

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04638

研究課題名（和文）炭酸化和ポゾラン反応による組織緻密化が硬化体の物質透過性に及ぼす影響

研究課題名（英文）Effect of Microstructure Densification by Carbonation and Pozzolanic Reaction on Material Permeability of Hardened Materials

研究代表者

徳重 英信（Tokushige, Hidenobu）

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80291269

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の結果から、JIS IV種灰の強熱減量、比表面積、密度に基づいた統計的手法の検討により各化学混和剤量が求められ、要求性能を満足するコンクリートの配合が可能であることが明らかとなった。なお、フライアッシュの品質とコンクリートの性状に関する統計的処理や機械学習的手法により適切に緻密化が図られる配合設計手法の構築が可能であることが示唆された。なお、JIS IV種灰を用いたコンクリートの有害物質溶出は、まったく問題ないことも明らかとなった。なお、各種もみ殻灰を用いたコンクリートの配合と強度の関係についても検討を行った結果、ポゾラン反応に伴う緻密化の進行が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強熱減量や比表面積にバラツキの多いJIS IV種フライアッシュと、ボイラー排出もみ殻灰を用いて、ポゾラン反応に伴うコンクリート硬化体組織の緻密化に対して検討を行った。品質に変動を伴うポゾラン材料を用いる際のコンクリートの配合設計法に対して、重回帰分析を用いた適切な統計処理が有効であることを明らかにし、また各種有害物質の溶出が問題ないことも明らかにした。これらの成果は、特に社会的意義を有するものと考えられ、また平易な重回帰分析によって配合設計法を構築することが可能であることは学術的意義にも通用するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Based on the results of this study, it is possible to determine the amount of each chemical admixture by examining the ignition loss, specific surface area, and density of JIS IV class ash, and to mix concrete that satisfies the required performance. became clear. In addition, it was suggested that it is possible to construct a mixing design method that achieves appropriate densification by statistical processing of fly ash quality and concrete properties and machine learning techniques. It was also found that there was no problem with the elution of harmful substances from concrete using JIS IV class ash. In addition, as a result of examining the relationship between the mix ratio and strength of concrete using various types of rice husk ash, the progress of densification due to the pozzolanic reaction was clarified.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート フライアッシュ もみ殻灰 強熱減量 密度 比表面積 フレッシュ性状 圧縮強度

1. 研究開始当初の背景

①フライアッシュなどのポゾランを混和したセメント・コンクリートの中性化、塩分浸透抑制、ASR 抑制や耐凍害性能などについては、これまでの国内外の研究などからも、①耐凍結融解性能：単位セメント量の確保、低水セメント比、適切な空気量と空気の質、②中性化：初期の炭酸化は早いポゾラン反応による緻密化も進む、③ASR 抑制にフライアッシュ混和は有効であるがその機構は明らかなのか、以上の検討が必要であることが様々な研究者から指摘されてきている。しかし、試験開始材齢の適正化などについては、時間と経費がかかることからあまり手をつけられていない領域である。しかし、申請者はこれらについて一部検討を開始しており、促進中性化試験については右図に示すような比較的短期の材齢について試験開始材齢の影響について検討している。さらに ASR の抑制効果についても一部試験を開始しており、未発表であるが右図に示すように一部の抑制効果について結果を得ているため、本申請課題の着想を得た。②もみ殻灰 (RHA) を用いたコンクリートのポゾラン反応性については、”徳重ら：もみ殻灰混和モルタルの振動締固めと強度発現に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.57, pp.231-236 (2004)” で既に研究を開始しており、暫く中断していたが、右図に示すように各種バイオマスボイラーから排出された RHA を用いたモルタルの強度発現について検討を開始しており、近年のエネルギー情勢からも本検討が必要であるとの着想を得ている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ポゾラン材料を混和したセメント硬化体の pH 低下を、ポゾラン反応によるものと炭酸化によるものとに分類し、その分類から硬化体組織の物質透過抵抗性能を明らかにすること、さらに ASR 抑制効果に対する Si/Ca 比に着目した耐久性能の適切な評価を行うことにある。実際のコンクリート構造物の施工や製造において、ポゾラン材料の選択は本来、地産地消で行われるべきであり、本研究では研究代表者所属機関の設置場所である秋田県内排出の石炭灰フライアッシュ (FA)、および秋田県内バイオマスボイラー排出のもみ殻灰 (Rice Husk Ash: RHA) を主に使い、さらに非晶質シリカを 60%程度含んでおり研究代表者が従来から研究材料に用いている秋田県内産天然ゼオライト粉末もポゾラン材料として使用する。FA 混和コンクリートの炭酸化や強度発現に及ぼす研究はこれまで数多く行われてきているが、ポゾラン反応と炭酸化を分類してそれらの物性に及ぼす影響を検討したものは数少ない。さらに、RHA を用いた研究についてはほとんど認められない。以上の課題について、本研究では特に、炭酸化とポゾラン反応による中性化に伴う物質透過抵抗性能の機構解明、ASR 抑制効果に対する Si/Ca 比の影響を明らかにすることを主眼とし、その性能が副次的に作用する塩分浸透性能への影響や、耐凍害性能に及ぼす影響についても、これまで研究代表者が積み重ねてきた知見を基に検討するものである。また RHA を用いたコンクリートはグリーンインフラの構築に関する社会的な要請からも、速やかに検討を開始することが必要である。

