

博 士 論 文

未粉碎処理の粃殻灰を混入したコンクリートの
特性と RC 梁部材への適用

Characteristics of Concrete with Rice Husk Ash and
Application to RC Beams

2017 年

梶原 教裕

目次

第1章 序論	・・・(1)
1.1 研究の背景と目的	
1.2 本論文の構成	
1.3 本論文における用語の定義	
1.4 参考文献	
第2章 使用材料	・・・(5)
2.1 セメント	
2.2 骨材	
2.3 珪灰	
2.4 混和剤	
2.5 まとめ	
2.6 参考文献	
第3章 珪灰を用いたコンクリートの特性および利用形態の検討	・・・(12)
3.1 利用形態について	
3.1.1 セメントの内割置換（結合材）	
3.1.2 セメントの外割置換（混和材）	
3.2 試験配合一覧	
3.3 使用材料、試験方法および試験項目	
3.3.1 使用材料	
3.3.2 練混ぜ方法および試験項目	
3.4 試験結果および考察	
3.4.1 結合材として珪灰を利用したコンクリートの特性	
3.4.2 混和材として珪灰を利用したコンクリートの特性	
3.5 まとめ	
3.6 参考文献	

第4章 粉殻灰混入コンクリートの養生条件が強度特性に与える影響の把握および RC 梁部材へ適用した際の破壊挙動 ・・・(31)

- 4.1 実験概要
- 4.2 養生条件の違いが粉殻灰を混入したコンクリートの強度特性に与える影響
 - 4.2.1 実験概要
 - 4.2.2 使用材料
 - 4.2.3 試験配合
 - 4.2.4 供試体の作製方法および養生方法
 - 4.2.5 試験項目および試験方法
 - 4.2.6 試験結果および考察
- 4.3 粉殻灰混入コンクリートの RC 梁部材への適用
 - 4.3.1 実験概要
 - 4.3.2 使用材料
 - 4.3.3 試験配合
 - 4.3.4 供試体および試験体の作製方法
 - 4.3.5 試験項目および試験方法
 - 4.3.6 材料特性試験結果および考察
 - 4.3.7 曲げ破壊試験結果および考察
- 4.4 まとめ
- 4.5 参考文献

第5章 結論 ・・・(53)

- 5.1 粉殻灰を用いたコンクリートの特性および利用形態の検討
- 5.2 粉殻灰混入コンクリートの養生条件が強度特性に与える影響の把握および RC 梁部材へ適用した際の破壊挙動

謝辞

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

コンクリートの力学的特性および耐久性を改善する方法の一つとして、フライアッシュやシリカフェームなどのポゾランを混和することが挙げられる。粃殻を適切な方法で焼成して得られる粃殻灰も、その主成分は非晶質のシリカであり、コンクリート混和材として期待される材料の一つである。

FAO (The Food and Agriculture Organization of the United Nations:国連食糧農業機関) によると、2010年、世界全体で年間約6.7億の粃が発生・生産されている¹⁾。その質量の20%程度が粃殻であり、これらを燃焼することにより発生する粃殻灰は、粃乾燥質量の約20%程度である。

粃殻灰のコンクリートへの利用に関する研究は、カリフォルニア大学バークレイ校のMehta教授ら²⁾をはじめとして、1970年代から多くの研究者が行っており、特定の条件下で焼成した粃殻灰は、フライアッシュやシリカフェームなどのポゾランよりも優れた活性度を示すことも報告されている。しかし、その利用については、産地や製造方法により品質が大きく異なることから、限定的である。また、近年の研究事例³⁾では、製造条件に関する検討、得られた粃殻灰のそのものの特性、コンクリートに混和した際の硬化前後の特性(フレッシュ性状、力学的特性、耐久性)、粃殻灰を用いる際のコストなど種々の検討が行われている。

一方、日本でも1990年代のはじめ頃から粃殻灰に関する研究^{4, 5, 6)}が行われているが、日本では実用化には至らず、性能の確認で終了したまま現在に至っている。その最大の原因として挙げられるのが経済性である。粃殻灰は施工性の確保と活性度を向上させるために、シリカフェームと違い粉砕する必要があること、粃殻灰を精製するために新たなプラントの建設をしなければいけないこと、粃殻灰を混入したコンクリートを打設する時にシリカフェームと比べ多量の化学混和剤を必要とすることなどが挙げられる。しかし、最も大きな障害は、粃殻の集積コストが挙げられる。ゆえに、現段階では日本国内において粃殻灰の実用化は困難な状況にある。

ところで、近年の日本では、多種多様な発電へのシフトが進められている。現状の火力発電は主として化石燃料を使用しているが、将来、日本においても化石燃料に代わり、例えば粃殻などのいわゆるバイオマスを燃料とした火力発電の推進も十分にあり得る。したがって、事前に産業副産物となる粃殻灰の有効利用は、環境負荷低減を図り、持続可能な社会を構築する上でも重要な課題の1つと考えられる。

粃殻灰に対する既往の研究^{4, 5, 6)}では、高い活性度を有する混和材料として、ポゾラン活性を得るため粃殻灰を粉砕した状態での利用を考えたのに対して、本論文で使用する粃殻灰は、前処理を必要とせずの有効利用可能な副産物との観点から、環境負荷低減材料と位置付け、排出される状態での使用(粉砕処理を施さない状態での使用)を利用条件とし、コンクリート混和材料として使用した際の特性およびRC梁部材へ適用した際の破壊挙動

を検証した。

上記実験で使用した籾殻灰は、タイ王国で稼働する籾殻を燃料とした火力発電所から排出される産業副産物である。2005年の時点で、年間約2.7万トンの籾殻灰が発生している。産業副産物は、経済性や環境負荷低減の観点から、地産地消での利用が望まれる。すなわち、現地の基準に沿った試験が必要となるが、日本の基準を適用した方が、籾殻灰の影響度合いを精度良く把握でき、性能を理解しやすいと考えたこと、東日本大震災後の電力不足に対して日本でのバイオマス発電の可能性も考え、各種試験はJIS規格に準拠して実施した。

1.2 本論文の構成

本論文は5章で構成されている。

第1章 序論

第2章 使用材料

第3章 籾殻灰を用いたコンクリートの特性および利用形態の検討

第4章 籾殻灰混入コンクリートの養生条件が強度特性に与える影響の把握およびRC梁部材へ適用した際の破壊挙動

第5章 結論

以下に各章の概要を示す。また、図1に、本論文における研究の流れと各章相互の関係をフローチャートに示す。

第1章では、【序論】として研究の背景、本論文の目的と各章の構成について記述した。

第2章では、【使用材料】を記載し、特に本論文で用いた籾殻灰の基本物性および既往の研究で使用されている籾殻灰については詳細を記述した。

第3章では、【籾殻灰を用いたコンクリートの特性および利用形態の検討】として籾殻灰を結合材として使用した配合、すなわちセメントと置き換えた配合にて利用した際の籾殻灰混入コンクリートの特性について示した場合と、籾殻灰を混和材として使用した配合、すなわち細骨材と置き換えた配合にて利用した際の籾殻灰混入コンクリートの特性について比較検討した。その結果、混和材として有効利用することが望ましいことを示した。

第4章では、【籾殻灰混入コンクリートの養生条件が強度特性に与える影響の把握およびRC梁部材へ適用した際の破壊挙動】として、前章より、本研究で使用する籾殻灰は混和材として使用することが望ましいとの知見から、混和材として使用することを前提とした。本章では、籾殻灰混入コンクリートの内部において練混ぜ水が籾殻灰に拘束され、保水効果が一定期間持続されることを検証するため、異なる養生条件下（水中養生、気中養生）で強度発現性を比較し、その妥当性を検証した。また、籾殻灰混入コンクリートの特性を生かした実用化に向けた検討として、実構造物への適用および検証を目的に、RC梁部材での載荷実験を行った。

