

産業副産物を細骨材および混和材として利用した
セメントモルタルの物理的特性および耐久性に関する研究

2017年 3月

佐 藤 重 悦

産業副産物を細骨材および混和材として利用したセメントモルタルの
物理的特性および耐久性に関する研究

目 次

第 1 章 序論

1. 1	研究の背景	1
1. 2	本研究における強度の定義	5
1. 3	既往の研究	7
1. 4	研究の目的	
1. 4. 1	既往の研究等における未解決課題を踏まえた本研究の 目的	1 2
1. 4. 2	産業副産物の有効利用拡大のための新規課題の設定と 解決	1 3
1. 5	本論文の構成	1 5

第 2 章 実験概要

2. 1	第 2 章の概要	2 0
2. 2	リサイクル細骨材	2 1
2. 3	再生細骨材を用いたモルタルの基礎性状	2 4
2. 4	廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの長期暴露性状	2 6
2. 5	溶融スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの物 理的特性および耐久性に関する実験的検討	2 9
2. 6	溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解特性に関 する基礎的検討	3 4

2. 7	埋戻し材用低強度モルタルへのリサイクル材料の適用に関する実験的検討	3 5
2. 8	埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定	3 8
2. 9	埋戻し材用低強度モルタルのワーカビリティと強度の性能評価に関する検討	4 1
第3章 普通強度のモルタルおよびコンクリートへの適用に関する検討		
3. 1	第3章の概要	4 6
3. 2	短期的性能	
3. 2. 1	再生細骨材を用いたモルタル	4 6
3. 2. 2	廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル	5 7
3. 2. 3	溶融スラグ細骨材を用いたモルタル	6 0
3. 2. 4	溶融スラグ細骨材を用いたコンクリート	6 7
3. 2. 5	まとめ	7 1
3. 3	長期的性能	
3. 3. 1	再生細骨材を用いたモルタルの暴露試験	7 2
3. 3. 2	廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの暴露試験	7 4
3. 3. 3	溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの暴露試験	8 0
3. 3. 4	まとめ	8 3
3. 4	まとめ	8 4
第4章 埋戻し材用低強度モルタルへの適用に関する検討		
4. 1	第4章の概要	8 6
4. 2	リサイクル材料の適用に関する検討	
4. 2. 1	低強度モルタルの配合	8 6

4. 2. 2	廃ガラスカレットを細骨材に用いた場合のフライアッシュによるアルカリシリカ反応抑制効果の確認	8 7
4. 2. 3	細骨材種別がフロー値および強度に及ぼす影響の検討	8 8
4. 2. 4	フライアッシュ種別がフロー値および強度に及ぼす影響の検討	9 0
4. 2. 5	セメント種別および脱型の有無が強度に及ぼす影響の検討	9 4
4. 2. 6	フロー値および強度の目標値を満足する配合の選定方法	9 5
4. 2. 7	まとめ	9 8
4. 3	強度に基づく配合選定の検討	
4. 3. 1	低強度モルタルの配合	9 9
4. 3. 2	湿砂養生における強度の検討	9 9
4. 3. 3	地中埋設における強度の検討	1 0 0
4. 3. 4	水砂養生における強度の検討	1 0 3
4. 3. 5	配合選定方法	1 0 5
4. 3. 6	まとめ	1 0 7
4. 4	ワーカビリティと強度の性能評価に関する検討	
4. 4. 1	低強度モルタルの配合	1 0 8
4. 4. 2	ワーカビリティ試験の検討	1 0 9
4. 4. 3	フロー値とブリーディング率との関係	1 1 0
4. 4. 4	養生方法および強度試験の検討	1 1 1
4. 4. 5	室内試験における配合種別ごとの強度の検討	1 1 2
4. 4. 6	地中埋設試験における配合種別ごとの強度	1 1 3
4. 4. 7	品質の異なる再生細骨材を用いた場合の比較	1 1 4
4. 4. 8	セメント種別が低強度モルタルのワーカビリティと強度に及ぼす影響	1 1 6
4. 4. 9	細骨材種別が低強度モルタルのワーカビリティと強度に及ぼす影響	1 1 9
4. 4. 10	まとめ	1 2 2
4. 5	まとめ	1 2 3

第5章 試験施工および環境影響評価

5. 1	第5章の概要	1 2 5
5. 2	試験施工	
5. 2. 1	再生細骨材を用いたコンクリート	1 2 5
5. 2. 2	廃ガラスカレット細骨材を用いたコンクリートの 地先境界ブロックへの適用	1 2 7
5. 2. 3	埋戻し材用低強度モルタル	1 2 9
5. 2. 4	まとめ	1 3 3
5. 3	環境影響評価	
5. 3. 1	リサイクル細骨材の重金属溶出試験	1 3 4
5. 3. 2	CO ₂ 排出量の検討	1 3 5
5. 3. 3	まとめ	1 3 7
5. 4	まとめ	1 3 8

第6章 結論

6. 1	普通強度モルタルおよびコンクリートへの適用に関する 検討	
6. 1. 1	短期的性能	1 3 9
6. 1. 2	長期的性能	1 3 9
6. 2	埋戻し材用低強度モルタルへの適用に関する検討	1 4 0
6. 3	試験施工および環境影響評価結果	
6. 3. 1	試験施工結果	1 4 1
6. 3. 2	環境影響評価結果	1 4 1
6. 4	今後の課題	1 4 1

参考文献リスト

本論文に関連する発表論文

第1章 序 論

1. 1 研究の背景

(1) コンクリートのマテリアルフロー

平成24年度の我が国における総物質投入量は約16億600万トン¹⁾であり、主要建設資材の需要量は凡そ5億9,000万トン(平成25年度)²⁾となり、年度は異なるものの資源利用量の約37%を占めている。平成24年度の生コンクリートの出荷量³⁾が92,099千m³(約2.03億トン)であることから、日本の総物質投入量の13%程度がコンクリートに投入されていることになる。平成2年度に過去最大の出荷量(197,997千m³)を記録してから、コンクリートの生産量は減少する傾向にあるものの、依然として大量の資源投入が継続していることから、循環型社会の構築を図る上で、コンクリートのマテリアルフローは非常に大きなカギを握っていると言えよう。

(2) 本研究における基本的な考え方

コンクリートに求められる様々な性能を満足するために、コンクリート容積の7割程度を占める骨材の影響は大きい。コンクリートを経済的に製造するためには、この骨材をいかに現場に近い場所で調達できるかが重要である。

コンクリート用骨材は、天然骨材、人工骨材および副産物である各種スラグ骨材やコンクリートを解体して再生させた再生骨材など様々なものがある。これまで骨材として主に使用されてきた天然の砂利・砂や碎石・砕砂は、採掘・製造の際に、天然資源の消費、土地利用改変による生態系への影響、廃棄物の発生、地球温暖化および大気汚染などの環境負荷を生じる場合が多い。さらに残された天然の骨材資源は品質が低下傾向にある⁴⁾ことから、入手可能な天然資源をいかに有効活用することができるかも重要である。

以上の状況を鑑み、本研究では、環境負荷の抑制と資源の有効活用促進の観点から、産業副産物や廃棄物を有効活用するために、コンクリート構造物解体時に発生したコンクリート塊から再生粗骨材を製造する際に副産された再生細骨材、自治体により回収されたガラスびんを起源とする廃ガラスカレット、一般ごみを起源とする熔融スラグおよび石炭火力発電所で副産されたフライアッシュをコンクリート材料として、“**適材適所で、なるべく手を加えずにそのままに近い状態で、かつ単位量としてできるだけ多く使用すること**”を基本として実験的検討を行った。

(3) 産業副産物の発生・利用状況と一般的課題

様々な産業副産物のコンクリート用骨材や混和材としての適用性が検討されている^{例えば}⁵⁾。本研究で対象とした再生細骨材を含む「再生骨材」、「廃ガラスカレット」、「ごみ熔融スラグ」、「フライアッシュ」について、その発生状況等の現状を調査した結果について概要を述べる。

① 再生骨材

平成 24 年度の建設副産物実態調査^⑥によれば、建設廃棄物全体として再資源化等（再資源化＋縮減）率は 96.0 %であり、上昇傾向を示している。品目別に見ると、アスファルト・コンクリート塊およびコンクリート塊が、平成 12 年度以降高い再資源化等率を保っており、建設汚泥や建設発生木材はともに、最終処分の比率が大幅に低下している。この中で、コンクリート塊の再資源化等率は 99.3 %となっている。

コンクリート塊の再資源化等フロー（文献^⑥の図から内容を抜粋して新たに作成したもの）を図 1-1-1 に示す。

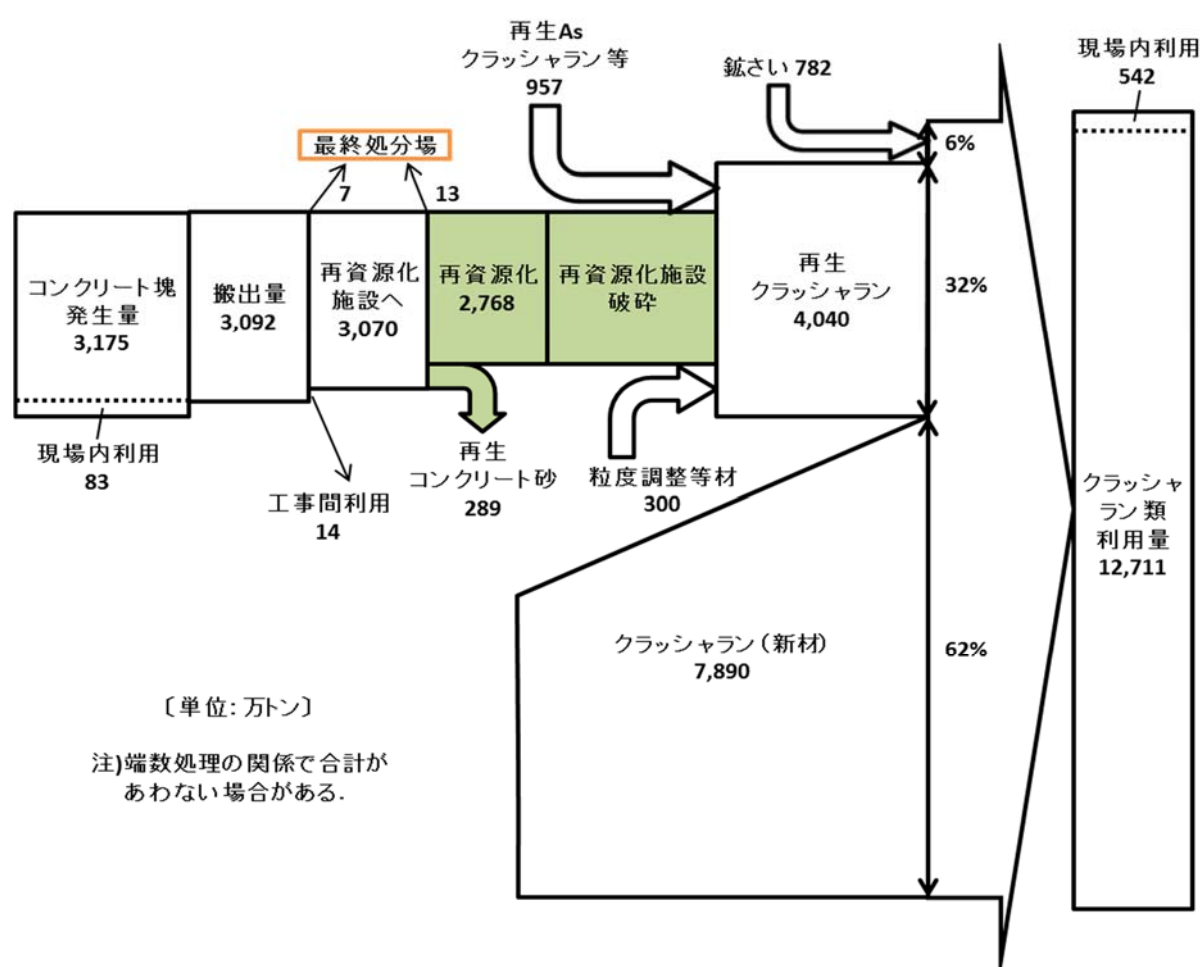


図 1-1-1 コンクリート塊の再資源化等フロー（平成 24 年度国交省調べ）

コンクリート塊の発生量は年間 3,175 万トンであり、このうち 83 万トンが現場内で利用され、残りの 3,092 万トンが現場から搬出される。この搬出量のうち 14 万トンが工事間利用にまわり、7 万トンが最終処分される。残りの 3,070 万トンが再資源化施設に送られ、選別・ふるい分けの後、289 万トンが再生コンクリート砂として利用され、13 万トンが最終処分される。残りの 2,728 万トンが再資源化施設で破碎され、アスファルト・コンクリート

塊から再資源化された再生 As（アスファルト）クラッシュラン等および粒度調整等材と混合され、さらに新材のクラッシュランや鉱さいと混合されて、クラッシュラン類として利用されている。今後はクラッシュラン類以外の新たな用途の開発が必要と考えられる。

再生骨材に関する JIS 規格は、コンクリート用再生骨材 H（JIS A 5021）、再生骨材 M を用いたコンクリート（JIS A 5022）および再生骨材 L を用いたコンクリート（JIS A 5023）である。この中で、特に再生骨材 M および再生骨材 L を用いるコンクリートは、再生骨材に含まれるセメントペースト量が多いため、乾燥収縮が大きくなるだけでなく、原コンクリートが非 AE コンクリートである場合には、耐凍害性に劣る可能性が高い。また再生骨材の原料であるコンクリート塊は、それが使用されていたコンクリートごとに材料・配合が異なっていると考えるのが適切である。そのため特定の構造物から得られるコンクリート塊に限定したうえで、原骨材に関する調査を事前に実施して製造しない限り、再生骨材の品質は大きくばらつく可能性があり、アルカリシリカ反応性を有する骨材が紛れ込む可能性もある。そのため再生骨材 M および再生骨材 L を用いたコンクリートの JIS では、コンクリートが使用される条件を限定して用いることが推奨されている⁷⁾。

② 廃ガラスカレット

国内におけるガラス瓶の出荷量⁸⁾は平成 25 年実績で 147.9 万トン、そのうちガラス瓶用カレットおよびその他の用途への再商品化量は 99.6 万トンとなっており、リサイクル率は約 67 %である。残りの 33 %は、市町村の回収時に色分けできずに資源化できないものや回収されないワンウェイ瓶などであり、廃棄されている。

廃ガラスカレットをコンクリート用骨材として使用する場合は、アルカリシリカ反応対策の必要性の有無を考慮すること、コンクリート用骨材としては発生量が非常に少ないこと、粒形が角張っていることから取扱いに安全上の注意が必要なこと、などである。

③ ごみ溶融スラグ

一般廃棄物、下水汚泥またはそれらの焼却灰を溶融固化したごみ溶融スラグ（以下、溶融スラグ）の生産量⁹⁾は、溶融施設の稼働数増加に伴って増大し、2008 年度に 86.6 万トンに達したがその後漸減、東日本大震災が発生した 2011 年度には 79.1 万トンとなっている。このうち 76.1 万トンが一般廃棄物起源であり、残りの 3 万トンが下水汚泥起源である。この溶融スラグの有効利用状況をみると、約 82 %にあたる 64.8 万トンが道路やコンクリート用の骨材、埋戻し・盛り土材、地盤・土質改良材などとして利用されているが、約 6%はストックされ、残りの約 12 %が最終処分されている。有効利用用途の中で最も大きな割合を占めるのが道路用骨材であり、有効利用量全体の 38.2 %を占めるが、次に大きい用途であるコンクリート用骨材は 16.1 %に過ぎない。

溶融スラグに関する JIS 規格は、一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材および同（追補 1）（JIS A 5031）がある。溶融スラグ

骨材を用いたコンクリートは、川砂と砕石を使用したコンクリートに比べて、空気量およびブリーディングの増大、スランプの低下、凝結時間の遅延等の傾向が認められ、28 日圧縮強度は溶融スラグ骨材の混合率の増加とともに減少するが、長期的には増進する傾向を示す。また、溶融スラグ骨材コンクリートは、普通骨材を用いたコンクリートと比較して、静弾性係数が大きく、長期性状として凍結融解抵抗性は低下する傾向があるが、長さ変化率は小さく、中性化深さは同程度である¹⁰⁾。

2008 年に社会問題化した建築物のポップアウト現象を受けて、溶融スラグ骨材は、JISA5308 に規定されるレディーミクストコンクリート、JIS A 5406 に規定される建築用コンクリートブロック、プレストレストコンクリートおよび建築物に用いるプレキャストコンクリートで、建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である部分に用いるものには用いてはならないとされたが、溶融スラグのコンクリート用骨材としての利用にはまだ「伸びしろ」があるように思われる。コンクリート用骨材のみならず、溶融スラグをより高度な建設資材として利用するための技術やシステムの確立が望まれる。

④ フライアッシュ

電力の安定供給に大きな役割を果たしている石炭火力発電所では、石炭燃焼に伴う副産物として大量の石炭灰（フライアッシュ、クリンカ）が産出される。石炭灰の産出量は、電力以外のものも含めると年間 1,000 万 t を超えており、今後も増加傾向にあると言われている¹¹⁾。

地球環境の保全や資源リサイクルなどの観点から 1991 年に「再生資源の利用の促進に関する法律」（通称リサイクル法）が制定され、2001 年には循環型社会の構築に向けての抜本的な法改正により「資源の有効な利用の促進に関する法律」として施行された。これらの法律において石炭灰が電気事業の「指定副産物」に指定され、有効利用促進を図るための技術開発が継続的に行われ、普及・拡大が進められている。

2007 年度の日本フライアッシュ協会の集約実績によれば、フライアッシュの主な有効利用用途は、セメント原料（粘土代替）、コンクリート混和材、トンネル裏込材、地盤改良材、建材、道路用、農水産用など多岐に亘っているが、その利用量は決して多くはなく、セメント原料への利用が全体の 6 割程度を占めているのが現状である。このセメント原料への利用を減少させることは、他の廃棄物のセメント原料への利用を可能とし、CO₂削減にも寄与すると考えられることから、セメント原料への依存を軽減して、他の用途への有効利用を拡大させることが地球環境保全の観点からも望まれる。なかでも、コンクリートへの利用は、フライアッシュの特長であるボゾラン活性やボールベアリング効果などを最も有効に活かせる用途であるが、諸外国に比べ、我が国ではフライアッシュの普及・拡大が進んでいるとは言いがたい状況である。その原因は、多品種の海外炭使用によるフライアッシュ品質のバラツキが大きいこと、供給体制の整備不足、研究事例が少なく配合設計手法が未整備であること、ユーザーへの PR 不足などが考えられる。

フライアッシュに関する JIS 規格は、コンクリート用フライアッシュ (JIS A 6201) がある。フライアッシュを用いたコンクリートは、フライアッシュの強熱減量値の変動により、コンクリートの空気量およびスランプ等の諸性状の管理が困難になる場合があるが、フライアッシュ用 AE 剤等により所定の空気量とスランプを安定して確保することが図られる。一般にフライアッシュは、これを使用したコンクリートの流動性を向上させ、所定のスランプを得るための単位水量を低減することができる。しかし、強熱減量値の大きいフライアッシュを用いた場合は、コンクリートの単位水量の低減を期待することは難しい。また、フライアッシュを用いたコンクリートの凝結時間は、フライアッシュを用いないコンクリートに比べて長くなる傾向があり、水和による発熱量は小さい。フライアッシュをセメント代替として内割りで混和した場合は、コンクリートの強度は比較的初期材齢では幾分減少するが、長期ではポズラン反応により強度は増進し、無混和コンクリートと同等以上の強度になる¹²⁾。

フライアッシュのコンクリートへの利用は、施工性能の向上、温度ひび割れの抑制、耐久性の向上、長期強度の増進、アルカリシリカ反応の抑制など、コンクリートの性能向上に係わるもののみならず、セメント代替による CO₂ 排出量の削減、近年の骨材事情の悪化に伴う細骨材の代替材料としての利用など、地球環境保全の観点からも普及・拡大を図る必要があると考えられる。

1. 2 本研究における強度の定義

本研究におけるモルタル・コンクリートの強度の定義と低強度モルタルの位置付けを図 1-2-1 に示す。

JIS A 5308 レディーミクストコンクリート (表 1-レディーミクストコンクリートの種類) では、普通コンクリートは、粗骨材の最大寸法が 20, 25 mm でスランプが 8, 10, 12, 15, 18 cm の場合、呼び強度 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 40, 42, 45 の 10 種類が定められている。そこで本研究では、「普通強度」の範囲を 18 N/mm² 以上 50 N/mm² 未満、「低強度」の範囲を 18 N/mm² 未満と定義した。

一方、アメリカでは、自己充填性を有し、硬化後の機械掘削が可能なモルタルが埋設管の基礎や埋戻し材、空洞の充填材などに用いられている¹³⁾。ACI Committee 229 では、この種のモルタルを CLSM (Controlled Low-strength Materials) と呼んで、材齢 28 日における圧縮強度が 8.3 N/mm² 以下のものと定義している。

CLSM の特徴は、以下の通りである。

- ① 自己充填性を有し打込みが容易で施工の省力化が可能
- ② 通常の締固めた土や砂質土より支持力が大きく透水性が低い
- ③ 解体時の掘削が可能
- ④ フライアッシュ、他の副産物やリサイクル材料の有効利用が可能

機械掘削が可能な圧縮強度は一般に、 2 N/mm^2 以下であって、 $0.3 \sim 0.7 \text{ N/mm}^2$ の低強度モルタルは良く締固められた土と同程度の強度であり、容易に機械掘削でき、埋戻し材としての強度も十分有している。

以上を踏まえ、本研究における「低強度モルタル」の圧縮強度は 18 N/mm^2 未満のものと定義し、特に CLSM と同様の特徴を持つ $0.3 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ の強度範囲の低強度モルタルを「埋戻し材用低強度モルタル」、 2.0 N/mm^2 を超えかつ 18 N/mm^2 未満のものを「その他の低強度モルタル」と呼ぶこととした。

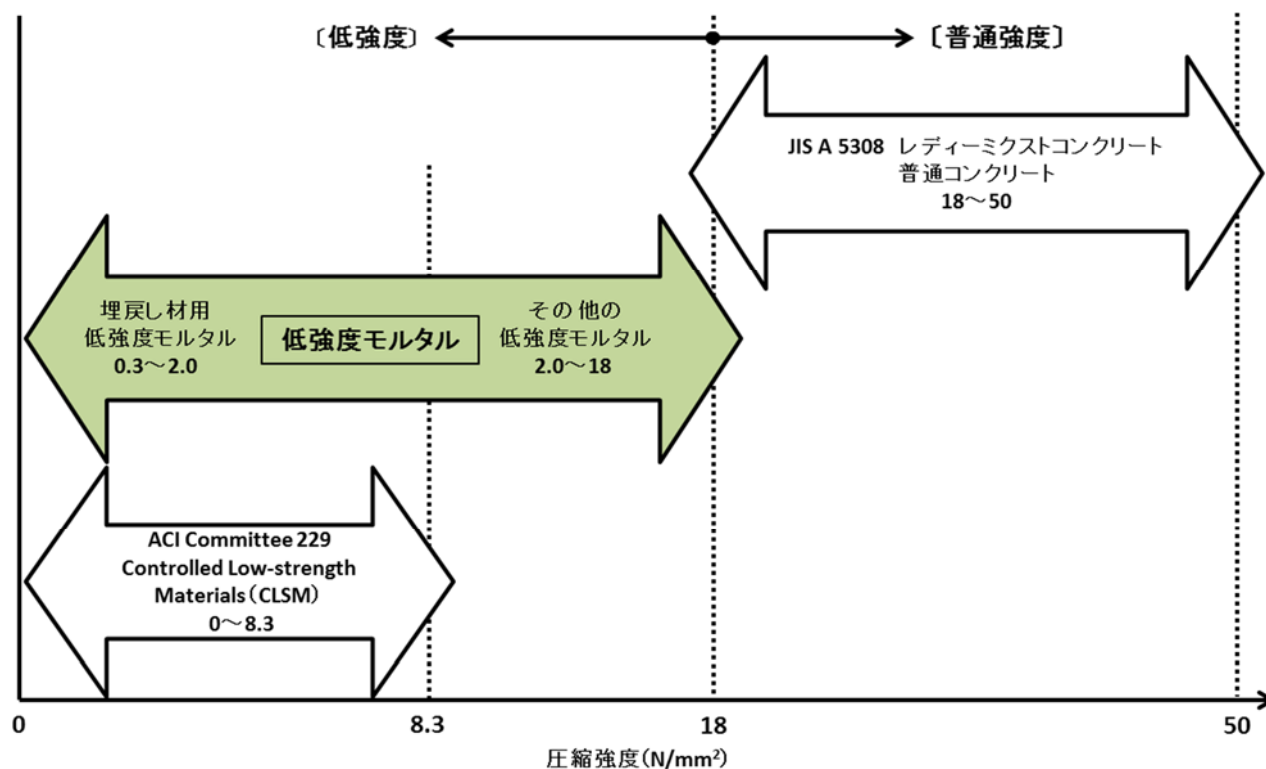


図 1-2-1 本研究におけるモルタル・コンクリートの強度の定義と低強度モルタルの位置付け

1. 3 既往の研究

本研究で対象としている産業副産物由来の骨材・混和材およびアプリケーションに関する最近の他の研究の概要を以下に述べる。

(1) 再生骨材

再生骨材については、JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H が 2005 年に、JIS A 5022 再生骨材 M を用いたコンクリートが 2007 年に、JIS A 5023 再生骨材 L を用いたコンクリートが 2006 年にそれぞれ制定され、改正を経て現在に至っているが、その普及状況は十分とはいえない。コンクリート用再生骨材の普及を図るためには、各種再生骨材の実験データおよび施工データを蓄積・整備する必要がある。また、再生骨材を製造する過程での環境負荷をいかに低減するか、このことは製造コストの低減にもつながると考えられる。新材に比較して品質の劣る再生骨材の効果的かつ効率的な品質改善法の開発も重要である。さらに、低品質再生骨材のコンクリート以外の用途への適用の検討が必要と考えられる。

本研究では再生細骨材を検討の対象としていることから、再生細骨材または再生細骨材および再生粗骨材を対象としている最近の研究について調査した概要を述べる。

コンクリート用再生骨材普及のための再生骨材実験データおよび施工データ蓄積・整備を目的として、渡邊ら¹⁴⁾は、再生骨材 H の製造コスト高や性質の周知不足が原因で積極的使用に至っていないことから、再生骨材 H の実験データを整備するため、再生細骨材 H を使用したコンクリートの試し練りを実施し、フレッシュ性状および硬化性状、耐久性に関する検討を行った結果、再生細骨材 H の使用割合が多いほど、所要のワーカビリティを得るための化学混和剤の添加率が低くなること、また、圧縮強度、長さ変化率や中性化深さ、凍結融解抵抗性をはじめとする試験を通して、強度や耐久性は通常のコンクリートと同等であることを確認したとしている。

山田ら¹⁵⁾は、低品質再生骨材の割合と含水状態を変化させたコンクリートの配合を設定して、実機での圧送を実施し、圧力センサーによる管内圧力の測定と圧送前後のコンクリートにおける品質の違いについて検討した結果、普通コンクリートと比べ、再生骨材を使用したコンクリートでは、再生骨材の割合が多くなるにつれてスランプの低下は抑制され、また同一の配合であっても含水状態の違いによって圧送性、圧送前後の圧縮強度の変動、間隙通過性、材料分離抵抗性は異なることを明らかにしたとしている。

松田ら¹⁶⁾は、再生骨材コンクリートの実用化を目指して大臣認定を取得、実構造物の基礎・基礎梁および場所打ち杭に適用し、施工前および施工期間中の再生骨材ならびに再生骨材コンクリートの品質管理は国土交通大臣認定に従って行なった結果、製造した再生骨材コンクリートは全て品質管理基準を満足しており、普通骨材を用いたコンクリートと同様に施工することができたとしている。

また、再生骨材を製造する過程での環境負荷低減を意識して、田端ら¹⁷⁾は、塩化物を含

有した海洋コンクリート塊から製造した再生骨材をコンクリート用骨材として利用する検討は積極的には行われていないことから、骨材の製造時に環境負荷の少ない再生骨材 L に着目し、塩化物イオン含有率 0.0～0.3 %の再生細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状、強度および鋼材腐食を検討した結果、再生細骨材中の塩化物イオンの多少は、スランプロス、空気量ロス、ブリーディング量、加圧ブリーディングおよび凝結時間に影響を及ぼさなかったとしている。

篠崎ら¹⁸⁾は、簡易処理された低品質の再生骨材 L を用いたポーラスコンクリートを保水性舗装材に適用することを想定して、吸水試験や保水試験、実際の冷却効果を検討するための屋外曝露試験を実施し、普通骨材との比較や粒径の影響を検討した結果、再生骨材 L の付着モルタル分が吸水量や保水量の増加に寄与しており、ポーラスコンクリートに再生細骨材 L を用いることで冷却効果を高められることが確認されたとしている。

一方、再生骨材の効果的かつ効率的な品質改善法の開発を目的として、小川ら¹⁹⁾は、再生細骨材の品質改善法について、再生細骨材のキャラクターと再生モルタルの流動性、強度特性の間の関係を多変量解析で評価した結果、流動性には再生細骨材の実積率と微粒分量が、圧縮および曲げ強度には骨材中欠陥率、表面平滑度等が影響することを示し、実積率を増大しかつ骨材欠陥率を低減するには、ボールミルや整粒機による磨砕作用が効果的であり、粒の表面はボールミルよりも整粒機で製造した方が凸凹した形状であり、再生モルタルの強度が高くなるとしている。

六名ら²⁰⁾は、乾式堅型ロッドすりもみ装置を用いて低環境負荷で再生骨材を製造し、得られた再生粗骨材 M、再生細骨材 L、再生微粉を利用して再生骨材コンクリートを製造、再生細骨材 L は炭酸化のみによる改質を行い、再生細骨材 L の改質の有無、再生微粉の混入がコンクリートの強度等に及ぼす影響について検討を行った結果、再生粗骨材 M のみを用いた場合は、普通粗骨材を用いた場合と同等の強度を示し、再生細骨材 L を改質すると、改質しない場合と比べて強度は大きくなり、普通骨材のそれより大きい値を示した。さらに、再生微粉を混入することで強度は大きくなり、弾性係数は再生骨材を用いることで小さくなったとしている。

これに対し、低品質再生骨材のコンクリート以外の用途への適用について、飯笹ら²¹⁾は、「水中コンクリート内パルス放電法」を用いて、コンクリートからパルス再生細骨材を回収し、海域環境回復のための覆砂の代替材としてパルス再生細骨材の適用性を検討するために、アサリを用いた魚類急性毒性試験を実施した結果、pH、および粒度がアサリの生存個体数に影響を与える事が明らかとなり、比重分離による軽量セメント分の除外、および中性化によってアサリの斃死数が低減されることが判明し、六価クロムの溶出基準も満たしており、パルス再生細骨材が覆砂の代替材として適用できる可能性を示したとしている。

（２）廃ガラスカレット

廃ガラスカレットは、コンクリート用骨材としての JIS 化がなされていないこと、コンクリートに用いた場合のアルカリシリカ反応が懸念されること、および発生量そのものが少ないことなどから、コンクリート用骨材への適用を検討した研究は数多くない。廃ガラスカレットに関連する最近の研究について調査した概要を述べる。

内田ら²²⁾は、廃ガラスのコンクリート二次製品への応用を想定し、廃ガラスの反応性骨材としての特性について、混入率、粒度ならびに初期養生条件の観点から評価したところ、単一粒度の廃ガラスを一定量置換して比較した結果、廃ガラスの粒度ペシマムが存在することを確認、廃ガラスは混入率が 40 %以上になると無害でない膨張反応を示し、混入率 80 %付近にペシマムが存在すること、また初期養生条件のうち、蒸気養生ではアルカリシリカ反応抑制効果は見られなかったが、圧力養生ではアルカリシリカ反応抑制効果を発揮したこと、さらに、圧力養生は蒸気養生に比べて圧縮強度等に与える影響が小さいが、養生時間が強度発現に影響を及ぼすことが明らかとなったとしている。

一方、村上ら²³⁾は、リサイクル資材による生物対応型エコマテリアルの開発を主眼に、屋上緑化基盤としての廃ガラス発泡骨材を用いたポーラスコンクリートの基礎物性試験ならびに芝の植生試験を行い、基礎物性として、空隙率、圧縮強度および赤外線ランプ照射試験による保水性が調べた結果、廃ガラス発泡骨材ポーラスコンクリートは、圧縮強度は小さいが、超軽量により屋上積載荷重の軽減がはかれること、ゼオライト骨材ポーラスコンクリートを保水層とする 2 層構造板により保水性が向上し、芝草丈の成長量増加に効果を有することなどが分かったとしている。

また、江藤ら²⁴⁾は、地上波アナログテレビジョン放送終了によって大量に廃棄されている、鉛を含有したブラウン管テレビのガラスを放射線遮蔽モルタル構造に使用するため、使用材料、混合割合、寸法および構造等の検討を行った結果、細骨材に密度の大きい製鋼酸化スラグおよび廃ブラウン管ガラスカレットを使用したモルタル板と廃ブラウン管ガラスカレットをパラフィンで封入して形成した積層構造が、放射線遮蔽効果が高いことが分かったとしている。

（３）溶融スラグ細骨材

コンクリート用溶融スラグ骨材については、JIS A 5031 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材が 2006 年に制定されたが、その後 2010 年の JIS A 5031 追補 1 により改正され、適用範囲の見直し等が行われた。溶融スラグ骨材普及の課題は、実環境における暴露試験等による耐久性の検討を中心とした実験・施工データのさらなる整備およびポップアウトに代表される劣化現象に対する懸念の払拭ではないかと思われる。ごみ溶融スラグ骨材に関する最近の研究の概要を述べる。

尾上ら²⁵⁾は、宮崎県中央部 10 市町村で発生する一般廃棄物および産業廃棄物のうち、可燃ごみを焼却処理して得られる熔融スラグをコンクリート用細骨材として適用するための室内試験の結果、スラグ置換率 25%までであれば、熔融スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状、力学特性および耐久性は普通コンクリートと同等以上となること、スラグ置換率を大幅に高める場合にはフライアッシュの併用が効果的であることが明らかとなり、さらに、実工場にて熔融スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品を試作し、スラグ置換率 30 %までの範囲で、その耐荷性能および環境影響に問題のないことを確認したとしている。

また、河野ら²⁶⁾は、豊田市渡刈クリーンセンターにて製造されたごみ熔融スラグを川砂と置換し、細骨材として用いた場合、その置換率がブリーディング、圧縮強度、凍結融解抵抗性等にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的として行った実験結果から、実験で用いた配合ではスラグ置換率が高くなるに従ってブリーディング率が高くなるが置換率が 50 %であっても 4.2 %未満であること、スラグ置換率が 50 %までについては大きな圧縮強度の低下を生じないこと、細骨材のスラグ置換率が 50 %までならば凍結融解に対して高い抵抗性を有していること、等の知見を得たとしている。

同様に、小川ら²⁷⁾は、都市ごみ熔融スラグ細骨材を対象に、置換率を要因として基礎物性を検討、さらに実構造物への使用を目指し、封かん養生 7 日後の屋内気中曝露した場合の物性を検討した結果、ごみ熔融スラグ細骨材を混入したコンクリートは、標準養生においては普通コンクリートと同等の強度を有するが、乾燥曝露した場合、普通コンクリートより強度が低下し、養生条件の影響を大きく受けることを示し、標準養生ではみられなかったごみ熔融スラグ細骨材を混入したコンクリートの強度の差異が、乾燥曝露することによって顕在化する原因を、乾燥下で潜在水硬性が発揮されなかったためとしている。

一方、熔融スラグ骨材を用いたコンクリートの耐久性について、川上ら²⁸⁾は、一般廃棄物および下水汚泥に由来する熔融スラグを細骨材または粗骨材として用いたコンクリートの材齢 10 年までの性状について考察し、熔融スラグを骨材としたコンクリートは、天然骨材を用いたコンクリートに比べ、圧縮強度は同程度か若干低下するが強度発現を阻害されることはなく、静弾性係数は大きく、長さ変化率は小さく、中性化の進行は遅延すること、また熔融スラグには潜在的な反応性を有するものがあり、材齢 4 年までの期間にポップアウトの発生を確認したとしている。

また、高田ら²⁹⁾は、熔融スラグ細骨材は JIS に規定されコンクリート用としても広く利用されているが、この材料でコンクリートのポップアウト現象の発生の可能性が指摘され、平成 22 年 7 月には JIS A 5031 の追補改正により注意喚起がなされたこと、また平成 23 年 3 月に（財）建材試験センターの調査研究でポップアウトの確認試験方法が提案されているものの適応事例は少ないことから、実プラントの熔融スラグを用いて、提案された確認試験

方法（案）に従ってモルタルによる評価試験とコンクリートでの評価試験を試みた。また、ポップアウト抑制に有効とされる自然エージング及び蒸気エージングの試験を行い、その効果を検討した結果、ポップアウトに対し、エージングは一定の効果があるとしている。

（４）低強度モルタル

産業副産物の有効利用を進める上で、それを用いたコンクリートのアプリケーションの拡大も必要である。本研究ではアプリケーションの一つとして「低強度モルタル（Low-Strength Mortar）」に焦点をあてた。「低強度モルタル」はその特性や用途において、北米で普及しているスラリー状の埋戻し材である CLSM (Controlled Low-Strength Material) とほぼ同じである。CLSM は、日本では制御型低強度材料と訳され、現在まで国内での使用実績はほとんどない³⁰⁾が、同様の用途に用いられるものとして流動化処理土がある。以下に、CLSM および流動化処理土に関する研究の現状を述べる。

① CLSM

CLSM について水口ら³⁰⁾は、使用材料は細骨材、セメント、フライアッシュ、水、混和剤が用いられ、その要求品質は、①強度（一軸圧縮強さ）、②流動性（フロー値）、③材料分離抵抗性（ブリーディング率）で評価するが、基準値は使用目的や適用範囲により異なり、一般的な基準値では、一軸圧縮強さが材齢 7 日で $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$ 程度、フロー値が 200～220mm 程度、ブリーディング率が 3 %未満であること、その特徴は施工後の再掘削が容易にでき、流動性・自己充填性・自己硬化性に優れていることであるとしている。

さらに、この CLSM について水口らは、室内実験および試験施工を行い、その結果について、①CLSM の配合設計の考え方、②一軸圧縮強さ、③凍上試験結果、④フライアッシュ品質の違いによる配合への影響、⑤空気量による影響、⑥プラントと現場の品質変動、⑦現場でのブリーディング率、⑧管内充填度試験結果、について報告している。

② 流動化処理土

低強度モルタルと同様の用途に、日本では流動化処理土が用いられている。流動化処理土の力学特性はセメント改良土と同様である。

木幡³¹⁾は、建設リサイクル法の制定などを受け、石炭灰や鉄鋼スラグなどの再利用用途として、流動化処理土を用いる場合が見られるようになってきているが、流動化処理土は密度を小さくしすぎると多量の水を含む貧配合のモルタルになってしまい、乾燥した場合には非常に脆くなる。したがって、作製方法や適用箇所を誤ると、予想外の沈下や崩壊といった事態を招く恐れもあることから、事前の配合試験を十分に行うことが重要であること、および狭隘な箇所では、埋戻し材に山砂を使っても十分な締固めができないことから、そのような箇所への流動化処理土の利用は極めて有効と考えられ、今後は地震災害時など供用中の挙動について詳細な調査が必要としている。

1. 4 研究の目的

1. 4. 1 既往の研究等における未解決課題を踏まえた本研究の目的

(1) 再生骨材

前述した近年の研究では、かつての品質の良い再生骨材 H から、製造時の環境負荷が少ない再生骨材 M や低品質の再生骨材 L にシフトしてきており、さらに再生骨材製造時の環境負荷を小さくすることは、製造コストの低減につながると考えられる。本研究では、環境負荷のさらなる低減を意図して、製造時の環境負荷が小さい再生骨材 L および再生骨材 L にも該当しない低品質の再生細骨材を対象とした。この再生細骨材は、品質改善等の処理を行わず、得られた再生骨材の 5 mm ふるい通過分をそのまま用いることを原則とした。また、既往の研究における耐久性の検討は、凍結融解試験や促進中性化試験等によるものが多く、実環境での暴露試験による耐久性の検討例は少ない。本研究では、積雪寒冷地での 17 年間の屋外暴露試験を実施して、低品質再生細骨材のコンクリート用細骨材としての利用方法および利用する場合の留意点等を耐久性の視点を含めて示すとともに、アプリケーションとして低強度モルタルへの適用という新たな用途を提案することとした。

(2) 廃ガラスカレット

村上ら²³⁾が用いている廃ガラス発泡骨材は、製造する際の環境負荷およびコストが懸念されるが、本研究で用いる廃ガラスカレットは、地方自治体が回収、分別、破碎し、5 mm ふるいを通過したものをそのまま用いることを原則としたため、製造時の環境負荷およびコストは低いと考えられる。また、廃ガラスカレットを用いたコンクリートの耐久性に関する検討例はほとんどない。本研究では、廃ガラスカレットを用いたモルタルの、積雪寒冷地における 15 年間の屋外暴露試験を実施することとし、さらにコンクリート地先境界ブロックを試験施工して 15 年間継続観察することにより耐久性を検討し、廃ガラスカレットがコンクリート用細骨材としての利用可能性を検証することとした。さらに、新規アプリケーションである埋戻し材用低強度モルタルへの適用の可能性についても検討を行うこととした。

(3) 溶融スラグ細骨材

ごみ溶融スラグ骨材を用いたコンクリート等の暴露試験等による耐久性に関するデータの蓄積はこれまでほとんど無い。さらに実際に使用されている溶融スラグ骨材のアルカリシリカ反応性の有無の検証についても改めて必要な時期に差し掛かってきている。そこで本研究では、産地の異なる 2 種類のごみ溶融スラグを対象として実験的検討を行い、耐久性の検討については、凍結融解試験に加え、積雪寒冷地における屋外暴露試験を実施して、その性状を明らかにすることとした。

(4) 低強度モルタル

CLSM については、供試体の養生について基準となる方法が示されていないが、その強

度は養生方法の違いによって大きな影響を受ける。また、流動化処理土については、密度を小さくしすぎると多量の水を含む貧配合のモルタルになってしまい、乾燥した場合には非常に脆くなる³¹⁾。これは低強度モルタルについても同様と考えられるが、埋戻し材として用いられる場合には、地下水に曝される環境における検討が必要と考えられる。このことから本研究では、既往の研究ではほとんど例がない実施工環境における地下水の有無や水分の影響を考慮した実験的検討を行い、目標性能を満足する低強度モルタルの配合選定法を提示することを目的とした。

1. 4. 2 産業副産物の有効利用拡大のための新規課題の設定と解決

前節で述べたこれまでの研究から抽出した課題に加えて、さらに研究を進め、再生骨材や副産骨材のコンクリート等への有効利用の拡大に向けて取り組むべきことは、以下の通りと考えられる。

- ① 再生骨材や副産骨材を用いた多様な実験や施工データの蓄積
- ② 中・長期の暴露試験などによる耐久性に関する性状の把握
- ③ コンクリート以外の新たな用途への適用性の検討

これらを踏まえて、本研究では強度レベルに応じたモルタルおよびコンクリートの各種性能評価と、実用を想定した試験施工、さらに本研究で対象としたモルタルおよびコンクリートの環境影響評価について検討を行うことを目的とした。

(1) 普通強度のモルタル・コンクリートに利用した場合の短期的性能および長期的性能

再生骨材や副産骨材を普通強度（一般に用いられる強度）のモルタルやコンクリートに用いた場合の実験等のデータは既に相当の蓄積があると考えられる。しかし、再生骨材や副産骨材はそれぞれ固有の特性を持っており、その特性も時間の経過とともに少しずつ変化していると考えられる。このため、現状において得られる再生骨材や副産骨材を普通強度のモルタルやコンクリートに用いた場合の性状を把握することは有意と考えられる。特に、これらに関する長期暴露試験等による耐久性の検討を行った例は少ない。

そこで本研究では、これらに関する実験によって得られた結果を時間軸で区分し、以下の通りに分けて検討・考察することとした。

- 1) 短期的性能：①フレッシュ時から材齢 91 日までの力学的性質
②各種室内促進試験による物理的性質
- 2) 長期的性能：材齢 1 年以上の暴露試験による各種性能評価

(2) 埋戻し材用低強度モルタルに利用した場合の適用性、配合選定方法およびワーカビリティと強度の性能評価に関する検討

本研究では、再生骨材や副産骨材のコンクリート以外の用途として「埋戻し材用低強度モルタル」（以下、低強度モルタル）を提案することとした。このため、これらの骨材の低強

度モルタルへの適用性を検討した上で、強度による配合選定の方法を検討する。さらに、実験によって得られた低強度モルタルのワーカビリティと強度の評価方法について、具体的に検討する。

（３）試験施工による適用性の検証および環境影響評価

上記（１），（２）等により得られたモルタル，コンクリートおよび低強度モルタルをいくつかのアプリケーションに試験的に適用し，その性能を検証する。これらの中には施工後 15 年以上経過しているものや東日本大震災を経ているものもあり，耐久性の検証結果としても有効な資料となり得る。

併せて，副産骨材の重金属溶出試験および再生骨材や副産骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの CO₂ 排出量の比較による環境への影響評価を行うことを目的とした。

1. 5 本論文の構成

本論文の構成（フローチャート）を図 1-5-1 に示す。

本論文は、以下に示す全 6 章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章は、本研究の背景、既往の研究、目的および本論文の構成について述べたものである。

第 2 章は、本研究で行った実験の概要について述べている。各実験について概説し、実験の中で特に重要な材料である産業副産物由来のリサイクル細骨材について述べた後、各実験の使用材料、配合および試験方法について説明している。

第 3 章は、産業副産物由来のリサイクル細骨材である再生細骨材、廃ガラスカレットおよびごみ溶融スラグ細骨材を一般的なコンクリートに適用することを想定して行った普通強度のモルタルおよびコンクリートの実験結果および考察について、「短期性能」と「長期性能」に分けて述べている。

第 4 章は、産業副産物由来のリサイクル細骨材である再生細骨材および廃ガラスカレットを埋戻し材用低強度モルタルに適用することを想定して行った実験結果および考察について、①適用性の検討、②配合選定方法の検討、③ワーカビリティと強度の評価方法の検討、の順に述べている。

第 5 章は、第 3 章の普通強度のモルタルおよびコンクリートに関する実験結果、さらに第 4 章の低強度モルタルに関する実験結果を踏まえて、リサイクル細骨材を用いたコンクリートや低強度モルタルなどの具体的なアプリケーションへの適用例としての試験施工結果について述べている。併せて、リサイクル細骨材およびこれを用いたコンクリートについて環境影響評価を行った結果を示した。

第 6 章は、本研究で得られた知見を結論として取りまとめたものである。

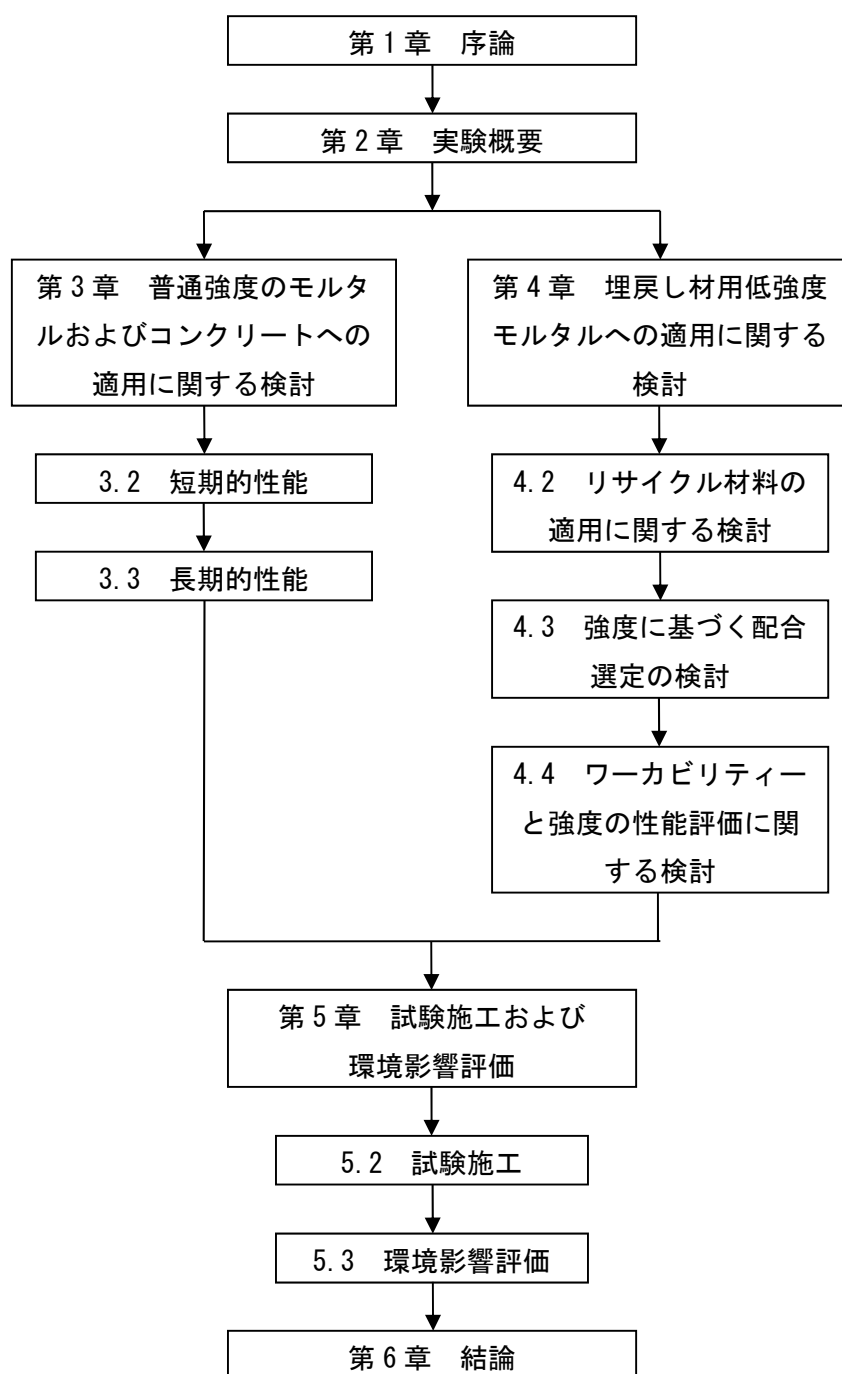


図 1-5-1 本研究の構成(フローチャート)

参考文献

- 1) 環境省：平成 27 年度版環境・循環型社会・生物多様性白書，状況，第 2 部，第 3 章，第 2 節，p.1，<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h27/html/hj15020302.html>（2015 年 9 月 28 日）
- 2) 建設副産物リサイクル広報推進会議：よくわかる建設リサイクル 2014-15，p.2，2014.11
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合会／全国生コンクリート協同組合連合会：生コンクリート製造業の概要，<http://www.zennama.or.jp/3-toukei/gaiyou/>（2015 年 9 月 29 日）
- 4) 日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，pp.1-3，2007.7
- 5) 日本コンクリート工学協会：廃棄物のコンクリート材料への再資源化に関するシンポジウム論文集，2002.9
- 6) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果参考資料，p.参考 1-9，<http://www.mlit.go.jp/common/001031803.pdf>（2017 年 1 月 7 日）
- 7) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案），pp.8-9，2014.10
- 8) ガラスびんリサイクル促進協議会：ガラスびんのマテリアルフロー図（平成 25 年度実績），http://www.glass-3r.jp/data/pdf/data_09.pdf，2015.9.5 確認
- 9) エコスラグ利用普及委員会：http://www.jsim.or.jp/ecoslag/03_04.html，（一社）日本産業機械工業会，（2015 年 9 月 5 日）
- 10) 川上勝弥：溶融スラグ骨材，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.107-108，2008.5
- 11) フライアッシュ有効活用小委員会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，（公社）土木学会コンクリート委員会，p.1，2009
- 12) 笠井芳夫，坂井悦郎：新セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，p.59，2007.1
- 13) W. S. Adaska：Controlled Low-Strength Materials，Concrete International，Vol.19，No.14，pp.41-43，1997
- 14) 渡邊真史，三本巖，我妻佳幸：【JCIy2014】再生細骨材 H を使用したコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1744-1749，2014
- 15) 山田悠二，橋本紳一郎，江本幸雄，伊達重之：低品質再生骨材の含水状態がコンクリートの圧送性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1465-1470，2013
- 16) 松田信広，竹内博幸，高橋祐一：中品質再生骨材を用いたコンクリートの実構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1516-1521，2012
- 17) 田端辰伍，宮里心一，網野貴彦，羽瀧貴士：塩化物を含有する再生骨材 L を用いたコンクリートの基礎的性状の把握，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.607-614，