3. 研究の方法

3.1 品質変動を有するフライアッシュを混和したセメント・コンクリートに関する研究

本研究で使用したフライアッシュ (FA) は、能代火力発電所において製造された 2020 年 10 月から 2021 年 3 月までの JIS II 種 (FA-II) および JIS IV 種相当 (FA-IV) の 12 種類である。FA-II と IV の密度、強熱減量および比表面積の品質変動を図-1 と図-2 に示す。FA-II は各月のロット変動があまりないが、FA-IV は特に強熱減量が大幅に変動するため、FA 粒子への化学混和剤吸着がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響が想定される。

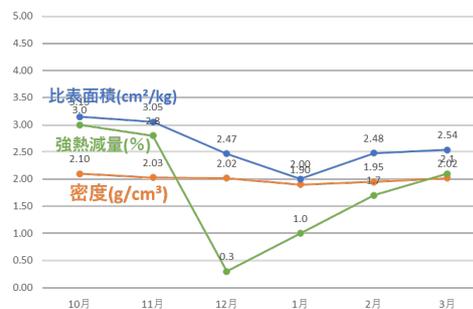
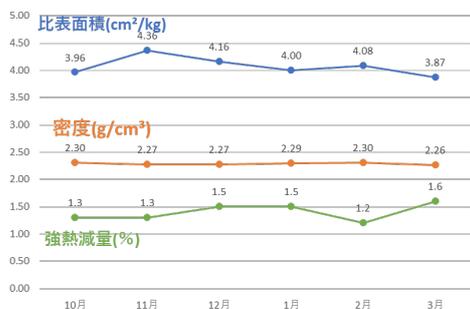


図-1 FA-II の月ごとの品質変動

図-2 FA-IV の月ごとの品質変動

表-1 コンクリートの示方配合 (1m³)

	C(kg)	W(kg)	S(kg)	G(kg)	FA(kg)
Plain	348	155	810	997	0
FA混和	313	155	775	997	70

表-2 モルタルの示方配合 (1m³)

	C(kg)	W(kg)	S(kg)	FA(kg)
SSプレーン	557	245	1296	0
Plain	557	245	1296	0
FA混和	501	248	1240	112

前節に示した品質変動を有する FA を混和したコンクリートのスランプと空気量に対する減水剤（ポリカルボン酸系）使用量と AE 剤（樹脂酸塩系）の使用量を推定するために、表-1 に示すコンクリートの示方配合を基本配合として選定し、それに対するフレッシュ時の要求性能をスランプ：12±2.5 cm，空気量 4.0～6.0%と設定した。この基本配合に対して各種 FA を使用し，所定のスランプと空気量の測定を行い，試験練りを重ねた。

既往の研究¹⁾では，モルタルフローとコンクリートのスランプに対して，図-3 に示すような傾向が明らかとなっている。そこで本研究でもまず FA 混和モルタルに対して，化学混和剤量とフローおよび空気量の関係を測定し，コンクリートの試験練りを開始するための化学混和剤量の基準値とした。なおモルタルの示方配合は表-2 に示すとおりである。