第5章では、第3章から第4章までに得られた成果を集約し、本論の結論としている。

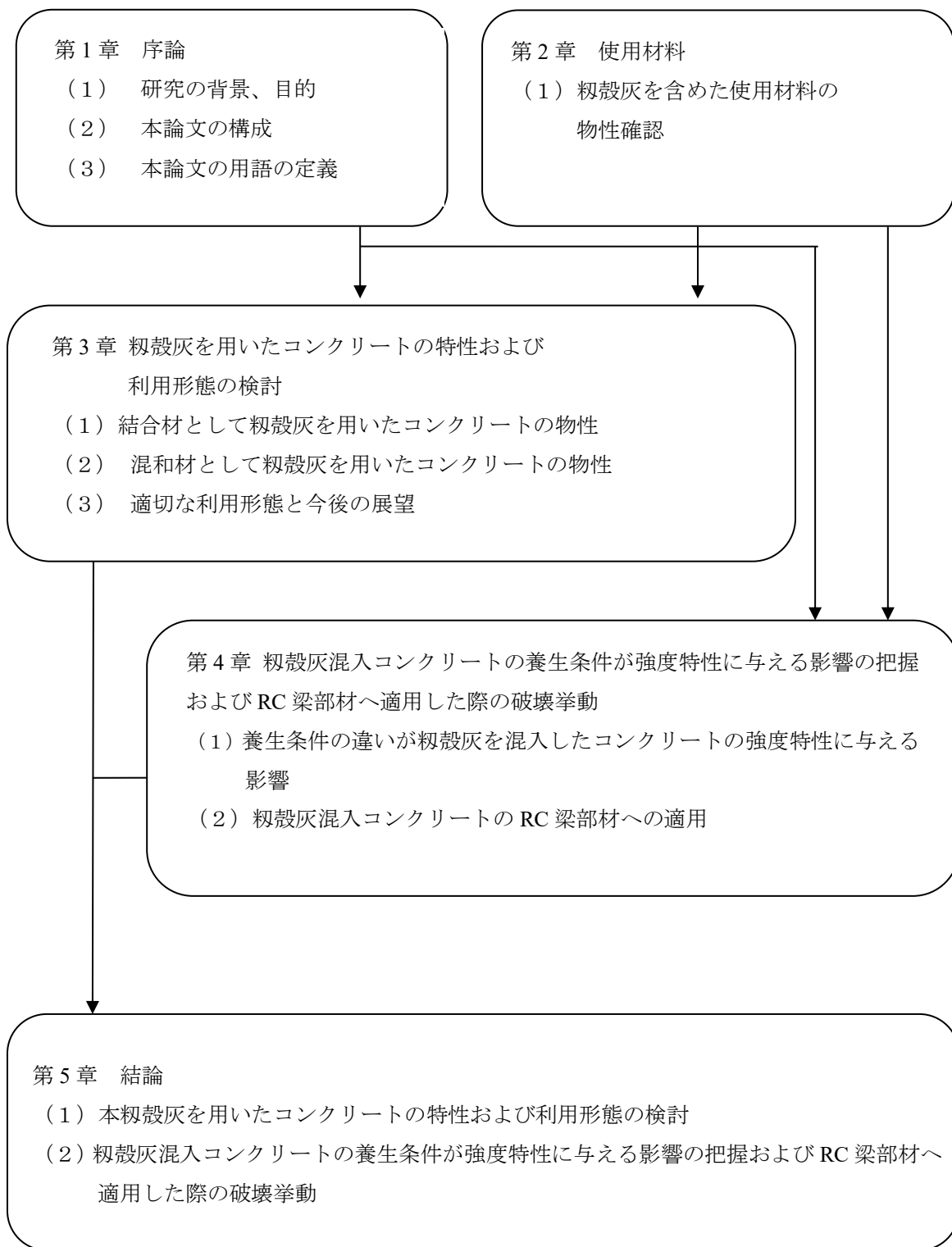


図1 本論文の構成

1.3 本論文における用語の定義

本論文で使用する用語のうち、特に繰り返して使用する用語、新たに用語として定義することで文意が理解しやすくなると考えられる用語について、以下のように定義する。

- (1) 粃殻灰混入コンクリート：JIS 外品であるタイ王国産の粉砕処理を施さない粃殻灰を使用したコンクリート。本論文では「RHA コンクリート」と表記。
- (2) 流動性：コンクリート、モルタルおよびペーストの自重もしくはバイブレータによる振動に伴う変形のしやすさのこと。本論文では、コンクリートは、JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験」に示されるスランプコーン(上面 $\phi 10$ cm、底面 20 cm、高さ 30 cm)に試料を詰めて、コーンを引き上げた時の試料の下がり「スランプ」を流動性の指標として用いた。
- (3) 材料分離：フレッシュコンクリートを構成する各材料(水、セメント、細骨材および粗骨材)の分布状況が、当初の均一な状態から変化する現象。本論文では目視による確認を指標とした。
- (4) ブリーディング：フレッシュコンクリート(モルタル、ペースト)中において、その構成材料のうち最も密度の小さい水が、上方へ移動する現象。本論文の評価方法としては、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準じて測定した。

1.4 参考文献

- 1)国連食糧農業機関ホームページ,2011
- 2)P.K.Metha:Properties of Blended Cement Made From Rice Husk Ash, ACI Journal, Vol.74,No.9,pp.440-442,1977
- 3)コンクリート工学会報誌,2012年7月発刊,pp.628-633
- 4)中嶋清実, 河野伊知郎ほか：コンクリート用混和材としてのもみがら灰の利用について, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, pp.419-424, 1994.6
- 5)佐藤幸三ほか：コンクリート用混和材としてのもみがら灰の利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.193-198, 1998
- 6)西松建設(株)技術研究所：粃殻灰コンクリートの研究開発について,2005

第2章 使用材料

2.1 セメント

セメントは、普通ポルトランドセメント（宇部三菱セメント(株)製）を使用した。表 2-1 にセメントの品質試験結果および JIS 規格値、表 2-2 にセメントの化学成分を示す。表 2-1 より、本研究で用いたセメントは JIS 規格の品質を満足するセメントと言える。

表 2-1 セメントの品質試験結果

		宇部三菱セメント(株)製	
		試験値	JIS 規格値
密度(g/cm ³)		3.16	-
比表面積(cm ² /g)		3290	2500 以上
凝結	水量(%)	27.8	-
	始発(h-min)	2-10	60min 以上
	終結(h-min)	3-26	10h 以下
安定性		良	良
圧縮強度 (N/mm ²)	3day	30.2	12.5 以上
	7day	46.1	22.5 以上
	28day	62.6	42.5 以上
水和熱 (J/g)	7day	329	-
	28day	383	-

表 2-2 セメントの化学成分

	MgO	SO ₃	Ig-loss	Na ₂ Oeq	Cl ⁻
宇部三菱セメント(株)製	1.21	2.09	2.09	0.49	0.013

単位:(%)

2.2 骨材

骨材の品質はコンクリートの諸性能に大きな影響を及ぼす。特に骨材に付着している微粒分量がフレッシュコンクリートの状態を左右し、硬化後のコンクリート供試体の強度にばらつき等の影響を与える。

そこで、今回使用する細骨材および粗骨材の品質を明らかにすることを目的に、骨材試験を実施した。本研究では、細骨材は瀬戸産の砕砂を、粗骨材には瀬戸産の砕石 2005 を使用した。それぞれの試験に用いた骨材に関する試験結果を以下に示す。

(1) ふるい分け試験結果

骨材のふるい分け試験は JIS A 1102（骨材のふるい分け試験方法）に基づいて行った。試

験結果を表 2-3、図 2-1、2-2 に示す。

今回使用する骨材の粗粒率は、表 2-3 に示すように細骨材（砕砂） 2.77、粗骨材が 6.64 である。粒度分布は図 2-1、2-2 に示す粒度曲線より、細骨材（砕砂）、粗骨材とも土木学会コンクリート標準示方書に示される標準粒度の範囲内に収まっていることがわかる。以上のことより、今回使用する骨材の粒度分布については、十分満足できる品質であるといえる。

表 2-3 骨材のふるい分け試験結果

細骨材（砕砂）

ふるい目の開き(mm)	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.075	粗粒率
ふるいに留まる 質量百分率(%)	0	0	9	35	59	81	93	97	2.77

粗骨材（砕石）

ふるい目の開き(mm)	25	20	15	10	5	2.5	粗粒率
ふるいに留まる 質量百分率(%)	0	6	21	61	97	100	6.64

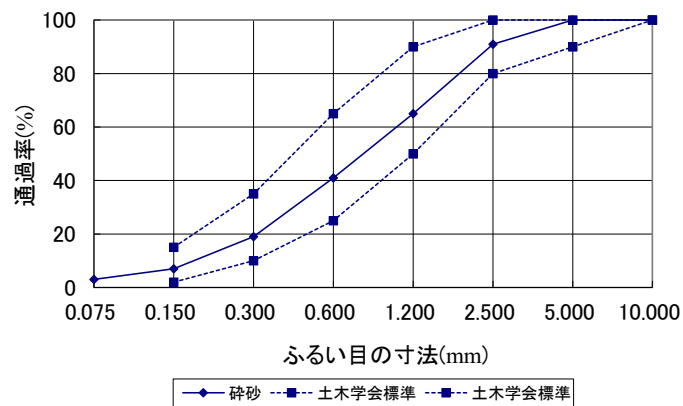


図 2-1 細骨材（砕砂）の粒度曲線

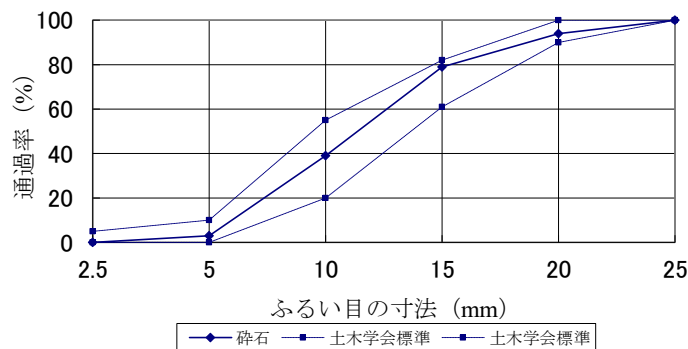


図 2-2 粗骨材（砕石）の粒度曲線

(2) 微粒分量試験結果

骨材の微粒分量試験結果を表 2-4 に示す。なお、表中の値は骨材のミルシートから転記した。

表 2-4 より 0.075mm ふるいを通過する微粒分量は細骨材(砕砂)で 4.82%、粗骨材では 0.68% であり、土木学会コンクリート標準示方書に示される規格値 (JIS A 5005 より砕砂 : 7.0%、JIS A 5308-2003 付属書 1 表 3 より粗骨材 : 1.0%と規定されている) 以下であることがわかる。ところで、粗骨材のふるい分け試験では 2.5mm ふるいを通過する粗骨材の質量百分率が 0%であるのに対して、微粒分量試験においては 0.075mm のふるいを通過する微粒分量が 0.68%となった。これはふるい分け試験では砕石粉がそのまま粗骨材の表面に付着して留まったことが原因であると思われる。

表 2-4 骨材の微粒分量試験結果

種別	細骨材(砕砂)	粗骨材(砕石)
(1)洗う前の乾燥質量(g)	510.1	2170.7
(2)洗った後の乾燥質量(g)	485.5	2156.0
(3)0.075mm ふるいを通過する質量の百分率 (①-②)÷①×100(%)	4.82	0.68

(3) 密度、吸水率および実積率試験結果

骨材の密度、吸水率および実積率試験は、JIS A 1109 (細骨材の密度および吸水率試験方法)、JIS A 1110 (粗骨材の密度および吸水率試験方法) および JIS A 1104 (骨材の単位容積質量および実積率試験方法) に基づいて行った。これらの試験結果を表 2-5 に示す。

密度、吸水率および実積率は東海地区での一般的な値であり、骨材の吸水率が細骨材、粗骨材ともに 3%未満であることから特に問題ないと言える。

表 2-5 骨材 (砕砂および砕石) の物性値

骨材種別	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (%)	実績率 (%)	単位容積 質量(kg/l)
細骨材 (砕砂)	2.67	2.64	1.24	2.77	58.7	-
粗骨材 (砕石)	2.72	2.70	0.53	6.64	59.1	1.59

2.3 粃殻灰

粃殻を燃焼させると、200~400°Cで炭化が起こり、600°C付近で灰化が起こる。1000°Cと高温になるとトリジマイトやクリストバライトなどの結晶質シリカに変質し、コンクリート用混和材としては不活性なものになる。したがって、良質な非結晶質シリカを得るには、灰化する温度をなるべく低温側でかつ、短時間で灰化することである。粃殻灰の物性および化学成分を表 2-6（既往の文献として中嶋¹⁾ら、佐藤²⁾らの文献を記載）、他の混和材と比較した物理試験結果の一例³⁾を表 2-7 に示す。粃殻灰の主成分は SiO₂ であり、密度は 2.38~2.41g/cm³、未燃カーボンは 3.5~3.9%、比表面積は 255000~321000cm²/g である。平均粒径は、既報⁴⁾で用いた粉碎粃殻灰が 19.0μm と本論文で用いた粃殻灰（80.1μm）に比べて非常に細かいことがわかる。ただし平均粒径を除き、他の物性値は化学成分も含めその差は、ばらつきの範囲内でほぼ等しいと考えられる。粃殻灰の粒子は複雑な形状を示していることから、その比表面積はシリカフェーム（微粒子ではほぼ球形）と同様、比較的大きい。