2012

- 18) 篠崎真澄, 半井健一郎: 再生骨材を用いたポーラスコンクリートの蒸発冷却効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1468-1473, 2012
- 19) 小川秀夫, 名和豊春, 大矢嘉津, 山本一雄: 脆弱部除去による再生細骨材の品質改善法, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp.213-227, 2011
- 20) 六名良輔, 堺孝司, 北垣亮馬, 名取正夫: 低環境負荷再生骨材コンクリートの強度・弾性係数に及ぼす再生細骨材の改質と微粉の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1459-1464, 2013
- 21) 飯笹真也, 増田龍哉, 浪平隆男, 重石光弘: 水中パルス放電により回収された再生細骨材の海洋環境回復のための覆砂代替材として適用可能性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1411-1416, 2013
- 22) 内田美夏, 高田龍一, 野中資博, 佐藤周之: 廃ガラスを利用したコンクリート二次製品の開発に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.224-229, 2013
- 23) 村上聖, 武田浩二, 山口信, 佐藤あゆみ: 保水性を付与した廃ガラス発泡骨材ポーラスコンクリートの緑化基盤材への適用, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.516-522, 2014
- 24) 江藤優馬, 高海克彦, 駒田弘明: 廃ブラウン管ガラスカレットを用いた積層モルタル板の放射線遮蔽効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1975-1980, 2013
- 25) 尾上幸造, 関戸知雄, 中津隆雄, 中村公生: 宮崎県で製造されるごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.65, pp.268-275, 2011
- 26) 河野伊知郎, 中嶋清実, 齊藤和秀, 林孝明: ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.94-99, 2012
- 27) 小川由布子, 川村和正, 半井健一郎, 佐藤良一: ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの力学特性に対する養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1585-1590, 2013
- 28) 川上勝弥, 横室隆, 宮澤祐介: コンクリート用溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの材齢 10 年における性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.137-142, 2011
- 29) 高田龍一, 北辻政文, 高橋真治, 明石哲夫: 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートのポップアウトの抑制に対するエージングの効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.88-93, 2012
- 30) 水口洋, 小野寺収, 堀口敬, 井伊博之: CLSM (Controlled Low-Strength Material) の国内における適用について, テクニカルレポート, コンクリート工学 Vol.42, No.10,

pp.19-28, 2004

- 31) 木幡行宏：流動化处理土の力学特性と今後の課題，土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp.618-627, 2006

第2章 実験概要

2. 1 第2章の概要

第2章では、まず各実験の中で使用したリサイクル細骨材について触れた後、本研究で行った実験を概説し、各実験の使用材料、配合および試験方法について説明している。実験5～7は、わが国では普及していない「埋戻し材用低強度モルタル」を対象としており、独自の試験方法や評価方法を含めて提示している。

本研究における実験の一覧を表2-1-1に示す。

表2-1-1 実験の一覧

No.	実験の概要	強度の目安 (N/mm ²)
1	再生細骨材を用いたモルタルの基礎性状	普通強度 (18 以上 50 未満)
2	廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの長期暴露性状	
3	溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解特性に関する基礎的検討	
4	溶融スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの物理的特性および耐久性に関する実験的検討	
5	埋戻し材用低強度モルタルへのリサイクル材料の適用	低強度 (0.3 以上 2.0 以下)
6	埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定	
7	埋戻し材用低強度モルタルのワーカビリティと強度の性能評価に関する検討	

実験1～4は、再生細骨材、廃ガラスカレットおよび一般ごみを起原とする溶融スラグ細骨材を用いた普通強度のモルタルおよびコンクリートの実験である。

実験5～7は、廃ガラスカレット、再生細骨材および多量のフライアッシュを用いた低強度モルタルの実験である。

2. 2 リサイクル細骨材

本研究で使用したリサイクル細骨材および普通細骨材の物理的性質を表 2-2-1 および表 2-2-2 にそれぞれ示す。

表 2-2-1 リサイクル細骨材の物理的性質

試験項目	R1	R2	R3	R4	K1	K2	Sa1	Sa2	Si
粗粒率	3.65	3.23	3.12	3.25	2.82	3.99	2.69	2.59	3.36
絶乾密度(g/cm ³)	2.14	2.07	1.79	1.77	2.49	2.49	2.79	2.81	2.70
吸水率(%)	8.83	11.32	17.56	22.40	0.40	0.40	0.40	0.24	0.78
単位容積質量(kg/L)	1.35	1.27	1.28	1.29	—	1.49	—	—	—
微粒分量(%)	2.2	4.9	7.6	13.9	—	1.4	—	—	—

R1,R2,R3,R4：再生細骨材 K1,K2：廃ガラスカレット Sa1, Sa2,Si：溶融スラグ細骨材

表 2-2-2 普通細骨材の物理的性質

試験項目	N1	N2	N3	N4	N5	CS1	CS2
粗粒率	2.65	1.64	2.72	2.57	2.55	3.12	2.65
絶乾密度(g/cm ³)	2.45	2.50	2.50	2.51	2.63	2.61	2.58
吸水率(%)	3.47	2.95	3.03	1.98	1.01	2.24	3.47
単位容積質量(kg/L)	1.60	1.48	—	—	1.76	—	—
微粒分量(%)	1.2	2.2	—	—	1.4	—	1.2

N1,N2,N3,N4,N5：天然細骨材，CS1,CS2：砕砂

R1, R2, R3 および R4 は再生細骨材である。R1 は、実験室で強度試験を行ったコンクリート供試体を6年間ストックし、破碎して再生粗骨材を製造した際に発生した 5 mm 以下のものである。R2 は、秋田県大館市（旧田代町）の建造後 60 年経過した橋梁の解体時に発生したコンクリート塊を利用して再生粗骨材を製造した際に発生した 5 mm 以下のものである。R3 および R4 は、主に札幌市内の建築物解体時に発生したコンクリート塊から再生路盤材を製造した際に発生した 5 mm 以下のものであり、発生時期が異なるため品質が異なるものである。なお、この中で R1 および R2 の品質は、JIS A 5023（再生骨材 L を用いたコンクリート）附属書 A（規定）コンクリート用再生骨材 L に該当しており、R3 および R4 はこれにも該当しない低品質の再生細骨材である。このように本研究では、JIS 規格外も含めて低品質な再生細骨材の積極的利用を図るための実験的検討を行った。

K1 および K2 は廃ガラスカレットであり、秋田市で回収された主としてソーダガラスである。これを破碎、ふるい分けした 5 mm 以下のものであり、密度・吸水率は安定しているが、採取時期が異なるため品質が異なるものである。

Sa1, Sa2 および Si は溶融スラグ細骨材である。Sa1 および Sa2 は、秋田市のシャフト炉式ガス化溶融炉から排出された急冷スラグであり、採取時期が異なるため品質が異なる。Si は、石巻市の流動床式ガス化溶融炉から排出された急冷スラグである。溶融スラグ細骨材は、その化学組成が高炉スラグ微粉末に近いことから、潜在水硬性を持つ可能性があると考えられる。

再生細骨材 R4（札幌市産）を図 2-2-1 に、廃ガラスカレット K2（秋田市産）を図 2-2-2 に、溶融スラグ細骨材 Si（石巻市産）を図 2-2-3 に、溶融スラグ細骨材の粉砕に用いた卓上ボールミルの外観を図 2-2-4 にそれぞれ示す。



図 2-2-1 再生細骨材 R4（札幌市産）



図 2-2-2 廃ガラスカレット K2（秋田市産）



図 2-2-3 溶融スラグ細骨材 Si（石巻市産）

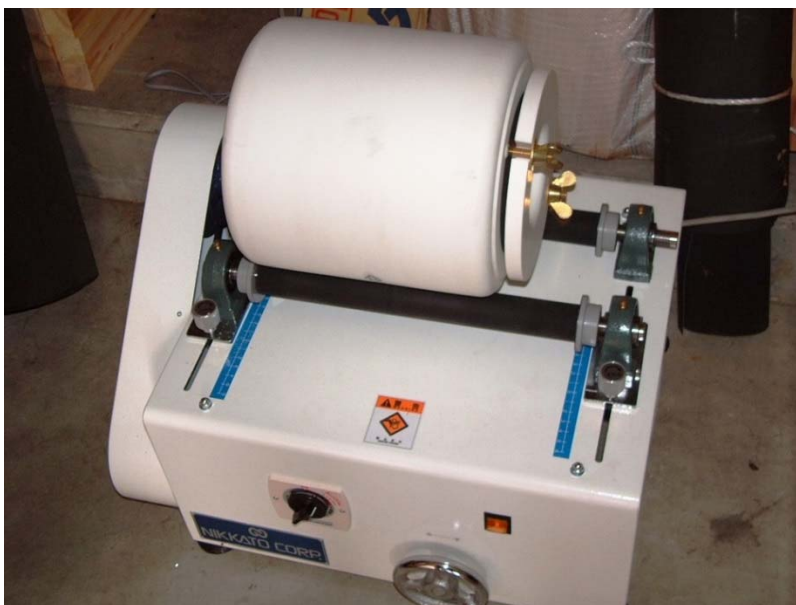


図 2-2-4 溶融スラグ細骨材の粉碎に用いた卓上ボールミル

N1, N2, N3, N4 および N5 は天然細骨材である。N1, N2 および N3 はいずれも秋田県産, N4 は宮城県産, N5 は北海道産である。

CS1 および CS2 は砕砂であり, いずれも秋田県産である。

2. 3 再生細骨材を用いたモルタルの基礎性状

本実験では、一次破碎のみでジョークラッシュにより再生粗骨材を製造した際に発生する 5 mm 以下の再生細骨材の活用を図るため、これを用いてモルタル供試体を作製し、①そのまま単味で用いた場合、②陸砂と混合し粒度を調整して用いた場合、③高性能 AE 減水剤を使用し単味で用いた場合について、単位水量、初期における耐凍害性を検討するための冬期屋外暴露環境下での質量変化率、乾燥収縮ひずみ、および各種養生条件での強度を測定して、川砂を用いた場合と比較し、上記②および③の改善の程度を考察した。その結果、②陸砂との混合および③高性能 AE 減水剤の使用による改善の有効性が明らかとなった。

(1) 使用材料

結合材は普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂 N1、再生細骨材 R1（実験室で強度試験を行ったコンクリート供試体を6年間ストックし、破碎して再生粗骨材を製造した際に発生したもの）およびこの再生細骨材 R1 と陸砂 N2 とを混合し、JIS A 5005（コンクリート用砕石及び砕砂）4.3.1 粒度の表 4 に示す範囲になるように調整した混合砂（質量比 55:45）を使用した。混和剤は、天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤（AE）、変性リグニン、アルキルアリルスルホン酸および活性持続ポリマーの複合体を主成分とする高性能 AE 減水剤（SP）を使用した。

(2) 再生細骨材を用いたモルタルの配合および製造

水セメント比（以下、W/C）を 40 %および 60 %の2種類とし、目標フロー値を設定するにあたり細骨材セメント質量比（以下、S/C）とフロー値の関係を求め、それぞれの W/C のモルタルの目標フロー値を 140 および 210 とし、質量法による空気量の測定を行った。

モルタル供試体成形用型（三連型枠）を用いて 40×40×160 mm の角柱供試体を JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて作製した。

(3) 冬期屋外暴露環境下における試験

モルタル供試体を作製後、1週間標準養生したものおよび脱型直後のものを、それぞれ秋田県大館市内の RC 建築物の西側に面した3階屋上に設置して暴露試験を行った。

秋田県大館市におけるモルタル供試体の冬期屋外暴露状況を図 2-3-1 に示す。暴露供試体の質量を最初の1週間は毎日、その後は1週間間隔で材齢 91 日まで測定した。



図 2-3-1 モルタル供試体の冬期暴露状況（秋田県大館市）

（４）乾燥収縮ひずみ測定

モルタル供試体を作製後，１週間標準養生したものを温度 20 ± 2 °C，相対湿度 60 ± 5 % の恒温恒湿庫内に静置して，JIS A 1129-2（モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第２部：コンタクトゲージ方法）に準じて長さ変化を測定した。測定は最初の１週間は毎日，その後は１週間間隔で材齢 91 日まで測定した。

（５）強度試験

屋外暴露および乾燥収縮ひずみ測定を行った供試体ならびに標準養生を行った供試体について，JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて曲げおよび圧縮強度試験を行った。強度試験材齢は 91 日とした。

2. 4 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの長期暴露性状

本実験では、廃ガラスカレットをコンクリート用細骨材として利用するために、これを細骨材として全量用いたモルタルの強度およびアルカリシリカ反応性試験を行った。さらにアルカリシリカ反応抑制対策として、セメントの一部を高炉スラグ微粉末およびフライアッシュに置換したモルタル供試体を作製して、積雪寒冷地において15年間の屋外暴露試験を行った。

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの混入によってアルカリシリカ反応が抑制されるのは、ポズラン反応によって生成したCa/Si比の小さいC-S-H水和物がアルカリを固定することと同時にセメント硬化体組織を密実にし、アルカリイオンの拡散・移動を抑制するためと考えられている³²⁾。

これらの暴露供試体の外観観察、質量減少率、動弾性係数および色彩色差計による表面色測定の結果、上記のアルカリシリカ反応抑制対策が有効であることおよび供試体表面の明度が劣化に対する指標になり得ることが示唆された。

(1) 使用材料

結合材は、普通ポルトランドセメント (C : 密度 3.15 g/cm³, 比表面積 3,310 cm²/g), 高炉スラグ微粉末 (BS : 密度 2.90 g/cm³, 比表面積 4,430 cm²/g) および JIS II 種相当のフライアッシュ (FA : 密度 2.33 g/cm³, 比表面積 3,840 cm²/g, 強熱減量 1.4 %) を使用した。

細骨材は、砕砂 (CS1 : 表乾密度 2.67 g/cm³, 吸水率 2.24 %, 粗粒率 3.12), 川砂 (N1 : 表乾密度 2.53 g/cm³, 吸水率 3.47 %, 粗粒率 2.65) および主としてソーダガラスの瓶を秋田市が回収・破碎した 5 mm 以下の未洗浄廃ガラスカレット (K1 : 表乾密度 2.50 g/cm³, 吸水率 0.40 %, 粗粒率 2.82) を使用した。

混和剤は、天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を 5 % 希釈溶液として使用した。

(2) モルタル供試体の作製

供試体は、砕砂 CS1 を用いた砕砂モルタル (NC), 川砂 N1 を用いた川砂モルタル (NR), 廃ガラスカレット K1 を細骨材に用いたカレットモルタル (K), アルカリシリカ反応抑制効果を期待して配合 K のセメント質量の 40 % を高炉スラグ微粉末 BS で置換したカレットモルタル (KB) および配合 K のセメント質量の 20 % をフライアッシュ FA で置換したカレットモルタル (KF) を水結合材比 W/B=60 %, 目標フロー値 210 の配合としてそれぞれ作製した。これらのモルタルは、スランプ 8 cm の土木用コンクリートのモルタル分を想定したものである。

JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じてモルタル供試体を作製し、フロー試験を行った後、モルタル供試体成形用型 (三連型枠) を用いて供試体を作製した。廃ガラスカレットは洗浄せずに細骨材として用いることを基本としたが、洗浄の有無がフロー値および強度に与える影響を明らかにするため、洗浄した廃ガラスカレットを細骨材に用いた

モルタル供試体も併せて作製し、基準とした砕砂 CS1 を用いた配合種別 NC とともに標準養生した。

同様に 100×100×400 mm の角柱供試体を作製し、2 週間の標準養生後に屋外暴露試験に供した。

（３）アルカリシリカ反応性試験および強度試験

細骨材として廃ガラスカレットを使用した場合は、アルカリシリカ反応により有害な膨張を引き起こすことが懸念される。このため、JIS A 1146（骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法））に準じて膨張率試験を行った。供試体の寸法は 40×40×160 mm であり、膨張率の測定は JIS A 1129-2（モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法（第 2 部：コンタクトゲージ方法））により行った。また、アルカリシリカ反応性試験終了後（材齢 182 日）の供試体を用いて、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて曲げおよび圧縮強度試験を行った。

（４）屋外暴露試験と測定項目

アルカリシリカ反応性試験の結果「無害でない」と判定された細骨材（川砂 N1 および廃ガラスカレット K1）を用いた配合について、JIS A 1132（コンクリートの強度試験用供試体の作り方）に準じてモルタル角柱供試体（100×100×400 mm）を 2 本ずつ作製した。材齢 1 日まで実験室内に静置後脱型し、材齢 14 日まで標準養生を行った後、秋田県大館市内の RC 建築物の西側に面した 3 階屋上に設置して暴露試験を行った。

RC 建築物の屋上における供試体暴露状況を図 2-4-1 に示す。



図 2-4-1 RC 建築物の屋上における供試体暴露状況（秋田県大館市）

暴露開始後10年までは年1～3回の頻度,その後15年経過時に写真撮影による外観観察,質量減少率およびJIS A 1127(共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数,動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法)に準じて動弾性係数を測定した。外観観察時には,供試体側面のL*a*b*表色系における明度を色彩色差計(三刺激値タイプ)により一面あたり3箇所(測定径50 mmの領域)で測定した。同配合の供試体2本の平均値を測定値とした。

暴露期間中の秋田県大館市の日平均気温の変化³³⁾を図2-4-2に示す。

暴露期間15年間の日平均気温の平均値は10.3℃,最高気温の平均値は30.2℃,最低気温の平均値は-10.0℃であった。この期間中の最高気温は37.5℃,最低気温は-19.0℃であり,凍結融解環境下であるが,冬期積雪時の供試体は積雪内の設置となっている。また供試体表面の含水状態による色のばらつきを避けるため,各供試体は測定・観察の1週間程度以上前に実験室内に搬入して,気乾状態で測定・観察を行った。

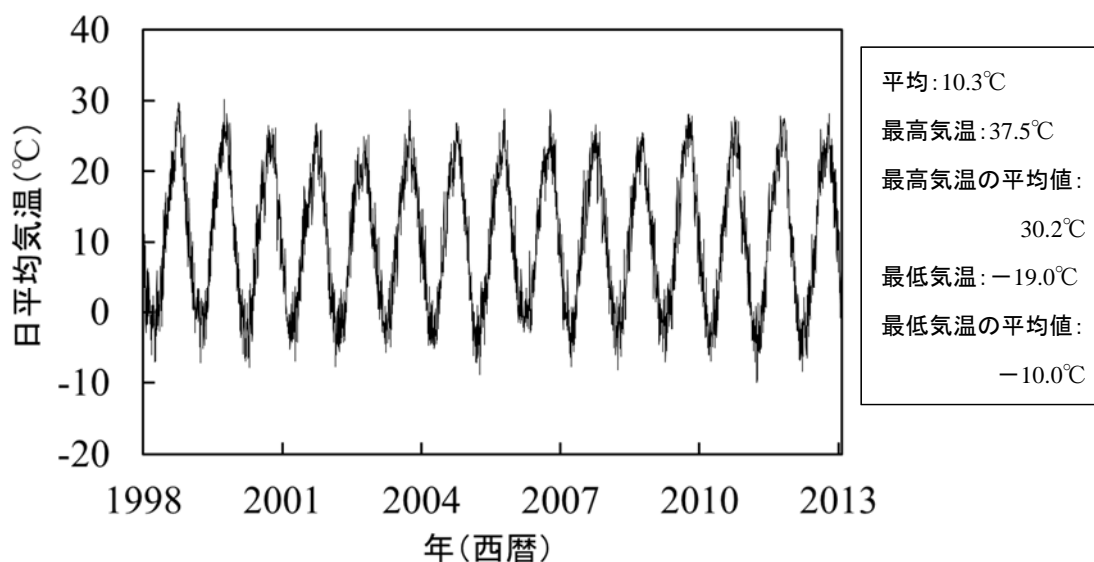


図 2-4-2 秋田県大館市の日平均気温の変化

2. 5 溶融スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの物理的特性および耐久性に関する実験的検討

本実験では、溶融スラグをコンクリート用細骨材に利用することを想定して、産地の異なる2種類の溶融スラグ細骨材に用いたモルタルを製造し、山砂に対する溶融スラグの置換率がモルタルのフレッシュ性状および強度に与える影響を検討した。さらに、急冷水砕処理により製造された溶融スラグの粒子性状改善のための卓上ボールミルによる溶融スラグの粉砕時間を変化させた場合について、同様の検討を行った。また、細骨材の一部を溶融スラグで置換したコンクリートを屋外暴露試験に供し、質量、動弾性係数およびコンクリート表面の明度について、天然砂を使用した場合と比較・検討した。その結果、溶融スラグの置換率および粉砕時間とそれを用いたモルタルおよびコンクリートの諸特性との関係が明らかとなった。

(1) 溶融スラグ細骨材を用いたモルタル

① 使用材料

結合材は、普通ポルトランドセメントを使用した。

モルタルの細骨材は、石巻広域クリーンセンター溶融施設(図2-5-1、流動床式ガス化溶融炉)で製造された5mm以下の溶融スラグ Si, 秋田市総合環境センター溶融施設(図2-5-2, シャフト炉式ガス化溶融炉)で製造された5mm以下の溶融スラグ Sa2 および宮城県大和町産の山砂 N4 を使用した。

溶融スラグ細骨材(秋田市産 Sa2)の粒子性状を図2-5-3に示す。



図2-5-1 石巻広域クリーンセンター溶融施設の外観



図 2-5-2 秋田市総合環境センター溶融施設の外観



図 2-5-3 溶融スラグ細骨材（秋田市産 Sa2）の粒子性状

また、溶融スラグ細骨材の品質改善を検討するため Si および Sa2 を卓上ボールミルで粉砕したものを細骨材として用いた。粉砕方法は、容量 7.3 リットルのポットミルに直径 30 mm のアルミナ製ボール 80 個（約 5 kg）および溶融スラグ 2 kg を入れ、ポットの回転速度 68 r.p.m. で所定の時間粉砕した。粉砕時間は 5 分、10 分、30 分および 60 分の 4 水準とした。

溶融スラグ細骨材種別ごとの粒度分布を図 2-5-4 に、溶融スラグ細骨材 Si（石巻市産）および Sa2（秋田市産）の粉砕時間ごとの粒度分布を図 2-5-5 および図 2-5-6 にそれぞれ示す。

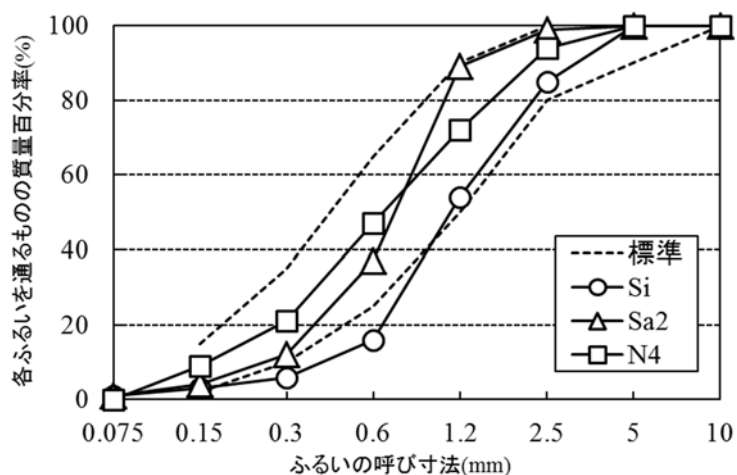


図 2-5-4 熔融スラグ細骨材種別ごとの粒度分布

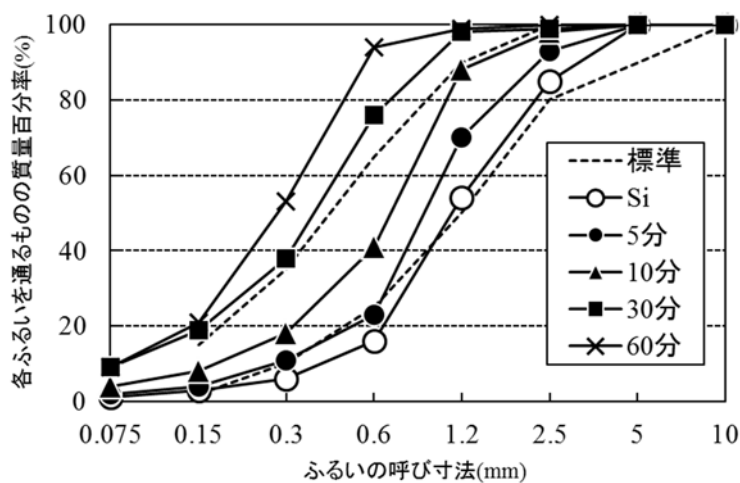


図 2-5-5 粉砕時間ごとの粒度の変化（石巻市産熔融スラグ細骨材 Si）

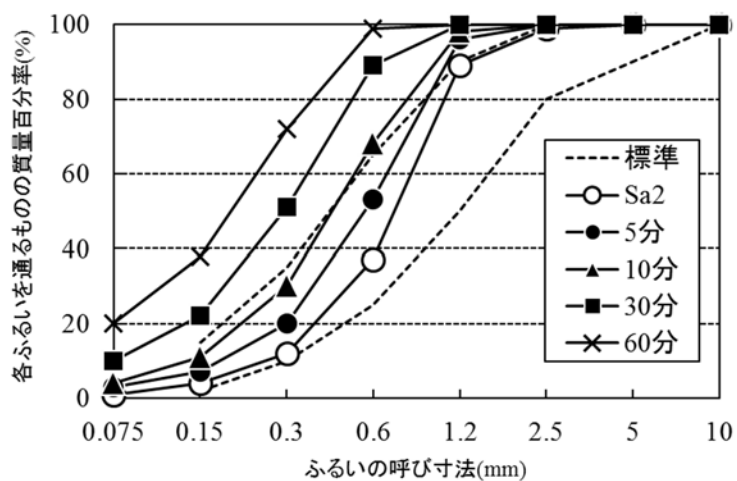


図 2-5-6 粉砕時間ごとの粒度の変化（秋田市産熔融スラグ細骨材 Sa2）

図中、破線の標準は JIS A 5005（コンクリート用砕石及び砕砂）による砕砂の粒度範囲である。熔融スラグ細骨材 Si が、ふるい目の呼び径 0.3～0.6 mm において、この粒度範囲外であった（図 2-5-4）。また、粉碎時間 30 分以上の熔融スラグは、すべてのふるい目の呼び径において、砕砂の粒度範囲外であった（図 2-5-5, 図 2-5-6）。なお、モルタルは細骨材種別による性状の違いを明確にするため、化学混和剤を使用しないプレーンモルタルとした。

② モルタルによる熔融スラグ置換率および粉碎時間の検討

山砂 N4 を細骨材に用いた W/C=60 %, S/C=3.0 の配合（N100）を基準とし、山砂 N4 と熔融スラグ細骨材 Si および Sa2 を質量比 30 : 70, 50 : 50 および 70 : 30 でそれぞれ混合した配合（Si30, Si50, Si70 および Sa30, Sa50, Sa70）および熔融スラグ Si および Sa2 を細骨材に全量用いた配合（Si100 および Sa100）のモルタルを作製し、フロー試験および質量法による空気量試験を行った。このとき、山砂 N4 と熔融スラグ細骨材 Si および Sa2 の混合砂は、すべて JIS A 5005（コンクリート用砕石及び砕砂）による砕砂の粒度範囲内であった。

熔融スラグ細骨材の粉碎時間による品質改善の検討は、スラグ置換率 50 %および細骨材の全量が熔融スラグ細骨材の配合について行った。また、一部の配合についてブリーディング試験を行った。モルタル供試体は、モルタル供試体成形用型（三連型枠）を用いて作製し、翌日脱型して標準養生を行い、所定の材齢（7 日、28 日、91 日）経過後 JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて強度試験を行った。

（2）熔融スラグ細骨材を用いたコンクリート

① 使用材料

コンクリートの細骨材は、熔融スラグ細骨材 Si および山砂 N4, 粗骨材は最大寸法 20 mm の砕石（絶乾密度 2.63 g/cm³, 吸水率 0.61 %）を使用した。混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマーの複合体を主成分とする高性能 AE 減水剤（SP）および天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤（AE）を使用した。

② 暴露試験

既往の文献³⁴⁾の配合を参考に、通常のコンクリート製品に用いられる設計基準強度 30 N/mm²が得られる配合（スランプ 6.0±1.5 cm, 空気量 5.0±1.5 %）とした。細骨材のスラグ置換率は質量比で 0 %, 30 %, 50 %の3水準とした。100×100×400 mm の型枠にコンクリートを打込み後、型枠ごと温度 60±5 °C, 相対湿度 95±5 %で1日、翌日脱型して標準養生で1日、その後12日間温度 20±1 °C, 相対湿度 60±5 %の気中でそれぞれ養生後、秋田県大館市内の RC 建築物の西側に面した3階屋上に設置して暴露試験を行った（図 2-4-1）。

試験中、質量、JIS A 1127（共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法）による動弾性係数および供試体表面の $L^*a^*b^*$ 表色系における明度 L^* を、色彩色差計（三刺激値タイプ、測定径 50 mm）を用いて測定した。なお、約 7 年間の暴露期間中、暴露地点である秋田県大館市の平均気温は 10.2 °C、最高気温は 35.7 °C、最低気温は -19.0 °C であり、冬期の暴露供試体は凍結融解作用環境下に置かれている。

2. 6 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解特性に関する基礎的検討

本実験では、シャフト炉式ごみ溶融炉から排出された溶融スラグをコンクリート用細骨材の一部として使用した場合の耐凍害性の程度を、耐久性指数、質量減少率、コンクリート表面の明度、強度の観点から検討した。その結果、溶融スラグ粒子に内在する欠陥によると思われる耐凍害性および明度の低下が発生することが明らかになった。

(1) 使用材料

結合材は普通ポルトランドセメント (C : 密度 3.16 g/cm^3)、粗骨材は最大寸法 20 mm の碎石 (密度 2.68 g/cm^3 , 吸水率 1.24%)、細骨材は天然砂 (N3 : 密度 2.58 g/cm^3 , 吸水率 3.03% , 粗粒率 2.72) および秋田市のシャフト炉式ガス化ごみ溶融炉から排出された急冷スラグ (Sa1 : 密度 2.80 g/cm^3 , 吸水率 0.40% , 粗粒率 2.69)を用いた。混和剤は、メタクリル酸系ポリマーを主成分とする高性能減水剤 (SP) とポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウムを主成分とする AE 剤 (AE) を用いた。

(2) コンクリート供試体の作製

配合設計では、通常のコンクリート製品に用いられる設計基準強度 30 N/mm^2 が得られるように、水セメント比 44.3% 、スランプの範囲 $6.0 \pm 1.5 \text{ cm}$ 、空気量の範囲 $5.0 \pm 1.5 \%$ を基準とし、細骨材のスラグ置換率を質量比で 0% 、 30% 、 50% および 70% の4水準としてコンクリート供試体を作製した。

(3) 凍結融解試験および明度の測定

凍結融解試験を JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法) の水中凍結融解試験方法 A 法に準じて行った。また、美観上重要となる供試体表面の $L^*a^*b^*$ 表色系における明度 L^* を、色彩色差計 (三刺激値タイプ、測定径 50 mm) を用いて各凍結融解サイクルにおいて測定した。

(4) コンクリートの強度試験

スランプおよび空気量試験を行った後、圧縮強度試験用として $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体を、凍結融解試験用として $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の角柱供試体をそれぞれ作製した。また、凍結融解試験終了後の供試体について JIS A 1106 (コンクリートの曲げ強度試験方法) に準じて曲げ強度試験を行い、さらにそれらの切片を用いて JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に準じて圧縮強度試験を行った。供試体の養生方法は、実際のコンクリート二次製品の養生方法に近づけるため、24 時間蒸気養生後 24 時間標準養生を行い、さらに 12 日間、各試験まで気中養生を行った。

2. 7 埋戻し材用低強度モルタルへのリサイクル材料の適用に関する実験的検討

本実験では、将来機械掘削される可能性がある場所を使用する埋戻し材用低強度モルタルを対象とした。このため、秋田県内で発生したリサイクル材料である廃ガラスカレット、再生細骨材、秋田県および山形県産の石炭灰フライアッシュを用いて、セメントの使用量を極力抑えた埋戻し材用低強度モルタル（目標フロー値 250 以上、目標圧縮強度範囲 0.3～2.0 N/mm²）の製造を試み、使用した材料の種別が低強度モルタルの諸特性に及ぼす影響および要求性能を満足する配合の選定方法について実験的検討を加えた。その結果から、埋戻し材用低強度モルタルの材料種別ごとの諸特性を明らかにするとともに、要求性能を満足する配合の選定方法を提示した。

（1）使用材料

① 細骨材

細骨材として、表 2-2-1 に示す廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 を使用した。廃ガラスカレット K2 は、主としてソーダガラスの瓶を秋田市が回収・破碎してふるい分けしたものであって、5 mm 以下の未洗浄のものを使用した。再生細骨材 R2 は、秋田県大館市（旧田代町）の建造後 60 年経過した橋梁の解体時に発生したコンクリート塊から製造された。このコンクリート塊を利用して再生粗骨材を製造する際に発生した 5 mm 以下のものを再生細骨材 R2 とした。

② フライアッシュ

石炭灰フライアッシュは、JIS II 種に相当し品質の異なる 3 種類、秋田県能代市産の Fa、山形県酒田市産の Fb および Fc を使用した。

石炭灰フライアッシュの物理的性質を表 2-7-1 に、秋田県能代市産の石炭灰フライアッシュ Fa の外観を図 2-7-1 にそれぞれ示す。

表 2-7-1 石炭灰フライアッシュの物理的性質

試験項目	能代市産 Fa	酒田市産 Fb	酒田市産 Fc
強熱減量 (%)	1.1~1.4	2.1	3.2
密度 (g/cm ³)	2.29~2.33	2.26	2.38
比表面積 (cm ² /g)	3,710~3,840	3,530	4,330



図 2-7-1 秋田県能代市産の石炭灰フライアッシュ Fa

③ セメント

低強度モルタルの圧縮強度を調節するため、普通ポルトランドセメント N および早強ポルトランドセメント H を使用した。セメントの物理的性質を表 2-7-2 に示す。

表 2-7-2 セメントの物理的性質

試験項目	普通 N	早強 H
強熱減量(%)	2.27	1.29
密度(g/cm ³)	3.15	3.13
比表面積(cm ² /g)	3,310	4,580

④ 混和剤

材料分離抵抗性および所要の流動性を得るために、混和剤として変性リグニン、アルキルアリルスルホン酸および活性持続ポリマーを主成分とする高性能 AE 減水剤(SP)を 20% 希釈溶液として使用した。

(2) 練混ぜ方法およびフロー試験

モルタルの練混ぜは、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に規定された練混ぜ機を使用し、機械練りによって行った。練り鉢に練混ぜ水以外の材料を入れ、直ちに低速で 30 秒間練混ぜた。練混ぜ水を入れて低速でさらに 30 秒間練混ぜ、練混ぜを休止してモルタルの均一性を確認後、再び低速で 90 秒間練混ぜた。練混ぜ時間は休止時間を除き 2 分 30 秒であった。

フロー試験を JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて行い、フローコーン取り

去り直後のフロー値（JIS0 フロー値）およびフローテーブルに所定の落下運動を与えた直後のフロー値（JIS フロー値）を測定した。このとき、フローコーンにモルタルを1層で打込み、突き棒による締固めを行わなかった。

まず細骨材として廃ガラスカレット K2, フライアッシュ Fa を用いたセメント添加率（粉体中のセメント質量の割合） $C/(F+C)=1\%$ の場合の JIS0 フロー値および JIS フロー値を、水粉体比 $W/(F+C)$, 細骨材粉体比 $S/(F+C)$ および SP 添加率を変化させて測定した。

次に、フライアッシュ Fa を用いた場合とほぼ等しい配合で Fb および Fc を用いた場合の検討を行い、目標フロー値を得るための水粉体比 $W/(F+C)$, 細骨材粉体比 $S/(F+C)$ および SP 添加率を決定した。その結果得られた配合で JIS A 1123 に準じてブリーディング試験を行い、材料分離の検討を行った。

また、モルタルの空気量を質量法により測定した。

次に再生細骨材 R2 を用いた場合の配合を、廃ガラスカレット K2 を用いた場合と同様の手順で検討した。

（3）供試体の作製および強度試験方法

埋戻し材用低強度モルタルは、強度が小さいことから、脱型、養生および強度試験時の供試体の取扱いには、細心の注意を要する。本研究における供試体の形状は、円柱に比較して取扱い中の供試体損傷が比較的少ないと考えられるモルタル供試体成形用型（三連型枠）を用いた角柱（ $40\times 40\times 160\text{ mm}$ ）とした。

目標フロー値が得られた配合の低強度モルタルをモルタル供試体成形用型（三連型枠）に詰め、締固めなしで供試体を作製し、温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$, 相対湿度 $95\pm 5\%$ の恒温恒湿器内に静置した。作製の翌日、器内から取り出し成形後再び器内に戻し、作製の2日後に脱型して実験室内（約 $13\sim 37^\circ\text{C}$ ）において表面水率 $3\sim 5\%$ の湿砂中で養生し、所定の材齢経過後 JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて強度試験を行った。

目標強度を満足するセメント添加率を決定するにあたり、細骨材およびフライアッシュ種別ごとにセメント添加率 $C/(F+C)$ を $0\sim 10\%$ の範囲で変化させて、材齢 7～182 日の圧縮強度を求めた。また、一部の配合について、普通および早強ポルトランドセメントを用いたモルタル供試体を作製し、材齢 7 日および 28 日の強度を比較して、セメント種別が初期強度に及ぼす影響を検討した。さらに、同配合のモルタル供試体を作製の翌日に成形後、脱型せずにそのまま温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$, 相対湿度 $95\pm 5\%$ の恒温恒湿器内で養生し、材齢 28 日および 91 日の圧縮強度を脱型後に湿砂中で養生した場合と比較した。

2. 8 埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定

本実験では、秋田県内で発生したリサイクル材料である廃ガラスカレット、再生細骨材および多量のフライアッシュを使用して、将来機械掘削が予想される場所に使用する埋戻し材用低強度モルタルの製造を試み、地中に埋設した場合（以下、地中埋設）および地中埋設を模した室内試験での各種養生条件下における強度特性を明らかにするとともに、要求強度を満足する配合の選定方法を検討した。その結果、室内試験における低強度モルタルの圧縮強度は材齢 91 日以後ほぼ一定になること、地中埋設した場合とこれを模した室内試験での強度の関係が、実施工において目標強度を得るための配合設計の目安になることを示した。

（1）使用材料および配合

結合材として、普通ポルトランドセメント（C：密度 3.15 g/cm^3 ，比表面積 $3,310 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）および JIS II 種に相当する秋田県産フライアッシュ（Fa：密度 $2.29 \sim 2.33 \text{ g/cm}^3$ ，比表面積 $3,710 \sim 3,840 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，強熱減量 $1.1 \sim 1.4 \%$ ），細骨材として、秋田市で回収・破碎された 5 mm 以下の主としてソーダガラスの未洗浄廃ガラスカレット K2 および秋田県大館市（旧田代町）の建造後 60 年経過した橋梁解体時に発生したコンクリート塊から再生粗骨材を製造する際に産出された 5 mm 以下の再生細骨材 R2 を使用した。混和剤として、変性リグニン、アルキルアシルスルホン酸および活性持続ポリマーを主成分とする高性能 AE 減水剤（SP）を 20 %希釈溶液として使用した。

（2）供試体の作製および養生条件

① 練混ぜ方法

モルタルの練混ぜには、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に規定された練混ぜ機を使用し、機械練りによって行った。練り鉢に練混ぜ水以外の材料を入れ、直ちに低速で 30 秒間練混ぜた。練混ぜ水および混和剤を入れて低速でさらに 30 秒間練混ぜ、練混ぜを休止してモルタルの均一性を確認後、再び低速で 90 秒間練混ぜた。練混ぜ時間は休止時間を除き 2 分 30 秒であった。JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じてフロー試験を行い、流動性を確認した後、締固めなしでモルタル供試体成形用型（三連型枠）に詰め、供試体を作製した。

② 養生方法

モルタル供試体成形用型（三連型枠）に詰めたモルタルを直ちに温度 $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $95 \pm 5 \%$ の恒温恒湿器内に静置した。翌日供試体表面の成形を行い、作製の 2 日後に脱型した後、低強度モルタルが埋戻し材として施工された場合の環境を想定した表 2-8-1 の各条件下に養生した。この養生砂には川砂（絶乾密度 2.47 g/cm^3 ，吸水率 3.05% ）を使用した。

表 2-8-1 施工環境を想定した低強度モルタルの室内における養生方法

養生種別	養生方法
湿砂養生	実験室に静置された密閉容器内の表面水率3～5%の湿砂中養生
水砂養生 20℃	湿砂養生に冠水する程度の水を入れた 20℃での養生
水砂養生 10℃	湿砂養生に冠水する程度の水を入れた 10℃での養生



図 2-8-1 湿砂養生



図 2-8-2 水砂養生

表 2-8-1 の各養生方法を図 2-8-1（湿砂養生）および図 2-8-2（水砂養生）に示す。

2～365 日の材齢経過後，JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて強度試験を行った。なお，材齢 2 日で脱型直後に標準養生したとき，供試体が水中で崩壊する現象が観察されたため標準養生は行わなかった。

標準養生時に水中で崩壊した供試体の一例を図 2-8-3 に示す。

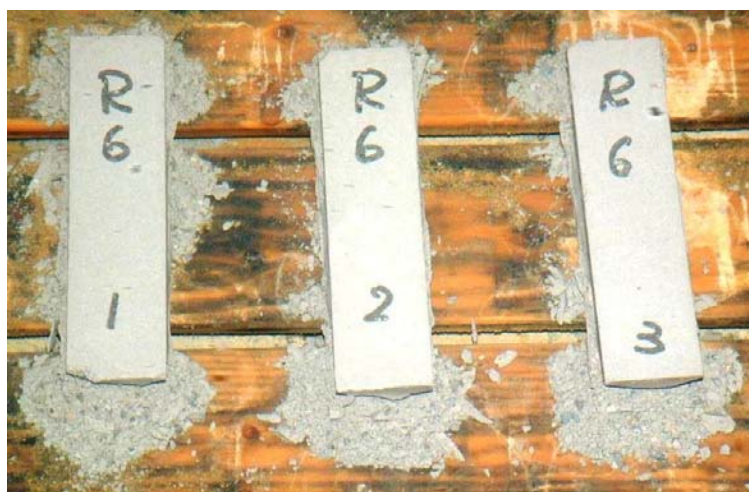


図 2-8-3 標準養生時に水中で崩壊した供試体

（3）屋外における地中埋設試験

低強度モルタルが埋戻し材として施工された場合の環境を想定した室内における養生後の強度試験結果を受けて、実際に屋外において低強度モルタルが施工された場合を想定した地中埋設試験を行い、強度を検証した。

低強度モルタル供試体の屋外における地中埋設状況（秋田県大館市）を図 2-8-4 に示す。

埋設時には、供試体を掘削し易いように供試体の周辺に砂を入れ、埋設された供試体の上面が地表面から約 40 cm の地中に埋設した。



図 2-8-4 屋外における地中埋設状況（秋田県大館市）

2. 9 埋戻し材用低強度モルタルのワーカビリティと強度の性能評価に関する検討

本実験では、自己充填性を有する埋戻し材用低強度モルタルのワーカビリティ、強度試験材齢および養生方法の基準とその評価方法を提示することを目的とした。2種類の普通ポルトランドセメント（普通，東日本大震災の瓦礫由来），2種類の低品質再生細骨材，多量のフライアッシュおよび高性能 AE 減水剤を使用した。フロー値およびブリーディング率の目標値は，250～300 および 3.0 %未満，圧縮強度の目標範囲を $0.3 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ とした。湿砂に余剰水を加えた中で供試体を 91 日間養生して，強度試験を実施した。フロー値，ブリーディング率および強度が室内試験で目標値に達していれば，地中に埋設された場合でも所要の強度が得られることを気象条件の異なる 2 地点で検証した。

（1）使用材料

結合材は，普通ポルトランドセメント O（密度 3.16 g/cm^3 ，比表面積 $3,240 \sim 3,310 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）および R（東日本大震災の瓦礫由来，密度 3.16 g/cm^3 ，比表面積 $3,310 \sim 3,340 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。フライアッシュは，JIS II 種に相当する Fa（密度 $2.29 \sim 2.33 \text{ g/cm}^3$ ，比表面積 $3,710 \sim 3,840 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，強熱減量 1.1～1.4 %）および Fd（密度 $2.33 \sim 2.36 \text{ g/cm}^3$ ，比表面積 $3,760 \sim 4,020 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，強熱減量 1.1～1.2 %）を使用した。

細骨材は，リサイクル細骨材として再生細骨材 R2, R3 および廃ガラスカレット K2 を使用した。再生細骨材 R2 は，秋田県大館市（旧田代町）の建造後 60 年経過した橋梁の解体時に発生したコンクリート塊から一次破碎のみで再生粗骨材を製造する際に発生したものである。再生細骨材 R3 は，主として北海道札幌市内の建築物解体時に発生したコンクリート塊から再生路盤材および再生粗骨材を製造する際に発生したものである。また，廃ガラスカレット K2 は，主としてソーダガラスの瓶を秋田市が回収，破碎してふるい分けしたものであつて，5 mm 以下のこれらを洗浄，改質等を行わずそのまま使用した。また，比較用として北海道幌延町産の普通細骨材 N5 を使用した。

混和剤は，高性能 AE 減水剤 SP①および SP②を使用した。その主成分は，SP①：変性リグニン，アルキルアリルスルホン酸および活性持続ポリマー，SP②：ポリカルボン酸エーテル系化合物である。

（2）低強度モルタルの配合

前述の 2. 7 節および 2. 8 節では，室内実験を中心として低強度モルタルの基礎的な性状を明らかにすることを目的としたため，結合材であるセメントの使用量をセメント添加率（粉体中のセメント質量の割合） $C/(F+C) \%$ で管理した。しかし，本実験では，実施工を想定した屋外での地中埋設における強度の検証および現場での配合選定の利便性を重視して，単位セメント量で管理することにした。

（3）練混ぜおよび供試体の作製

練混ぜには、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に規定された練混ぜ機を使用した。練り鉢に練混ぜ水および混和剤以外の材料を入れ、直ちに低速で 30 秒間練混ぜた。予め混和剤を入れた練混ぜ水を入れてさらに低速で 30 秒間練混ぜ、練混ぜを休止してモルタルの均一性を確認した後、再び低速で 90 秒間練混ぜ、合計練混ぜ時間を 2 分 30 秒とした。

練混ぜ後、フロー試験および質量法による空気量試験を行った。その後、締固めをせずにモルタル供試体成形用型（三連型枠）に詰め、角柱供試体（40×40×160 mm）を作製した。供試体を型枠ごと湿気箱に入れ、温度 20 ± 1 °C、相対湿度 60 ± 5 %の恒温恒湿庫内に静置した。打込み後 20～24 時間内に供試体表面の成形を行い、再び湿気箱に戻し恒温恒湿庫内に静置し、材齢 3 日で脱型後、各条件下で養生した。この時、湿気箱内の温湿度は温度 20 ± 1 °C、相対湿度 95 ± 5 %であった。

なお、2. 7 節（埋戻し材用低強度モルタルへのリサイクル材料の適用に関する実験的検討）および 2. 8 節（埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定）では、打込みした低強度モルタルを型枠ごと恒温恒湿器内に静置して材齢 2 日で脱型したが、本実験では、型枠ごと湿気箱に入れて恒温恒湿庫内に静置したため、材齢 2 日で脱型した場合に供試体の変形や破損がみられた。このため、材齢 3 日で脱型することにした。

（4）フロー試験

低強度モルタルの目標フロー値を、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）によるフロー値（以下、JIS フロー値）で 250 以上 300 以下とした。それは、JIS フロー値が 250 未満のモルタルを締固めなしでモルタル供試体成形用型（三連型枠）に詰めて供試体を作製した場合、供試体の側面に寸法の大きい空隙がみられ、実施工した場合には充填不足になり、初期欠陥につながると考えられたためである。このことから締固めなしで欠陥のない施工を行うためには、JIS フロー値で 250 以上が必要と考えられた。

既往の研究でも、JIS フロー値が 250 以上であれば自己充填性が十分確保できる³⁵⁾としたものがある。また、JIS フロー値が 300 を超えると材料分離傾向が顕著となったため上限は 300 とした。

低強度モルタルは自己充填性を有し、締固め不要であることから、フローコーンを取り去った直後の広がり（以下、JIS0 フロー値）を JIS フロー値と併せて測定した。また国内で低強度モルタルと同様の用途に用いられている流動化処理土には、文献³⁶⁾に示すシリンダーフロー値（以下、JHS フロー値）が用いられている。また、文献³⁷⁾では、流動化処理土の用途別の要求品質（案）の中で、その用途が埋設管の埋戻しの場合の品質規定値を 140 mm 以上（打込み時）としているが、JHS フロー値の確認を一部の配合で行い、JIS0 フロー値との関係を検討した。

（5）ブリーディング試験

低強度モルタルの材料分離抵抗性および硬化後の沈下量の指標となるブリーディング率

は、文献³⁸⁾に示されるポリエチレン袋方法（以下、ポリ袋法）により測定した。この方法では、3時間経過後のブリーディング率および20時間以上経過後の最終ブリーディング率を規定しているが、流動化処理土を埋設管（ガス管、上下水道管など）の埋戻しに用いる場合の要求品質（案）の品質規定³⁷⁾を3%未満としている。これを参考に水口ら²⁹⁾は、低強度モルタルと同様の用途に用いられ、北米で普及しているスラリー状の埋戻し材であるCLSM（Controlled Low-Strength Materials）について基準値を提示している。これらを参考に、本実験ではブリーディング率の目標値を、ポリ袋法による最終ブリーディング率で3.0%未満とした。

（6）養生方法

低強度モルタルが埋戻し材として施工された場合の環境を想定して、地下水の有無を考慮した表2-9-1に示す条件下で養生した。

表2-9-1 地下水の有無を考慮した低強度モルタルの養生方法

養生種別	養生方法
湿砂養生 20℃	20℃における表面水率3～5%の湿砂中養生
水砂養生 20℃	20℃における表面水率25%（過剰水）の湿砂中養生

すなわち、表面水率3～5%に調整した砂中での養生（以下、湿砂養生 20℃）およびこれに冠水する程度の水を加えた養生（以下、水砂養生 20℃）を恒温庫内で行った。

（7）強度試験

機械による掘削が可能となる低強度モルタルの強度について明確な基準はないが、既往の文献^{31),39)}および筆者らの長期強度確認試験の結果⁴⁰⁾から、目標値は圧縮強度が0.3～2.0 N/mm²の範囲とした。これは、埋戻し材として十分な強度を有しており、かつ機械掘削が可能な強度範囲とされている³¹⁾。長期材齢における強度の増進によって機械掘削が困難となることが懸念されるため、湿砂養生 20℃および水砂養生 20℃は材齢91日まで行い、目標強度の範囲を満足しているか否かを検討した。

