶⁾ものの、未だ確立されたものとなっておらず、依然として案の改善が検討されているのが現状である。

このことから第 3 章においてはまず、ポーラスコンクリートに関する現状および課題点をまとめ、ポーラスコンクリートの重要な性能評価試験である「透水試験」および「空隙率試験」について、試験方法や試験器具等について、再現性を含めて検討を

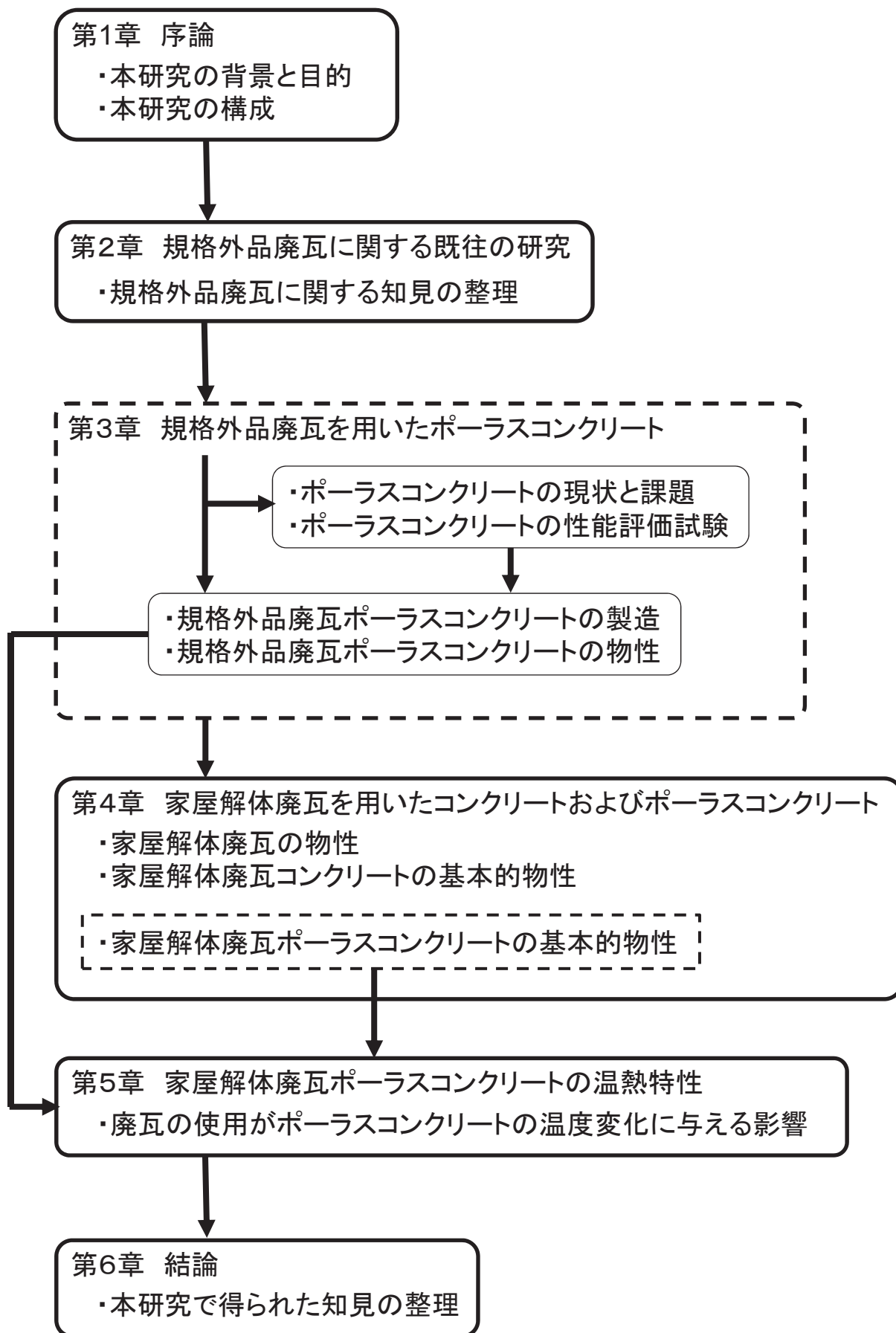


図1-2 本論文の構成

行った。これを踏まえ、規格外品廃瓦ポーラスコンクリート供試体の作製および各種性能試験を行い、規格外品廃瓦がポーラスコンクリートへ与える影響の把握を試みた。

「第4章 家屋解体廃瓦を用いたコンクリートおよびポーラスコンクリート」では、まず家屋解体廃瓦の物性を把握することを目的として各種物性試験を行った。次に、家屋解体廃瓦を粗骨材として用いコンクリート（以下、家屋解体廃瓦コンクリート）を製造し、家屋解体廃瓦がコンクリートに与える影響を確認した。そして、家屋解体廃瓦を用いてポーラスコンクリート（以下、家屋解体廃瓦ポーラスコンクリート）を製造し、家屋解体廃瓦がポーラスコンクリートに与える影響の把握を試みた。

さらに「第5章 廃瓦ポーラスコンクリートの温熱特性」では、ポーラスコンクリートの保水性が、廃瓦を粗骨材に用いることで向上すると予測されることから、廃瓦がポーラスコンクリートの温度変化に与える影響を把握することを目的に、規格外品廃瓦および家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートを用いて屋外試験を実施した。

最後に「第6章 結論」では、各章より得られた知見について取りまとめ整理した。

〈参考文献〉

- [1] 環境省：ヒートアイランド対策マニュアル、2012.3
- [2] 三島直生、中川武志、畑中重光、北野博亮：屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.337-342、2008
- [3] 永井伴英、寺西浩司、吉永美香：ポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.361-366、2008
- [4] 天野佑樹、上原匠、梅原秀哲、武長祐樹：三州瓦廃材のコンクリートへの有効利用、コンクリート工学論文集、Vol.20、No.2、2010.5
- [5] 坂口稔：三州瓦廃材を用いたポーラスコンクリートの特徴、名古屋工業大学 大学院 工学研究科 修士論文、2010.2
- [6] ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会：同報告書、日本コンクリート工学協会、2003.5

第2章

規格外品廃瓦に関する 既往の研究

第 2 章 規格外品廃瓦に関する既往の研究

所属研究室では規格外品廃瓦の有効利用を目的に、コンクリート用骨材への適用を目指した研究に取り組んできた。本章では、規格外品廃瓦の物性および規格外品廃瓦を粗骨材として用いたコンクリートについて、これまでの研究により得られた知見をまとめる。ただし、規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリートについての知見は、第 3 章においてポーラスコンクリートについて整理するとともにまとめた。また、家屋解体廃瓦の現状等は、第 4 章において物性試験結果を含め整理した。

2. 1 規格外品廃瓦の物性

2. 1. 1 規格外品廃瓦とは

本研究で取り扱う規格外品廃瓦とは、愛知県西三河地方で生産される「三州瓦」の規格外品を破砕処理したものである。三州瓦は、粘土を 1100～1150℃の高温で焼成して生産される。図 2-1 に三州瓦の種類を示す。近年需要が増加しているフルフラットタイプ（F 形）の釉薬瓦が主であるが、他にもいぶし瓦など数種類の瓦が生産されている。各生産工場から再生処理工場に持ち込まれた廃瓦は、保管状態により乾燥状態の廃瓦は「瓦くず」、含水状態の廃瓦は「ガラ」と称し区別されており、瓦くずは全体の約 87%、ガラは約 13%を占める。さらに、再生処理工場に持ち込まれた瓦くずは、破砕・粉砕処理した粒径 0.5mm 以下のパウダー状の破砕品（通称：普通シャモット）および、破砕・篩分け処理した粒径 10、5、2mm の破砕品（通称：特殊シャモット）となる。一方、ガラは破砕処理され粒径 40mm 以下の破砕品（通称：ビット）となり、現在、再生処理工場においては上記の普通シャモット、特殊シャモット、ビットの 3 種類が、廃瓦のリサイクル製品として製造販売されている¹⁾。写真 2-1 に処理前の廃瓦を、写真 2-2 に処理後の廃瓦を示す。

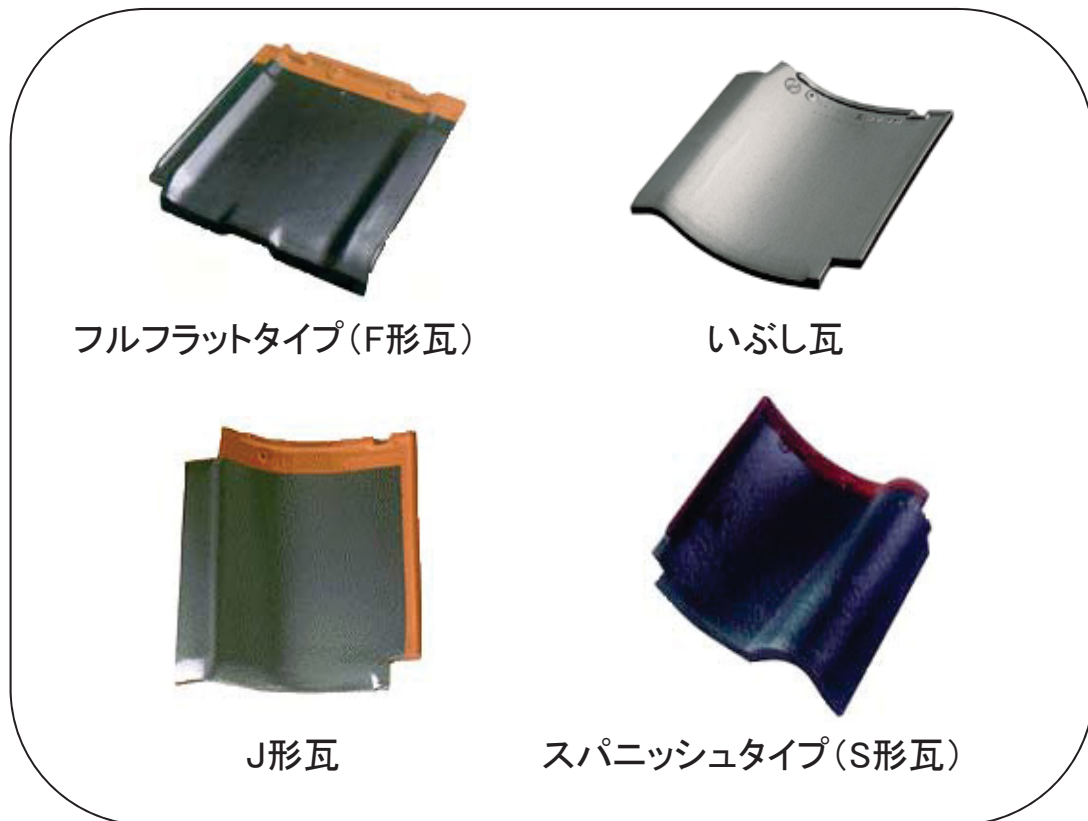


図2-1 三州瓦の種類



写真2-1 処理前の規格外品廃瓦



普通シャモット(粒径0.5mm以下)



特殊シャモット(粒径10~2mm)



特殊シャモット(粒径5~2mm)



特殊シャモット(粒径2~0mm)



ビット(粒径40mm以下)

写真2-2 処理後の規格外品廃瓦

2. 1. 2 規格外品廃瓦の安全性環境基準値

現在、三州瓦製造時に用いられる着色剤（釉薬）には、若干の鉛やホウ素など有害物質を含むことが知られており、廃瓦の一部にも付着している。しかし、表 2-1 に示す廃瓦の一種（ビット）における溶出試験の結果（環境庁告示第 46 号）²⁾ によると、計量対象項目の全てにおいて基準値未満、もしくは未検出という結果が得られており、廃瓦を建設資材等へ再利用することにおいて、環境面での問題はほとんどないといえる。また近年、釉薬として有害物質（鉛やホウ素等）を含まない廃ガラス 70%、粘土長石 30%に着色剤として酸化鉄、二酸化マンガン等から成る新たな瓦用釉薬が開発され、一部使用が始められている³⁾。これらのことから、廃瓦は環境庁が定める土壤汚染に係る環境基準を満たす、環境に優しい資材であるといえる。

2. 1. 3 規格外品廃瓦の利用状況

現在、普通シャモットに関しては三州瓦業界の取り決めとして、三州瓦の原料となる粘土に約 3%添加する利用方法が確立されており、安定した需給関係が成立している。しかし、特殊シャモットに関しては、透水性セラミックブロックやコンクリートブロックの化粧材や運動施設のアンツーカー等として、また、ビットに関しては、路盤材や舗装骨材等として小規模ながら利用され始めたが、その他の用途での利用は少なく、未だ安定した需給関係は成立していない。破碎処理のみのビットおよび特殊シャモットは、粉碎処理を行う普通シャモットに比べ、加工に係る作業性や経済性の面で有利なことから、その安定した有効利用方法の確立が求められている。

2. 1. 4 規格外品廃瓦骨材の物性

上原ら⁴⁾や飛田ら⁵⁾は、規格外品廃瓦のうち、粒径 5~0mm タイプの特殊シャモットをコンクリート用細骨材（以下、規格外品廃瓦細骨材）として、ビットを土木学会

表2-1 規格外品廃瓦の溶出試験結果

| 項目 | 基準値 | 試験結果 |
|-----------------|--|----------------------------|
| カドミウム | 検液 1 ℓにつき0.01mg以下 | 0.001mg/ℓ未満 |
| 全シアン | 検液中に検出されないこと | 検出せず (0.1mg/ℓ未満) |
| 有機リン化合物 | 検液中に検出されないこと | 検出せず (0.1mg/ℓ未満) |
| 鉛 | 検液 1 ℓにつき0.01mg以下 | 0.005mg/ℓ未満 |
| 六価クロム | 検液 1 ℓにつき0.05mg以下 | 0.01mg/ℓ未満 |
| ひ素 | 検液 1 ℓにつき0.01mg以下、 かつ埋立て等の用に供する場 所の土地利用目的が農用地 (田に限る)である場合は、 試料1kgにつき15mg未満 | 0.005mg/ℓ未満 |
| ふっ素 | 検液 1 ℓにつき0.8mg以下 | 0.2mg/ℓ |
| 総水銀 | 検液 1 ℓにつき0.0005mg以下 | 0.0005mg/ℓ未満 |
| アルキル水銀 | 検液中に検出されないこと | 検出せず (0.0005mg/ℓ未 満) |
| ポリ塩化ビフェニル | 検液中に検出されないこと | 検出せず (0.0005mg/ℓ未 満) |
| トリクロロエチレン | 検液 1 ℓにつき0.03mg以下 | 0.002mg/ℓ未満 |
| テトラクロロエチレン | 検液 1 ℓにつき0.01mg以下 | 0.0005mg/ℓ未満 |
| ジクロロメタン | 検液 1 ℓにつき0.02mg以下 | 0.002mg/ℓ未満 |
| 四塩化炭素 | 検液 1 ℓにつき0.002mg以下 | 0.0002mg/ℓ未満 |
| 1,2-ジクロロエタン | 検液 1 ℓにつき0.004mg以下 | 0.0004mg/ℓ未満 |
| 1,1-ジクロロエチレン | 検液 1 ℓにつき0.02mg以下 | 0.002mg/ℓ未満 |
| シス-1,2-ジクロロエチレン | 検液 1 ℓにつき0.04mg以下 | 0.004mg/ℓ未満 |
| 1,1,1-トリクロロエタン | 検液 1 ℓにつき1mg以下 | 0.0005mg/ℓ未満 |
| 1,1,2-トリクロロエタン | 検液 1 ℓにつき0.006mg以下 | 0.0006mg/ℓ未満 |
| 1,3-ジクロロプロペン | 検液 1 ℓにつき0.002mg以下 | 0.0002mg/ℓ未満 |
| チウラム | 検液 1 ℓにつき0.006mg以下 | 0.0006mg/ℓ未満 |
| シマジン | 検液 1 ℓにつき0.003mg以下 | 0.0003mg/ℓ未満 |
| チオベンカルブ | 検液 1 ℓにつき0.02mg以下 | 0.002mg/ℓ未満 |
| ベンゼン | 検液 1 ℓにつき0.01mg以下 | 0.001mg/ℓ未満 |
| セレン | 検液 1 ℓにつき0.01mg以下 | 0.002mg/ℓ未満 |
| 銅 | 埋立て等の用に供する場所の 土地利用目的が農用地(田に 限る)である場合は、試料1 kgにつき125mg未満 | 0.8mg/kg |
| ほう素 | 検液 1 ℓにつき1mg以下 | 0.15mg/ℓ |

* 全項目において、平成3年環境庁告示46号による溶出試験基準を満足している。

* 同溶出試験には、供試体として三州瓦廃材（ビット）を用いている。

が定める粒径 20～5mm の標準粒度の中央値をとるように、粒度調整を行ったものをコンクリート用粗骨材（以下、規格外品廃瓦粗骨材）として定義し、研究を始めた。表 2-2 に飛田ら⁵⁾による規格外品廃瓦骨材の物性試験結果と土木学会が示す標準的な骨材の物性を、写真 2-3 に規格外品廃瓦骨材を示す。

(1) 篩い分け試験 (JIS A 1102-1999)

規格外品廃瓦細骨材の篩い分け試験において、粗粒率 3.19 と標準的な細骨材の粗粒率の基準値 (2.3～3.1) に近い値を示し、粒度分布は土木学会が定める範囲内⁶⁾にほぼ収まっていると報告している。

(2) 微粒分量試験 (JIS A 1103-2003)

規格外品廃瓦細骨材の微粒分量は 11.22% という値を示し、標準的な基準値 (3.0%以下) の 4 倍に近い値となり、これを用いる場合、所定のワーカビリティを保持するために、細骨材率および単位水量の調整等が必要であると報告している。

(3) 密度試験 (JIS A 1109-1999、JIS A 1110-1999)

規格外品廃瓦細骨材および粗骨材の絶乾密度は、それぞれ 2.03g/cm^3 および 2.07g/cm^3 という値を示し、土木学会が定める骨材の絶乾密度での基準値 (2.50g/cm^3 以上) と比較すると、ともに小さな値となり、表乾密度についてはそれぞれ 2.25g/cm^3 および 2.24g/cm^3 という値が得られたと報告している。これは規格外品廃瓦が多孔質構造を有しており、内部の空隙分だけ軽くなるためであると考えられる。

(4) 廃瓦骨材の吸水率試験および廃瓦粗骨材の含水率経時変化試験

(JIS A 1109-1999、JIS A 1110-1999)

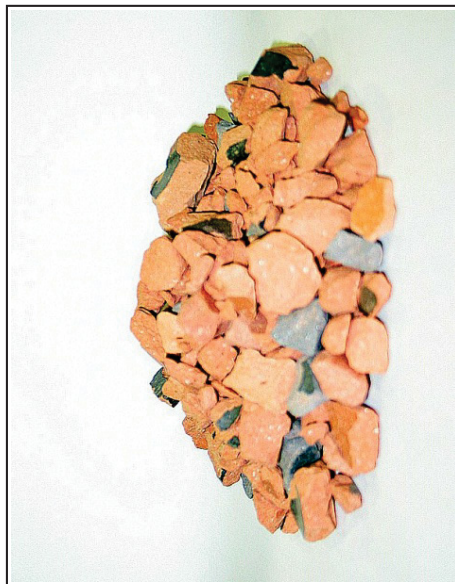
規格外品廃瓦細骨材および粗骨材の吸水率は、JIS に準拠した方法で 24 時間吸水後の見掛けの値で表すと、それぞれ 10.40% および 7.86% という値を示し、土木学会が定める骨材での吸水率の基準値 (細骨材で 3.5%以下、粗骨材で 3.0%以下) と比較すると、ともに約 2～3 倍大きな値が得られたと報告している。また、表 2-3 および図 2-2

表2-2 規格外品廃瓦骨材の物性

| | 粒径 (mm) | 表乾密度 (g/cm ³) | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 粗粒率 | 微粒分量 (%) | 単位容積質量 (kg/l) | 実績率 (%) | 粒形判定 実績率 (%) | 破碎値 (%) |
|-----------|------------|------------------------------|------------------------------|------------|---------|-------------|------------------|------------|--------------------|------------|
| 規格外品廃瓦細骨材 | 5~0 | 2.25 | 2.03 | 10.40 | 3.19 | 11.22 | 1.47 | 72.2 | 58.7 | 23.11 |
| 規格外品廃瓦粗骨材 | 20~5 | 2.24 | 2.07 | 7.86 | 6.60 | 0.00 | 1.24 | 59.6 | 62.0 | |
| 標準細骨材 | 5~0 | - | 2.5以上 | 3.5以下 | 2.3~3.1 | 3.0%以下 | 1.70 | 65.3 | 53%以上 | 7.31 |
| 標準粗骨材 | 20~5 | - | 2.5以上 | 3.0以下 | - | - | 1.65 | 63.5 | 55%以上 | |



[規格外品廃瓦細骨材]



[規格外品廃瓦粗骨材]

写真2-3 規格外品廃瓦骨材

表2-3 規格外品廃瓦粗骨材の含水率経時変化試験結果

| 浸漬時間 | 1分 | 5分 | 15分 | 30分 | 1時間 | 3時間 | 6時間 | 1日 | 3日 | 5日 | 1週間 | 2週間 |
|--------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 含水率(%) | 5.28 | 5.66 | 5.82 | 5.89 | 5.91 | 6.2 | 6.59 | 7.22 | 8.11 | 9.19 | 9.18 | 9.44 |

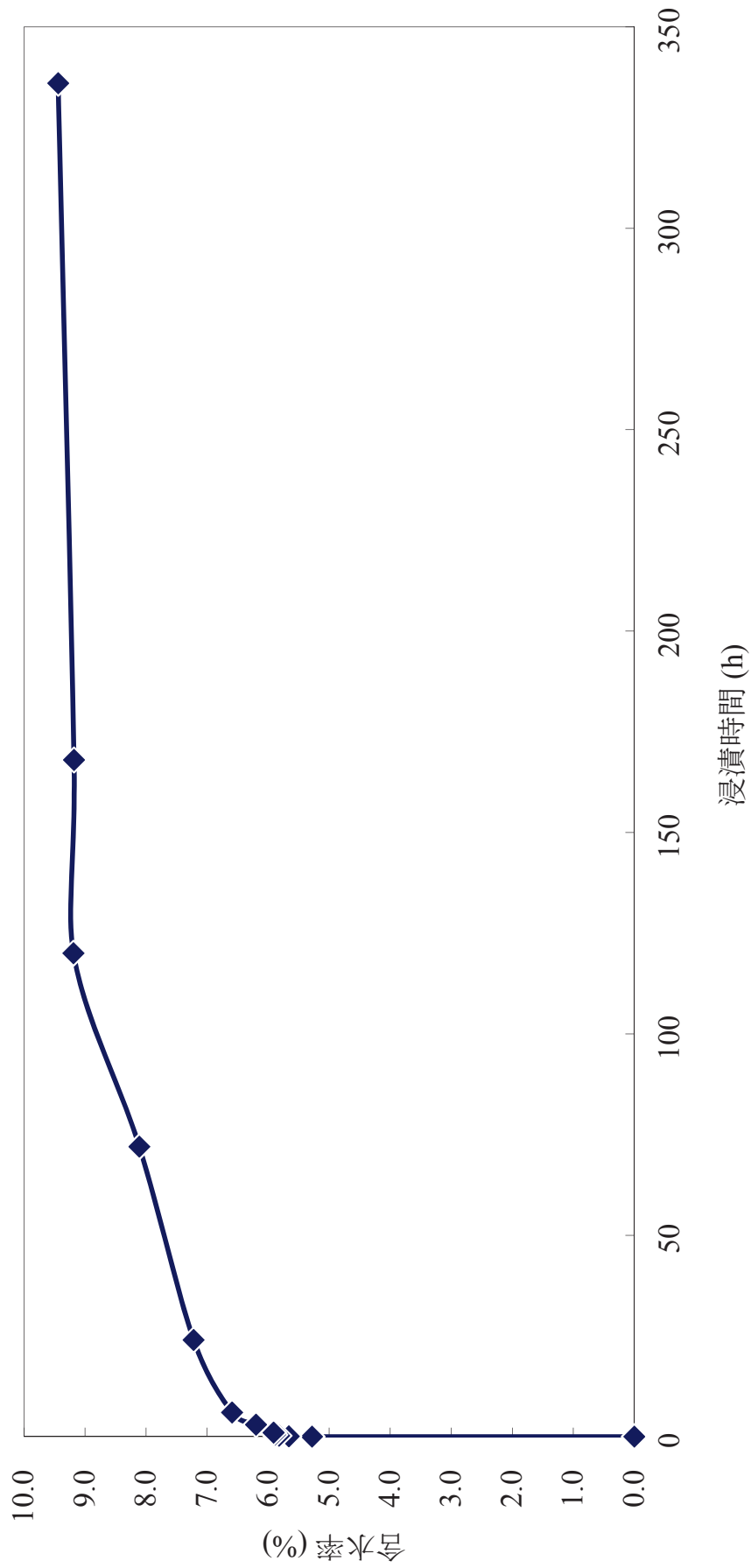


図2-2 規格外品廃瓦粗骨材の含水率経時変化試験結果

に規格外品廃瓦粗骨材における含水率の経時変化試験結果を示す。規格外品廃瓦粗骨材は吸水時間 1 分で含水率 5.28%に達し、その後徐々に含水率は上昇し、限界含水率（骨材が飽和状態となる含水率）に到達して飽和状態となるまでに 5 日間（120 時間）かかる結果が得られたと報告している。なお、見掛けの吸水率が 7.22%となっており、表 2-2 の物性試験結果（7.86%）と若干異なるが、これは副産物であるために生じたバラツキであると考えられる。これより、規格外品廃瓦の吸水率は、軽量骨材と同様に、時間とともに変化することが明らかとされた。

（５） 単位容積質量試験（JIS A 1104-1999）

規格外品廃瓦細骨材および粗骨材の単位容積質量は、それぞれ 1.47kg/m^3 および 1.24kg/m^3 という値を示し、標準的な細骨材および粗骨材の単位容積質量（細骨材で 1.70kg/m^3 、粗骨材で 1.65kg/m^3 ）に比べ小さい値となった。これは規格外品廃瓦骨材が多孔質構造を有することに起因すると推察している。

（６） 実積率および粒形判定実積率試験（JIS A 1104-1999、JIS A 5005/5.8-1993）

規格外品廃瓦細骨材および粗骨材の実積率は、それぞれ 72.2%および 59.6%という値を示し、標準的な実積率の基準値（細骨材で 65.3%、粗骨材で 63.5%）と比較すると、細骨材では大きな値が、粗骨材では小さな値が得られたと報告している。その理由として、規格外品廃瓦細骨材には比較的微粒分量が多く含まれているということ、規格外品廃瓦粗骨材に含まれる粒径の大きなものの中に、扁平もしくは細長い粒形のものが比較的多く存在していたことを挙げている。

粒形判定実積率とは、その試料が有する粒形の良否を判断する指標となるもので、それぞれ廃瓦細骨材 58.7%および廃瓦粗骨材 62.0%という値を示し、JIS A 5005 に規定されている基準値（細骨材で 53%以上、粗骨材で 55%以上）と比較すると、ともに基準値を満足する材料であり、規格外品廃瓦骨材は良好な粒子形状を有すると報告している。

(7) 破砕試験 (BS812:Part110:1990)

規格外品廃瓦骨材の破砕値は 23.11%であり、比較対象とした砕石 2005 (瀬戸産) の破砕値は 7.31%となり、規格外品廃瓦骨材は砕石に比べ約 3 倍の値が得られたと報告している。これは廃瓦骨材の強度が砕石の 3 分の 1 程度であることを示しており、廃瓦骨材は標準骨材に比べて強度が低いといえる。

また、友竹ら⁷⁾は、規格外品廃瓦のアルカリシリカ反応性について、化学法 (JIS A 1145) および 3 条件下でのモルタルバー法 (JIS A 1146: 温度 40℃・相対湿度 100%、デンマーク法: 温度 50℃の飽和 NaCl 溶液浸漬、および ASTM C 1260: 温度 80℃の 1N・NaCl 溶液浸漬) を用いて調査した結果、化学法での「無害でない」という結果を除き、モルタルバー法では「無害」であるとの試験結果が得られたと報告している。化学法とは、24 時間のアルカリ溶液との反応で簡易に判定結果を得ることのできる効率の良い試験方法である。しかし、同方法は、一般的に分析機器や操作による誤差が生じやすく、試料として用いた廃瓦の品質にばらつきがある等の不確定な要因を考慮すると、同方法による試験結果の信憑性には疑問が残る。これらのことから、モルタルバー法による結果を考慮すると、規格外品廃瓦によるアルカリシリカ反応への影響は小さいと推察される。

2. 2 規格外品廃瓦を用いたコンクリート

これまでに、規格外品廃瓦骨材を用いたコンクリート (以下、規格外品廃瓦コンクリート) について、杉浦ら⁸⁾や天野ら⁹⁾¹⁰⁾により研究が行われており、それらはコンクリート製造時における規格外品廃瓦骨材の含水状態により、以下のような知見が得られている。

2. 2. 1 表乾状態の規格外品廃瓦を用いたコンクリート

(1) フレッシュ性状

杉浦ら⁸⁾は、混和剤使用量を調節することで、材料分離することなく、スランプ、空気量ともに設定した目標範囲内に制御可能であると報告している。

(2) 強度特性

杉浦ら⁸⁾は、圧縮強度は規格外品廃瓦骨材の置換率に関わらず、標準的な骨材を用いた場合とほぼ同程度の値を示すことを報告している。一方、静弾性係数は規格外品廃瓦骨材の置換率が増加するに従い低下する傾向が見られることを報告している。これについて天野ら¹⁰⁾は、規格外品廃瓦骨材自体の静弾性係数が標準的な骨材に比べて半分程度と低い値（廃瓦骨材； 30kN/mm^2 程度、砕石； 60kN/mm^2 程度）であることに起因することを明らかにしている。

(3) 乾燥収縮特性

天野ら⁹⁾は標準的な骨材を用いた場合と比較して、表乾状態の規格外品廃瓦骨材を用いた場合、試験期間中の質量変化や長さ変化に、廃瓦骨材に含まれる水分量に依存した影響が現れるが、示方書の基準と比較した上で、実用上問題ないとしている。

(4) 凍結融解抵抗性

天野ら⁹⁾は、表乾状態の規格外品廃瓦骨材を用いた場合、凍結融解抵抗性が著しく低下したと報告している。またその原因として、規格外品廃瓦骨材に含まれる多量の水が凍結する際に生じる高い膨張圧を挙げている。

(5) 中性化抵抗性

天野ら⁹⁾は、規格外品廃瓦細骨材の混入がわずかに中性化抵抗性を低下させる傾向があるが、その影響は小さく、示方書の基準と比較してなんら問題ないとしている。

2. 2. 2 気乾状態の規格外品廃瓦を用いたコンクリート

天野ら⁹⁾は杉浦らの研究結果を受け、気乾状態の規格外品廃瓦骨材を用いることにより規格外品廃瓦コンクリートの凍結融解抵抗性の改善を試みている。

(1) フレッシュ性状

混和剤使用量を調節することにより、空気量の制御は可能であるが、そのワーカビリティについては、粘性が高く、作業負荷が大きい為、今後の課題点であると指摘している。

(2) 強度特性

気乾状態の規格外品廃瓦骨材を用いた場合、標準的な骨材を用いた場合と比較して、強度の増加が確認できたとしている。またこの要因として、気乾状態である規格外品廃瓦骨材が、施工中に練混ぜ水の一部を吸水し、実際の水セメント比が低下することによるものであると推察している。

(3) 凍結融解抵抗性

気乾状態の規格外品廃瓦骨材を用いた場合、標準的な骨材を用いた場合と同様に、高い凍結融解抵抗性を備えていると報告している。またこの要因として、規格外品廃瓦骨材内部に存在すると考えられる不飽和部分が、凍結時に水の逃げ道となり、内部圧力低下につながったと考察している。

2. 2. 3 表面噴霧した規格外品廃瓦を用いたコンクリート

天野ら¹¹⁾は気乾状態の規格外品廃瓦骨材に対し、練混ぜ直前に表面噴霧処理を施し、練混ぜ中の骨材の吸水を抑制することにより、規格外品廃瓦コンクリートのフレッシュ性状および凍結融解抵抗性の改善を試みている。

(1) フレッシュ性状

気乾状態の規格外品廃瓦骨材に対し、表面噴霧処理を施すことにより、優れた施工

性および空気連行性を有するコンクリートの作製が可能であることを明らかとし、特に、噴霧量を多くするほど施工性は向上したと報告している。

(2) 強度特性

規格外品廃瓦骨材に対する噴霧量が増加するに連れて、圧縮強度および静弾性係数は低下するが、噴霧量4～6%程度（規格外品廃瓦骨材質量比）であれば、規格外品廃瓦粗骨材と単位水量の間での水分の授受が抑制され、標準的な骨材を使用した場合と同等の強度が得られると報告している。また、噴霧量4～6%の表面噴霧法により作製したコンクリートについて、水セメント比と圧縮強度の間には高い正の相関関係があり、強度制御上問題ないことも報告している。

(3) 凍結融解抵抗性

凍結融解抵抗性に関して、噴霧量0～8%において、高い凍結融解抵抗性を有することを明らかにしている。また、表面噴霧処理を施した規格外品廃瓦粗骨材は、浸水しやすい空隙以外の空隙が、コンクリート硬化時においても不飽和部分として存在し、そこが水分凍結の際に生じる膨張圧の逸散余地になったためであると推察している。

乾燥収縮特性に関して、噴霧量が増加するに連れ、質量変化は大きくなるが、必ずしも比例関係とはならないと報告しており、4%の表面噴霧を行ったコンクリートの長さ変化は、乾燥13週程度までは標準的な骨材を使用したコンクリートの長さ変化を下回り、13週以降はほぼ同じ挙動を示したと報告している。さらに、噴霧量8%においても、コンクリート標準示方書の規格と比較して、なんら問題ないことを明らかにしている。

以上のことを踏まえ天野らは、表面噴霧法を規格外品廃瓦骨材に対し4～6%で施すことにより、フレッシュ性状および凍結融解抵抗性ともに問題のない規格外品廃瓦コンクリートの製造が可能であると報告している。