本論文で使用した粃殻灰は、東南アジアの稲作地帯で稼働する粃殻を燃料とした火力発電所から排出される産業副産物であり、火力発電所の燃焼炉底部と燃焼炉内の集じん機から回収された混合粃殻灰（約 9 : 1 の割合）である（2005 年の時点で、年間約 2.7 万トンの粃殻灰が発生）（写真 2-1）。未粉碎処理の状態であるため、その特徴として、形状にばらつきがあることが倍率 200 の写真から判断できる。倍率 1000 の写真からは 内部の空隙の形状寸法も様々な多孔質構造であることがわかり、そのため粒径が大きくても、比表面積が大きいと判断される。会報誌(2012 年 7 月発刊)⁵⁾によると、既往の研究で用いられている粃殻灰の比表面積は 3110000~40000cm²/g、平均粒径は 22.4~5.0μm 程度と報告されているが、本論文で使用した未粉碎処理の粃殻灰の比表面積は 321000cm²/g、平均粒径は 80.1μm 程度の大きめの粒子形状であることが確認できる。なお、用いた粃殻灰は多孔質であり、かつ、破碎処理がなされてなく粒子も粗いため、ブレーン空気透過装置での比表面積の測定が不能となったことから気体吸着法（BET 法）により測定した。粃殻灰の化学反応性に関しては、粃殻は火力発電の燃料として約 800°Cで燃焼利用されていることから、粃殻灰の主成分である SiO₂ は活性度が高いことが明らかにされている⁶⁾。

また、比較混和材料として、シリカフェーム（写真 2-2）、フライアッシュ（写真 2-2）の写真も合わせて掲載する。写真 2-1、2-2 は走査型電子顕微鏡（SEM）により撮影した。粃殻灰（写真 2-1）はシリカフェーム（写真 2-2）と比較して粒径が非常に大きく、粒子が非球形であることが確認される。また、フライアッシュ（写真 2-2）と比較しても粒径が大きく、粒子が非球形であることが確認される。したがって、既存の混和材料と比較して、粒子が球状に近いことによるボールベアリング効果が期待されず、フレッシュコンクリートのワーカビリティが低下すると予想される。よって、適切なフレッシュコンクリートのワーカビリティを確保するための工夫が必要と判断される。

表 2-6 粃殻灰の物性および化学成分

項目	単位	分析方法	本論文で 用いた 粃殻灰	既報 ⁷⁾ で 用いた 粉碎 粃殻灰	中嶋 ¹⁾ らの論文で用いた もみがら灰			佐藤ら ²⁾ の論文で用 いたもみがら灰		
					ルイジ アナ産	テキサ ス産	メキシ コ産	JR	AR	
未燃カーボン	%	CHN 計	3.5	3.9	-	-	-	-	-	
強熱減量	%	815°C加熱(重量法)	8.2	8.6	-	-	-	-	-	
かさ密度	g/mL	重量法(30回ポンピング)	0.48	0.92	-	-	-	-	-	
比表面積	cm ² /g	BET 法	321000	255000	79200	162300	244400	655000	420000	
平均粒径	μm	レーザー回折法	80.1	19.0	6.47	6.39	5.18	-	-	
密度	g/cm ³	比重計	2.41	2.38	2.18	2.15	2.21	2.13	2.12	
焼成温度	°C	-	800 程度	800 程度	500~700			700 程度		
化 学 成 分	SiO ₂	wt%	ICP 発光分析	83.0	81.0	93.30	93.00~ 97.00	97.50	83.4	85.4
	Al ₂ O ₃		ICP 発光分析	0.35	0.55	-	1.00	0.20	0.20	0.20
	CaO		ICP 発光分析	0.56	0.87	0.35	1.00	0.10	0.40	0.20
	MgO		ICP 発光分析	0.33	0.40	0.08	1.00	0.20	0.40	0.20
	SO ₃		ICP 発光分析	0.31	0.39	-	-	-	-	-
	Cl		イオンクロマトグラフ法	0.24	0.24	-	-	-	-	-
	K ₂ O		原子吸光分析法	1.3	0.28	1.51	1.00	0.30	1.53	3.16
pH	-	水抽出(1g/20ml) pH 計	9.9	10.0	-	-	-	-	-	
水分	wt%	重量法	0.77	1.9	-	-	-	-	-	

表 2-7 各種コンクリート混和材料の物理試験結果

混和材	主な性質			
	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	非晶質(%)	平均粒径(μm)
フライアッシュ	2.0~2.2	3000~5000	-	20(1~100)
高炉スラグ微粉末	2.80 以上	3000~10000	-	-
シリカフェーム	2.1~2.2	200000	86.5	0.1
粃殻灰	2.15~2.2	79200~244000	94.7~86.5	6.47~5.18

*粃殻灰は中嶋¹⁾らの研究による北アメリカ産の値

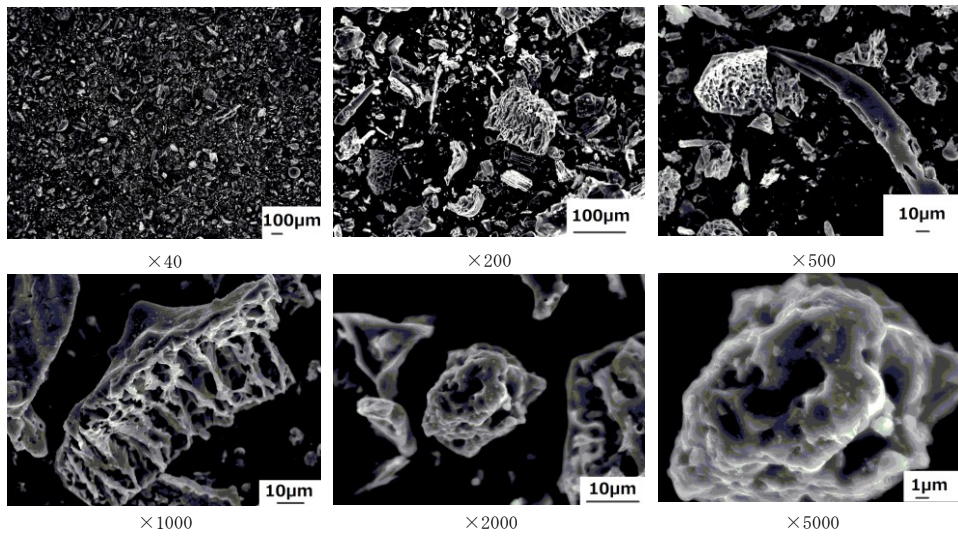


写真 2-1 本研究で使用了した粉殻灰の走査型電子顕微鏡(SEM)写真

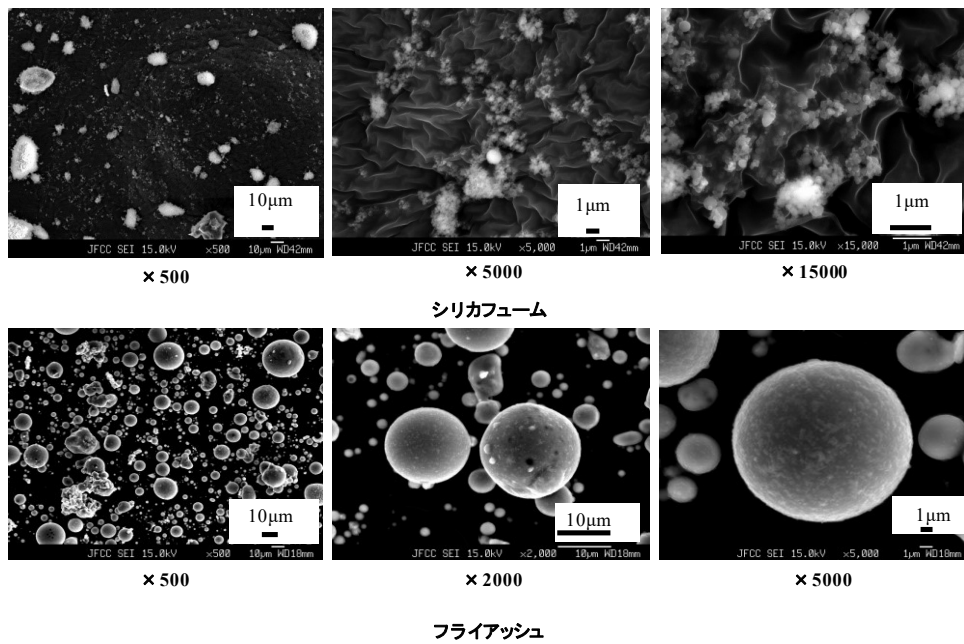


写真 2-2 シリカフェーム(上段)およびフライアッシュ(下段)の走査型電子顕微鏡(SEM)

2.4 混和剤

粉殻灰の種類や使用量によっては、フレッシュコンクリートのワーカビリティが低下することが既往の文献¹⁾および SEM 写真からも推察される。そこで、ある程度のワーカビリティを確保することを目的として、本研究ではポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤（以下、SP と表記）、高級脂肪酸および非イオン系界面活性剤を主成分としたフライアッシュ用 AE 剤を使用することにした。

2.5 まとめ

表 2-8 に本実験で使用した材料を取りまとめ一覧表で示す。第 3 章、第 4 章で実施した実験では、表 2-8 に示す値を用いた。

表 2-8 使用材料一覧表

種別		記号	物性値
普通ポルトランドセメント		C	密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3290cm ² /g(宇部三菱セメント社製)
細骨材	砕砂	S	表乾密度:2.67 g/cm ³ 絶乾密度:2.64 g/cm ³ 吸水率:1.24% 粗粒率:2.77 実積率:58.7%
粗骨材	碎石 2005	G	表乾密度:2.72 g/cm ³ 絶乾密度:2.70 g/cm ³ 吸水率:0.53% 粗粒率:6.64 実積率:59.1%
混和材	粉殻灰	RHA	密度:2.41g/cm ³ 平均粒径:80.1 μ m 比表面積:321000cm ² /g 未燃カーボン:3.5%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	主成分:末端スルホン酸基を有するポリカルボン酸基含有多元ポリマー
	AE 剤	AE	主成分:高級脂肪酸および非イオン系界面活性剤

2.6 参考文献

- 1)中嶋清実, 河野伊知郎ほか: コンクリート用混和材としてのもみがら灰の利用について, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, pp.419-424, 1994.6
- 2)佐藤幸三ほか: コンクリート用混和材としてのもみがら灰の利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.193-198, 1998
- 3)コンクリート混和材料ハンドブック
- 4)梶原教裕ほか: 火力発電所より排出される粉殻灰の有効利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, pp.1873-1878, 2009
- 5)コンクリート工学会報誌, 2012 年 7 月発刊, pp.628-633
- 6)梶原教裕ほか: 粉殻を燃料とした火力発電所から排出される粉砕処理を施さない粉殻灰を混入したコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp.1558-1563, 2012