（8）屋外における地中埋設試験

北海道小樽市における低強度モルタル供試体の屋外地中埋設の状況を図2-9-1に示す。

埋設地点の地表から50 cm程度の深さまで掘削し、5 cm厚程度の砂を敷き均し、その上に供試体を設置し、供試体上面から5 cm程度まで砂を被せた後、その上に掘削時の発生土を埋戻した。図中、左上の袋には温度記録計が入っており、これにより埋設した地中の温度を1時間毎に記録した。埋設供試体上面の地表面からの位置は、深さ約40 cmであった。なお、秋田県大館市における埋設も同様であった。

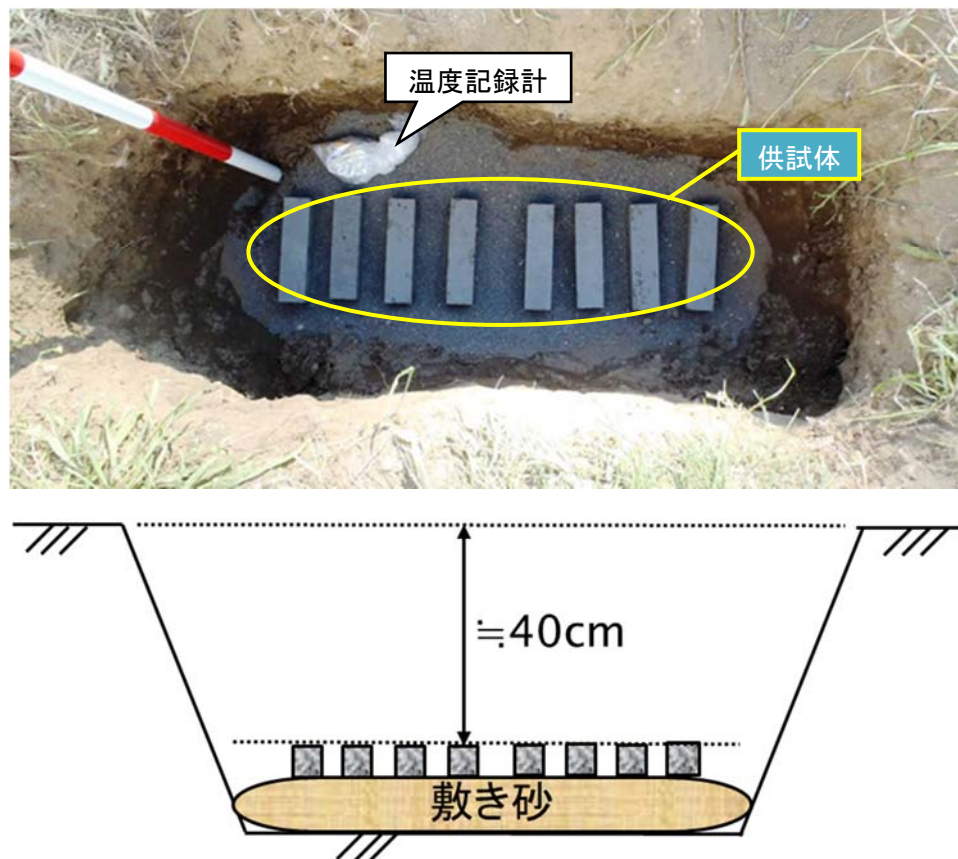


図 2-9-1 北海道小樽市における低強度モルタル供試体の地中埋設状況

参考文献

- 13) W. S. Adaska: Controlled Low-Strength Materials, Concrete International, Vol.19, No.4, pp.41-43, 1997
- 30) 水口洋ほか：CLSM（Controlled Low-Strength Material）の国内における適用について，コンクリート工学，Vol.42，No.10，pp.19-28，2004
- 32) 内川浩，羽原俊祐：アルカリ反応性骨材を含有する各種セメントモルタルの硬化体組織と膨張性の関係，セメント技術年報，41，1987
- 33) 国土交通省気象庁ホームページ：気象統計情報，
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 34) 柏崎健輔，佐藤重悦，城門義嗣，加賀谷誠：ごみ熔融スラグをリサイクル使用したコンクリートの凍結融解特性と品質改善に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1435-1440，2005

- 35) 桜田良治, 丸山久一, 黒島一郎, 下山善秀, 佐藤豊一: フライアッシュを多量に使用した自己充填モルタルの基本特性, 第25回セメント・コンクリート研究討論会論文集, p.60, 1998
- 36) 東・中・西日本高速道路株式会社: 試験方法第3編コンクリート関係試験方法, pp.31-35, 2006
- 37) 土木研究所, ㈱流動化処理工法総合監理: 流動化処理土利用技術マニュアル (平成19年/第2版), 技報堂出版, pp.50-54, 2008
- 38) 土木学会: 2010年制定コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準, pp.238-239, 2010
- 39) M.E. Ayers, S.Z. Wong, and W. Zaman: Optimization of Flowable Fill Mix Proportions, CONTROLLED LOW-STRENGTH MATERIALS, ACI SP-150-2, pp.15-37, 1994
- 40) 佐藤重悦, 加賀谷誠: リサイクル材料を用いた埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定, セメント・コンクリート論文集 No.57, pp.619-624, 2003

第3章 普通強度のモルタルおよびコンクリートへの適用に関する検討

3. 1 第3章の概要

第3章では、実験1～4の普通強度のモルタルおよびコンクリートを対象とした実験の結果および考察を、フレッシュ時の特性値（フロー値、スランプ、空気量、ブリーディング率など）、硬化後の特性値（材齢1年未満の強度、質量減少率、乾燥収縮率、など）および凍結融解試験による特性値（耐久性指数など）の『短期的性能』と1年以上の暴露試験による特性値（質量減少率、相対動弾性係数、表面色など）の『長期的性能』に分けて示した。

3. 2 短期的性能

3. 2. 1 再生細骨材を用いたモルタル

（1）再生細骨材を用いたモルタルの配合

再生細骨材を用いたモルタルの配合を表3-2-1-1に示す。例えば配合種別におけるN40は、川砂N1を用いたW/Cが40%のモルタル配合を示す。

配合種別R32は、再生細骨材R1を用いたW/Cが40%の配合種別R40を基本にして、混和剤に高性能AE減水剤（SP）を用いることにより目標フロー値を変えずに単位水量を減じてW/Cを32.4%まで低減したものである。同様に配合種別R44は、再生細骨材R1を用いたW/Cが60%の配合種別R60を基本にして、混和剤に高性能AE減水剤（SP）を用いることによりフロー値を変えずに単位水量を減じることを試みたが、目標フロー値が210のままだと材料分離が生じたため、目標フロー値を140としてW/Cを44.5%まで低減したものである。なお、高性能AE減水剤の使用量は、製造元が示す標準的使用量の範囲に入っている。

表3-2-1-1 再生細骨材を用いたモルタルの配合

配合 種別	目標 フロー値	空気量 (%)	W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)					混和剤 (C×wt%)
					W	C	N1	R1	N2	
N40	140	7.5	40.0	2.3	228	569	1309	0	0	0.06(AE)
R40		6.5		2.2	226	563	0	1238		
M40		8.0		2.4	217	544		717	587	
R32		3.5	32.4	2.2	198	608		1338	0	2.0(SP)
N60	210	12.5	60.0	3.2	240	400	1282	0	0	0.06(AE)
R60		15.5		2.8	239	398	0	1117		
M60		13.0		3.0	244	407		672	549	
R44	140	3.5	44.5	2.8	218	492		1375	0	1.0(SP)

(2) フレッシュ性状の検討

水セメント比 (W/C) 40 %および 60 %におけるフロー値と砂セメント質量比 (S/C) との関係を図 3-2-1-1 に示す。

両水セメント比 (W/C) において、砂セメント質量比 (S/C) を一定すなわち同一配合とすると、再生細骨材を用いた配合 R40 および R60 のフロー値が最も小さくなることがわかる。一般に再生細骨材を用いた場合、コンシステンシーを一定とすると普通細骨材を用いた場合よりも単位水量が大きくなる傾向にあるが、これを示唆しているものと思われる。この関係を用いて、それぞれの水セメント比 (W/C) 40 %および 60 %に対して目標フロー値を 140 および 210 に設定したが、このときの砂セメント質量比 (S/C) は、川砂を用いた場合 (N40) や混合砂を用いた場合 (M40) よりも再生細骨材を用いた場合 (R40) に小さくなった。

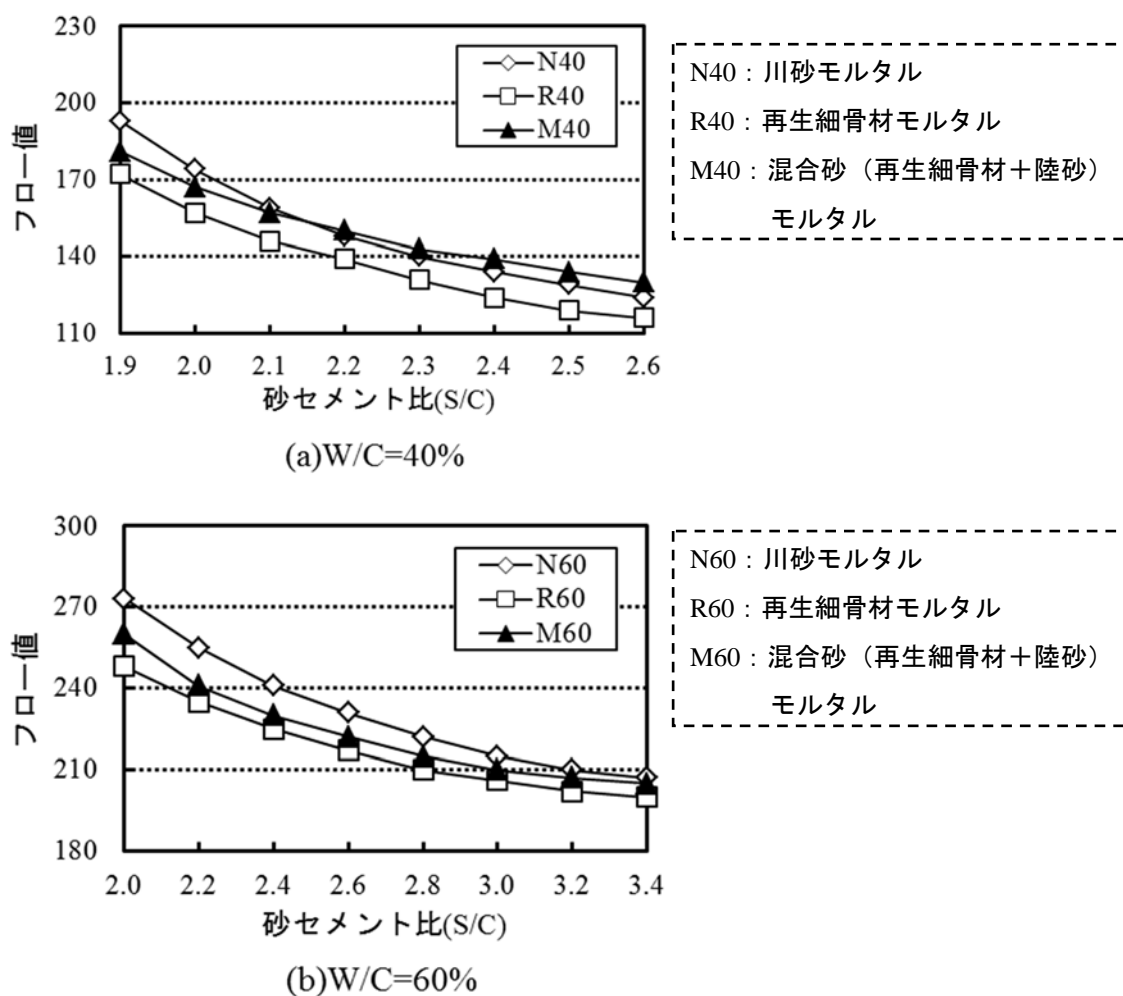


図 3-2-1-1 フロー値と砂セメント比 (S/C) との関係

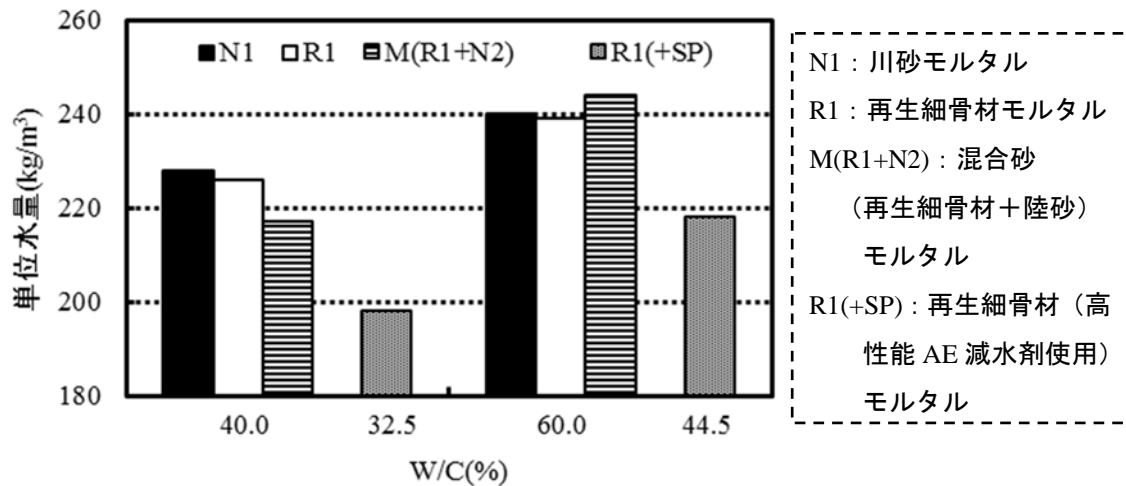


図 3-2-1-2 同じコンシステンシーを与える各配合の単位水量の比較

同じコンシステンシーを与える各配合の単位水量の比較を図 3-2-1-2 に示す。

川砂を用いた場合 (N1) を基準とすると、再生細骨材を用いた場合 (R1) の単位水量は両水セメント比 (W/C) において幾分小さく、混合砂を用いた場合 {M(R1+N2)} では水セメント比 (W/C) 40 % の場合に小さく、60 % の場合に大きくなった。これらの現象は、図 3-2-1-1 に示したように一定フロー値における砂セメント質量比 (S/C) の違いおよびそれに伴う空気量の変化に起因すると考えられる。

再生細骨材を用いた場合 (R1) の水セメント比 (W/C) 40 % および 60 % の配合の目標フロー値を 140 として高性能 AE 減水剤を使用した結果 {R1(+SP)}，単位水量は川砂を用いた場合 (N1) より大きく低減でき、水セメント比 (W/C) をそれぞれ 32.4 % および 44.5 % に低減することができた。

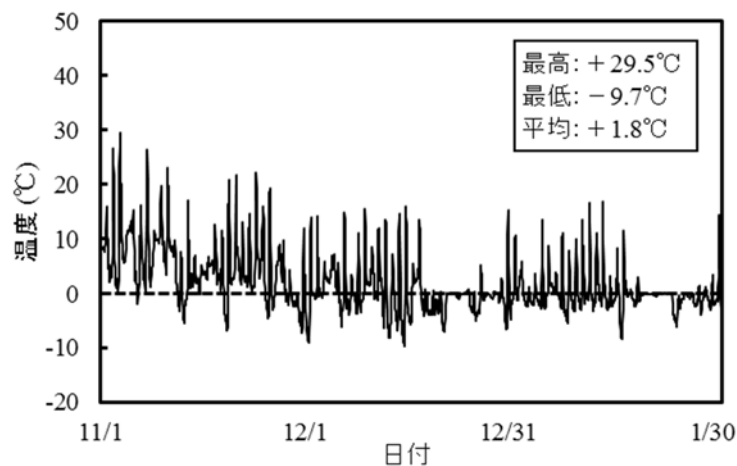


図 3-2-1-3 暴露供試体表面付近の温度変化

(3) 質量変化率の検討

暴露供試体表面付近の温度変化を図 3-2-1-3 に、一週間の標準養生後に暴露した場合および脱型後すぐに暴露した場合の水セメント比 (W/C) 40 %および 60 %における配合種別ごとの質量変化率の経時変化を図 3-2-1-4 および図 3-2-1-5 にそれぞれ示す。

図 3-2-1-4 より、質量変化率の値はいずれもほぼマイナス側にあり、供試体質量の減少傾向が認められる。経時変化における変動を骨材種別ごとに比較すれば、川砂を用いた場合 (N40, N60) を基準として再生細骨材を用いた場合 (R40, R60) および混合砂を用いた場合 (M40, M60) が幾分小さく、高性能 AE 減水剤を添加して再生細骨材を用いた場合 (R32, R44) が最も小さくなった。

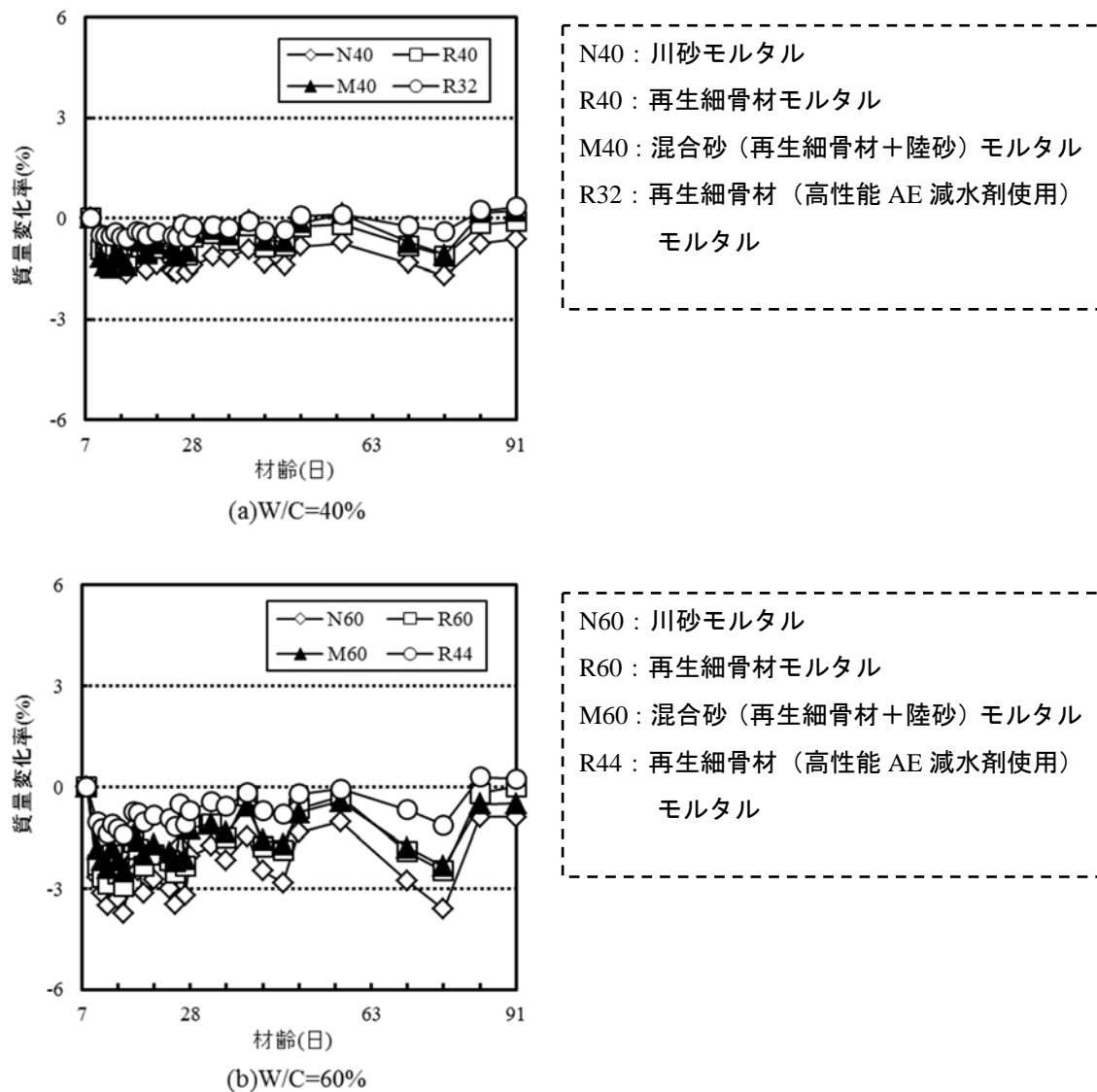


図 3-2-1-4 配合種別ごとの質量変化 (1 週間の標準養生後暴露)

図 3-2-1-5 より、質量変化率の値はマイナス側からプラス側に推移して変化する傾向にあり、供試体質量の増加傾向が認められる。経時変化における変動を骨材種別ごとに比較すると、川砂を用いた場合 (N40, N60) を基準として再生細骨材を用いた場合 (R40, R60) がこれと等しいか大きく、混合砂を用いた場合 (M40, M60) が等しいか幾分小さく、高性能 AE 減水剤を添加して再生細骨材を用いた場合 (R32, R44) が最も小さくなった。

図 3-2-1-4 に示された結果は、主として供試体の乾燥によるところが大きく、図 3-2-1-5 に示された結果は、融雪水や雨水の吸水によるところが大きいと考えられる。

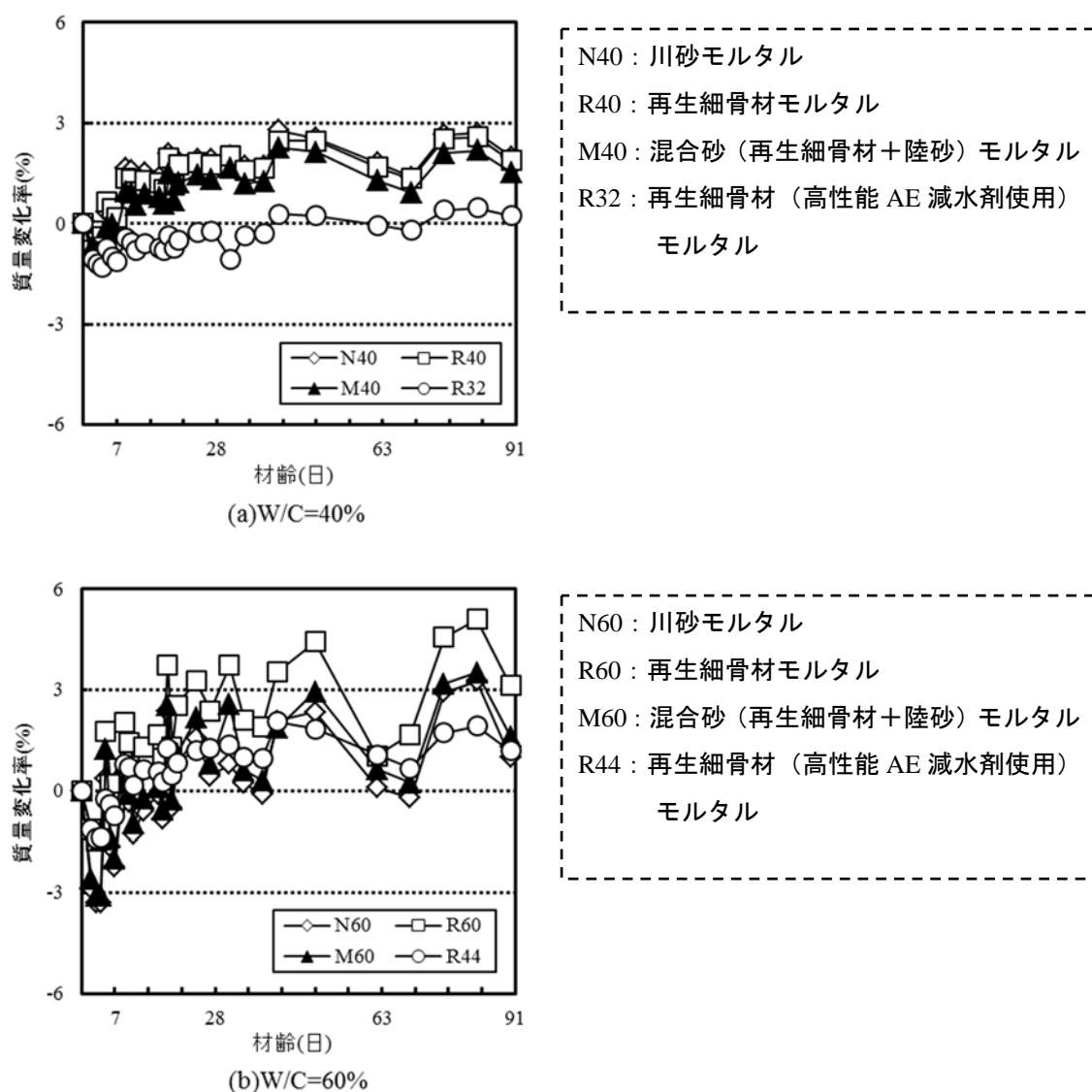


図 3-2-1-5 配合種別ごとの質量変化 (型枠脱型後すぐ暴露)

なお、暴露期間中における質量変化率の大きな低下 (例えば、図 3-2-1-5 (b) W/C=60% の材齢 63~70 日付近) は、測定スケジュールや暴露地点の積雪状況等の都合により質量測定

のための室内保管時間が長くなり供試体の乾燥が進んだためである。

また、経時変化における質量変化率の変動を養生条件で比較すると、一週間の標準養生後に暴露した方が、脱型後すぐに暴露した場合より小さくなった。水セメント比 (W/C) ごとに比較すると、いずれの養生条件においても水セメント比 (W/C) 40 %の配合の質量変化が 60 %の配合より小さく、水セメント比 (W/C) 44.5 %の高性能 AE 減水剤を用いた R44 の質量変化が水セメント比 (W/C) 60 %の配合 (N60, R60, M60) より小さく、水セメント比 (W/C) 32.4 %の高性能 AE 減水剤を添加して再生細骨材を用いた R32 の質量変化が水セメント比 (W/C) 40 %の配合 (N40, R40, M40) より小さくなった。これらの質量変化率の変動は、供試体内外の水分の移動を示していると考えられる。

図 3-2-1-3 に示したように、暴露期間中に凍結融解の繰り返し作用があったと考えられることから、この変動が小さいほど耐凍害性に有利であると考えられる。ひと冬目での限られた期間の暴露ではあるが、初期における耐凍害性を維持するためには「養生を十分に行うこと」や「水セメント比を小さくすること」が効果的であると考えられる。

(4) 質量減少率の検討

W/C=40 %および 60 %における質量減少率の経時変化を図 3-2-1-6 に示す。材齢 91 日における水セメント比 (W/C) 40 %の場合の質量減少率は、川砂を用いた場合 (N40) を基準とすると、再生細骨材および混合砂を用いた場合 (R40, M40) はほぼこれと等しく、高性能 AE 減水剤を添加して再生細骨材を用いた場合 (R32) が最も小さくなった。水セメント比 (W/C) 60 %の場合の質量減少率は、川砂を用いた場合 (N60) を基準とすると、再生細骨材を用いた場合 (R60) がほぼこれと等しく、混合砂を用いた場合 (M60) は幾分小さく、高性能 AE 減水剤を添加して再生細骨材を用いた場合 (R44) が最も小さくなった。

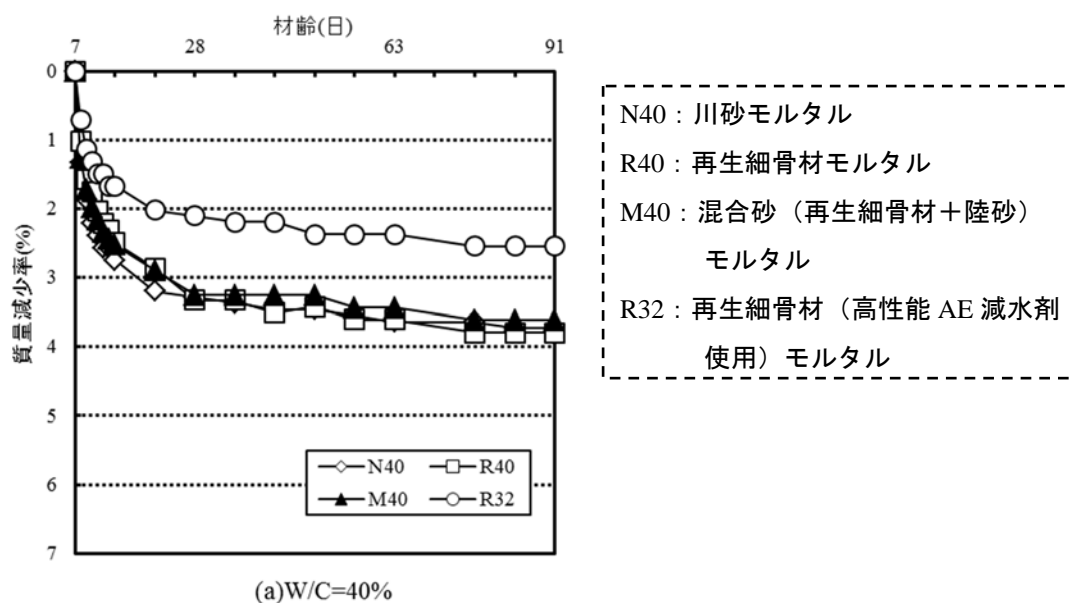


図 3-2-1-6(a) 配合種別ごとの質量減少率の経時変化 (W/C=40%)

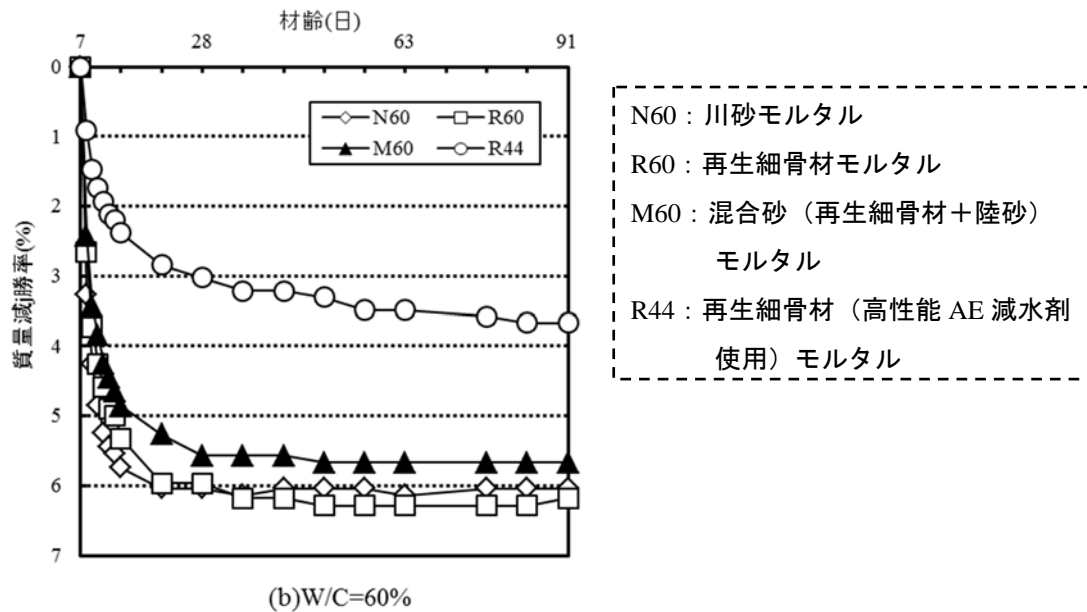


図 3-2-1-6 (b) 配合種別ごとの質量減少率の経時変化 (W/C=60%)

(5) 乾燥収縮ひずみの検討

水セメント比 (W/C) 40 %および 60 %における乾燥収縮率の経時変化を図 3-2-1-7 に示す。

両水セメント比 (W/C=40%, 60%) の場合とも川砂を用いた場合 (N40, N60) を基準とすれば、再生細骨材を用いた場合 (R40, R60) が川砂を用いた場合 (N40, N60) より大きく、混合砂を用いた場合 (M40, M60) および高性能 AE 減水剤を添加して再生細骨材を用いた場合 (R32, R44) はほぼ等しく川砂を用いた場合 (N40, N60) より大きいものの、再生細骨材を用いた場合 (R40, R60) より 10~20 %乾燥収縮率が小さくなった。

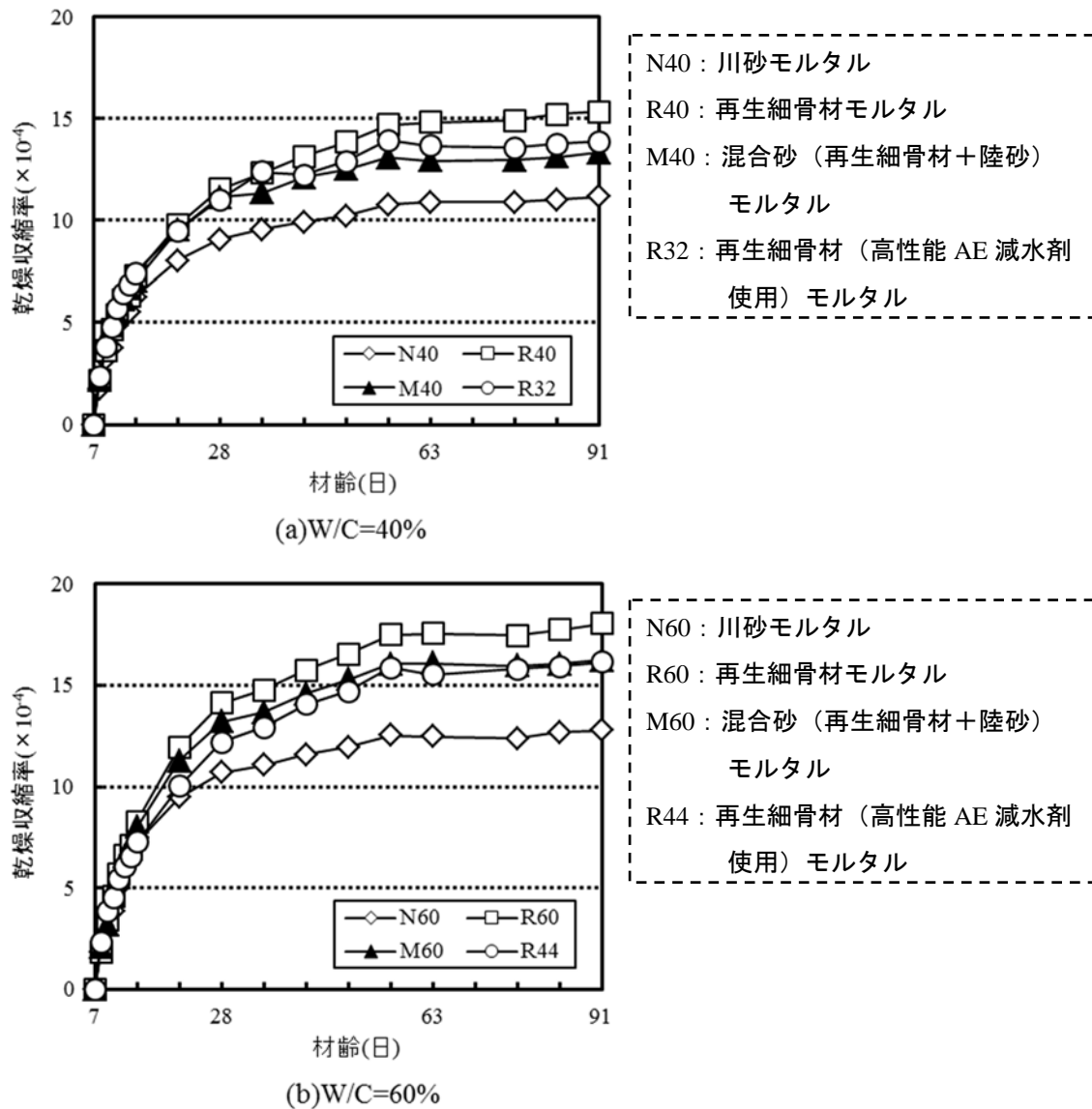


図 3-2-1-7 配合種別ごとの乾燥収縮率の経時変化

(6) 強度の検討

両水セメント比 (W/C) の骨材種別ごとの材齢 91 日における圧縮および曲げ強度の比較を図 3-2-1-8 および図 3-2-1-9 にそれぞれ示す。

圧縮および曲げ強度の骨材種別ごとの大きさを比較すると、ほぼ次の大小関係となった。川砂を用いた場合の強度を基準とすれば、水セメント比 (W/C) 40 %では再生細骨材を用いた R40 および混合砂を用いた M40 が川砂を用いた N40 より小さく、再生細骨材に高性能 AE 減水剤を用いて W/C を低減した R32 は等しくなった。同様に水セメント比 (W/C) 60 %では再生細骨材を用いた R60 が川砂を用いた N60 より小さく、混合砂を用いた M60 は等しく、再生細骨材に高性能 AE 減水剤を用いて W/C を低減した R44 は川砂を用いた N60 より大きくなった。

また、いずれの養生条件においても骨材種別ごとの強度の大小関係はほぼこれと等しいが、養生条件の間で強度の大小関係を示せば、およそ

「標準養生＞一週間標準養生後（冬期）暴露＞一週間標準養生後乾燥＞脱型後すぐ（冬期）暴露」の順となった。

以上の結果から、強度的には、① 高性能 AE 減水剤を用いて単位水量を低減すること、水セメント比（W/C）60 %のように水セメント比が比較的大きい場合には、② 普通骨材との混合使用することが効果的であり、このとき十分な湿潤養生が必要であると考えられる。

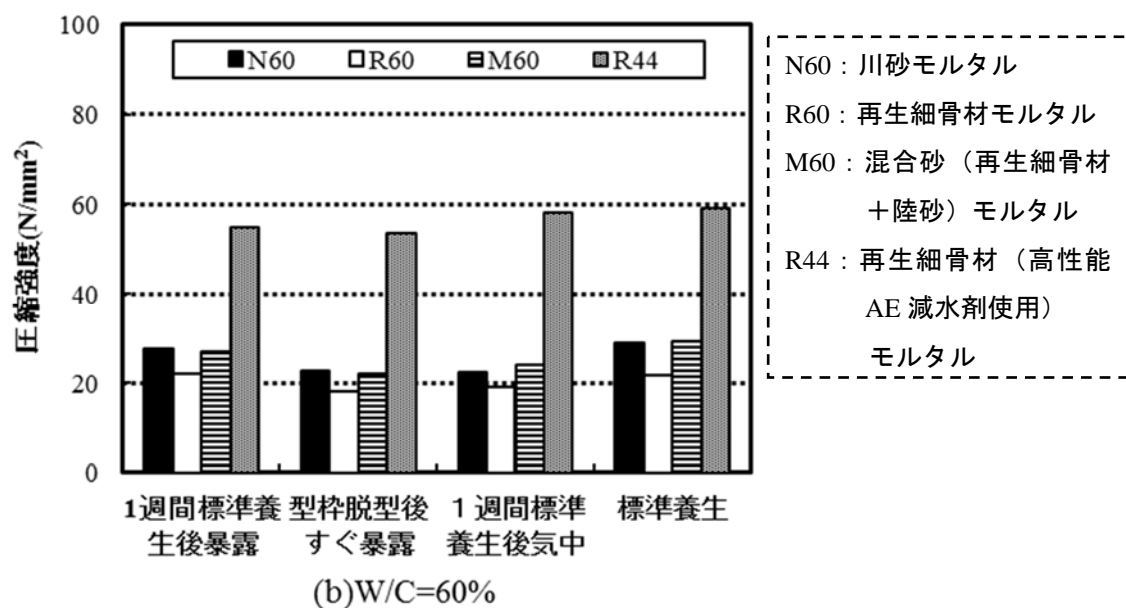
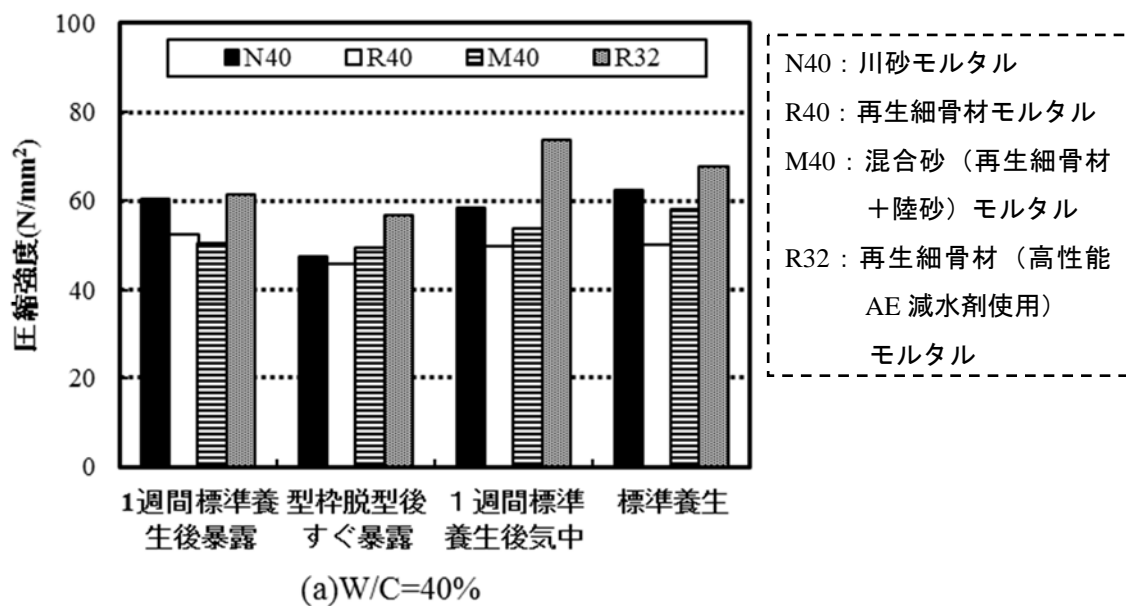


図 3-2-1-8 配合種別ごとの 91 日圧縮強度の比較

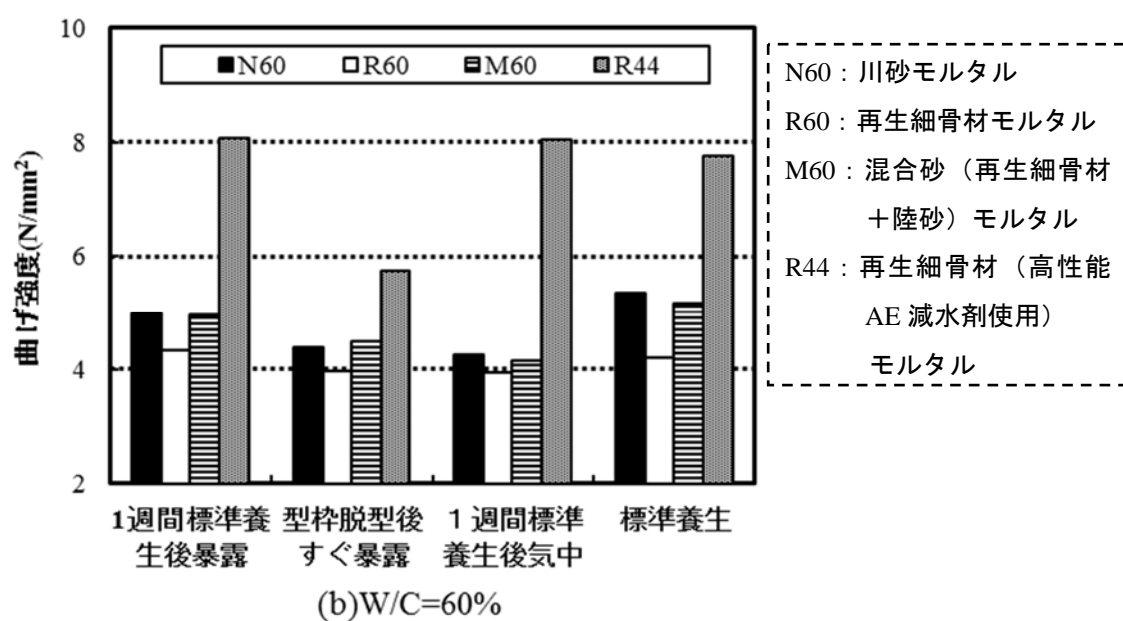
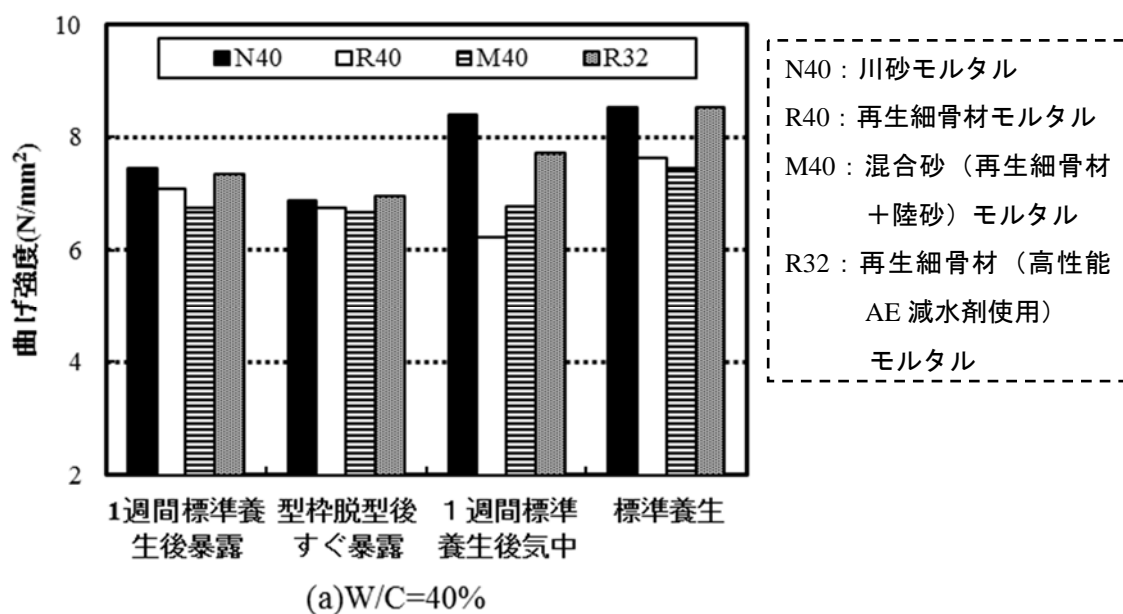


図 3-2-1-9 配合種別ごとの 91 日曲げ強度の比較

(7) まとめ

コンクリート塊を一次破碎したときに発生する再生細骨材を用いたコンクリートの品質改善を試みるために、再生細骨材と陸砂との混合砂（質量比 55 : 45）および再生細骨材を単味で高性能 AE 減水剤を用いて水セメント比を低減したモルタル供試体を作製し、単位水量、冬期屋外暴露試験による質量変化率の変動、乾燥収縮率および強度について、川砂を使用した場合と比較した結果、以下の結論が得られた。

- ① 所要のフロー値を得るための単位水量は、川砂を使用した場合と比較して再生細骨材単味およびこれと陸砂との混合砂をそれぞれ使用した場合には大きな違いが認められなかったが、再生細骨材を使用した場合には高性能 AE 減水剤を用いることにより単位水量を 9～13 % 低減でき、水セメント比 40 % および 60 % をそれぞれ 32.4 % および 44.5 % とすることができた。
- ② 冬期屋外暴露したときの質量変化率の変動を耐凍害性の一指標とすれば、十分な湿潤養生を行い、高性能 AE 減水剤を使用して水セメント比を低下させた場合に、初期の耐凍害性において有利となった。
- ③ 再生細骨材を使用した場合の乾燥収縮率は、川砂を使用した場合より大きいが、再生細骨材と陸砂との混合砂および高性能 AE 減水剤を使用して再生細骨材を使用した場合には、乾燥収縮率を 10～20 % 程度小さくすることができた。
- ④ 再生細骨材を単味で用いたときの材齢 91 日における強度は、川砂を使用した場合と比較して劣るが、水セメント比 60 % では再生細骨材と陸砂との混合砂を用いることにより川砂を使用した場合と同程度に改善できた。しかし、水セメント比 40 % では混合砂を用いることによる改善効果が小さかった。また、再生細骨材を単味で用いたときであっても、高性能 AE 減水剤の使用により川砂を使用した場合と同程度もしくはそれ以上に強度を改善することができた。
- ⑤ ②で得られた改善の程度は、養生条件が異なっても同様に得ることができたが、強度の大きさは以下の順となった。

『 標準養生 > 一週間標準養生後（冬期）暴露 > 一週間標準養生後乾燥 > 脱型後すぐ（冬期）暴露 』

3. 2. 2 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル

(1) 配合

廃ガラスカレット K1 を細骨材に用いたモルタルの配合を表 3-2-2-1 に示す。

表 3-2-2-1 廃ガラスカレット K1 を細骨材に用いたモルタルの配合

配合 種別	W/B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤 (kg/m ³)
			W	C	BS	FA	CS1	N1	K1	
NC	60	18.0	257	428	0	0	1,141	0	0	0.257
NR		9.0	287	478			0	1,194		0.287
K		14.0	269	449				0	1,121	0.269
KB		13.0	271	271	180				1,128	0.271
KF		10.0	278	371	0	93			1,160	0.278

BS：高炉スラグ微粉末，FA：フライアッシュ

(2) フレッシュ性状の検討

フロー値とカレット混入率との関係を図 3-2-2-1 に示す。

フロー値は、カレット未混入の場合と比較して、カレット混入率が 50 %では同程度、100 %では小さくなった。これは使用した廃ガラスカレットの粗粒率が 2.82 とほぼ標準的な値であるが、図 2-2-2 に示したように、一般に廃ガラスカレットの粒形が角張っていることによると考えられる。

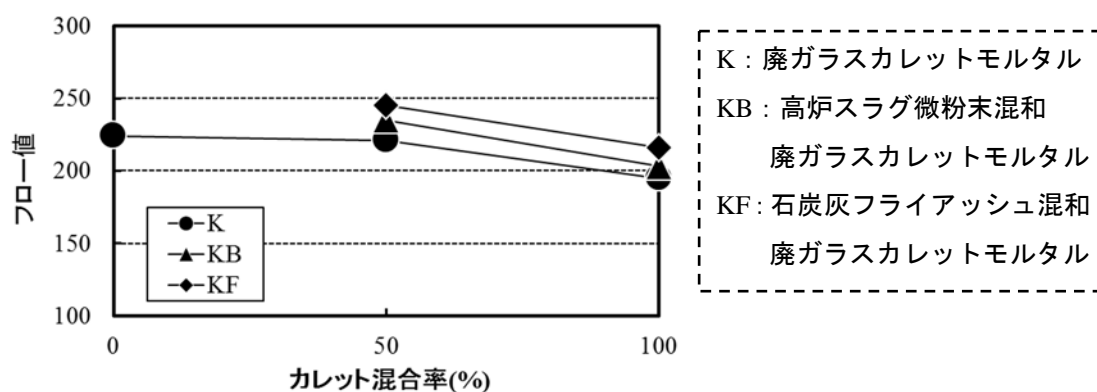


図 3-2-2-1 カレット混合率とフロー値の関係

(3) 強度の検討

標準養生における細骨材種別ごとのモルタルの圧縮強度と材齢の関係を図 3-2-2-2 に示す。

細骨材に砕砂、川砂およびカレットを用いた表 3-2-2-1 の配合 NC, NR および K の標準

養生における 91 日圧縮強度は 31.3 N/mm^2 、 31.6 N/mm^2 および 24.5 N/mm^2 となった。配合 NC および NR に比し配合 K の強度は約 22 %低下したが、細骨材に用いた廃ガラスカレットの表面が平滑であり、砕砂や川砂を用いた場合に比較して、骨材とセメントペーストの付着が低下したことが影響したものと考えられる。