2.3 まとめ

- (1) 瓦廃材は、環境庁が定める土壌の汚染に係る環境基準を満たしており環境にやさしい再生材料である。
- (2) 廃瓦骨材は吸水率が非常に高く、通常の骨材と比べて3倍程度の値を示し、特に最初の1分で5.28%と高い吸水率を示すが、限界吸水率に到達するまでには5日以上かかる。また、ペーストに包まれた状態においても優れた吸水性能を持つ。
- (3) 瓦廃材の特徴である優れた吸・保水性能は、瓦廃材をコンクリート用骨材として扱う上では、負の要素として現れている。
- (4) 表面噴霧処理を施した気乾状態の規格外品廃瓦を用いることにより施工性、強度および耐久性に問題ない規格外品廃瓦コンクリートの製造が可能である。

以上が既往の研究より得られた規格外品廃瓦に関する知見である。ここにあるように、規格外品廃瓦の特徴である優れた吸・保水性能は、規格外品廃瓦コンクリートにおいては負の要素として現れているため、規格外品廃瓦の有効利用という観点からは、更なる用途開発が求められる。そこで規格外品廃瓦が、要求性能として保水機能が挙げられるポーラスコンクリートに適用されれば、ポーラスコンクリートの保水性能の向上が期待され、規格外品廃瓦の有効利用となり得る。以上のようなことから、第3章においては、まず、ポーラスコンクリートの概要についてこれまでに得られている知見をまとめ整理する。次に、規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリートを製造し、規格外品廃瓦がポーラスコンクリートの性能へ与える影響の把握を試みた。

〈参考文献〉

- [1] リサイクル原料シャモット・ビット、シャモット工場等、愛知県陶器瓦工業組合
発行カタログ
- [2] 三州瓦廃材溶出試験結果証明書、愛知県陶器瓦工業組合（証明書発行元：株式会社
愛研）
- [3] 福永均、伊藤征幸、榊原一彦、久野徹：三州瓦産地ゼロエミッション技術、愛知
県産業技術研究所 常滑窯業技術センター、2002.12
- [4] 上原匠、梅原秀哲、友竹博一、篠田泰宏：瓦廃材を細骨材として用いたコンクリート
の物性、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.1405-1410、2005
- [5] 飛田浩孝：瓦廃材のコンクリート用骨材への適用性に関する研究、名古屋工業大
学 大学院 工学研究所 修士論文、2006.2
- [6] 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]、P28、2002
- [7] 友竹博一、青山俊春、鳥居和之：廃瓦再生細骨材のリサイクル活用に関する基礎
的研究、第59回年次学術講演会講演概要集、土木学会、pp.359～360、2004.9
- [8] 杉浦永太、Lee Han Chiang、飛田浩孝、上原匠、梅原秀哲：瓦廃材を骨材として利用し
たコンクリートの物性に関する研究、第61回年次学術講演会講演概要集、土木学
会、pp.337～338、2006.9
- [9] 天野佑樹、杉浦永太、上原匠、梅原秀哲：三州瓦廃材を用いたコンクリートの耐久性、
セメント・コンクリート論文集、No.61、pp.542～549、2007
- [10] 天野佑樹、糸山豊、Lee Han Chiang、上原匠：三州瓦廃材を用いた RC 梁部材の特性、
セメント・コンクリート論文集、No.61、pp.550～557、2007
- [11] 天野佑樹、上原匠、梅原秀哲、武長祐樹：三州瓦廃材のコンクリートへの有効利
用、コンクリート工学論文集、Vol.20、No.2、2010.5

第 3 章

規格外品廃瓦を用いた ポーラスコンクリート

第3章 規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリート

3.1 ポーラスコンクリートとは

日本コンクリート工学会が発行する「ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書」(以下、委員会報告)¹⁾によると、ポーラスコンクリートとは、粗骨材と、粗骨材を連結するためのセメントペースト(または少量の細骨材を含むモルタル)によって構成されるオコシ状のコンクリートであるとされており、現在は河川護岸や道路舗装に使用実績がみられる。このように、ポーラスコンクリートに関して産官学により研究や施工が行われてはいるが、これらの研究や施工はそれぞれ独自に進めているものが多く、配合設計法や施工法、その評価方法について規格化されていないのが現状である。

3.1.1 ポーラスコンクリートの基本性状

(1) 材料

空隙率を大きくするために単一粒度の粗骨材を用いている。粗骨材の最大寸法は用途により異なり、河川護岸用では20mm、車道舗装用では13mm、歩道用では5mm程度の実績が多い。細骨材を用いない配合もいくつか報告されているが、ダレ落ちを防止するためにモルタル容積の20~27%程度使用する配合が多くみられる。また、ほとんどの配合で高性能AE減水剤が使用されている。

(2) 空隙性状

ポーラスコンクリートの最大の特徴は空隙を有することである。空隙はその構造別に次の3つに定義されている。

・連続空隙

供試体表面からみて連続している空隙であり、容易に水で飽和、排水される空隙

・独立空隙

供試体表面からみて独立している空隙であり、水で飽和、排水するには若干の時間を要する空隙

・全空隙

供試体全体に含まれる全ての空隙（連続空隙と独立空隙の和）

配合設計では任意の全空隙率を設定して設計するが、透水性に影響するのは連続空隙である。各用途での施工実績における設計空隙率は、護岸ブロックで 22～28%、護岸の現場打ちでは 21～30%、車道では 15～20%、歩道では 16.5～25%程度の実績がみられる。

（３） 強度

ポーラスコンクリートの強度は主に空隙率、水セメント比および粗骨材最大寸法の影響を受けることが一般的に明らかにされている。特に、空隙率の影響を大きく受け、圧縮強度、曲げ強度ともに空隙率の増加にともなって減少することが多くの研究から明らかにされている。圧縮強度に関しては河川護岸に適用する際に、 $10\sim 18\text{N/mm}^2$ 程度の設計基準強度を用いることが多い。また、道路舗装の設計曲げ強度は、車道では 4.5N/mm^2 、歩道では $2.5\sim 3.5\text{N/mm}^2$ 程度の値が用いられることが多い。なお、曲げ強度の圧縮強度に対する割合は $1/5\sim 1/4$ 程度が一般的であるとされている。

（４） フレッシュ性状

ポーラスコンクリートのフレッシュ性状は主にペースト若しくはモルタルの流動性に支配され、底面へのダレ落ちに注意する必要があるとされている。しかし、その判定方法に関して様々な試験方法が提案されているものの、簡便性や信頼性の観点から問題も多く、確立に至っていないのが現状である。なお、流動性の調整は主に高性能 AE 減水剤使用量の調整により行うのが良いとされている。

3. 1. 2 ポーラスコンクリートの配合設計

委員会報告では、配合設計の手順について指針案を示している。これによると、ポーラスコンクリートの配合設計の手順としては、

- ①粗骨材量の決定
- ②空隙率に応じたモルタル量の設定
- ③細骨材量の決定
- ④単位水量およびセメント量の決定
- ⑤混和剤使用量の決定

の順に行うことを標準としており、通常のコングリート設計手順とは大きく異なる。

ポーラスコンクリートの主な性能はその空隙により決まるため、粗骨材の実積率および目標空隙率からその他の材料を決定していく方法を採用している。また、粗骨材の実積率は、JIS A 1104 法に準拠して求めるが、その際の締固め方法については、実際の締固め方法に準拠した方法で行った方が良いとされている。ここで、粗骨材の実積率を基にその他の材料の使用量を決定していることから、実際にポーラスコンクリートを練混ぜると、骨材と骨材の隙間にモルタル（またはペースト）が入り込むために、実際の 1m^3 中に存在する粗骨材量は実積率の値よりも幾分少なく、またその分空隙が多くなり、設計空隙率どおりの空隙率が得られなくなる。そこで報告書では、骨材の実積率に「補正係数」を乗じることで出来上がりポーラスコンクリートの空隙率が設計空隙率の許容値内に収まる適切な値を有するよう調整するようになっている。

なお、ポーラスコンクリートの強度や耐久性確保の観点から、水セメント比は可能な限り低い値とすることが望ましく、20~30%程度の実積が多く報告されている。

3. 1. 3 ポーラスコンクリートの供試体作製および性能評価試験方法

(1) 供試体作製方法

ポーラスコンクリートに関する過去の研究は、既に述べたように、それぞれ独自に行われており、作製方法や締固め方法に関しても様々な方法が報告されている。

練混ぜ時のミキサへの材料投入順序に関しては、一括投入方式、水後入れ方式、ペースト（モルタル）先練り方式等が報告されている。

締固め方法に関しては、現場打ちで施工する場合、バックホウを用いてバケット面で押すように行う方法や、小型の振動コンパクタを用いて振動を与えながら行う方法等が実績として報告されている。なお、普通コンクリートの場合に通常使用されている内部振動機は用いることが出来ないとされている。一方、実験室レベルでの締固め方法に関しても多数の報告があり、突き棒による締固め、型枠バイブレータによる締固め、テーブルバイブレータによる締固めなどが多い。しかし、前川ら²⁾は突き棒による締固めは、上部、中央部、下部におけるばらつきが大きく、突き棒跡が残る可能性があることを指摘している。

（２） 透水試験方法

委員会報告において「ポーラスコンクリートの透水試験方法（案）」として円柱供試体を対象とした定水位透水試験が提案されている。ただし、供試体側面と型枠の間に生じる空隙の多い領域が透水係数に及ぼす影響は、非常に大きいことが明らかとなっている。この影響を取り除く方法は、供試体寸法を大きくするか、コアボーリングによる供試体の作製など様々な方法が考えられているが、未だ確立されたものとなっていない。

（３） 空隙率試験方法

ポーラスコンクリートの最大の特徴とも言える空隙率の測定方法に関して、透水試験方法と同様に、委員会報告において「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）」として提案されている。ただし、その試験工程においてバラツキが生じやすいことや、供試体の含水状態により空隙率の変動することから、供試体の表乾状態の見極めが重

要である。

(4) 圧縮・曲げ強度試験方法

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験および曲げ強度試験には、それぞれコンクリートの圧縮強度試験方法（JIS A 1108）およびコンクリートの曲げ強度試験方法（JIS A 1106）が用いられている。ただし、供試体セット時に、載荷装置と供試体の間は、十分に接触できるようにキャッピング処理等の対策をとる必要がある。

3. 1. 4 ポーラスコンクリートの機能

(1) 透水・排水・保水性能

ポーラスコンクリートはその連続空隙により透水・排水性能を有する。これらの性能が要求される構造物としては、車道、歩道、公園などの舗装や緑化基盤などが挙げられる。また、空隙に保水材等を注入し、雨水等を保水させ徐々に蒸発させることで、舗装等の温度上昇抑制も期待される。

(2) 水質浄化性能

ポーラスコンクリートの構造を利用した、一種の礫間接触酸化法による水質浄化に加えて、内部まで連続した空隙を有するための多様な生物相が形成されることによる生物による水質浄化機能が期待されている。また、混和材として高炉スラグ微粉末や人工ゼオライト、木炭等を用い、窒素およびリンの除去率を向上させる研究も取り組まれている。

(3) 吸音性能

ポーラスコンクリートが多孔質構造であることから、高い吸音性能を有している。また、ポーラスコンクリート吸音性能は厚さが厚いほど低周波数の、薄いほど高周波数の吸音に優れていると報告されている。

(4) 調湿・吸着性能

ポーラスコンクリートが多孔質構造であることから、周辺空気が高い湿度の条件においては空気中の水蒸気を吸収し、低い湿度の条件においては内部の水分を水蒸気として放出する調湿性能が期待されている。また、表面積が大きいという特徴から、人工ゼオライトや酸化チタン等を混入することにより SO_x や NO_x といった有害ガスを吸着し無害化させる吸着性能が期待されている

(5) 温熱性能

永井ら³⁾は屋内試験によりポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果の把握を試みている。その結果、ポーラスコンクリートは普通コンクリートに比べ、より高い温度上昇抑制効果を備えていることを明らかにしている。

また、三島ら⁴⁾は、ポーラスコンクリートの平板を作製し、屋外暴露試験を実施することにより、ポーラスコンクリートの温度低減効果の検討を行っている。その結果、供試体が湿潤状態の場合は乾燥状態と比較して、最大 4～5℃程度の温度低減が見られたと報告している。

これらのことから、ポーラスコンクリートには、水の補給が可能な場合であれば高い温度低減効果があるといえる。

なお、城門ら⁵⁾は、規格外品廃瓦と同様に吸水率の高い火山礫（吸水率 68.97%）を骨材として用いたポーラスコンクリートに対して平板の屋外暴露試験を実施している。その結果、断面中心温度および平板表面の気温が普通コンクリートに比べて 1～9℃低くなることを明らかにしている。

3. 2 ポーラスコンクリートの性能評価試験の検討

ポーラスコンクリートの重要な性能の一つとして、透水性能が挙げられ、透水性能を把握するには、透水試験の実施が必要である。現在、透水性能を評価する透水試験

については、3. 1. 4 (2) で述べたとおり、他のポーラスコンクリートの性能評価試験と同様に JCI 試験案が提案されているが、その特性上、供試体側面を拘束する素材や、その密着程度によって得られる結果に差異が生じることが考えられる。ところが JCI 試験案では、試験の手順や試験装置の簡単な概略図などは記述されているものの、その試験装置の形状や素材などについては、「透水円筒は供試体に十分密着し、供試体との間に隙間を生じない円筒とする。」と定性的な表現にとどまり、詳細な規定がなされていない。それ故に、各研究機関による試験装置の形状や、素材等は異なると考えられるが、既往の研究に関しても、試験装置の詳細を言及している報告は少なく、試験や追試を実施する場合、その再現性に疑問が残る。そこで著者らは、ポーラスコンクリートの透水試験に関して、透水円筒の素材や、供試体側面への密着程度が透水係数に及ぼす影響を明らかにし、その妥当性を検討するとともに、再現性についても検討した。

また、空隙率試験に関しても、JCI 試験案に比べ、より簡便な空隙率試験方法を新たに提案し、JCI 試験案との比較によりその妥当性も検討した。

3. 2. 1 透水試験

著者ら⁶⁾は「鋼製型枠」、「熱収縮フィルム」および「円筒ゴム」の3種類の透水円筒を用いた試験を対象とし、透水円筒としての有効性について施工性および再現性の観点から検討を行った。その結果、「熱収縮フィルム」および「円筒ゴム」を透水円筒として用いる場合、供試体側面のせき板効果を低減させるができることを明らかとし、またその透水試験は高い再現性を持つことも明らかとした。

3. 2. 2 空隙率試験

著者らは JCI 試験案として提案されている「容積法」および「質量法」に対して、

新たに「注水法」を提案し、これら試験方法の妥当性および再現性について検討を行った。その結果、「注水法」は「容積法」と高い相関関係を示すことから、同程度の再現性を示すことを明らかとしている。ただし、その試験方法の特徴から、「注水法」は「容積法」と比較して簡便な試験方法ではあるが、供試体の含水状態により、容積法より比較的大きな空隙率が得られやすいことを注意点として挙げている。

3. 3 規格外品廃瓦ポーラスコンクリート

3. 3. 1 実験概要

既往の研究において、規格外品廃瓦は優れた吸・保水性能を備えることが明らかとされている。しかし、コンクリート用骨材として用いた場合、規格外品廃瓦の優れた吸・保水性能は、コンクリートの施工性や耐久性に負の影響を与えることも明らかとされた。そこで、規格外品廃瓦をポーラスコンクリート粗骨材として用いることにより、その優れた吸・保水性能は、ポーラスコンクリートに期待される保水性能を向上させることにつながると考えた。本節では、規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリートを製造し、標準的な骨材（砕石）を用いた場合と比較することにより、規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリートの各種性能を把握することを目的とした。

3. 3. 2 使用材料および配合設計

使用材料およびその物性値を表 3-1 に、使用した粗骨材の写真を写真 3-1 に示す。粗骨材には、規格外品廃瓦（記号：Bs）と、その比較対象として JIS A 5001 で分類される道路用単粒度砕石（記号：G）を用いた。なお、粗骨材の粒度は 2 水準を設定した。ここで、比較対象を 7 号砕石（粒度範囲：5～2.5mm）とした規格外品廃瓦には、作業性の観点より、リサイクル製品としての工場出荷時の状態⁷⁾である粒度範囲：5～2mm のもの使い、本研究においては便宜上、7 号規格外品廃瓦と称し、両者を併せ

表3-1 使用材料

| 材料 | 名称・規格 | 記号 | 物性値・諸元 |
|------|--------------------------|----|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | C | 密度：3.16 g/cm ³ |
| 細骨材 | 砕砂（瀬戸産） | S | 表乾密度：2.67 g/cm ³ ，吸水率：1.24 %， 粗粒率：2.77 |
| 粗骨材 | 7号規格外品廃瓦 | Bs | 粒度範囲：5~2 mm，実積率：60.1 % 表乾密度：2.24 g/cm ³ ，気乾密度：2.07 g/cm ³ 吸水率：7.86 % |
| | 6号規格外品廃瓦 | | 粒度範囲：13~5 mm，実積率：61.3 % 表乾密度：2.24 g/cm ³ ，気乾密度：2.07 g/cm ³ 吸水率：7.86 % |
| | 7号砕石 （瀬戸産・JIS A 5001） | G | 粒度範囲：5~2.5 mm，実積率：55.5 % 表乾密度：2.69 g/cm ³ ，絶乾密度：2.67 g/cm ³ 吸水率：0.88 % |
| | 6号砕石 （瀬戸産・JIS A 5001） | | 粒度範囲：5~2.5 mm，実積率：59.9% 表乾密度：2.65 g/cm ³ ，絶乾密度：2.63 g/cm ³ 吸水率：0.66 % |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤 | SP | ポリカルボン酸系 |

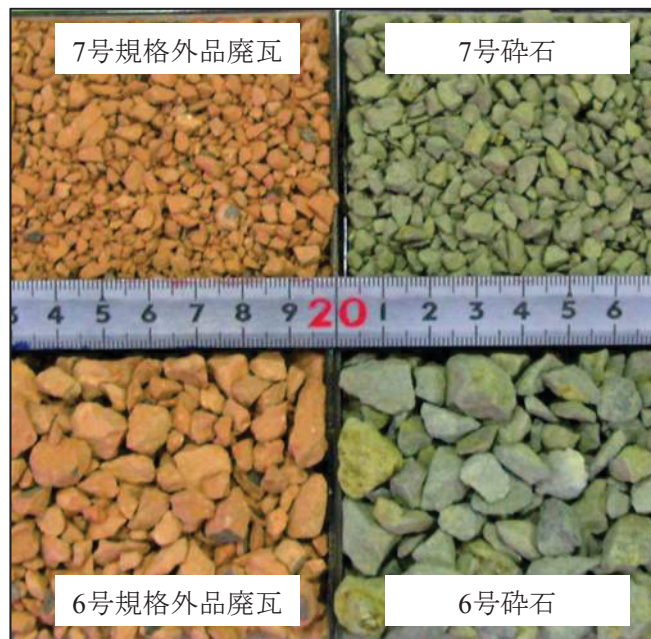


写真3-1 規格外品廃瓦と砕石

て7号粒径粗骨材と呼ぶこととする。また、比較対象を6号砕石(粒度範囲:13~5mm)とした規格外品廃瓦には、粒度調整した6号規格外品廃瓦(粒度範囲:13~5mm)を用い、両者を併せて6号粒径粗骨材と呼ぶこととする。

ここで、図3-1に7号および6号粒径粗骨材の粒度曲線を示す。図中の破線は、JIS A 5001に規定されているそれぞれの粒径における規格値の上下限值である。図3-1より、7号砕石および6号砕石についてはJISの規格範囲内に収まっているが、規格外品廃瓦については両者ともに細粒分が多い材料であることが確認できる。これが要因となり、実積率は7号規格外品廃瓦:60.1%、7号砕石:55.5%、6号規格外品廃瓦:61.3%、6号砕石:59.9%と、規格外品廃瓦が砕石と比較して大きな値を示したと推察される。

また、既往の研究⁵⁾において規格外品廃瓦は優れた吸水性能を有することから、表乾状態で練り混ぜを行うと、硬化後に凍結融解抵抗性を著しく低下させるため、気乾状態で用いることが望ましいが、気乾状態のまま練り混ぜると、練混ぜ水を吸水してしまい、施工性能の著しい低下や製造物の性能低下の原因となるとされている。そこで、練混ぜ中の規格外品廃瓦の瞬間的な吸水を抑制し、施工性能を確保することを目的として、練混ぜ直前に規格外品廃瓦に対して水を噴霧する「表面噴霧処理」を施す必要があるとしている。規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリートの製造においても、施工性能や性能確保の観点から、気乾状態の規格外品廃瓦に表面噴霧処理を施して用いることとした。そこで、規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリートの製造においても、施工性能や性能確保の観点から、気乾状態の規格外品廃瓦に表面噴霧処理を施して用いることとし、規格外品廃瓦に噴霧する水量を決定することを目的に、7号および6号規格外品廃瓦の含水率の経時変化試験を実施した。なお、含水率の計測はJIS A 1125に準拠して実施した。図3-2に7号および6号規格外品廃瓦の含水率の経時変化を示す。図3-2より、規格外品廃瓦の含水率は瞬間的に急激に上昇し、その

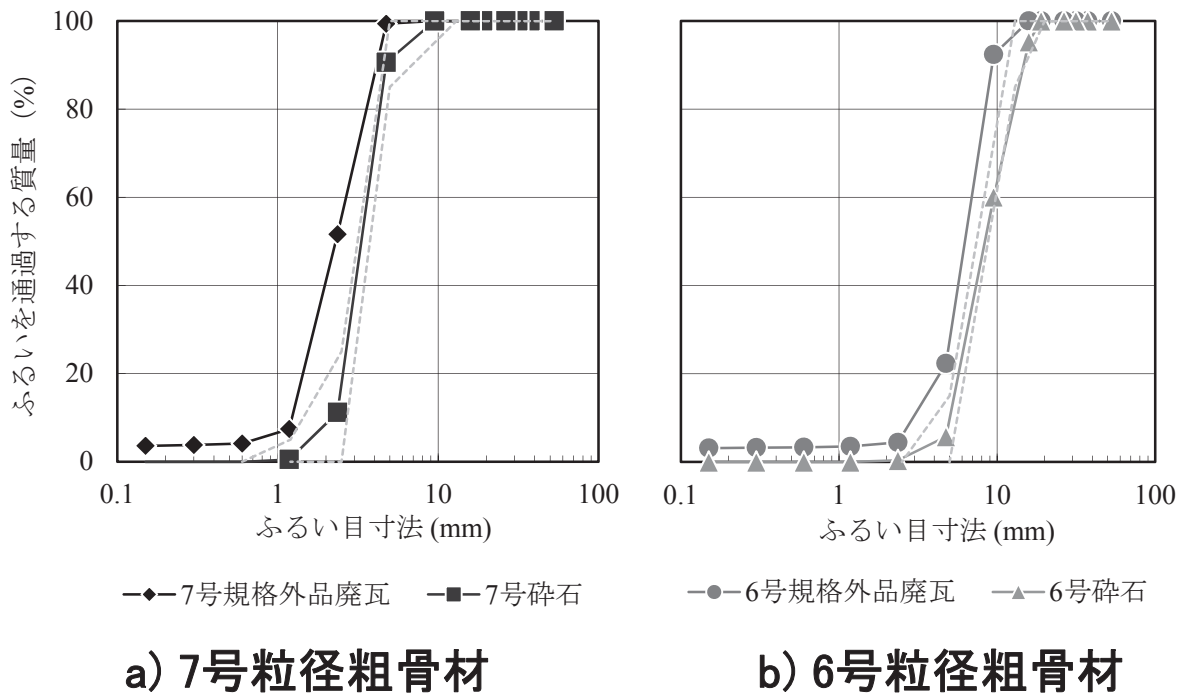


図3-1 粗骨材粒度曲線

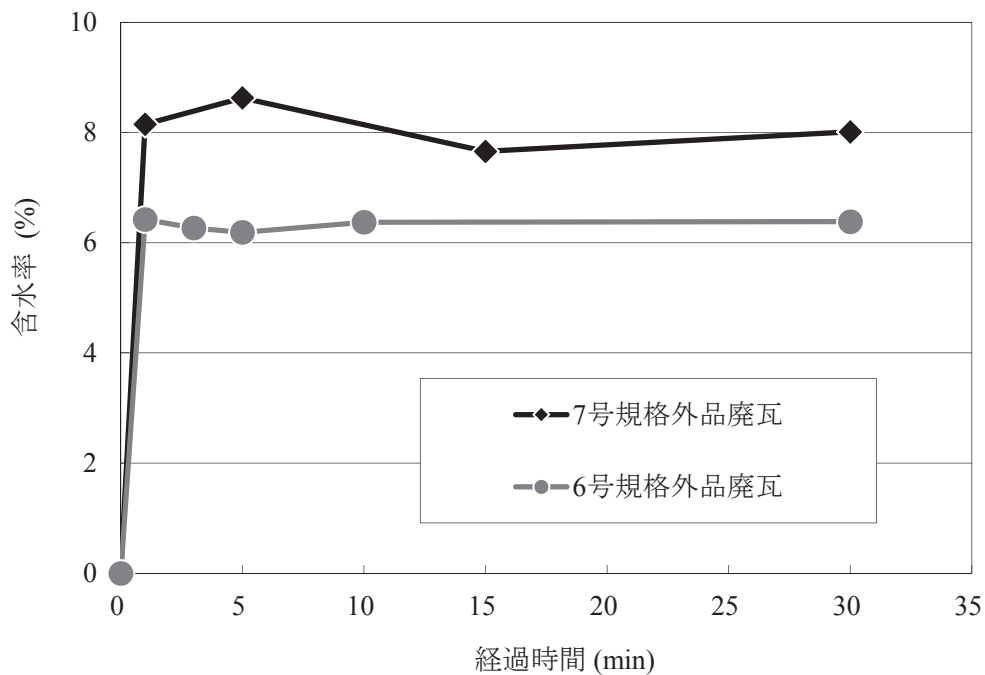


図3-2 含水率の経時変化

後 30 分経過時点程度まで一定の値をとることが確認できる。また、7号規格外品廃瓦の方が6号規格外品廃瓦よりも大きい値を示すことが確認されたが、これは7号規格外品廃瓦の方が粒径は小さく、水と接触する面積が大きいことから、瞬間的な吸水量が大きくなったためであると推察される。これらの結果より、練混ぜ時の表面噴霧処理において規格外品廃瓦に噴霧する水量はそれぞれ、7号規格外品廃瓦：8.0%、および6号規格外品廃瓦：6.3%とした。

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、結合材のダレ落ち防止を目的に、細骨材として砕砂を所定の容積割合で用いるとともに、フレッシュ性状の制御を目的に、混和剤に高性能 AE 減水剤を用いた。

配合表を表 3-2 に示す。ポーラスコンクリートの配合設計は、委員会報告書¹⁾を参考に行った。設計空隙率を 20%、水セメント比を 23%、および細骨材モルタル容積比 (s/m) を 20%の 1 水準とした。また、7号および6号規格外品廃瓦を用いた場合の補正係数を選定することも目的に、補正係数を数水準設定した。なお、表 3-2 に示す配合では、実際の空隙率の影響もあり練上がり量が必ずしも 1m^3 とはならないが、要求される空隙率を満たす配合を対象に比較検討を行うことから問題ないと判断した。なお、配合名はそれぞれ「7BsPOC：7号規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリート」、「6BsPOC：6号規格外品を用いたポーラスコンクリート」、「7GPOC：7号砕石を用いたポーラスコンクリート」、および「6GPOC：6号砕石を用いたポーラスコンクリート」とする。

3. 3. 3 試験方法

試験項目は、フレッシュ性状判定試験、空隙率試験 (JCI-SPO2-1)、透水試験 (JCI-SPO3-1)、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、曲げ強度試験 (JIS A 1106) および保水性能試験である。以下に、フレッシュ性状判定試験および保水性能試験の詳細を示す。

表3-2 配合表

| 配合名 | 補正係数 | W/C (%) | s/m (%) | W | C | S | G | B | SP [C×(%)] |
|--------|------|---------|---------|----------------------|-----|-----|------|------|------------|
| | | | | (kg/m ³) | | | | | |
| 7BsPOC | 0.90 | 23 | 20 | 87 | 379 | 138 | 0 | 1120 | 1.2 |
| | 0.91 | | | 85 | 371 | 135 | | 1132 | 1.2 |
| | 0.92 | | | 83 | 361 | 132 | | 1145 | 1.2 |
| | 0.95 | | | 77 | 335 | 122 | | 1183 | 1.2 |
| | 1.00 | | | 67 | 291 | 106 | | 1245 | 1.2 |
| 6BsPOC | 0.80 | | | 104 | 453 | 165 | | 1015 | 0.8 |
| | 0.85 | | | 94 | 408 | 149 | | 1079 | 0.8 |
| | 0.87 | | | 90 | 390 | 142 | | 1104 | 0.8 |
| | 0.88 | | | 88 | 381 | 139 | | 1117 | 0.8 |
| | 0.90 | | | 84 | 364 | 133 | | 1142 | 0.8 |
| | 0.95 | | | 73 | 319 | 116 | | 1205 | 0.8 |
| | 1.00 | | | 63 | 274 | 110 | 1269 | 0.8 | |
| 7GPOC | 0.89 | | | 103 | 448 | 163 | 1329 | 0.8 | |
| | 0.92 | | | 97 | 424 | 155 | 1374 | 0.8 | |
| | 0.90 | | | 101 | 440 | 160 | 1344 | 0.8 | |
| | 0.95 | | | 92 | 399 | 146 | 1418 | 0.8 | |
| | 1.00 | | | 82 | 359 | 131 | 1493 | 0.8 | |
| 6GPOC | 0.75 | | | 118 | 513 | 187 | 1208 | 0 | 0.8 |
| | 0.80 | | | 108 | 470 | 171 | 1289 | | 0.8 |
| | 0.85 | | | 98 | 426 | 155 | 1370 | | 0.8 |
| | 0.90 | | | 88 | 382 | 139 | 1426 | | 0.8 |
| | 0.95 | | | 78 | 338 | 123 | 1505 | | 0.8 |
| | 1.00 | | | 68 | 294 | 107 | 1584 | | 0.8 |

(1) フレッシュ性状判定試験

フレッシュ性状判定試験は、供試体作製時における結合材のダレ落ち具合や、その分布状況等を確認し、製造した試料での供試体作製の可否を判断する目的で実施した。 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の型枠を用いて供試体の作製方法と同様の方法でPOCを成型し、その場ですぐに型枠を外して底面、側面および内部の状態の観察し、供試体作製の可否を判断した。結合材のダレ落ちによる空隙の閉塞が確認されず、結合材が全体的に均一な状態であることが確認された場合は供試体作製「可」と判断し、供試体を作製した。ダレ落ち等が確認され、供試体作製「否」とであると判断された場合には、配合を見直し再度練混ぜを行うこととした。この方法による評価は、定性的ではあるが、簡便、迅速かつ確実に底部のダレ落ち、および内部の結合材の充填状況が確認できる方法として有効であると考えられる。なお、本研究では、フレッシュ性状判定試験結果が良好であり、供試体作製「可」と判断された試料により作製した供試体を試験対象としている。

(2) 保水性能試験

保水性能試験は、規格外品廃瓦がポーラスコンクリートの保水性能に与える影響を把握することを目的に実施した。まず、円柱供試体 ($\phi 100 \times 200 \text{mm}$) を 24 時間水中で吸水させた後、連続空隙内の水抜きを目的に、恒温室内 (20°C 、RH 60%) で一定時間 (7BsPOC : 12 時間、6BsPOC : 6 時間) 静置した。なお、静置時間は、検討対象となる規格外品廃瓦を用いた 7BsPOC と 6BsPOC の含水量が同程度になるように設定し、また、比較対象である砕石を用いた GPOC では、それぞれの粗骨材粒径において BsPOC と同時間とした。

次に、7号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートは側面を、6号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートは側面および底面を不透水性シートで遮水し、 60°C の恒温器内で保管しながら質量計測を行い、時間経過に伴う供試体からの蒸発量を計測した。

今回、粗骨材粒径ごとに異なる遮水条件を採用した理由は、7号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートは透水型の歩道用舗装を、6号粒径粗骨材を用いポーラスコンクリートは、保水型の車道用舗装を想定したためである。

最後に、質量がほぼ一定となり、変化が確認できない状態となった供試体を炉乾燥（約110℃）して絶乾状態とし質量を量り、試験開始時との質量差から、ポーラスコンクリート供試体が試験開始時に保持していた水量（保水量）を求めた。試験結果は、単位面積当たりの累積蒸発量で表される。

なお、透水試験で用いる透水円筒には、3.2.1より施工性および再現性の観点から、円筒ゴムを用いることとした。空隙率試験については、3.2.2で述べたように、規格外品廃瓦のような多孔質構造の材料を用いる場合には「注水法」では供試体の表乾状態の見極めが困難となることから、「容積法」を採用した。また、規格外品廃瓦のような多孔質構造の粗骨材を使用した場合は、「容積法」における自然放置中に乾きすぎないように注意して供試体を保管することが重要である。そのためにも、使用する多孔質材料の吸・排水性能を把握しておくことが必要となる。

3.3.4 供試体作製方法

練混ぜには公称容量0.06 m³の水平2軸型強制練りミキサを用いた。ミキサにセメント、粗骨材および細骨材を投入して空練をした後、練混ぜ水（混和剤含む）を投入し練り混ぜた。なお、規格外品廃瓦を用いたポーラスコンクリートを製造する場合には、まず規格外品廃瓦を全量ミキサに投入し、所定量の表面噴霧処理を施した後、セメントと細骨材を投入し空練を実施した。練混ぜ完了後ミキサから排出し切返しを行った後、フレッシュ性状判定試験を実施して作製したポーラスコンクリートのフレッシュ性状を確認した。

供試体の締固めは、表面振動機（振動数 160Hz、振幅 0.8mm）を用いて実施した。
供試体に収まるべき質量を計量し、2層に分けて型枠に詰めた。なお、供試体はφ100×200mm および 100×100×400mm を作製し、各種試験において適宜使用した。