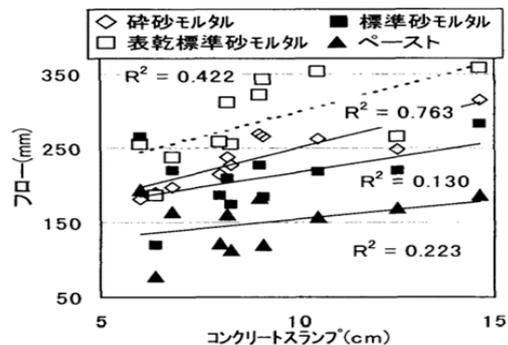


図-3 モルタルフローとスランプの関係¹⁾

3.2 もみ殻液化残渣を用いたもみ殻灰混和モルタルの強度特性

3.2.1 使用材料および配合

(1)使用材料

セメントは早強ポルトランドセメント，骨材はセメント強さ試験用標準砂（JIS R 5201，密度 2.61g/cm³，吸水率 0.42%）を用いた。

本研究で用いたもみ殻灰は，図 4 に示すもみ殻を PEG を用いて液化した液化物からの残渣分を乾燥等として抽出した「RHA-R」，大型バイオマスボイラーでもみ殻を燃料とした大型バイオマスボイラーから排出されたもみ殻灰「RHA-O」，もみ殻 100%の固形燃料をバイオマスボイラーで燃焼した「RHA-E」および同燃料を家庭用ストーブで燃焼した「RHA-I」をボイラー等副産物として用いた。さらに既往の研究でコンクリート混和材料として製造した高活性もみ殻灰（RHA-H）も用いた。使用材料一覧を表 3 に示す。

(2)供試体の配合

モルタルの配合を表 2 に示す。水セメント比を 50%，および S/C=3.0 としている。各 RHA を細骨材置換で 10% および 20%で混和した。比較として RHA 無混和モルタル（Plain）も用いている。減水剤は，リグニンスルホン酸塩とポリカルボン酸系化合物を主成分としたものを用いたが，Plain には減水剤を使用せず，RHA-H は H-10 の時に C×5.0%，H-20 の時に C×6.5%，その他の RHA の減水剤量は C×1.5%の量を使用した。なお RHA-R，O，E，I に関しては吸水率が非常に高かったため，使用する RHA と同量の水を事前に吸水（Pre Wetting）させてから使用した。

3.2.2 供試体の製造と試験

供試体寸法はφ50×100 mm を用い，モルタルの練混ぜ直前に RHA-R，O，E，I については Pre Wetting（事前に水と RHA を練混ぜ）を行っている。フレッシュ時の測定は，空気量は AE 剤を投入していないため測定はせず，減水剤の効果を確認するためにモルタルフローの測定のみを行い，表 4 に示した Plain モルタルの減水剤量とフローの関係をもとに，概ね 200±40mm 程度の範囲を目安とした。各 RHA 混和モルタルのフローが概ねこの範囲とするために，試験を繰り返した結果，減水剤を増量させてもフローのコントロールが困難であったため，本研究では RHA に Pre Wetting を施す方法を選択した。

供試体は蒸気養生（最高 45°C 95RH%以上）後に標準養生（20°C水中）を行い，材齢 7 日および 14 日で圧縮強度の測定を実施した。

4. 研究成果

4.1 品質変動を有するフライアッシュを混和したコンクリートの配合設計

4.1.1 FA 混和モルタルのフレッシュ性状

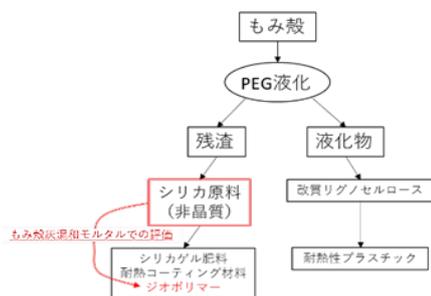


図 4 もみ殻残渣（RHA-R）の製

表 3 使用材料

使用材料	記号	備考欄
セメント	早強ポルトランドセメント	C 太平洋セメント
細骨材	セメント強さ試験用標準砂	S
水	秋田市水道水	W
混和材	もみ殻液化残渣	R-10,R-20
	高性能もみ殻灰	H-10,H-20
	秋田県内バイオマス発電ボイラー排出灰	O-10,O-20
	もみ殻燃料モミガライトのバイオマス発電ボイラー燃料排出灰	E-10,E-20
もみ殻燃料モミガライトの薪ストーブ燃焼排出灰	I-10,I-20	
混和剤	減水剤「フローリック VP-10」	Ad ポリカルボン酸系