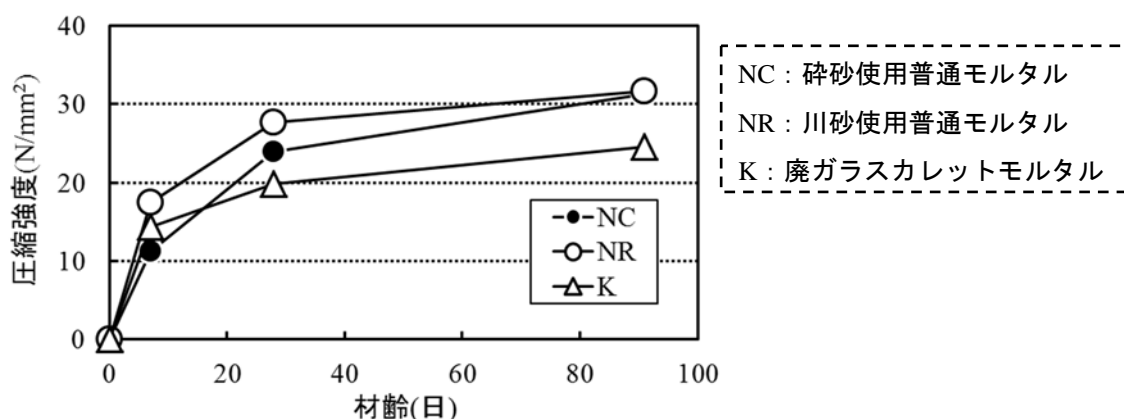


図 3-2-2-2 標準養生における細骨材種別ごとのモルタルの圧縮強度と材齢の関係

（４）アルカリシリカ反応性の検討

モルタルバー法による配合種別ごとのモルタルの膨張率を図 3-2-2-3 に示す。

材齢 182 日における配合 NC, NR および K の膨張率は 0.000 %, 0.166 % および 0.408 % となり、配合 NR および K の膨張率はアルカリシリカ反応性の判定基準である 0.100 % を超え「無害でない」となった。

これに対し、セメント質量の 40 % および 20 % を高炉スラグ微粉末およびフライアッシュで置換した配合 KB および KF の膨張率は 0.034 % および 0.019 % となり「無害」と判定された。セメントの一部を、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュで置換することによるアルカリシリカ反応抑制効果が確認された。

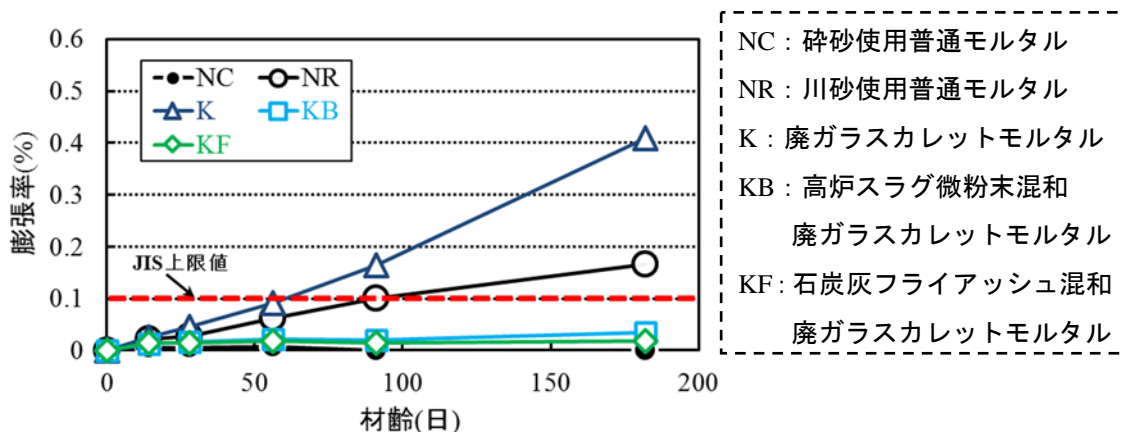


図 3-2-2-3 配合種別ごとのモルタルの膨張率

配合種別ごとのモルタルのアルカリシリカ反応性試験終了時の膨張率，ならびに膨張率測定後の圧縮および曲げ強度を図 3-2-2-4 に示す。

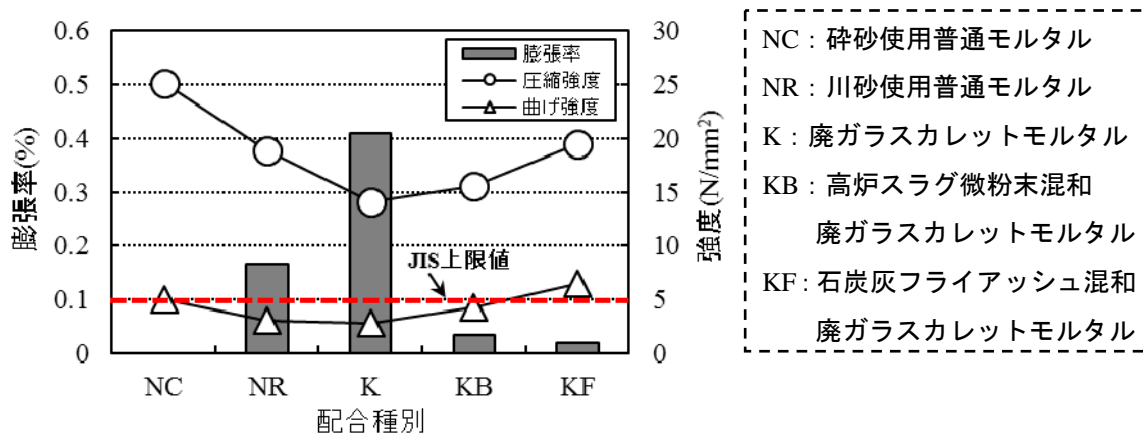


図 3-2-2-4 配合種別ごとの膨張率と膨張率測定後の強度

膨張率測定後の配合 NC, NR および K の曲げ強度は 5.0 N/mm^2 , 3.1 N/mm^2 および 2.8 N/mm^2 となり，配合 NC に比較して NR および K はそれぞれ約 38 % および 44 % 小さくなった。これに対し，配合 KB および KF の曲げ強度は 4.3 N/mm^2 および 6.5 N/mm^2 となり，配合 NC に比較して KB は約 14 % 小さく，KF は約 30 % 大きくなった。

一方，膨張率測定後の配合 NC, NR および K の圧縮強度は 25.1 N/mm^2 , 18.9 N/mm^2 および 14.1 N/mm^2 となり，配合 NC に比較して NR および K はそれぞれ約 25 % および 44 % 小さくなった。また，配合 KB および KF の圧縮強度は 15.5 N/mm^2 および 19.5 N/mm^2 となり，配合 NC に比較して KB および KF は約 38 % および 22 % 小さくなった。

以上の結果から，セメントの一部を高炉スラグ微粉末およびフライアッシュで置換することにより，カレットモルタル（配合 K）の曲げおよび圧縮強度は改善され，その効果は特にフライアッシュで置換した配合 KF の曲げ強度において大きく，配合 K の 2.3 倍，砕砂を用いた配合 NC の 1.3 倍を呈する結果となった。

(5) まとめ

結合材としてのセメントと高炉スラグ微粉末，フライアッシュとの混和により，モルタルの細骨材全量に廃ガラスカレットを用いても，アルカリシリカ反応を抑制することができた。このことから，アルカリシリカ反応の抑制対策を適切に行えば，細骨材に対する廃ガラスカレットの置換率をより大きくすることが可能と考えられる。

3. 2. 3 溶融スラグ細骨材を用いたモルタル

(1) 溶融スラグ細骨材を用いたモルタルの配合

宮城県石巻市産の溶融スラグ細骨材 Si および秋田市産の溶融スラグ細骨材 Sa2 を用いたモルタルの配合を表 3-2-3-1 に示す。

表 3-2-3-1 溶融スラグ細骨材を用いたモルタルの配合

配合 種別	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水 W	セメント C	山砂 N4	石巻市産 Si	秋田市産 Sa2
N100	60	287	479	1436	0	0
Si30				1023	438	
Si50				740	740	
Si70				449	1048	
Si100				0	1526	
Sa30				1028	0	441
Sa50				746		746
Sa70				455		1061
Sa100				0		1554

(2) スラグ置換率の検討

① フレッシュ性状

スラグ種別ごとのスラグ置換率とフロー値と関係を図 3-2-3-1 に示す。

基準としたスラグ置換率 0 % のモルタル（配合 N100）のフロー値は約 200 となり、石巻市産溶融スラグ細骨材 Si を置換した配合シリーズのフロー値は、Si の粗粒率が標準的な細骨材に比べて 3.36 と大きいため、スラグ置換率の増加に伴い大きくなる傾向がみられた。これに対し、秋田市産溶融スラグ細骨材 Sa2 を置換した配合シリーズのフロー値は、スラグ置換率の増加に伴い小さくなる傾向がみられた。Sa2 の粗粒率は山砂 N4 とほぼ同等であるが、図 2-5-3 に示したように、溶融スラグが針状の粒子を含んでいることや天然砂に比べて粒形が角張っているため、流動性が低下したと考えられる。

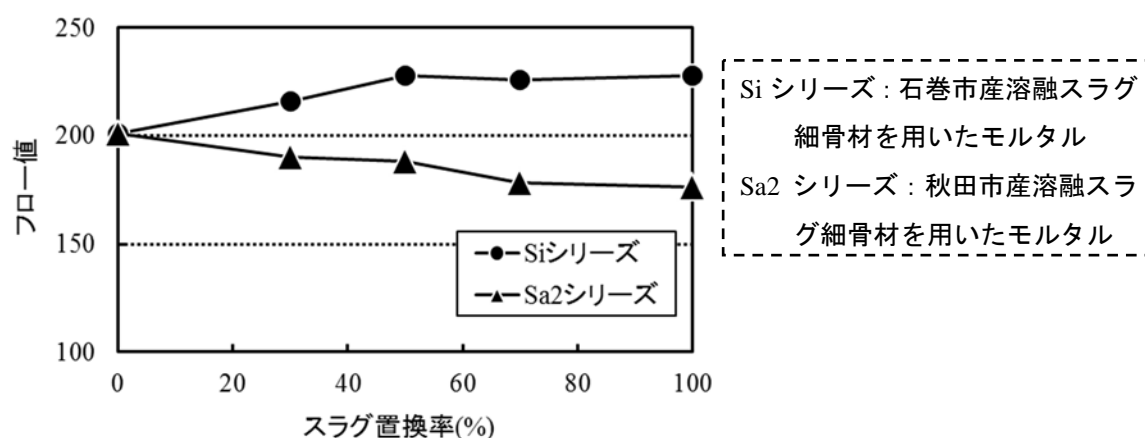


図 3-2-3-1 スラグ置換率とフロー値の関係

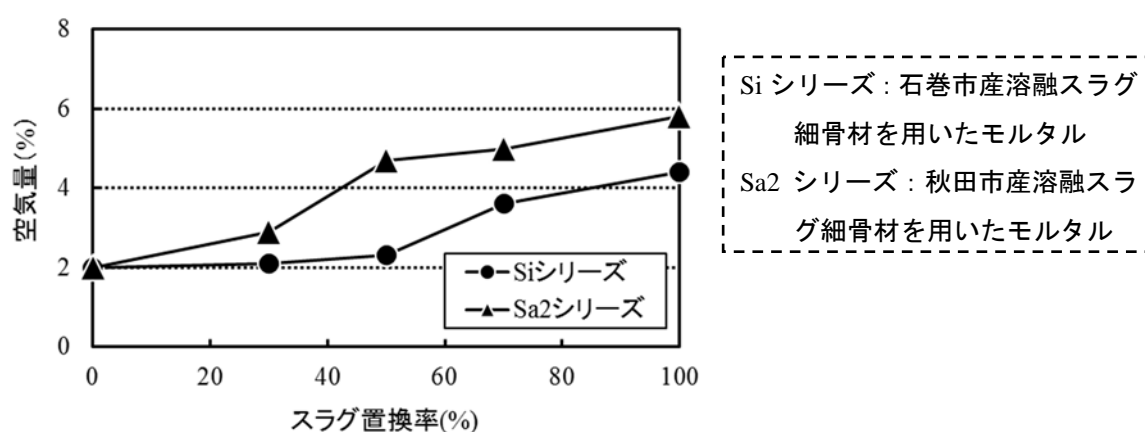


図 3-2-3-2 スラグ置換率と空気量の関係

スラグ種別ごとのスラグ置換率と空気量の関係を図 3-2-3-2 に示す。

本実験で対象とした表 3-2-3-1 のモルタルはすべて、化学混和剤を用いないプレーンモルタルとした。このためモルタル中の空気は、練混ぜの際に巻き込まれた空気（エントラップドエア）である。

基準としたスラグ置換率 0 % のモルタル（配合 N100）の空気量は 2.0 % となり、空気量は Si シリーズ, Sa2 シリーズともにスラグ置換率の増加に伴い大きくなる傾向がみられた。これはスラグ骨材の粒形が角張っていることや粒子表面に気泡が付着しやすいこと³⁴⁾などから、天然の骨材に比し空気を巻き込みやすいことが原因と考えられる。また両シリーズの空気量の差は主に粗粒率の違いによるもので、粗粒率の小さい Sa2 シリーズがより空気を巻き込みやすかったと推察される。

スラグ種別ごとのスラグ置換率とブリーディング率の関係を図 3-2-3-3 に示す。

スラグ置換率 0 % における両シリーズのブリーディング率は同じ配合（N100）のものであるが、Sa2 シリーズが Si シリーズの 5.6 % に対し 2 倍近い 10.1 % となった。このためシリーズ間の比較は困難だが、ブリーディング率は両シリーズともスラグ置換率 50 % で最大

となり 100 %でやや減少した。スラグ骨材は山砂 N4 に比し保水性が小さいこと²⁵⁾や密度が大きいことなどから、ブリーディングが発生しやすいと考えられる。

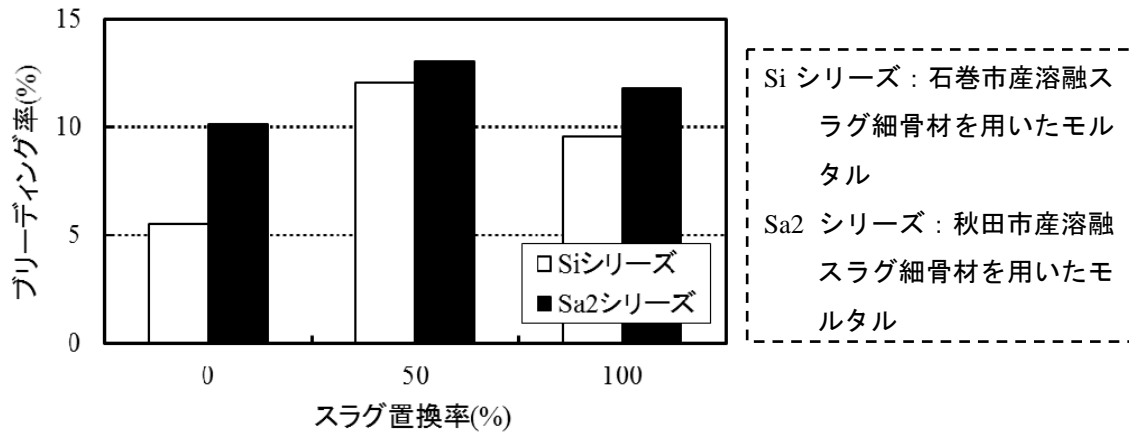


図 3-2-3-3 スラグ置換率とブリーディング率の関係

② 強度性状

Si および Sa2 シリーズのスラグ混合率ごとの圧縮強度と材齢との関係を図 3-2-3-4 および図 3-2-3-5 に示す。両シリーズともスラグ置換率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向がみられたが、材齢 91 日におけるスラグ置換率 0 %の基準配合 N100 に対する強度低下率は、スラグ置換率 70 %までの範囲で最大 6 %程度であった。スラグ自体の潜在水硬性が強度の発現に寄与していると考えられる。また、溶融スラグ種別による大きな違いはみられなかった。

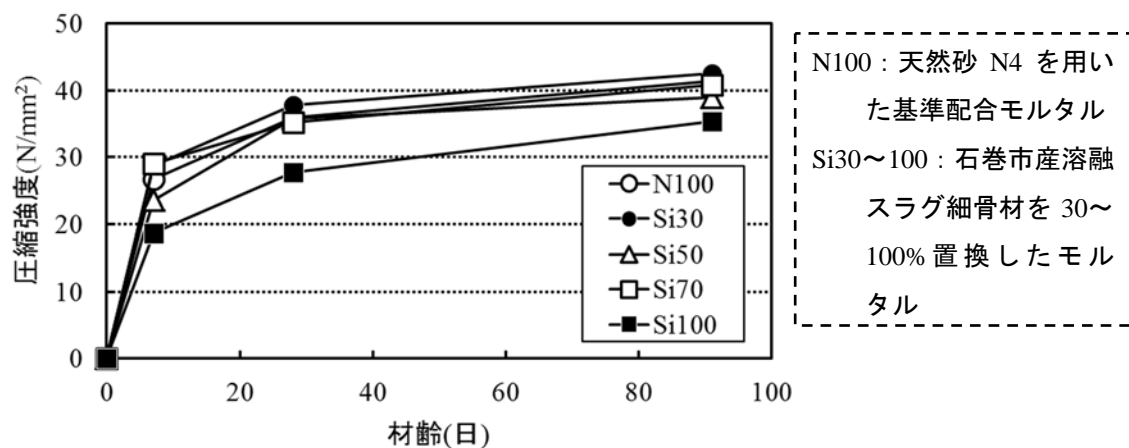


図 3-2-3-4 配合種別ごとの圧縮強度の経時変化 (Si シリーズ)

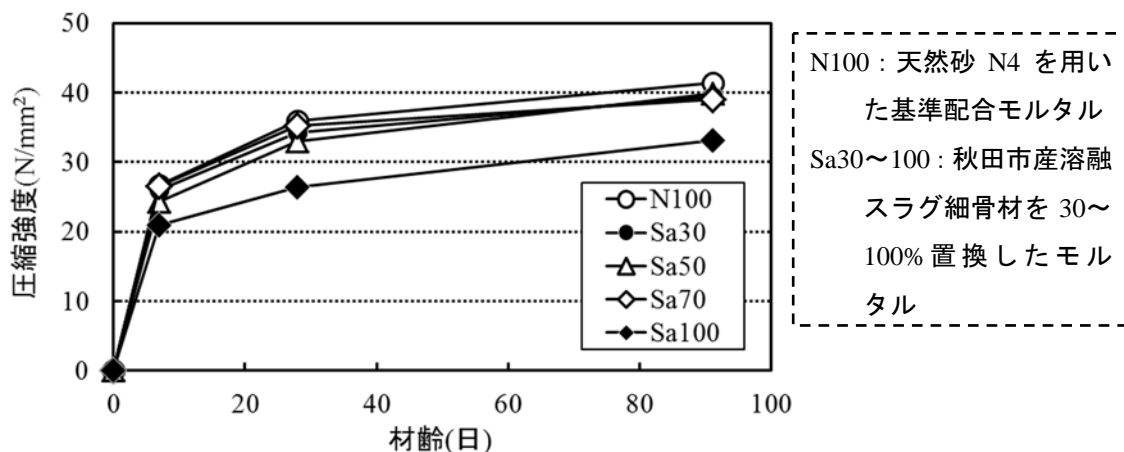


図 3-2-3-5 配合種別ごとの圧縮強度の経時変化 (Sa2 シリーズ)

(3) スラグ粉砕時間の検討

① フレッシュ性状

スラグ置換率 50 %におけるスラグ種別ごとのスラグ粉砕時間とフロー値の関係を図 3-2-3-6 に示す。両シリーズともスラグ粉砕時間の増加に伴い粒度が細くなり、フロー値が低下する傾向がみられた。Si シリーズは、5 分間の粉砕において粒形の改善が、粒度が細くなることにより卓越したためフロー値が大きくなったものの、その後は粒度が細くなるのに伴いフロー値が減少したと考えられる。

スラグ置換率 50 %におけるスラグ種別ごとのスラグ粉砕時間と空気量の関係を図 3-2-3-7 に示す。両シリーズともスラグ粉砕時間の増加に伴い粒子形状が改善され、空気量が低下する傾向がみられた。Si シリーズは、5 分間の粉砕において骨材粒子の脆弱部分や針状成分が破碎され、その成分による巻き込み空気増加を促進したと推察される。その後は粉砕による粒形の改善により巻き込み空気が徐々に減少したと考えられる。

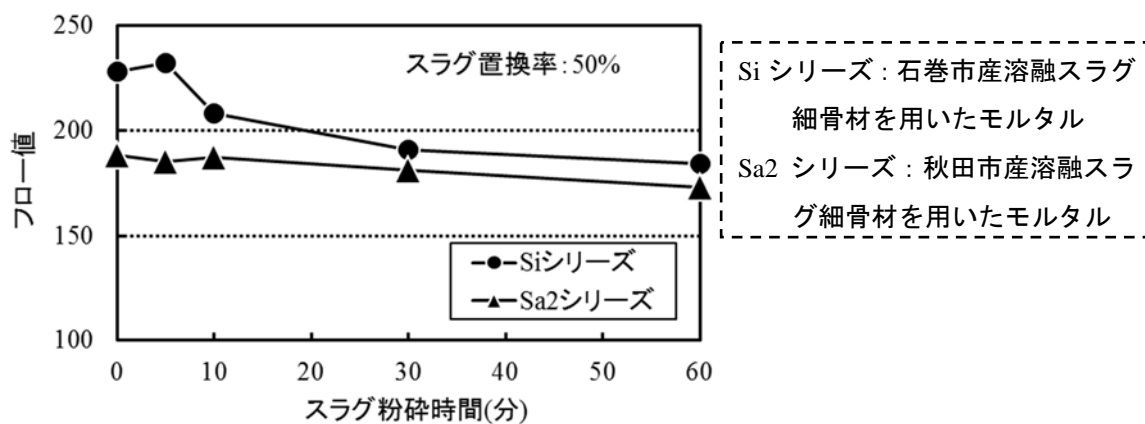


図 3-2-3-6 スラグ粉砕時間とフロー値の関係

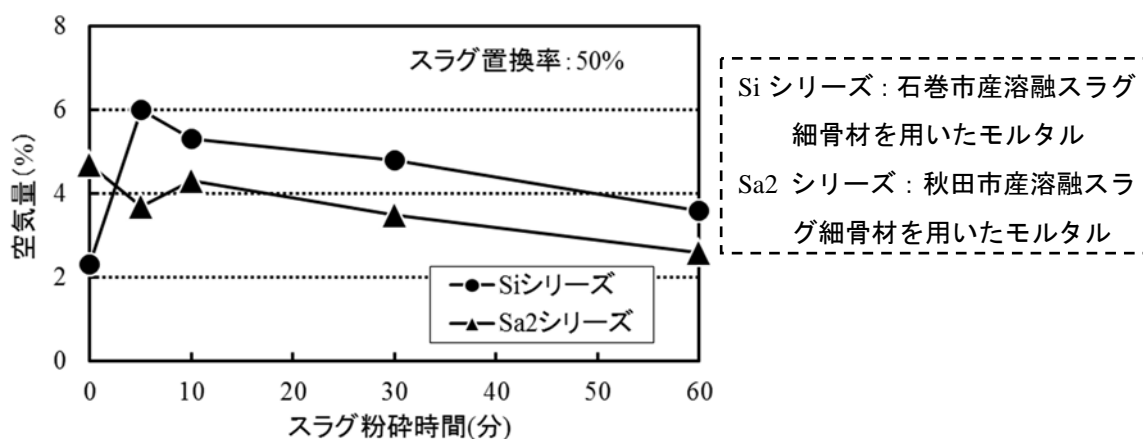


図 3-2-3-7 スラグ粉碎時間と空気量の関係

スラグ置換率 50 %におけるスラグ種別ごとのスラグ粉碎時間とブリーディング率の関係を図 3-2-3-8 に示す。

スラグ粉碎時間は 30 分間であり、両シリーズとも粉碎によりブリーディング率は小さくなった。その減少割合は Si シリーズが 35 %と大きく、Sa2 シリーズは 10 %であった。なお、図 2-5-5 および図 2-5-6 に示したように、粉碎時間が 30 分および 60 分の場合には、石巻産スラグ Si および秋田産スラグ Sa2 が JIS A 5005 (コンクリート用砕石及び砕砂) の砕砂の粒度範囲を外れるが、本実験の範囲では粒度分布よりも粒子形状の改善が支配的となったと考えられる。

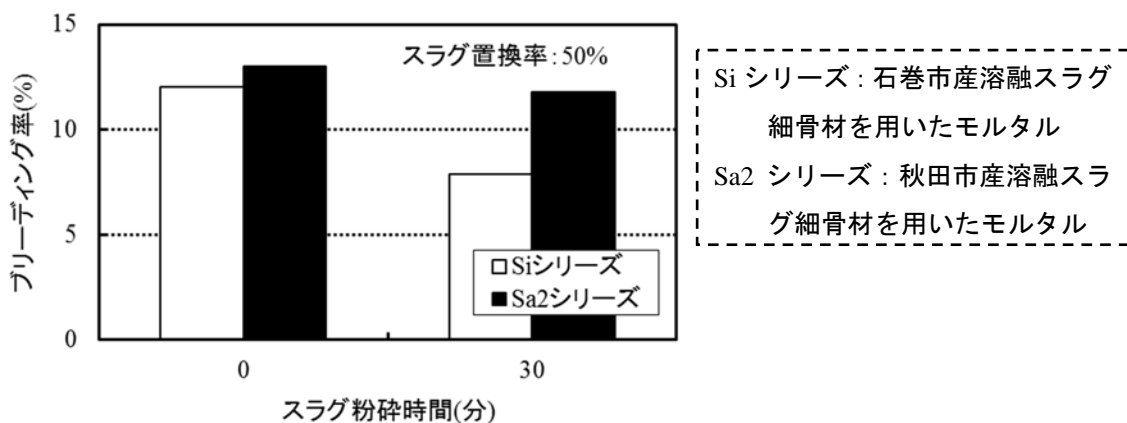


図 3-2-3-8 スラグ粉碎時間とブリーディング率の関係

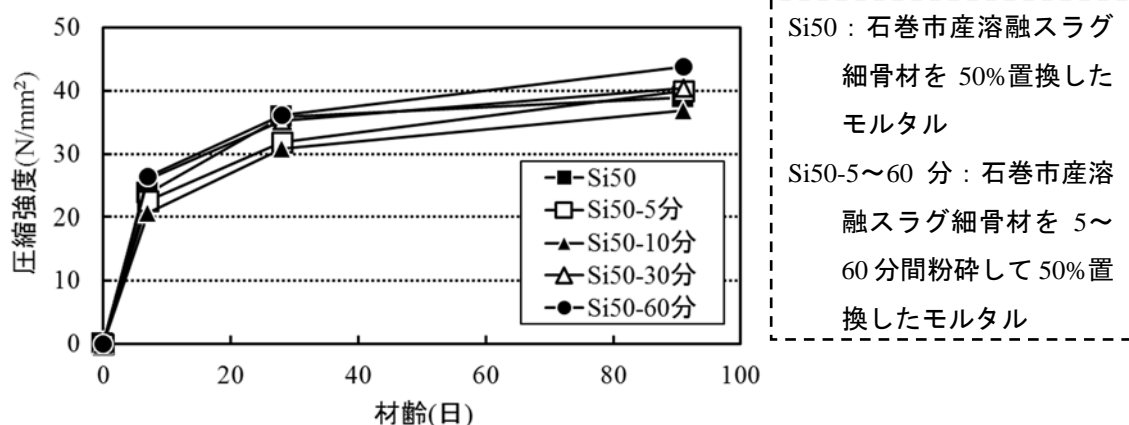


図 3-2-3-9 スラグ粉砕時間ごとの圧縮強度の経時変化 (Si シリーズ)

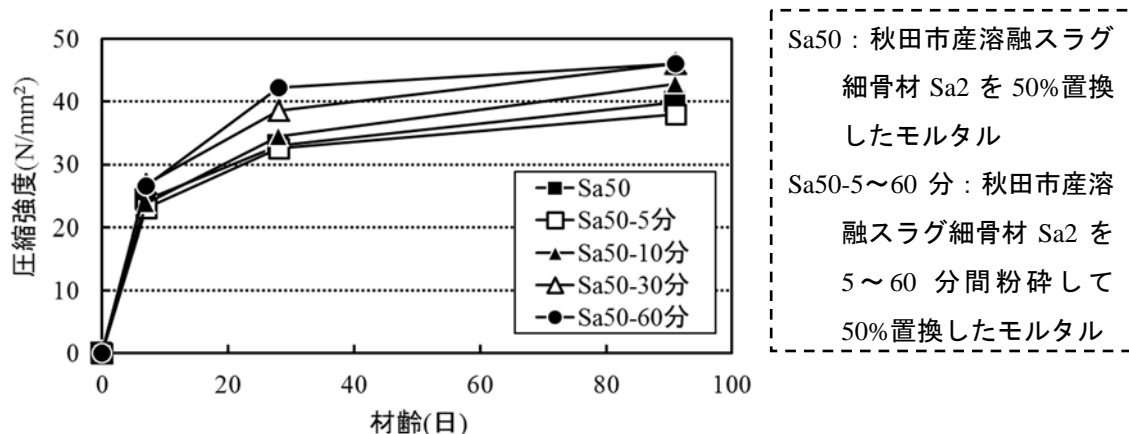


図 3-2-3-10 スラグ粉砕時間ごとの圧縮強度の経時変化 (Sa2 シリーズ)

② 強度性状

石巻産スラグ Si および秋田産スラグ Sa2 シリーズのスラグ置換率 50 %におけるスラグ粉砕時間ごとの圧縮強度の経時変化を図 3-2-3-9 および図 3-2-3-10 にそれぞれ示す。

材齢 91 日における Si シリーズの圧縮強度は、粉砕時間 10 分のとき粉砕なしに比して約 6 %低下したが、粉砕時間 60 分では約 12 %増加、粉砕時間 5 分および 30 分では粉砕なしに比して約 2～4 %増加した。同様に Sa2 シリーズの圧縮強度は、粉砕時間 5 分のとき粉砕なしに比して約 5 %低下したが、粉砕時間 10 分、30 分および 60 分ではそれぞれ約 7 %、16 %および 16 %増加した。

粉砕時間が比較的短い 10 分間までの間に、スラグ表面の角ばりや凸部、針状粒子などの脆弱部分が破壊されて粒状になり、一時的に巻き込み空気が増えることなどにより強度が低下、その後は粉砕による粒子性状の改善が卓越し、徐々に巻き込み空気が減少、これに伴い強度が増加したと考えられる。

また、粉砕によってスラグの比表面積が大きくなり、潜在水硬性が活性化されたことが考えられる。

(4) まとめ

- ① 溶融スラグの置換率増加に伴い、モルタルのフロー値は、主に溶融スラグの粒度や粒形に支配され、溶融スラグの粒度が標準よりも大きい場合は大きく、標準の場合は小さくなった。同様に、空気量は巻き込み空気が増加して増える傾向がみられた。これらの傾向は、いずれも溶融スラグの粉砕処理により改善されることが分かった。
- ② 溶融スラグ細骨材の使用によりモルタルのブリーディング率は増加する傾向があるが、溶融スラグの粉砕処理により改善されることが分かった。
- ③ 溶融スラグの置換率増加に伴い強度は低下する傾向があるが、溶融スラグの置換率が70%程度以下であればその低下率は材齢91日において最大6%程度であった。
- ④ 溶融スラグ細骨材の10分程度以上の粉砕処理は、それを用いたモルタルの強度改善に効果的であった。
- ⑤ 溶融スラグ細骨材の置換率を適切に設定し、場合によっては粉砕による品質改善処理を併用することにより、溶融スラグ細骨材の利用を促進することが可能と考えられる。

3. 2. 4 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリート

(1) 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの配合

秋田市産溶融スラグ細骨材 Sa1 を用いたコンクリートの配合を表 3-2-4-1 に示す。

表 3-2-4-1 秋田市産溶融スラグ細骨材 Sa1 を用いたコンクリートの配合

W/C (%)	スラグ 置換率 (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(kg/m ³)	
		水 W	セメント C	天然砂 N3	秋田市産 Sa1	碎石 G	SP	AE
44.3	0	146	330	732	0	1090	1.485	0.033
	30			512	220			
	50			366	366			
	70			220	512		1.320	

(2) フレッシュ性状の検討

スラグ置換率とスランプおよび空気量の関係を図 3-2-4-1 に示す。

スランプおよび空気量ともに、スラグ置換率の増加に伴い、ほぼ増加する傾向が認められる。溶融スラグの種類によっては、スラグ置換率の増加に伴ってスランプが減少する場合もあるが⁴⁾、スランプの増加は使用した溶融スラグの品質がコンクリート用細骨材の基準を満足していること、表面がガラス質の溶融スラグが増加して、モルタル成分のせん断抵抗が減少したことなどによると考えられる。また、スラグ置換率 70 %においては、スランプの増加を見越して高性能減水剤使用量を減じたため減少した。

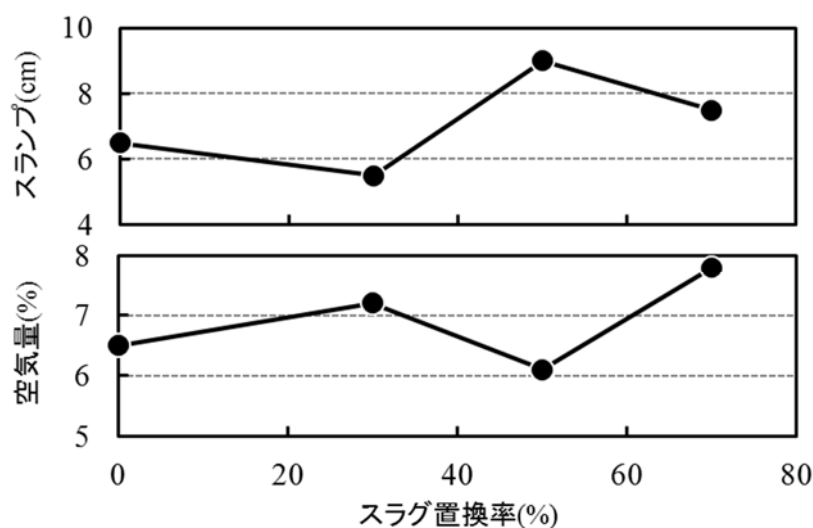


図 3-2-4-1 スラグ置換率とスランプおよび空気量の関係

(3) 強度の検討

スラグ置換率と圧縮強度の関係を図 3-2-4-2 に示す。スラグ置換率 70 %において、圧縮強度が減少する傾向が認められる。これは、スラグ粒子内の気泡の存在や表面のひび割れが顕微鏡観察で見られたことから、スラグ粒子自体の脆弱さやスラグ表面とペーストとの付着不良の影響が現れたと考えられる。

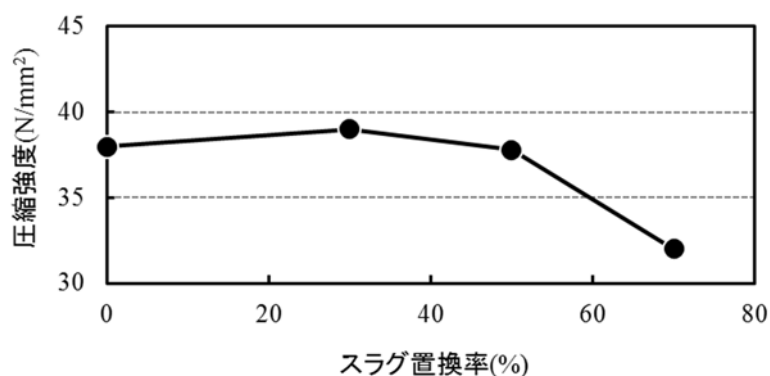


図 3-2-4-2 スラグ置換率と圧縮強度の関係

(4) 凍結融解試験

スラグ置換率と耐久性指数、300 サイクル終了時の質量減少率および明度の関係を図 3-2-4-3、図 3-2-4-4 および図 3-2-4-5 にそれぞれ示す。

スラグ置換率の増加に伴い耐久性指数は減少し、スラグ置換率 70 %で 85 となった。質量減少率は、スラグを置換しない場合より増加するが、置換率の増加による増加傾向は認められなかった。一般に、ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートのブリーディング量は、溶融方式の違いにもよるが天然砂を用いた場合より増加することが指摘されている^{41),42)}。ブリーディング量の増加は、コンクリート表面に脆弱層を形成し、スケーリングの程度を増加させると考えられている。しかし、図 3-2-4-4 に示したようにスラグ置換率の増加に伴う質量減少率の増加傾向が認められなかった。これは、用いたスラグ Sa1 の粗粒率が天然砂 N3 のそれより小さく、ブリーディング量が大きく異ならなかったことによると推察される。なお、スラグ置換率 0 %の場合と比較して質量減少率が増加したのは、スラグ粒子自体に内在する欠陥により凍結融解作用によって劣化し、表面からはく離した影響が大きいと判断される。

供試体表面の明度は、300 サイクル終了時ではスラグ置換率の増加に伴い減少する傾向が認められる。また、凍結融解試験前でもスラグ置換率の増加に伴う減少傾向が認められた。試験前後の明度の差は、置換率の変化によらずほぼ一定であることから、スラグ置換率を増加するとコンクリート表面がスラグの明度である黒色に近づき、凍結融解作用によってスラグ粒子が表面に露出した場合、これが顕著になると考えられる。

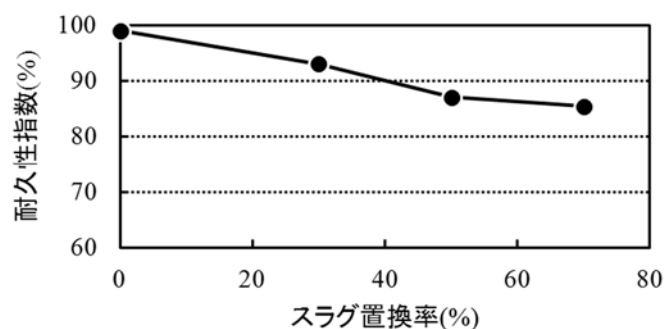


図 3-2-4-3 スラグ置換率と耐久性指数の関係

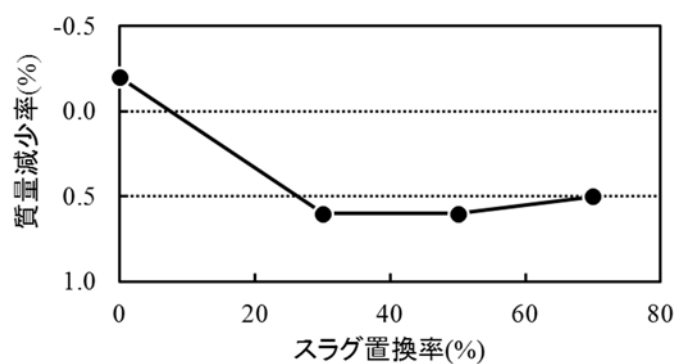


図 3-2-4-4 スラグ置換率と質量減少率の関係

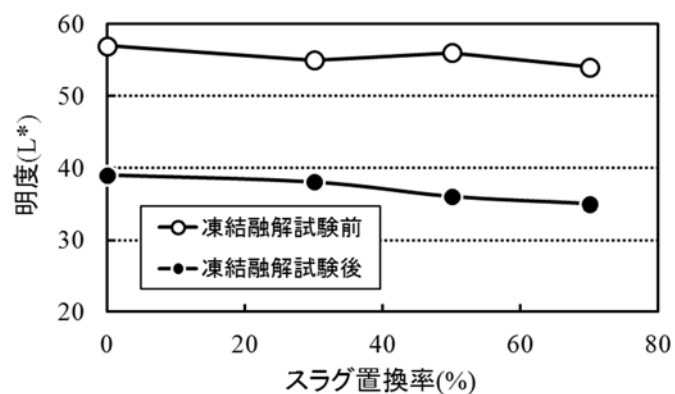


図 3-2-4-5 スラグ置換率と気乾状態の明度 L* の関係

スラグ置換率と試験前後における圧縮強度比を図 3-2-4-6 に示す。

強度比をスラグ置換率 0 % の強度に対する各スラグ置換率の強度の百分率とした。圧縮強度比は、試験開始前においては、スラグ置換率 70 % を除いて低下が認められなかった。試験終了後においては、スラグ置換率の増加に伴って低下し、スラグ置換率 70 % においてこれが顕著となった。このような現象が生じた原因として、凍結融解作用を受けた場合、

スラグ粒子に内在する気泡や微細なひび割れなどの欠陥により粒子自体の劣化が進行し、ペーストとの付着が損なわれたことが考えられる。したがって、ごみ溶融スラグの有効活用を図るためには、スラグ粒子に存在する欠陥を除去する必要があると判断される。

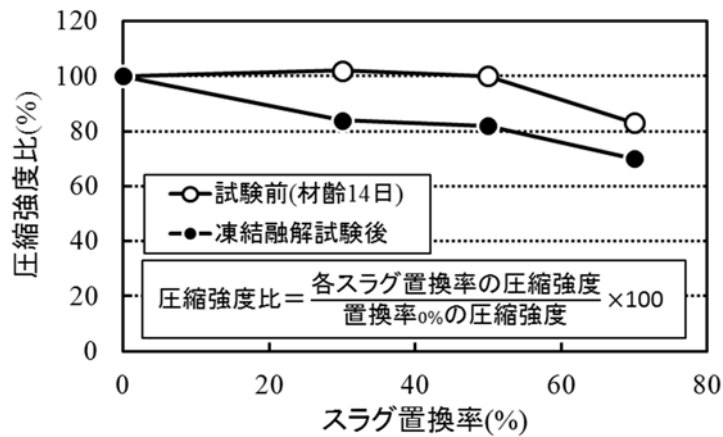


図 3-2-4-6 スラグ置換率と凍結融解試験前後における圧縮強度比の関係

(5) まとめ

- ① スラグ置換率の増加に伴いスランプおよび空気量は増加し、圧縮強度は粒子自体に内在する微細ひび割れや空隙欠陥と付着不良の影響によりスラグ置換率 70 %で低下した。単位容積質量は幾分増加した。
- ② スラグ置換率の増加に伴い耐久性指数は減少し、空気量 6 %を確保することによりスラグ置換率 70 %で 85 となった。質量減少率は、スラグを置換しない場合より増加するが、スラグ置換率の増加に伴う増加は認められなかった。
- ③ コンクリート表面の明度は、スラグ置換率の増加に伴い減少し、凍結融解 300 サイクル終了時には溶融スラグの明度（黒色）に近づいた。
- ④ 天然砂と比較して溶融スラグの密度は大きく、吸水率は小さいが、微細ひび割れや気泡を有するため、凍結融解作用により劣化してペーストとの付着が損なわれるため凍結融解試験後の圧縮強度および曲げ強度がスラグ置換率とともに大きく低下する傾向が認められた。

3. 2. 5 まとめ（短期的性能）

再生細骨材，廃ガラスカレットおよび溶融スラグ細骨材を用いた普通強度のモルタルおよびコンクリートの短期的性能〔フレッシュ時の特性値（フロー値，スランプ，空気量，ブリーディング率など），硬化後の特性値（材齢 91 日以内の強度，質量減少率，乾燥収縮率など）および凍結融解試験による特性値（耐久性指数など）〕について，以下のことがわかった。

（1）再生細骨材を用いたモルタル

再生細骨材を用いたモルタルの品質改善には，普通細骨材との混合使用や高性能 AE 減水剤を用いて水セメント比を低減することが効果的であること，また材齢初期における湿潤養生が重要であることが明らかとなった。

（2）廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル

廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの品質改善には，結合材としての高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混和が効果的であり，これにより廃ガラスカレットのアルカリシリカ反応を抑制できることがわかった。アルカリシリカ反応の抑制対策を適切に行えば，細骨材に対する廃ガラスカレットの置換率を大きくすることが可能と考えられる。

（3）溶融スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリート

溶融スラグ細骨材を用いたモルタルの品質改善には，普通細骨材との混合使用や溶融スラグ細骨材の粉碎処理が効果的であることがわかった。

溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍結融解性能の改善には，普通細骨材との混合使用や空気量 6 %を確保することが効果的であることがわかった。

3. 3 長期的性能

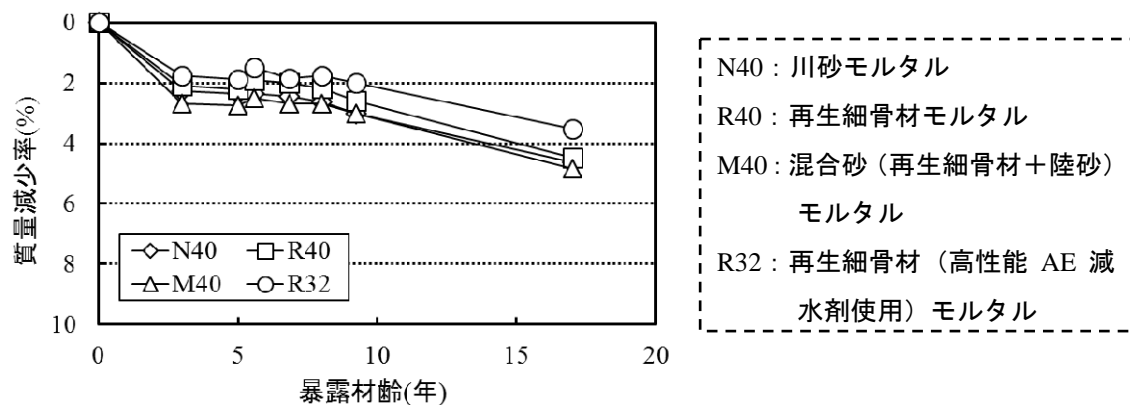
3. 3. 1 再生細骨材を用いたモルタルの暴露試験

(1) 質量減少率

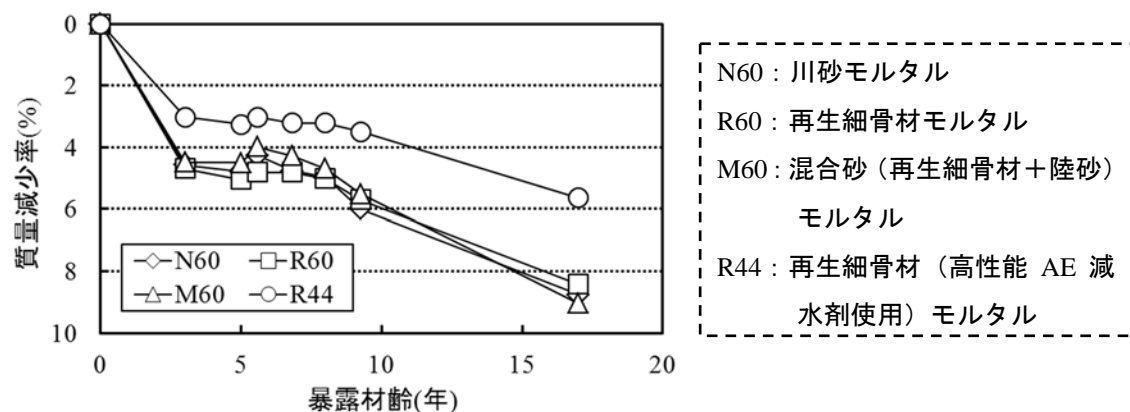
水セメント比 (W/C) 40 %および 60 %における配合種別ごとの質量減少率の経時変化を図 3-3-1-1 に示す。

図 3-3-1-1 (a) の水セメント比 (W/C) 40 %シリーズより、暴露材齢 17 年における配合 N40, R40, M40 および R32 の質量減少率はそれぞれ 4.6 %, 4.5 %, 4.8 %および 3.5 %となり、W/C が小さい配合 R32 が最も小さくなった。

同様に図 3-3-1-1 (b) の水セメント比 (W/C) 60 %シリーズより、暴露材齢 17 年における配合 N60, R60, M60 および R44 の質量減少率はそれぞれ 8.8 %, 8.4 %, 9.0 %および 5.6 %となり、W/C が小さい配合 R44 が最も小さくなった。このことから、質量減少率に対する細骨材種別の影響は W/C に比し小さいと考えられる。



(a) W/C=40%シリーズ



(b) W/C=60%シリーズ

図 3-3-1-1 配合種別ごとの質量減少率の比較

(2) 動弾性係数

暴露材齢 17 年における水セメント比 (W/C) 40%および 60%の配合種別ごとの動弾性係数を図 3-3-1-2 に示す。

暴露材齢 17 年における配合 R40, M40 および R32 の動弾性係数は、配合 N40 を基準とすると、N40 よりそれぞれ 29 %, 3 %および 15 %小さくなった。同様に配合 R60, M60 および R44 の動弾性係数は、N60 よりそれぞれ 35 %, 18 %小さく、および 12 %大きくなった。両水セメント比シリーズ (W/C=40%, 60%) において、再生細骨材をそのまま用いた配合 R40 および R60 の動弾性係数が最小となり、天然砂の混合により再生細骨材の粒度を調整した配合および高性能 AE 減水剤の使用により W/C を低減した配合は動弾性係数の回復がみられた。動弾性係数の比較においては、細骨材種別による明確な相違が認められた。なお、動弾性係数の測定は暴露材齢 17 年から開始したため、それ以前の測定結果は存在しない。

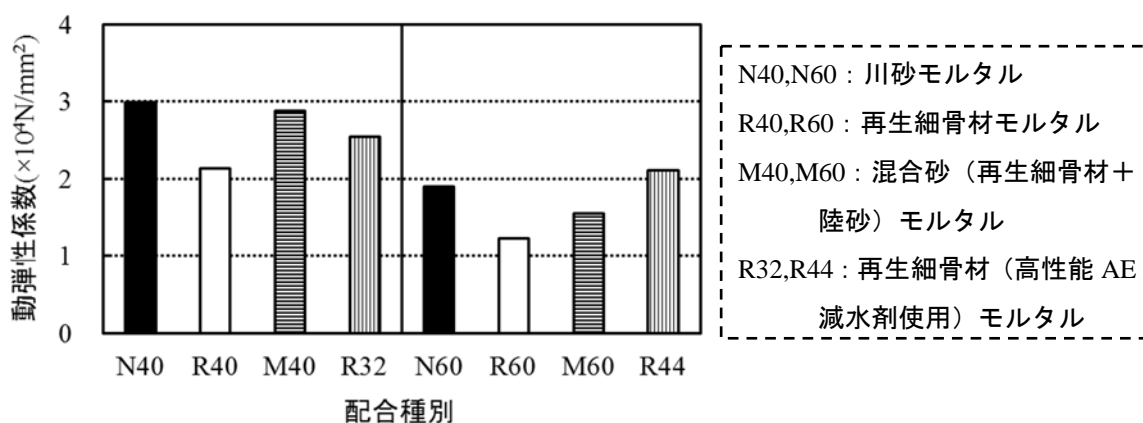


図 3-3-1-2 配合種別ごとの動弾性係数

(3) まとめ

- ① 積雪寒冷地における 17 年間の屋外暴露試験の結果、質量減少率は主に水セメント比に支配され、細骨材種別の影響は大きくないことが分かった。これに対して動弾性係数は、水セメント比および細骨材種別の影響が大きいことが分かった。
- ② 再生細骨材を用いる場合、水セメント比 40 %のシリーズにおいては天然砂との混合が、水セメント比 60 %のシリーズにおいては高性能 AE 減水剤の使用による水セメント比の低減が、それを用いたモルタルの長期的性能改善にそれぞれ効果的であることが示唆された。この結果を、3. 2. 1 (6) 節に述べた短期的性能における強度の検討結果と比較すると、配合種別ごとの傾向は必ずしも一致しておらず、短期・長期両面からみると、水セメント比 60 %における高性能 AE 減水剤使用による水セメント比低減が効果的であった。