3. 3. 5 試験結果および考察

(1) 全空隙率と補正係数

図 3-3 に各配合における全空隙率と補正係数の関係を示す。これより、設計空隙率である 20% が実測空隙率として得られる補正係数はそれぞれ、7BsPOC: 0.91、7GPOC: 0.92、6BsPOC: 0.87 および 6GPOC: 0.85 と割り出された。これより、補正係数は骨材種類やその吸水性能による影響は小さく、その粒径に支配されることが明らかとなった。また、今後今回と同一の製造方法であるならば、これらの補正係数を用いることにより、おおむね設計空隙率どおりの空隙率が確保されたポーラスコンクリートが製造できるといえよう。

(2) 連続空隙率と透水係数

図 3-4 に連続空隙率と透水係数の関係を示す。規格外品廃瓦を用いた BsPOC および砕石を用いた GPOC とともに、空隙率が大きくなるに従い、透水係数が大きくなるという一般的な傾向が確認された。

7号粒径粗骨材を用いた場合、BsPOC および GPOC とともに 6号粒径粗骨材を用いた場合と比較して、透水係数は小さくなる傾向があることが確認された。これは粗骨材間の空隙径の大きさに起因すると考えられ、空隙径のより小さな 7号粒径粗骨材を用いた場合の方が小さい値を示したと推察される。

また、同粒径の粗骨材を用いたポーラスコンクリートどうしで粗骨材種類の違いを比較すると、いずれの粒径とも GPOC と比較して BsPOC の方が小さい値を示すことが確認できる。これは両粒径において規格外品廃瓦の方が細粒分を多く含むことが要因

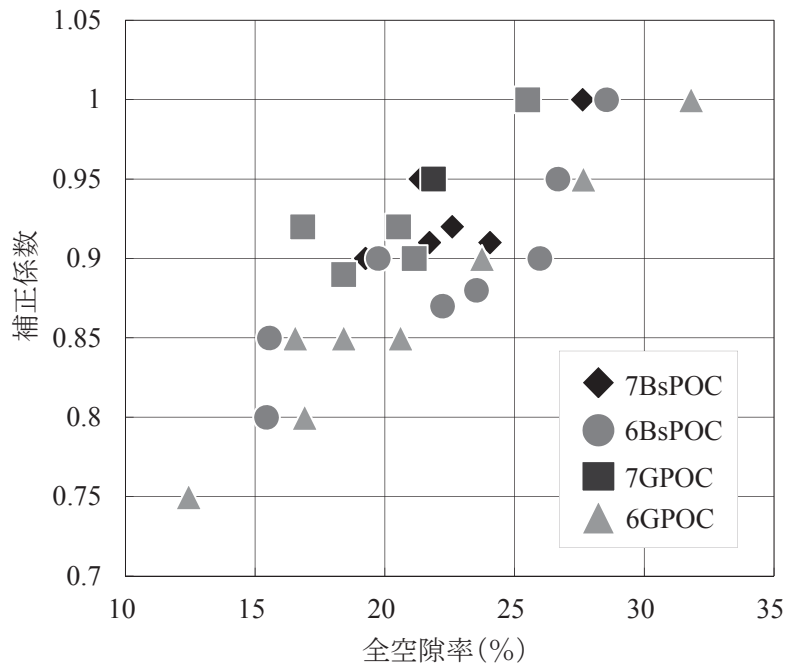


図3-3 全空隙率と補正係数

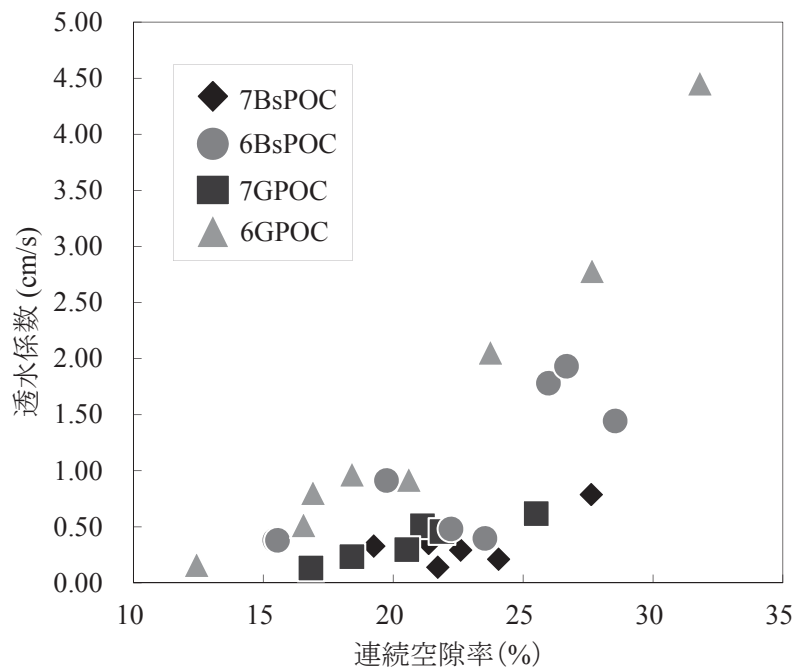


図3-4 連続空隙率と透水係数

と考えられる。ここで、2. 1. 4 (7) で既述したように、砕石および規格外品廃瓦の破砕試験 (BS812) より、破砕値がそれぞれ砕石 : 7.31 %、および、規格外品廃瓦 : 23.11 %という結果を得ており、規格外品廃瓦は砕石と比較して強度が低いことより、規格外品廃瓦は供試体締固め時の表面振動機による加振および圧密時に骨材の一部が破損し、さらに細粒分が多くなったことも推察される。これらの要因により、BsPOC は GPOC と比較して、粗骨材間の空隙径が小さくなり、透水係数が小さい値を示したと考えた。

以上のことより、透水係数は空隙量ではなく、空隙径の大きさに大きく支配されているといえ、空隙径の比較的小さい BsPOC は GPOC よりも透水性能が低い値を示すといえる。ただし、作製した全てのポーラスコンクリート供試体において、透水性舗装における透水係数の下限値⁹⁾である 0.01 cm/s を満たしていることから、透水性能からみて今回製造したポーラスコンクリートは透水性舗装として用いることには問題はないといえる。なお、今後は規格外品廃瓦の加工に伴う、細粒化の影響も含めて、利用方法を検討する必要がある。

(3) 全空隙率と圧縮強度の関係

図 3-5 に全空隙率と圧縮強度の関係をそれぞれ示す。また、圧縮強度試験で破壊した供試体の破断面を写真 3-2 に示す。図 3-5 より規格外品廃瓦を用いた BsPOC および砕石を用いた GPOC とともに、空隙率が大きくなるに従い圧縮強度が小さくなるような一般的な傾向が確認された。

a) 粗骨材粒径が与える影響

砕石を用いた GPOC の試験結果に着目すると、7GPOC と比較して 6GPOC の方が圧縮強度は大きくなる傾向を示すことが確認された。この傾向は畑中¹⁰⁾らの試験においても同様に確認され、畑中らは粗骨材粒径が大きくなることにより、粗骨材表面に付着している結合材の膜厚が厚くなり、圧縮強度が増大したと報告している。今回の試

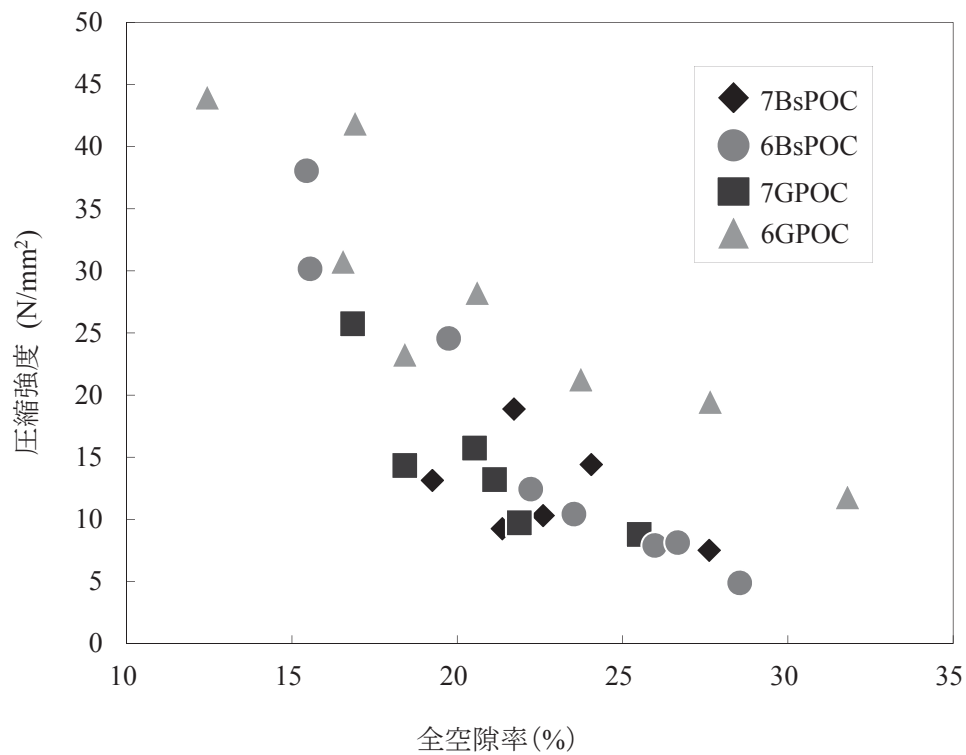
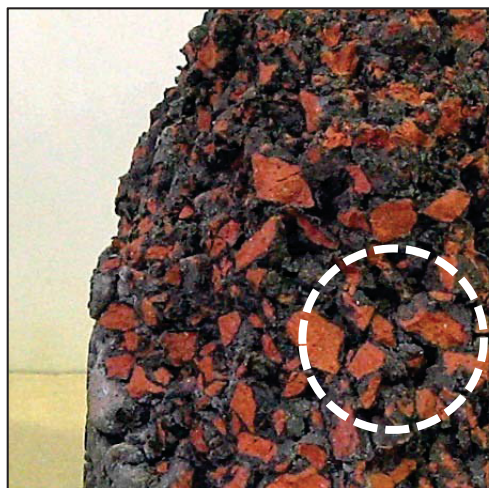


図3-5 全空隙率と圧縮強度



a) BsPOC



b) GPOC

写真3-2 圧縮強度試験供試体の破断面

験結果における傾向についても、これと同様な要因によるものと推察される。

しかし、規格外品廃瓦を用いた BsPOC の試験結果においては、前述した GPOC のような傾向は確認できず、7BsPOC および 6BsPOC の圧縮強度は同様な空隙率 - 圧縮強度関係を示すことが確認された。ここで写真 3-2 より、GPOC 供試体の破断面には結合材破壊や界面破壊のみが確認されたのに対し、BsPOC 供試体の破断面を観察すると、図中白破線で囲まれた箇所のように、規格外品廃瓦自体が破壊される骨材破壊が顕著に確認できた。これにより、BsPOC の場合は結合材や界面の破壊よりも粗骨材破壊が先行して発生することが明らかとなった。これは 3. 3. 5. (2) で述べたように、規格外品廃瓦の破砕値は砕石の破砕値の 3 倍近い値であり、砕石よりも強度が低く、規格外品廃瓦の強度が結合材強度を下回ったことが要因として挙げられる。したがって、規格外品廃瓦を用いた BsPOC の圧縮強度は、砕石を用いた GPOC に確認されたような粗骨材表面の結合材膜厚よりも、粗骨材の強度に支配されているといえる。

b) 規格外品廃瓦が与える影響

① 7BsPOC と 7GPOC の比較

7号規格外品廃瓦を用いた 7BsPOC および 7号砕石を用いた 7GPOC を比較すると、両者の空隙率 - 圧縮強度関係がほぼ同程度であることが確認された。ここで、7BsPOC の破壊断面においても、粗骨材破壊が確認されたことから、7BsPOC では結合材破壊よりも粗骨材破壊が先行したと考えられる。

ところで、7BsPOC および 7GPOC の両者が同程度の値を示しているということから、規格外品廃瓦の強度が、7GPOC における粗骨材表面の結合材強度と同程度であったと推察される。したがって、粗骨材表面の結合材強度について比較してみると、7BsPOC の方が 7GPOC と比較して大きいものと判断される。この要因としては、POC 供試体成型後からの初期養生中に規格外品廃瓦が結合材中の自由水を吸着したことによって、結合材の水セメント比が低下したことにより強度が増大したこと、および規格外品廃

瓦は多孔質であるためモルタルとの付着性が良好であり、碎石を用いた GPOC と比較して結合強度が増大したことが挙げられる。

② 6BsPOC と 6GPOC の比較

粗骨材種類により差が確認できない 7 号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートとは異なり、6 号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度の比較では、その圧縮強度に粗骨材種類によって差が確認された。6 号規格外品廃瓦を用いた 6BsPOC の方が、6 号碎石を用いた 6GPOC と比較して、同空隙率帯において小さい値を示すことが明らかとなり、これは規格外品廃瓦強度が結合材強度よりも小さかったことが要因であると考えられる。

(4) 全空隙率と曲げ強度の関係

図 3-6 に全空隙率と曲げ強度の関係を示す。また、曲げ強度試験により破壊したポーラスコンクリート供試体の破断面を写真 3-3 に示す。図 3-6 より、曲げ強度についても圧縮強度と同様に空隙率が大きくなるに従い曲げ強度が小さくなる一般的な傾向が確認された。

a) 粗骨材粒径が与える影響

碎石を用いた GPOC においては、圧縮強度試験結果と同様に、粗骨材粒径が大きい 6GPOC の方が 7GPOC と比較して曲げ強度が大きくなる傾向が確認された。これは 3. 3. 5 (3) a) で述べたように結合材の膜厚が増大したことにより、曲げ強度も増大したものと推察され、これにより、圧縮強度と同様、粗骨材粒径が大きいほど曲げ強度も大きい値を示す結果が得られた。

一方、規格外品廃瓦を用いた 7BsPOC および 6BsPOC では、空隙率－曲げ強度の関係がほぼ同じ傾向を示したことから、BsPOC においては圧縮強度の場合と同様に、結合材破壊や界面破壊よりも粗骨材破壊が先行したことが推察される。すなわち、規格外品廃瓦を用いた BsPOC においては、粗骨材粒径による曲げ強度の差は確認できな

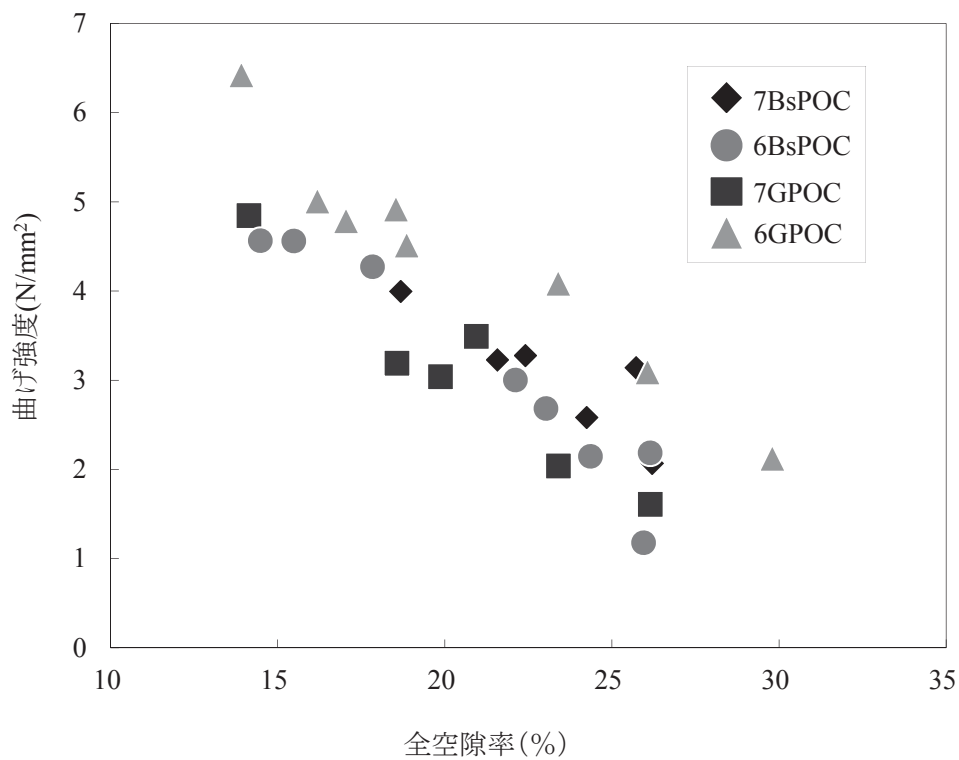
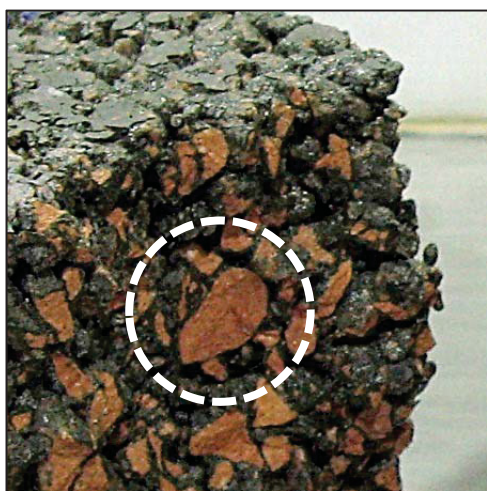


図3-6 全空隙率と曲げ強度



a) BsPOC



b) GPOC

写真3-3 曲げ強度試験供試体の破断面

った。これより、規格外品廃瓦の物性がポーラスコンクリートの曲げ強度に影響を与えていると考えられる。

b) 規格外品廃瓦が与える影響

① 7BsPOC と 7GPOC の比較

7号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートでは、空隙率－圧縮強度関係で得られた傾向や、6号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートとは異なる結果となった。同空隙率帯において、曲げ強度は7BsPOCの方が、7GPOCと比較して大きい値を示すことが確認された。これは7BsPOCにおいては、結合材強度が練混ぜ中や硬化中の規格外品廃瓦の吸水により増大したこと、および規格外品廃瓦と結合材の付着が良好であり、結合強度が増大したことにより、7BsPOCの曲げ強度の方が大きい値を示す結果となったと考えられる。今回の結果から、7号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートの曲げ強度では、規格外品廃瓦の強度は、砕石を用いたGPOCの結合材強度よりも大きく、骨材強度の観点から問題ないと判断した。

② 6BsPOC と 6GPOC の比較

6号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートに着目すると、6GPOCと比較して6BsPOCの方が同空隙率帯において曲げ強度は小さい値を示すことが確認された。ここで写真3-3より、圧縮強度の場合と同様に、規格外品廃瓦を用いたBsPOC供試体の破断面において骨材破壊が確認されたことから、6号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートの曲げ強度でも、同様に結合材強度よりも粗骨材強度が影響を与えることが確認された。

今回の試験結果より、全空隙率約23%以下であれば歩道舗装の設計曲げ強度である $2.5\sim 3.5\text{N/mm}^2$ をおおむね満たすことが確認されたことから、BsPOCは強度面において歩道舗装材料として問題ないと言える。ところで、6号粒径粗骨材は、車道用透水性舗装として用いられていることが多い。しかし、今回製造した6BPOCは車道舗装

の設計曲げ強度である 4.5N/mm^2 を確保できなかった。したがって、車道用 BsPOC を製造するためには、配合等の更なる改良が必要である。

(5) 保水性能試験結果

図 3-7 に保水性能試験結果を示す。試験に用いた供試体の各配合における平均全空隙率は、それぞれ 7BPOC : 20.1 %、6BPOC : 19.7 %、7GPOC : 22.4 %、および 6GPOC : 18.5 %である。

ここで図 3-7 において、粗骨材粒径の差により、累計単位面積蒸発量がほぼ一定となる（蒸発が収束する）時期に大きな差が確認できる。これは、今回実施した試験では、7号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリート供試体が透水性歩道用舗装を想定して側面のみ遮水処理した状態なのに対して、6号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリート供試体は保水性車道用舗装を想定して側面および底面を遮水処理した状態であるという試験条件の差が大きく影響している。すなわち、7号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリート供試体からの排水は上下面より、6号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリート供試体の排水は上面のみより行われることから、排水距離に差があること、および7号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリート供試体においては、供試体内からの排水が重力の影響を受けることが挙げられる。ただし、粗骨材粒径の違いにより試験条件は異なるが、同じ粗骨材粒径を用いたポーラスコンクリート供試体間では試験方法は統一されていることから、規格外品廃瓦の使用がポーラスコンクリートの保水性能に与える影響を検討の上では問題ないと判断して、考察を行った。

図 3-7 より、7号粒径および6号粒径粗骨材を用いたポーラスコンクリートにおいて、規格外品廃瓦を用いた BsPOC の方が、砕石を用いた GPOC と比較して、初期段階の蒸発量が多いことが確認できる。

また、絶乾状態の質量から算出した保水量（図中白抜きプロット）を比較すると、空隙率は同程度であったにもかかわらず BsPOC の方が GPOC より 1.7~1.9 倍程度大

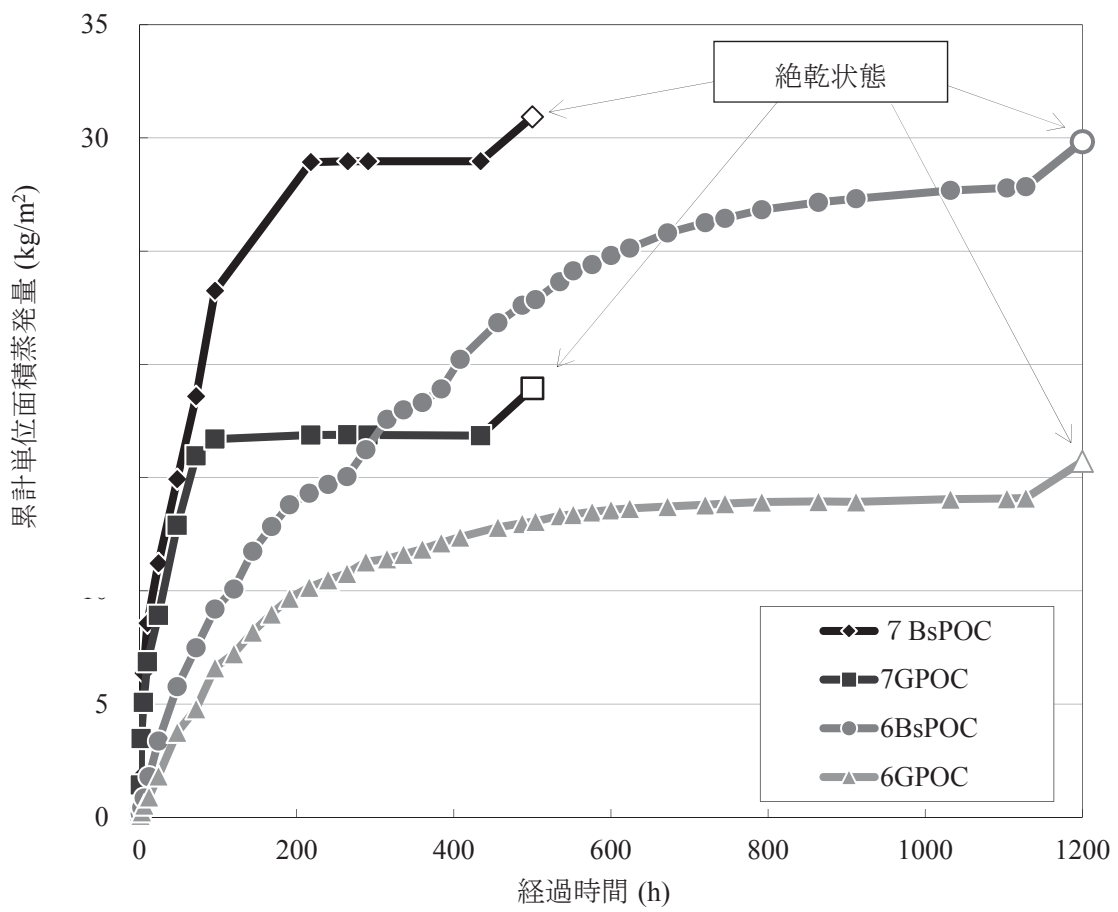


图3-7 保水性能試験結果

きい値を示すことが確認された。これは、試験開始時に保持していた水量が 1.7～1.9 倍程度多かったことを示しており、供試体の 24 時間水中保管時に、規格外品廃瓦を用いた BPOC は、粗骨材間の空隙のみならず、規格外品廃瓦自体の空隙にも水が浸入（規格外品廃瓦が吸水）したことにより、碎石を用いた GPOC よりも多くの水を試験開始時に保持できていたことが要因として考えられる。

今回の試験結果より、規格外品廃瓦を用いた BsPOC は碎石を用いた GPOC と比較して、同様に給水しても保水量が多く蒸発散能力が高い、すなわち、規格外品廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材として用いることで、ポーラスコンクリートの保水性能が向上することが明らかとなった。また、試験開始後 3 日目以降において蒸発量に大きな差が見られることから、夏季の渇水期におけるヒートアイランド現象抑制に有効であると考えられる。

3. 4 まとめ

- (1) ポーラスコンクリートはその内部に多くの空隙を持ち、この空隙により透水、排水、保水機能などが期待されている。
- (2) ポーラスコンクリートの透水試験方法は、日本コンクリート工学協会により試験案が提案されてはいるものの、詳細な規定は無く、未だ確立されてはいない。
- (3) ポーラスコンクリートの空隙率試験は、その試験工程においてバラツキが生じやすい等、問題が指摘されている。
- (4) ポーラスコンクリートを舗装等に適用することにより、夏季の路面温度低減効果が期待されており、現在研究が進められている。
- (5) 規格外品廃瓦は碎石と比較して細粒分を多く含むことが確認された。また、使用した規格外品廃瓦の表面噴霧処理における噴霧量は、その含水率の経時変化試験より、それぞれ 7 号規格外品廃瓦：8.0 %、および 6 号規格外品廃瓦：6.3 %

とした。

- (6) 配合設計時に用いる補正係数は、それぞれ 7BsPOC:0.91、7GPOC:0.92、6BsPOC:0.87、および 6GPOC:0.85 と算出され、補正係数は骨材種類やその吸水性能による影響は小さく、その粒径による影響が大きいことが明らかとなった。今後、この値を用いることにより、おおむね設計空隙率どおりの空隙率が確保されたポーラスコンクリートが製造可能である。
- (7) 規格外品廃瓦ポーラスコンクリートについて、その圧縮および曲げ強度は規格外品廃瓦の強度に支配されていることが明らかとなった。また、強度面について、歩道用舗装として問題ないことが明らかとなった。
- (8) ポーラスコンクリート用粗骨材として規格外品廃瓦を用いることにより、標準的な粗骨材を用いた場合と比較してその保水量は 1.7~1.9 倍程度大きくなり、ポーラスコンクリートの保水性能が向上することが明らかとなった。

以上より、規格外品廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材に用いることは可能であり、ポーラスコンクリートの性能向上にも繋がるといえる。このように、規格外品廃瓦がポーラスコンクリートの骨材へ適用できるのであれば、家屋解体廃瓦についてもポーラスコンクリート用骨材として用いることができる可能性があると考えられる。規格外品廃瓦と比較して発生量が多く、発生場所が全国多岐にわたる家屋解体廃瓦での可能性を明らかにすることが循環型社会構築の上でも求められる。そこで、第4章において、家屋解体廃瓦の物性把握を含め、家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートを製造し、各種性能試験を実施することで、ポーラスコンクリートへの適用の可否について検討する。

〈参考文献〉

- [1] 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書、2003.5
- [2] 前川明弘、山本晃、三島直生、畑中重光：小粒径ポーラスコンクリートの各種特性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.1397-1402、2006
- [3] 永井伴英、寺西浩司、吉永美香：ポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.361-366、2008
- [4] 三島直生、中川武志、畑中重光、北野博亮：屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.337-342、2008
- [5] 城門義嗣、加賀谷誠：火山礫を用いたポーラスコンクリートのヒートアイランド現象抑制効果に関する検討、土木学会論文集、No.781、V 66、133-143、2005.2
- [6] 坂口稔、天野佑樹、上原匠、尾澤敏行：ポーラスコンクリートの透水試験及び空隙率試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1699-1704、2009
- [7] 愛知県陶器瓦工業組合：リサイクル原料シャモット・ビット、シャモット工場等、愛知県陶器瓦工業組合発行カタログ、2001
- [8] 天野佑樹ほか：三州瓦廃材のコンクリートへの有効利用、コンクリート工学論文集、Vol.21、No.2、pp.1-11、2010
- [9] 社団法人日本道路協会：舗装施工便覧〈平成18年度版〉、2006
- [10] 畑中重光、三島直生、湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度－空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第594号、pp.17-23（2005）

第4章

家屋解体廃瓦を用いた コンクリートおよび ポーラスコンクリート

第4章 家屋解体廃瓦を用いたコンクリートおよびポーラスコンクリート

既往の研究（第2章）では、規格外品廃瓦のコンクリートへの適用が、粗骨材としてならば可能であることが明らかとされ、規格外品廃瓦利用についての留意事項が示された。そこで本研究では、前章までにポーラスコンクリート用粗骨材に適用すれば、規格外品廃瓦の特性である優れた吸・保水性能を活かすことができることを明らかにした。

ところで発生量やその地域も大きな、家屋解体廃瓦も産地や環境により品質に差はあるが、規格外品廃瓦同様に、コンクリート用粗骨材およびポーラスコンクリート用粗骨材へ適用できる可能性があると言える。また、大地震等の大規模災害が発生した場合には、大量の家屋解体廃瓦が一度に発生することも考えられ、処理方法が問題となることも考えられる。このようなときに、家屋解体廃瓦をコンクリート用骨材として用いることが可能であれば、処理問題の解決だけでなく、被災した現地における迅速な復旧作業の手助けができると言えよう。

そこで本章では、家屋解体廃瓦の基本的な物性の把握および、家屋解体廃瓦がコンクリートおよびポーラスコンクリートの物性に与える影響を把握することを目的とし、家屋解体廃瓦に対する各種物性試験および、家屋解体廃瓦を粗骨材として用いたコンクリートおよびポーラスコンクリートを製造し各種性能試験を実施した。

4. 1 家屋解体廃瓦の物性

4. 1. 1 家屋解体廃瓦とは

これまでの研究においては、瓦生産時に発生する規格外品廃瓦のみを研究対象としてきた。しかし瓦は、日本各地で生産・消費されており、家屋の建替え等に伴う家屋解体時に使用済みの瓦が大量に発生している。本研究で扱う家屋解体廃瓦とは、屋根

瓦として使用された後、家屋解体などにより建設副産物とされた廃瓦を中間処理場において破砕処理したものである。

4. 1. 2 家屋解体廃瓦の発生状況

主に瓦が使用される木造日本家屋の寿命は、維持管理次第ではあるが平均 30 年程度といわれている。ここで、経済産業省¹⁾および国土交通省²⁾による統計から、木造家屋の新築戸数および瓦の総出荷枚数の抜粋を表 4-1 に示す。30 年前（昭和 57 年）の木造家屋の建築戸数を見てみると約 70 万棟であり、瓦の出荷枚数は約 16 億枚（約 528 万 t）と極めて膨大な量である。すなわち、仮にすべての家屋が平均寿命で取り壊されたとすると、この 1 年間で 528 万 t もの廃瓦が発生するともいえる。また、今から昭和 50 年代は毎年 20 億枚近い出荷量となっていることから、今後も継続的に膨大な量の家屋解体廃瓦が発生することが予測される。

しかしながら現在、家屋解体時に発生する廃瓦は、建設廃棄物として処理されているのが一般的で、最終的には埋め立て処分されている。最終処理場の逼迫が懸念されている昨今、家屋解体廃瓦を再度資源として利用することができれば、廃棄物の減少につながり循環型社会の実現へ大きく貢献できる。

4. 1. 3 家屋解体廃瓦の物性

本節では、家屋解体廃瓦の密度や吸水率など基本的な物性把握のほかに、ポーラスコンクリートの配合設計で必要となる実積率などの物性を把握することを目的に各種試験を実施した。

(1) 試験対象

写真 4-1 に物性試験に用いた家屋解体廃瓦を示す。また、写真 4-2 に家屋解体廃瓦に混入していた混入物の一例を示す。試験対象とする家屋解体廃瓦は、美濃地方にあ

表4-1 瓦出荷枚数と木造住宅着工戸数

| 年 | 粘土瓦 総出荷枚数 (千個) | 新築木造住宅 着工戸数 (戸) | 年 | 粘土瓦 総出荷枚数 (千個) | 新築木造住宅 着工戸数 (戸) |
|-----|----------------------|-----------------------|-----|----------------------|-----------------------|
| S40 | 723,164 | 646,536 | S63 | 1,603,331 | 697,267 |
| S41 | 776,625 | 642,304 | H1 | 1,672,293 | 719,870 |
| S42 | 935,973 | 757,765 | H2 | 1,510,432 | 757,765 |
| S43 | 994,423 | 885,931 | H3 | 1,546,520 | 624,003 |
| S44 | 1,101,601 | 960,948 | H4 | 1,598,716 | 971,130 |
| S45 | 1,264,942 | 1,035,500 | H5 | 1,604,892 | 697,496 |
| S46 | 1,308,296 | 697,105 | H6 | 1,578,293 | 721,431 |
| S47 | 1,243,708 | 1,111,846 | H7 | 1,599,612 | 666,124 |
| S48 | 2,129,891 | 1,120,484 | H8 | 1,473,913 | 754,296 |
| S49 | 1,542,455 | 869,637 | H9 | 1,444,926 | 611,316 |
| S50 | 1,496,080 | 907,389 | H10 | 1,243,830 | 545,133 |
| S51 | 1,644,362 | 992,966 | H11 | 1,202,477 | 565,544 |
| S52 | 1,689,750 | 946,489 | H12 | 1,142,848 | 555,714 |
| S53 | 1,888,538 | 955,158 | H13 | 1,080,482 | 522,823 |
| S54 | 2,030,913 | 909,534 | H14 | 1,047,324 | 503,761 |
| S55 | 1,998,181 | 750,653 | H15 | 1,024,115 | 523,192 |
| S56 | 1,643,140 | 653,647 | H16 | 883,124 | 540,756 |
| S57 | 1,587,618 | 666,960 | H17 | 860,134 | 542,848 |
| S58 | 1,543,091 | 590,848 | H18 | 832,802 | 559,201 |
| S59 | 1,445,437 | 594,144 | H19 | 665,960 | 504,546 |
| S60 | 1,515,565 | 591,911 | H20 | 574,183 | 516,886 |
| S61 | 1,517,598 | 633,858 | H21 | 572,350 | 430,121 |
| S62 | 1,544,383 | 741,552 | H22 | 488,945 | 460,134 |