第3章 粉砕灰を用いたコンクリートの特性および利用形態の検討

3.1 利用形態について

混和材料をコンクリートに混合する配合には、セメントと置換する内割混合と、単位セメント量を保持して骨材と置換する外割混合がある

既報^{1, 2)}において、セメントの内割置換（単位セメント量を低減させ CO₂ 排出量を抑制）での有効利用を目的に、粉砕灰を排出時の状態で練り混ぜたコンクリートの物性について報告している。既報¹⁾では、未粉砕処理の粉砕灰を最大 30%まで置換しても高い活性度を有していること、ただし粉砕灰置換率を増やすに従い、流動性を確保するため細骨材率を上げ、化学混和剤の使用量を増やす必要があり、その結果フレッシュコンクリートの粘性が高くなることを報告した。その結果を踏まえて、既報²⁾では粉砕灰置換率 30%に対して、コンクリート標準示方書³⁾（以下、示方書と表記）で推奨される単位水量 175kg/m³より 20kg 多い単位水量 195kg/m³の配合 1 水準を検討した結果、スランプ値の改善は小さいが化学混和剤の使用量が半分となり粘性も施工上問題ないこと、単位水量を増加させても強度および乾燥収縮、耐凍害性に問題がないことなど、利用できる可能性を報告した。

また、既報^{4, 5)}では、混和材と位置づけ、細骨材と粉砕灰を置換（セメントの外割置換）した粉砕灰混入コンクリート（以下、RHA コンクリートと表記）の物性について報告している。まず、粉砕灰混入モルタルでは、強度試験結果より、未粉砕処理の状態でも 90%以上の高い活性度を示すことから、未粉砕処理での利用の有意性を明らかにした。しかし、フロー試験結果より、単位水量と化学混和剤使用量を一定にした場合、粉砕灰無混入のフロー値比を 100%とすると、粉砕処理した粉砕灰と未粉砕処理の粉砕灰では、フロー値比比較でそれぞれ、134%、75%となり、未粉砕処理の粉砕灰を使用すると流動性が低下することも明らかとなった。なお、RHA コンクリートでは、粉砕灰 3 水準の配合から、粉砕灰の単位量が 75kg/m³の場合に施工性を保持しつつ、高い強度が確保できることを報告している。ただし、乾燥収縮および耐凍害性の確認はなされていない。今後、有効利用を推進するには RHA コンクリートが施工性、強度、耐久性を満足する必要がある。

そこで本章では、未粉砕処理の粉砕灰をコンクリートに効果的に利用する適切な混入量および利用形態を明らかにするため、フレッシュ時と硬化後の特性について、既報のデータ^{2, 4, 5)}も含めて実験データを統計的に整理し考察した。

さらに、フレッシュ時の不具合を抑え、混入することによる硬化コンクリートの強度、耐凍害性の向上および乾燥収縮が抑制される配合条件について検討した。

なお、本章では、既報のデータ^{2, 4, 5)}を含め、実験データは結合材（セメント内割置換）および混和材（セメント外割置換）ごとに、それぞれ単位水量などの因子をパラメータに整理、考察した。

3.1.1 セメントの内割置換（結合材）

セメントの内割置換で粉砕灰を使用する配合では、単位水量、単位粉砕灰量、水結合材比、細骨材率、化学混和剤量、練混ぜ時間をパラメータとし RHA コンクリートの流動性改善と粘性低減を試みた。特に、単位水量に着目し、流動性と強度発現を兼備する配合の目安を実験により検証した。ただし、強度確保と流動性改善の観点および、過度の化学混和剤使用量と練混ぜ時間低減の観点から、粉砕灰を有効利用するための適切な配合を模索することとした。水結合材比は 80、70、60、55、50 の 5 水準設定し、粉砕灰置換率においてもセメント質量の 0%、10%、20%、30%、50% の 5 水準設定した。また、単位水量を増加させることから併せて乾燥収縮および耐凍害性試験も実施した。

結合材として有効利用する場合、粉砕灰の置換率を最大でセメント質量の 30%までとした。（ただし、R50-80-A は比較配合のためこの限りではない）シリーズ A で設定した配合は、単位水量 195 kg/m^3 を基準にさらなる流動性改善と粘性低減を目的に、単位水量を増加させた。

目標スランプは後述する設定条件により適宜設定し、目視および供試体作製時において材料分離が見受けられず、適切な流動性を保持している事を確認して試験を実施した。目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

3.1.2 セメントの外割置換（混和材）

既報^{4, 5)}では明らかにされていなかった凝結時間、ブリーディング量の把握に加えて、乾燥収縮および耐凍害性を改めて検討することとした。シリーズ B では単位水量を 175 kg/m^3 、水セメント比を 50、60% の 2 水準とし示方書³⁾に準拠する範囲での値を採用した。シリーズ B での検討は、施工性確保に加えて、単位セメント量が少ない配合や、水セメント比 60% と比較的水セメント比の高い配合に対して懸念される強度確保や乾燥収縮および耐凍害性に対して、粉砕灰を混入することの有効性を明らかにすることにある。なお、目標スランプは特に設定せず、目視および供試体作製時において材料分離が見受けられず、適切な流動性を保持している事を確認して試験を実施した。（ $10 \pm 2.5 \text{ cm}$ 程度）なお AE コンクリートの目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ に設定した。

新たに実施した配合では、既報⁵⁾と同じ水セメント比 60%、単位水量 175 kg/m^3 、単位セメント量 292 kg/m^3 、単位粗骨材量 1132 kg/m^3 一定の条件の下、単位粉砕灰量 0、50、 75 kg/m^3 （Base-60-B、50R-60-B、75R-60-B と表記）をそれぞれ細骨材と質量置換した配合を設定した。また比較配合として水セメント比 50%、単位水量 175 kg/m^3 、単位セメント量 350 kg/m^3 、単位粗骨材量 1099 kg/m^3 を設定し粉砕灰混入量の差がフレッシュ性状および硬化性状に与える影響について改めて検討した。

3.2 試験配合一覧

表 3-1 に既報の配合を含む全配合を示す。シリーズ A はセメントの内割置換（結合材）

表 3-1 既報を含めた配合表一覧

No.	種別	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					化学混和剤		備考:配合設定条件
					水 W	セメント C	珪灰 RHA	細骨材 S	粗骨材 G	SP (kg/m ³)	AE (B×%)	
1	Base-50-A0 ⁴⁾	50	50	39.6	175	350	0	708	1099	1.75	0.02	W=175 kg/m ³ ,W/B=50%,s/a=39.6%一定 →示方書の単体量の上限に準拠した際の性状把握
2	R10-50-A0 ⁴⁾	56	50	39.6	175	315	35	704	1094	3.50	0.02	
3	R30-50-A0 ⁴⁾	71	50	39.6	175	245	105	697	1082	7.35	0.02	
4	Base-50-A02 ⁴⁾	50	50	38.1	185	370	0	664	1067	0.74	0.04	示方書の推奨値より単体量を 10~20 kg/m ³ 高く設定 →単体量増加による性状把握
5	R30-50-A02 ⁴⁾	71	50	36.3	195	273	117	606	1051	3.90	0.04	
6	Base-50-A	50	50	36.3	195	390	0	617	1103	0.78	0.07	
7	R10-50-A	56	50	36.3	195	351	39	613	1096	3.12	0.04	
8	R20-50-A1	63	50	36.3	195	312	78	609	1091	5.07	0.03	示方書の推奨値より単体量を さらに高く設定 (W=210~280 kg/m ³) →単体量をパラメータとし、強度とフレッシュ性状に与える影響を把握
9	R30-80-A	114	80	40.0	280	245	105	592	904	2.80	0.008	
10	R30-70-A	100	70	40.0	245	245	105	629	961	2.80	0.008	
11	R30-60-A	86	60	40.0	210	245	105	665	1018	2.80	0.008	
12	R50-80-A	160	80	40.0	280	175	175	584	893	5.25	0.02	
13	R30-60-A	86	60	40.0	210	245	105	666	1018	5.25	0.02	W,RHA 置換率,s/a 一定 →W/B を変化させた際の性状把握
14	R20-60-A	75	60	40.0	195	260	65	695	1062	2.60	0.03	
15	R20-55-A	69	55	40.0	195	284	71	684	1046	3.55	0.025	
16	R20-50-A2	63	50	40.0	195	312	78	672	1027	3.90	0.035	
17	Base-60-B0 ⁶⁾	60	-	44.6	175	292	0	811	1074	3.21	-	Non-AE コンクリート対象 W/C=60% 55% 50%の3水準設定 →示方書の単体量の上限に準拠した際の性状把握 →強度とフレッシュ性状に与える影響を把握
18	50R-60-B0 ⁶⁾	60	-	43.0	175	292	50	758	1074	13.68	-	
19	100R-60-B0 ⁶⁾	60	-	41.2	175	292	100	706	1074	15.68	-	
20	Base-55-B0 ⁶⁾	55	-	43.6	175	318	0	783	1080	3.50	-	
21	50R-55-B0 ⁶⁾	55	-	41.9	175	318	50	730	1080	14.72	-	
22	100R-55-B0 ⁶⁾	55	-	40.0	175	318	100	677	1080	16.72	-	
23	Base-50-B0 ⁶⁾	50	-	42.6	175	350	0	754	1084	3.85	-	
24	50R-50-B0 ⁶⁾	50	-	40.8	175	350	50	701	1084	16.00	-	
25	100R-50-B0 ⁶⁾	50	-	38.9	175	350	100	647	1084	18.00	-	AE コンクリート対象 W/C=60% 50%の2水準設定 →示方書の単体量の上限に準拠した際の性状把握 →強度とフレッシュ性状に与える影響を把握
26	Base-50-B00-2 ⁷⁾	50	-	39.6	175	350	0	708	1099	1.40	0.035	
27	50R-50-B00 ⁷⁾	50	-	37.8	175	350	50	652	1099	4.00	0.10	
28	75R-50-B00 ⁷⁾	50	-	36.8	175	350	75	625	1099	6.38	0.35	
29	Base-60-B00 ⁷⁾	60	-	39.6	175	292	0	727	1130	1.17	0.035	
30	50R-60-B00 ⁷⁾	60	-	37.8	175	292	50	672	1130	3.42	0.07	
31	75R-60-B00-2 ⁷⁾	60	-	36.7	175	292	75	644	1130	5.51	0.105	
32	100R-60-B00 ⁷⁾	60	-	35.7	175	292	100	616	1132	7.84	0.14	AE コンクリート対象 W/C=60% 50%の2水準設定 →示方書の単体量の上限に準拠した際の性状把握 →乾燥収縮,耐凍害性を含めた硬化性状とフレッシュ性状に与える影響を把握
33	Base-50-B	50	-	39.6	175	350	0	708	1099	1.40	0.035	
34	50R-50-B	50	-	37.8	175	350	50	652	1099	4.00	0.05	
35	75R-50-B	50	-	36.8	175	350	75	625	1099	6.38	0.35	
36	Base-60-B	60	-	39.5	175	292	0	725	1132	2.04	0.025	
37	50R-60-B	60	-	37.6	175	292	50	669	1132	5.13	0.04	
38	75R-60-B	60	-	36.6	175	292	75	642	1132	8.44	0.05	