3. 3. 2 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの暴露試験

(1) 質量減少率の経時変化

屋外暴露試験におけるモルタルの質量減少率 W_L の経時変化を図 3-3-2-1 に示す。

暴露材齢 15 年における配合 NR, K, KB および KF の質量減少率 W_L はそれぞれ, 5.4 %, 2.3 %, 2.9 % および 3.7 % であった。供試体の質量は, 測定時の含水状態によって若干の増減を繰り返しながら徐々に減少している。暴露開始から 2 年目程度まではいずれの供試体も標準養生から屋外に暴露されたことにより, 乾燥を受けて質量が減少したものと考えられるが, 特に配合 NR については, 他の供試体の細骨材が廃ガラスカレットであり吸水率が 0.40 % と小さいのに対して, 吸水率が 3.47 % の川砂を用いているために, 骨材中の水分の逸脱が支配的となったことが影響したものと考えられる。さらに供試体表面には, 凍結融解作用によると思われるスケーリングがみられたことから, これも質量減少の一因と考えられる。

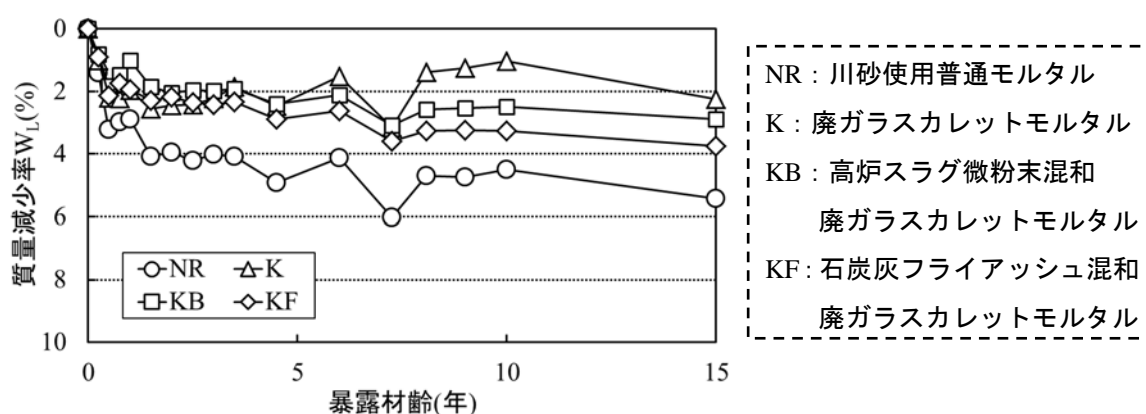


図 3-3-2-1 配合種別ごとの質量減少率の経時変化

(2) 相対動弾性係数の経時変化

屋外暴露試験におけるモルタルの相対動弾性係数の経時変化を図 3-3-2-2 に示す。

暴露材齢 15 年における配合 NR, K, KB および KF の相対動弾性係数はそれぞれ, 104 %, 50 %, 83 % および 101 % となり, 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュのアルカリシリカ反応抑制効果が確認された。配合 NR および K の相対動弾性係数は, 暴露開始からほとんど増加することなく, 材齢の経過とともに徐々に低下している。しかし, 配合 KB および KF の相対動弾性係数は, 暴露材齢 1.5 年および 1.0 年において最大値が 113 % および 121 % になっている。この最大値からの配合 KB および KF の相対動弾性係数の低下を考えると, マイナス 30 および 20 ポイントとなる。また配合 KB および KF の相対動弾性係数が暴露材齢 10 年から 15 年にかけてそれぞれ 11 および 5 ポイント低下していることから, さらに長期材齢の暴露性状を把握する必要があると考えられる。

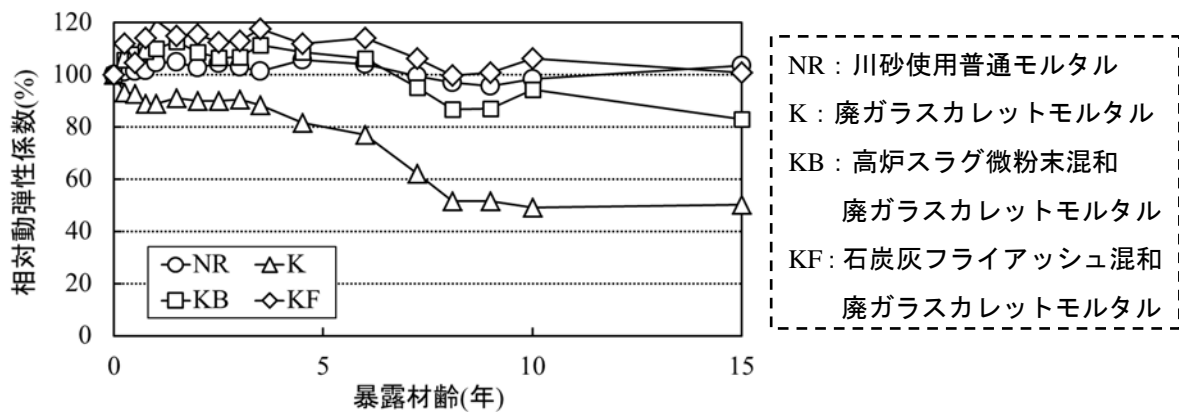


図 3-3-2-2 配合種別ごとの相対動弾性係数の経時変化

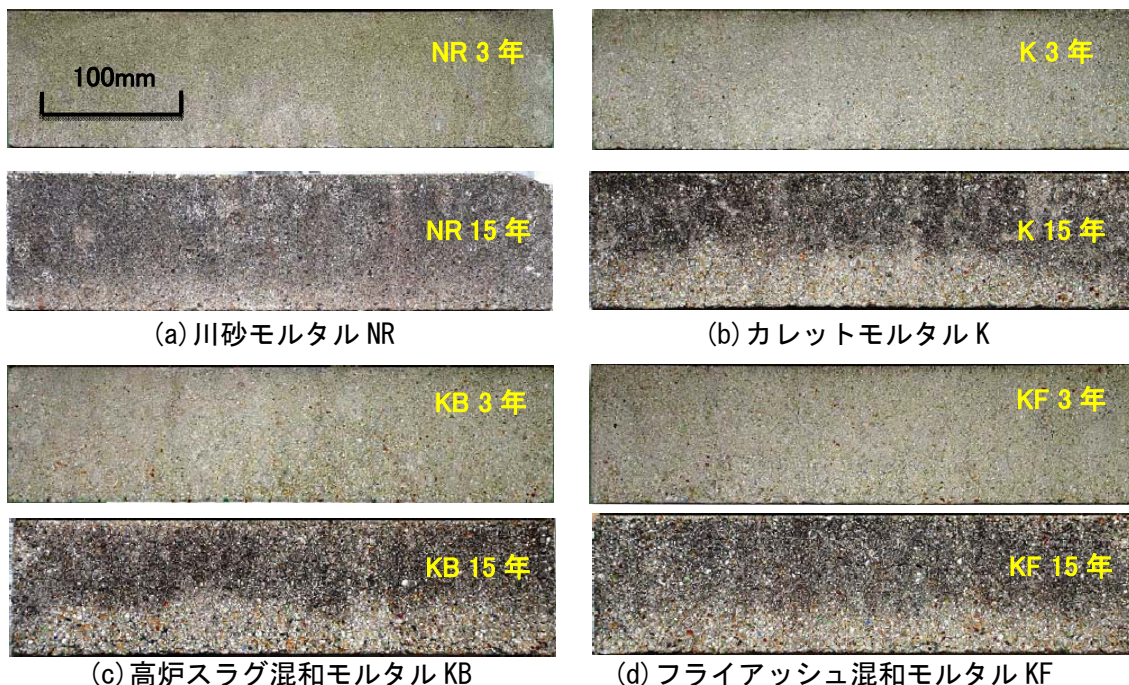


図 3-3-2-3 暴露材齢 3 年および 15 年経過後のモルタル供試体側面の外観

(3) 暴露供試体の外観

暴露材齢 3 年および 15 年経過後のモルタル供試体側面の外観を図 3-3-2-3 に示す。

暴露材齢 15 年経過後において、いずれの供試体も凍結融解作用によると思われるスケーリングにより、表面のペーストが剥離して骨材が露出し、黒っぽい汚れの吸着がみられた。図 3-3-2-3(a) 下の 15 年経過後の川砂モルタル NR の右上の欠損は、運搬時の取扱いによるものである。図 3-3-2-3(b) 下の 15 年経過後のカレットモルタル K には、主にアルカリシリカ反応によると思われるひび割れがみられた。これらのひび割れ部分には、生態系物質の吸着が確認された。一方、アルカリシリカ反応抑制対策のため高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和した図 3-3-2-3(c) 下、(d) 下の 15 年経過後の高炉スラグ混和モルタル

ル KB およびフライアッシュ混和モルタル KF には、スケーリングによる骨材の露出以外に目立った劣化は認められなかった。

(4) 暴露供試体表面の色調

色彩色差計による明度および色相・彩度の測定は、暴露材齢1年経過時から開始し、供試体の暴露側面（100×400 mm の面）各3箇所での測定値の平均である。

暴露試験における明度（ L^* ）の経時変化を図 3-3-2-4 に示す。

測定開始時および暴露材齢 15 年における各供試体側面の明度範囲は、64.4～67.3 および 40.4～48.8、平均では 65.6 および 44.3 となり 21.3 低下し、暴露材齢の進行に伴う低下が認められた。

配合種別ごとの明度の変化を図 3-3-2-5 に示す。

測定開始時の最大明度は配合 KB の 67.3、配合 NR および KF の明度は 65.4、最小明度は配合 K の 64.4 であった。

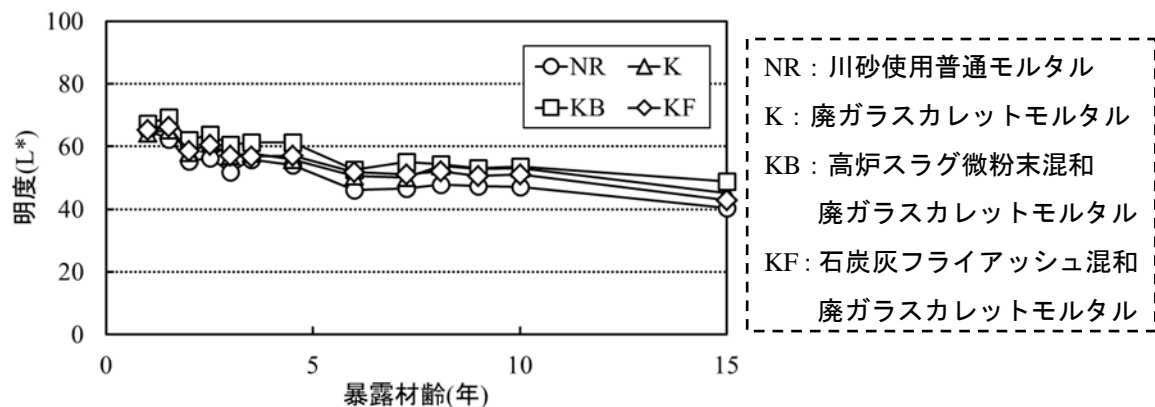


図 3-3-2-4 配合種別ごとの明度の経時変化

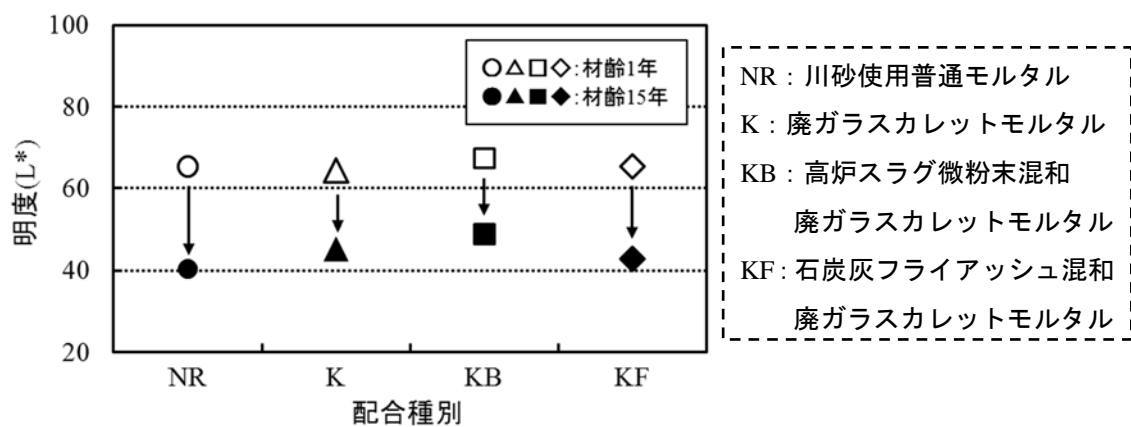


図 3-3-2-5 配合種別ごとの明度の変化

暴露試験における相対明度（測定開始時の明度に対する各材齢の明度の割合(%)： rL^* ）の経時変化および暴露材齢 15 年における配合種別ごとの相対明度を図 3-3-2-6 および図 3-3-2-7 にそれぞれ示す。

暴露材齢 15 年における配合 NR, K, KB および KF の相対明度はそれぞれ, 61.8 %, 70.3 %, 72.5 % および 65.6 %, 平均 67.6 % であった。図 3-3-2-3 でも明らかなように, 暴露材齢 15 年経過後の供試体側面には黒色の汚れが吸着し, 骨材の露出とともに明度低下の原因になったと考えられる。特に配合 NR は, 黒色の汚れが測定面のほぼ全体にみられ, さらに骨材である川砂の露出によって明度が 40.4, 相対明度が 61.8 % と 4 配合中最小になったと考えられる。

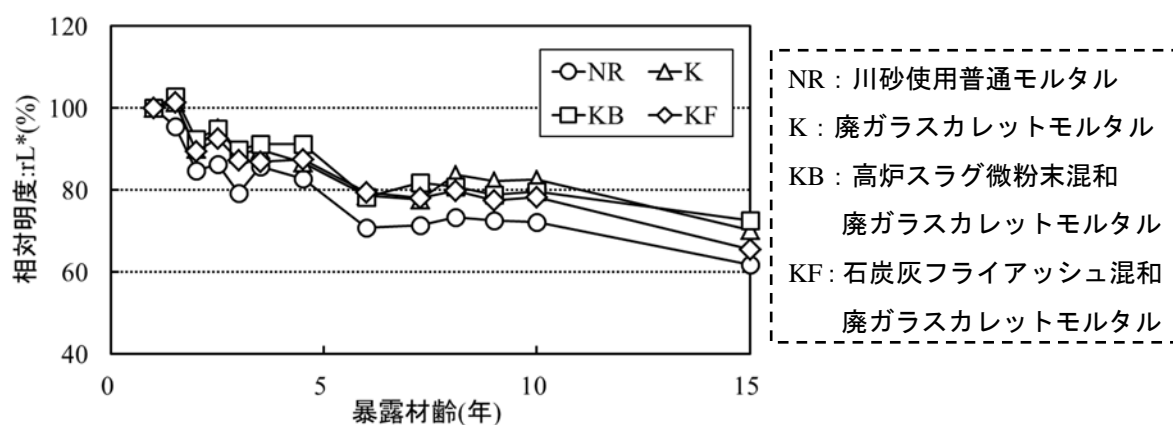


図 3-3-2-6 配合種別ごとの相対明度の経時変化

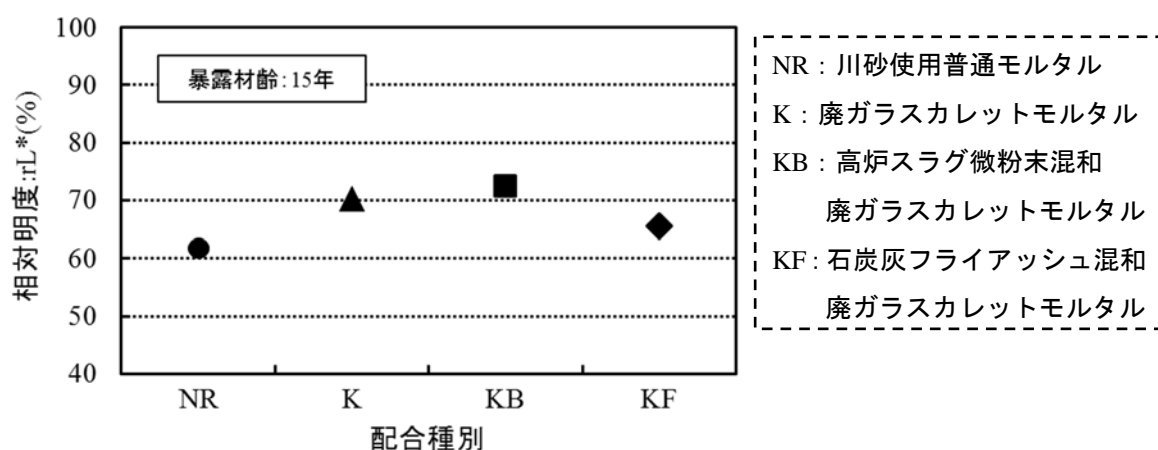


図 3-3-2-7 暴露材齢 15 年における配合種別ごとの相対明度

いずれの供試体側面も上下方向に色調のばらつきがみられたことから, 供試体暴露時の設置環境については検討が必要である。

以上のことから, 既往の研究³⁴⁾で検討されているように, 明度は暴露期間中の供試体表

面の品質変化に対して、何らかの指標となり得ると考えられる。

なお、全ての供試体において色相・彩度を表す a^* および b^* について、その変化は殆ど認められなかった。

(5) 暴露供試体表面の相対明度と質量減少率の関係

暴露期間中の各モルタル供試体側面の相対明度 rL^* と質量減少率 W_L の関係を図 3-3-2-8 に示す。

明度の測定を暴露材齢 1 年経過後から開始したため、図中の質量減少率 W_L は、各暴露材齢時点での質量減少率から暴露材齢 1 年経過時の質量減少率を減じたものとしており、図 3-3-2-1 に示した質量減少率とは異なっている。なお、暴露材齢 1 年における配合 NR, K, KB および KF の質量減少率はそれぞれ、2.9 %, 2.0 %, 1.0 % および 1.9 % であった。

川砂モルタル配合 NR, 高炉スラグ微粉末を混和したカレットモルタル配合 KB およびフライアッシュを混和したカレットモルタル配合 KF の相対明度 rL^* と質量減少率 W_L の間には相関関係が認められ、相関係数 $|r|$ は 0.74~0.87 の範囲であり、質量の減少に伴い明度が相対的に低下する傾向がみられた。これに対し、廃ガラスカレットをそのまま細骨材に用いたカレットモルタル配合 K の相対明度と質量減少率の間には相関関係は認められず、相関係数 $|r|$ は 0.18 であった。これは、廃ガラスカレット自体の色彩や明度のバラツキが大きいことが影響していると考えられる。

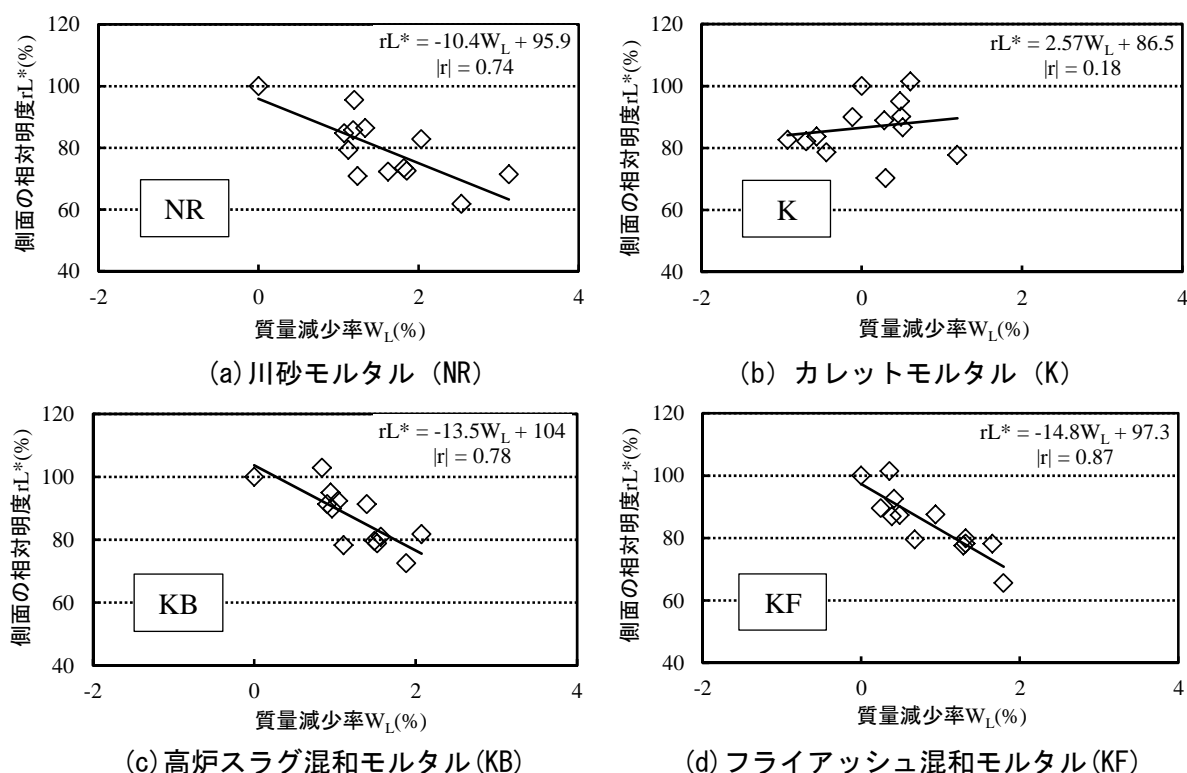


図 3-3-2-8 暴露期間中の各モルタル供試体側面の相対明度と質量減少率の関係

(6) まとめ

- ① 積雪寒冷地で屋外暴露試験を 15 年間行った結果、スケーリングにより供試体表面のペーストが剥離して骨材が露出し、黒色の汚れの吸着がみられた。
- ② 暴露期間の進行に伴い供試体の質量減少率は増加し、相対動弾性係数は低下した。最も劣化が著しいカレットモルタルの暴露材齢 15 年における相対動弾性係数は 50 %まで低下したが、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混和により相対動弾性係数は大きく改善された。
- ③ 暴露期間中の供試体表面の明度は、暴露材齢の進行に伴い低下する傾向があり、供試体表層の剥離や汚れなどの品質変化に対する指標になると考えられる。
- ④ 上記②は、短期的性能の 3. 2. 2 (4) 節に述べたアルカリシリカ反応性の検討結果と一致しており、アルカリシリカ反応の抑制対策を適切に行えば、長期的性能の観点からも、細骨材に対する廃ガラスカレットの置換率をより大きくすることが可能と考えられる。

3. 3. 3 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの暴露試験

(1) 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの配合

暴露試験に供した石巻市産の溶融スラグ細骨材 Si を用いたコンクリートの配合を表 3-3-3-1 に示す。

表 3-3-3-1 暴露試験に供した石巻市産溶融スラグ細骨材 Si を用いたコンクリートの配合

配合 種別	設計基準 強度 (N/mm ²)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水	セメント	天然砂	石巻市産	碎石	混和剤	
			W	C	N4	Si	G	SP	AE
N100C	30	44.2	146	330	726	0	1106	3.63	0.149
Si30C					518	222			
Si50C					375	375			

(2) 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの暴露性状

配合種別ごとの質量減少率の経時変化を図 3-3-3-1 に示す。

暴露直後、質量は増加し暴露材齢 9 ヶ月時点で 1.6～1.7 % 程度の増加率であった。その後、質量は徐々に減少しているが、暴露材齢約 7 年で 0.5～0.8 % の増加となっている。配合種別ごとの違いは大きくないが、溶融スラグを置換した配合 Si30C および Si50C の質量増加率が山砂を用いた配合 N100C に比べてやや大きくなっている。

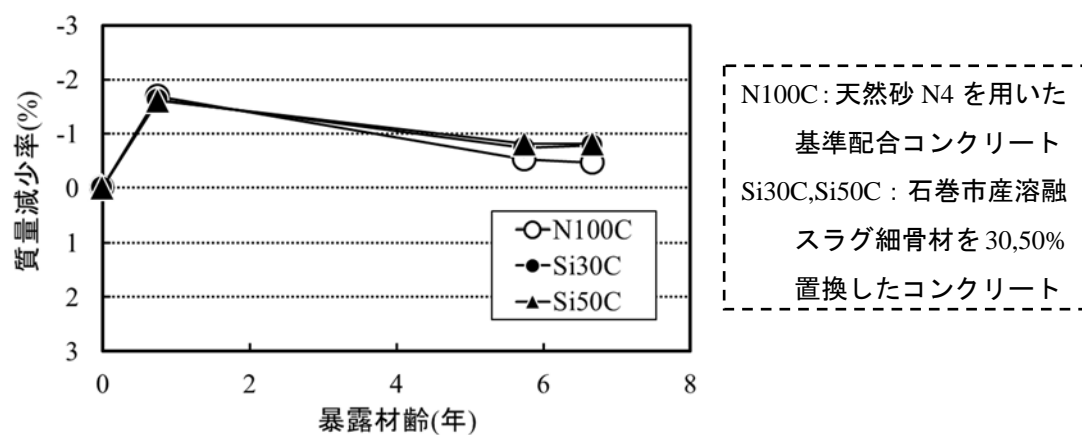


図 3-3-3-1 暴露試験における質量減少率の経時変化

配合種別ごとの相対動弾性係数の経時変化を図 3-3-3-2 に示す。

図 3-3-3-1 に示した質量減少率と同様の変化を示し、暴露材齢 9 ヶ月時点で 129～133 % まで増加し、その後徐々に低下、暴露材齢約 7 年で配合 N100C, Si30C および Si50C の相

対動弾性係数はそれぞれ 107 %, 129 % および 124 % となっており、溶融スラグを置換した配合 Si30C および Si50C の相対動弾性係数が山砂を用いた配合 N100C に比べて大きくなっている。

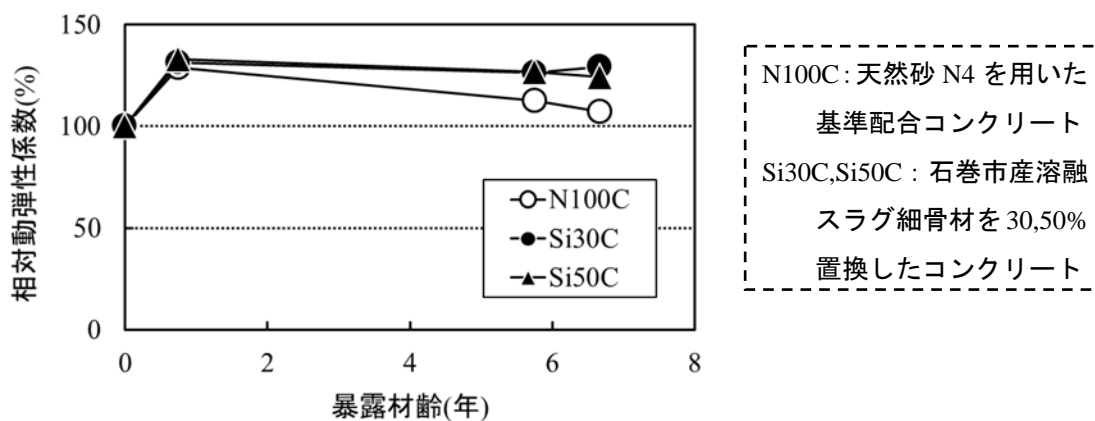


図 3-3-3-2 屋外暴露試験における相対動弾性係数の経時変化

配合種別ごとの供試体表面の明度の経時変化を図 3-3-3-3 に示す。

明度 L^* は 0 が黒、100 が白を表し、図中太線は溶融スラグ自体の明度を示す。供試体表面の明度は、暴露材齢の進行とともに徐々に低下した。暴露開始時点の明度 L^* の範囲は 63～67 であったが、材齢約 7 年で 20 程度低下し、その範囲は 43～47 となった。凍結融解作用に伴う供試体表面のスケーリングによって、スラグ粒子が表面に露出すれば、明度はスラグの明度に近づき減少すると考えられたが、配合種別による違いは認められなかったことから、明度の低下は主に供試体表面の経年汚れの増加によるものと思われる。

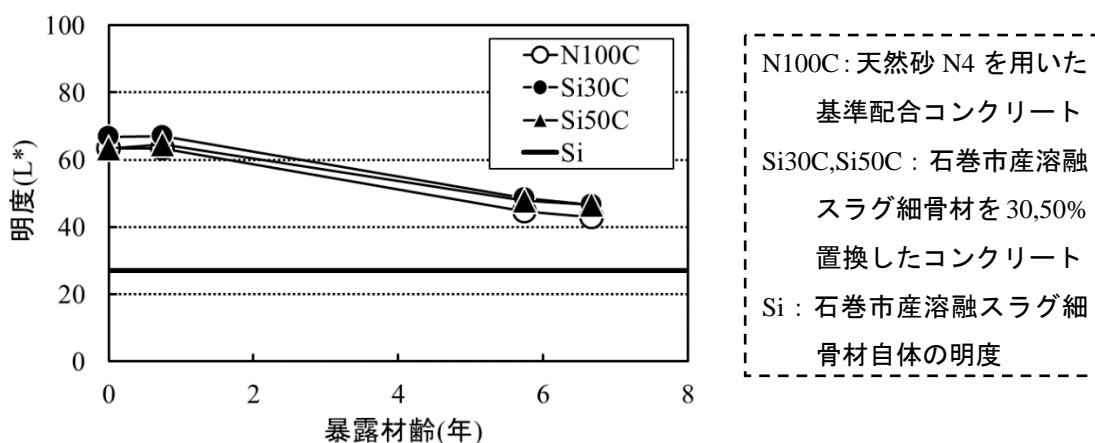


図 3-3-3-3 暴露試験における供試体表面の明度 (L^*) の経時変化

（3）まとめ

溶融スラグを細骨材の一部（質量比 30%および 50%）に用いたコンクリートの積雪寒冷地における約7年の屋外暴露試験の結果，山砂を細骨材に用いた場合に比較して，質量減少率は小さく，相対動弾性係数は大きくなったが，コンクリート表面の明度には有意な差は認められなかった。今後も屋外暴露試験を継続し，より長期における性状を明らかにする必要がある。

3. 3. 4 まとめ（長期的性能）

再生細骨材，廃ガラスカレットおよび溶融スラグ細骨材を用いた普通強度のモルタルおよびコンクリートの長期的性能〔1年以上の暴露試験による特性値（質量減少率，相対動弾性係数，供試体の表面色など）〕について，以下のことがわかった。

（1）再生細骨材を用いたモルタル

積雪寒冷地で屋外暴露試験を17年間行った結果，質量減少率は主に水セメント比に支配され，細骨材種別の影響は大きくないことがわかった。これに対し動弾性係数には，水セメント比および細骨材種別の影響が大きいことがわかった。

また再生細骨材を用いる場合，水セメント比40%においては普通細骨材との混合使用が，水セメント比60%においては高性能AE減水剤の使用による水セメント比の低減が，それぞれ長期的性能の改善に対して効果的であることが示唆された。

（2）廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル

積雪寒冷地で屋外暴露試験を15年間行った結果，スケーリングにより供試体表面のペーストが剥離して骨材が露出し，黒色の汚れの吸着がみられた。

また暴露期間の進行に伴い，供試体の質量減少率は増加し，相対動弾性係数は低下した。最も劣化が著しかったカレットモルタルの暴露材齢15年における相対動弾性係数は50%まで低下したが，高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混和したモルタルの相対動弾性係数は大きく改善された。

暴露期間中の供試体表面の明度は，暴露材齢の進行に伴い低下する傾向があり，供試体表層の剥離や汚れなどの品質変化に対する指標になると考えられる。

（3）溶融スラグ細骨材を用いたコンクリート

溶融スラグを細骨材の一部に用いたコンクリートの積雪寒冷地における約7年の屋外暴露試験の結果，山砂を細骨材に用いた場合に比較して，質量減少率は小さく，相対動弾性係数は大きくなったが，コンクリート表面の明度には有意な差は認められなかった。

3. 4 まとめ（普通強度のモルタルおよびコンクリートへの適用に関する検討）

再生細骨材，廃ガラスカレットおよび溶融スラグ細骨材を用いた普通強度のモルタルおよびコンクリートの短期的性能〔フレッシュ時の特性値（フロー値，スランプ，空気量，ブリーディング率など），硬化後の特性値（材齢 91 日以内の強度，質量減少率，乾燥収縮率など）および凍結融解試験による特性値（耐久性指数など）〕および長期的性能〔1 年以上の暴露試験による特性値（質量減少率，相対動弾性係数，供試体の表面色など）〕について，以下のことがわかった。

（1）再生細骨材を用いたモルタル

① 短期的性能

再生細骨材を用いたモルタルの品質改善には，普通細骨材との混合使用や高性能 AE 減水剤を用いて水セメント比を低減することが効果的であること，また材齢初期における湿潤養生が重要であることが明らかとなった。

② 長期的性能

積雪寒冷地で屋外暴露試験を 17 年間行った結果，質量減少率は主に水セメント比に支配され，細骨材種別の影響は大きくないことがわかった。これに対し動弾性係数には，水セメント比および細骨材種別の影響が大きいことがわかった。また再生細骨材を用いる場合，水セメント比 40 %においては普通細骨材との混合使用が，水セメント比 60 %においては高性能 AE 減水剤の使用による水セメント比の低減がそれぞれ長期的性能の改善に対して効果的であることが示唆された。

以上の検討結果から，短期的および長期的性能における配合種別ごとの傾向は必ずしも一致せず，短期・長期両面からの検討の必要性が確認された。本研究では，水セメント比 60%において，高性能 AE 減水剤の使用による水セメント比の低減が再生細骨材を用いたモルタルの短期的および長期的性能の改善に効果的であることが分かった。

（2）廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル

① 短期的性能

廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの品質改善には，結合材としての高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混和が効果的であり，これにより廃ガラスカレットのアルカリシリカ反応を抑制できることがわかった。

② 長期的性能

積雪寒冷地で屋外暴露試験を 15 年間行った結果，スケーリングにより供試体表面のペーストが剥離して骨材が露出し，黒色の汚れの吸着がみられた。また暴露期間の進行に伴い供試体の質量減少率は増加し，相対動弾性係数は低下した。最も劣化が著しかったカレットモルタルの暴露材齢 15 年における相対動弾性係数は 50 %まで低下したが，高炉スラグ

微粉末やフライアッシュの混和によるアルカリシリカ反応抑制効果により大きく改善された。暴露期間中の供試体表面の明度は、暴露材齢の進行に伴い低下する傾向があり、供試体表層の剥離や汚れなどの品質変化に対する指標になると考えられる。

以上の検討結果から、廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルのアルカリシリカ反応抑制対策として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混和が効果的であることが明らかとなった。アルカリシリカ反応抑制対策を適切に行えば、細骨材に対する廃ガラスカレットの置換率を、より大きくすることが可能と考えられる。

（3）溶融スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリート

① 短期的性能

溶融スラグ細骨材を用いたモルタルの品質改善には、普通細骨材との混合使用や溶融スラグ細骨材の粉碎処理が効果的であることがわかった。また、溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍結融解性能の改善には、普通細骨材との混合使用や、空気量6%を確保することが効果的であることがわかった。

② 長期的性能

溶融スラグを細骨材の一部に用いたコンクリートの積雪寒冷地における約7年の屋外暴露試験の結果、山砂を細骨材に用いた場合に比較して、質量減少率は小さく、相対動弾性係数は大きくなったが、コンクリート表面の明度には有意な差は認められなかった。

以上の検討結果から、置換率を適切に設定し、必要に応じて品質改善処理を併用することにより溶融スラグ細骨材の利用促進が可能と考えられる。今後は、より長期の暴露性状把握が必要である。

参考文献

- 26) 河野伊知郎, 中島清実, 齊藤和秀, 林孝明: ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.94-99, 2012
- 34) 柏崎健輔, 佐藤重悦, 城門義嗣, 加賀谷誠: ごみ溶融スラグをリサイクル使用したコンクリートの凍結融解特性と品質改善に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1435-1440, 2005
- 41) 高田聡恵, 糸山豊, 上原匠, 梅原秀哲: 溶融スラグのコンクリート用材料としての有効利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1629~1634, 2004
- 42) 北辻政文, 田中礼治, 遠藤孝夫, 鳴海繁実: 都市ごみガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用, コンクリート工学論文集, No.13, Vol.2, pp.89~97, 2002

第4章 埋戻し材用低強度モルタルへの適用に関する検討

4. 1 第4章の概要

第4章では、埋戻し材用低強度モルタルに関する実験の結果および考察を示した。この種の材料は産業副産物やリサイクル材料の適用に有利であることから、廃ガラスカレットおよび再生細骨材の適用性について、室内試験における検討結果を示した。その上で、低強度モルタルを利用する場合に必要な配合選定の方法として、室内および現地における強度に基づく選定手順を示した。さらに、得られた低強度モルタルのフレッシュ時のワーカビリティおよび硬化後の強度特性に関する評価方法について検討した結果を示した。

4. 2 リサイクル材料の適用に関する検討

4. 2. 1 低強度モルタルの配合

廃ガラスカレット K2 を細骨材に用いた低強度モルタルの配合を表 4-2-1-1 に示す。表中の配合種別において示した KFa1 の K は細骨材種別において秋田市産廃ガラスカレット K2, Fa はフライアッシュ種別において秋田県能代市産フライアッシュ Fa を用いたことを示し、末尾の数値 1 は粉体中のセメント質量の割合 $C/(F+C)=1\%$ を示す。

目標フロー値（250 以上）を満足した秋田県大館市（旧田代町）産再生細骨材 R2 を用いた低強度モルタルの配合を表 4-2-1-2 に示す。

表 4-2-1-1 秋田市産廃ガラスカレット K2 を細骨材に用いた低強度モルタルの配合

配合 種別	W/(F+C) (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(SP) [(F+C)×wt%]
			W	F	C	S (K2)	
KFa1	40	4.5	311	769	8	777	0.4/0.6
KFb1		3.0	312	774		782	
KFc1		2.0	321	797		805	

W/(F+C) : 水粉体比, F : フライアッシュ

表 4-2-1-2 秋田県大館市（旧田代町）産再生細骨材 R2 を用いた低強度モルタルの配合

配合 種別	フロー 値	W/(F+C) (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(SP) [(F+C)×wt%]
				W	F	C	S (R2)	
RFa1	285	40	2.0	310	768	8	776	0.4
RFb0	280	50		307	615	0	922	
RFc10	260	70		389	501	56	834	0.3

W/(F+C) : 水粉体比, F : フライアッシュ

4. 2. 2 廃ガラスカレットを細骨材に用いた場合のフライアッシュによるアルカリシリカ反応抑制効果の確認

細骨材として砕砂 CS2 を用いた普通モルタル N-C, 細骨材として秋田市産廃ガラスカレット K1 を用いた K-C および K-C のセメントの一部を能代市産フライアッシュ Fa で置換したモルタル K-Fa のモルタルバー法 (JIS A 1146) による材齢 182 日の膨張率および膨張率試験後の曲げ強度試験結果を図 4-2-2-1 に示す。図中、矢印および赤の破線はモルタルバー法における膨張率の上限 0.100% を示す。

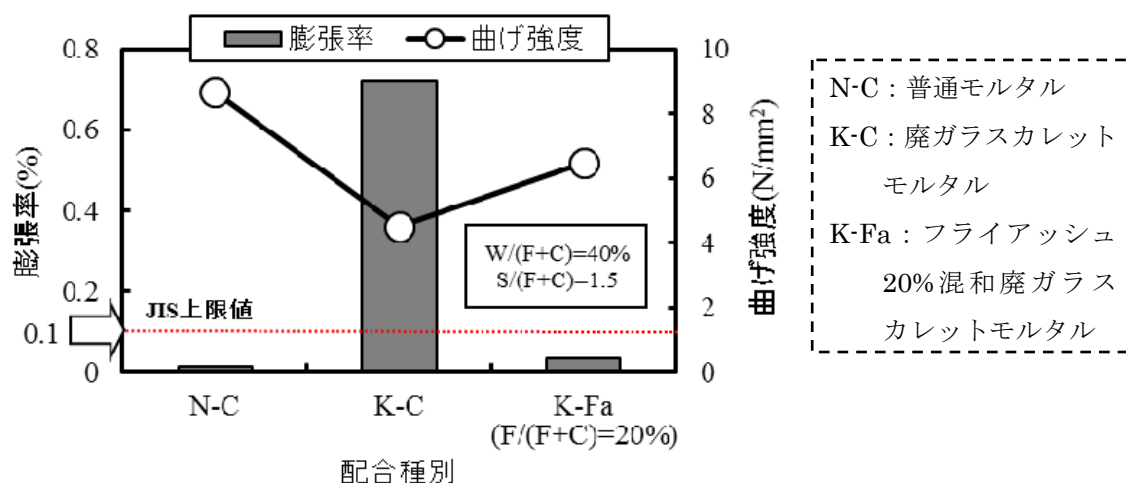


図 4-2-2-1 フライアッシュによるアルカリシリカ反応抑制効果

フライアッシュの置換率はセメント質量比 20 %, 水粉体比 $W/(F+C)$ は 40 %, 細骨材粉体比 $S/(F+C)$ は 1.5 である。図 4-2-2-1 より、細骨材を砕砂とした場合、アルカリシリカ反応が発生することはないが、廃ガラスカレットとした場合にはアルカリシリカ反応が発生し、曲げ強度が低下することがわかる。しかし、セメントの一部をフライアッシュに置換することによりアルカリシリカ反応の発生を抑制できることが確認できた。

本実験で対象とするモルタルは、セメント量が極端に少ないモルタルであり、さらにフライアッシュを多量に用いるためアルカリシリカ反応を抑制できると判断される。以下の節では、廃ガラスカレットを用いた場合を主として示し、一部再生細骨材を用いた場合との比較を示す。

4. 2. 3 細骨材種別がフロー値および強度に及ぼす影響の検討

(1) フロー値の検討

能代市産フライアッシュ Fa を用いた低強度モルタルの細骨材種別ごとのフロー値を図 4-2-3-1 に示す。

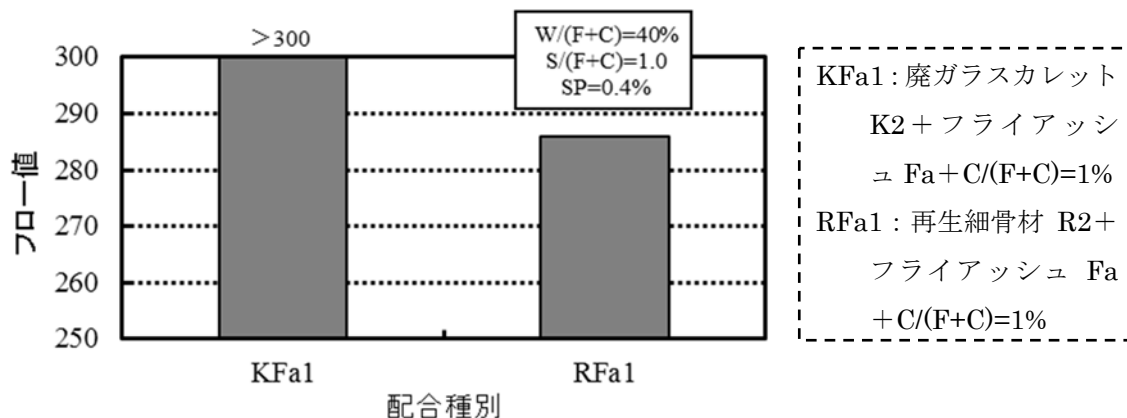


図 4-2-3-1 細骨材種別ごとのフロー値

水粉体比 $W/(F+C)=40\%$ 、細骨材粉体比 $S/(F+C)=1.0$ および SP 添加率を 0.4% とした場合のフロー値は、廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 を用いた場合、それぞれ 300 超および 286 となり、材料分離はみられず目標値の 250 以上となった。廃ガラスカレット K2 を用いた場合のフロー値が再生細骨材 R2 を用いた場合より大きくなった原因は、廃ガラスカレット K2 の粗粒率が再生細骨材 R2 よりも大きいことおよび廃ガラスカレット K2 の粒子表面が平滑であることが考えられる。

(2) 強度の検討

フライアッシュ Fa を用いた場合の細骨材種別ごとの材齢 91 日の圧縮強度を図 4-2-3-2 に示す。

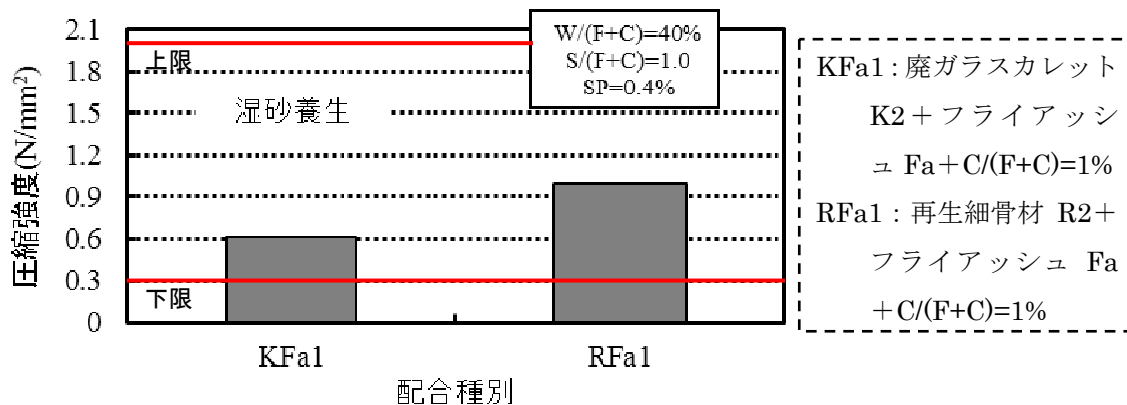


図 4-2-3-2 細骨材種別ごとの 91 日圧縮強度

配合は、図 4-2-3-1 に示したものと同一であり、湿砂養生は、表 2-8-1 および図 2-8-1 に示した、実験室に静置された密閉容器内の表面水率 3～5%の湿砂中養生である。

廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 を用いた場合の 91 日圧縮強度は、それぞれ 0.62 N/mm^2 および 0.99 N/mm^2 となり、目標値の $0.3 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ を満足した。廃ガラスカレット K2 を用いた場合の圧縮強度が再生細骨材 R2 を用いた場合より小さくなった原因は、廃ガラスカレット K2 の粒子表面が平滑なため付着力が小さいことおよび再生細骨材 R2 中の未水和セメント分の水和が強度の増進に寄与したことが考えられる。

4. 2. 4 フライアッシュ種別がフロー値および強度に及ぼす影響の検討

(1) フロー値の検討

フライアッシュの品質の変化がフロー値に及ぼす影響を表 4-2-4-1 に示す。

Fa を用いた場合のフロー値は、高性能 AE 減水剤添加率（以下、SP 添加率）が 0.4 % および 0.6 % の場合ともに 300 以上となり目標フロー値 250 以上が得られ、材料分離はみられなかった。同じ配合で Fb を用いた場合のフロー値は、SP 添加率 0.4 % では硬練りで測定不可、SP 添加率 0.6 % では 213 となり目標フロー値に達しなかった。同様に Fc を用いた場合のフロー値は SP 添加率 0.4 % および 0.6 % の場合ともに硬練りで測定不可となった。このため同じ配合での比較は不可能と判断し、目標フロー値を満足する配合を求めて、これにより比較することにした。

表 4-2-4-1 フライアッシュの品質の変化がフロー値に及ぼす影響

配合 種別	SP 添加率 [(F+C)×wt%]		フライアッシュ種別
	0.4	0.6	
KFa1	>300	>300	能代市産 Fa（強熱減量 1.1～1.4%）
KFb1	×	213	酒田市産 Fb（強熱減量 2.1%）
KFc1	×	×	酒田市産 Fc（強熱減量 3.2%）

×…硬練りのため測定不可能

目標フロー値を満足したフライアッシュ種別ごとの単位水量を図 4-2-4-1 に示す。

SP 添加率は 0.4% の一定とした。フライアッシュ Fa および Fb を用いた場合の単位水量はそれぞれ 310 kg/m³ および 311 kg/m³ となった。水粉体比 W/(F+C) はフライアッシュ Fa および Fb に対してそれぞれ 40 % および 50 % であるが、細骨材粉体比 S/(F+C) がそれぞれ 1.0 および 1.5 となった。フライアッシュ Fc を用いた場合の単位水量は 389 kg/m³ となり、Fa および Fb を用いた場合より 25 % 程度大きくなった。フライアッシュ Fc を用いた場合の水粉体比 W/(F+C) は 70 % であり、細骨材粉体比 S/(F+C) は Fb を用いた場合と同じ 1.5 であった。再生細骨材 R2 を用いた場合は表 4-2-1-2 に示した通り、廃ガラスカレット K2 を用いた場合と同様の傾向となった。フライアッシュ種別が単位水量に及ぼす影響は大きく、その原因は主として強熱減量および比表面積の違いによると考えられる。

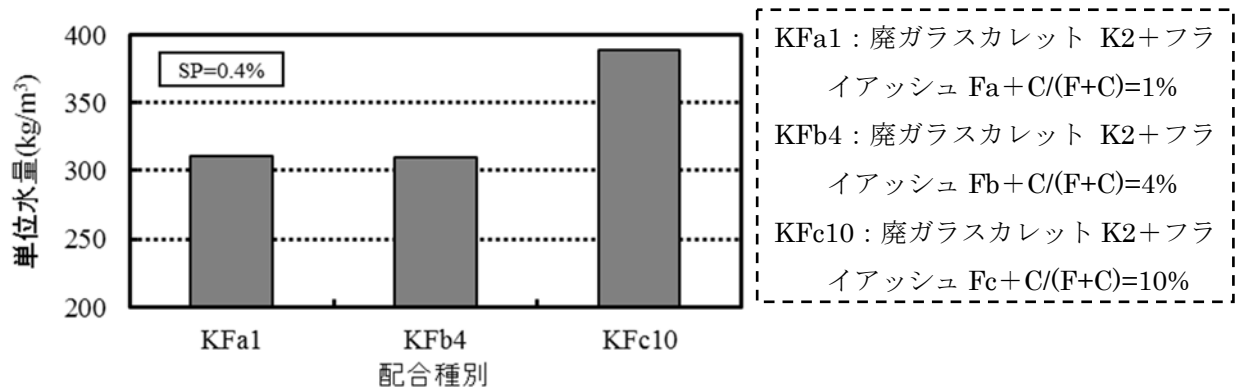


図 4-2-4-1 フライアッシュ種別の異なる配合種別ごとの単位水量

目標フロー値を満足したフライアッシュ種別ごとのフロー値を図 4-2-4-2 に示す。

フライアッシュの品質の変化に応じて、水粉体比 $W/(F+C)$ および細骨材粉体比 $S/(F+C)$ を変化させることにより、材料分離を起こさず目標フロー値となる配合を得ることができた。