写真4-1 家屋解体廃瓦



写真4-2 混入物

る建設副産物中間処理工場へ運び込まれた瓦くずを破碎処理したものである。家屋の解体時に得られたものということもあり、木片や漆喰片、釘などの混入物が見受けられるが、本研究においては家屋解体廃瓦による各種性能への影響を検討していくことから、これらの混入物については極力取り除くように努めた。家屋解体廃瓦の実用の際には、風選や磁選により、これら混入物の除去がなされる。

(2) 試験項目および方法

家屋解体廃瓦コンクリート用粗骨材として用いることを想定した家屋解体廃瓦（粒径 20~5mm）に対する試験項目は、ふるい分け試験、密度試験、吸水率試験、含水率の継時変化試験、実積率試験、粒状判定実積率試験、破碎試験、溶出試験およびアルカリシリカ反応性試験を実施した。

また、家屋解体廃瓦ポーラスコンクリート用粗骨材として用いることを想定した家屋解体廃瓦（粒径 13~5mm）に対しては、ふるいわけ試験（JIS A 1102）、密度試験（JIS A 1110）、吸水率試験（JIS A 1110）、含水率の継時変化試験、実積率試験（JIS A 1104）を実施した。

含水率の継時変化試験は、多孔質構造である家屋解体廃瓦の含水率が、浸漬時間の長短によりどのような違いがあるか把握することを目的に実施した。含水率の継時変化を把握することで、家屋解体廃瓦コンクリートおよびポーラスコンクリート製造において家屋解体廃瓦に施す表面噴霧処理の際の噴霧量を設定することを目的とした。試験は、家屋解体廃瓦を水（ $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）の中に浸漬させる時間を変化させることで、家屋解体廃瓦の含水率が浸漬時間とともにどのように変化していくか把握することおよび、家屋解体廃瓦ポーラスコンクリート製造時の表面噴霧処理における噴霧量の設定を目的とした。なお、含水率の計測は、JIS A 1110 に準拠して行った。

4. 1. 4 試験結果および考察

(1) コンクリート用骨材として用いる家屋解体廃瓦（粒径 20~5mm）

表 4-2 に試験結果一覧を示す。なお、比較のため既往の研究において得られている規格外品廃瓦の各種数値も併せて示す。

各試験結果より、家屋解体廃瓦は規格外品廃瓦とほぼ同様の物性であることが明らかとなった。ただし、吸水率および破砕値については規格外品廃瓦と比較して大きい値を示した。ここで写真 4-3 に家屋解体廃瓦および規格外品廃瓦の表面を走査型電子顕微鏡で撮影した画像（以下、SEM 像）を示す。両者の SEM 像を比較してみると、家屋解体廃瓦は、規格外品廃瓦と比較して、表面の所々に比較的大きな穴が開いていることが確認できる。これは、屋根瓦として利用されている間に水分が凍結するなどの経年劣化の影響を受け、瓦の細孔が大型化したことや、規格外品廃瓦は現在の発達した技術で製造された高品質な瓦であることから、製造された年代の異なる瓦の品質差によるものとも推察される。これらの要因により、家屋解体廃瓦の吸水率が規格外品廃瓦の吸水率よりも大きい値を示し、強度も低い（破砕値が大きい）値を示したと考えられる。つづいて表 4-3 に溶出試験結果を示す。全ての計量対象項目において基準値以下、もしくは未検出という結果が得られた。これにより、規格外品廃瓦と同様、家屋解体廃瓦を骨材として利用するについて環境面の問題は少ないと言える。また、アルカリシリカ反応性試験において、化学法（JIS A 1145）では「無害でない」との試験結果であったが、モルタルバー法（JIS A 1146）で確認した結果「無害」との評価が得られた。

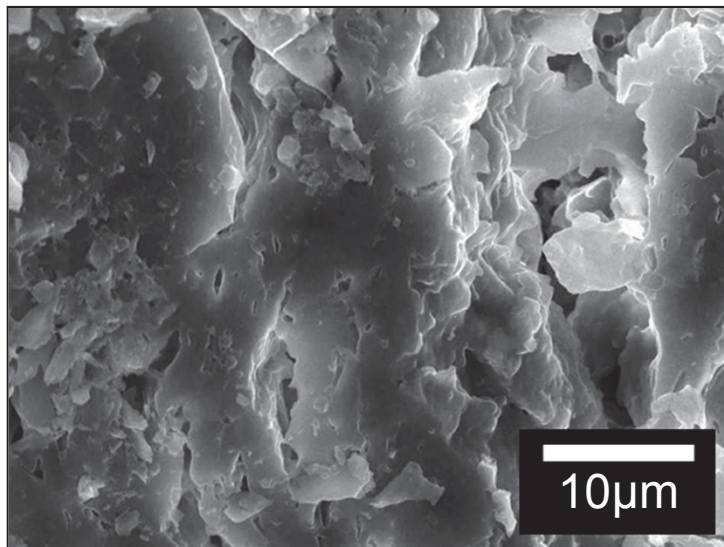
以上のことから、家屋解体廃瓦は規格外品廃瓦と同様に取り扱うことができるといえる。

(2) ポーラスコンクリート用骨材として用いる家屋解体廃瓦（粒径 13~5mm）

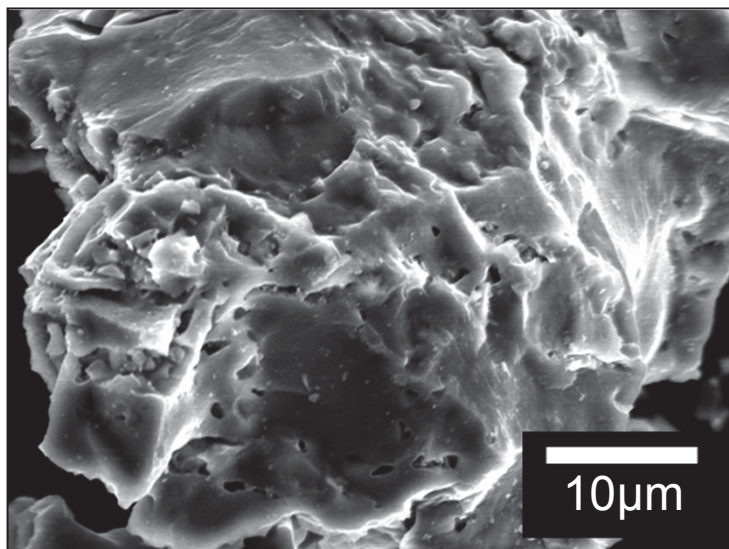
表 4-4 に試験結果一覧を示す。また比較対象として規格外品廃瓦の各種数値も併せ

表4-2 家屋解体廃瓦(粒径20~5mm)の物性試験結果

| | 粒径 (mm) | 表乾密度 (g/cm ³) | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 粗粒率 | 単位容積 質量 (kg/l) | 実績率 (%) | 粒形判定 実績率 (%) | 破砕値 (%) |
|------------|------------|------------------------------|------------------------------|------------|------|----------------------|------------|--------------------|------------|
| 家屋解体 廃瓦 | 20~5 | 2.21 | 2.03 | 9.16 | 6.76 | 1.20 | 59.3 | 58.6 | 25.82 |
| 規格外品 廃瓦 | 20~5 | 2.24 | 2.07 | 7.86 | 6.60 | 1.24 | 59.6 | 62.0 | 23.11 |



a) 家屋解体廃瓦



b) 規格外品廃瓦

写真4-3 廃瓦のSEM像

表4-3 溶出試験結果

| 項目 | 基準値 | 試験値 |
|-------|--------------------|--------------|
| カドミウム | 検液1ℓにつき 0.01mg以下 | 0.001mg/ℓ未満 |
| 鉛 | 検液1ℓにつき 0.01mg以下 | 0.005mg/ℓ未満 |
| 六価クロム | 検液1ℓにつき 0.05mg以下 | 0.01mg/ℓ未満 |
| 砒素 | 検液1ℓにつき 0.01mg以下 | 0.005mg/ℓ未満 |
| 総水銀 | 検液1ℓにつき 0.0005mg以下 | 0.0005mg/ℓ未満 |
| セレン | 検液1ℓにつき 0.01mg以下 | 0.002mg/ℓ未満 |
| ふっ素 | 検液1ℓにつき 0.8mg以下 | 0.12mg/ℓ |
| ほう素 | 検液1ℓにつき 1mg以下 | 0.33mg/ℓ |

表4-4 家屋解体廃瓦(粒径13~5mm)の物性試験結果

| | 粒径 (mm) | 表乾密度 (g/cm ³) | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 単位容積 質量 (kg/ℓ) | 実績率 (%) |
|--------------|------------|------------------------------|------------------------------|------------|----------------------|------------|
| 家屋解体廃瓦 | 13~5 | 2.21 | 2.03 | 11.17 | 1.20 | 57.9 |
| 6号 規格外品廃瓦 | 13~5 | 2.24 | 2.07 | 8.85 | 1.24 | 61.3 |
| 7号 規格外品廃瓦 | 5~2.5 | | | 10.18 | 1.24 | 60.1 |

て示す。表 4-4 より、家屋解体廃瓦は規格外品廃瓦と比較して同等な密度であることが明らかとなったが、吸水率については（1）と同様に家屋解体廃瓦の方が規格外品より大きい値を示した。図 4-1 に骨材の粒度分布を示す。これより、本研究において取り扱うポーラスコンクリート粗骨材用の家屋解体廃瓦は 6 号規格外品廃瓦に近い粒径であることが確認された。図 4-2 に含水率の経時変化試験結果を示す。図より、7 号規格外品廃瓦の方が 6 号規格外品廃瓦よりも大きい値を示すことが確認できるが、これは 7 号規格外品廃瓦の方が骨材粒径は小さく、表面積が大きいため水と触れやすいことから、吸水量が大きくなったと推察される。ここで、家屋解体廃瓦の含水率の経時変化に着目すると、家屋解体廃瓦の粒度分布は、先に述べたように 7 号規格外品廃瓦よりも 6 号規格外品廃瓦に近いにもかかわらず、7 号規格外品廃瓦と同等以上に含水率が上昇することが確認できる。これは（1）でも述べた通り、家屋解体廃瓦は経年劣化の影響を受け、瓦の細孔が大型化したことや、規格外品廃瓦は現在の発達した技術で製造された高品質な瓦であることから、製造された年代の異なる瓦の品質差によるものとも推察され、これらの要因により、家屋解体廃瓦の方が規格外品廃瓦よりも大きい値を示したと考えられる。なお、今回の含水率の経時変化試験結果より、練混ぜ時の表面噴霧処理において噴霧する水量は家屋解体廃瓦の質量比で 8.9%（7 号規格外品廃瓦：8.0%、6 号規格外品廃瓦：6.3%）とした。

4. 2 家屋解体廃瓦コンクリート

4. 2. 1 実験概要

家屋解体廃瓦をコンクリート用粗骨材として用いた場合、家屋解体廃瓦がコンクリートの物性にどのような影響を与えるか把握するために各種試験を実施した。ここでこれまでの研究において、廃瓦をコンクリート用粗骨材として利用することは、廃瓦の備える優れた吸・保水性能は、表面噴霧処理等の配慮をしなければ耐久性の低

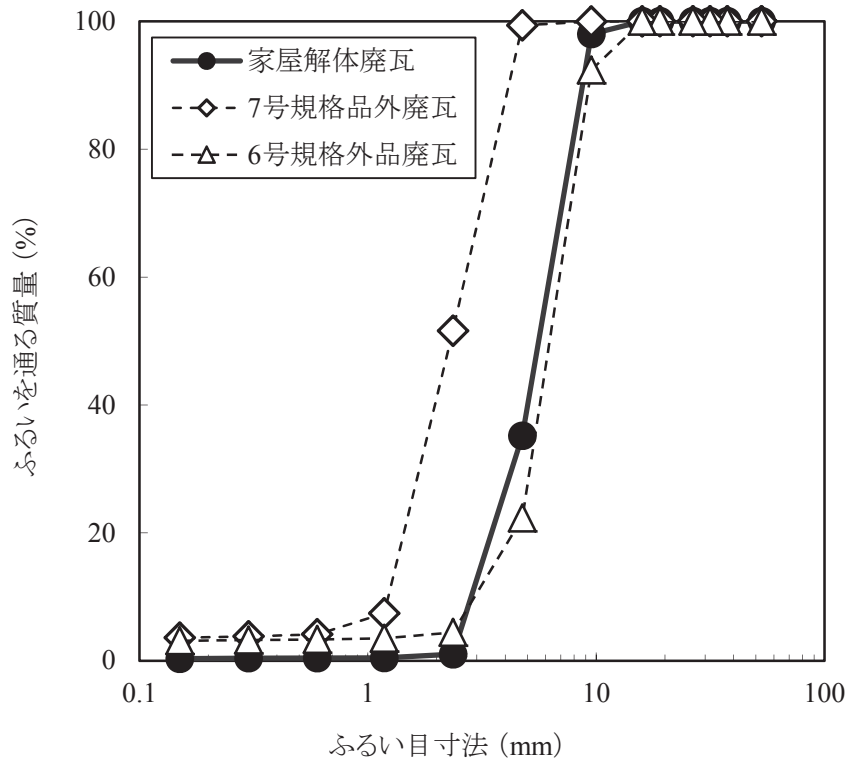


図4-1 廃瓦の粒度分布

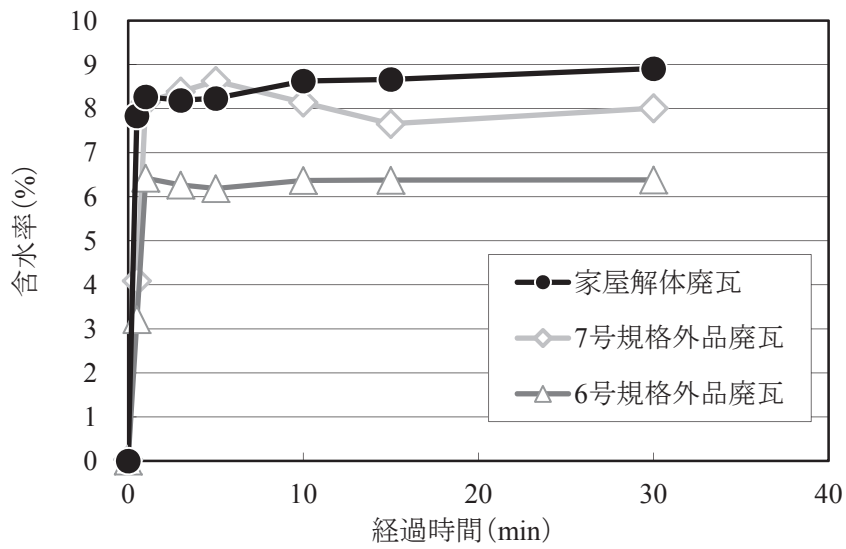


図4-2 廃瓦の含水率の継時変化

下など招くため、廃瓦の有効利用とは言い難いことから、廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材へ適用する研究へと変遷してきた。しかしながら、コンクリート用粗骨材として用いた場合に、規格外品廃瓦と比較してどのような違いがあるか確認することにより、家屋解体廃瓦の特徴をよりよく把握することが可能になると考えられることから、先ず家屋解体廃瓦を用いたコンクリートの製造および各種試験を実施した。なお比較対象には、既往の研究における規格外品廃瓦コンクリートにおける数値を用いることとした。

4. 2. 2 使用材料および配合設計

表 4-5 に使用材料を、表 4-6 に配合表を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材には砕石（瀬戸産）粗骨材には 4. 1 で試験対象とした家屋解体廃瓦（粒径 20~5mm）を用いた。また、施工性や耐久性の向上および、既往の研究との整合性を勘案して、JIS に準拠したフライアッシュⅡ種を使用した。なお、フレッシュ性状の制御を目的に、混和剤に高性能減水剤および AE 助剤を用いた。なお、比較対象については粗骨材以外は同じ材料を用いている。

各配合の単位水量を $175\text{kg}/\text{m}^3$ で一定とし、水セメント比を 45%、55% の 2 水準を設定した。また、目標スランプを $8\pm 2.5\text{cm}$ に、目標空気量を $4.5\pm 1.5\%$ に設定し、混和材の使用量は所定のフレッシュ性状が得られるように適宜調整した。各配合名は、家屋解体廃瓦を用いたコンクリートを「家屋解体」、規格外品廃瓦を用いたコンクリートを「規格外品」と表し、後ろに続く数字は各配合の水セメント比を表す。

4. 2. 3 試験項目

試験項目はフレッシュ性状試験として、スランプ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1118）および単位容積質量試験（JIS A 1116）、硬化性状試験として圧縮強度試験（JIS

表4-5 使用材料

| 材料 | 名称・規格 | 記号 | 物性値・諸元 |
|------|-----------------------------|----|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | C | 密度：3.16 g/cm ³ |
| 細骨材 | 砕砂（瀬戸産） | S | 表乾密度：2.67 g/cm ³ ，吸水率：1.24%， 粗粒率：2.77 |
| 粗骨材 | 家屋解体廃瓦粗骨材 | Bd | 表乾密度：2.21 g/cm ³ ，吸水率：9.16% 絶乾密度：2.03g/cm ³ ，破碎値：25.82% |
| | 規格外品廃瓦粗骨材 | Bs | 表乾密度：2.24 g/cm ³ ，吸水率：7.86% 絶乾密度：2.07g/cm ³ ，破碎値：23.11% |
| | 砕石2005（瀬戸産） | G | 表乾密度：2.72 g/cm ³ ，吸水率：0.53% 絶乾密度2.70g/cm ³ ，破碎値：7.31%，粗粒率：6.64 |
| 混和材 | フライアッシュ （JIS A 6201 II種） | FA | 密度：2.27 g/cm ³ |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤 | SP | ポリカルボン酸系 |
| | AE助剤 | AE | 高級脂肪酸塩および非イオン系 |

表4-6 配合表

| 配合名 | W/C (%) | s/a (%) | 単位容積質量(kg/m ³) | | | | | SP※ | AE※ |
|--------|------------|------------|----------------------------|-----|----|-----|-----|------|-------|
| | | | W | C | FA | S | B | | |
| 家屋解体45 | 45 | 48 | 175 | 389 | 58 | 809 | 666 | 1.00 | 0.010 |
| 家屋解体55 | 55 | | | 318 | 48 | 844 | 695 | 1.00 | 0.004 |
| 規格外品45 | 45 | | | 389 | 58 | 809 | 679 | 0.80 | 0.020 |
| 規格外品55 | 55 | | | 318 | 48 | 844 | 708 | 0.70 | 0.005 |

※：(C+FA)×(%)

A 1108)、静弾性係数試験 (JIS A 1149)、また耐久性試験として凍結融解試験 (JIS A 1148) および乾燥収縮試験 (JIS A 1129) とし、それぞれの JIS に準拠した方法で試験を実施した。

4. 2. 4 供試体作製方法

これまでにも述べてきたように、規格外品廃瓦は表乾状態で練り混ぜに用いると耐久性が低いということから、規格外品廃瓦コンクリート製造時には気乾状態の規格外品廃瓦に表面噴霧処理を施してから使用することとしている。これに倣い、家屋解体廃瓦においても表面噴霧処理を施して使用することとした。また、表面噴霧量は既往の研究を参考に、家屋解体廃瓦の質量比で 6.0%とした。なお、比較対象とする「規格外品」においても規格外品廃瓦に対する表面噴霧量は 6.0%である。

練り混ぜには公称容量 0.05m^3 のパン型強制練りミキサを用い、細骨材およびセメント、フライアッシュを投入し 30 秒間空練を行った。空練後、練混ぜ水 (混和剤含む) を投入し、さらに 30 秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入して 60 秒練り混ぜた。

練混ぜ終了後、コンクリートを練り板に排出し、均一な練混ぜ状態となるように切り返しを行い、直ちにフレッシュ試験を行った。そして、所定のフレッシュ性状が得られた場合は供試体を作製し、フレッシュ性状に難がある場合は混和剤の量を調整してやり直した。

圧縮強度および静弾性係数試験用には、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を各配合 12 体ずつ作製した。長さ変化試験用には $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体を各配合 3 体ずつ作製した。各供試体は脱型後、 20°C の恒温室で水中養生を行った。また、凍結融解試験用には供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体を配合「家屋解体 55」3 本作製した。「家屋解体 55」を対象とした理由は、水セメント比が高い方が凍結融解抵抗性は低いと考えられることから、水セメント比がより高い「家屋解体 55」を試験対象とした。

4. 2. 5 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表 4-7 に各フレッシュ性状試験結果を示す。目標スランプ $8\pm 2.5\text{cm}$ および目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$ の範囲内に収まったことから、家屋解体廃瓦コンクリートにおいても、規格外品廃瓦コンクリートと同様に、細骨材率や混和剤の調整により、フレッシュ性状の制御が可能であることが明らかとなった。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

図 4-3 に各配合の材齢 4 週および 13 週における圧縮強度と静弾性係数を示す。図より、家屋解体廃瓦コンクリートは規格外品廃瓦コンクリートと比較してそれぞれの材齢、水セメント比の違いにおいて若干小さい値を示すことが確認できた。これは、規格外品廃瓦と比較して家屋解体廃瓦の破砕値が大きいすなわち、骨材自体の強度が低いことが影響していると推察される。さらに、4. 1. 3 (1) で述べたように、家屋解体廃瓦には木片等の混入物があり、十分に除去しきれなかった可能性があることから、これらが強度低下の要因になったと考えられる。ただし、水セメント比と圧縮強度の関係性から、水セメント比が小さいほど圧縮強度が大きくなっていることから、一般的なコンクリート同様に水セメント比の操作により強度のコントロールができることが示唆された。静弾性係数については、材齢 4 週においては「家屋解体 55」が他と比較して若干小さい値を示したものの、そのほかは「規格外品」と比較して顕著な差は確認できなかった。

(3) 乾燥収縮特性

乾燥収縮試験における質量減少率を図 4-4 に、長さ変化を図 4-5 に示す。

図 4-4 より、質量減少率は試験開始直後から家屋解体 55の方が家屋解体 45よりも質量減少率が大きい傾向を示し、試験終了まで変化することはなかった。これは水セメント比がより大きな家屋解体 55の方が、家屋解体 45と比較して供試体内部に自由水

表4-7 フレッシュ性状試験結果

| 配合名 | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 単位容積重量 (kg/l) | 練温 (°C) |
|--------|--------------|------------|------------------|------------|
| 家屋解体45 | 8.5 | 5.6 | 2.097 | 29.3 |
| 家屋解体55 | 7.5 | 5.2 | 2.079 | 29.3 |

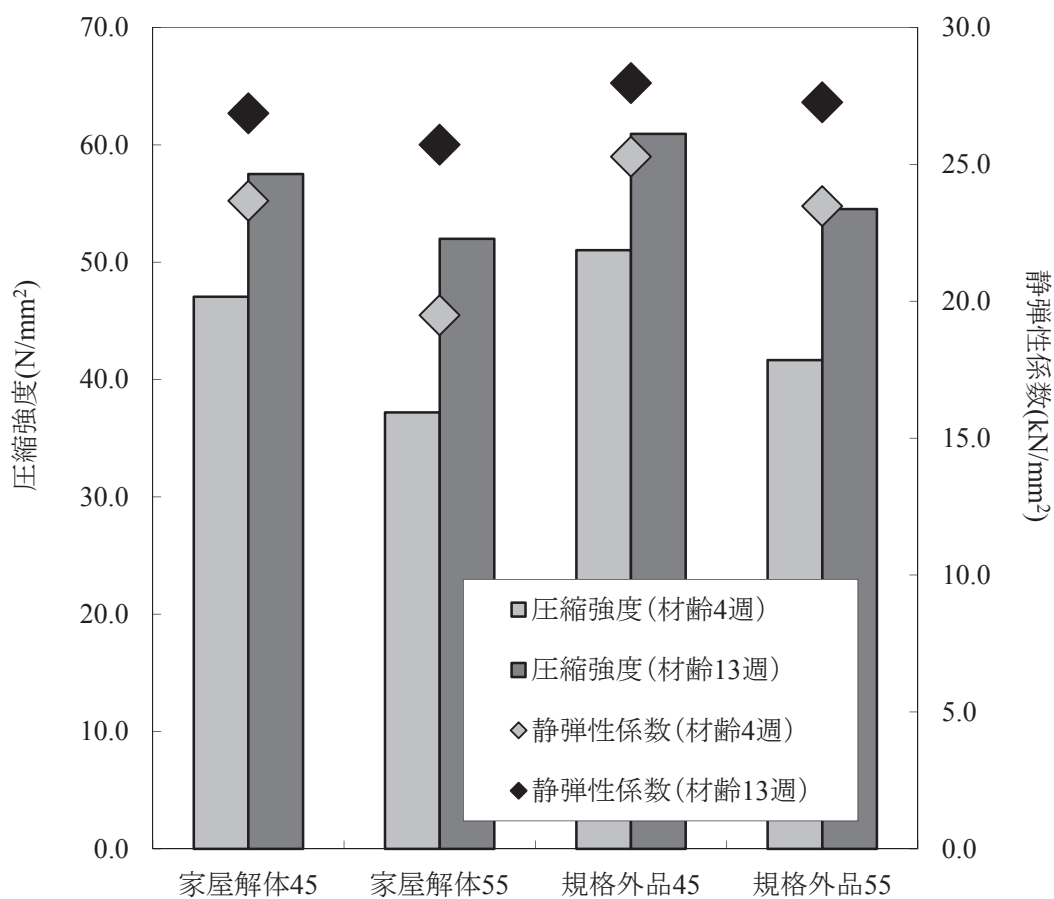


図4-3 圧縮強度と静弾性係数

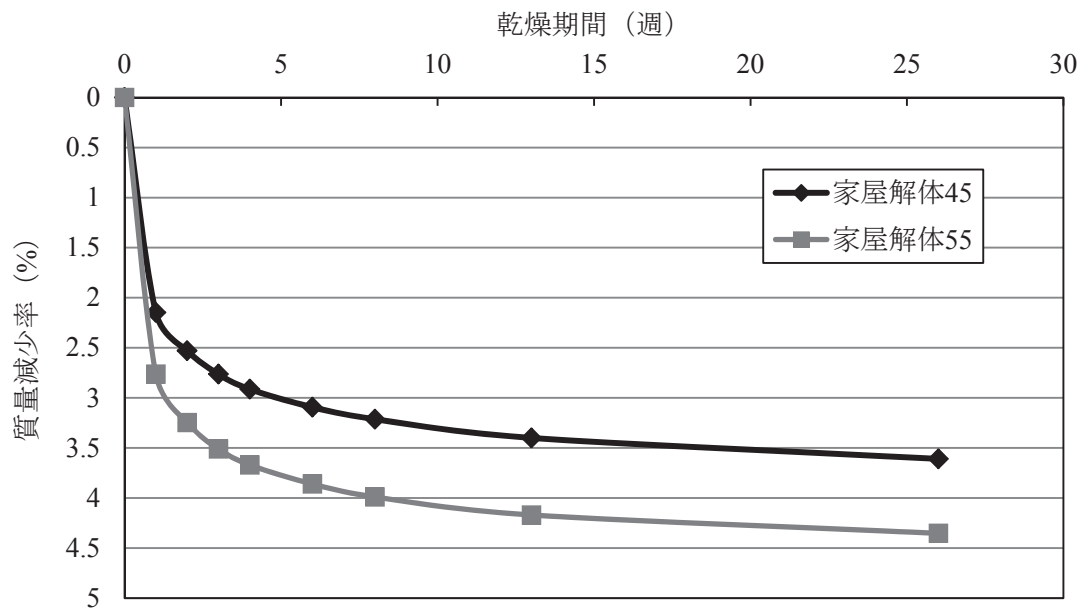


図4-4 質量減少率

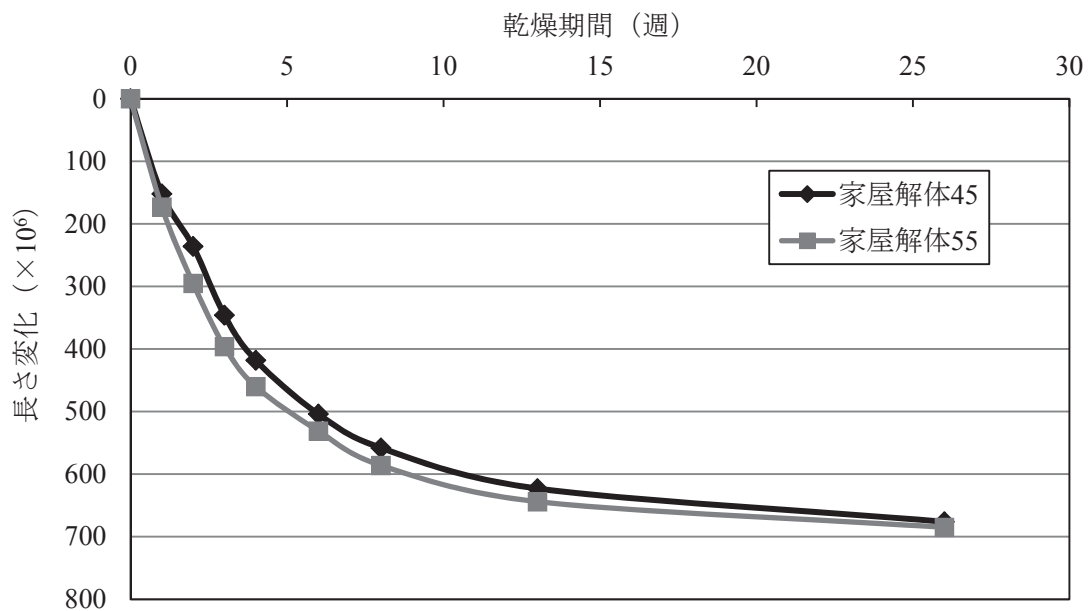


図4-5 長さ変化

がより多くあったためであると推察される。一方、図 4-5 より、長さ変化においては水セメント比の違いによる顕著な差は確認できなかった。また、長さ変化の収束は 700×10^{-6} 程度と予測される。ここで、示方書³⁾では、乾燥収縮ひずみの限界値を $500 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$ と定めている。今回の試験においては、コンクリートの限界値内に収まるかどうか判断できなかったため、乾燥収縮試験については今後も継続していく必要があるといえる。

(4) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験における相対動弾性係数を図 4-6 に、質量変化率を図 4-7 に示す。試験終了時の相対動弾性係数は 69% であり、示方書⁴⁾に定められる下限値である 60% を下回ることはなかった。試験後の供試体は、各所にスケーリングやポップアウト等が確認されたが、質量が増加に転じることはなかったことから、致命的な大きなひび割れは発生しなかったものと考えられる。ここで、既往の研究⁵⁾においては試験終了時においても相対動弾性係数が 90% 以上を維持していることが確認されているが、これは既往の研究において試験に用いた配合が水セメント比 40% のものであったことから、コンクリート供試体内部の自由水が家屋解体⁵⁵と比較して少ないことによると考えられる。したがって、寒冷地で家屋解体廃瓦コンクリートを施工する場合には、水セメント比を 40% 程度に設定すれば、厳しい寒さの中でも高い凍結融解抵抗性を備えるコンクリートが製造できるといえよう。

以上の結果より、家屋解体廃瓦をコンクリート用粗骨材として用いた場合、規格外品廃瓦と比較して、若干強度は低下することが確認された。耐久性についても今後のさらなる検討が必要である。しかしながら、本研究においては、家屋解体廃瓦の有効利用を目的のひとつとしており、用途先にポーラスコンクリートを想定していることから、家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートの各種物性の把握を進めた。