表 4 供試体の配合

試料名	水セメント比		単位量 (kg/m ³)					Mortar Flow (mm)
	(%)	W	C	細骨材 S	RHA	減水剤 A	Pre Wetting	
Plain				1536	0	0	0	171
R-10				1383	153	7.7	153	213
R-20				1167	208	7.7	208	223
H-10				1383	153	25.8	0	160
H-20				1167	208	33.3	0	148
O-10	50	256	512	1383	153	7.7	153	181
O-20				1167	208	7.7	208	177
E-10				1383	153	7.7	153	237
E-20				1167	208	7.7	208	213
I-10				1383	153	7.7	153	214
I-20				1167	208	7.7	208	234

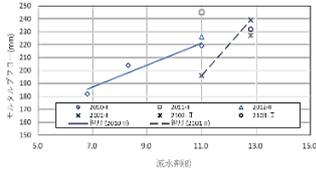


図-5 モルタルフローおよび空気量 (FA-II)

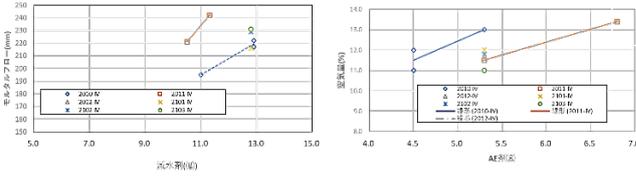


図-6 モルタルフローおよび空気量 (FA-IV)

モルタル供試体のフローと減水剤量の関係を図-5に、空気量とAE剤量の関係を図-6に示す。図-5と図-6の関係、ならびに図-3に示したフローとスランプの関係より、コンクリートに対して所要のフレッシュ性状を得るための減水剤量とAE剤量を同定し基準値とした。

4.1.2 FA混和コンクリートのフレッシュ性状

前節の結果から設定した所要のスランプと空気量を得るための減水剤量およびAE剤量を変化させ、各FAを混和した表-1のコンクリートに対して試験練を行った結果について、スランプと減水剤量(Ad, C×%)の関係を図-7に、空気量とAE剤量(AE, C×%)の関係を図-8に示す。図中の赤点線はスランプおよび空気量の要求範囲である。

スランプと減水剤量の関係においては、FA-IIにおいて明確な傾向が認めれないが、FA-IVにおいては減水剤量の増加に伴いスランプが増加する傾向が示された。また空気量についてはFA-IIは相関がある傾向となったが、FA-IVについてはFA-IIに比較して鈍い正の相関が存在する傾向を呈した。

図-7と図-8に示した結果より、各FA混和の際の所定のスランプと空気量を得るための減水剤量とAE剤量を同定した結果について、図-9にFA-IIおよびFA-IVを混和し同定した減水剤量(Ad)をプロットした結果を、図-10に同様にAE剤量(AE)をプロットした結果を示す。この配合の結果を基に、各FAの比表面積(SA)、密度(ρf)および強熱減量(igross)と、所定のスランプと空気量をえるための減水剤量(Ad)およびAE剤量(AE)との間に対して、次節に述べる重回帰分析を行った。

4.1.3 FAの品質変動を考慮したFA混和コンクリートの所定のフレッシュ性状を得るための減水剤量とAE剤量の選定

前節で明らかにした所定のスランプと空気量を得るための減水剤量およびAE剤量を求めるために、図-9と図-10に示した各混和剤量とFAの3つの品質要素について、線形重回帰分析を行った。その結果、FA-IIとFA-IVの全体を考慮した分析結果は以下の式で提示され、重回帰係数は0.8程度と相互に相関を有する結果を得た。

$$\begin{aligned} Ad(C\%) &= -0.013 \times igloss(\%) - 1.14 \times \rho f(g/cm^3) + 0.00019 \times SA(cm^2/g) + 3.04 \\ AE(C\%) &= 0.092 \times igloss(\%) - 2.63 \times \rho f(g/cm^3) + 0.00038 \times SA(cm^2/g) + 5.05 \end{aligned}$$