低強度モルタルの流動状況を図 4-2-4-3 に示す。

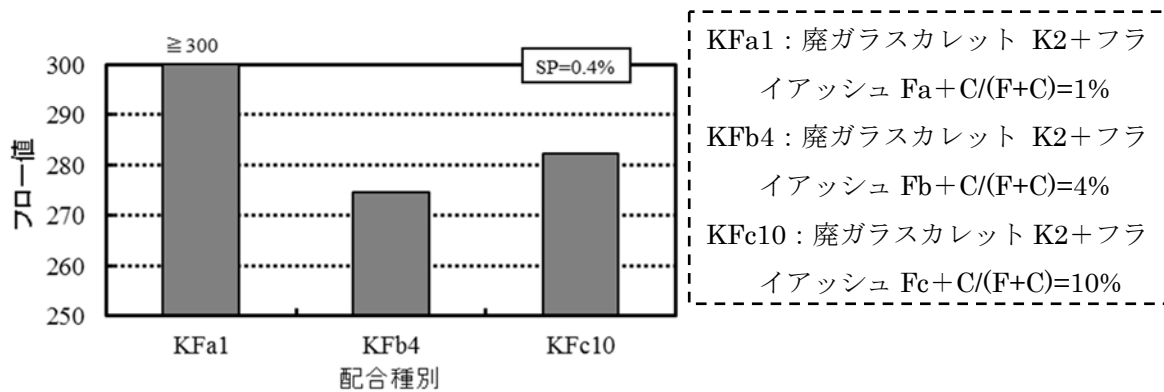


図 4-2-4-2 フライアッシュ種別の異なる配合種別ごとのフロー値

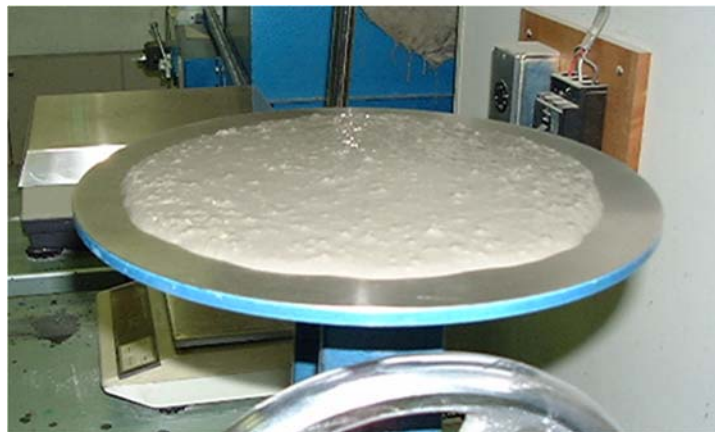


図 4-2-4-3 低強度モルタルの流動状況

(2) ブリーディング率の検討

目標フロー値を満足したフライアッシュ種別ごとのブリーディング率の経時変化を図4-2-4-4に示す。

図中 Std は、天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を用いたフロー値 210 程度の普通モルタル（単位水量 277 kg/m^3 ）を示す。低強度モルタルのブリーディング率はフライアッシュ種別により異なり、普通モルタルより大きくなった。その原因は主として単位水量の違いおよびセメント量が少なくなることによると考えられる。

なお、埋戻し材であっても地下水の低下がある場合や覆土の薄い場合において、水分の移動に伴う体積変化が生じることが考えられる。この点については、さらに検討する必要がある。

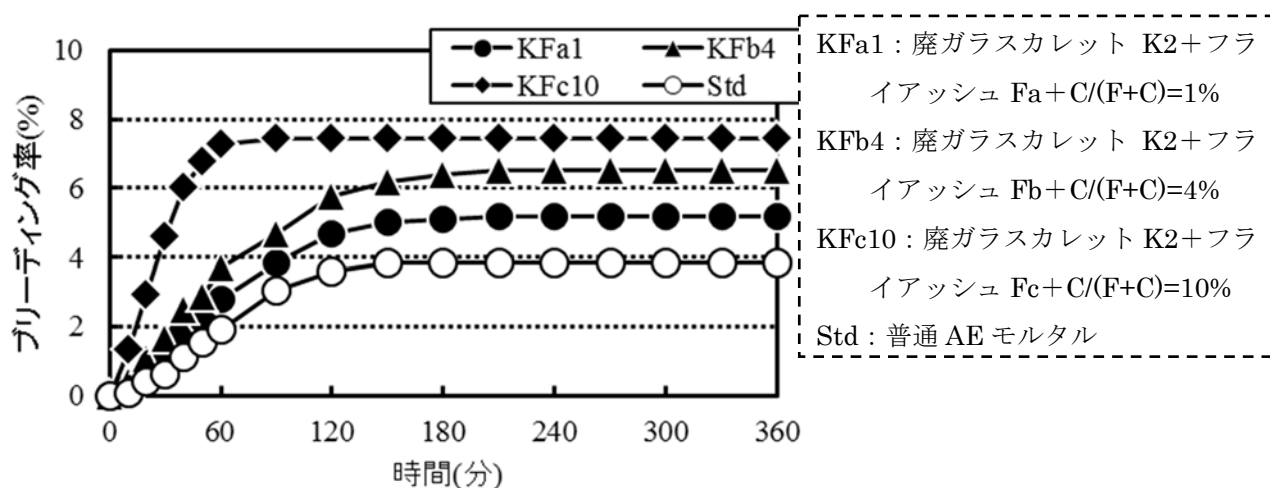


図 4-2-4-4 ブリーディング率の経時変化

(3) 強度の検討

目標フロー値を満足したフライアッシュ種別ごとの材齢 91 日の圧縮強度を図 4-2-4-5 に示す。湿砂養生は、表 2-8-1 および図 2-8-1 に示した、実験室に静置された密閉容器内の表面水率 3～5 % の湿砂中養生である。

フライアッシュ Fa, Fb および Fc に対してセメント添加率 $C/(F+C)$ をそれぞれ 1 %, 4 % および 10 % とした場合の 91 日圧縮強度は、それぞれ 0.62 N/mm^2 , 0.31 N/mm^2 および 0.83 N/mm^2 となり、目標圧縮強度の範囲 $0.3 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ を満足した。目標フロー値を得るためにフライアッシュ Fa, Fb および Fc に対して水粉体比 $W/(F+C)$ はそれぞれ 40 %, 50 % および 70 %, 細骨材粉体比 $S/(F+C)$ はそれぞれ 1.0, 1.5 および 1.5 となり、水粉体比 $W/(F+C)$ および細骨材粉体比 $S/(F+C)$ の増大に応じてセメント添加率 $C/(F+C)$ を大きくすることにより、目標圧縮強度を得ることができた。

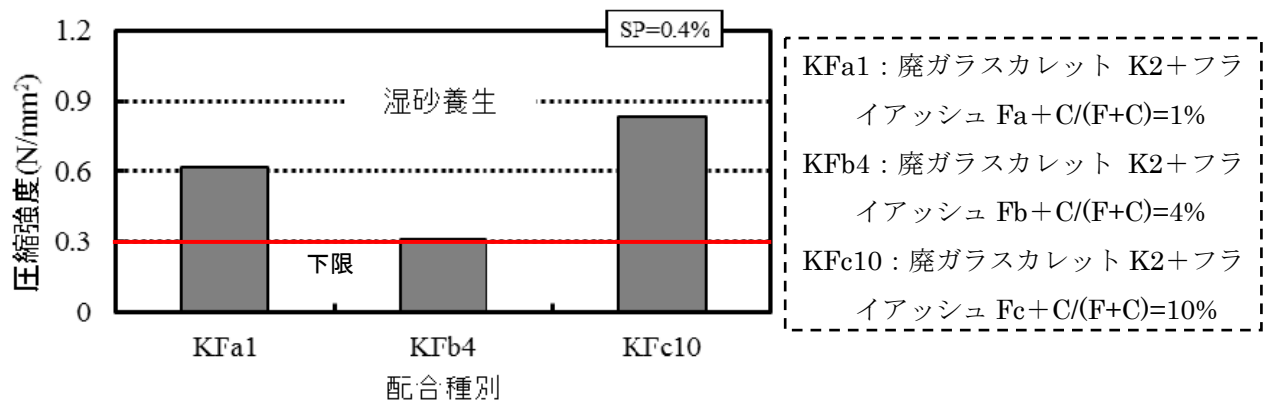


図 4-2-4-5 フライアッシュ種別の異なる配合種別ごとの 91 日圧縮強度

4. 2. 5 セメント種別および脱型の有無が強度に及ぼす影響の検討

配合 KFa1 におけるセメント種別ごとの材齢 7 日および 28 日の圧縮強度を図 4-2-5-1 に示す。

材齢初期における強度の増進を期待して早強ポルトランドセメント H を使用したが、セメント種別による違いはほとんどみられなかった。これは単位セメント量が 8 kg/m^3 と極端に小さいことによると考えられる。

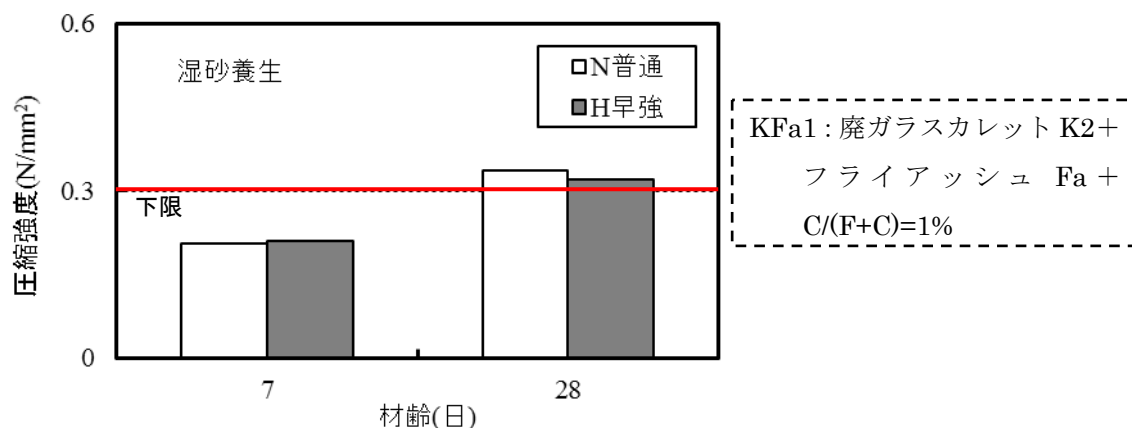


図 4-2-5-1 セメント種別ごとの圧縮強度 (KFa1)

配合 KFa1 における脱型の有無と圧縮強度の関係を図 4-2-5-2 に示す。

材齢 28 日および 91 日の圧縮強度はいずれも「脱型あり」が「脱型なし」より大きくなった。脱型作業に伴う供試体への衝撃などによる強度の低下を危惧したが、それ以上に湿砂養生①と恒温恒湿器内での湿気養生との養生環境の違いによる影響が大きかったため、「脱型なし」の強度が小さくなったと考えられる。

実施工においては、「脱型なし」で湿潤状態の地中に埋設され则认为られるが、室内試験に伴う供試体の脱型作業は慎重に行う必要がある。

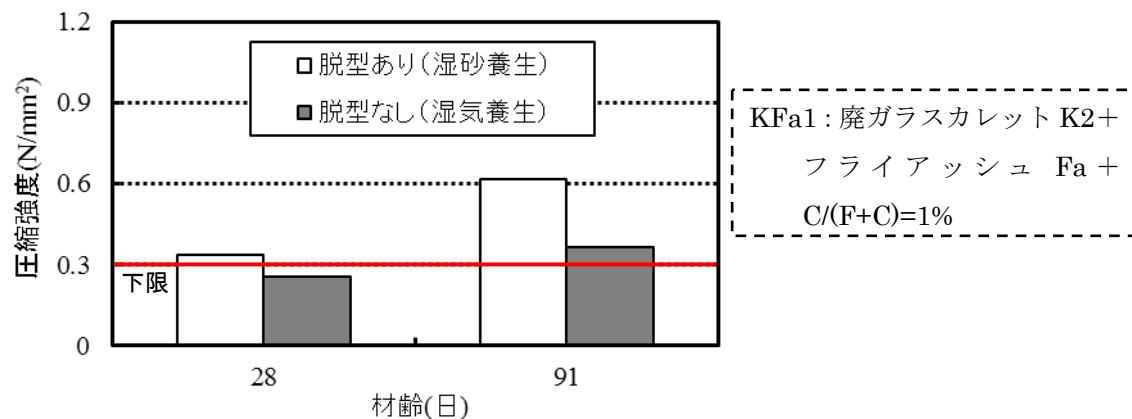


図 4-2-5-2 型枠の脱型有無と圧縮強度の関係 (KFa1)

4. 2. 6 フロー値および強度の目標値を満足する配合の選定方法

目標フロー値が得られた範囲での全配合のフローコーン取去り直後のフロー値（JIS0 フロー値）とフローテーブルに所定の落下運動を与えた直後のフロー値（JIS フロー値）の関係を図 4-2-6-1 に示す。

両者の間には直線関係が認められ、目標 JIS フロー値の 250 以上を確実に得るためには、JIS0 フロー値で 200 以上を目標値にすれば良いと考えられる。また配合によっては JIS フロー値が 300 以上となり、フローテーブル上では測定できない場合がある。このため低強度モルタルの流動性を評価する方法として、JIS0 フロー値により判定する方法を使用できると考えられる。

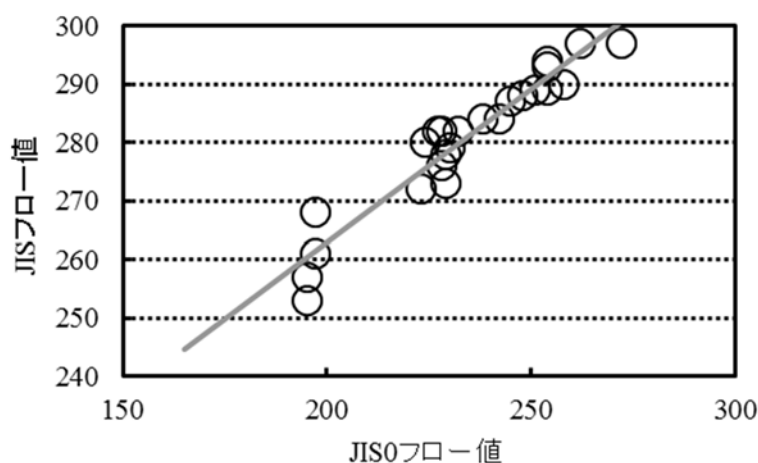


図 4-2-6-1 JIS0 フロー値と JIS フロー値の関係

配合選定するために、まずフライアッシュ、細骨材、水および高性能 AE 減水剤を用いてモルタルを製造し、目標 JIS フロー値が得られる配合を求める。そして圧縮強度を調節するためにセメント添加率 $C/(F+C)$ を変化させる必要があることから、セメント添加率 $C/(F+C)$ がフロー値に及ぼす影響を検討した。

フライアッシュ Fa を用いた場合の細骨材種別ごとのセメント添加率 $C/(F+C)$ と JIS0 フロー値の関係を図 4-2-6-2 に示す。

図中、横太線は目標 JIS0 フロー値（下限）を示す。廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 を用いた場合ともに、セメント添加率 $C/(F+C)$ の増加に伴い、JIS0 フロー値が減少する傾向がある。他のフライアッシュを用いた場合においても同様の傾向が得られた。この結果から、目標 JIS フロー値が得られるセメント添加率 $C/(F+C)$ は、KFa の場合 6 % 以下、RFa の場合 4 % 以下と判断された。

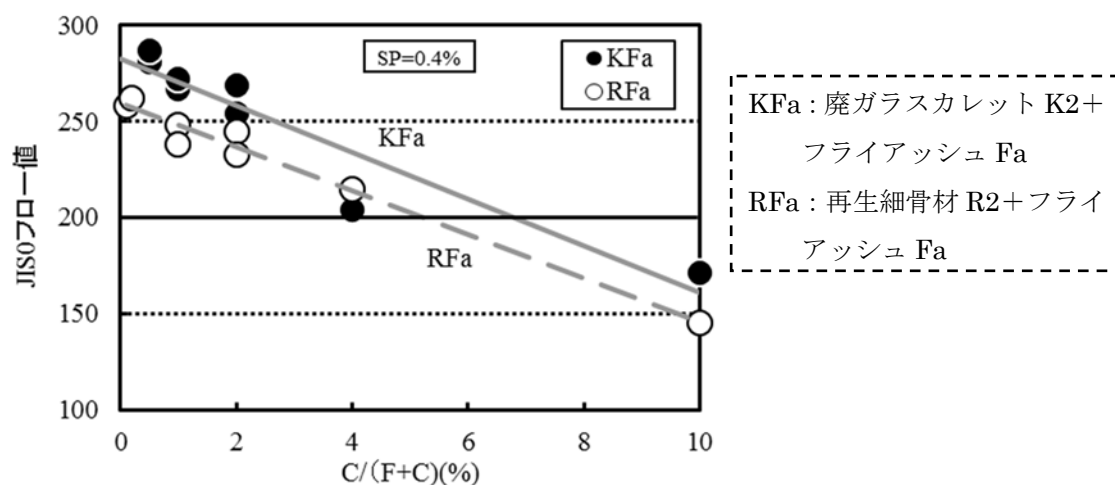


図 4-2-6-2 セメント添加率と JIS0 フロー値の関係

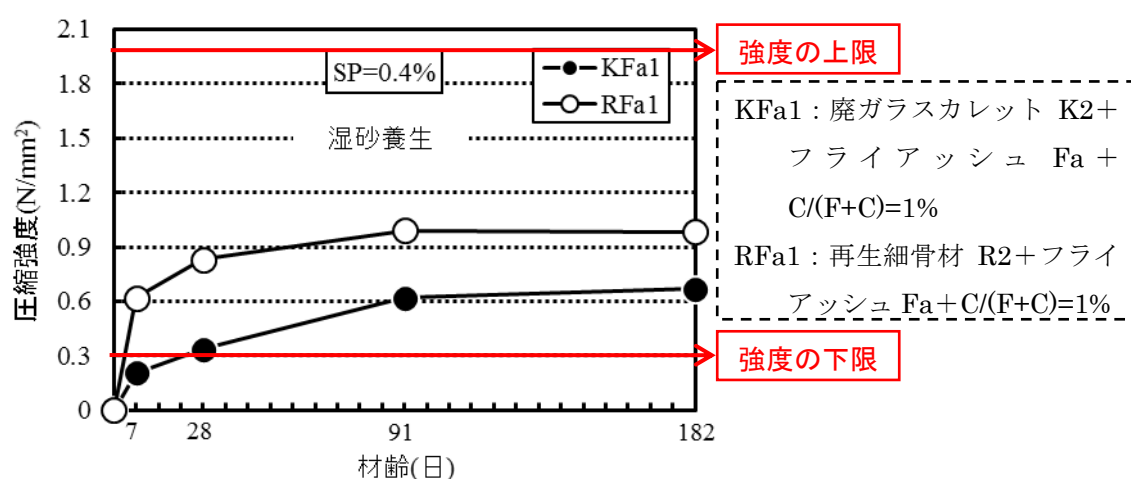


図 4-2-6-3 細骨材種別の異なる配合種別ごとの圧縮強度

次に強度についての検討を行った。

一例としてフライアッシュ Fa を用い、セメント添加率 1 % の細骨材に廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 をそれぞれ用いた細骨材種別の異なる配合 KFa1 および RFa1 の圧縮強度を図 4-2-6-3 に示す。

湿砂養生は、表 2-8-1 および図 2-8-1 に示した実験室に静置された密閉容器内の表面水率 3 ～ 5 % の湿砂中養生である。また、図中の強度の上限および下限は、硬化後の低強度モルタルの機械掘削が容易な強度範囲である 0.3 ～ 2.0 N/mm² を示している。

低強度モルタルの圧縮強度は、廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 を用いた場合ともに、材齢 91 日以後ほぼ一定となる傾向がみられた。このことから、フライアッシュを用いた低強度モルタルの強度は、材齢 91 日の圧縮強度によって、目標圧縮強度範囲に達しているか否か検討することができると判断される。

フライアッシュ Fa を用いた場合の細骨材種別ごとのセメント添加率 $C/(F+C)$ と 91 日圧縮強度の関係を図 4-2-6-4 に示す。

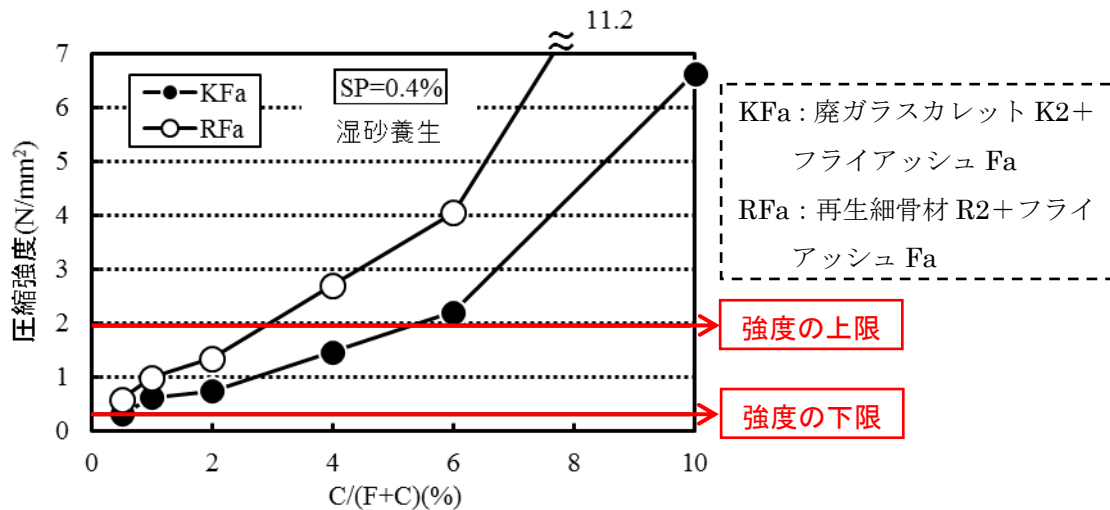


図 4-2-6-4 セメント添加率と 91 日圧縮強度の関係

図 4-2-6-4 より、セメント添加率 $C/(F+C)$ の増加に伴って、強度は増加する傾向にあり、廃ガラスカレットを用いた KFa の場合はセメント添加率 $C/(F+C)$ が 0.5～6%，再生細骨材を用いた RFa の場合はセメント添加率 $C/(F+C)$ が 0～3%において目標強度の低強度モルタルが得られた。

また、品質の異なるフライアッシュ (Fb および Fc) を用いた場合であっても、同様の手法で配合を選定することができた。

4. 2. 7 まとめ

リサイクル材料である廃ガラスカレット **K2**、再生細骨材 **R2** およびフライアッシュを用いて、埋戻し材として自己充填性（目標フロー値 **250** 以上）および十分な強度（材齢 **91** 日の圧縮強度 $0.3 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ ）を有し、機械掘削が可能な低強度モルタルについて、実験的検討を加えた結果、以下の結論が得られた。

- （1）廃ガラスカレット **K2** を細骨材に用いた場合のフロー値は、再生細骨材 **R2** を用いた場合よりも大きく、材齢 **91** 日の圧縮強度は、再生細骨材 **R2** を用いた場合よりも小さくなった。
- （2）使用するフライアッシュの品質が変動することにより、目標フロー値が得られる配合は異なる。
- （3）普通および早強セメントの違いが低強度モルタルの初期強度に及ぼす影響はみられなかった。また、脱型の有無が強度に及ぼす影響よりも、養生環境の違いにより強度は異なり、湿砂養生における強度発現が認められた。
- （4）フライアッシュの品質が変化した場合であっても、セメント添加率 $C/(F+C)$ とフロー値および材齢 **91** 日の圧縮強度の関係を求めることにより、これらの目標値を満足する配合を求めることができる。

4. 3 強度に基づく配合選定の検討

4. 3. 1 低強度モルタルの配合

廃ガラスカレットおよび再生細骨材を用いた低強度モルタルの配合を表 4-3-1-1 に示す。

表 4-3-1-1 の配合種別における K は廃ガラスカレット K2, R は再生細骨材 R2, Fa はフライアッシュ Fa をそれぞれ用いていることを示し、末尾の数値はセメント添加率（粉体中のセメント質量の割合） $C/(F+C)$ (%)を示す。

表 4-3-1-1 廃ガラスカレットおよび再生細骨材を用いた低強度モルタルの配合

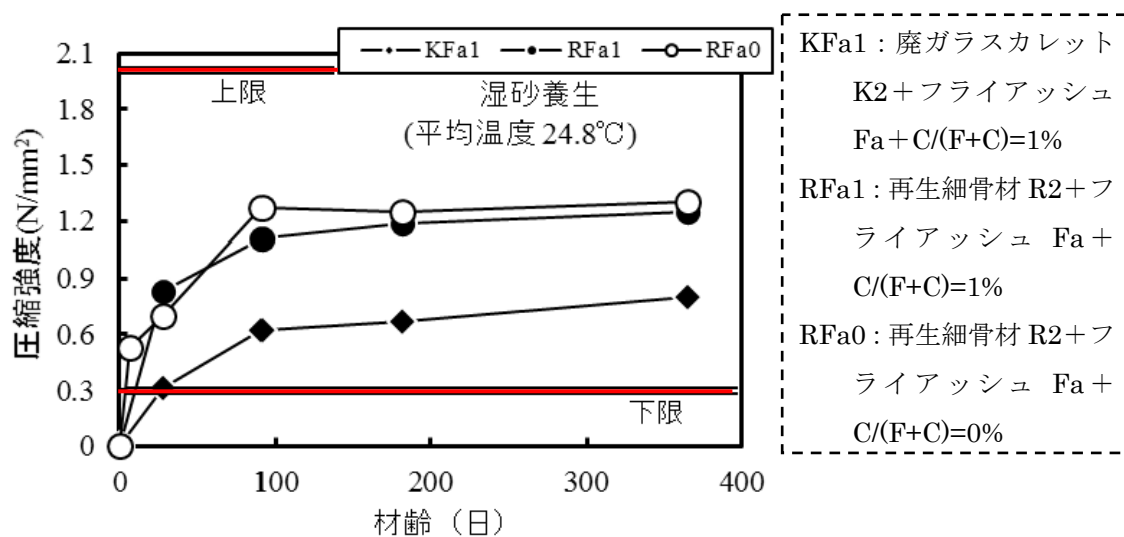
配合 種別	W/(F+C)	空気量 (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤 (F+C)×wt%
			W	F	C	K2	R2	
KFa1	0.40	4.5	309	765	8	773	0	0.4
KFa2				758	15	774		
KFa4			310	744	31	775		
KFa6			311	730	47	777		
RFa0		2.0	308	771	0	0	771	
RFa1			309	764	8		772	
RFa2				757	15			
RFa4				743	31			
RFa6			310	729	47		775	

4. 3. 2 湿砂養生における強度の検討

表 2-8-1 に示した施工環境を想定した低強度モルタルの室内における養生方法、湿砂養生における配合種別ごとの圧縮強度の経時変化を図 4-3-2-1 に示す。

材齢 91 日における配合 KFa1, RFa1 および RFa0 の圧縮強度はそれぞれ 0.62 N/mm², 1.1 N/mm² および 1.3 N/mm² となり目標強度を満足した。再生細骨材を用いた配合 RFa0 の場合は、フライアッシュのみでセメント無添加でもセメント添加率 1% と同等の強度が得られた。これは再生細骨材中の未水和セメント分の水和やフライアッシュによるポゾラン反応が強度の増進に寄与したためと考えられる。また、材齢 91 日以降は強度がほぼ一定となる傾向がみられた。配合 KFa2 および RFa2 も目標強度を満足したが、セメント添加率をさらに増加した場合には、上限強度を大きく超えることがわかった。なお、湿砂養生における 1 年間の平均養生温度は 24.8 °C であった。

この結果を受けて、目標強度を満足した表 4-3-1-1 の配合 KFa1, RFa1 および RFa0 について地中埋設を行い、91 日圧縮強度を求めた。

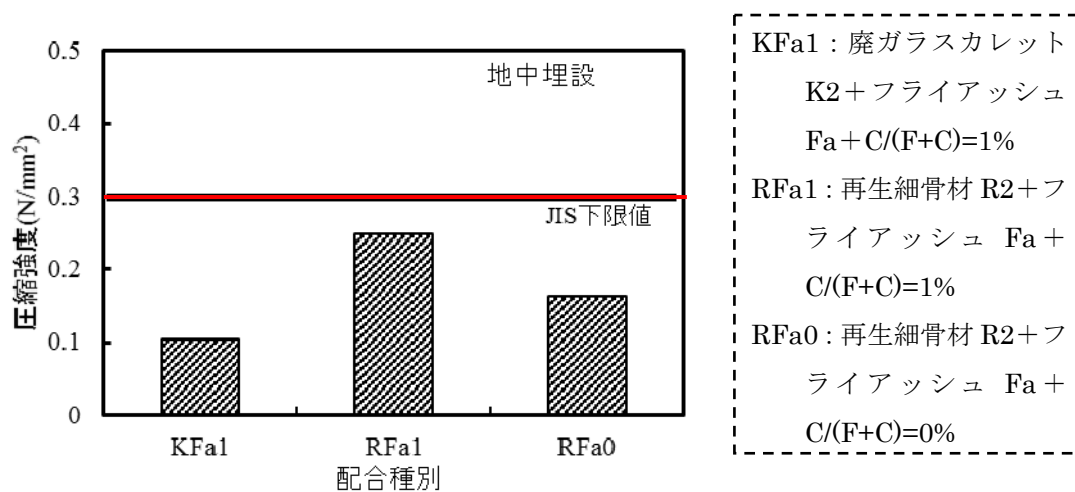


4. 3. 3 地中埋設における強度の検討

7月～10月に実施した地中埋設における配合種別ごとの91日圧縮強度を図4-3-3-1に示す。

地中埋設における配合 KF a1, RF a1 および RF a0 の圧縮強度はそれぞれ 0.10 N/mm², 0.25 N/mm² および 0.16 N/mm² となり、目標強度の下限 0.3 N/mm² に達しなかった。これは、養生期間が7月～10月と年間通して最も気温が高い時期を含んでいたにもかかわらず地中の温度が実験室より低かったことおよび雨水や地下水の影響を受けたことが原因と考えられる。

地中埋設した場合の温度は年間最高でも 23 °C (2002 年 8 月) 程度であり、冬期は 0 °C 近くまで下がることから、湿砂養生の平均温度 24.8 °C と比較してかなり低いと考えられる。



埋設地点の2003年2～3月の地中および地表付近の温度の経時変化を図4-3-3-2に示す。

この期間の地中の温度は最低2℃、最高14℃、平均6℃であり、氷点下には達していないものの最低2℃まで下がっている。同期間の地表付近の温度（積雪時は雪中）は、最低-1℃、最高6℃、平均1℃であった。3月中旬以降の急激な温度上昇は、雪解け水の影響と考えられる。地中であっても深さ40cm程度と浅いため、年間温度の変化の幅は20℃を超えた。この低強度モルタルはフライアッシュを多量に使用していることから養生温度の影響を受けやすいと考えられる。気温の高い地域では逆に地中埋設した場合の強度が、室内試験での強度より大きくなることも考えられる。

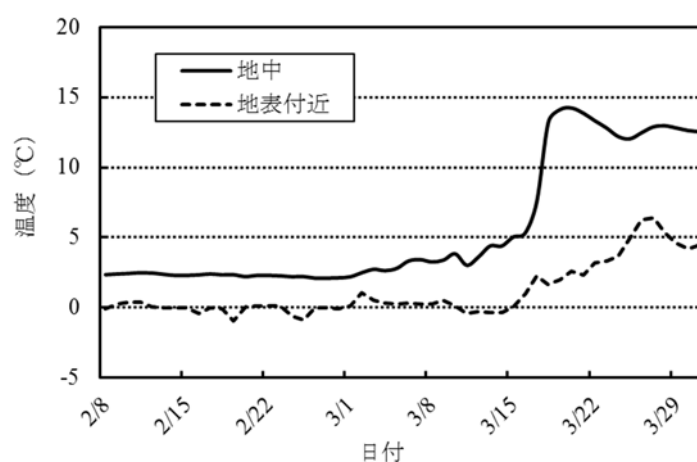


図4-3-3-2 地中および地表付近の温度の経時変化

Folliard らは、低強度モルタルと同様の用途に用いられる CLSM（制御型低強度材料）について、温度の高い現場で施工する場合にはその強度を過小評価する恐れがあるので、室内試験で強度評価するときは、養生温度を現場の予想温度とすることを推奨している⁴³⁾。

地中埋設供試体の埋設時および掘削時の状況を図4-3-3-3に示す。

埋設した場所は透水性が低く、掘削時にしばしば地下水が観察された。土質はシルトを含む砂質土であり、雨水の影響を受けやすい地下水位の高い地点であった。水質としては pH7 程度であったが、実施工にあたっては硫酸塩などの影響を事前に調査する必要があると考えられる。このことからセメント添加率を4%および6%に増加させて再度地中埋設を行った。

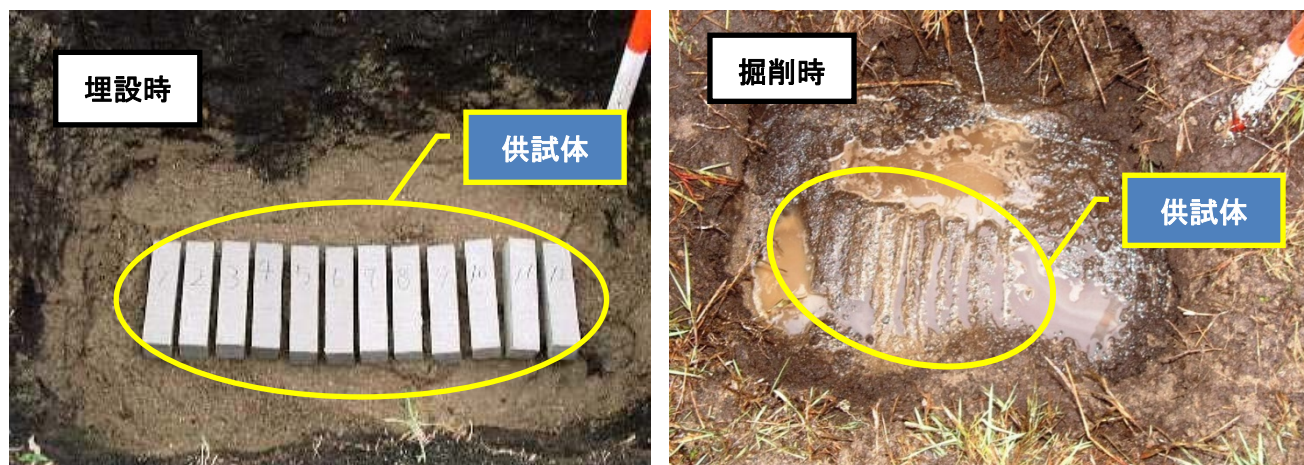


図 4-3-3-3 地中埋設供試体の埋設時および掘削時の状況

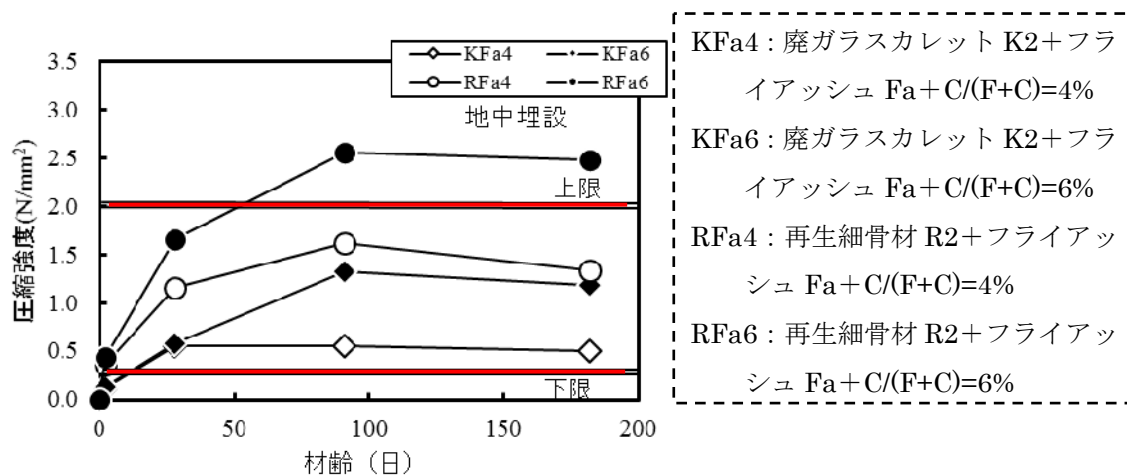


図 4-3-3-4 地中埋設における配合種別ごとの圧縮強度

5～11月に実施した地中埋設における配合種別ごとの圧縮強度の経時変化を図 4-3-3-4 に示す。

配合 KFa4, KFa6 および RFa4 の 91 日圧縮強度はそれぞれ 0.56 N/mm^2 , 1.3 N/mm^2 および 1.6 N/mm^2 となり目標強度を満足したが, RFa6 は 2.6 N/mm^2 となり目標強度の上限 2.0 N/mm^2 を超えた。湿砂養生で目標強度を満足した配合よりもセメント量を多くすることにより, 実施工でも目標強度を得ることができると考えられる。

4. 3. 4 水砂養生における強度の検討

図 4-3-3-2 に示すように、埋設地点の温度が実験室よりも低いことおよび掘削時に地下水が観察されたことから、温度および雨水、地下水の影響を考慮した 20 °C および 10 °C の水砂養生における強度の確認を行った。

配合 KFa6 および RFa4 における養生条件ごとの圧縮強度の経時変化を図 4-3-4-1 および図 4-3-4-2 にそれぞれ示す。

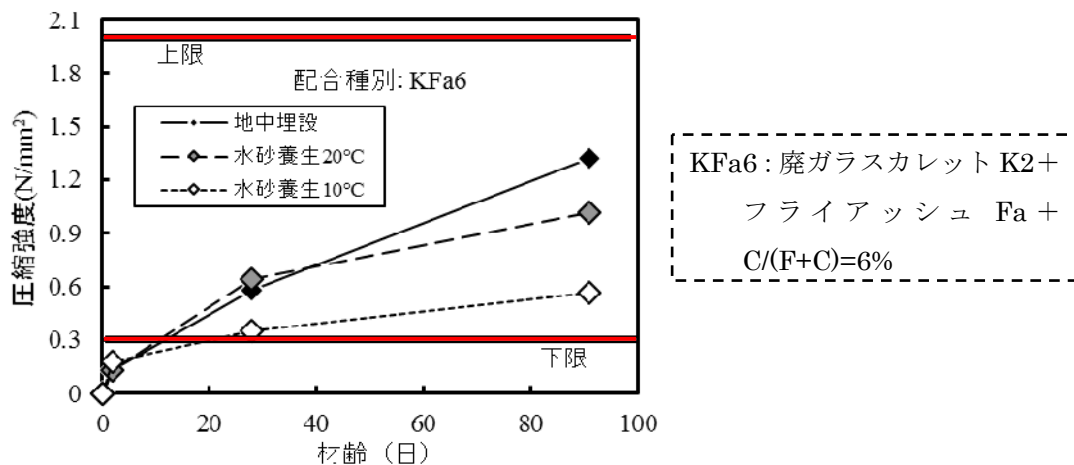


図 4-3-4-1 養生方法ごとの圧縮強度の経時変化 (KF a6)

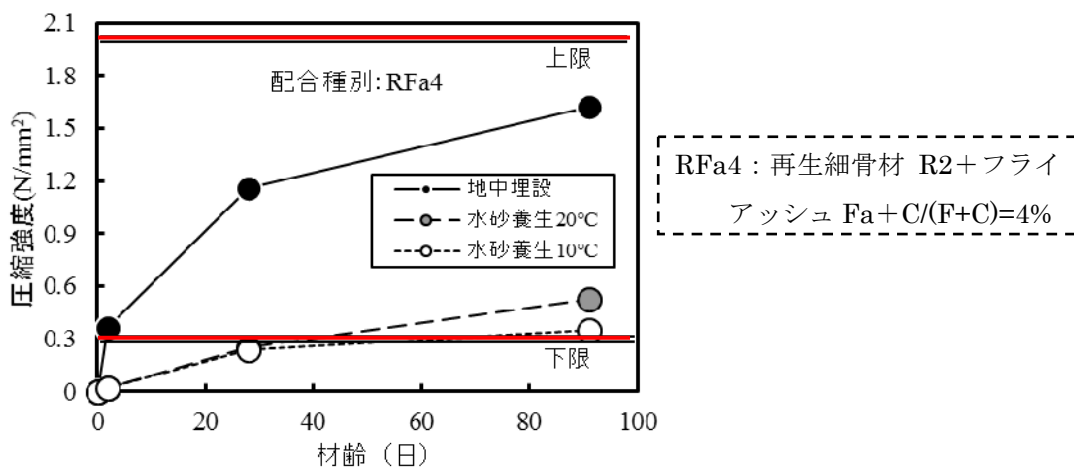


図 4-3-4-2 養生方法ごとの圧縮強度の経時変化 (RF a4)

配合 KFa6 の 91 日圧縮強度は、20 °C および 10 °C でそれぞれ 1.0 N/mm² および 0.57 N/mm² となり、地中埋設した場合の 1.3 N/mm² よりも小さくなった。配合 RFa4 の 91 日圧縮強度は、20 °C および 10 °C ではそれぞれ 0.52 N/mm² および 0.35 N/mm² となり、地中埋設した場合の 1.6 N/mm² よりも小さくなった。なお、地中埋設した時期は、配合 KFa6, RFa4 とともに 5 月～8 月であった。各養生条件における 91 日圧縮強度の大小関係は、

『湿砂養生①＞地中埋設＞水砂養生①20℃＞水砂養生②10℃』

となり、配合 KFa6 および RFa4 の地中埋設における 91 日圧縮強度は、20℃の水砂養生における同配合の強度のそれぞれ約 1.3 倍および 3.1 倍となった。配合 KFa6 および RFa4 の脱型時の 2 日圧縮強度は、それぞれ 0.13 N/mm² および 0.02 N/mm² であり、配合 RFa4 は硬化が不十分な状態で水の浸透にさらされたため、地中埋設に対する水砂中での強度比が小さくなったと考えられる。

4. 3. 5 配合選定方法

廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 を用いた場合の地中埋設および水砂養生 20℃ における 91 日圧縮強度の関係を図 4-3-5-1 および図 4-3-5-2 にそれぞれ示す。

図 4-3-3-3 で示したように、供試体埋設現場において地下水の強度への影響が考えられたため水砂養生 20℃を基準に考察した。両図中、矢印で示した横軸の強度は、地中埋設した場合の目標強度の下限 0.3 N/mm² および上限 2.0 N/mm² に対応する水砂養生 20℃における強度の目安を示す。その範囲は廃ガラスカレット K2 および再生細骨材 R2 を用いた場合、それぞれおよそ 0.2~1.5 N/mm² および 0.1~0.6 N/mm² となった。この範囲に水砂養生 20℃における 91 日圧縮強度がそれぞれ入る配合を選定すれば良い。しかし、現場と想定した環境条件の違いなどを考えれば、得られた強度範囲の中央に近い配合を選定した方が安全側に入るものと思われる。すなわち図 4-3-5-1 および図 4-3-5-2 からは、表 4-3-1-1 の配合 KFa6 および RFa2 を選定すれば良いと考えられる。

なお、この実験では水砂養生 20℃を基準としたが、室内試験の養生条件は施工場所の温度条件および水の影響を考慮した適切なものにする必要がある。このように室内試験における強度から地中埋設した場合の強度を推定することにより、要求強度を満足する低強度モルタルの配合選定が可能と考えられる。

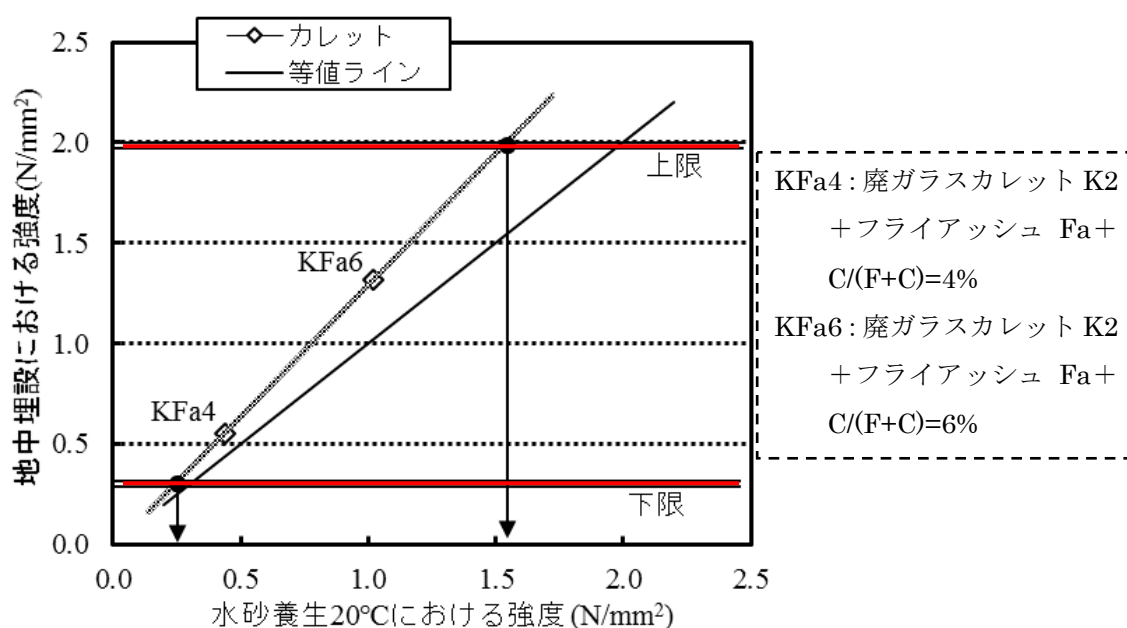


図 4-3-5-1 水砂養生 20℃と地中埋設における 91 日圧縮強度の関係
(細骨材に廃ガラスカレットを用いた場合)

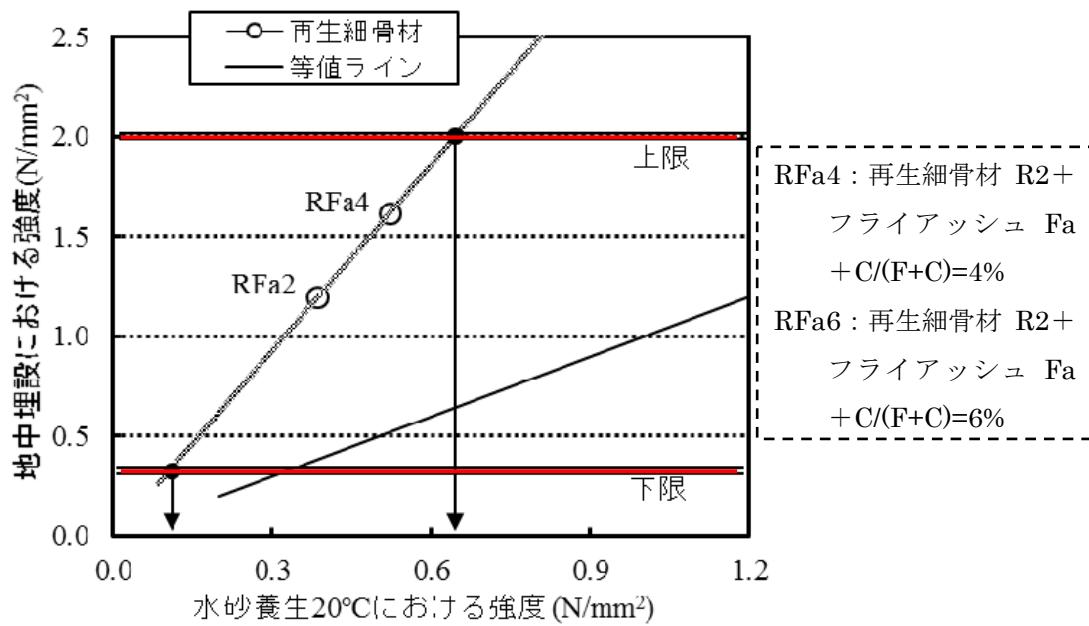


図 4-3-5-2 水砂養生 20°Cと地中埋設における 91 日圧縮強度の関係
(再生細骨材を用いた場合)

4. 3. 6 まとめ

リサイクル材料である廃ガラスカレット，再生細骨材および多量のフライアッシュを使用して，低強度モルタル（目標フロー値 250 以上，目標圧縮強度 $0.3 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ ）を製造し，その供試体を湿砂養生，水砂養生 20°C ，水砂養生 10°C の各養生および地中埋設後，強度試験を行った。その結果から要求強度を満足する配合の選定方法について実験的検討を加えた結果，以下の結論が得られた。

- （1）室内試験における低強度モルタルの圧縮強度は，材齢 91 日以後ほぼ一定となった。
このことから，低強度モルタルの強度を室内試験により評価する場合の材齢は，91 日が適当と考えられる。
- （2）91 日圧縮強度の大小関係は，
『 湿砂養生 > 地中埋設 > 水砂養生 20°C > 水砂養生 10°C 』
となり，廃ガラスカレットおよび再生細骨材を用いた場合の地中埋設における 91 日圧縮強度は， 20°C の水砂養生における同配合の強度のそれぞれ約 1.3 倍および 3.1 倍となった。
- （3）実施工で目標強度となる低強度モルタルの配合を得るためには，施工場所の温度や水の有無を確認した上で，適切な室内試験の養生条件を選択した強度試験結果から配合選定ができると考えられる。

4. 4 ワーカビリティと強度の性能評価に関する検討

4. 4. 1 低強度モルタルの配合

再生細骨材および廃ガラスカレットを細骨材に用いた低強度モルタルの配合を表4-4-1-1に示す。細骨材種別 R2, K2, N5 および R3 ごとに, A (秋田県産再生細骨材を使用した配合), K (廃ガラスカレットを使用した配合), N (北海道産天然細骨材を使用した配合), H および Ha (北海道産再生細骨材を使用した配合) の各配合シリーズとした。例えば, 配合種別 A30 は, 細骨材種別 R2 を用いた単位セメント量 30 kg/m³ の配合を表す。

表 4-4-1-1 再生細骨材および廃ガラスカレットを細骨材に用いた低強度モルタルの配合

配合 種別	目標 フロー 値	目標 ブリー ディン グ率 (%)	空 気 量 (%)	単位量 (kg/m³)								FA 種別
				W	C	FA	S				混和剤 (SP)*	
							R2	K2	N5	R3		
A15	250 ～ 300	< 3.0	2.0	308	15	760	771	0	0	0	① 3.1	Fa
A30					30	749						
A50					50	735						
K15			4.5	309	15	761	0	772	0	0		
K30					30	751						
K50					50	738						
N10			3.0	263	10	871	0	0	878	0	② 3.1	Fd
N30					30	856						
N40					40	849						
N50					50	842						
H10			3.0	263	10	871	0	0	0	696	② 3.6	
H30					30	856						
H40					40	849						
H50					50	842						
H10a	2.0	308	10	781	0	0	0	707	② 0.8			
H30a			30	766								
H50a			50	751								

※SP 主成分 ①変成リグニン, アルキルアリルスルホン酸および活性持続ポリマー ②ポリカルボン酸エーテル系化合物

A, K および N シリーズの配合を決定するにあたり, 単位セメント量 15 (N は 10) kg/m³ を一定とし, 数水準の細骨材粉体比 $S/(C+F)$ を設定して, 目標フロー値 (250～300) が得られるように単位水量を変化させた。その後, 高性能 AE 減水剤 (SP) を用いて単位水量

を減らし、目標フロー値（250～300）となるように調節した。その結果、細骨材粉体比 $S/(C+F)=1.0$ 、単位水量は 263～309 kg/m³ となった。

次に、低強度モルタルの強度を上下限值（0.3～2.0 N/mm²）内に確保する必要があるため、単位セメント量の増加に伴い強度が増大すると考え、単位セメント量 10 kg/m³ および 15 kg/m³ の配合における単位水量を一定として、単位セメント量を 50 kg/m³ まで増加させた。セメント量の増加に伴いフロー値は減少したが、単位セメント量 10 kg/m³ および 15 kg/m³ の配合におけるフロー値が 270～285 程度になるように調節することによって、減少したフロー値が 250 以上の目標範囲となることがわかった。

また、A と Ha シリーズ（配合種別 A15, H10a を除く）および N と H シリーズは、それぞれ同容積とした配合である。

4. 4. 2 ワーカビリティー試験の検討

低強度モルタルは自己充填性を有し、締固めなしで施工することを想定していることから、フローコン取去り直後のフロー値（JIS0 フロー値）、フローテーブルに所定の落下運動を与えた直後のフロー値（JIS フロー値）およびシリンダーフロー値（JHS フロー値）の関係を求めた。