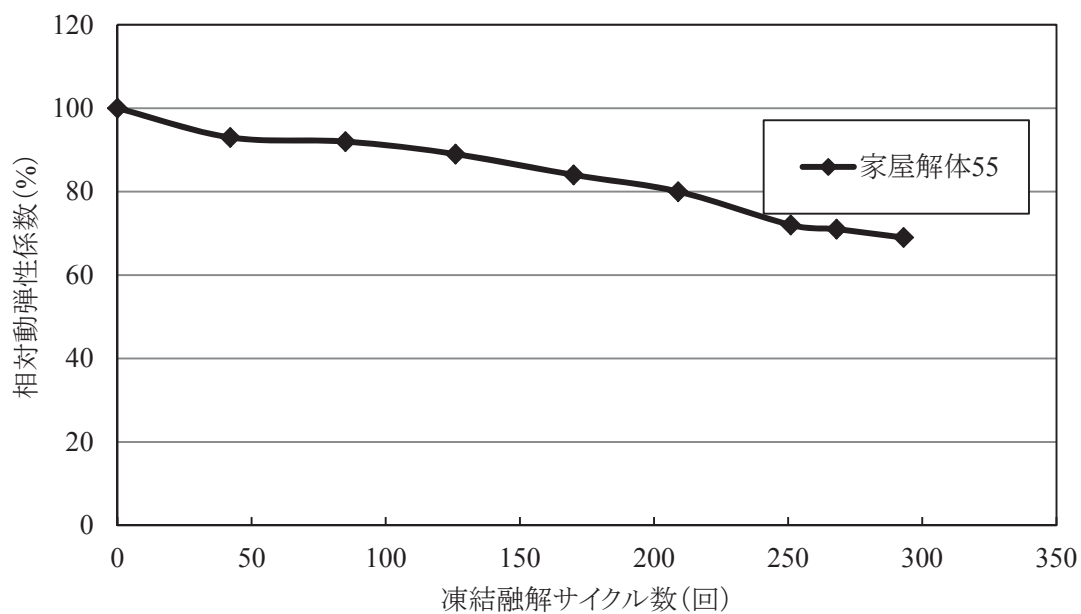


図4-6 相対動弾性係数

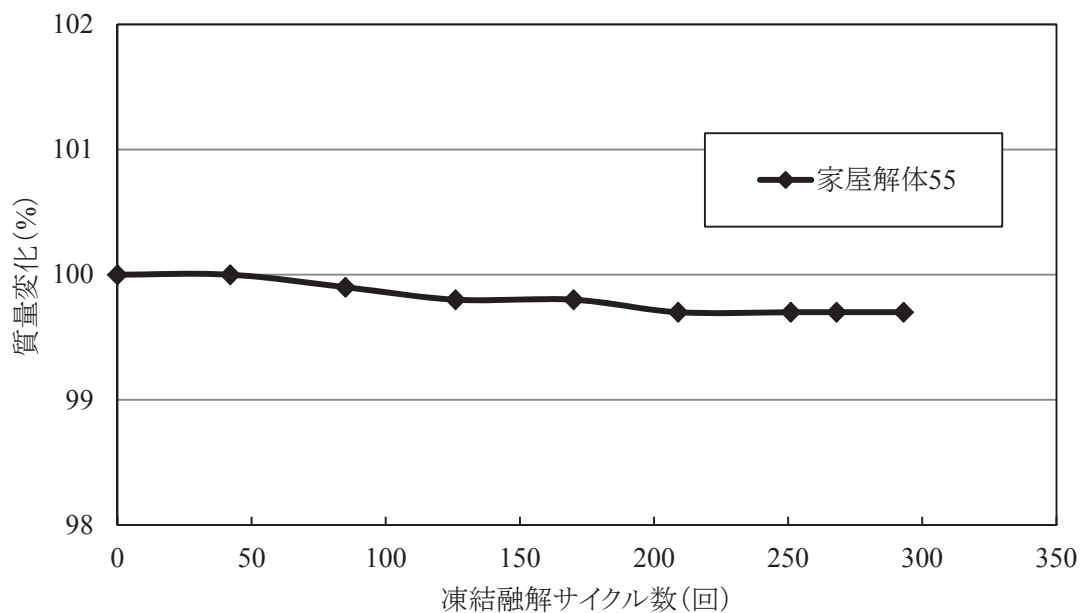


図4-7 質量変化

4. 3 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリート

4. 3. 1 実験概要

これまでに家屋解体廃瓦は規格外品廃瓦とほぼ同様に扱うことが可能であることが明らかとされてきた。そこで本節では、家屋解体廃瓦の特徴を生かせる用途先として、規格外品廃瓦と同じくポーラスコンクリート用粗骨材を想定し、家屋解体廃瓦がポーラスコンクリートの基本的な物性に与える影響の把握を目的として各種試験を実施した。なお比較対象には、規格外品廃瓦および砕石を用いたポーラスコンクリートを用いた。

4. 3. 2 使用材料および配合設計

表 4-8 に使用材料を、配合表を表 4-9 に示す。家屋解体廃瓦の比較対象には、第 3 章と同じ規格外品廃瓦および道路用単粒度砕石 (JIS A 5001) を用いた。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、結合材のダレ落ち防止を目的に、細骨材として砕砂を所定の容積割合で用いるとともに、フレッシュ性状の制御を目的に、混和剤に高性能 AE 減水剤を用いた。配合設計は第 3 章と同様に、委員会報告⁶⁾を参考に行った。設計空隙率を 20%、水セメント比を 23%、および細骨材モルタル容積比 (s/m) を 20% とし、補正係数は規格外品廃瓦および砕石については第 3 章により得られた値を用いることとし、家屋解体廃瓦については予備実験により求め 0.92 とした。

4. 3. 3 試験項目

試験項目は、空隙率試験 (JCI-SPO2-1)、透水試験 (JCI-SPO3-1)、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、曲げ強度試験 (JIS A 1106) とした。

さらに、家屋解体廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材として用いることによるポーラスコンクリートの吸水性能に与える影響の把握を目的に、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の供試

表4-8 使用材料

| 材料 | 名称・規格 | 記号 | 物性値・諸元 |
|------|--------------------------|----|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | C | 密度：3.16 g/cm ³ |
| 細骨材 | 砕砂（瀬戸産） | S | 表乾密度：2.67 g/cm ³ ，吸水率：1.24%，粗粒率：2.77 |
| 粗骨材 | 家屋解体廃瓦 | Bd | 粒度範囲：13～5 mm，実積率：57.9% 表乾密度：2.21 g/cm ³ ，気乾密度：2.03 g/cm ³ 吸水率：11.17%，破砕値：25.82% |
| | 7号規格外品廃瓦 | Bs | 粒度範囲：5～2 mm，実積率：60.1% 表乾密度：2.24 g/cm ³ ，気乾密度：2.07 g/cm ³ 吸水率：7.86%，破砕値：23.11% |
| | 6号規格外品廃瓦 | | 粒度範囲：13～5 mm，実積率：61.3% 表乾密度：2.24 g/cm ³ ，気乾密度：2.07 g/cm ³ 吸水率：7.86%，破砕値：23.11% |
| | 7号砕石 （瀬戸産・JIS A 5001） | G | 粒度範囲：5～2.5 mm，実積率：55.5% 表乾密度：2.69 g/cm ³ ，絶乾密度：2.67 g/cm ³ 吸水率：0.88%，破砕値：7.31% |
| | 6号砕石 （瀬戸産・JIS A 5001） | | 粒度範囲：5～2.5 mm，実積率：59.9% 表乾密度：2.65 g/cm ³ ，絶乾密度：2.63 g/cm ³ 吸水率：0.66%，破砕値：7.31% |
| 混和剤 | 高性能AE減水剤 | SP | ポリカルボン酸系 |

表4-9 配合表

| 配合名 | 補正係数 | W/C (%) | s/m (%) | W | C | S | Bd | Bs | G | SP※ | |
|--------|------|---------|---------|----------------------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|
| | | | | (kg/m ³) | | | | | | | |
| BdPOC | 0.92 | 23 | 20 | 94 | 408 | 149 | 1079 | - | - | 1.2 | |
| 7BsPOC | 0.91 | | | 85 | 371 | 135 | - | 1132 | | - | 1.2 |
| 6BsPOC | 0.87 | | | 90 | 390 | 142 | | 1104 | | | 1.2 |
| 7GPOC | 0.92 | | | 97 | 424 | 155 | - | - | 1374 | 0.8 | |
| 6GPOC | 0.85 | | | 98 | 426 | 155 | | | 1370 | 0.8 | |

※ C × (%)

体を用いて、ポーラスコンクリートの含水率試験を JIS A 1125 に準拠して実施した。なお、ポーラスコンクリート供試体は、廃瓦が飽和状態になるまで水に浸漬させた後、空隙内の水抜きを目的に、24 時間恒温室（ $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）内で表面の乾燥対策を施し気中保管したものをを用いた。

4. 3. 4 供試体作製方法

練混ぜには公称容量 0.06 m^3 の水平 2 軸型強制練りミキサを用いた。ミキサにセメント、粗骨材および細骨材を投入して空練をした後、練混ぜ水（混和剤含む）を投入し練り混ぜた。なお、廃瓦を用いたポーラスコンクリートを製造する場合には、まず廃瓦を全量ミキサに投入し、所定量の表面噴霧処理を施した後、すぐさま練混ぜに用いた。表面噴霧処理は、強制練りミキサ内に廃瓦を投入後、ミキサを作動させながら電動噴霧器により廃瓦全体に均等に水が掛かるように噴霧した。噴霧時間は、電動噴霧器の時間当たりの噴霧量を基に、廃瓦の種類と練混ぜ量に応じて算出した。

練混ぜ後ミキサから排出し切返しを行った後、フレッシュ性状判定試験を実施して製造したポーラスコンクリートのフレッシュ性状を確認し、供試体作製可と判断された場合、供試体を作製した。

供試体の締固めは、表面振動機（振動数 160Hz 、振幅 0.8mm ）を用いて実施し、供試体に収まるべき質量を計量し、2 層に分けて型枠に詰めた。なお、供試体は各配合において $\phi 100\times 200\text{mm}$ （円柱供試体）を 5 体、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ （角柱供試体）を 3 体ずつ作製した。円柱供試体については、5 体全てに対して空隙率試験および透水試験を行った後、5 体中 3 体に対して材齢 28 日において圧縮強度試験を行い、他の 2 体に対しては含水率試験を行った。また、角柱供試体については、材齢 28 日において曲げ強度試験を行った後、2 つに破断された供試体に対して空隙率試験を行い、その平均をそれぞれの角柱供試体の空隙率とした。

4. 3. 5 試験結果および考察

(1) 連続空隙率と透水係数

図 4-8 に連続空隙率と透水係数の関係を示す。一般的には、連続空隙率が大きくなるほど透水係数が大きくなる傾向があることが知られている。しかし図において、連続空隙率にばらつきが生じた 7BsPOC ではその傾向が明確に現れたが、他のポーラスコンクリートでは対象となる供試体の空隙率のばらつきが小さいため、明確な傾向は確認できなかった。

骨材粒径に着目すると、粒径の小さな 7BsPOC および 7GPOC と比較して、粒径の大きな 6BsPOC および 6GPOC の方が、同程度の空隙率においてより大きな透水係数を示すことが確認できる。また、BdPOC は、6BsPOC とほぼ同様の傾向を示しており、これは家屋解体廃瓦が 6号規格外品廃瓦に近い粒度分布であることから、ポーラスコンクリート供試体の内部も似たような構造となっているためと推察される。また、家屋解体廃瓦の実積率は 57.9%と他の骨材と比較して比較的小さいことから、空隙の径が大きくなったことも透水係数が大きな値を示した要因として推察される。

なお、試験結果より、BdPOC は、透水性舗装における透水係数の下限値⁷⁾である 0.01 cm/s を十分に満たしていることから、透水性能からみて、今回製造したポーラスコンクリートは透水性舗装材料として用いることに問題はないことが明らかとなった。

(2) 全空隙率と強度

a) 圧縮強度

図 4-9 に全空隙率と圧縮強度の関係を示す。図 4-8 の結果と同様に、全空隙率にばらつきが生じた 7BsPOC では、全空隙率が大きくなるに従い圧縮強度が小さくなる一般的な傾向が確認されるが、他のポーラスコンクリートでは、対象となる供試体の空隙率のばらつきが小さいため明確な傾向は確認できなかった。

砕石ポーラスコンクリートに着目してみると、骨材粒径が大きい 6GPOC の方が

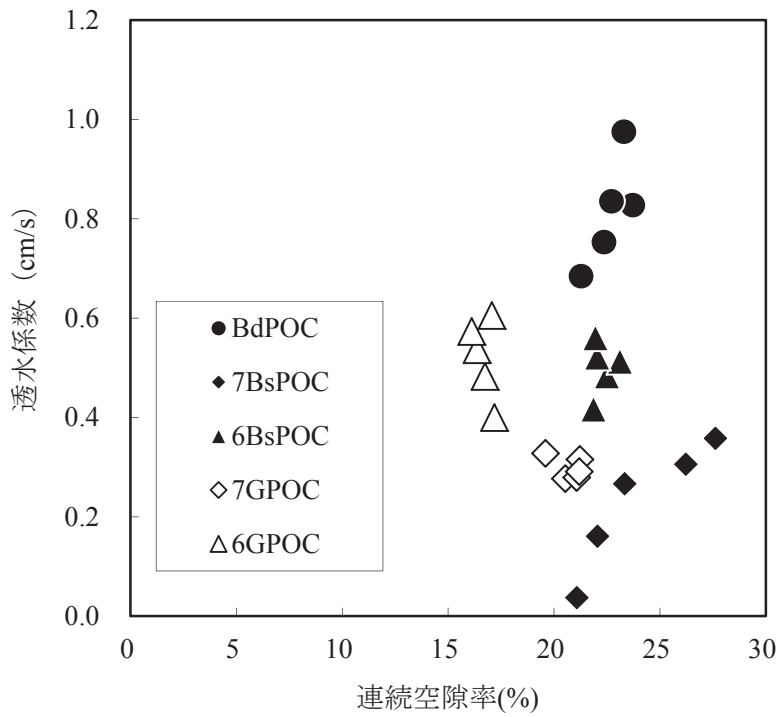


図4-8 連続空隙率と透水係数

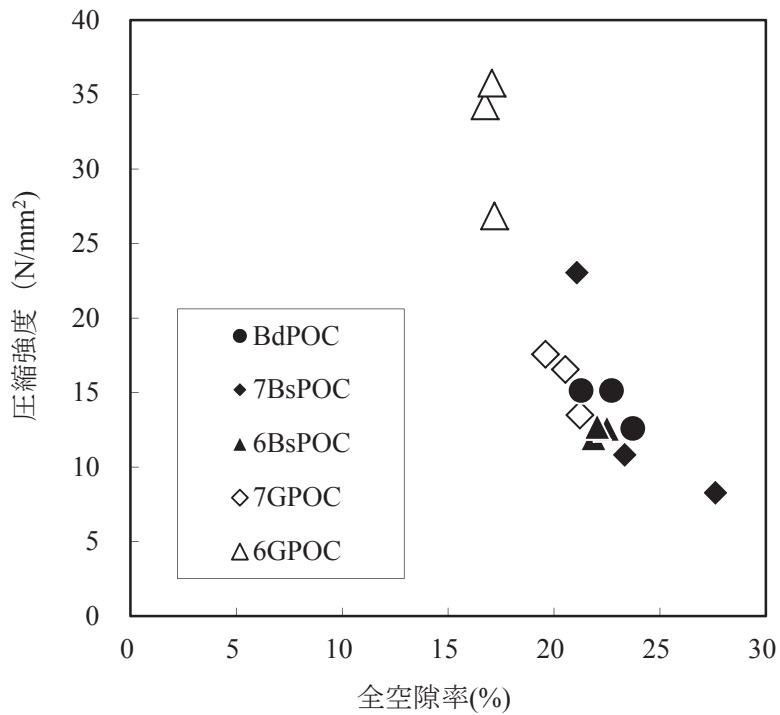


図4-9 全空隙率と圧縮強度

7GPOC よりも大きな値をとる傾向が確認できる。これは、骨材粒径が大きい分、骨材周囲のモルタル厚が増し、これにより圧縮強度が増したと推察される。

一方、規格外品廃瓦ポーラスコンクリートに着目してみると、粗骨材粒径に関わらずほぼ同程度の値をとることが確認できる。ここで、破断面を観察したところ、GPOC 供試体の破断面には結合材破壊や粗骨材と結合材間の界面破壊のみが確認されたのに対し、BdPOC および BsPOC 供試体の破断面を観察すると、廃瓦自体が破壊される骨材破壊が顕著に確認できた。これにより、BdPOC においても結合材や界面の破壊よりも粗骨材破壊が先行して発生することが確認できた。これは家屋解体廃瓦の破砕値が 25.82%と、規格外品廃瓦（23.11%）と同様に碎石の破砕値（7.31%）の 3 倍以上の値であり、家屋解体廃瓦の強度が碎石の強度よりも低いことが要因である。従って、家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートの圧縮強度についても、碎石ポーラスコンクリートに確認されたような粗骨材表面の結合材強度よりも、粗骨材（家屋解体廃瓦）の強度に支配されているといえる。

b) 曲げ強度

図 4-10 に全空隙率と圧縮強度の関係を示す。これより、骨材の種類に関係なく全空隙率が大きくなるほど曲げ強度は小さくなるという一般的な傾向が確認された。また、曲げ強度試験後の供試体破断面においても廃瓦の破壊が顕著に確認できたことから、廃瓦ポーラスコンクリートの曲げ強度を支配する要因も圧縮強度の場合と同様に、廃瓦の強度であるといえる。なお、歩道用舗装の設計曲げ強度 $2.5\sim 3.5\text{N/mm}^2$ 以上⁷⁾を満たしていることから、BdPOC は、強度面からみて歩道用舗装材料として問題ないことが明らかとなった。

(3) ポーラスコンクリートの吸水性能

表 4-10 にそれぞれの配合別の含水率を、図 4-11 に各配合の単位体積当たりの吸水量を示す。これより、BdPOC が単位体積あたりに吸水できる量は、BsPOC の約 1.3 倍、

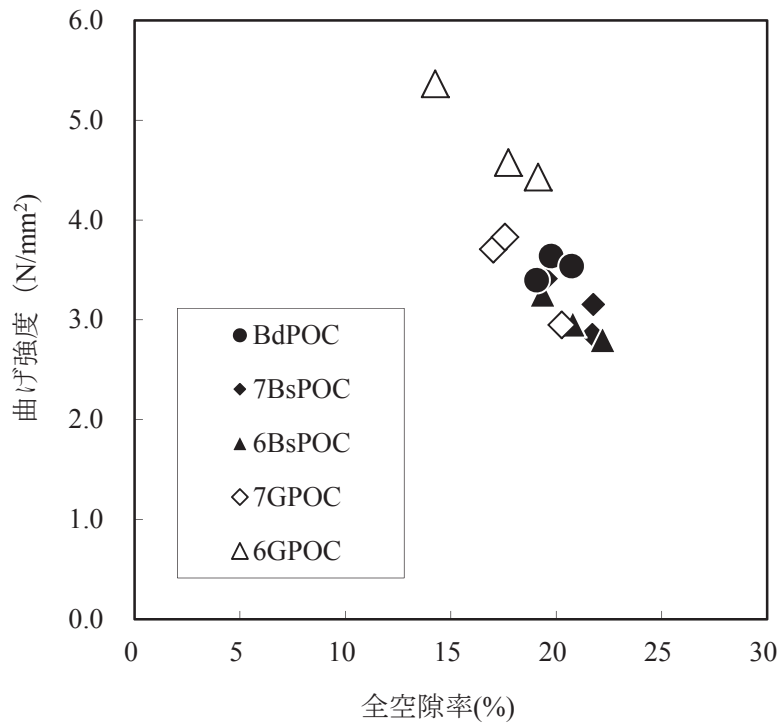


図4-10 全空隙率と曲げ強度

表4-10 ポーラスコンクリートの飽和時含水率

| 配合名 | 含水率(%) |
|--------|--------|
| BdPOC | 10.7 |
| 7BsPOC | 8.4 |
| 6BsPOC | 7.8 |
| 7GPOC | 4.7 |
| 6GPOC | 3.5 |

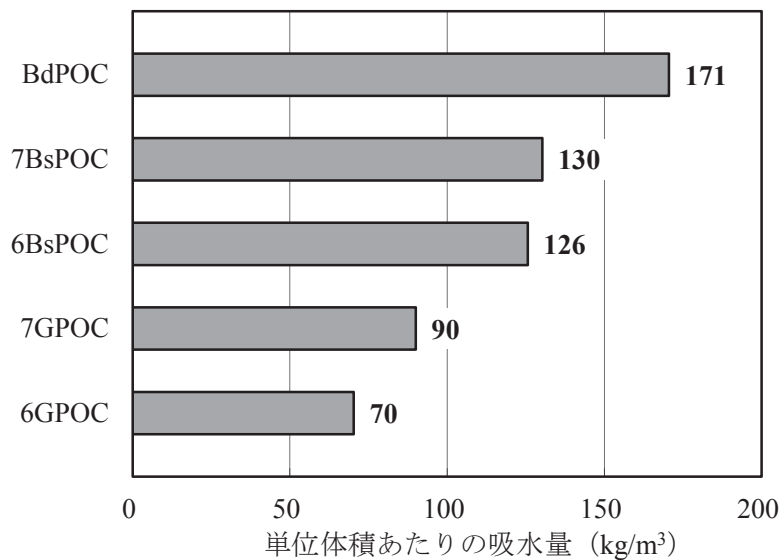


図4-11 各配合における単位体積当たりの吸水量

GPOC の約 2~2.5 倍多く、BdPOC は優れた吸水性能を備えることが明らかとなった。

これは、ポーラスコンクリートの吸水量と廃瓦の吸水率では吸水条件の差異（飽和状態と 24 時間吸水）から単純に比較することはできないが、家屋解体廃瓦と規格外品廃瓦の吸水率の差が一因として挙げられる。さらには、単位モルタル量の違いなども考えられるが、今回の試験結果からは明らかにすることはできなかった。

これより、BdPOC を舗装材料として適用した場合、降雨や打ち水等で給水された際、より多くの水を内部に吸収することが可能であり、ヒートアイランド現象等の対策となる温度上昇抑制効果の向上が可能となることが期待される。

また試験結果より、今回対象としたポーラスコンクリートを 10cm 厚の舗装材料に用いたとすると、その最大保水量（吸水量と空隙量の合計）はそれぞれ BdPOC : 40kg/m²、7BsPOC : 37 kg/m²、6BsPOC : 35 kg/m²、7GPOC : 29 kg/m²、6GPOC : 23 kg/m² となり、近年頻繁に発生しているゲリラ豪雨等の浸水被害に対して、廃瓦ポーラスコンクリート舗装は遊水地の役割を果たし、減災効果にも大きく役立つといえよう。

4. 4 まとめ

- (1) 家屋解体廃瓦は吸水率が規格外品廃瓦と比較して大きいことが明らかとなった。この要因として、経年劣化による影響や、瓦製造当時の製造技術の差によるものと推察される。
- (2) 家屋解体廃瓦を用いたコンクリートは、家屋解体廃瓦自体の強度および混入物等の影響により、規格外品廃瓦を用いたコンクリートと比較して強度が若干低下する。
- (3) 家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートは、透水性舗装における透水係数の下限値（0.01 cm/s）を満たしていることから、透水性能からみて透水性舗装用材料として用いて問題ない。

(4) 家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートは、歩道用舗装の設計曲げ強度 (2.5~3.5 N/mm²) を満たしていることから、強度面からみて歩道用舗装材料として用いて問題ない。

(5) 家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリート用粗骨材として用いることにより、ポーラスコンクリートの吸水性能が向上する。

以上が家屋解体廃瓦、家屋解体廃瓦コンクリートおよび家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートの基本的物性である。これより、家屋解体廃瓦の特徴をより発揮できると考えられるポーラスコンクリートへの適用については、強度面からの制約は受けるものの、大負荷のかからない歩道舗装等であれば適用可能であると判断できる。さらに第5章において、家屋解体廃瓦の特徴である優れた吸・保水性能が、ポーラスコンクリートに期待される機能の一つである温熱特性、特に温度上昇の抑制にどのように影響を与えるか把握することを目的に、実際に屋外環境下において温度計測試験を実施した。

〈参考文献〉

- [1] 経済産業省：工業統計表
- [2] 国土交通省：建築統計（新築住宅着工数）
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕、pp.54、2002
- [4] 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp.123～124、2007
- [5] 天野佑樹、上原匠、梅原秀哲、武長祐樹：三州瓦廃材のコンクリートへの有効利用、コンクリート工学論文集、Vol.21、No.2、pp.1-11、2010
- [6] 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書、2003.5
- [7] 社団法人日本道路協会：舗装施工便覧、2006

第 5 章

廃瓦ポーラスコンクリート の温熱特性

第5章 廃瓦ポーラスコンクリートの温熱特性

5.1 実験概要

前章までに、規格外品および家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートの基本的な物性を把握してきた。その結果、標準的な骨材を用いたポーラスコンクリートと比較して強度が若干低下するものの、良好な透水性能の確保および、空隙率の制御が可能であることを明らかにした。またポーラスコンクリート用粗骨材に廃瓦を用いることで、ポーラスコンクリートの吸水性能が向上することも明らかとした。このことから、廃瓦の影響により、ポーラスコンクリートの温度上昇が抑制されると期待される。そこで本章では、ポーラスコンクリートの温熱特性について検討することとした。試験は供試体温度を計測することにより、粗骨材種類がポーラスコンクリートの温度変化にどのような影響を与えるか把握することを目的に屋外環境下での試験(以下、屋外試験)を実施した。

屋外試験は、規格外品廃瓦ポーラスコンクリート(以下、BsPOC)、家屋解体廃瓦ポーラスコンクリート(以下、BdPOC)および砕石ポーラスコンクリート(以下、GPOC)により作製した $300\times 300\times 100\text{mm}$ の平板供試体を用いて実施した。まず、平板供試体を1枚で屋外試験を行い、各供試体の温度変化を観測することにより、廃瓦がポーラスコンクリートの温熱性能に与える影響の把握を試みた。ここで平板供試体を1枚としたのは、1枚単位で試験に用いると、その温度変化に必要な熱量は小さくなり、よりその温熱特性の傾向が把握しやすくなると考えられたからである。1枚単位での試験により大まかな傾向を把握できた後に、平板供試体を9枚用いてより大きな平板供試体を作製し、屋外試験に用いた。そして平板供試体表面に水を散布することで給水し、各種ポーラスコンクリートの温度変化を観測した。なお、平板供試体を9枚用いた屋外試験は、試験設備の関係上、BdPOCおよび6GPOCを対象に実施した。以上の

ような屋外試験を実施することで、家屋解体廃瓦および規格外品廃瓦の粗骨材への利用、ポーラスコンクリートの温熱特性に与える影響の把握を試みた。

5. 1. 1 屋外試験環境

写真 5-1 に屋外試験場の様子を示す。試験場所には周囲に日射を遮る要因のない場所を選定した。平板供試体の温度および気温の計測には先端を溶接した T 型熱電対を用い、データロガーにより一定時間間隔で各値を記録した。気温測定用の熱電対は、直接日射が当たらない且つ、空気の滞留が生じないような構造の容器に入れ、屋上床面から約 1.2m の高さに設置した。また、試験場への日射量および降水量を計測することを目的に、全天日射量計および雨量計を試験場内に設置した。試験は 2011 年 10 月から 2012 年 11 月現在まで継続的に実施し、考察対象として挙げた項目について適合する期間のデータを抽出した。

5. 1. 2 平板供試体作製方法

練混ぜには公称容量 0.06 m^3 の水平 2 軸型強制練りミキサを用いた。ミキサにセメント、粗骨材および細骨材を投入して空練をした後、練混ぜ水（混和剤含む）を投入し練り混ぜた。なお、廃瓦を用いたポーラスコンクリートを製造する場合には、まず廃瓦を全量ミキサに投入し、所定量の表面噴霧処理を施した後、すぐさま練混ぜに用いた。表面噴霧処理は、強制練りミキサ内に廃瓦を投入後、ミキサを作動させながら電動噴霧器により廃瓦全体に均等に水が掛かるように噴霧した。噴霧時間は、電動噴霧器の時間当たりの噴霧量を基に、廃瓦の種類と練混ぜ量に応じて算出した。練混ぜ後ミキサから排出し切返しを行った後、フレッシュ性状判定試験を実施して製造したポーラスコンクリートのフレッシュ性状を確認し、供試体作製可と判断された場合、供試体を作製した。図 5-1 に屋外試験に用いる平板供試体の概要を示す。供試体の縮



写真5-1 屋外試験の様子

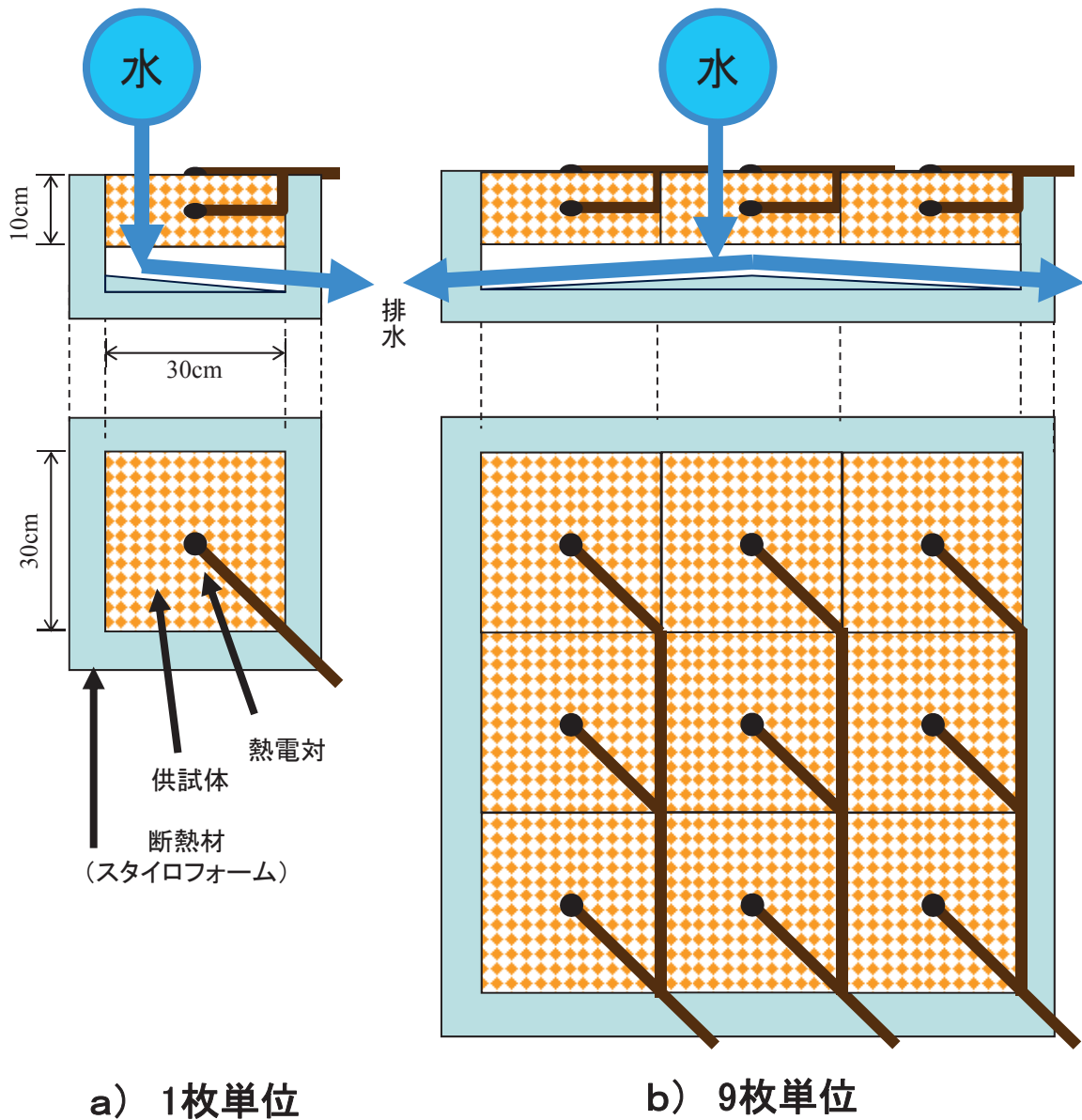


図5-1 試験時の供試体の概要

固めは、表面振動機（振動数 160Hz、振幅 0.8mm）を用いて実施し、供試体に収まるべき質量を計量して、2層に分けて型枠に詰めた。ここで下層を締固めた後、屋外試験で供試体中心部の温度を測定するために先端を溶接した T 型熱電対を設置し、上層分を流し込み締め固めた。硬化後、供試体表面中央には先端を溶接した T 型熱電対をセメントペーストで貼り付けた。また、平板供試体と外気との熱のやり取りを平板供試体上面から制限することを目的に、平板供試体上面以外は断熱材（スタイロフォーム）で覆った。ただし、底面については降雨等で平板供試体に与えられた水が留まらないように傾斜をつけて排水できる構造とした。また、比較対象として普通コンクリート（以下、NC）（設計基準強度：24N/mm²、粗骨材最大寸法：20mm）による平板供試体も作製し、屋外試験に用いた。なお、普通コンクリートの平板供試体についても供試体温度を測定するために、平板供試体中心および供試体表面中央に T 型熱電対を設置した。

5. 2 晴天時における廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化

5. 2. 1 試験条件

晴天時の温度変動の考察対象は、2012年7月23日～28日の6日間とした。屋外試験場に設置された雨量計において降水は確認されておらず、また気象庁による統計においても、名古屋地方気象台における降水量は観測されていない。図 5-2 に考察対象期間における試験場における気温および日射量を示す。また、参考として図 5-3 に気象庁の統計による名古屋地方気象台における各種気象データを示す。期間中の試験場における最高気温は 41.9℃（気象庁統計：36.9℃）であった。