*No.1~16 はセメントの内割置換配合を, No.17~38 はセメントの外割置換配合を示す。

の配合 (No.1~16) を, シリーズ B はセメントの外割置換 (混和材) の配合 (No.17~38) を示す。全配合の設定条件は以下のとおりとなる。

内割置換 (目標スランプは適宜設定)

No1~3 : $W=175 \text{ kg/m}^3$ 、 $W/B=50\%$ 、 $s/a=39.6\%$ 一定

・示方書の単位水量の上限に準拠した際の性状把握

No4~8 : 推奨値より単位水量を $10\sim 20 \text{ kg/m}^3$ 高く設定

・単位水量増加による性状把握

・No6~8 の目標スランプは $12\pm 2.5 \text{ cm}$

No9~13 : 単位水量をさらに高く設定 ($W=210\sim 280 \text{ kg/m}^3$)

・高単位水量が強度とフレッシュ性状に与える影響把握

・目標スランプの設定なし

No14~16 : $W=195 \text{ kg/m}^3$ 、 $s/a=40.0\%$ 一定

・ W/B を変化させた際の性状把握

・目標スランプは $12\pm 2.5 \text{ cm}$

外割置換 (目標スランプは $12\pm 2.5 \text{ cm}$ 程度)

No17~25 : Non-AE コンクリート、 $W/C=60$ 、 55 、 50%

・示方書の単位水量の上限に準拠した際の性状把握

No26~32 : AE コンクリート、 $W/C=60$ 、 50%

・示方書の単位水量の上限に準拠した際の性状把握

No33~38 : AE コンクリート、 $W/C=60$ 、 50%

・示方書の単位水量の上限に準拠した際の乾燥収縮、耐凍害性への影響把握

3.3 使用材料、試験方法および試験項目

3.3.1 使用材料

本章では第2章で提示した材料をもとに実験を実施した。

3.3.2 練混ぜ方法および試験項目

コンクリートの練混ぜには、公称容量 0.06 m^3 の水平 2 軸型強制練りミキサを使用した。本章での材料投入手順は、砕砂の半分、セメント、粉砕灰、残りの砕砂、碎石の順序で行い、空練り後に練混ぜ水を投入する手順とした。練混ぜ時間は粉砕灰の混入量が増加するに従い適宜調整し、1~7分程度になった。

練混ぜ終了後のコンクリートは練り板に受け、均一になるように 2 往復切り返した後に直ちにフレッシュ試験を行った。なお、スランプや空気量が目標値から外れた場合、十分な材料分離抵抗性と目標空気量を有している場合は試料として有効であると判断し、供試体を作製した。

コンクリートの試験項目は、フレッシュ性状に対しては、スランプ試験 (JIS A 1101-2005)、

空気量試験 (JIS A 1128-2005)、単位容積質量試験 (JIS A 1116-2005)、凝結時間試験 (JIS A 1147-2007)、ブリーディング試験 (JIS A 1123-2003) とした。硬化性状に対しては、圧縮強度試験 (JIS A 1108-2006)、静弾性係数試験 (JSCE-G 502-1999)、長さ変化率試験 (JIS A 1129-3-2001)、凍結融解試験 (JIS A 1148-2001) を実施した。圧縮強度の試験材齢、静弾性係数の試験材齢は適宜設定し、長さ変化率試験は材齢 26 週まで、凍結融解試験は 300 サイクルまで実施した。供試体の養生方法については JIS に準拠して養生した。

3.4 試験結果および考察

3.4.1 結合材として珪砂灰を利用したコンクリートの特性

(a) フレッシュ性状

表 3-2 にシリーズ A のフレッシュ性状試験結果を示す。表 3-2 より単位水量 195kg/m^3 、 $s/a=36.3\%$ 一定の配合 No.6~8 で Base-50-A (No.6) と比較すると、R10-50-A (No.7)、R20-50-A1 (No.8) では、スランプが目標範囲内に収まり、未粉砕処理の珪砂灰を用いても化学混和剤使用量と練混ぜ時間を調整することで No.6 の配合と同程度のスランプ制御は可能となることが確認された。また、目視によるフレッシュコンクリートの練上がり状態から No.7、No.8 とともに施工可能なコンシステンシーを有していることも確認された。これは、既報の単位水量 175kg/m^3 の配合 (No.1~3) と比較すると、単位ペースト量が増加したことでワーカブルなコンクリートが得られた事によりスランプが増大したと考えられる。空気量についても、ばらつきはあるが $4.5\pm 1.5\%$ の範囲に収まった。既報²⁾の単位水量 195kg/m^3 (No.5) と比較すると、流動性を確保するには珪砂灰の単位量に応じて単位水量をさらに増やす必要があると言える。珪砂灰無混入の No.6 の配合と同等のフレッシュ性状となるように、単位水量を最大 280kg/m^3 まで増加させ、化学混和剤使用量の低減を試みた配合 (No.9~13) では、未粉砕処理の珪砂灰を使用する際の単位水量を示方書³⁾推奨値である 175kg/m^3 (単位水量の上限値) より大幅に増やすことでスランプの制御は容易となり、フレッシュ時の切返し作業から、ハンドリング (粘性低減) の向上も確認された。

なお、単位水量を最大 280kg/m^3 まで増加させても、材料分離は認められなかった。しかし、No.7~16 の RHA コンクリートは Base-50-A (No.6) と比較して、化学混和剤使用量の低減が認められなかった事や、後述する硬化性状への悪影響が懸念されることから、未粉砕処理の珪砂灰を内割置換する場合には、単位水量を 195kg/m^3 で使用する事が目安になると考えた。単位水量 195kg/m^3 、珪砂灰置換率 20%一定の下で、水粉体比を 60、55、50%と 3 水準設定 (No.14~16) した配合でも化学混和剤と練混ぜ時間を適宜調整することで適切なフレッシュ性状が確保されることを確認した。No.9~16 の空気量についても、ばらつきはあるが $4.5\pm 1.5\%$ の範囲に収まった。

次に、珪砂灰をセメントの内割置換した配合のフレッシュ性状に影響を与える因子の傾向を明確にするため図 3-1 に単位珪砂灰量と高性能 AE 減水剤の関係を、図 3-2 に単位珪砂灰量とスランプの関係を、図 3-3 に単位珪砂灰量と練混ぜ時間の関係を、図 3-4 にスランプ

表 3-2 配合表およびフレッシュ試験結果一覧(珪殻灰をセメントの内割置換した配合)

No.	種別	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					化学混和剤		スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	練上がり温度 (°C)	練混ぜ時間 (分)
					水 W	セメント C	珪殻灰 RHA	細骨材 S	粗骨材 G	SP (kg/m ³)	AE (B×%)					
1	Base-50-A0 ⁴⁾	50	50	39.6	175	350	0	708	1099	1.75	0.02	12.0	4.7	2.324	25.5	1.5
2	R10-50-A0 ⁴⁾	56	50	39.6	175	315	35	704	1094	3.50	0.02	7.0	5.4	2.284	25.4	2.0
3	R30-50-A0 ⁴⁾	71	50	39.6	175	245	105	697	1082	7.35	0.02	7.0	5.5	2.304	25.6	4.0
4	Base-50-A02 ⁴⁾	50	50	38.1	185	370	0	664	1067	0.74	0.04	10.5	3.6	2.341	27.8	1.5
5	R30-50-A02 ⁴⁾	71	50	36.3	195	273	117	606	1051	3.90	0.04	5.0	4.5	2.252	28.5	7.0
6	Base-50-A	50	50	36.3	195	390	0	617	1103	0.78	0.07	12.0	4.0	2.322	23.4	1.5
7	R10-50-A	56	50	36.3	195	351	39	613	1096	3.12	0.04	12.5	6.0	2.274	23.7	2.0
8	R20-50-A1	63	50	36.3	195	312	78	609	1091	5.07	0.03	9.5	4.4	2.308	23.6	3.0
9	R30-80-A	114	80	40.0	280	245	105	592	904	2.80	0.008	19.5	5.0	2.077	22.4	1.0
10	R30-70-A	100	70	40.0	245	245	105	629	961	2.80	0.008	12.0	4.3	2.201	22.6	2.0
11	R30-60-A	86	60	40.0	210	245	105	665	1018	2.80	0.008	1.5	3.8	2.261	23.0	2.0
12	R50-80-A	160	80	40.0	280	175	175	584	893	5.25	0.02	21.0	4.5	2.111	22.7	6.0
13	R30-60-A	86	60	40.0	210	245	105	665	1018	5.25	0.02	13.5	4.8	2.219	14.3	3.0
14	R20-60-A	75	60	40.0	195	260	65	695	1062	2.60	0.03	9.5	4.9	2.247	14.4	3.0
15	R20-55-A	69	55	40.0	195	284	71	684	1046	3.55	0.025	14.0	5.1	2.249	15.0	3.0
16	R20-50-A2	63	50	40.0	195	312	78	672	1027	3.90	0.035	10.5	4.2	2.272	14.8	3.0

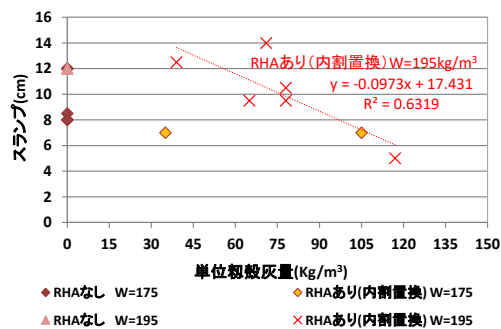
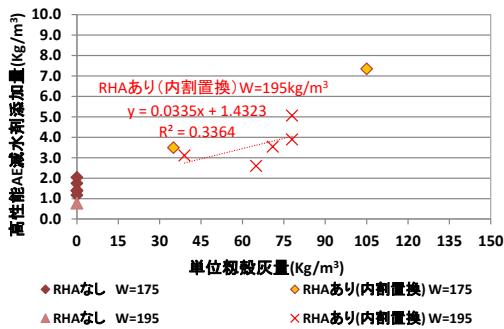