以上の結果を用いて、検証試験練を実施した結果(図-11)では、スランプと空気量ともに一律増加する傾向となり、上式への低減係数導入などによる効率的な配合設計法が構築できる可能性が示唆された。

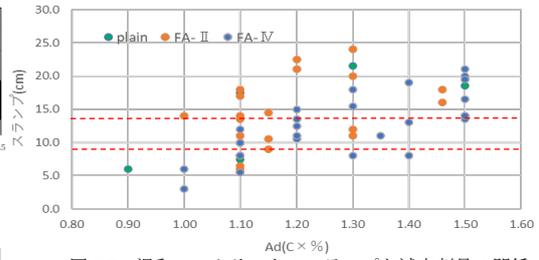


図-7 FA混和コンクリートのスランプと減水剤量の関係

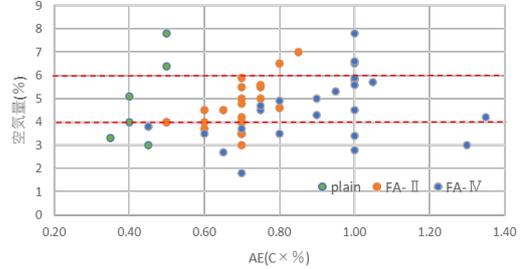


図-8 FA混和コンクリートの空気量とAE剤量の関係

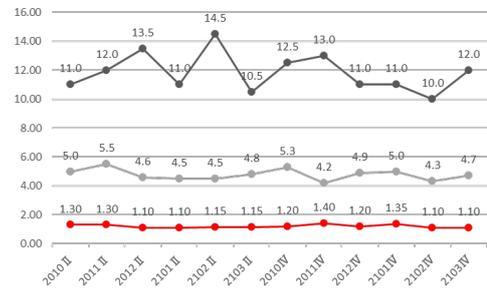


図-9 スランプを満足したFA混和コンクリートの減水剤量

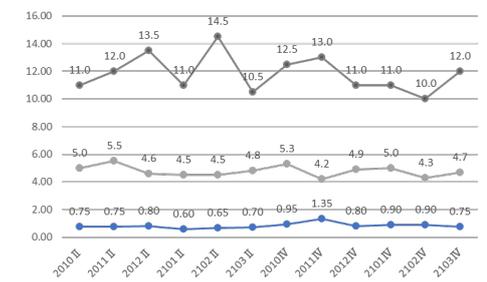


図-10 空気量を満足したFA混和コンクリートのAE剤量

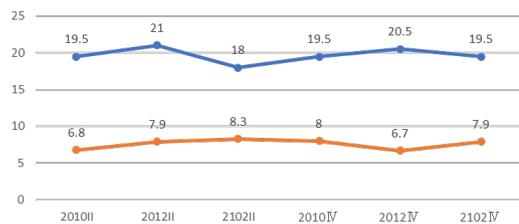


図-11 重回帰分析結果から検証試験練を実施した結果

4.2 もみ殻液化残渣を用いたもみ殻灰混和モルタルの強度特性

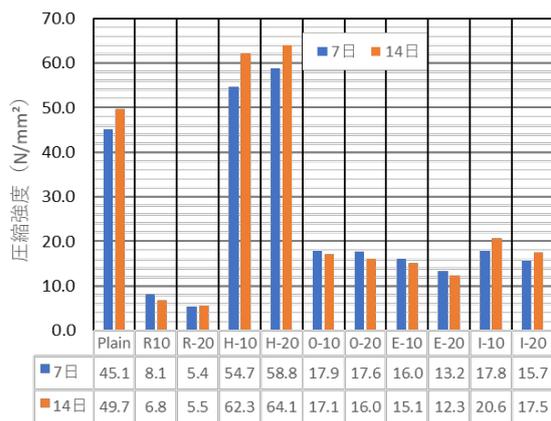


図 12 RHA 混和モルタルの圧縮強度

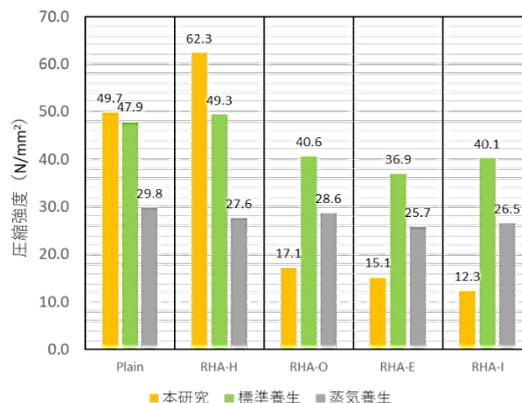


図 14 既往の研究結果との比較

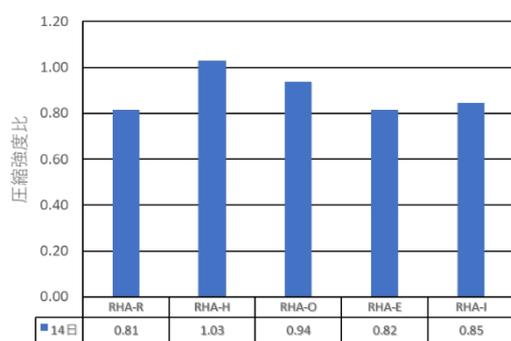


図 13 RHA10%の強度に対する 20%混和時

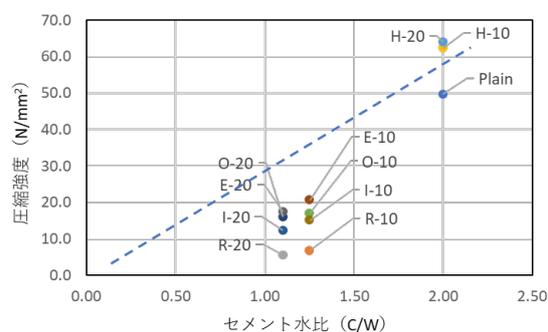


図 15 圧縮強度と C/W の関係

供試体の材齢 7 日および材齢 14 日での圧縮強度試験結果を図 12 に示す。本研究での配合設計では RHA を外割置換として設計したため、ポズラン反応による強度発現が顕著に出ることが想定されたが、材齢の経過とともに Plain と RHA-H のみに強い強度発現が認められ、その他の供試体には顕著な伸びが認められなかった。なお、RHA-H については Plain モルタルよりも強度発現が顕著となり、高活性 RHA を用いることで短期間でのポズラン反応の効果が本研究でも確認された。