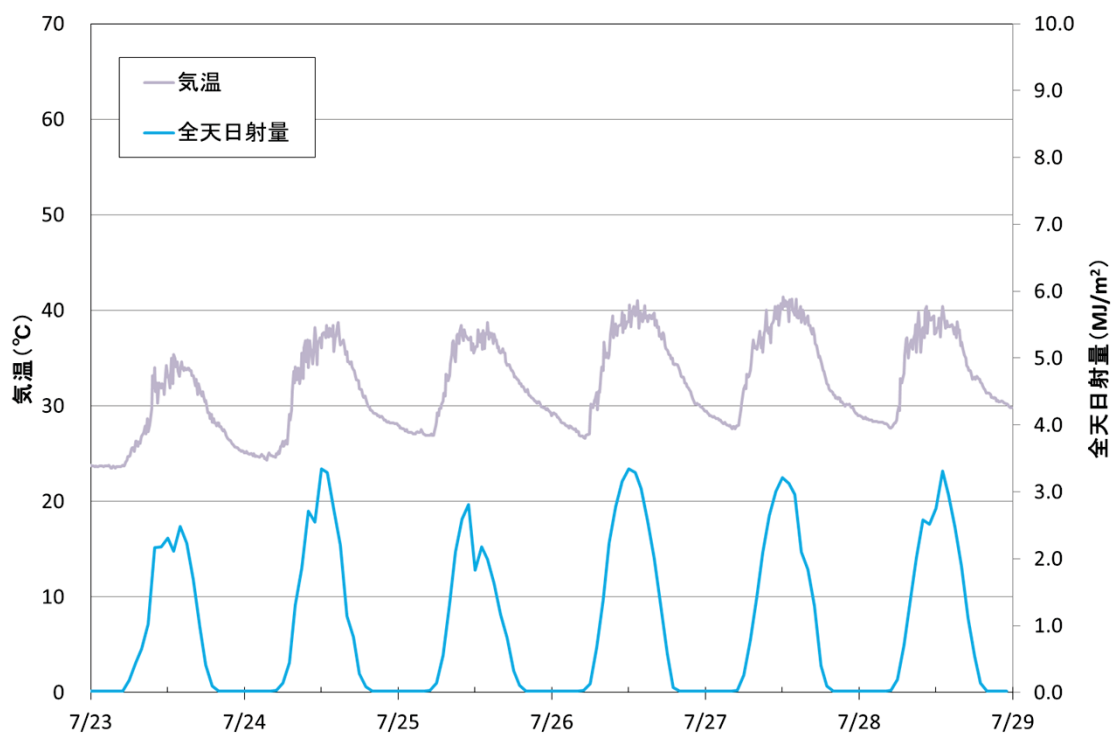
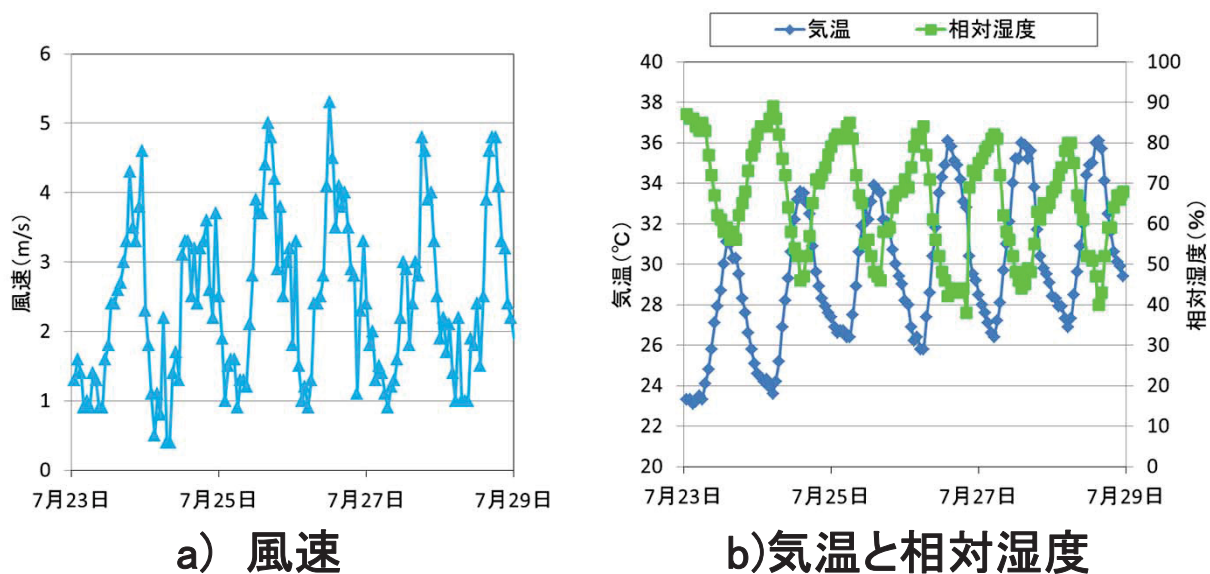


図5-2 試験期間中の気象条件(試験場所)



a) 風速

b) 気温と相対湿度

図5-3 試験期間中の気象条件(気象庁データ)

5. 2. 2 試験結果および考察

(1) 表面温度

図 5-4 に各供試体の表面温度変化を示す。表面温度と全天日射量を比較すると、表面温度の変動は、全天日射量の変動に非常によく対応しており、表面温度の変動には日射が大きく影響を与えることが確認できた。ここで特に気温が高かった 7 月 26 日および 7 月 27 日に注目する。図 5-5 に 7 月 26~27 日の表面温度の変化を示す。日の出後、供試体が日射を受けると、表面温度は気温とともに上昇し始めた。その後、全天日射量がピークを迎えたのち、表面温度は下降し始めた。各平板供試体表面温度の変動の様子から、温度上昇および下降時におけるグラフの傾きを比較すると、 $BdPOC > 6BsPOC \approx 7BsPOC > 7GPOC \approx 6GPOC > NC$ という順になった。グラフの傾きが大きいということは、熱しやすく冷めやすいということを表しており、廃瓦ポーラスコンクリートは砕石ポーラスコンクリートと比較して、ポーラスコンクリートは普通コンクリートと比較して熱しやすく冷めやすい特性があることが明らかとなった。この熱しやすく冷めやすいという性質には、容積比熱が関係していると考えられる。容積比熱とは、「単位体積あたりの物体の温度を 1°C 上昇させるのに必要な熱量」のことであり、単位は例えば $\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ で表される。この容積比熱が小さいほど、物体の単位体積あたりの温度変化に必要な熱量は小さい、すなわち熱しやすく冷めやすい物質であるといえる。なお、容積比熱は (比熱 : $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) \times (密度 : kg/m^3) により計算される。ここで、容積比熱について考察する上での仮定として、それぞれの配合における各材料の割合について、空気の割合 (空隙率) は、第 4 章における空隙率試験により得られた値の各配合の平均値とし、設計空隙率との差分については、粗骨材とモルタルが均一に混ざっていると想定して粗骨材およびモルタルを同割合で増減させることにより調整した。表 5-1 に、各配合における容積比熱の計算結果を示す。計算の結果、容積比熱の小さい (熱しやすく冷めやすい) 順に $BdPOC < 7BsPOC < 6BsPOC < 7GPOC$

表5-1 容積比熱計算結果

| 種類 | 材料 | 密度 | 比熱 | 単位容積に 占める体積 | 各材料の 容積比熱 | 1℃上昇に必要な熱量 | |
|--------|------------|-------------------|---------|----------------|------------------------|------------|------------------------|
| | | kg/m ³ | J/(g・K) | m ³ | MJ/(m ³ ・K) | 各材料 | 合計※ |
| | | | | | | MJ/K | MJ/(m ³ ・K) |
| BdPOC | 家屋解体 廃瓦 | 2030 | 0.75 | 0.51 | 1.52 | 0.77 | 1.247 (1.313) |
| | モルタル | 2346 | 0.80 | 0.25 | 1.88 | 0.48 | |
| | 空気 | 1.293 | 1.01 | 0.25 | 1.30E-03 | 3.25E-04 | |
| 7BsPOC | 規格外品 廃瓦 | 2070 | 0.75 | 0.52 | 1.55 | 0.81 | 1.272 (1.325) |
| | モルタル | 2346 | 0.80 | 0.24 | 1.88 | 0.46 | |
| | 空気 | 1.293 | 1.01 | 0.24 | 1.30E-03 | 3.12E-04 | |
| 6BsPOC | 規格外品 廃瓦 | 2070 | 0.75 | 0.52 | 1.55 | 0.81 | 1.302 (1.329) |
| | モルタル | 2346 | 0.80 | 0.26 | 1.88 | 0.49 | |
| | 空気 | 1.293 | 1.01 | 0.22 | 1.30E-03 | 2.86E-04 | |
| 7GPOC | 7号砕石 | 2690 | 0.71 | 0.51 | 1.92 | 0.98 | 1.521 (1.521) |
| | モルタル | 2346 | 0.80 | 0.29 | 1.88 | 0.54 | |
| | 空気 | 1.293 | 1.01 | 0.20 | 1.30E-03 | 2.60E-04 | |
| 6GPOC | 6号砕石 | 2650 | 0.71 | 0.52 | 1.89 | 0.99 | 1.552 (1.507) |
| | モルタル | 2346 | 0.80 | 0.30 | 1.88 | 0.56 | |
| | 空気 | 1.293 | 1.01 | 0.17 | 1.30E-03 | 2.21E-04 | |
| NC | - | 2000 | 1.050 | 1.000 | 2.10 | 2.10 | |

※()内の値は、配合設計通りの材料割合として計算した値

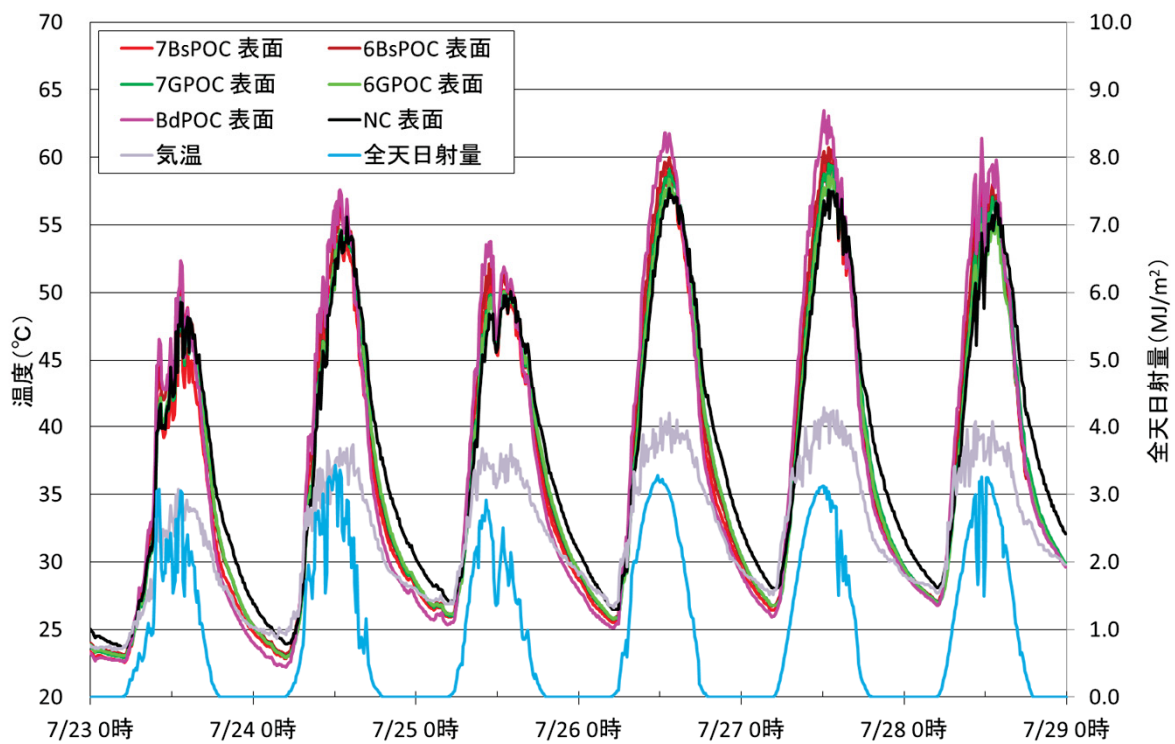


図5-4 晴天時における平板供試体表面温度変化

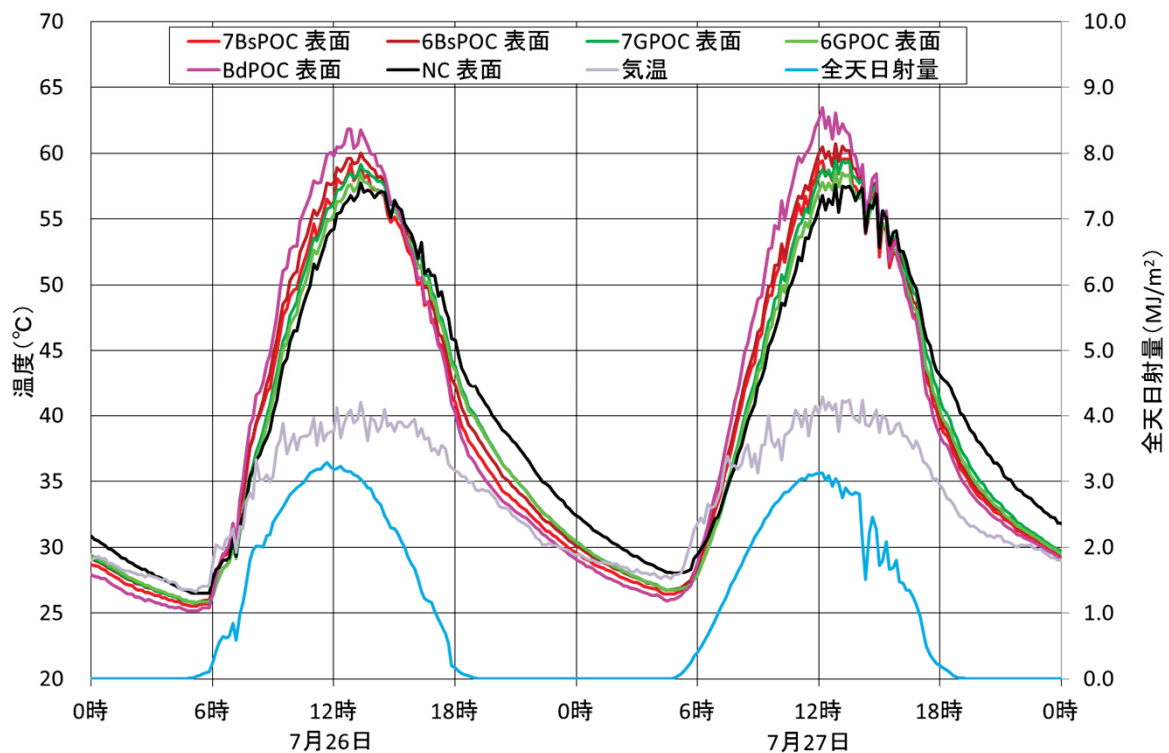


図5-5 平板供試体表面温度変化(7月26, 27日)

<6GPOC<NC となり、温度変化のグラフの傾きの大きさの順序とほぼ一致した。これにより、図 5-5 のような結果が得られた要因には容積比熱が影響していることが明らかとなった。表 5-1 を材料別に見てみると、空気は容積比熱が小さいことからポーラスコンクリートとしての容積比熱に与える影響は少ないといえ、また、モルタルについては同質のものを使っていると考えられることから、各配合における容積比熱が表のようになったのは、粗骨材の影響が大きいといえる。したがって容積比熱の小さな廃瓦を用いたことが、廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化を生じやすく（熱しやすく冷めやすく）した要因であると推察される。

(2) 中心温度

図 5-6 に平板供試体中心温度の変化を示す。平板供試体の中心温度は表面温度の変動と異なり、全天日射量の変動しても表面温度ほどは鋭敏に反応せず、いくらか遅れてから変動する傾向が確認できる。これは平板供試体表面から中心部に熱が伝導されるのに時間がかかるからである。ここでも、(1) 表面温度と同様に気温の高かった 7 月 26~27 日に注目する。図 5-7 に 7 月 26~27 日の中心温度の変化を示す。

図 5-7 より、グラフの傾きが大きい順に示すと、 $7GPOC \cong 6GPOC > NC \cong 6BsPOC > 7BsPOC > BdPOC$ となり、表面温度とは温度変化の傾向が異なっていることが確認できる。最高温度についても、表面温度では廃瓦を用いた BsPOC および BdPOC が砕石を用いた GPOC や NC より $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 程度高かったのに対して、中心温度では逆に $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 程度低くなった。このような結果が得られた要因には、各材料の熱伝導率が関係していると考えられる。熱伝導率の大小は、一般的に [固体] > [液体] > [気体] となる。そのため、骨材内部に空隙を持つ廃瓦の熱伝導率は、砕石のそれと比較して小さいため、表面からの熱が中心部に到達し難かったことが要因であると推察される。従って、一般的に粘土瓦が持つとされる高い断熱効果について、ポーラスコンクリートの粗骨材となった状態においても発揮されているといえ、廃瓦ポーラスコンクリート

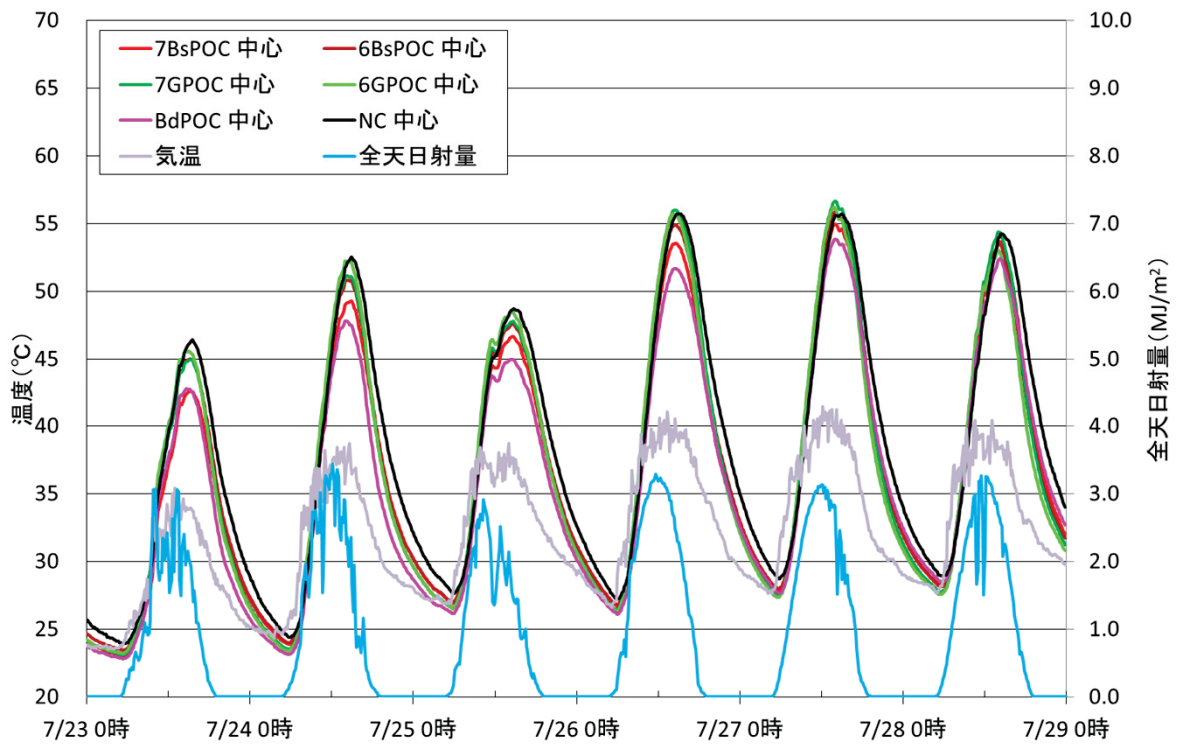


図5-6 晴天時における平板供試体中心温度変化

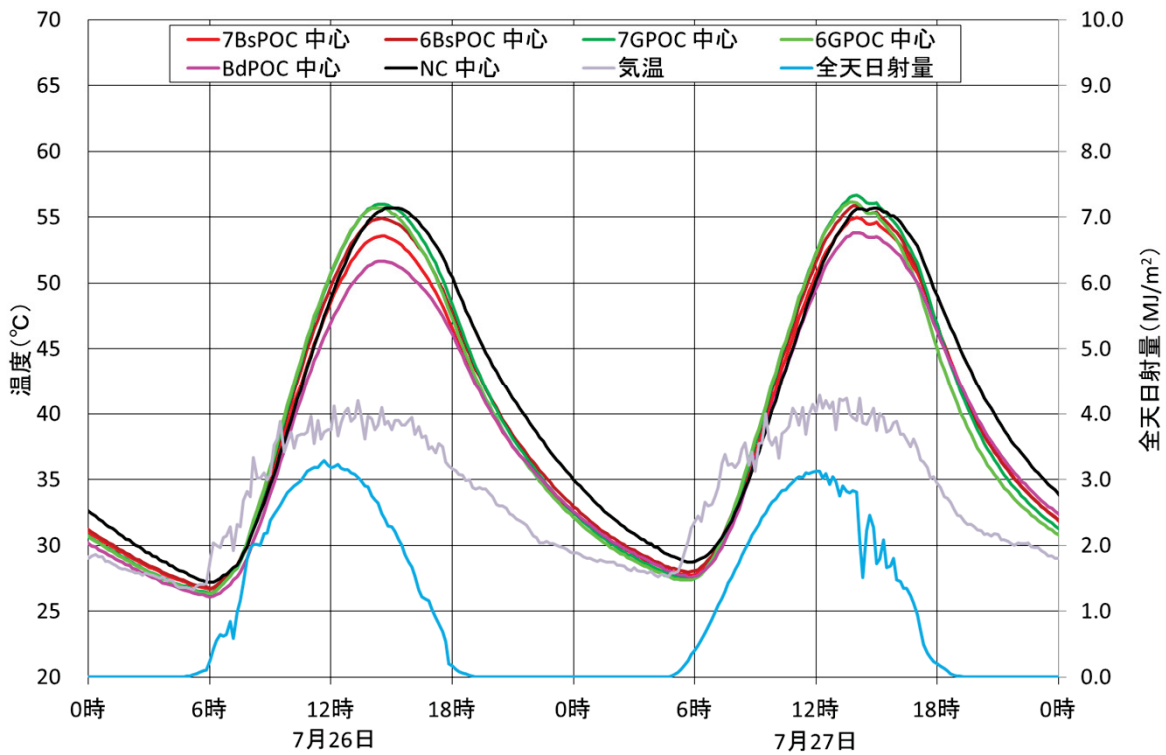


図5-7 平板供試体中心温度変化(7月26, 27日)

を建物屋上の床板などに用いた場合、階下の部屋の温度上昇を抑制できると考えられる。

5. 3 降雨後における廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化

5. 3. 1 試験条件

降雨後数日間における各平板供試体の温度変動の考察対象には、2012年8月5日～10日の6日間とした。図5-8に考察対象期間における試験場における気温および日射量を示す。降雨は8月6日に観測され、試験場に設置された雨量計によると、12～13時の間に7.0mm、15～16時の間に3.5mmの雨量を記録した。8月7日以降において降雨は観測されておらず、また、8月7日は試験場における最高気温で40.9℃（11時半頃）となり、気象庁統計（名古屋地方気象台）においても最高気温35.4℃と真夏日を記録している。参考として図5-9に気象庁の統計による名古屋地方気象台における各種気象データを示す。

5. 3. 2 試験結果および考察

(1) 表面温度

図5-10に試験期間中の表面温度の変動を示す。図より、8月5日や6日の温度変化を確認すると、5. 3. 1と同様な温度変化の傾向が確認されたが、降雨が記録された8月6日の12時半ごろになると各平板供試体は雨により冷やされ一気に温度が低下している。その後雨が止み、温度は上昇に転じるが、降雨が再び記録された15時半ごろに再度、各平板供試体の表面温度は一気に低下している。

a) 普通コンクリート（NC）との比較

図5-11にNCと各POCの温度差（「各POCの温度」－「NCの温度」）を示す。図5-11では、縦軸正方向に大きくなるほど、NCと比較して温度が高いことを表す。図

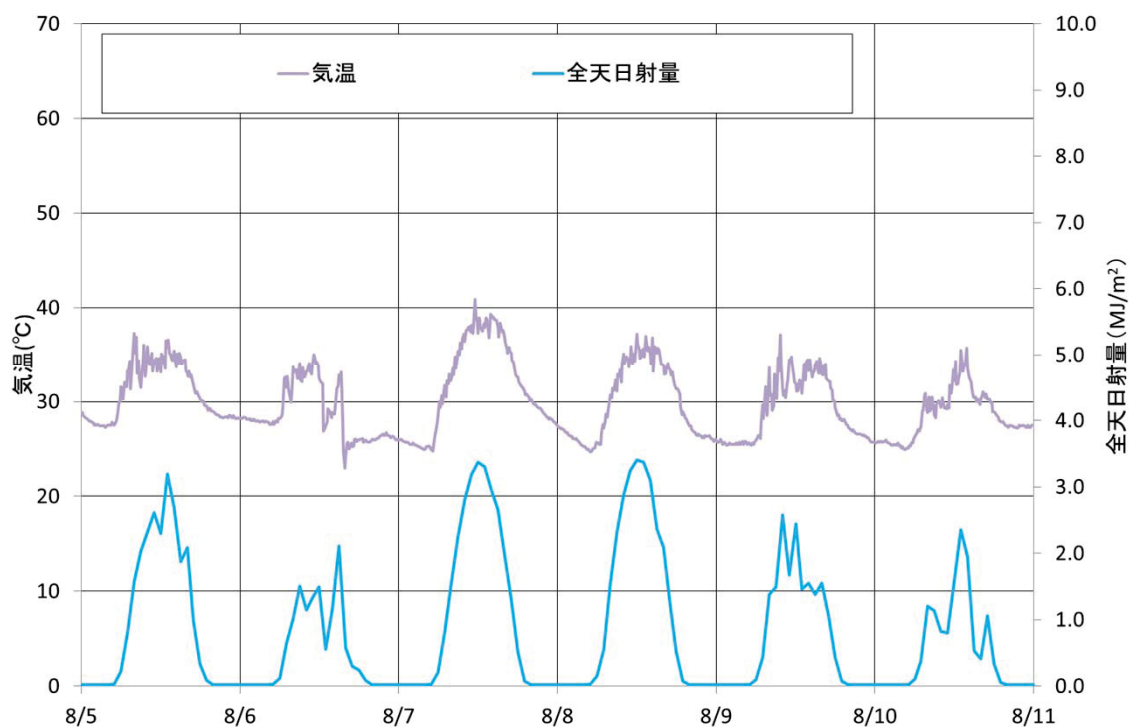
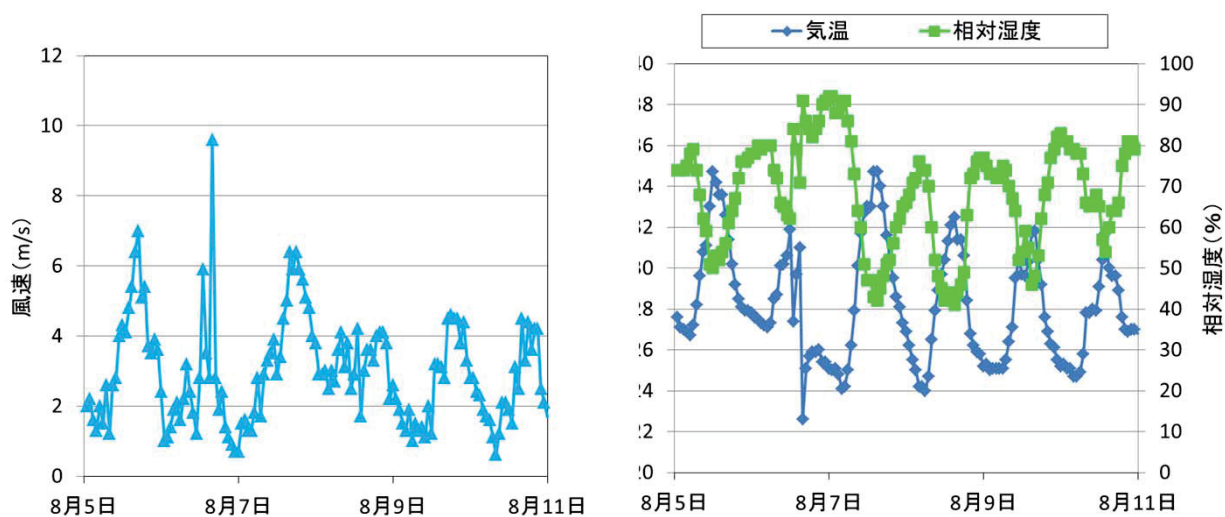


図5-8 試験期間中の気象条件(試験場所)



a) 風速

b) 気温と相対湿度

図5-9 試験期間中の気象条件(気象庁データ)

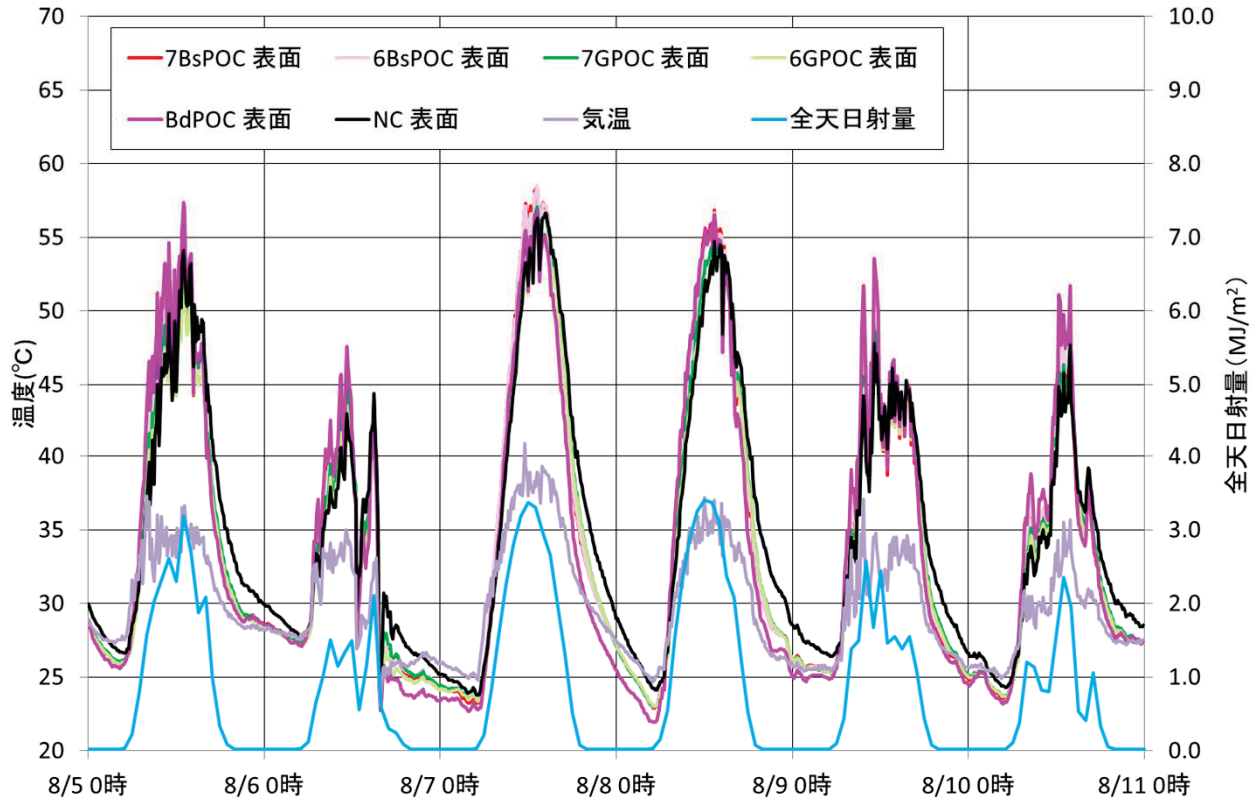


図5-10 降雨後における平板供試体表面温度変化

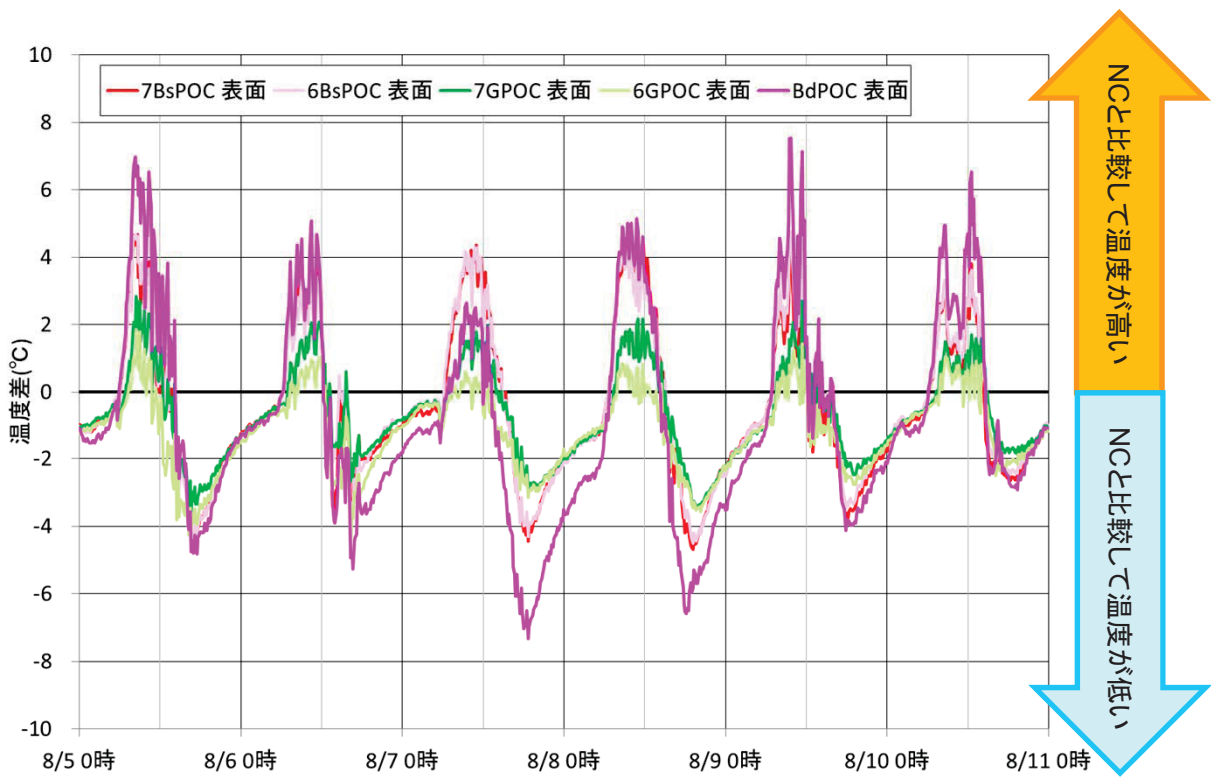


図5-11 平板供試体の表面温度差
(各POC - NC)

5-11 より、8月6日の降雨前後において、NC と GPOC の温度差の傾向に明確な差は確認できなかつた。一方で、NC と BsPOC および BdPOC の温度差を見てみると、降雨日（8月6日）の前後における温度差において、変化したことが確認でき、特に BdPOC はその変化が顕著に確認できた。BdPOC について見てみると、降雨前までは他 POC と同様な温度変化の傾向を示していたが、降雨翌日には、それまで最高表面温度が NC と比較して 5~7℃ 高かったのに対して、約 2℃ 高い温度差となるまで低下している。また、日射量が減少する午後になると、BdPOC の温度は NC よりも低くなり、日没（18時 50 分頃）するまでにその差は徐々に拡がり最大で約 7.5℃、BdPOC は NC より低い表面温度を示した。日没後は気温が高いこともあって徐々に温度差はなくなり、翌日（8月8日）に日が昇ると、BdPOC の方が温度は高くなった。降雨の 2 日後（8月8日）における NC と各 POC の最高温度差は降雨前との明確な違いは確認できなかったが、日射量が減少に転じる午後の温度差を見てみると、降雨前の温度差の変化と比較して、降雨翌日（8月7日）と同様に、日没までに温度差が 6℃ 以上となり、降雨前とは異なる傾向を示した。この傾向は降雨 3 日後（8月9日）にも若干ながら確認され、降雨 4 日後（8月10日）になると、温度差は GPOC の傾向とほぼ同様となった。ここで、図 5-12 降雨後の水の挙動を示す。図 5-12 の様に、降雨によって供給された水が、廃瓦へ吸収され、この水が徐々に大気に放出される際に、平板供試体の熱を奪ったため、廃瓦用いたポーラスコンクリートの温度の上昇が抑制され、より吸水率が大きな家屋解体廃瓦を用いた BdPOC においてより顕著に現れたためであると推察される。