図 3-1 単位珪殻灰量と高性能 AE 減水剤の関係 図 3-2 単位珪殻灰量とスランプの関係

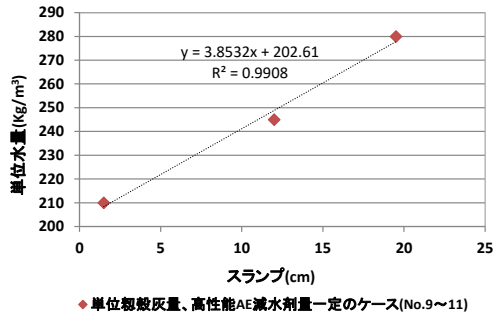
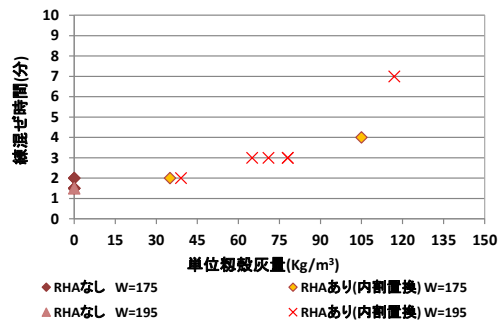


図 3-3 単位珪殻灰量と練混ぜ時間の関係 図 3-4 スランプと単位水量の関係

と単位水量の関係を、図 3-5 に練混ぜ時間と単位水量の関係を示す。

図 3-1 より、単位水量 195kg/m^3 の配合 (No.6~8、14~16) において、RHA コンクリート中の単位粉体置換量を増大させると、無混入のコンクリートと比較して、高性能 AE 減水剤の使用量が $2.0\sim 5.0\text{kg/m}^3$ と最大で無混入のコンクリートの 7 倍程度の使用量が必要となることが認められた。また、単位水量 175kg/m^3 の配合 (No.1~3) と比較すると、傾向として、高性能 AE 減水剤の使用量は少なくなることが読み取れるが、RHA コンクリートの単位粉体置換量と高性能 AE 減水剤の使用量との相関は $R^2=0.3364$ と低いことが確認された。すなわち、粉体中の単位粉体量に対し、効果的に高性能 AE 減水剤が分散に寄与していないことが明らかとなった。今後の課題として粉体中の有効利用を確立する上でもセメントだけではなく粉体も効率よく分散する化学混和剤の開発が待たれる。

図 3-2 より、単位水量 195kg/m^3 の配合 (No.5~8、14~16) において、RHA コンクリート中の単位粉体置換量を増大させると、スランプは低下する傾向にあることが認められた。この原因には、単純に単位粉体置換量を増大させ粉体全体の比表面積が増大したことが挙げられる。さらに、写真 2-1 の粉体中の SEM 写真より、多孔質であり平均粒径がセメントより大きい粉体に練混ぜ水が吸着され粉体内部に練混ぜ水がとどまる（保水される）ことで本来流動性に寄与する練混ぜ水が相対的に少なくなること流動性が低下する一因と考えられる。ただし、単位水量 175kg/m^3 の配合 (No.1~3) と比較すると、単位水量 195kg/m^3 の配合 (No.6~8、14~16) のスランプは増大し、No.5 を除いて目標スランプ内に収まることが確認された。

図 3-3 より、単位水量 195kg/m^3 の配合 (No.6~8、14~16) において、RHA コンクリート中の単位粉体置換量 $39\sim 78\text{kg/m}^3$ の範囲では、無混入のコンクリートと比較して同等のスランプを得るためには、1.5~2 倍程度の練混ぜ時間が目安となることが明らかとなった。すなわちコンクリートが均一に一体化するまでの時間が長くなることが確認された。ただし、今後の課題として、練混ぜ方法も含めた合理的な練混ぜ時間を検討しデータ整理する必要がある。また、RHA コンクリート中の単位粉体置換量 100kg/m^3 以上の範囲では無混入のコンクリートと比較して、2 倍以上の練混ぜ時間が必要となり練混ぜ効率が著しく低下することが認められた。すなわち、練混ぜ効率に支配的な影響を及ぼさない範囲での単位粉体量の適正混入量は $25\sim 80\text{kg/m}^3$ の範囲 (R10 および R20 シリーズ相当) にあることが実験より明らかとなった。

図 3-4 より、単位粉体置換量 105kg/m^3 、高性能 AE 減水剤添加量 2.80kg/m^3 一律の配合 (No.9~11) において、相関係数 $R^2=0.9908$ との試験結果から、RHA コンクリートのスランプと単位水量には高い相関関係があることが認められた。すなわち、スランプを調整するには、化学混和剤ではなく単位水量で制御することが効果的であることが明らかとなった。最大で単位水量は 280kg/m^3 まで設定したが、材料分離はなくブリーディングも認められなかった。

図 3-5 より、RHA コンクリートは無混入のコンクリートと比較して単位水量が少ないと

練混ぜ時間が増加する傾向にある。これは珪砂灰に対する濡れ性⁷⁾の影響が関係すると考える。すなわち、単位水量を少なくすることで、モルタルの粘性が増加することから、RHAコンクリートの濡れ性が低下し、結果的に練混ぜ時間が増加したと考えられる。また、単位珪砂灰量 175kg/m³、117kg/m³の結果から、単位珪砂灰量 105kg/m³を使用した配合 (No.3、9、10、11、13) の場合、単位水量と練混ぜ時間に負の相関(R²=0.8521) があることが認められた。したがって、設定した単位水量に応じて適宜練混ぜ時間を調整する必要があることが確認された。ただし、設定した単位水量を踏まえた最適な練混ぜ時間は、今回の試験から把握できなかった。

(b)硬化性状

表 3-3 にシリーズ A の硬化性状試験結果を示す。図 3-6、図 3-7、図 3-8 にシリーズ A の材齢 28、91、182、365 日での圧縮強度、静弾性係数および、材齢 28 日に対する各材齢の圧縮強度比を示す。

表 3-3 硬化性状試験結果一覧(珪砂灰をセメントの内割置換した配合)

No.	種別	圧縮強度(N/mm ²)					静弾性係数(KN/mm ²)					26週時点の長さ変化率(μ)	相対動弾性係数(300サイクル時)(%)
		材齢7日	材齢28日	材齢91日	材齢182日	材齢365日	材齢7日	材齢28日	材齢91日	材齢182日	材齢365日		
1	Base-50-A0 ⁴⁾	-	47.1	-	-	-	-	34.5	-	-	-	550	-
2	R10-50-A0 ⁴⁾	-	45.0	-	-	-	-	31.6	-	-	-	562	-
3	R30-50-A0 ⁴⁾	-	37.3	-	-	-	-	28.9	-	-	-	525	-
4	Base-50-A02 ⁴⁾	-	44.0	52.7	-	-	-	34.4	34.0	-	-	629	-
5	R30-50-A02 ⁴⁾	-	41.5	53.5	-	-	-	28.4	32.8	-	-	653	80
6	Base-50-A	-	36.9	44.8	47.1	-	-	33.8	37.0	37.6	-	701	93
7	R10-50-A	-	41.9	49.5	51.4	-	-	31.1	34.8	36.8	-	749	90
8	R20-50-A1	-	42.7	53.6	55.8	-	-	31.0	34.2	36.2	-	774	82
9	R30-80-A	-	11.3	-	-	-	-	14.5	-	-	-	-	-
10	R30-70-A	-	18.0	-	-	-	-	20.0	-	-	-	-	-
11	R30-60-A	-	25.4	-	-	-	-	24.8	-	-	-	-	-
12	R50-80-A	-	10.7	25.4	-	-	-	14.2	24.4	-	-	-	-
13	R30-60-A	-	26.2	35.0	40.8	49.6	-	24.9	27.8	31.4	32.5	791	81
14	R20-60-A	-	29.7	37.5	39.6	42.1	-	27.2	30.8	32.0	33.2	827	84
15	R20-55-A	-	35.4	43.2	45.6	48.6	-	27.4	31.2	32.2	34.3	848	86
16	R20-50-A2	-	40.8	48.3	50.1	53.5	-	30.1	33.1	32.9	37.0	879	80

図 3-6 より、Base コンクリート (No.4) と比べ RHA コンクリート (No.5) は、セメントの内割置換のため材齢 28 日の強度は低いですが、材齢 91 日の強度では同等以上になることが明らかとなった。また、単位水量 195kg/m³、水粉体比 50%の配合 (No.6~8) について、Base

コンクリート (No.6) と比べ RHA コンクリート (No.7, 8) は、空気量が 0.4~2.0%高い結果にも関わらず強度発現性が大きく、単位珪砂灰量が増加することで強度も高くなることが確認された。すなわち、強度発現の観点から、単位珪砂灰量はセメントの代替材料として有効であることが認められた。

図 3-7 より、静弾性係数も圧縮強度と同様に材齢とともに高くなることが確認された。図 3-8 より、RHA コンクリート、Base コンクリートともに、材齢 28 日以降の強度増進が確認できる。特に、材齢 28 日から 91 日にかけて、単位水量と単位珪砂灰量が他の配合と比べて比較的多い配合 No.12 および No.13 の伸びが大きい。また、単位水量 195kg/m³、水粉体比 60、55、50%の配合 (No.14~16) について、図 3-6 より、圧縮強度は水粉体比が小さいほど強度発現は大きくなるが、図 3-7 より、材齢 28 日以降の強度増進は逆の傾向となる。すなわち、RHA コンクリートのポズラン反応の活性度に着目すると、単位水量と単位珪砂灰量を増加させることでその効果が発揮され、多孔質な珪砂灰が練混ぜ水を取込み、保水することで内部水中養生効果が生まれ、長期強度発現に繋がったと考えられる。ただし、単位水量 195kg/m³、水粉体比 50%の配合 (No.6~8) について、Base コンクリート (No.6) と RHA コンクリート (No.7, 8) の強度増進はほぼ同等となり、RHA コンクリートのポズラン反応による優位性が確認されず、ポズラン反応が活性化する最適な単位水量と単位珪