N および H シリーズの JIS フロー値と JIS0 フロー値の関係を図 4-4-2-1 に示す。図より、両者の間には良好な正の相関関係が認められ、JIS フロー値が 250 以上になるためには、落下運動なしの JIS0 フロー値が 180 程度以上になれば良いことがわかった。

N および H シリーズの落下運動なしのフロー値（JIS0）とシリンダーフロー値（JHS）の関係を図 4-4-2-2 に示す。図より、両者の間には図 4-4-2-1 と同様に良好な正の相関関係が認められ、落下運動なしのフロー値（JIS0）が 180 以上になるためには、シリンダーフロー値（JHS）が 183 mm 程度以上になれば良いことがわかった。

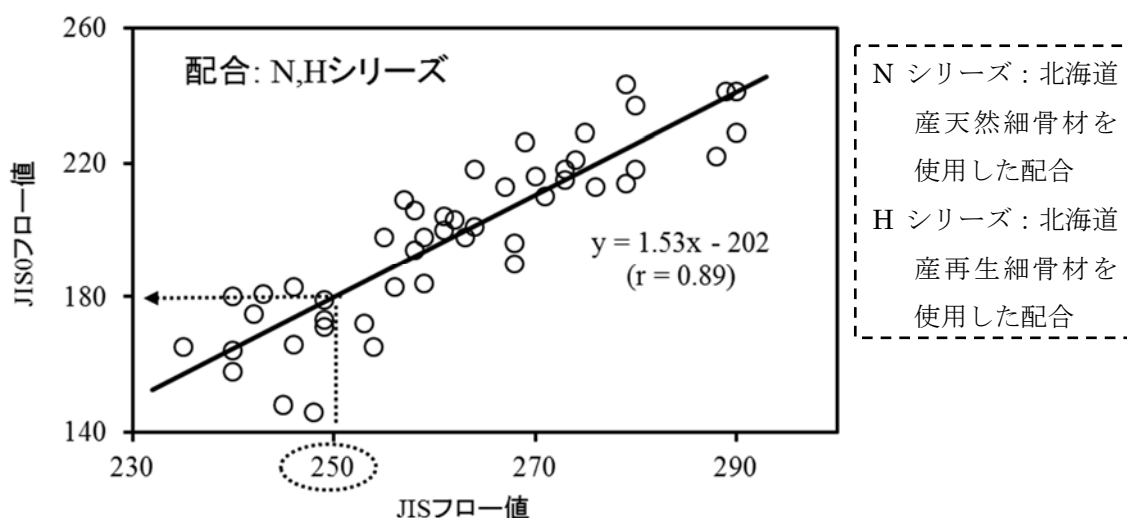


図 4-4-2-1 JIS フロー値と JIS0 フロー値の関係

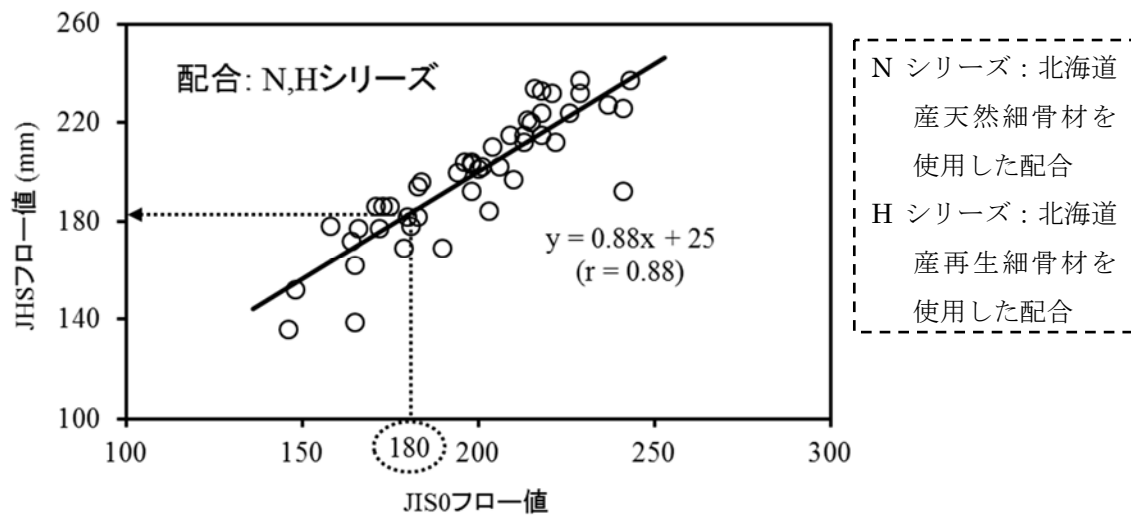


図 4-4-2-2 JIS0 フロー値と JHS フロー値の関係

4. 4. 3 フロー値とブリーディング率との関係

NおよびHシリーズの配合ごとのフロー値(JIS)とブリーディング率の関係を図4-4-3-1に示す。

フロー値の増加に伴ってブリーディング率は増加する傾向があり、Hシリーズのブリーディング率は、微粒分が多かったためNシリーズの場合よりも小さくなった。ブリーディングによる施工上面の下がりや硬化後の沈下を考慮する際に、同じ細骨材種別であれば、フロー値によってブリーディング率の増減傾向が判断できると思われる。

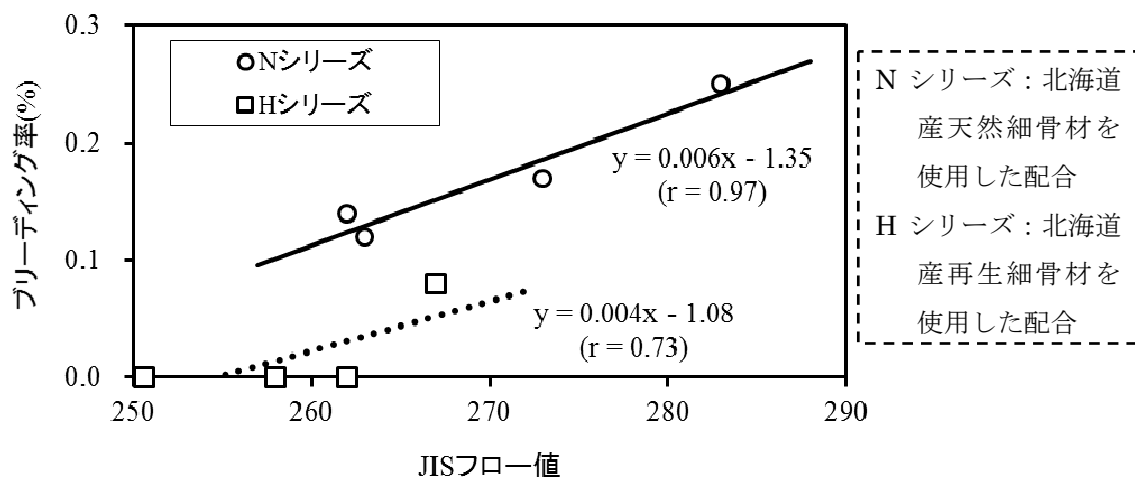


図 4-4-3-1 JIS フロー値とブリーディング率の関係

4. 4. 4 養生方法および強度試験の検討

埋戻し材用低強度モルタルが施工される環境を想定して、表 2-9-1（地下水の有無を考慮した低強度モルタルの養生方法）に示す 2 つの養生方法における強度を比較した。

N シリーズの単位セメント量と養生方法ごとの 28 日圧縮強度の関係を図 4-4-4-1 に示す。

単位セメント量 10～50 kg/m³に増加したときの湿砂養生 20℃および水砂養生 20℃における圧縮強度はそれぞれ、0.30～1.20 N/mm²および 0.26～1.30 N/mm²の範囲となり、およそ 1 N/mm²増加したが養生方法による違いはほとんどなく、目標範囲にあった。湿砂養生 20℃は養生砂の表面水率のばらつきが強度に影響を与えることが考えられるが、水砂養生 20℃の場合はその影響はなく、地下水の有無が低強度モルタルの強度に与える影響を考慮すれば、養生方法として水砂養生 20℃が良いと考えられる。

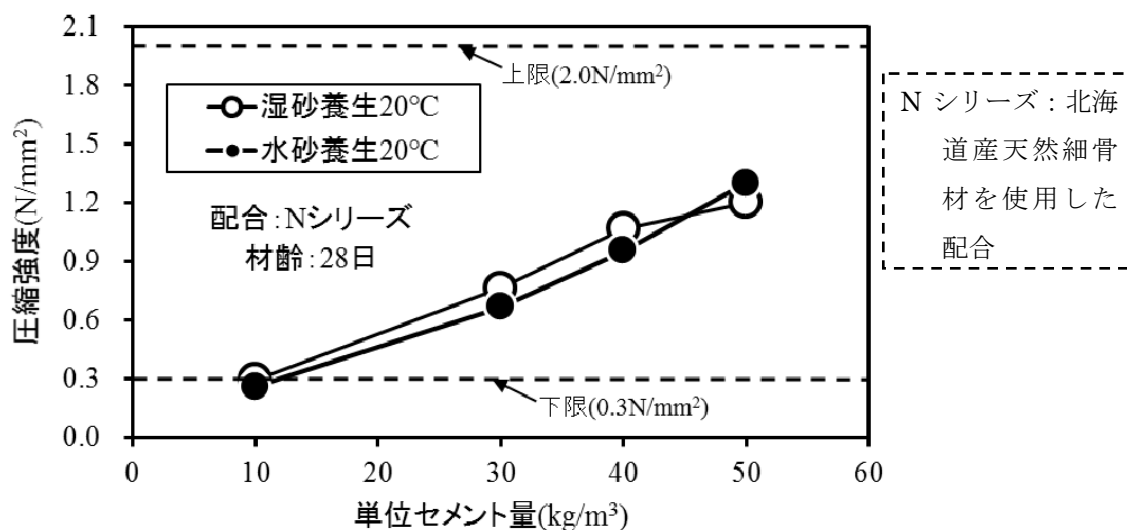


図 4-4-4-1 単位セメント量と 28 日圧縮強度の関係

4. 4. 5 室内試験における配合種別ごとの強度の検討

水砂養生 20℃における材齢と配合種別ごとの圧縮強度の関係を図 4-4-5-1 に示す。

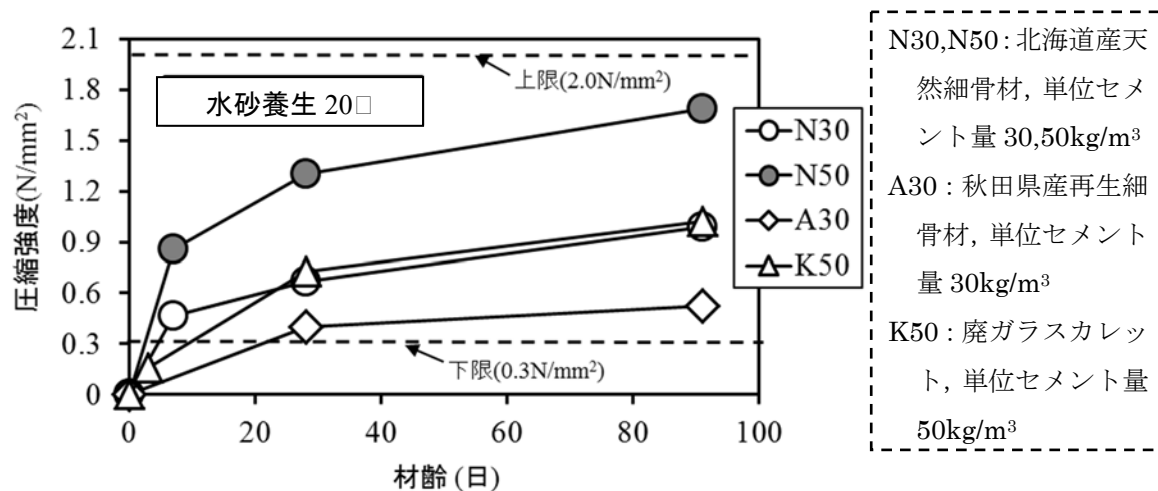


図 4-4-5-1 水砂養生 20℃における配合種別ごとの圧縮強度

配合 N30 , N50, A30 および K50 の材齢 91 日における圧縮強度はそれぞれ 0.99 N/mm², 1.69 N/mm², 0.52 N/mm² および 1.02 N/mm² となり, 0.3~2.0 N/mm² の目標範囲に入った。実験室における低強度モルタルの圧縮強度は, 材齢 91 日以後ほぼ一定となる傾向がある⁴⁰⁾。したがって, 低強度モルタルが目標強度を満足しているか否かを判断する材齢としては 91 日が適当と考えられた。

また, 材齢 28 日に対する 91 日の圧縮強度比を求めた結果, 1.3~1.4 の範囲であった。表 4-4-1-1 に示した他の配合を含めた実験室における材齢 28 日に対する 91 日の圧縮強度比は 1.2~1.4 の範囲であり, 平均値が約 1.3 となった。これは既往の研究成果²⁹⁾と一致しており, 室内試験では低強度モルタルの強度試験材齢を 28 日としても, その結果から材齢 91 日における強度が目標範囲に入るか否か予測可能であると思われる。

以上の実験室での結果を基に, 気象条件の異なる 2 地点で低強度モルタルの屋外地中埋設試験を実施して, 目標範囲内の強度が得られることを検証した。

4. 4. 6 地中埋設試験における配合種別ごとの強度の検討

気象条件の異なる2地点で地中埋設した場合の材齢と配合種別ごとの圧縮強度の関係を図4-4-6-1に示す。

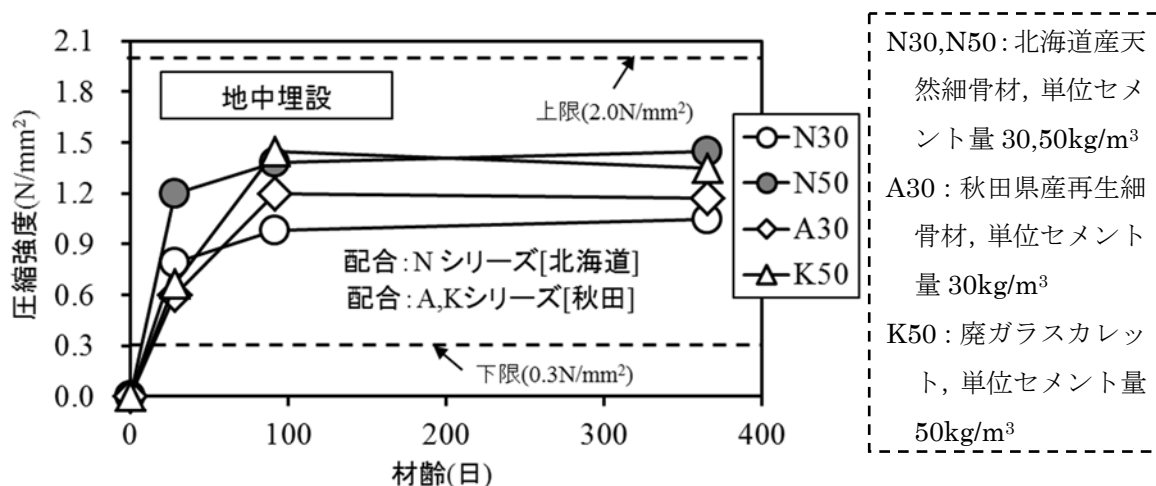


図 4-4-6-1 地中埋設における配合種別ごとの圧縮強度

配合 N30 および N50 は地点 H（北海道小樽市）において9月から，配合 A30 および K50 は地点 A（秋田県大館市）において5月から，それぞれ屋外地中埋設試験を開始した。

この時，地点 H における材齢 28 日および 91 日までの平均地中温度は 11.7 °C および 6.3 °C であり，開始時期が9月だったため材齢が進むとともに地中温度が低下した。これに対し，地点 A における材齢 28 日および 91 日までの平均地中温度は 17.4 °C および 20.0 °C であり，開始時期が5月だったため地点 H とは逆に材齢が進むとともに地中温度が上昇した。配合 N30, N50, A30 および K50 の材齢 365 日における圧縮強度はそれぞれ 1.05 N/mm², 1.45 N/mm², 1.17 N/mm² および 1.35 N/mm² となり，気象条件の異なる2地点であったが，目標とする 0.3～2.0 N/mm² の範囲内であった。

このように，強度は材齢 91 日以後ほぼ一定となることから，フロー値およびブリーディング率の目標値を満足する配合のモルタルを実験室で水砂養生して，材齢 91 日で目標強度が得られれば，これを屋外に地中埋設しても目標強度範囲に入る低強度モルタルが得られることがわかった。

4. 4. 7 品質の異なる再生細骨材を用いた場合の比較

再生細骨材はその品質を左右する付着モルタルの除去が難しく、そのまま用いた場合、低品質になりがちである。表 2-2-1 に示すような品質が大きく異なる再生細骨材 R2 および R3 を用いて、目標とするワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することを試みた。それは、任意の低品質再生細骨材の使用が可能となれば、低強度モルタルの製造が容易になると考えたからである。相対的に品質が良い再生細骨材 R2 と同じ材料容積とした再生細骨材 R3 を用いた配合を Ha シリーズとして、両シリーズの特性を比較した。なお、それぞれの再生細骨材は産地が異なるが、フライアッシュおよび高性能 AE 減水剤についても再生細骨材発生地で得られる異なるものをそれぞれ用いた。また、目標フロー値が得られるように高性能 AE 減水剤 (SP) の量を調節した。

2 種類の再生細骨材を用いた配合シリーズごとの単位セメント量とフロー値およびブリーディング率の関係を図 4-4-7-1 に示す。

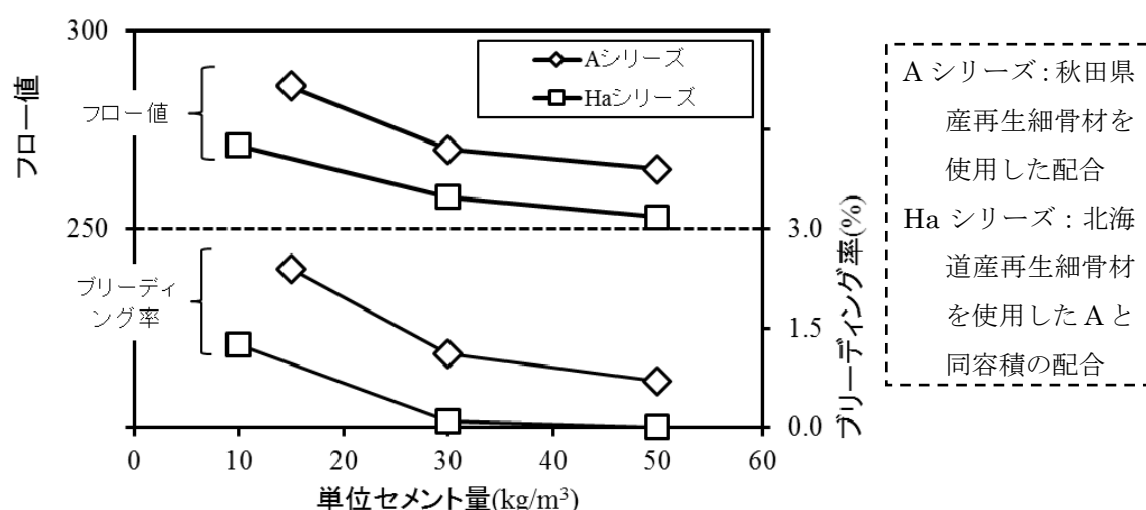


図 4-4-7-1 単位セメント量とフロー値およびブリーディング率の関係

配合 A および Ha シリーズのフロー値はそれぞれ 265～286 および 253～271 の範囲となり、単位セメント量の増加に伴って 18～21 減少した。同様に、配合 A および Ha シリーズのブリーディング率はそれぞれ 0.71～2.40 % および 0.00～1.25 % の範囲で、目標ブリーディング率の 3.0 % 未満を満足した。また、ブリーディング率は単位セメント量の増加に伴い減少し、配合 Ha シリーズは A シリーズより再生細骨材の微粒分量が多いため、ブリーディング率が小さくなった。

水砂養生における配合シリーズごとの単位セメント量と材齢 28 日の圧縮強度の関係を図 4-4-7-2 に示す。

配合 A および Ha シリーズの単位セメント量が 15 (Ha は 10) ～50 kg/m³ に増加したときの 28 日圧縮強度はそれぞれ、0.30～0.91 N/mm² および 0.12～0.72 N/mm² と増加し、

配合 A シリーズが Ha シリーズより若干大きくなったが大差はみられなかった。

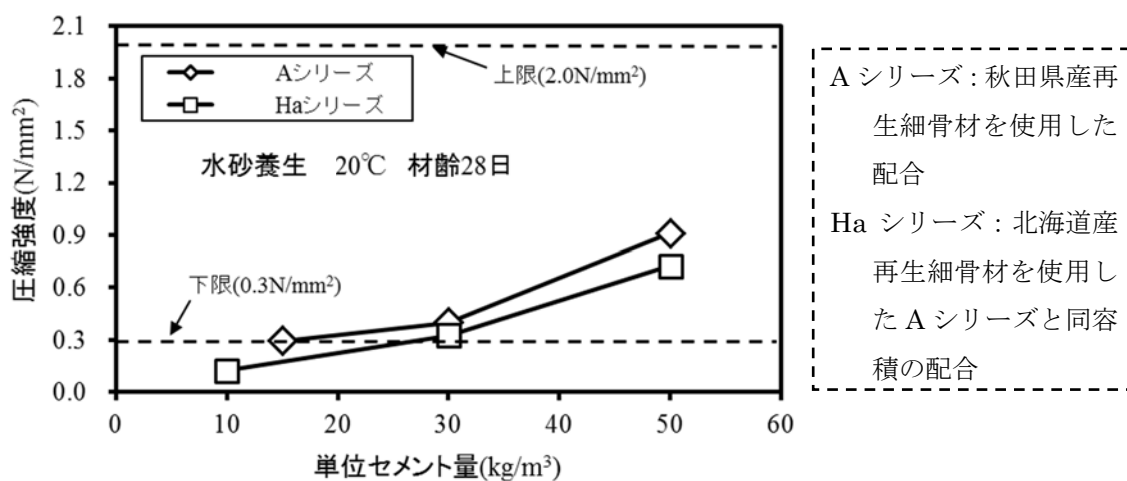


図 4-4-7-2 単位セメント量と 28 日圧縮強度の関係

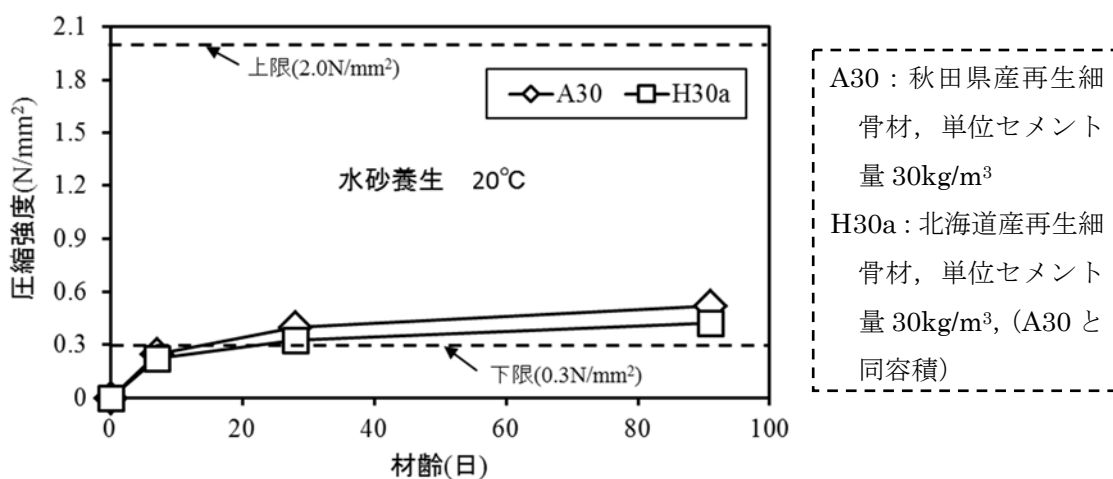


図 4-4-7-3 水砂養生における配合種別ごとの圧縮強度の経時変化

図 4-4-7-3 に、水砂養生における配合種別ごとの材齢と圧縮強度の関係を示す。

配合 A30 および H30a の材齢 91 日における圧縮強度は 0.52 N/mm² および 0.42 N/mm² となり、目標とする 0.3～2.0 N/mm² の範囲に入った。

以上の結果より、出所および品質が異なる低品質再生細骨材やフライアッシュを用いた同容積配合の場合であっても、高性能 AE 減水剤の量を調節して、目標とするワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することが可能であることがわかった。

4. 4. 8 セメント種別が低強度モルタルのワーカビリティと強度に及ぼす影響

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による震災（東日本大震災）で発生した災害廃棄物（いわゆる瓦礫）を原料の一部として製造された普通ポルトランドセメント R と通常の普通ポルトランドセメント O（R と同メーカー）を用いた低強度モルタルを製造し、そのワーカビリティと強度を比較・検討した。

セメント種別ごとの単位セメント量とフロー値およびブリーディング率の関係を図 4-4-8-1 に示す。天然細骨材 N5 を用いたセメント O および R のフロー値はそれぞれ 262～283 および 253～270 の範囲となった。フロー値は、単位セメント量の増加に伴い減少し、セメント R は O より 10 程度小さくなった。同様に、セメント O および R のブリーディング率はそれぞれ 0.12～0.25 % および 0.12～0.63 % の範囲であり、両セメントを用いた場合とも単位セメント量の増加に伴い減少する傾向がみられた。セメント R を用いた場合は O より若干大きくなったが、その差は最大 0.4 ポイント程度であり、目標の 3.0 % 未満を満足した。

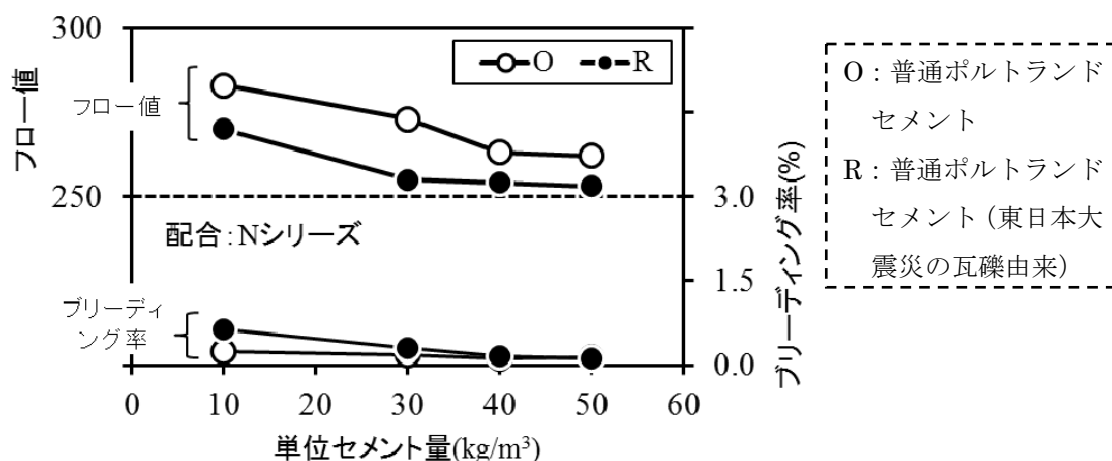


図 4-4-8-1 単位セメント量とフロー値およびブリーディング率の関係

水砂養生における配合 N シリーズのセメント種別ごとの単位セメント量と 28 日圧縮強度の関係を図 4-4-8-2 に示す。

セメント O および R の単位セメント量が 10～50 kg/m³ に増加したときの 28 日圧縮強度はそれぞれ、0.26～1.30 N/mm² および 0.19～1.01 N/mm² と増加し、セメント R が O より若干小さくなったが、大差はみられなかった。

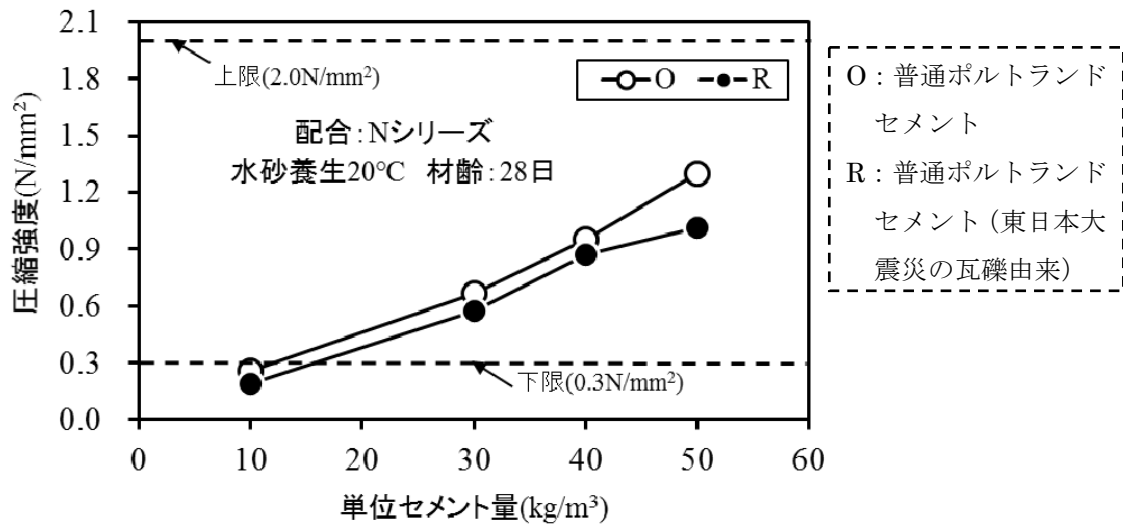


図 4-4-8-2 単位セメント量と配合種別ごとの 28 日圧縮強度の関係

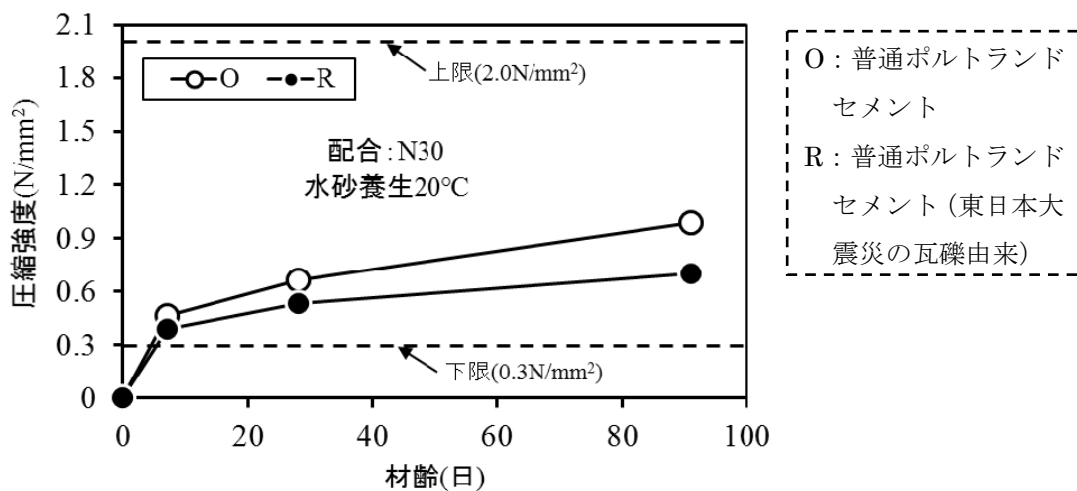


図 4-4-8-3 水砂養生におけるセメント種別ごとの圧縮強度

配合 N30 の水砂養生におけるセメント種別ごとの材齢と圧縮強度の関係を図 4-4-8-3 に示す。

セメント O および R の材齢 91 日における圧縮強度は 0.99 N/mm² および 0.70 N/mm² となり、セメント R を用いた方が小さいが、目標とする 0.3~2.0 N/mm² の値が得られた。

配合 N30 の北海道での地中埋設におけるセメント種別ごとの材齢と圧縮強度の関係を図 4-4-8-4 に示す。

セメント O および R を用いた材齢 91 日における圧縮強度は 0.98 N/mm² および 0.87 N/mm² となり、室内実験の結果と同様に目標とする 0.3~2.0 N/mm² の値が得られた。

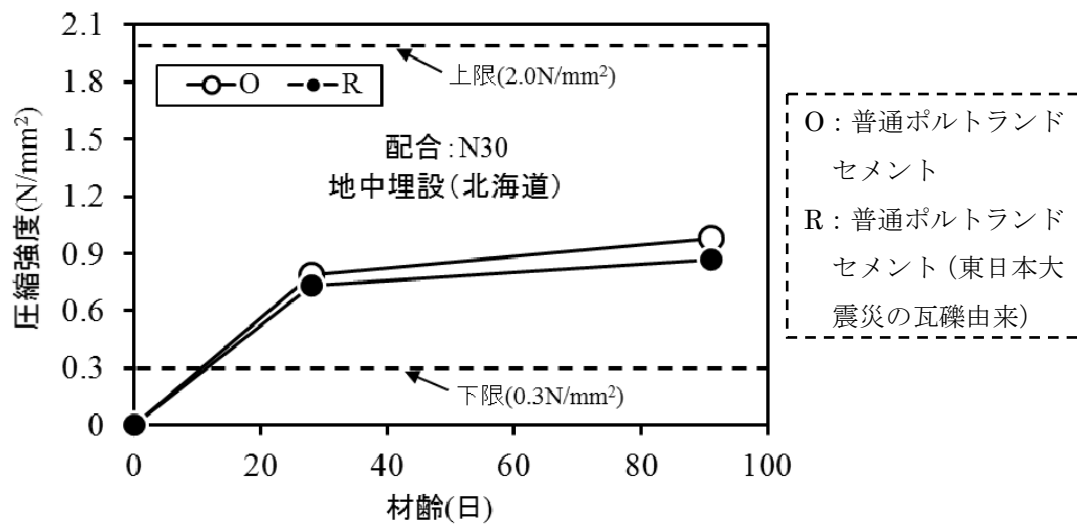


図 4-4-8-4 地中埋設(北海道)におけるセメント種別ごとの圧縮強度

天然細骨材 N5 を用いた N シリーズの配合において、普通セメント O と R のセメント種別による大きな違いはみられず、セメント R を用いて目標ワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することができた。

大規模災害時に大量に発生した災害廃棄物を原料の一部に用いたセメントであっても、製造時に適切な品質管理がなされることによって、通常のセメントと差異なく使用できることが示された。

4. 4. 9 細骨材種別が低強度モルタルのワーカビリティと強度に及ぼす影響

配合 N および H シリーズの単位セメント量とフロー値およびブリーディング率の関係を図 4-4-9-1 に示す。

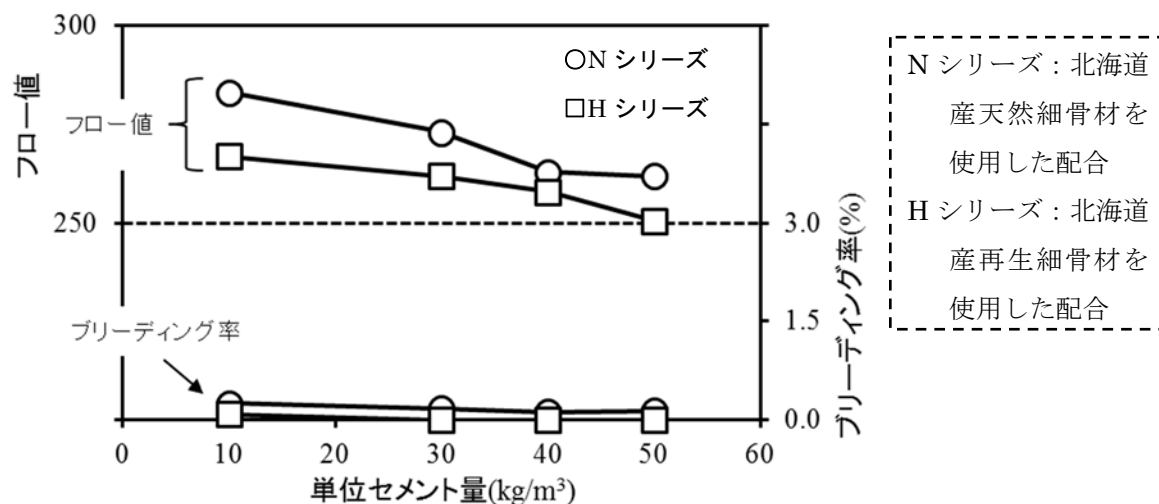


図 4-4-9-1 単位セメント量とフロー値およびブリーディング率の関係

N10 のフロー値は 283 であったが、同配合の H10 の場合は 232 となり、再生細骨材 R3 の微粒分が多いことから目標下限値である 250 より小さくなった。このため高性能 AE 減水剤の使用量を増加して、フロー値を 267 とした。単位水量を一定として単位セメント量を 10～50 kg/m³ まで増加したとき、配合 N および H シリーズのフロー値はそれぞれ 262～283 および 251～267 の目標範囲内となった。また、配合 N および H シリーズのブリーディング率はそれぞれ 0.12～0.25 % および 0.00～0.08 % の範囲で減少した。

水砂養生における細骨材種別ごとの単位セメント量と材齢 28 日の圧縮強度の関係を図 4-4-9-2 に示す。

単位セメント量が 10～50 kg/m³ に増加したときの 28 日圧縮強度は天然細骨材 N5 を用いた配合 N シリーズの場合で 0.26～1.30 N/mm²、再生細骨材 R3 を用いた配合 H シリーズの場合で 0.24～1.47 N/mm² と増加したが目標範囲内となり、細骨材種別の違いは認められなかった。

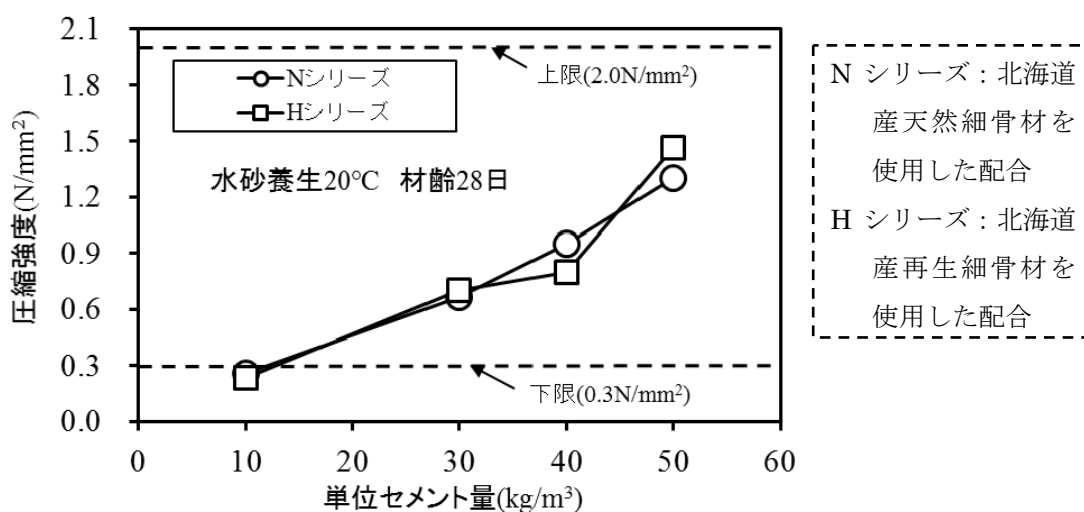


図 4-4-9-2 単位セメント量と細骨材種別ごとの 28 日圧縮強度の関係

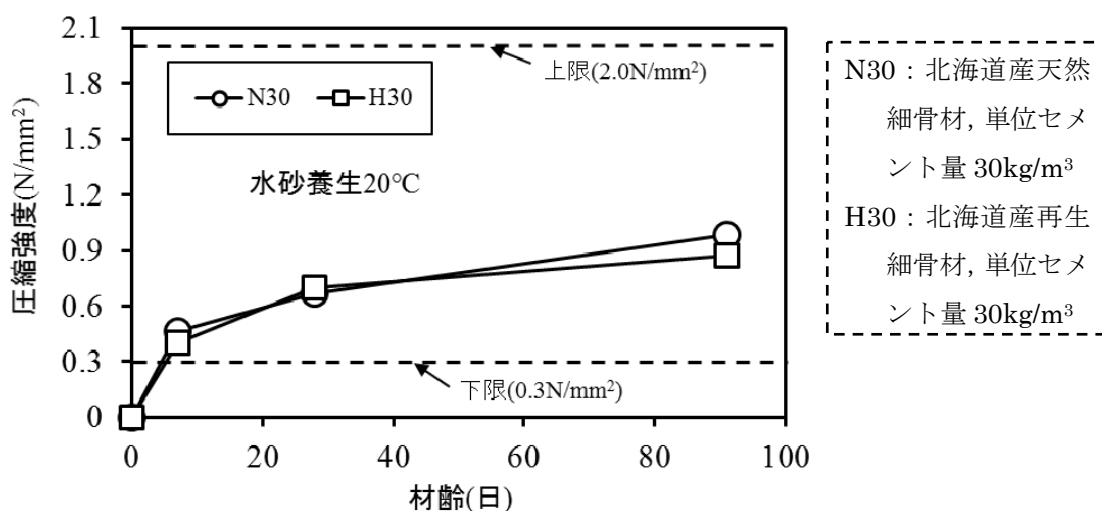


図 4-4-9-3 水砂養生における配合種別ごとの圧縮強度

水砂養生における細骨材種別ごとの材齢と単位セメント量 30 kg/m³ の圧縮強度の関係を図 4-4-9-3 に示す。

細骨材種別 N5 および R3 を用いた配合 N30 および H30 の材齢 91 日における圧縮強度は 0.99 N/mm² および 0.87 N/mm² となり、両者とも目標範囲内に入った。この目標強度範囲では、主にセメントペーストの強度が低強度モルタルの強度を支配し、細骨材自体の強度の影響がほとんど表れなかったと考えられる。

北海道(小樽市)での地中埋設における細骨材種別ごとの材齢と単位セメント量 30 kg/m³ の圧縮強度の関係を図 4-4-9-4 に示す。

細骨材種別 N5 および R3 を用いた配合 N30 および H30 の材齢 91 日の圧縮強度は 0.98 N/mm² および 0.71 N/mm² となり、目標範囲となった。この強度差は、主に埋設期間中の

後者の平均地中温度が前者に比し8℃ほど低かったことが原因と考えられる。

以上の結果から、再生細骨材の微粒分が多い場合においても、高性能 AE 減水剤の使用量を増加することによって、普通細骨材を用いた場合と同様にフロー値およびブリーディング率を目標値とすることが可能である。両細骨材を用いた場合の圧縮強度はほぼ等しく、実験室内で目標強度が確認できれば、地中埋設においてもこれを得ることができた。

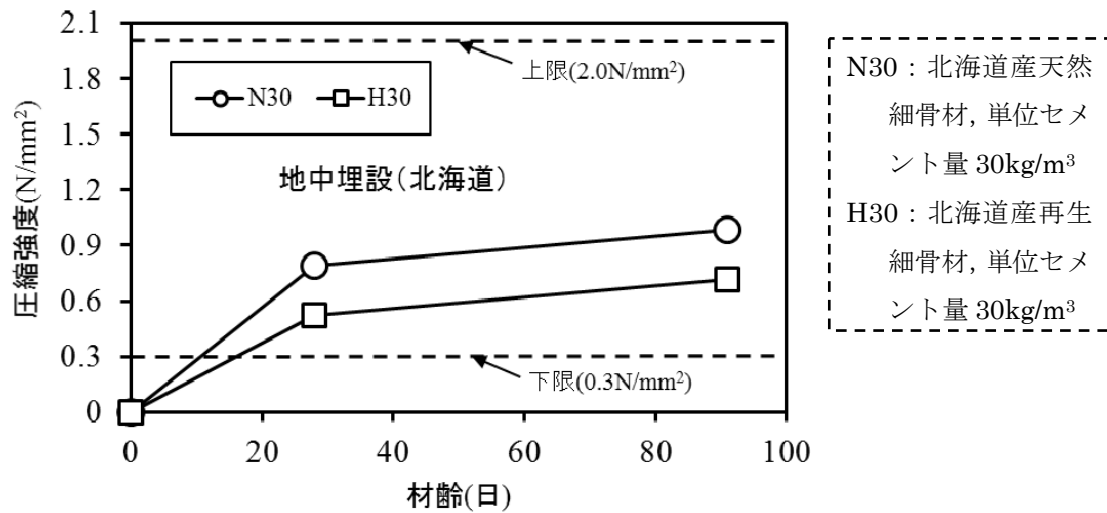


図 4-4-9-4 地中埋設(北海道)における配合種別ごとの圧縮強度

4. 4. 10 まとめ

多量のフライアッシュと低品質再生細骨材を用いた自己充填性を有する埋戻し材用低強度モルタルの流動性、材料分離抵抗性および強度について実験的検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) フロー値およびブリーディング率の目標値（250～300 および 3.0 %未満）を満足する配合のモルタルを、地下水の影響を考慮した水砂養生で養生し、材齢 28 日の強度試験結果を 1.3 倍した 91 日予測強度が目標範囲内（0.3～2.0 N/mm²）であれば、これを屋外に地中埋設しても目標強度範囲に入る低強度モルタルが得られることを気象条件が異なる 2 地点において確認した。
- (2) 出所および品質が異なる低品質再生細骨材やフライアッシュを用いた同容積配合の場合であっても、高性能 AE 減水剤の使用量を調節して目標とするワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することが可能である。
- (3) 東日本大震災で発生した災害廃棄物を原料の一部に使用したセメントを用いた場合であっても、目標とするワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することができた。
- (4) 普通細骨材および低品質再生細骨材を用いた場合の圧縮強度はほぼ等しく、実験室内で目標強度が確認できれば、地中埋設においてもこれを得ることができることを確認した。

4. 5 まとめ

(1) 埋戻し材用低強度モルタルへのリサイクル材料の適用

リサイクル材料である廃ガラスカレットおよび再生細骨材の埋戻し材用低強度モルタルへの適用性について、室内試験による実験的検討を加えた結果、以下の結論が得られた。

- ① 廃ガラスカレットを細骨材に用いた場合のフロー値は、再生細骨材を用いた場合よりも大きく、91日圧縮強度は、再生細骨材を用いた場合よりも小さくなった。
- ② 使用するフライアッシュの品質が変動することにより、目標フロー値が得られる配合は異なる。
- ③ 普通および早強セメントの違いが低強度モルタルの初期強度に及ぼす影響はみられなかった。また、脱型の有無が強度に及ぼす影響よりも、養生環境の違いにより強度は異なり、湿砂養生における強度発現が認められた。
- ④ フライアッシュの品質が変化した場合であっても、セメント添加率 $C/(F+C)$ とフロー値および91日圧縮強度の関係を求めることにより、目標値を満足する配合を求めることができる。

(2) 埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定

埋戻し材用低強度モルタルの室内および現地における試験結果から、要求強度を満足する配合の選定方法について、以下の結論が得られた。

- ① 室内試験における低強度モルタルの圧縮強度は、材齢91日以後ほぼ一定となった。このことから、低強度モルタルの強度を室内試験により評価する場合の材齢は、91日が適当と考えられる。
- ② 91日圧縮強度の大小関係は、『湿砂養生＞地中埋設＞水砂養生 20℃＞水砂養生 10℃』となり、廃ガラスカレットおよび再生細骨材を用いた場合の地中埋設における91日圧縮強度は、20℃の水砂養生における同配合の強度のそれぞれ約1.3倍および3.1倍となった。
- ③ 実施工で目標強度となる低強度モルタルの配合を得るためには、施工場所の温度や水の有無を確認した上で、適切な室内試験の養生条件を選択した強度試験結果から配合選定ができると考えられる。

(3) 埋戻し材用低強度モルタルのワーカビリティと強度の性能評価

埋戻し材用低強度モルタルの流動性、材料分離抵抗性および強度の性能評価方法について実験的検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- ① フロー値およびブリーディング率の目標値(250～300 および 3.0 %未満)を満足する配合のモルタルを、地下水の影響を考慮した水砂養生で養生し、材齢28日の強度試験結果を1.3倍した91日予測強度が目標範囲内(0.3～2.0 N/mm²)であれば、これを屋外に地中埋設しても目標強度範囲に入る低強度モルタルが得られることを

気象条件が異なる2地点において確認した。

- ② 出所および品質が異なる低品質再生細骨材やフライアッシュを用いた同容積配合の場合であっても、高性能 AE 減水剤の使用量を調節して目標とするワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することが可能である。
- ③ 東日本大震災で発生した災害廃棄物を原料の一部に使用したセメントを用いた場合であっても、目標とするワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することができた。
- ④ 普通細骨材および低品質再生細骨材を用いた場合の圧縮強度はほぼ等しく、実験室内で目標強度が確認できれば、地中埋設においてもこれを得ることができることを確認した。

参考文献

- 30) 水口洋, 小野寺収, 堀口敬, 井伊博之: CLSM (Controlled Low-Strength Material) の国内における適用について, コンクリート工学, Vol.42, No.10, pp.19-28, 2004
- 40) 佐藤重悦, 加賀谷誠: リサイクル材料を用いた埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定, セメント・コンクリート論文集 No.57, pp.619-624, 2003
- 43) Kevin J. Folliard, Lianxiang Du, and David Trejo: Effects of Curing Conditions on Strength Development of Controlled Low-Strength Material, ACI Materials Journal, January-February 2003, pp.79-86, 2003

第 5 章 試験施工および環境影響評価

5. 1 第 5 章の概要

第 5 章では、第 3 章の普通強度のモルタルおよびコンクリートの実験結果および第 4 章で示した埋戻し材用低強度モルタルの実験結果を基本として、具体的なアプリケーションへの適用例としての試験施工例を示した。また、本研究の中で主なリサイクル材料である廃ガラスカレットおよび再生細骨材に関する環境影響評価の一例を示した。

5. 2 試験施工

5. 2. 1 再生細骨材を用いたコンクリート

再生細骨材を用いたモルタルの検討結果を基に、再生細骨材を細骨材の一部に用いたカラーコンクリート平板ブロックの製造を試み、これを用いた舗装の試験施工を行った。

再生細骨材を用いたカラーコンクリート平板ブロックの配合を表 5-2-1-1 に示す。

表 5-2-1-1 再生細骨材を用いたカラーコンクリート平板ブロックの配合

配合 種別	設計基準 強度 (N/mm ²)	空気 量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							備考
					W	C	S		G	混和剤		
							N5	R4		AW	AE	
HC	30	4.5	52	46.4	175	337	829	0	961	2.02	2.70	基層
RM				—	274	528	974	264	0	0	3.70	表層
wRM				—		527	966	260	0	0		

再生細骨材を細骨材の一部に用いたカラーコンクリート平板ブロックは、コンクリート用顔料により着色した 20 mm 厚の表層モルタルと 40 mm 厚の基層コンクリートの 2 層構造とした。表 5-2-1-1 の配合種別 HC は、粗骨材に北海道小樽産砕石 2005（絶乾密度 2.61 g/cm³，吸水率 1.80 %），細骨材に北海道幌延産陸砂 N5 を用いた基層コンクリートである。配合種別 RM および wRM は、黒および黒以外の着色した表層モルタルであり、両配合とも細骨材に幌延産陸砂 N5 と札幌産再生細骨材 R4 の混合砂を用いた。再生細骨材 R4 の吸水率は 22.40 %，微粒分量は 13.9 % であり，JIS A 5023 附属書 A（規定）の再生細骨材 L（RLS）の品質を満たさない低品質な再生細骨材であった。なお，N5 と R4 の混合比率は容積比で 3 : 1 とした。また，色が黒の配合種別 RM には普通ポルトランドセメントを，色が黒以外の配合種別 wRM には発色を考慮し，ホワイトセメント（密度 3.05 g/cm³，比表面積 3,460 cm²/g）を使用した。