以上のことから、廃瓦を用いたポーラスコンクリートにおいては、降雨によりポーラスコンクリート内へ水が供給されたことで温度が上昇しにくくなり、その影響は 3 日間程度続くことが明らかとなった。

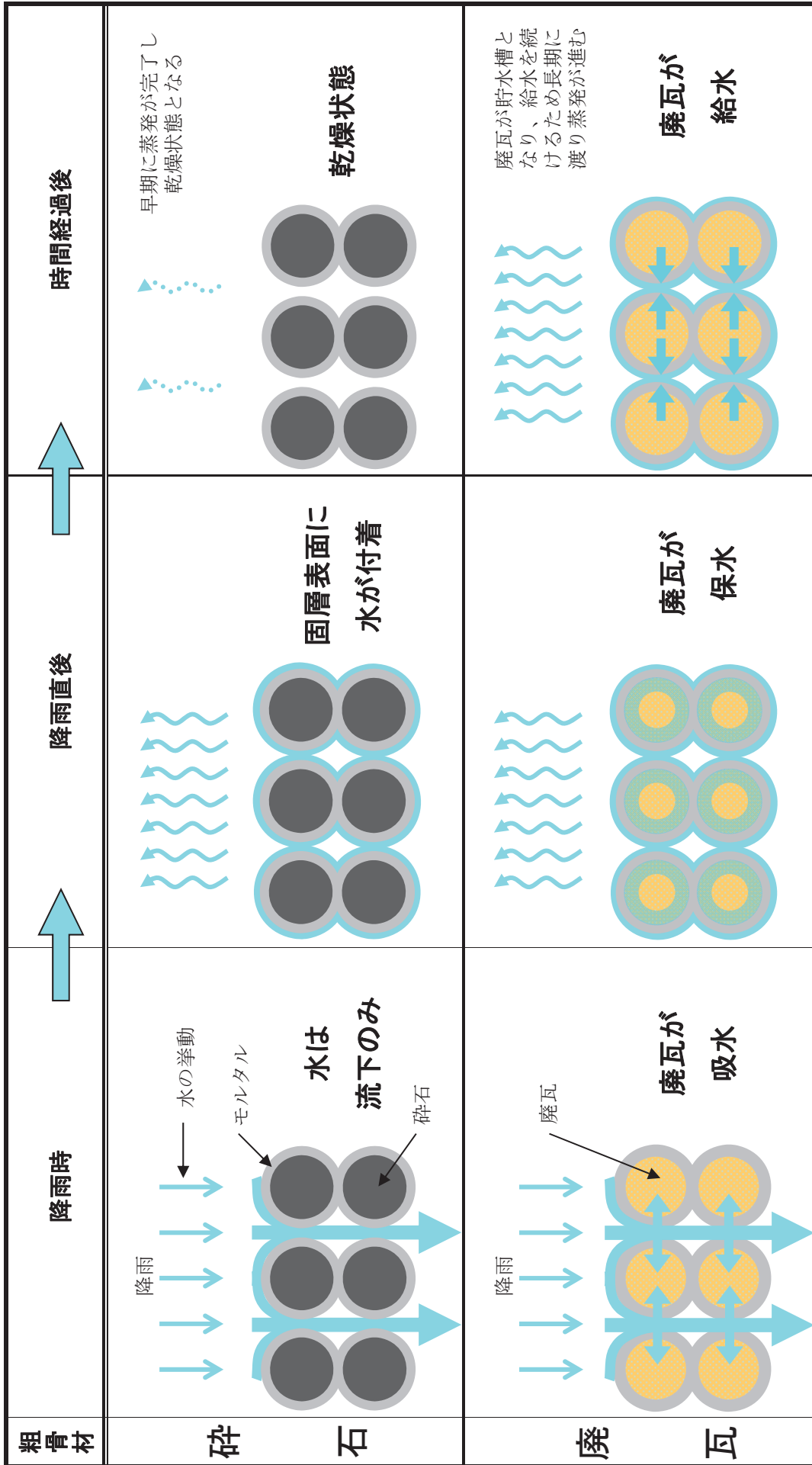


図5-12 降雨後の水の挙動

b) 粗骨材種類による比較

図 5-13 に BdPOC と各 POC の表面温度差（「BdPOC の表面温度」－「各 POC の表面温度」）を示す。図 5-13 では縦軸正方向に大きくなるほど、各 POC と比較して BdPOC の温度が高いことを表す。図 5-13 より降雨前日（8 月 5 日）では、BsPOC は他の POC と比較して日の出とともに温度が高くなり、それぞれ最大温度差約 3℃：7BsPOC、6BsPOC、約 5℃：7GPOC および、約 6℃：6GPOC となった。これは 5. 2 でも述べたように、容積比熱の差によると推察される。降雨日の翌日（8 月 7 日）の全天日射量が増加する時間帯（午前中）を見てみると、降雨前とは傾向が異なり、BdPOC は BsPOC と比較して温度が相対的に低く推移し続けた。BdPOC と GPOC を比較すると、BdPOC の方が高温にはなるものの、降雨前とは異なり最大でも 2℃程度の増大に収まった。さらに、全天日射量が減少に転じる午後を見てみると、BdPOC は BsPOC および GPOC の表面温度を最大 4℃程度下回ることが確認された。これらは、a) と同様に降雨によって供給された水が、廃瓦へ吸収され、この水が徐々に大気に放出される際に平板供試体の熱を奪ったためであると推察され、吸水率がより大きい家屋解体廃瓦を用いた BdPOC の方がより大きな温度低減を示したと推察される。

(2) 中心温度

図 5-14 に試験期間中の平板供試体中心温度の変動を示す。図より、表面温度と同様に降雨前においては 5. 3. 1 と同様な温度変化の傾向が確認されたが、降雨が記録された 8 月 6 日の 12 時半ごろになると各平板供試体は雨により冷やされ一気に温度が低下している。その後雨が止み、温度は上昇に転じるが、降雨が再び記録された 15 時半ごろに再度、各平板供試体の中心温度は一気に低下している。

a) 普通コンクリート（NC）との比較

図 5-15 に NC と各 POC の温度差（「各 POC の温度」－「NC の温度」）を示す。図 5-15 では、縦軸正方向に大きくなるほど、NC と比較して温度が高いことを表す。表

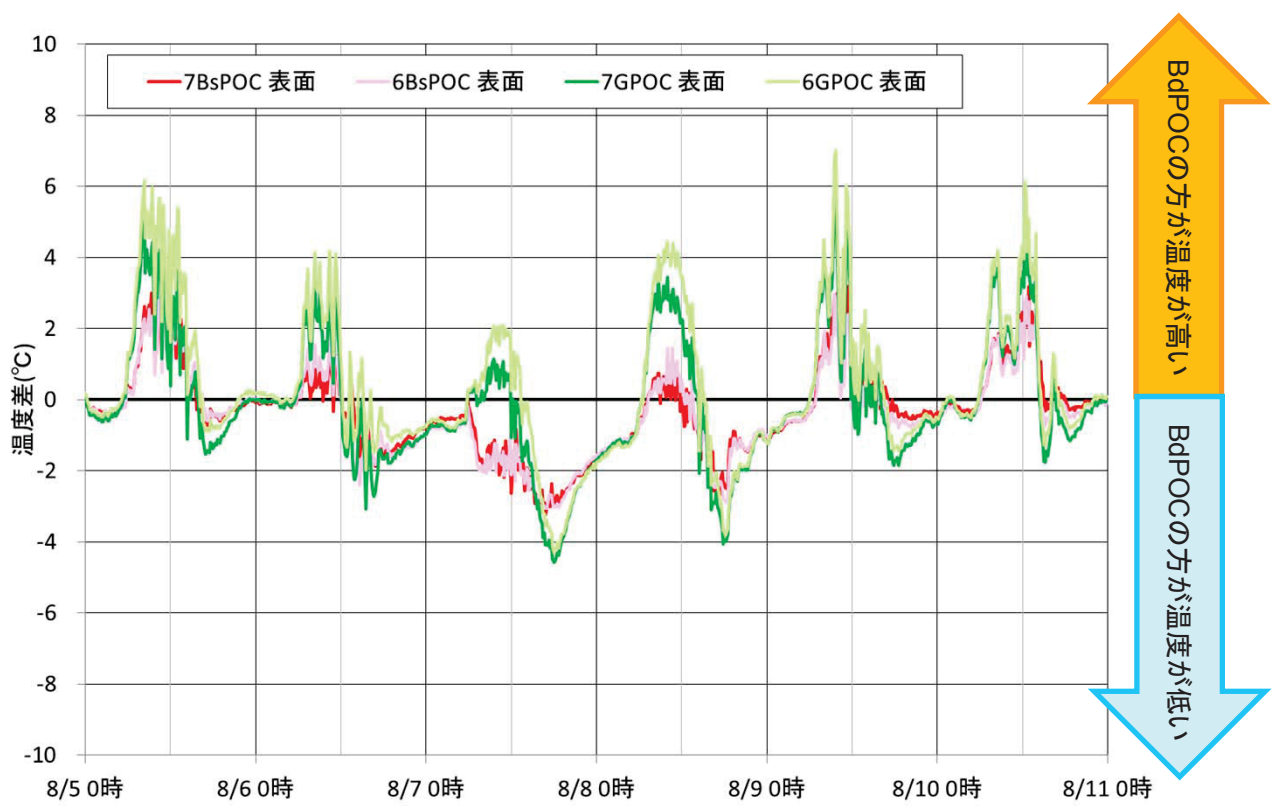


図5-13 平板供試体の表面温度差
(BdPOC - 各POC)

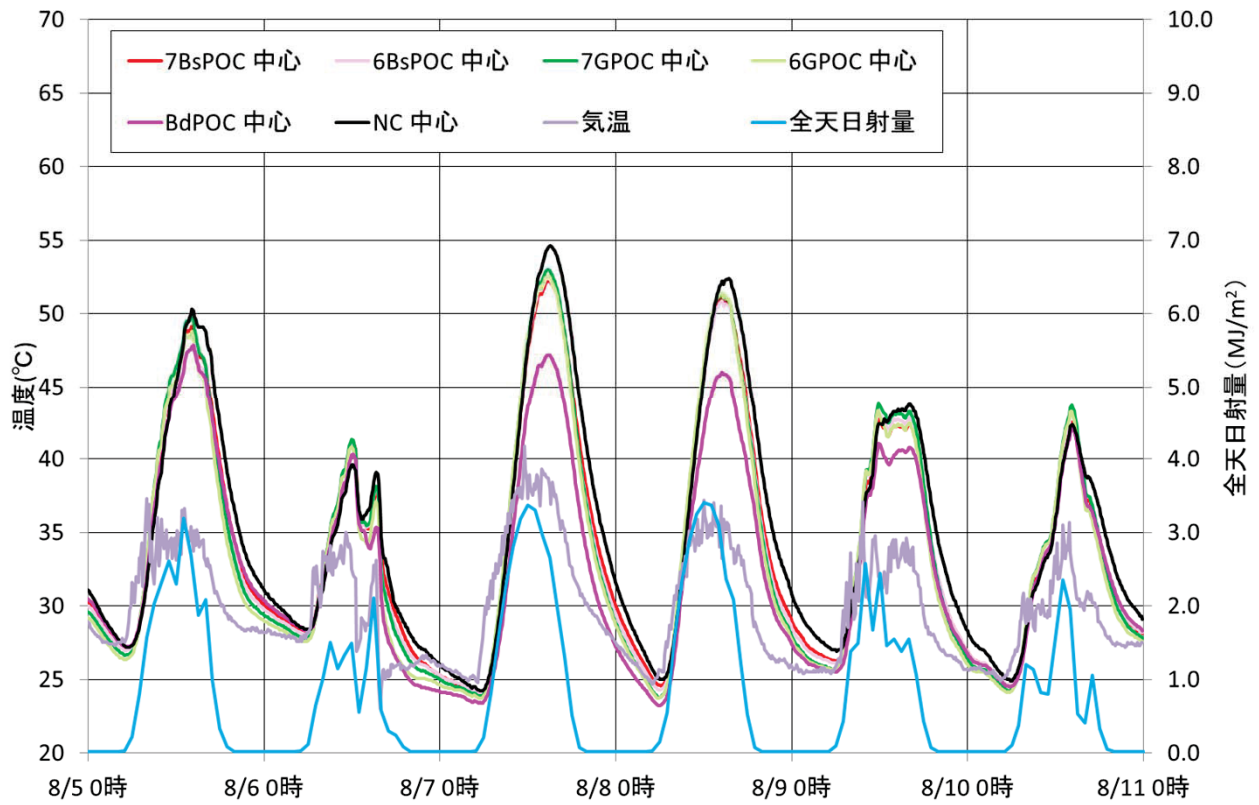


図5-14 降雨後における平板供試体中心温度変化

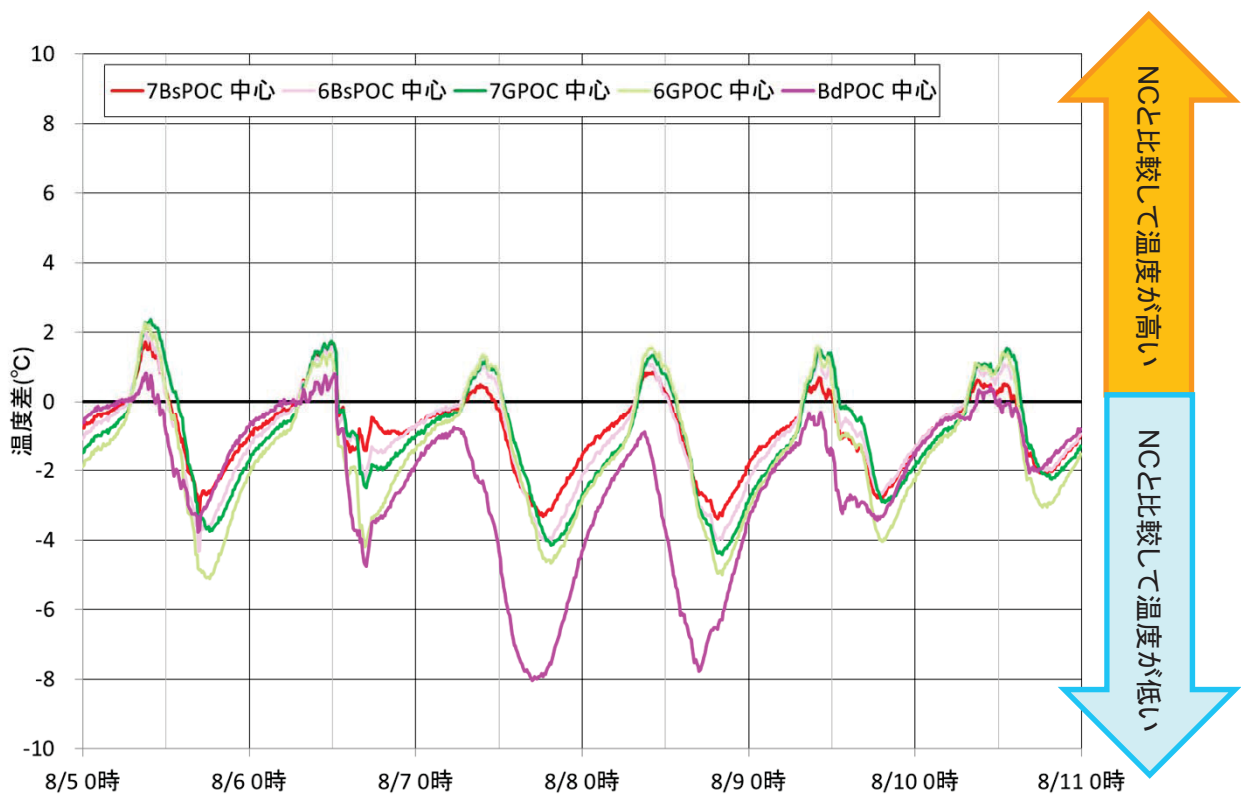


図5-15 平板供試体の中心温度差
(各POC - NC)

面温度と同様に、降雨の前後において、各 GPOC と NC との関係には明確な差は確認できなかった。一方、BdPOC および BsPOC との差を見てみると、降雨日翌日（8月7日）に中心温度が NC を大きく下回っていることが確認でき、その差は BsPOC では正午において約 4℃、日没頃には最大で 8℃以上となった。また、その翌日（8月8日）においても同程度の温度差が確認できる。これもこれまでの推察と同様に、廃瓦が供給された水を放出することで、熱量が水の状態変化に使用され、平板供試体供試体の温度上昇が抑制されたためと推察される。

b) 粗骨材種類による比較

図 5-16 に BdPOC と各 POC の中心温度差（「BdPOC の中心温度」－「各 POC の中心温度」）を示す。図 5-16 では縦軸正方向に大きくなるほど、各 POC と比較して BdPOC の中心温度が高いことを表す。降雨時刻（8月6日 12時半頃）から 3 日後（8月10日）の日没時刻頃まで BdPOC の中心温度は他の POC の中心温度を下回り続けた。これは吸水率のより大きな家屋解体廃瓦がより多くの水を含んでいたためと推察される。これより、ポーラスコンクリートは家屋解体廃瓦を用いることにより、その温度上昇をより長く抑制できることが明らかとなった。

以上のことから、廃瓦ポーラスコンクリートは、水の供給を受けることで普通コンクリートと比較して最大 8℃以上の温度低減が可能であることが明らかとなり、吸水率の比較的大きな家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートにおいてはその効果は 3 日程度継続する。

5. 4 定時散布給水した廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化

前節において、廃瓦を用いることで、ポーラスコンクリートの温度上昇を抑制することが可能であることを明らかとした。また、降雨後のような内部に水を保持している状態において、より温度上昇を抑制することも明らかとなった。そこで、人為的に

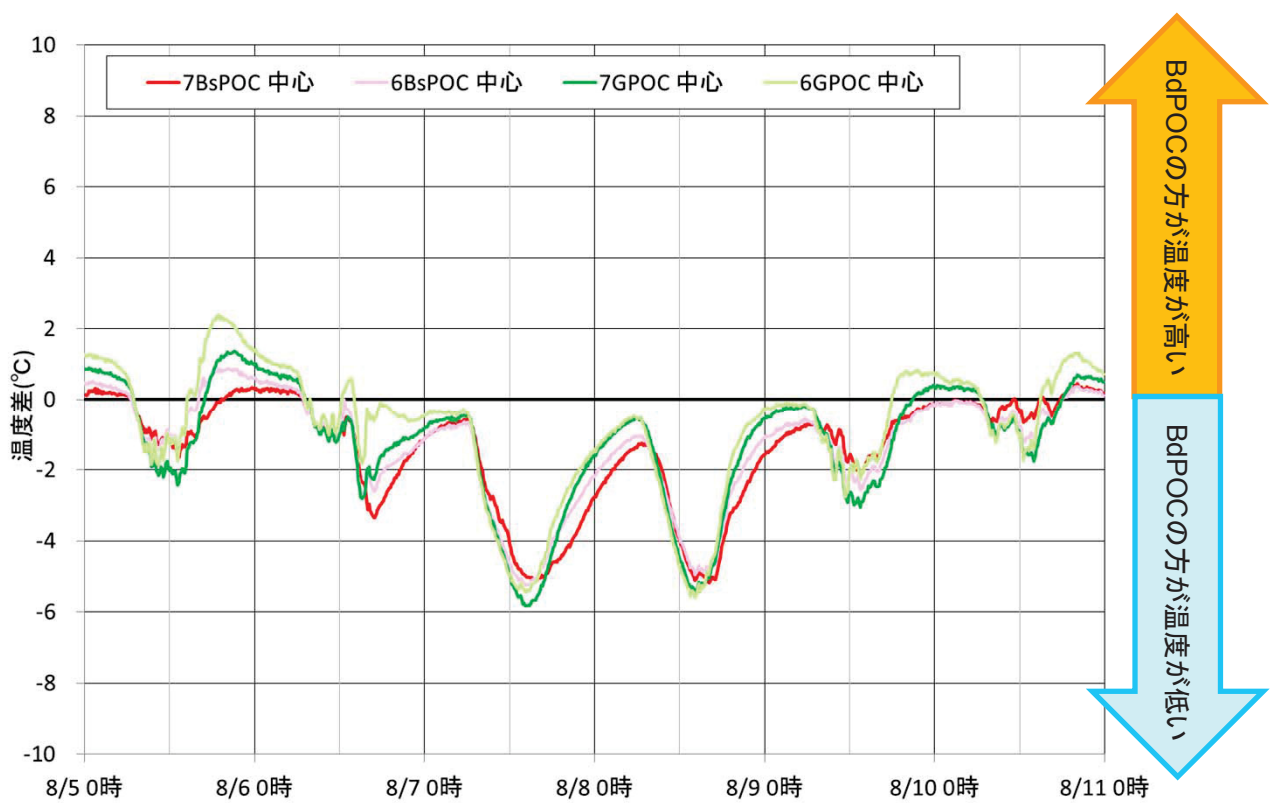


図5-16 平板供試体の中心温度差
(BdPOC - 各POC)

水を供給することにより、計画的な温度低減が可能となれば、都市計画等におけるヒートアイランド現象対策やその計画に大いに貢献できると考えられる。本節では、定時に平板供試体に定量の水を散布し、水の散布が温度上昇抑制効果にどのような影響を与えるか把握することを目的に、屋外試験を実施した。

5. 4. 1 試験条件

試験は2012年8月18日に実施した。図5-17に当日の試験場における気象条件を示す。また参考として、図5-18に気象庁の統計による名古屋地方気象台における各種気象データを示す。試験日前3日間において降水は確認されず、平板供試体の含水状態は、気乾状態に近いものと考えられる。試験当日は、午前中から雲で供試体が陰ることがしばしばあり、その様子は図5-18の気温からも読み取れる。さらに13時前後から雨雲が確認され始め、13時半過ぎには激しい雨が降り出したため、試験を終了した。散布時刻は初回を9時として、以降10時、11時と1時間間隔に設定した。また各散布給水量は一般的な降雨（降水量5mm）を想定し、平板供試体の上面積（ 0.81m^2 ）から4.05ℓとした。散布する水は事前に汲み置き、直射日光の当たらない室内で保管しておいた。散布時の水温は、多少の上下はあったが、ほぼ 30°C と一定を保っていた。散布には如雨露を用い、平板供試体表面全体に均等にかかるように心掛けて行った。

5. 4. 2 試験結果および考察

(1) 表面温度

図5-19に各平板供試体の表面温度変化を示す。なお、平板供試体の温度は、9枚の平板供試体の平均値である。図5-19より、日の出以後気温とともに温度は上昇していくが、散布給水を行った時点において、温度の急降下が確認されたが、表面付近の水はすぐに乾き、温度は再び上昇に転じている。また、BdPOCと6GPOCを比較してみ

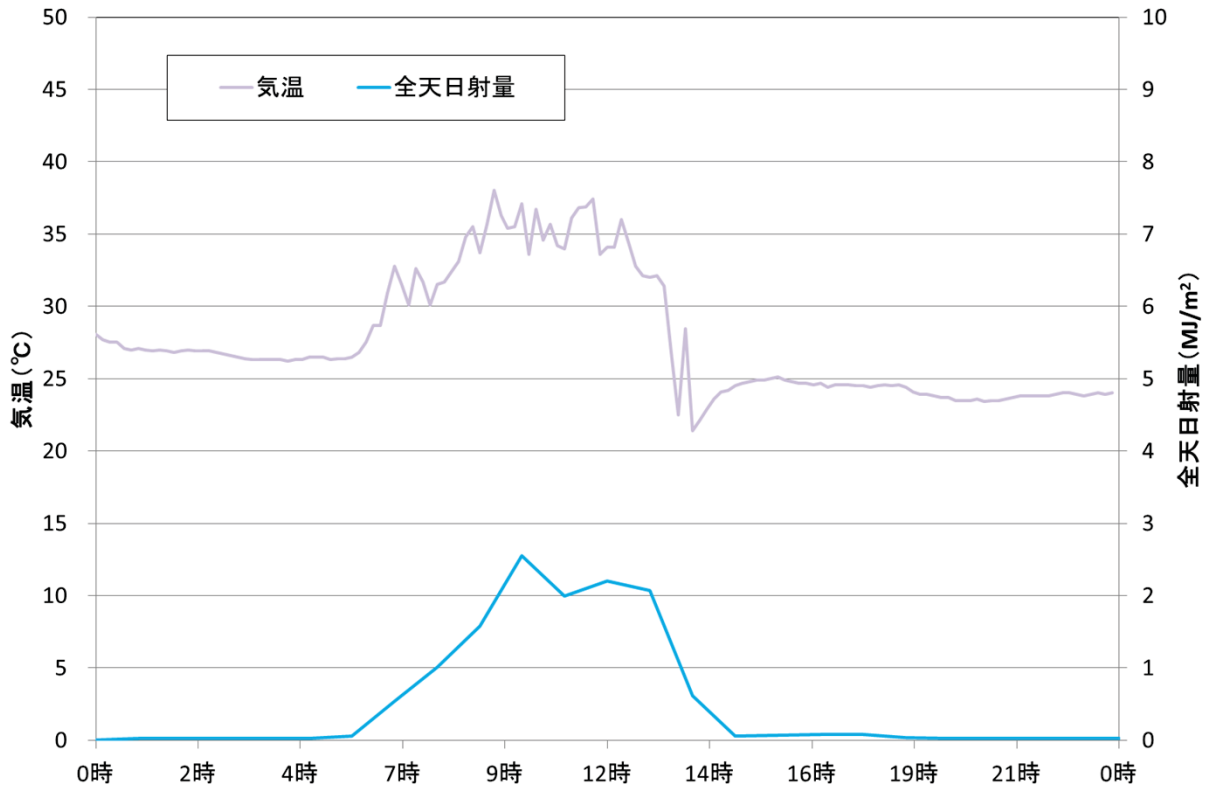
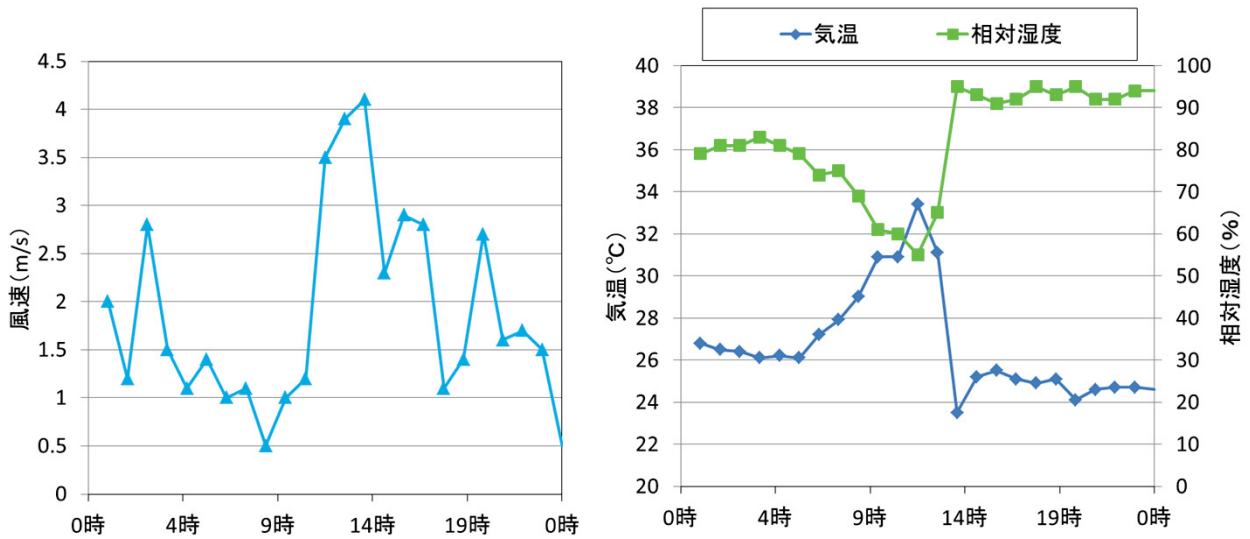


図5-17 試験期間中の気象条件(試験場所)



a) 風速

b) 気温と相対湿度

図5-18 試験期間中の気象条件(気象庁データ)

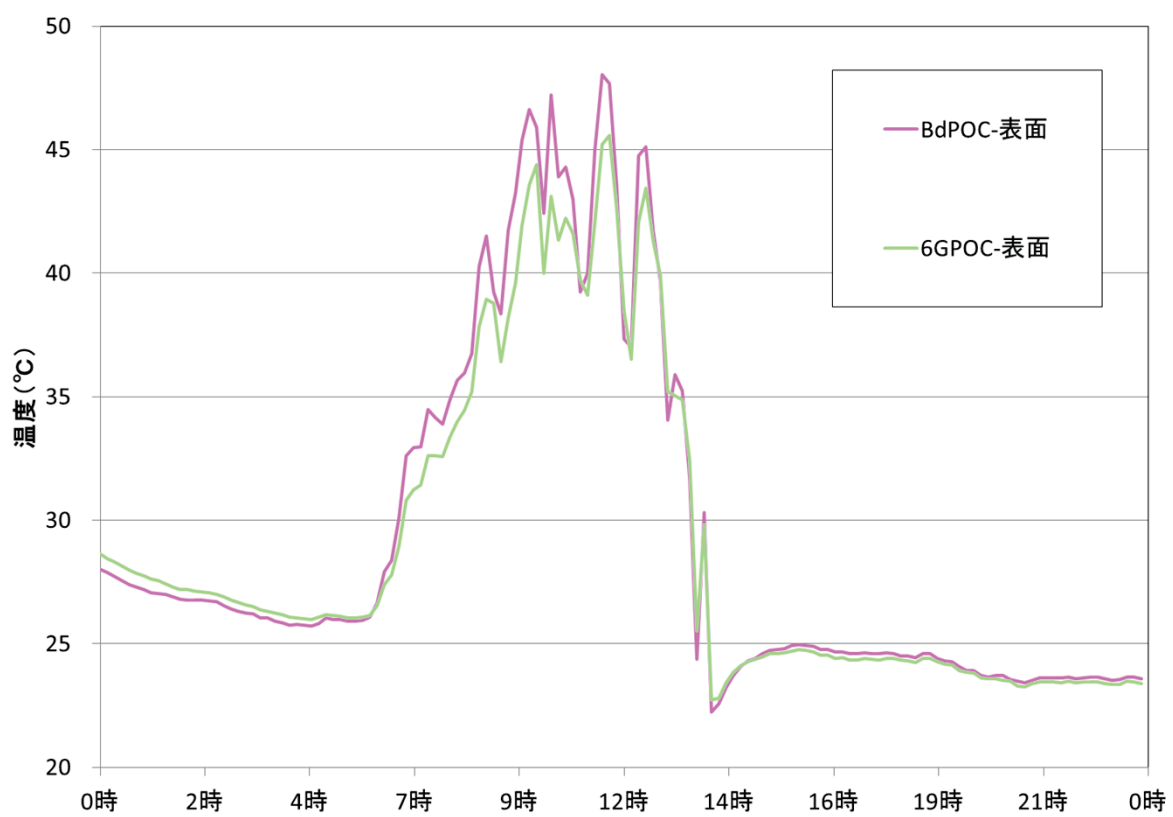


図5-19 定時散布給水における平板供試体表面温度変化

ると、常に BdPOC の方が高い温度を保っていたことが確認される。これは、5. 3でも述べてきたように、乾いた状態における温度は、その容積比熱に起因して 6GPOC よりも BdPOC の方が変動しやすいことから、BdPOC の方が温度は高くなったと推察される。

(2) 中心温度

図 5-20 に各平板供試体の中心温度変化を示す。なお、平板供試体の温度は、9 枚の平板供試体の平均値である。中心温度の変動の傾向は、(1) 表面温度とは異なり、6GPOC より BdPOC の方が低く推移しつづけた。しかしながらその温度差はわずかなものとなり、試験前の予想とは異なるものとなった。ここで、9 時および 10 時における散布給水後の各平板供試体の中心温度の変動を見てみると、6GPOC では少なからず温度低下が確認できるのに対し、BdPOC は温度上昇が若干緩やかになった程度で温度低下は確認できなかった。このような結果になった要因としては、散布した水が表面の熱を内部へ伝えてしまったことが考えられる。ここで図 5-21 に散布した水の挙動を示す。図 5-21 の様に日射により蓄えられた熱は、散布された水に吸収され、熱を蓄えた水は供試体内部に浸入する。碎石を用いた 6GPOC においては空隙内を通過して平板供試体を通過し、そのまま外へ排出される。しかし、吸水率の大きな家屋解体廃瓦を用いた BdPOC においては、散布され熱を蓄えた水は、平板供試体を通過する間に家屋解体廃瓦に吸水されたため、平板供試体中心の温度は低下しなかったと推察される。以上のことから、家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートについては、日射等により既に平板供試体が高温な状態において水を散布しても、内部の温度は低減されないことが明らかとなった。これでは家屋解体廃瓦の優れた吸・保水性能を活かしているとは言えず、給水方法についてさらなる検討が必要であることが明らかとなった。