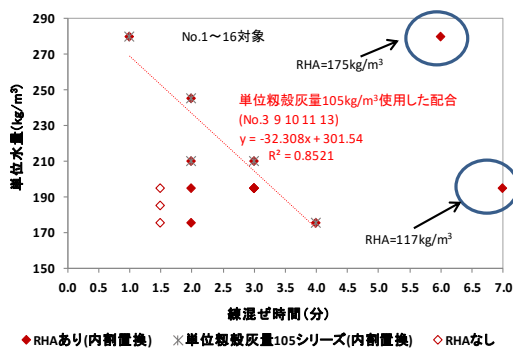


図 3-5 練混ぜ時間と単位水量の関係

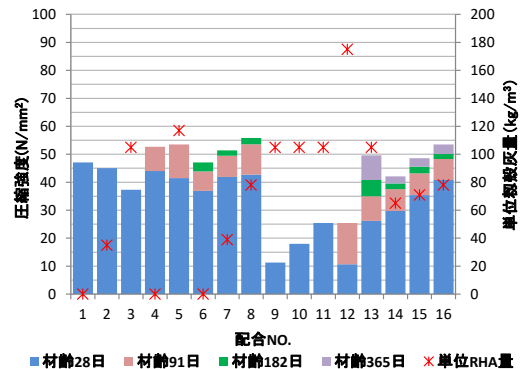


図 3-6 各配合における圧縮強度試験結果

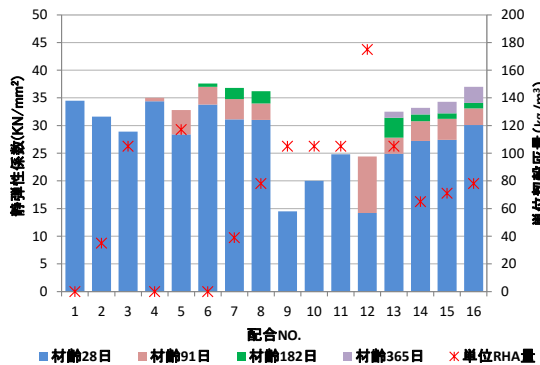


図 3-7 各配合における静弾性係数試験結果

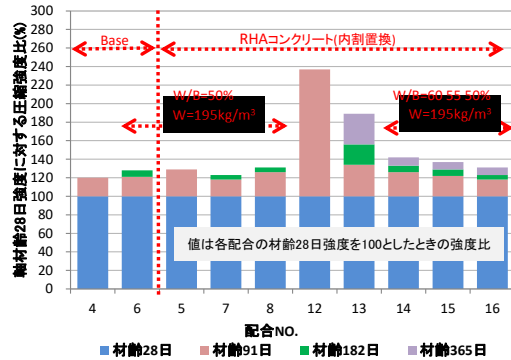


図 3-8 材齢 28 日に対する圧縮強度比の関係

殻灰量は、今回の実験からは把握できなかった。図 3-9 に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中に示す示方書⁶⁾の関係と比較すると、いずれの結果も強度と弾性係数の相関性は高いことが認められた。ただし、RHA コンクリートは普通コンクリートより低い結果となった。図 3-10 に、単位粗骨材量と 26 週時点の長さ変化率の関係を示す。一般に、コンクリートは 1m³ 中の単位粗骨材量が多くなるとコンクリート中のモルタルを拘束するため乾燥収縮は小さくなる傾向にある。今回の RHA コンクリートも普通コンクリート同様に単位粗骨材量が増加することにより乾燥収縮が抑制されることが認められた。すなわち、RHA コンクリートの乾燥収縮を抑制するには、一般的なコンクリートと同様に、フレッシュ性状に影響のない範囲で単位粗骨材量を増やすことが有効であることが明らかとなった。

図 3-11 に、単位殻灰量と 26 週時点の長さ変化率の関係を、図 3-12 に、質量減少率と 26 週時点の長さ変化率の関係を示す。図 3-11 より、全体的にデータのばらつきがおおきく、単位殻灰量と 26 週時点の長さ変化率に明確な相関関係はみられなかった。ただし、単位水量が増加するごとに乾燥収縮ひずみも大きくなる傾向にあることが読み取れることから、単位殻灰量の影響よりも単位水量による影響が支配的であることが認められた。図 3-12 より、RHA コンクリートと無混入のコンクリートを比較すると、RHA コンクリートの質量減少率が無混入のコンクリートと比較して大きいことが明らかとなった。これは、RHA コ

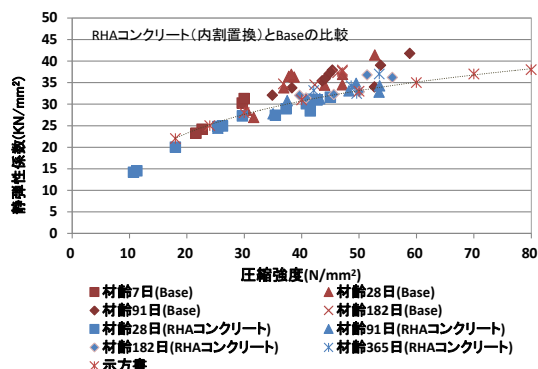


図 3-9 圧縮強度と静弾性係数の関係

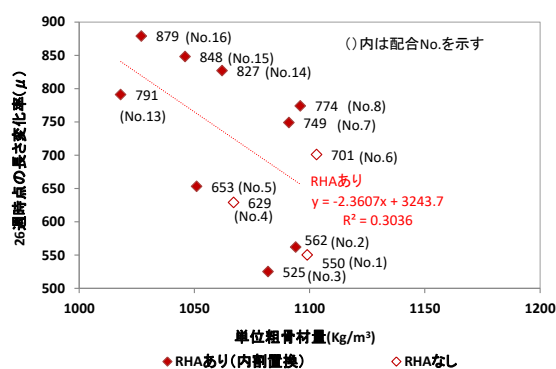


図 3-10 単位粗骨材量と 26 週時点の長さ変化率の関係

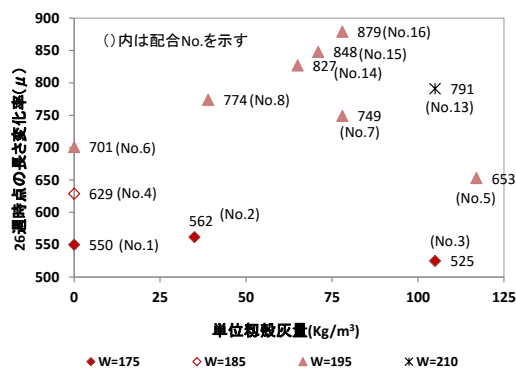


図 3-11 単位殻灰量と 26 週時点の長さ変化率の関係

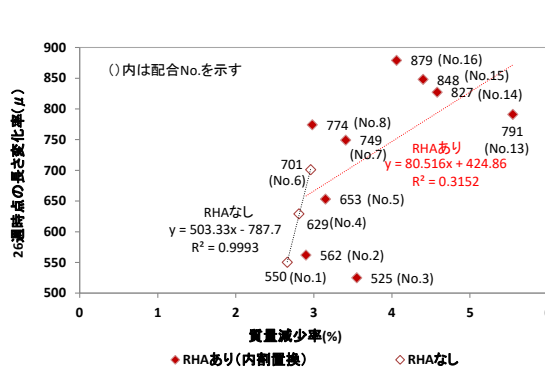


図 3-12 質量減少率と 26 週時点の長さ変化率の関係

ンクリートの単位水量が無混入コンクリートより大きく設定されていることや、珪殻灰が練混ぜ水を保水するため、水分蒸発する期間が無混入のコンクリートと比べて相対的に長くなることで、最終的に水分蒸発量が大きくなると考えられる。ただし、無混入コンクリートの相関係数が $R^2=0.9993$ と高いのに対して、 $R^2=0.3152$ と相関が低いことから、RHA コンクリートの乾燥収縮は水分蒸発以外の要因で引き起こされる可能性がある。また、珪殻灰が多孔質であり、比表面積が大きいことにより、珪殻灰自体が吸着していた水分の蒸発も生じていると考えられる。

図 3-10、図 3-11、図 3-12 より、示方書³⁾に記載されている乾燥収縮率の上限値を満足することから、珪殻灰を混入した場合の乾燥収縮性状については、特に、単位粗骨材量および単位水量をパラメータとして制御することで有効利用上の問題はないと言える。

図 3-13 に、空気量と 300 サイクル時点の相対動弾性係数の関係を示す。一般に、コンクリートは 1m^3 中の空気量が多くなるとコンクリート中にかかる内部膨張圧が緩和されるため耐凍害性は向上する傾向にある。今回の RHA コンクリートも普通コンクリート同様に空気量が増加することにより相対動弾性係数も高い値を示すことが認められた。すなわち、RHA コンクリートにおいても空気量と相対動弾性係数は高い相関関係 ($R^2=0.8856$) にあり、耐凍害性を確保するためには空気量を増やすことが有効であることが明らかとなった。また、同一空気量の場合、RHA なしの値に比べて RHA ありの値が低い傾向を示すのは、試験開始材齢時の強度差に起因していると考えられる。すなわち、本試験は JIS に準拠した試験条件で実施したため、十分なポゾラン反応による長中期の活性化が進んでいない状況での比較試験であることが一要因と考えられる。よって、図 3-13 より、連行空気量を 2%程度増やすことで耐凍害性は改善されると言える。図 3-14 に、単位珪殻灰量と 300 サイクル時点の相対動弾性係数の関係を示す。珪殻灰混入による内部膨張圧の緩和を期待したが、図 3-14 から単位珪殻灰量が増加するにしたがって相対動弾性係数が漸減することが認められた。原因として、珪殻灰置換による単位セメント量の減少も一因に挙げられるが、図 3-6 の圧縮強度試験結果では説明できない。ところで、凍結融解作用の供試体については、既往の研究^{8, 9)}より、凍結融解の繰返しにおいて、凍結過程の水の押し込みと融解過程の水の吸込みに

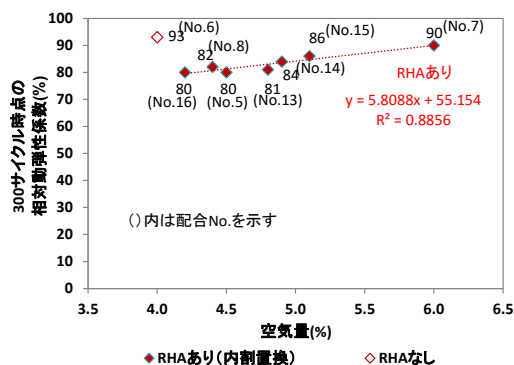


図 3-13 空気量と 300 サイクル時相対動弾性係数の関係

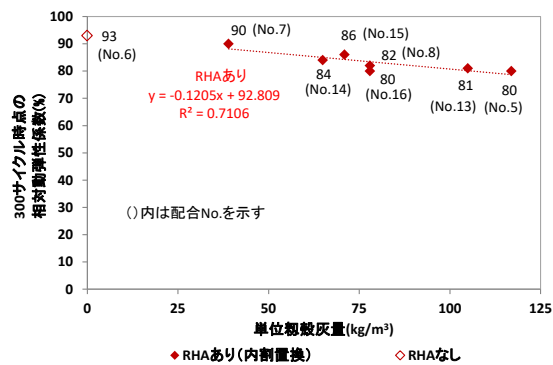


図 3-14 単位珪殻灰量と 300 サイクル時相対動弾性係数の関係

より、常温では吸水されない量の水がコンクリート中に供給されることが報告されている。シリーズ A では、セメントの内割で粉砕灰を使用しているため、単位粉砕灰量が増加することで相対的に単位セメント量は減少するが、粉体全体の比表面積は大きくなるため、水分を多く保有（吸着）しやすい構造となり、コンクリート内部の含水能力が大きくなると考えられる。その結果、凍結融解作用下では内部構造が緩み相対動弾性係数が漸減したと考えられる。つまり、粉砕灰が多孔質であることによる内部膨張圧の緩和よりも、コンクリート内部含水能力増加による内部組織の緩和の方が支配的となったと考えられる。