Plain と RHA-H 以外のモルタルでは、フレッシュモルタルの流動性確保を目的として使用した減水剤の効果があまりなく、前述した Pre Wetting 法による流動性の確保を行ったが、混和材 (RHA) と同量の水を加えたことによりモルタル内の水セメント比が増加し、強度低下につながったことが考えられる。

次に RHA 混和率の増加に伴う強度発現効果を検討するために、混和率 10% のときの各供試体の圧縮強度に対する混和率 20% のときの強度比を図 13 に示す。RHA-H については材齢 7 日から 14 日にかけて若干の強度増加が認められた。しかし、他の RHA については大きな変化が認められない。なお、本研究で主対象とした RHA-R については、他の副産物 RHA (O, E, I) と同程度の強度比となり、圧縮強度としては図 2 に示したように他 RHA 混和モルタルの強度よりも低い結果となったが、適切な配合設計で他 RHA と同等程度の特性を持たせることが可能ではないかと考えられる。

一方、既往の研究でも RHA 混和モルタルを、本研究とは異なる養生方法 (「標準養生のみ」と「蒸気養生後に室内養生」) で実施しており、その結果との比較を図 14 に示す。既往の配合では RHA をセメント内割混和としているが、Plain と RHA-H の強度は本研究の強度が最も高い。しかし他供試体については本研究の結果が最も低い結果となり、施工性に考慮した Pre Wetting が影響したことが考えられる。本研究の配合と強度試験結果から求めた圧縮強度とセメント水比 (C/W) の関係を図 5 に示す。副産物 RHA (O, E, I) の C/W の「W」については Pre Wetting の水量を単位水量に含んだが、これらのモルタルの強度は Pre Wetting の影響を加味しても低くなり、活性度や混和率などその他の要素が強度低下に及ぼしたものと考えられる。したがって、施工性の確保には適切な減水剤選定が必要であることを含め、今後の詳細な検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------