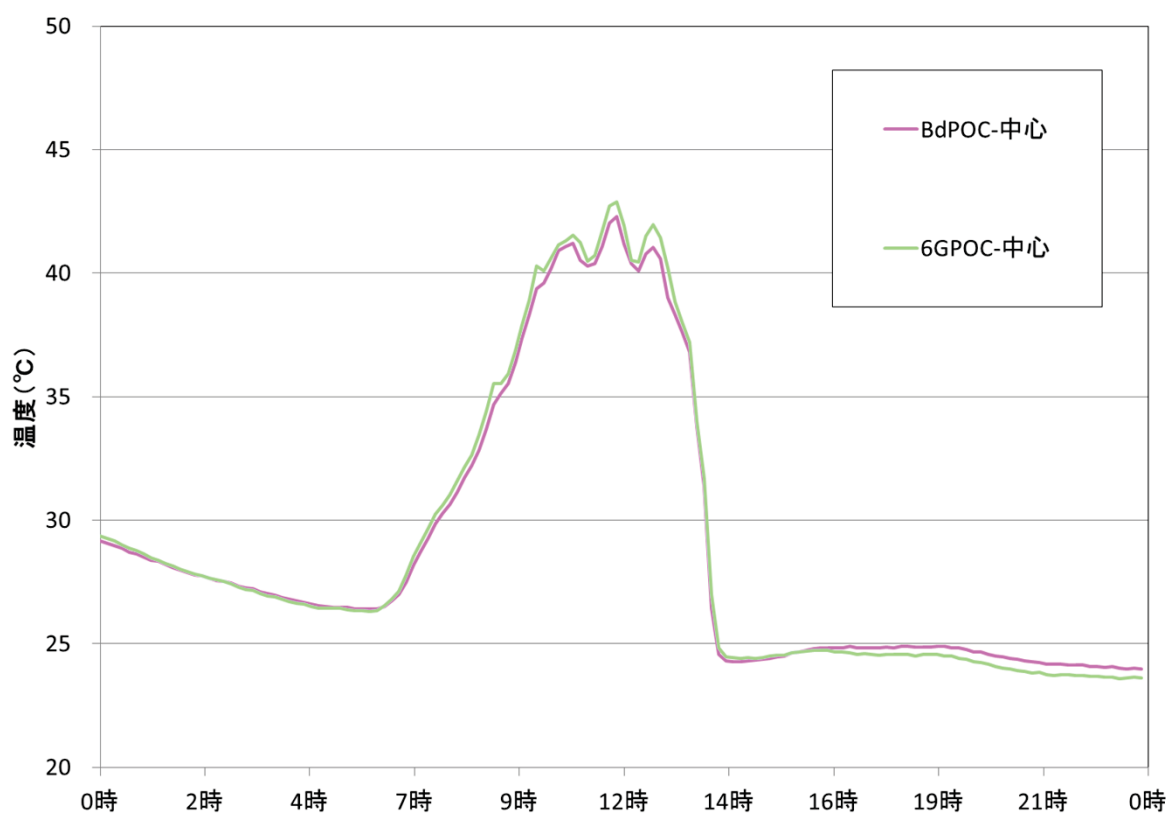


図5-20 定時散布給水における平板供試体中心温度変化

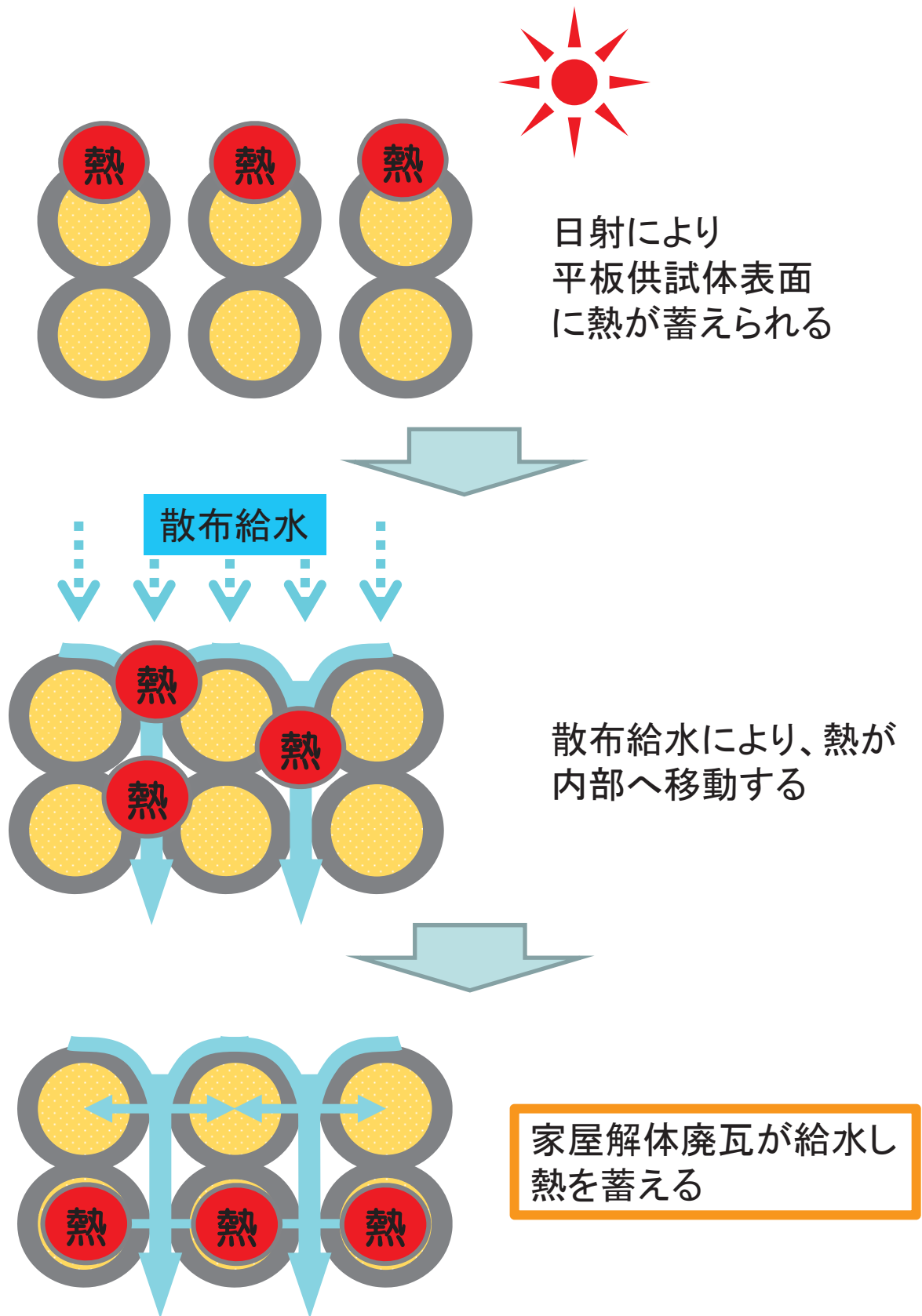


図5-21 散布給水による水の挙動

5. 5 未明に散布給水した廃瓦ポーラスコンクリートの温度変化

前節において、日中、既に平板供試体温度が高い状態で散布給水することでは、家屋解体廃瓦の優れた吸・保水性能を活かせないことが明らかとなった。そこで、本節では、別の給水方法として、日が昇る夜明け前（未明）に散布給水し、家屋解体廃瓦の保水性能をもって水を保持させ、日中における平板供試体の温度上昇の抑制を試みた。

5. 5. 1 試験条件

試験は2012年8月23日に実施した。図5-22に当日の試験場における気象条件を示す。また参考として、図5-23に気象庁の統計による名古屋地方気象台における各種気象データを示す。試験日前3日間において降水は確認されず、平板供試体の含水状態は、気乾状態に近いと考えられる。散布給水量は5.4と同様に4.05ℓとした。また、散布時刻は当日の日の出時刻（5時19分）よりも早い4時50分に設定した。これにより、日射による平板供試体の表面の熱が、内部へ移動することを防いだ。散布する水は事前に汲み置き、直射日光の当たらない室内で保管していた。なお、散布時の水温は約30℃であった。散布には如雨露を用い、平板供試体表面全体に均等にかかるように心掛けて行った。

5. 4. 2 試験結果および考察

(1) 表面温度

図5-24に各平板供試体の表面温度変化を示す。なお、平板供試体の温度は、9枚の平板供試体の平均値である。図より、これまでの傾向通り、BdPOCの方が6GPOCより高い温度維持しながら変動していることが確認でき、未明に散布した水による明確な影響は確認できなかった。

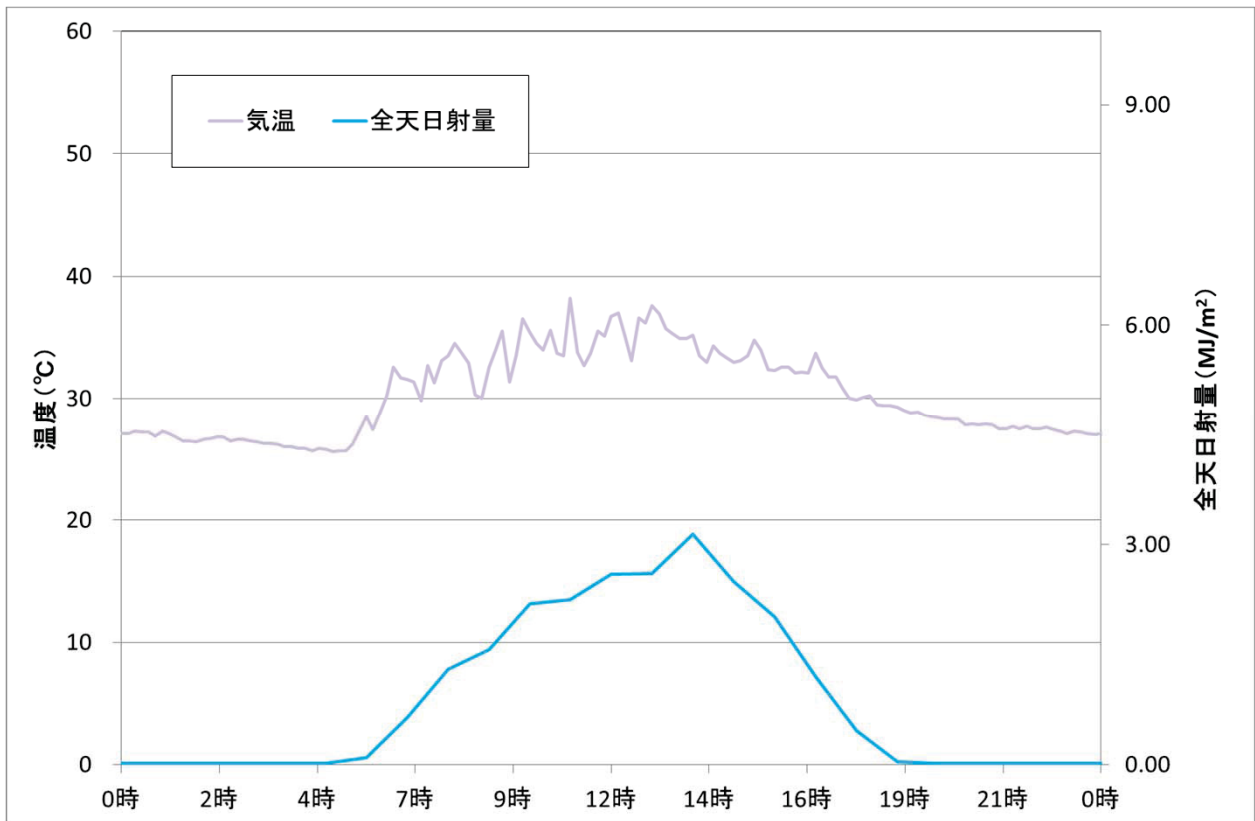
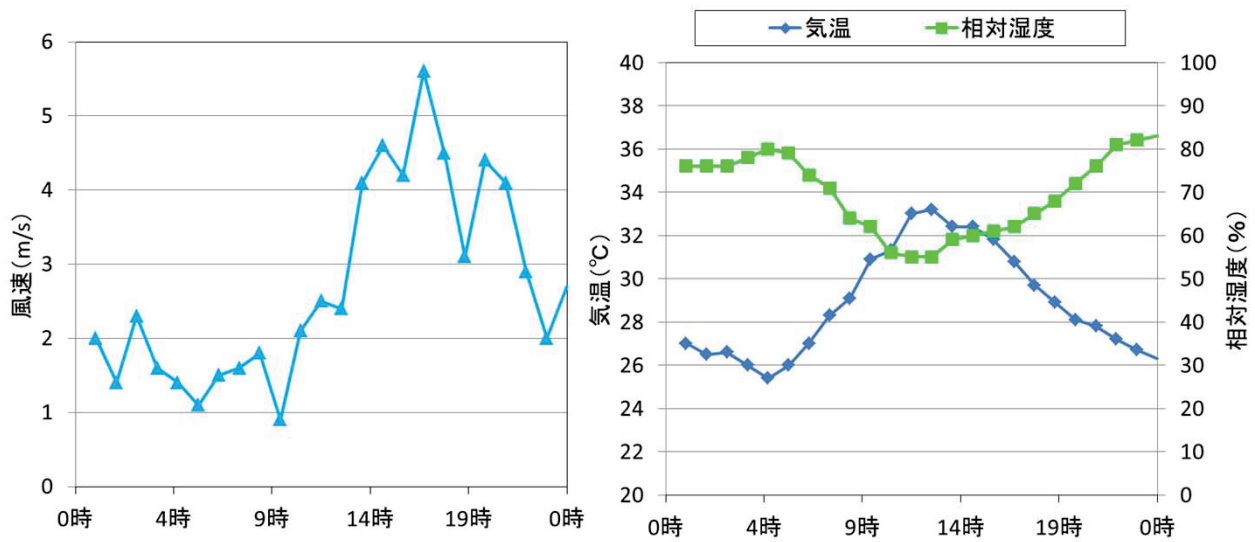


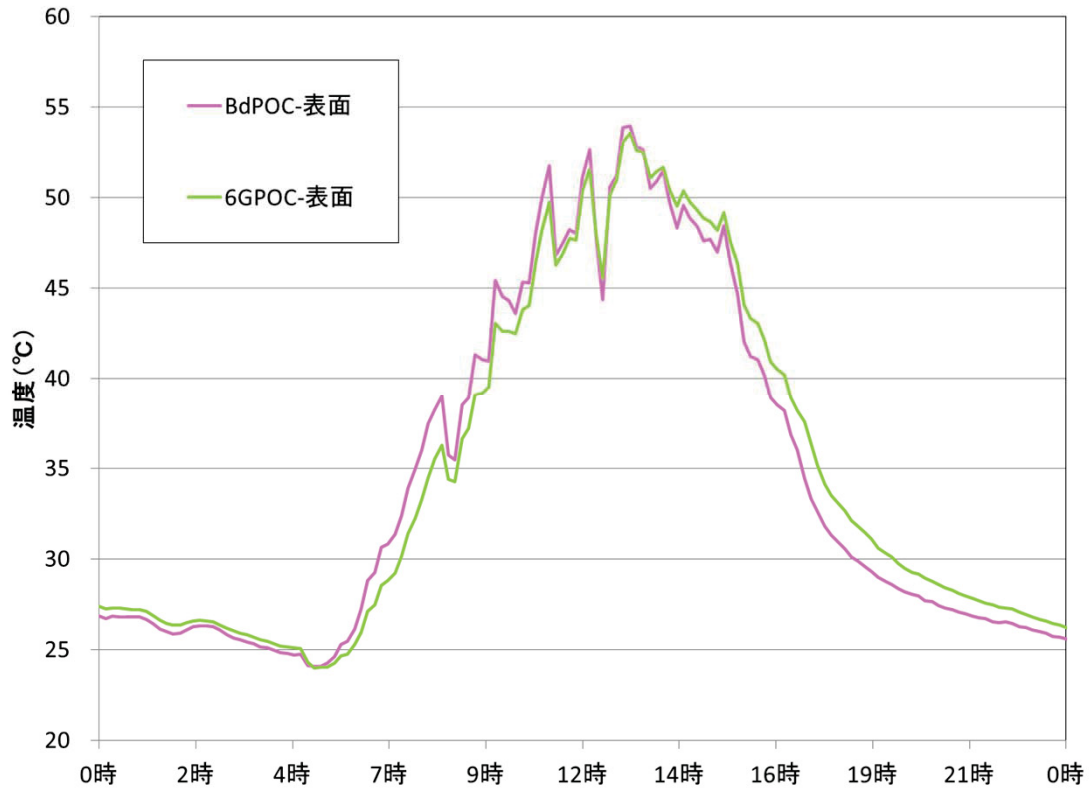
図5-22 試験期間中の気象条件(試験場所)



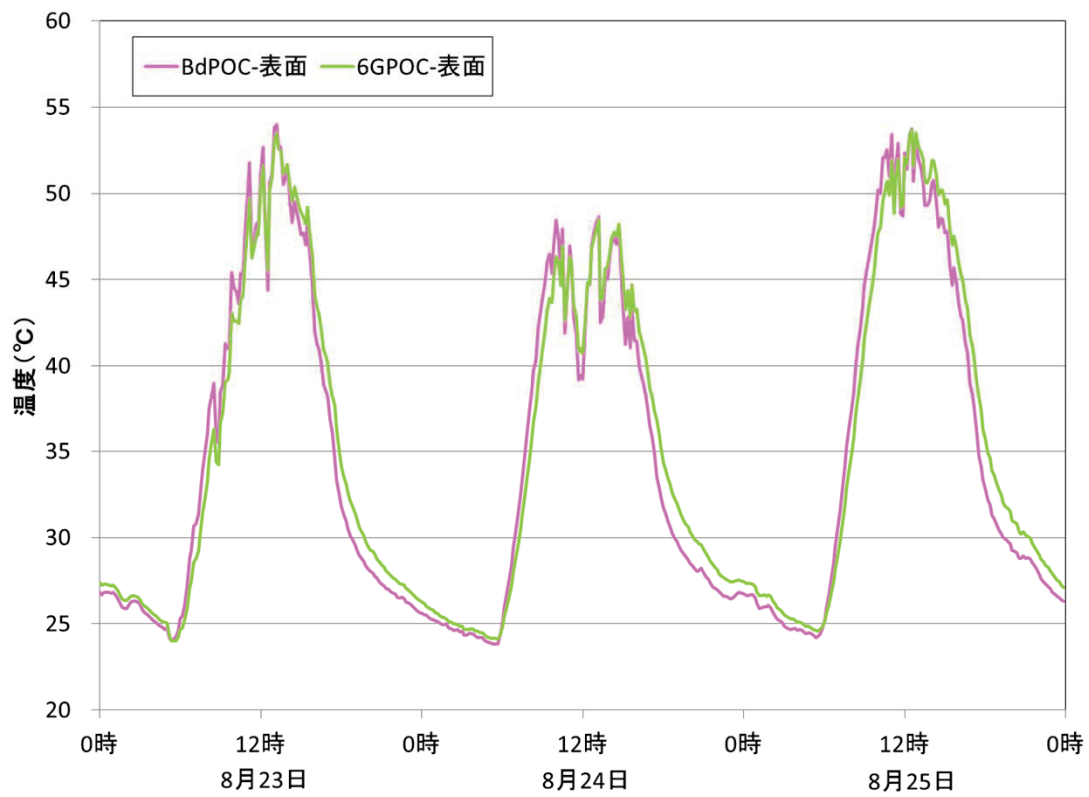
a) 風速

b) 気温と相対湿度

図5-23 試験期間中の気象条件(気象庁データ)



a) 散布当日(8月23日)



b) 散布後3日間(8月23日~25日)

図5-24 未明散布給水した平板供試体表面温度変化

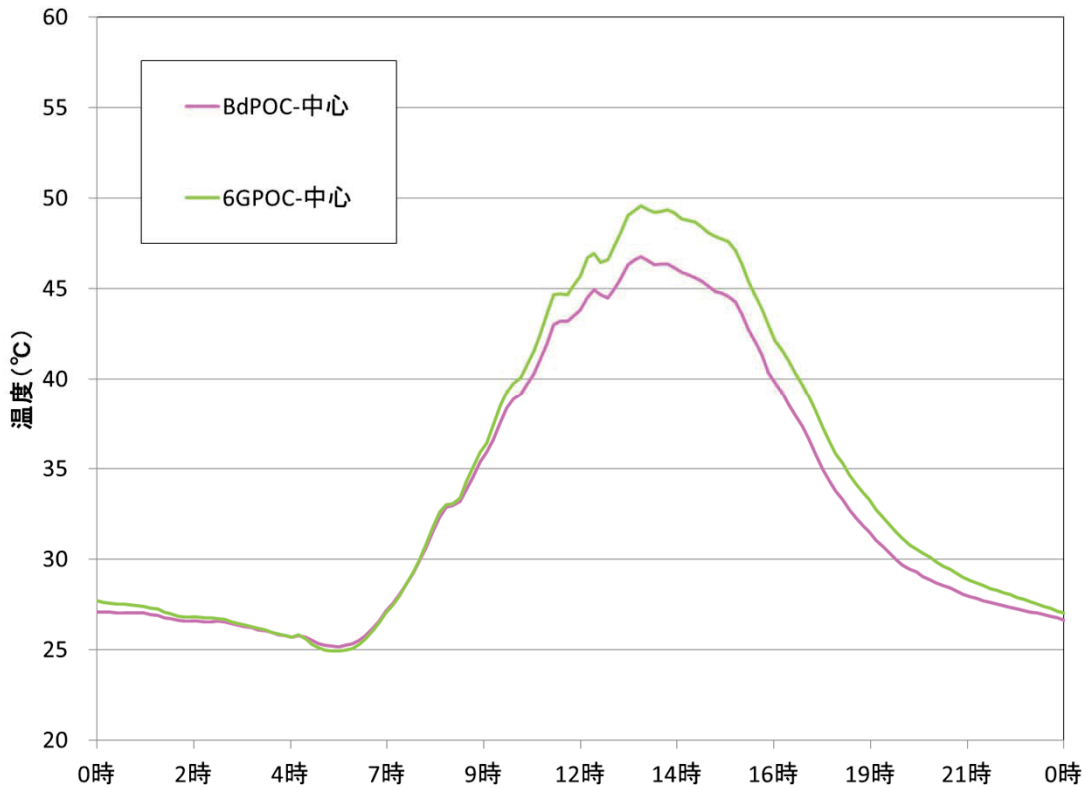
(2) 中心温度

図 5-25 に各平板供試体の中心温度変化を示す。なお、平板供試体の温度は、9 枚の平板供試体の平均値である。図より、それぞれの最高温度を確認すると、5.3 とは異なり、BdPOC が 6GPOC よりも 4℃ 近く温度が低いことが確認できた。表面温度では、未明に散布した水による影響は確認されなかったが、中心温度では 5.3 とは異なり、大きな温度差が確認された。このような違いが確認された要因としては、未明の給水により平板供試体内の家屋解体廃瓦が吸水し、水を蓄えたことにより、熱を受けても水の状態変化（潜熱）に使用されたことや、5.3.2 でも述べたような熱の移動がされなかったことが推察される。

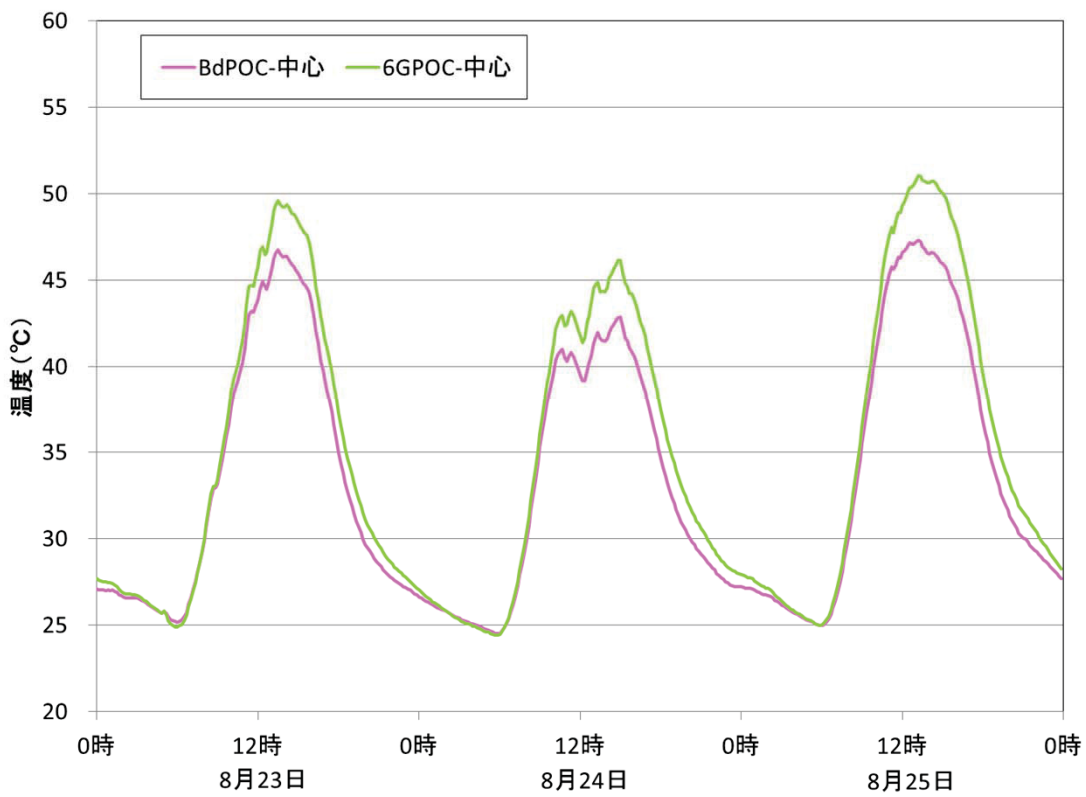
以上のことから、廃瓦を用いたポーラスコンクリートは、ポーラスコンクリートへ給水することで、その温度上昇抑制効果を向上させることが可能となることが明らかとなった。しかし、留意点として、給水方法によっては内部に熱を誘導してしまう可能性があることも明らかとなった。

5.5 まとめ

- (1) 廃瓦を用いたポーラスコンクリートは、廃瓦の容積比熱の小ささに起因して、標準的な骨材を用いたポーラスコンクリートと比較して、「熱しやすく冷めやすい」ことが明らかとなった。
- (2) 廃瓦ポーラスコンクリートは、廃瓦は多孔質構造であり微細な空隙を多く含むことから熱伝導率が小さくなることに起因して、標準的な骨材を用いたポーラスコンクリートと比較して熱が伝わりにくい断熱効果があることが明らかとなった。
- (3) 廃瓦ポーラスコンクリートは降雨等により内部へ水が供給されることで温度上



a) 散布当日(8月23日)



b) 散布後3日間(8月23日～25日)

図5-25 未明散布給水した平板供試体中心温度変化

昇が抑制されることが明らかとなり、その効果は廃瓦の優れた吸保水性能より数日間継続することが明らかとなった。また、より吸水率の大きな家屋解体廃瓦を用いることで、その効果はより高まることも明らかとなった。

(4) 廃瓦ポーラスコンクリートの温度上昇を抑制する給水は、日中ポーラスコンクリートが高い温度の時に実施すると、表面の熱を内部へ誘導してしまうことから、効果が薄いことが明らかとなった。

(5) 廃瓦ポーラスコンクリートの温度上昇を抑制する給水は、日の出前に実施することで、表面の熱を内部へ誘導することなく効果的に温度の上昇を抑制できることが明らかとなった。

以上が屋外試験を実施することにより得られた知見である。ポーラスコンクリート用粗骨材として廃瓦（規格外品廃瓦、家屋解体廃瓦）を用いることで、標準的な骨材を用いた場合と比較して高い温度上昇抑制効果が得られることが明らかとなった。しかしながら、その給水方法にも効果的なものとそうでないものがあることも明らかとなった。今後、本試験が参考とされ、より効果的・効率的な給水方法の確立や、実際に大面積を舗装し、地盤や路盤等の上で試験をすることにより廃瓦ポーラスコンクリートのより効果的な利用方法を発見することが望まれる。

第 6 章

結 論

第6章 結 論

本研究では、家屋解体廃瓦の有効利用可能な用途開発を念頭に、家屋解体廃瓦のポーラスコンクリート用粗骨材への適用を目指し、家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートを製造して、その物性や特性に家屋解体廃瓦が与える影響を把握することを目的として、各種試験を実施した。

さらに、「規格外品廃瓦」、「家屋解体廃瓦」を用いたポーラスコンクリートの実用化を目指し、乾燥・湿潤環境下での温度変化への影響を把握することを目的に屋外試験を実施した。

以下に本研究により得られた知見をまとめる。

- (1) 規格外品廃瓦は砕石と比較して細粒分を多く含むことが確認された。また、使用した規格外品廃瓦の表面噴霧処理における噴霧量は、その含水率の経時変化試験より、それぞれ7号規格外品廃瓦：8.0%、および6号規格外品廃瓦：6.3%とした。
- (2) 配合設計時に用いる補正係数は、それぞれ7BsPOC：0.91、7GPOC：0.92、6BsPOC：0.87、および6GPOC：0.85と算出され、補正係数は骨材種類やその吸水性能による影響は小さく、その粒径による影響が大きいことが明らかとなった。今後、この値を用いることにより、おおむね設計空隙率どおりの空隙率が確保されたポーラスコンクリートが製造可能である。
- (3) 規格外品廃瓦ポーラスコンクリートについて、その圧縮および曲げ強度は規格外品廃瓦の強度に支配されていることが明らかとなった。また、強度面について、歩道用舗装として問題ないことが明らかとなった。
- (4) ポーラスコンクリート用粗骨材として規格外品廃瓦を用いることにより、標準的な粗骨材を用いた場合と比較してその保水量は1.7～1.9倍程度大きくなり、ポーラスコンクリートの保水性能が向上することが明らかとなった。

- (5) 家屋解体廃瓦は吸水率が規格外品廃瓦と比較して大きいことが明らかとなった。
- この要因として、経年劣化による影響や、瓦製造当時の製造技術の差によるものと推察される。
- (6) 家屋解体廃瓦を用いたコンクリートは、家屋解体廃瓦自体の強度および混入物等の影響により、規格外品廃瓦を用いたコンクリートと比較して強度が若干低下する。
- (7) 家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートは、透水性舗装における透水係数の下限値 (0.01 cm/s) を満たしていることから、透水性能からみて透水性舗装用材料として用いて問題ない。
- (8) 家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートは、歩道用舗装の設計曲げ強度 (2.5~3.5 N/mm²) を満たしていることから、強度面からみて歩道用舗装材料として用いて問題ない。
- (9) 家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリート用粗骨材として用いることにより、ポーラスコンクリートの吸水性能が向上する。
- (10) 廃瓦を用いたポーラスコンクリートは、廃瓦の容積比熱の小ささに起因して、標準的な骨材を用いたポーラスコンクリートと比較して、「熱しやすく冷めやすい」ことが明らかとなった。
- (11) 廃瓦ポーラスコンクリートは、廃瓦は多孔質構造であり微細な空隙を多く含むことから熱伝導率が小さくなることに起因して、標準的な骨材を用いたポーラスコンクリートと比較して熱が伝わりにくい断熱効果があることが明らかとなった。
- (12) 廃瓦ポーラスコンクリートは降雨等により内部へ水が供給されることで温度上昇が抑制されることが明らかとなり、その効果は廃瓦の優れた吸保水性能より数日間継続することが明らかとなった。また、より吸水率の大きな家屋解体廃瓦を用いることで、その効果はより高まることも明らかとなった。
- (13) 廃瓦ポーラスコンクリートの温度上昇を抑制する給水は、日中ポーラスコンク

リートが高い温度の時に実施すると、表面の熱を内部へ誘導してしまうことから、効果が薄いことが明らかとなった。

(14) 廃瓦ポーラスコンクリートの温度上昇を抑制する給水は、日の出前に実施することで、表面の熱を内部へ誘導することなく効果的に温度の上昇を抑制できることが明らかとなった。

本研究により廃瓦をポーラスコンクリート用粗骨材として用いることで、廃瓦の特性である優れた吸・保水性能を活かした有効利用が可能であることが明らかとなり、廃瓦ポーラスコンクリートの温度上昇を抑制することで、ヒートアイランド現象対策の一案としての可能性も明らかとされた。しかし、給水方法によっては効果が確認できない場合もあったことから、今後、効果的・効率的な給水方法の確立や、実際に大面積を舗装し、地盤や路盤等の上で試験をすることにより廃瓦ポーラスコンクリートのより効果的な利用方法を発見することが望まれる。

謝 辞

博士論文をまとめるにあたり、数多くの皆様の御指導・御協力いただきましたことを、ここに深く感謝いたします。

上原匠准教授には、研究計画をはじめ、実験、論文の作成と本当にお世話になりました。ここへ至るまでの途中、ご心配をおかけしたり、至らぬ点多々あったりと大変ご迷惑をおかけしました。学部生の頃から考えると6年半もの長きに渡り、本当に充実した日々を過ごすことができました。ありがとうございました。

小畑誠教授、河辺伸二教授、前田健一教授には、論文作成にあたり御指導・御助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

吉田亮助教には、実験遂行にあたり、沢山の御助言御協力いただきました。吉田助教の鋭い指摘と問いかげにより、研究をより良いものへと昇華させることができました。ありがとうございました。

平原英樹さんには、試験計器の御指導や、その他研究生活においても大変お世話になりました。長丁場の試験の際に、平原さんの明るいトークで盛り上がり、楽しく試験を実施することが出来ました。ありがとうございました。

尾澤敏行さんには、試験装置の作製に始まり、様々な事で御協力いただきました。また、尾澤さんの研究や試験に対する姿勢からは、沢山のことを学ばせていただきました。ありがとうございました。

社団法人瓦チップ研究会代表理事である亀井則幸様には本研究のテーマである廃瓦の提供をはじめとして多岐にわたりご協力いただきました。本研究がこのような成果を上げることができたのも、亀井様の御協力があってこそのもです。ここに深く感謝申し上げます。

ともに研究生活を過ごした諸先輩方や同輩、後輩たちから数多くご協力いただきましたこと、ここに深く感謝申し上げます。私が社会人であったことから、常日頃研究室に顔を出せませんでした。そのような中でも着実に実験を進行してくれた猪飼元紀君、杉浦領亮君、西尾秀登君、加納侑岳君、黒木善生君へは、言葉には表しきれないくらいの感謝の気持ちでいっぱいです。本当にありがとうございました。

最後に、私をあらゆる面で支えてくれた家族に深く感謝の意を表して、謝辞とさせていただきます。

2013.9 坂口 稔