施工前後の状況を図 5-2-1-1 に示す。

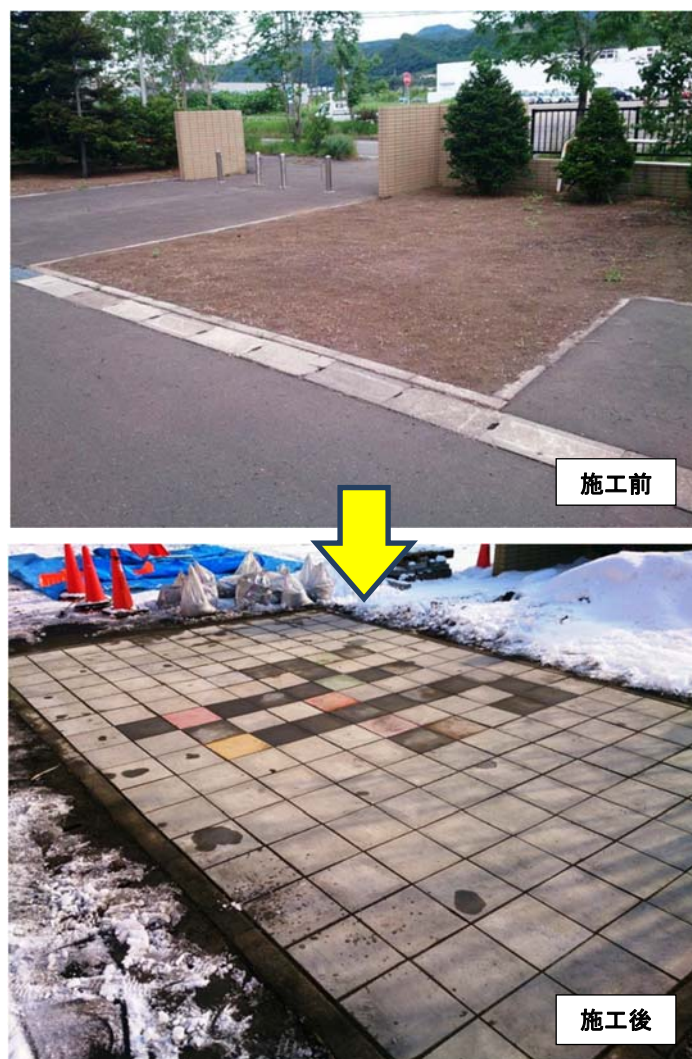


図 5-2-1-1 再生細骨材を用いたカラーコンクリート平板ブロックによる舗装

コンクリート平板舗装の中央付近に再生細骨材を細骨材の一部の用いたカラーコンクリート平板ブロック 30 枚を配置し、周辺は市販の平板ブロックによる舗装とした。施工から 1 年ほど経過したが、異常は認められない。

5. 2. 2 廃ガラスカレット細骨材を用いたコンクリートの地先境界ブロックへの適用

廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの検討結果を基に、廃ガラスカレットを細骨材の一部に用いたコンクリートを適用した地先境界ブロックの試験施工を行った。

地先境界ブロックに用いたコンクリートの配合を表 5-2-2-1 に示す。

骨材種別 K30 は、細骨材質量の 30 %に秋田市産の廃ガラスカレット K1 を使用したものである。同配合のモルタルは、モルタルバー法によるアルカリシリカ反応性試験の結果「無害」となった。

表 5-2-2-1 廃ガラスカレットを細骨材に用いたコンクリートの配合

細骨材 種別	設計基準 強度 (N/mm ²)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (B×wt%)
					W	C	S		G	
							CS1	K1		
K30	30	3.0	45	32.7	155	345	407	174	1254	0.06



図 5-2-2-1 廃ガラスカレットを細骨材に用いたコンクリートの地先境界ブロックへの適用状況

施工後1年経過時および15年経過時の状況を図5-2-2-1および図5-2-2-2にそれぞれ示す。施工から15年ほど経過した時点で、地先境界ブロック表面色の経年変化はあるものの、ひび割れ等の劣化はみられない。

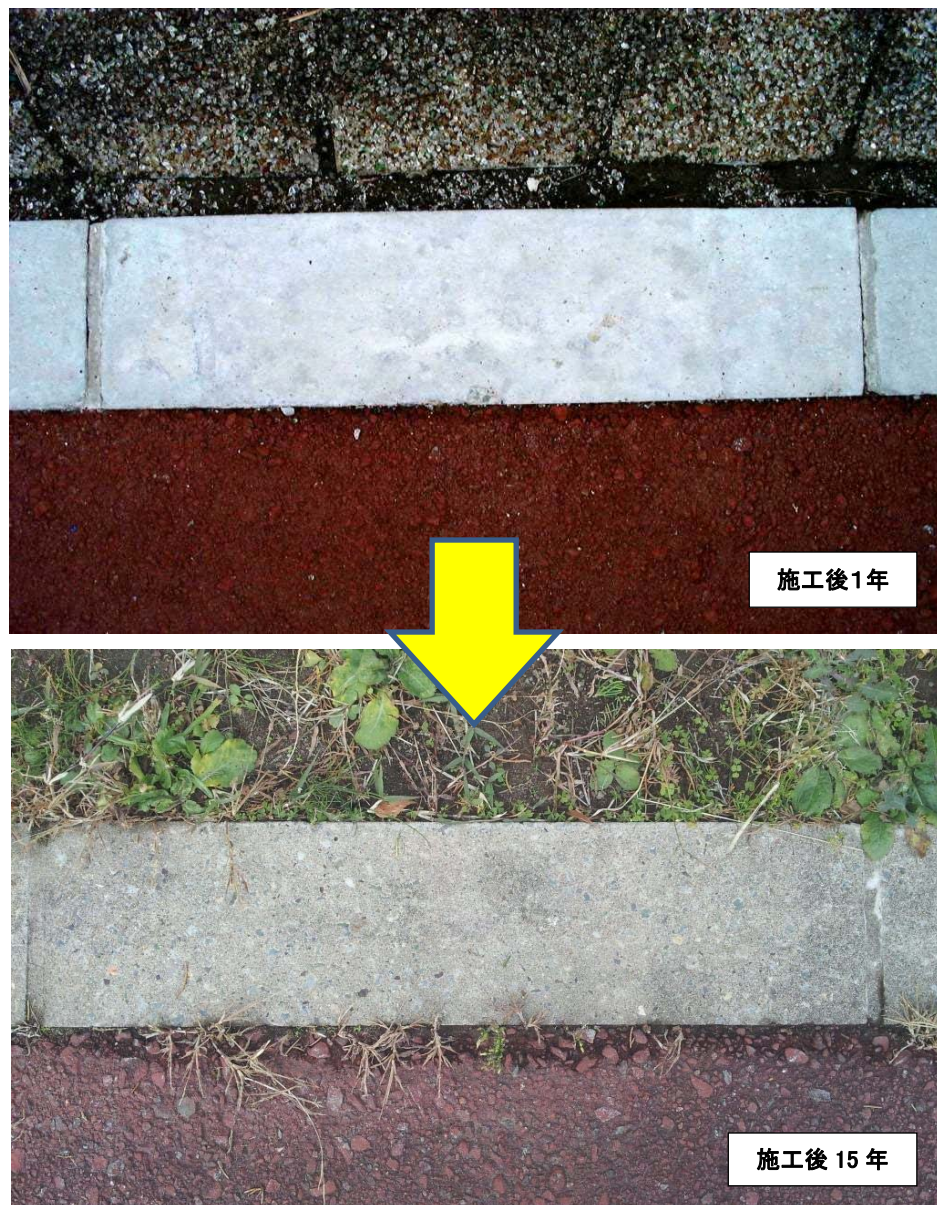


図5-2-2-2 廃ガラスカレットを細骨材に用いたコンクリート地先境界ブロック

5. 2. 3 埋戻し材用低強度モルタル

試験施工を行った低強度モルタルの配合を表 5-2-3-1 に示す。表中、低強度モルタル LSM1～4 は目標強度が 0.3～2.0 N/mm² の自己充填性を有する「埋戻し材用低強度モルタル」であるが、LSM5 は目標強度が 8～10 N/mm² と大きく、目標フロー値が小さい、本研究における強度の定義（図 1-1-2）では「その他の低強度モルタル」に該当する。

表 5-2-3-1 試験施工を行った低強度モルタルの配合

配合 種別	目標 圧縮 強度 (N/mm ²)	目標 フロ ー値	空 気 量 (%)	水 粉体比 W/(C+F) (%)	単位量(kg/m ³)												
					W	C	RC	FA1	FA2	FA3	FA4	S		混和剤			
												Si	N5	AE	SP		
LSM1	0.3 ～ 2.0	250 ±30	8.0	40	307	23	0	744	0	0	0	767	0	3.45	0		
LSM2			6.0	35	286	24		0	792			0		817	0	0	4.08
LSM3			4.0	40	384	0			0					960	480	1.92	2.40
LSM4			3.0	30	262					0				0	0	834	883
LSM5			8～10	160±20	4.5			30				264				191	0

(1) インターロッキングブロック舗装の下地への適用

インターロッキングブロック舗装の下地には、表 5-2-3-1 に示す配合種別 LSM1 の低強度モルタルを適用した。この配合種別 LSM1 には、秋田県能代市産のフライアッシュ FA1 および宮城県石巻市産の溶融スラグ細骨材 Si を使用した。施工前後の状況を図 5-2-3-1 に、施工状況を図 5-2-3-2 にそれぞれ示す。

目的は、インターロッキング舗装のマンホール周りにおける段差の解消であった。施工から 7 年ほど経過した時点で異常等は認められない。この施工では、施工面積に対して施工厚さが小さかったことや地盤が砂地だったことから低強度モルタルの流動性が阻害され、特徴のひとつである自己充填性を十分に確認することができなかった。



図 5-2-3-1 低強度モルタルのインターロッキングブロック舗装の下地への適用状況



図 5-2-3-2 低強度モルタルの施工状況

(2) 平板ブロック舗装の下地への適用

平板ブロック舗装の下地には、表 5-2-3-1 に示す配合種別 LSM2 および LSM3 の低強度モルタルを適用した。この配合種別 LSM2 および LSM3 には山形県酒田市産のフライアッシュ FA2 および FA3 をそれぞれ使用した。細骨材は LSM1 同様、宮城県石巻市産の溶融スラグ細骨材 Si を使用した。配合種別 LSM2 の低強度モルタルによる施工前後の状況を図 5-2-3-3 に、施工状況を図 5-2-3-4 にそれぞれ示す。



図 5-2-3-3 低強度モルタルの平板ブロック舗装の下地への適用状況 1



図 5-2-3-4 低強度モルタルの施工状況

目的は、平板ブロック舗装における段差の解消であった。上記（１）とは異なり、比較的狭い面積で施工厚さを確保し、自己充填性が確認できるようにした。その結果、自己充填性およびセルフレベリングであることを確認できた。しかし、厳密には施工面が水平でなかったため硬化後に低強度モルタルの表面を削って高さを調整する必要があった。この際も、低強度モルタルは容易に削ることができた。

配合種別 LSM3 の低強度モルタルによる施工後および施工後 7 年経過時の状況を図 5-2-3-5 に示す。

目的はセルフレベリング性能の確認であった。このため、段差等のない平板ブロック舗装部分の下地として適用した。施工から 7 年ほど経過した時点で、異常等は認められない。

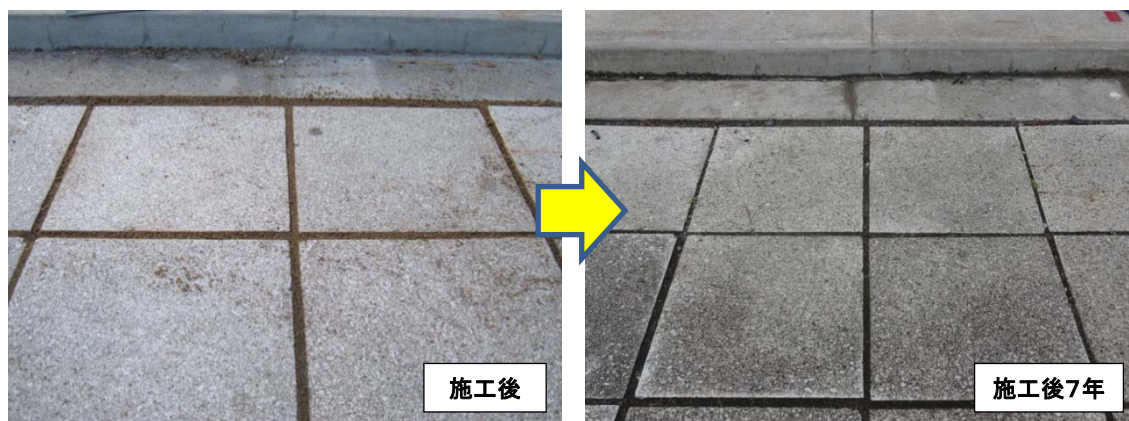


図 5-2-3-5 低強度モルタルの平板ブロック舗装の下地への適用 2

（３）人工芝舗装の路盤および均しモルタルへの適用

人工芝舗装の路盤および均しモルタルには、表 5-2-3-1 に示す配合種別 LSM4 および LSM5 の低強度モルタルを適用した。この配合種別 LSM4 および LSM5 には、東日本大震災で発生した瓦礫を原料の一部に使用した普通ポルトランドセメント RC および北海道苫小牧産のフライアッシュ FA4 を使用した。細骨材は北海道幌延産陸砂 N5 とした。

配合種別 LSM4 および LSM5 の低強度モルタルによる施工前後の状況を図 5-2-3-6 に、施工状況を図 5-2-3-7 にそれぞれ示す。

目的は、低強度モルタルの路盤材および傾斜地における均しモルタルへの適用であった。前者については、配合種別 LSM1~LSM3 と同様の特性を持つ低強度モルタル LSM4 である。しかし後者の配合種別 LSM5 は、傾斜した人工芝舗装の下地となる均しモルタルのため、フロー値を 250 ± 30 から 160 ± 20 へと小さく設定して、勾配のある施工箇所に対応できるものとした。さらにひび割れ防止のための鉄筋を配筋した。また、目標圧縮強度は他の配合種別より大きい $8 \sim 10 \text{ N/mm}^2$ に設定した。



図 5-2-3-6 低強度モルタルの人工芝舗装の路盤および均しモルタルへの適用状況

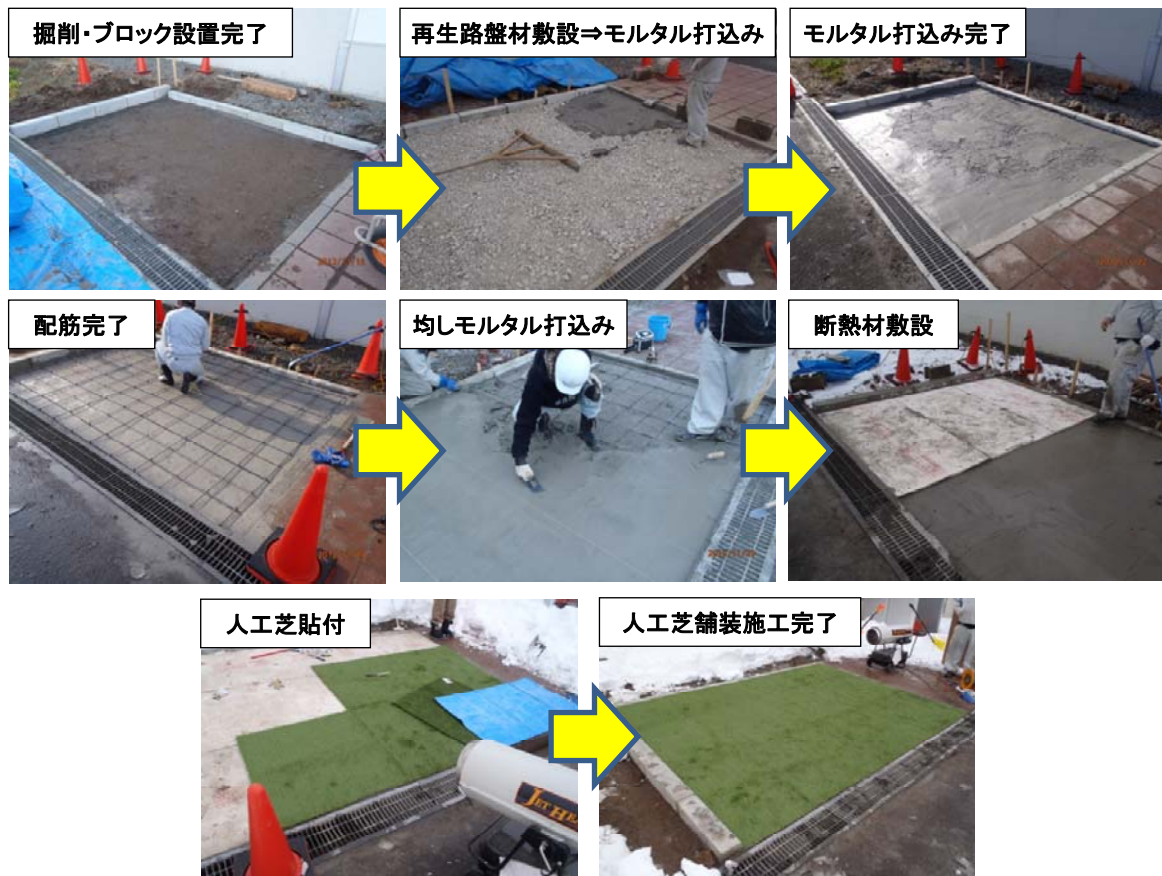


図 5-2-3-7 低強度モルタルの施工状況

5. 2. 4 まとめ

(1) 再生骨材を用いたコンクリート

再生細骨材を用いたカラーコンクリート平板ブロックによる舗装については、再生細骨材の置換割合の更なる検討が必要と思われる。また積雪寒冷地においては、表層のカラーモルタルに十分な空気量を連行することにより、耐凍害性を付与する必要がある。

(2) 廃ガラスカレットを用いたコンクリート

廃ガラスカレットを細骨材に用いたコンクリートの境界ブロックへの適用については、アルカリシリカ反応対策を行わなくても、細骨材質量比 30%の置換であれば問題がないことが、施工後 15 年経過した時点で確認できた。

(3) 低強度モルタルの各種用途への適用

ブロック舗装の下地や舗装路盤、傾斜地における均しモルタル等への適用の可能性について検討した結果、用途に合わせて流動性や強度を調整することで適用できる可能性があることが確認された。

5. 3 環境影響評価

5. 3. 1 リサイクル細骨材の重金属溶出試験

リサイクル細骨材（再生細骨材 R2 および廃ガラスカレット K2）の重金属溶出試験結果を図 5-3-1-1 に示す。

試験項目は、水銀 Hg、カドミウム Cd、鉛 Pb、六価クロム Cr6+、砒（ひ）素 As、セレン Se、ふっ素 F およびほう素 B の 8 項目とした。各試験項目の（ ）内の数値は、当該試験項目の環境庁告示第 46 号「土壌の汚染に係る環境基準」（以下、基準値）を示しており、数値軸は基準値に対する倍数を示している。例えば水銀の溶出試験結果が基準値 0.0005 mg/ℓ の 3 倍 0.0015 mg/ℓ であれば基準値に対する倍数は 3 となる。

再生細骨材 R2 は、鉛 Pb、六価クロム Cr6+ および砒素 As が検出されたが、いずれも基準値未満だった。廃ガラスカレット K2 は、すべての試験項目において基準値未満または定量下限値未満であった。

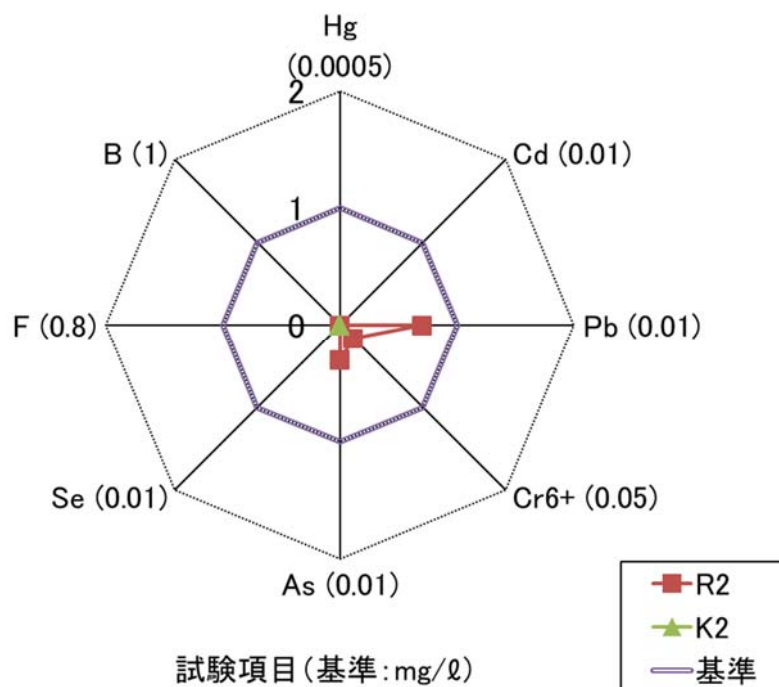


図 5-3-1-1 リサイクル細骨材の重金属溶出試験結果（基準値に対する倍数）

5.3.2 CO₂排出量の検討

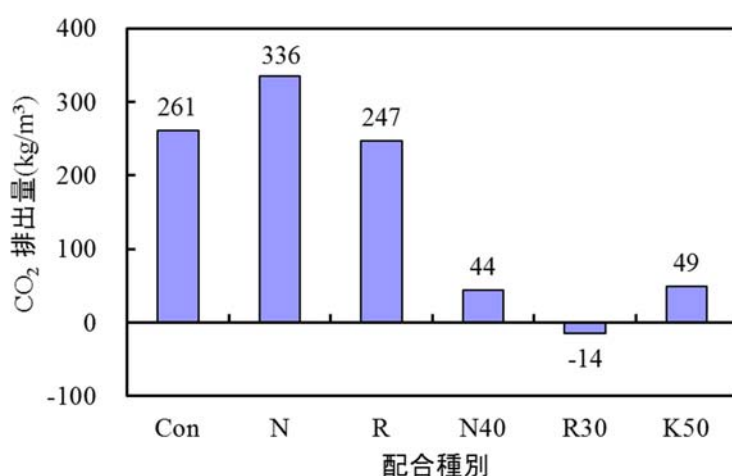
環境影響評価に用いた各材料および製造過程における CO₂ 排出量と運搬距離の想定を表 5-3-2-1 に示す。

インベントリデータは、主に文献 44) を参考としたが、普通ポルトランドセメントは(一社)セメント協会が公開している 2011 年度データ 45) を使用した。混和剤は AE 減水剤のインベントリデータをそのまま使用した。再生細骨材のインベントリデータは、資源消費および廃棄処分不要の便益を考慮している。廃ガラスカレットのインベントリデータは、処理能力 1 ton/h, 消費電力 1.5 kWh のガラス粉砕機を想定し、電力の CO₂ 原単位を 0.5 kg/kWh として計算したもので、資源消費および運搬の便益を考慮している。

表 5-3-2-1 材料および製造過程における CO₂ 排出量と運搬距離の想定

	CO ₂ 排出量(g)	運搬距離(km)
上水道水(kg)	0.281	0
普通ポルトランドセメント(kg)	787.9	100
フライアッシュ(kg)	-9.13	150
陸砂(kg)	1.87	30
再生細骨材(kg)	-65.1	50
廃ガラスカレット(kg)	-1.12	50
混和剤(kg)	1.22	200
運搬(t・km)	78.3	—
練混ぜ(m ³)	7650	—

[注] 運搬は 10 トンディーゼルトラックを想定



Con：普通コンクリート
 N：普通モルタル
 R：再生細骨材を用いた普通モルタル
 N40：天然細骨材を用いた低強度モルタル
 R30：再生細骨材を用いた低強度モルタル
 K50：廃ガラスカレットを用いた低強度モルタル

図 5-3-2-1 配合種別ごとの CO₂ 排出量の比較

コンクリートおよびモルタルと地中埋設において要求性能を満足した低強度モルタルの配合種別ごとの CO₂ 排出量の比較を図 5-3-2-1 に示す。図中、配合種別 Con, N および R は、表 5-3-2-2 に示す普通コンクリート（スランプ 18 cm, 粗骨材の最大寸法 20 mm）、普通モルタルおよび再生細骨材を用いたモルタルの配合である。同様に図中、配合種別 N40, R30 および K50 は、表 5-3-2-3 に示す陸砂、再生細骨材および廃ガラスカレットを細骨材に用いた低強度モルタルの配合である。

表 5-3-2-2 普通コンクリートおよびモルタルの配合

配合種別	W/C	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	摘 要
			W	C	陸砂	再生細骨材	G		
Con	0.55	4.5	165	300	833	0	1014	1.10	普通コンクリート
N	0.60	18.0	257	428	1141		0	0.06	普通モルタル
R		15.5	239	398	0	1117			再生細骨材を用いた普通モルタル

表 5-3-2-3 低強度モルタルの配合

配合種別	水粉体比 W/(F+C)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 {(F+C)×wt%}
			W	C	FA	陸砂	再生細骨材	廃ガラスカレット	
N40	0.475	3.0	356	40	710	749	0	0	0.50
R30	0.400	2.0	309	30	744	0	774		0.40
K50		4.5	311	50	728		0	777	

表 5-3-2-1 のデータを用いて算定した排出量を比較すると、普通コンクリート Con の 261 kg/m³ に対してセメント使用量の大きい普通モルタル N は 336 kg/m³ となり 75 kg/m³ 大きく、細骨材に全量再生細骨材を使用したモルタル R は 247 kg/m³ となり、逆に 14 kg/m³ 小さくなった。再生細骨材の使用による CO₂ 排出量の削減効果が確認された。

低強度モルタルの配合 N40, R30 および K50 の CO₂ 排出量はそれぞれ 44, -14 および 49 kg/m³ となり、再生細骨材を用いた配合 R30 のときに最小となった。セメントの CO₂ 原単位が他の材料に比べて著しく大きいため、セメント使用量の小さい低強度モルタルの CO₂ 排出量は、単位セメント量が少ない分だけ減少する。また、再生細骨材を用いた配合 R30 および廃ガラスカレットを細骨材に用いた配合 K50 におけるフライアッシュと細骨材の単位量の合計は 1,500kg/m³ を超え、産業副産物由来の材料を多量に使用することができると明らかとなった。

このことから、低強度モルタルの細骨材として再生細骨材を用いることが、CO₂ 排出量による環境影響評価の観点から有利であり、破碎エネルギーの少ない低品質再生細骨材の用途として低強度モルタルが期待される。

5. 3. 3 まとめ

- (1) 再生細骨材および廃ガラスカレットの重金属溶出試験を行った結果、再生細骨材から、鉛、六価クロムおよび砒素が検出されたが、いずれも「土壤の汚染に係る環境基準値」未満であった。
- (2) 再生細骨材を用いた低強度モルタルの材料・製造プロセスにおける CO₂ 排出量は、 -14 kg/m^3 となり環境影響評価の観点から有利である。このことから、低強度モルタルは破碎次数の少ない低品質再生細骨材の用途として期待される。

5. 4 まとめ（試験施工および環境影響評価）

（1）試験施工

① 再生骨材を用いたコンクリート

再生細骨材を用いたカラーコンクリート平板ブロックによる舗装については、再生細骨材の置換割合の更なる検討が必要と思われる。また積雪寒冷地においては、表層のカラーモルタルに十分な空気量を連行することにより、耐凍害性を付与する必要がある。

② 廃ガラスカレットを用いたコンクリート

廃ガラスカレットを細骨材に用いたコンクリートの境界ブロックへの適用については、アルカリシリカ反応対策を行わなくても、細骨材質量比 30 %の置換であれば問題がないことが、施工後 15 年経過した時点で確認できた。

③ 低強度モルタルの各種用途への適用

ブロック舗装の下地や舗装路盤、傾斜地における均しモルタル等への適用の可能性について検討した結果、用途に合わせて流動性や強度を調整することで適用できる可能性があることが確認された。

（2）環境影響評価

① 重金属溶出試験

再生細骨材および廃ガラスカレットの重金属溶出試験を行った結果、再生細骨材から、鉛、六価クロムおよび砒素が検出されたが、いずれも「土壌の汚染に係る環境基準値」未満であった。

② CO₂ 排出量

再生細骨材を用いた低強度モルタルの材料・製造プロセスにおける CO₂ 排出量は、 -14 kg/m^3 となり環境影響評価の観点から有利である。このことから、低強度モルタルは破碎次数の少ない低品質再生細骨材の用途として期待される。

参考文献

- 44) 李柱国, 山本泰彦, 大久保孝昭: コンクリートの環境性能評価法と環境配慮型調合設計法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1373-1378, 2006
- 45) (一社)セメント協会: セメントの LCI データの概要, p.7 (2013 年 7 月 22 日)

第6章 結 論

6. 1 普通強度のモルタルおよびコンクリートへの適用の関する検討

各種リサイクル細骨材を普通強度のモルタルおよびコンクリートの細骨材の一部または全量に用いた場合について、その短期的性能〔フレッシュ時および材齢 91 日以下の硬化特性（各種促進試験を含む）〕および長期的性能（材齢 1 年以上の暴露試験）を第 3 章で明らかにした。以下に得られた知見を述べる。

6. 1. 1 短期的性能

- (1) 再生細骨材を用いたモルタルの実験では、高性能 AE 減水剤を使用して単位水量を低減することにより、初期の耐凍害性において有利となり、乾燥収縮率が小さくなり、91 日強度は普通細骨材を使用した場合と同等以上に改善された。
- (2) 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの実験では、普通細骨材との混合使用や結合材の一部に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混和することにより、アルカリシリカ反応を抑制することができた。
- (3) 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの実験では、溶融スラグ置換率の増加に伴いスランプおよび空気量は増加し、圧縮強度は低下、単位容積質量は幾分増加した。凍結融解試験では、溶融スラグ置換率の増加に伴い耐久性指数は減少したが、空気量 6%を確保することにより溶融スラグ置換率 70%で 85 となった。質量減少率は、溶融スラグを置換しない場合より増加するが、溶融スラグ置換率の増加に伴う増加は認められなかった。
- (4) 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリート表面の明度は、溶融スラグ置換率の増加に伴い減少し、凍結融解 300 サイクル終了時には溶融スラグの明度（黒色）に近づいた。凍結融解試験後の圧縮および曲げ強度が溶融スラグ置換率とともに大きく低下する傾向が認められた。
- (5) 溶融スラグ細骨材を用いたモルタルの実験では、溶融スラグ置換率の増加に伴い、フロー値は、溶融スラグの粒度が標準より大きい場合は大きく、標準の場合は小さくなり、空気量は増える傾向がみられた。また、溶融スラグ細骨材の使用によりモルタルのブリーディング率は増加する傾向がみられたが、溶融スラグの粉砕処理により改善された。溶融スラグ置換率の増加に伴い強度は低下する傾向があるが、10 分程度以上の粉砕処理は、それを用いたモルタルの強度改善に効果的であった。

6. 1. 2 長期的性能

- (1) 再生細骨材を用いたモルタルの暴露試験の結果、質量減少率は主に水セメント比に支配され、細骨材種別の影響は大きくないが、動弾性係数は、水セメント比および細骨材種別の影響が大きいことが分かった。また、水セメント比 40%の配合においては

天然砂との混合が、水セメント比 60%の配合においては高性能 AE 減水剤の使用による水セメント比の低減が効果的であることが示唆された。

- (2) 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタルの積雪寒冷地での暴露試験の結果、スケーリングにより供試体表面のペーストが剥離して骨材が露出し、黒色の汚れの吸着がみられた。暴露期間の進行に伴い供試体の質量減少率は増加し、相対動弾性係数は低下した。特にカレットモルタルの劣化が著しかったが、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混和により相対動弾性係数は大きく改善された。暴露期間中の供試体表面の明度は、暴露材齢の進行に伴い低下する傾向があり、供試体表層の剥離や汚れなどの品質変化に対する指標になると考えられる。
- (3) 溶融スラグ細骨材を一部に用いたコンクリートの積雪寒冷地における約7年の暴露試験の結果、溶融スラグを置換しない場合より質量減少率は小さく、相対動弾性係数は大きくなったが、コンクリート表面の明度に有意な差は認められなかった。

6. 2 埋戻し材用低強度モルタルへの適用に関する検討

各種リサイクル細骨材の埋戻し材用低強度モルタルへの適用性、埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定方法および埋戻し材用低強度モルタルのワーカビリティと強度の性能評価方法を第4章で明らかにした。以下に得られた知見を述べる。

- (1) リサイクル材料である廃ガラスカレット、再生細骨材およびフライアッシュを用いて、埋戻し材として自己充填性（目標フロー値 250 以上）および十分な強度（材齢 91 日の圧縮強度 $0.3 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ ）を有し、機械掘削が可能な低強度モルタルについて、実験的検討を加えた。その結果、廃ガラスカレット、再生細骨材およびフライアッシュの品質が変化した場合であっても、セメント添加率（粉体中のセメント質量の割合）とフロー値および材齢 91 日の圧縮強度の関係を求めることにより、目標値を満足する配合を求めることができた。
- (2) リサイクル材料である廃ガラスカレット、再生細骨材およびフライアッシュを使用して埋戻し材用低強度モルタルを製造し、湿砂養生、水砂養生 20°C 、水砂養生 10°C 、地中埋設の各養生後、強度試験を行い、目標強度を満足する配合の選定方法について実験的検討を加えた。その結果、低強度モルタルの強度を室内試験により評価する場合の材齢は、91 日が適当と考えられた。その上で、各養生条件における 91 日圧縮強度の大小関係を明らかにした。また、実施工で目標強度の配合を得るためには、施工場所の温度変化や水の有無を確認した上で、適切な室内試験の養生条件を選択した強度試験結果から配合選定ができると考えられる。
- (3) 多量のフライアッシュと低品質再生細骨材を用いた自己充填性を有する埋戻し材用低強度モルタルの流動性、材料分離抵抗性および強度について実験的検討を行った結果、フロー値およびブリーディング率の目標値を満足する配合の低強度モルタルを、地下水の影響を考慮した水砂養生で養生し、材齢 28 日の強度試験結果から求めた 91

日予測強度が目標範囲内であれば、これを屋外に地中埋設しても目標強度範囲に入る低強度モルタルが得られることを気象条件が異なる2地点において確認できた。また、出所および品質が異なる低品質再生細骨材やフライアッシュを用いた同容積配合の場合であっても、混和剤の使用量を調節して目標とするワーカビリティおよび強度を満足する低強度モルタルを製造することが可能なことが分かった。

6. 3 試験施工および環境影響評価結果

各種リサイクル骨材を普通強度のモルタル、コンクリートおよび低強度モルタルに使用した試験施工例を行った。さらに、本研究で対象とした産業副産物用いた環境影響評価については、リサイクル細骨材の重金属溶出試験結果および低強度モルタルの CO₂ 排出量比較における優位性を第5章で明らかにした。以下に得られた知見を述べる。

6. 3. 1 試験施工結果

- (1) 再生細骨材を用いたコンクリートについては、細骨材の一部に再生細骨材を用いたカラーコンクリート平板ブロックによる舗装の試験施工を行った。現状、不具合や異常等は認められない。今後も継続して観察していく予定である。
- (2) 廃ガラスカレットを細骨材の一部に用いたコンクリートについては、境界ブロックに適用した結果、アルカリシリカ反応対策を行わなくても、細骨材質量比 30%の置換であれば問題がないことが、施工後 15 年経過した時点で確認できた。
- (3) 低強度モルタルの各種用途への適用については、ブロック舗装の下地や舗装路盤、傾斜地における均しモルタル等への適用の可能性について検討した結果、用途に合わせて流動性や強度を調整することで適用できる可能性があることが確認された。

6. 3. 2 環境影響評価結果

- (1) 低強度モルタルに用いた材料である再生細骨材および廃ガラスカレットの重金属溶出試験を行った結果、再生細骨材から、鉛、六価クロムおよび砒素が検出されたが、いずれも環境庁告示第 46 号「土壤の汚染に係る環境基準値」未満であった。
- (2) 再生細骨材を用いた低強度モルタルの材料および製造プロセスにおける CO₂ 排出量は -14 kg/m^3 となり、環境影響評価の観点から有利になることが分かった。このことから、低強度モルタルは、破碎次数の少ない低品質再生細骨材の用途として期待される。

6. 4 今後の課題

- (1) 普通強度のモルタルおよびコンクリートへの適用に関して、短期的性能についてはこれまで、本研究の内容を含めて相当の研究データが蓄積されてきている。しかし、長期的性能については、長期暴露試験や実施工された構造物の長期観測・測定データ

などの蓄積がさらに必要と考えられる。また、コンクリート表面の色彩測定結果とコンクリート内部の品質変化や劣化との関係については、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

- (2) 埋戻し材用低強度モルタルへの適用に関して、産業副産物やリサイクル材料の適用については、今後もその時代の状況に応じた副産物やリサイクル材料の適用性に関する検討を継続していく必要があると考えられる。また本研究では、強度に基づく配合選定およびワーカビリティと強度の性能評価に関する検討結果を示したが、今後は実施工における施工性や耐久性、さらには再掘削性に関する検討を継続する必要があると考えられる。これらについては、わが国において研究および施工実績が先行していると考えられる流動化処理土やアメリカでの CLSM の事例^{例えば 46),47)}が参考になる。
- (3) 低強度モルタルについては、我が国における試験施工や実施工事例が少ないことから、この種の材料の周知および普及の促進を図るとともに、研究データおよび施工事例をさらに蓄積していくことが重要と考えられる。また、使用材料および低強度モルタルの環境影響評価については、強度が小さい場合やフライアッシュの使用量が多い場合には重金属成分の溶出が懸念されるため注意が必要と考えられ、この視点からの配合設計の最適化が必要である。
- (4) 気候変動枠組条約第 21 回締約国会議 (COP21) および京都議定書第 11 回締約国会議 (CMP11) が 2015 年 11 月 30 日から 12 月 11 日まで、フランス・パリで開催されたことを受け、2016 年 11 月 4 日に「パリ協定」が発効した。この中で日本は、2030 年までに CO₂ 排出量を 2013 年比で 26%削減することを約束した。この削減目標を達成するためには、各産業分野において目標値を定め、これを達成するための技術およびシステムの構築を促進するとともに、目標の実現に向け具体的行動ができる人材を育成する必要がある⁴⁸⁾。コンクリートセクターにおいても、CO₂ 排出量や廃棄物の削減のための取組みをより一層推進し、その技術やシステムを途上国に波及させていくことが望まれる。

参考文献

- 46) 深谷渉, 田中祐大, 仁科憲: 流動化処理土の再掘削に関する一考察, 下水道協会誌, Vol.47, No.568, 2010
- 47) Lianxiang Du, Kevin J. Folliard, and Thanos Drimalas: Effects of Additives on Properties of Rapid-Setting Controlled Low-Strength Material Mixtures, ACI Materials Journal/January-February 2012, Title no. 109-M03, pp.21-29, 2012
- 48) 日本コンクリート工学協会: コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書, pp.300-301, 2010

参考文献リスト

- 1) 環境省：平成 27 年度版環境・循環型社会・生物多様性白書，状況，第 2 部，第 3 章，第 2 節，p.1, <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h27/html/hj15020302.html> (2015 年 9 月 28 日)
- 2) 建設副産物リサイクル広報推進会議：よくわかる建設リサイクル 2014-15, p.2, 2014.11
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合会／全国生コンクリート協同組合連合会：生コンクリート製造業の概要，<http://www.zennama.or.jp/3-toukei/gaiyou/> (2015 年 9 月 29 日)
- 4) 日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，pp.1-3, 2007.7
- 5) 日本コンクリート工学協会：廃棄物のコンクリート材料への再資源化に関するシンポジウム論文集，2002.9
- 6) 国土交通省：平成 24 年度建設副産物実態調査結果参考資料，p.参考 1-9, <http://www.mlit.go.jp/common/001031803.pdf> (2017 年 1 月 7 日)
- 7) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案），pp.8-9, 2014.10
- 8) ガラスびんリサイクル促進協議会：ガラスびんのマテリアルフロー図（平成 25 年度実績），http://www.glass-3r.jp/data/pdf/data_09.pdf, 2015.9.5 確認
- 9) エコスラグ利用普及委員会：http://www.jsim.or.jp/ecoslag/03_04.html, (一社)日本産業機械工業会，(2015 年 9 月 5 日)
- 10) 川上勝弥：溶融スラグ骨材，コンクリート工学，Vol.46, No.5, pp.107-108, 2008.5
- 11) フライアッシュ有効活用小委員会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，(公社)土木学会コンクリート委員会，p.1, 2009
- 12) 笠井芳夫，坂井悦郎：新セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，p.59, 2007.1
- 13) W. S. Adaska: Controlled Low-Strength Materials, Concrete International, Vol.19, No.4, pp.41-43, 1997
- 14) 渡邊真史，三本巖，我妻佳幸：【JCIy2014】再生細骨材 H を使用したコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.1744-1749, 2014
- 15) 山田悠二，橋本紳一郎，江本幸雄，伊達重之：低品質再生骨材の含水状態がコンクリートの圧送性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.1465-1470, 2013
- 16) 松田信広，竹内博幸，高橋祐一：中品質再生骨材を用いたコンクリートの実構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1516-1521, 2012
- 17) 田端辰伍，宮里心一，網野貴彦，羽瀧貴士：塩化物を含有する再生骨材 L を用いたコンクリートの基礎的性状の把握，セメント・コンクリート論文集，Vol.66, pp.607-614, 2012

- 18) 篠崎真澄, 半井健一郎: 再生骨材を用いたポーラスコンクリートの蒸発冷却効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1468-1473, 2012
- 19) 小川秀夫, 名和豊春, 大矢嘉津, 山本一雄: 脆弱部除去による再生細骨材の品質改善法, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp.213-227, 2011
- 20) 六名良輔, 堺孝司, 北垣亮馬, 名取正夫: 低環境負荷再生骨材コンクリートの強度・弾性係数に及ぼす再生細骨材の改質と微粉の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1459-1464, 2013
- 21) 飯笹真也, 増田龍哉, 浪平隆男, 重石光弘: 水中パルス放電により回収された再生細骨材の海洋環境回復のための覆砂代替材として適用可能性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1411-1416, 2013
- 22) 内田美夏, 高田龍一, 野中資博, 佐藤周之: 廃ガラスを利用したコンクリート二次製品の開発に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.224-229, 2013
- 23) 村上聖, 武田浩二, 山口信, 佐藤あゆみ: 保水性を付与した廃ガラス発泡骨材ポーラスコンクリートの緑化基盤材への適用, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.516-522, 2014
- 24) 江藤優馬, 高海克彦, 駒田弘明: 廃ブラウン管ガラスカレットを用いた積層モルタル板の放射線遮蔽効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1975-1980, 2013
- 25) 尾上幸造, 関戸知雄, 中津隆雄, 中村公生: 宮崎県で製造されるごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.65, pp.268-275, 2011
- 26) 河野伊知郎, 中嶋清実, 齊藤和秀, 林孝明: ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.94-99, 2012
- 27) 小川由布子, 川村和正, 半井健一郎, 佐藤良一: ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの力学特性に対する養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1585-1590, 2013
- 28) 川上勝弥, 横室隆, 宮澤祐介: コンクリート用溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの材齢 10 年における性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.137-142, 2011
- 29) 高田龍一, 北辻政文, 高橋真治, 明石哲夫: 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートのポップアウトの抑制に対するエージングの効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.88-93, 2012
- 30) 水口洋, 小野寺収, 堀口敬, 井伊博之: CLSM (Controlled Low-Strength Material) の国内における適用について, テクニカルレポート, コンクリート工学 Vol.42, No.10, pp.19-28, 2004

- 31) 木幡行宏：流動化処理土の力学特性と今後の課題，土木学会論文集 F，Vol.62，No.4，pp.618-627，2006
- 32) 内川浩，羽原俊祐：アルカリ反応性骨材を含有する各種セメントモルタルの硬化体組織と膨張性の関係，セメント技術年報，41，1987
- 33) 国土交通省気象庁ホームページ：気象統計情報，
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 34) 柏崎健輔，佐藤重悦，城門義嗣，加賀谷誠：ごみ溶融スラグをリサイクル使用したコンクリートの凍結融解特性と品質改善に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1435-1440，2005
- 35) 桜田良治，丸山久一，黒島一郎，下山善秀，佐藤豊一：フライアッシュを多量に使用した自己充填モルタルの基本特性，第 25 回セメント・コンクリート研究討論会論文集，p.60 (1998)
- 36) 東・中・西日本高速道路株式会社：試験方法第 3 編コンクリート関係試験方法，pp.31-35，2006
- 37) 土木研究所，(株)流動化処理工法総合監理：流動化処理土利用技術マニュアル（平成 19 年／第 2 版），技報堂出版，pp.50-54，2008
- 38) 土木学会：2010 年制定コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準，pp.238-239，2010
- 39) M.E. Ayers, S.Z. Wong, and W. Zaman : Optimization of Flowable Fill Mix Proportions, CONTROLLED LOW-STRENGTH MATERIALS, ACI SP-150-2, pp.15-37, 1994
- 40) 佐藤重悦，加賀谷誠：リサイクル材料を用いた埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定，セメント・コンクリート論文集 No.57，pp.619-624，2003
- 41) 高田聡恵，糸山豊，上原匠，梅原秀哲：溶融スラグのコンクリート用材料としての有効利用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1629～1634，2004
- 42) 北辻政文，田中礼治，遠藤孝夫，鳴海繁実：都市ごみガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用，コンクリート工学論文集，No.13，Vol.2，pp.89～97，2002
- 43) Kevin J. Folliard, Lianxiang Du, and David Trejo: Effects of Curing Conditions on Strength Development of Controlled Low-Strength Material, ACI Materials Journal, January-February 2003, pp.79-86, 2003
- 44) 李柱国・山本泰彦・大久保孝昭：コンクリートの環境性能評価法と環境配慮型調合設計法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1373-1378，2006
- 45) (一社)セメント協会：セメントの LCI データの概要，p.7，2013.7.22
- 46) 深谷渉，田中祐大，仁科憲：流動化処理土の再掘削に関する一考察，下水道協会誌，Vol.47，No.568，2010
- 47) Lianxiang Du, Kevin J. Folliard, and Thanos Drimalas : Effects of Additives on

- Properties of Rapid-Setting Controlled Low-Strength Material Mixtures, ACI Materials Journal/January-February 2012, Title no. 109-M03, pp.21-29, 2012
- 48) 日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書，pp.300-301，2010

本論文に関連する発表論文

- (1) 佐藤重悦, 徳重英信: ごみ熔融スラグ細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの物理的特性および耐久性に関する実験的検討, 材料, 第 65 巻, 第 1 号, 91 頁～96 頁 (2016 年)
- (2) 佐藤重悦, 徳重英信: 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル供試体の長期暴露性状, コンクリート工学年次論文集, 第 36 巻, 第 1 号, 1810 頁～1815 頁 (2014 年)
- (3) 佐藤重悦, 加賀谷誠: リサイクル細骨材を用いた埋戻し材用低強度モルタルのワーカビリティと強度に関する研究, セメント・コンクリート論文集, 第 67 号, 565 頁～572 頁 (2014 年)
- (4) 柏崎健輔, 佐藤重悦, 城門義嗣, 加賀谷誠: ごみ熔融スラグをリサイクル使用したコンクリートの凍結融解特性と品質改善に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, 第 27 巻, 第 1 号, 1435 頁～1440 頁 (2005 年)
- (6) 佐藤重悦, 加賀谷誠: リサイクル材料を用いた埋戻し材用低強度モルタルの強度に基づく配合選定, セメント・コンクリート論文集, 第 57 号, 619 頁～624 頁 (2003 年)
- (7) 佐藤重悦, 加賀谷誠: 埋戻し材用低強度モルタルへのリサイクル材料の適用に関する実験的検討, 建設用原材料, 第 11 巻, 第 1 号, 19 頁～24 頁 (2001 年)
- (8) 佐藤重悦, 加賀谷誠: カレットおよび再生細骨材のコンクリートへの利用に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, 第 54 号, 299 頁～304 頁 (2000 年)
- (9) 佐藤重悦, 加賀谷誠: 再生細骨材を用いたモルタルの基礎性状, セメント・コンクリート論文集, 第 52 号, 438 頁～443 頁 (1998 年)

謝 辞

本論文は、筆者が 1994 年から 2013 年までの 20 年間に、秋田職業能力開発短期大学校（秋田県大館市）、東北職業能力開発大学校（宮城県栗原市）および北海道職業能力開発大学校（北海道小樽市）で行った研究を、2012 年 4 月から 2017 年 3 月までの秋田大学大学院工学資源学研究科博士後期課程在籍中に取りまとめたものです。

本論文を作成するにあたり、終始暖かいご指導とご鞭撻を賜りました秋田大学大学院理工学研究科システムデザイン工学専攻教授・徳重英信博士に心よりお礼申し上げます。また、非常にご多忙の中、有益なご教授を賜りました秋田大学大学院理工学研究科附属理工学研究センター教授・林滋生博士、秋田大学大学院理工学研究科システムデザイン工学専攻教授・後藤文彦博士、秋田大学大学院理工学研究科システムデザイン工学専攻教授・濱岡秀勝博士に深く感謝いたします。

秋田大学鉱山学部土木工学科卒業後、民間企業に籍を置いていた筆者に、学生時代の恩師であり当時鉱山学部長であられた故徳田弘博士から現職のご紹介があったのが 1991 年の春ごろだったと記憶しています。翌 1992 年から現職の世界に飛び込み、以来 25 年が過ぎようとしています。

転職後 1 年間の開設準備を経て、1993 年に初任地の秋田職業能力開発短期大学校が大館市に開学、その後 10 年の長きにわたり、同じく学生時代の恩師であり徳田先生の教え子でもあられた故加賀谷誠博士が、毎年度前期 6 か月間週 1 回のペースで非常勤講師として大館まで通っていただき、その間毎週のように研究に関するご指導をいただきました。加賀谷先生の非常勤終了後も定期的に秋田大学にお邪魔して研究に関する相談に乗っていただき、暖かく、時には厳しくご指導いただきました。

筆者が籍を置く職業能力開発大学校は厚労省所管であり、全国に所在しており転勤があります。初任地の秋田に 12 年間、次の宮城に 6 年間、さらに次の北海道に 6 年間、現在は宮城に戻って 1 年になるところです。転勤のたびに研究環境が大きく変わり、研究が滞ることもしばしばでしたが、その都度加賀谷先生から叱咤・激励をいただき、何とか継続することができました。

長期にわたる研究成果をまとめるため 2012 年 4 月から博士後期課程にお世話になることを決断、加賀谷先生から直接ご指導いただくことになりました。し

かし、翌 2013 年夏に加賀谷先生が急逝され、筆者は指導教員を失ってしまいました。一時は筆者自身どうなるのかわからないような状態でしたが、徳重先生が指導教員を引き継いでいただくことが決まり、当時筆者が所属していた北海道職業能力開発大学校にも何度も足をお運び頂き、懇切丁寧にご指導いただきました。ここに改めてお礼申し上げます。

本論文に関する研究を実施するにあたり、実験に協力していただいた当時の学生の皆さんに深く感謝いたします。また、これまで 3 か所の大学校でお世話になった同僚や先輩・後輩の皆さんに感謝いたします。さらに、実験の実施にあたり数多くの材料メーカーや近隣の生コン工場等の皆様から試料のご提供をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

このように、本論文は非常に多くの方々のご協力の結果、取りまとめることができましたものです。ここに深く感謝申し上げます。

おわりに、筆者が研究・論文の取りまとめに集中できるように常に後方で支援してくれた妻・江理子に心から感謝するとともに、いつも癒しとなってくれた長男・重吾、長女・花音、さらに二人の孫の面倒をみてくれた母・ノリ子に感謝します。また、私の仕事への取り組み方や、その他様々なことに対して大きな影響を与えてくださった、故徳田弘先生ならびに故加賀谷誠先生に、論文の完成を報告できることに感謝して、本論文の謝辞といたします。

2017 年 3 月 佐藤 重悦