図 3-13、図 3-14 より 300 サイクル終了時点で相対動弾性係数が 60%以上を保っていることから、有効利用上の耐凍害性の問題はないと言える。また、粉砕灰をセメントの内割置換で結合材として使用する場合には、置換率の設定においては目標空気量を高めに設定することを検討する必要があると言える。

3.4.2 混和材として粉砕灰を利用したコンクリートの特性

(a)フレッシュ性状

表 3-4 にシリーズ B のフレッシュ性状試験結果を、図 3-15、図 3-16 に、それぞれ Non-AE コンクリート (No.17~25) における高性能 AE 減水剤添加量とスランプの関係、単位粉砕灰量とスランプの関係を示す。内割置換で用いた場合と同じく RHA コンクリートは無混入のコンクリートと比較して同等以上のスランプを得るためには、高性能 AE 減水剤の添加量が極めて多くなり、粉砕灰置換量が多くなるとスランプは低下することが明らかとなった。すなわち、粉砕灰を混和材と位置付け細骨材と置換すると、コンクリートの系全体の粉体の比表面積が大きくなることで、比表面積あたりに作用する混和剤の吸着が相対的に少なくなり、十分に分散効果が得られなかったことが考えられる。また、コンクリートに占める総粉体量が増えることで粘性が増加し、適度な流動性、つまり、施工可能なスランプを得るためには、化学混和剤の使用量を増加させる必要があるが、Non-AE コンクリートであることから空気量が少ないことも化学混和剤使用量が增大した要因の 1 つと考えられる。

図 3-17、図 3-18 に、AE コンクリート (No.26~38) における高性能 AE 減水剤添加量とスランプの関係、単位粉砕灰量とスランプの関係を示す。Non-AE コンクリートのフレッシュ性状と同様に RHA コンクリートは無混入のコンクリートと比較してほぼ同等のスランプを得るためには、高性能 AE 減水剤の添加量が多くなる傾向ではあるが、空気を連行させることで高性能 AE 減水剤添加量が $3.4\sim 8.4\text{kg/m}^3$ 程度に収まり、Non-AE コンクリートの RHA コンクリートよりも少ない高性能 AE 減水剤の添加量で無混入のコンクリートとほぼ同等のスランプを得た。すなわち、空気を連行させることによる AE 剤の作用（ボールベアリング効果）によって流動性が改善されたと考えられる。

図 3-19 に、AE コンクリートにおける練混ぜ時間と単位粉砕灰量の関係を示す。RHA コンクリートの相関係数が $R^2=0.6364$ と比較的高いことから、単位粉砕灰量を増加させた場合には練混ぜ時間を長く調整することで所定のフレッシュ性状を得る目安となることが認められた。

表 3-4 配合表およびフレッシュ試験結果一覧(珪殻灰をセメントの外割置換した配合)

No.	種別	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					化学混和剤		スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	練上がり温度 (°C)	練混ぜ時間 (分)
					水 W	セメント C	珪殻灰 RHA	細骨材 S	粗骨材 G	SP (kg/m ³)	AE (B×%)					
17	Base-60-B0 ⁶⁾	60	-	44.6	175	292	0	811	1074	3.21	-	14.5	1.3	2.24	17.5	1.5
18	50R-60-B0 ⁶⁾	60	-	43.0	175	292	50	758	1074	13.68	-	22.5	0.4	2.25	19.0	3.0
19	100R-60-B0 ⁶⁾	60	-	41.2	175	292	100	706	1074	15.68	-	20.5	0.1	2.23	19.0	3.0
20	Base-55-B0 ⁶⁾	55	-	43.6	175	318	0	783	1080	3.50	-	14.5	1.7	2.25	17.5	1.5
21	50R-55-B0 ⁶⁾	55	-	41.9	175	318	50	730	1080	14.72	-	22.0	0.5	2.23	17.0	3.0
22	100R-55-B0 ⁶⁾	55	-	40.0	175	318	100	677	1080	16.72	-	19.0	0.2	2.25	20.5	3.0
23	Base-50-B0 ⁶⁾	50	-	42.6	175	350	0	754	1084	3.85	-	13.0	1.4	2.27	18.0	1.5
24	50R-50-B0 ⁶⁾	50	-	40.8	175	350	50	701	1084	16.00	-	23.0	0.7	2.25	16.0	3.0
25	100R-50-B0 ⁶⁾	50	-	38.9	175	350	100	647	1084	18.00	-	19.5	1.5	2.24	18.0	3.0
26	Base-50-B00-2 ⁷⁾	50	-	39.6	175	350	0	708	1099	1.40	0.035	8.0	4.8	-	-	2.0
27	50R-50-B00 ⁷⁾	50	-	37.8	175	350	50	652	1099	4.00	0.10	7.0	6.0	-	-	2.0
28	75R-50-B00 ⁷⁾	50	-	36.8	175	350	75	625	1099	6.38	0.35	8.0	5.1	-	-	4.0
29	Base-60-B00 ⁷⁾	60	-	39.6	175	292	0	727	1130	1.17	0.035	8.5	4.0	-	-	2.0
30	50R-60-B00 ⁷⁾	60	-	37.8	175	292	50	672	1130	3.42	0.07	6.0	4.2	-	-	2.0
31	75R-60-B00-2 ⁷⁾	60	-	36.7	175	292	75	644	1130	5.51	0.105	7.0	5.1	-	-	2.0
32	100R-60-B00 ⁷⁾	60	-	35.7	175	292	100	616	1132	7.84	0.14	6.5	4.0	-	-	4.0
33	Base-50-B	50	-	39.6	175	350	0	708	1099	1.40	0.035	8.0	4.8	-	-	2.0
34	50R-50-B	50	-	37.8	175	350	50	652	1099	4.00	0.05	7.0	5.0	-	-	2.0
35	75R-50-B	50	-	36.8	175	350	75	625	1099	6.38	0.35	8.0	5.1	-	-	4.0
36	Base-60-B	60	-	39.5	175	292	0	725	1132	2.04	0.025	12.0	5.4	2.315	23.2	1.5
37	50R-60-B	60	-	37.6	175	292	50	669	1132	5.13	0.04	8.5	5.8	2.282	23.8	1.5
38	75R-60-B	60	-	36.6	175	292	75	642	1132	8.44	0.05	8.0	5.9	2.267	23.8	3.0

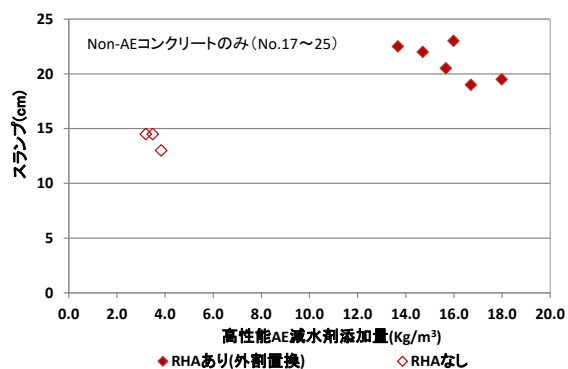


図 3-15 高性能 AE 減水剤とスランプの関係

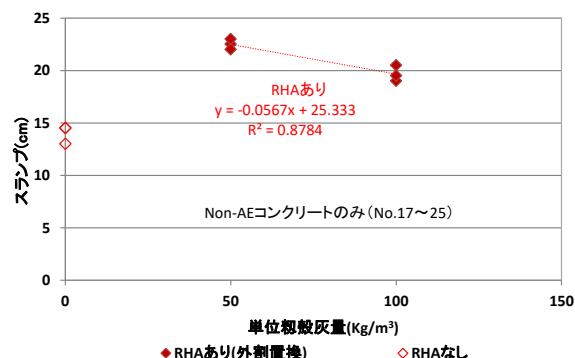


図 3-16 単位珪殻灰量とスランプの関係

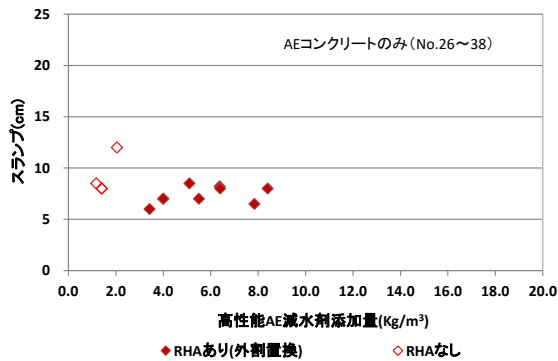


図 3-17 高性能 AE 減水剤とスランプの関係

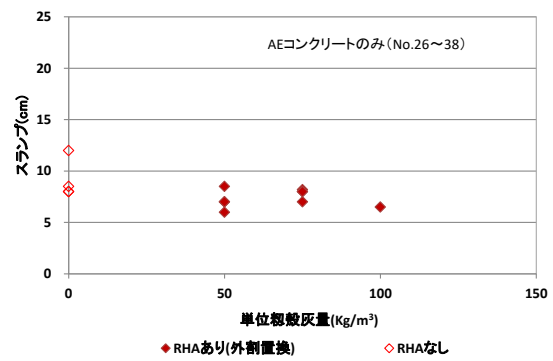


図 3-18 単位粉殻灰量とスランプの関係

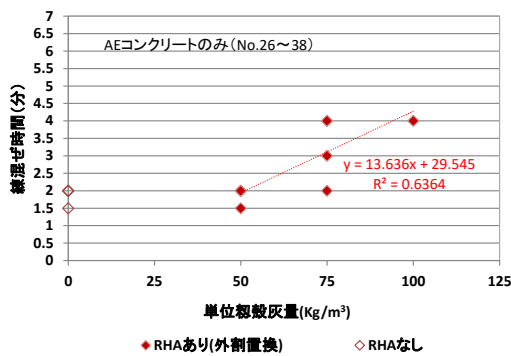


図 3-19 単位粉殻灰量と練混ぜ時間の関係

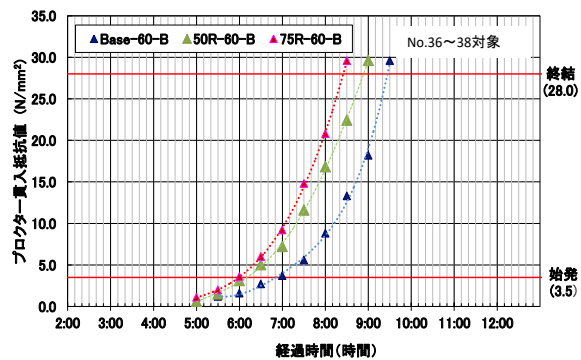


図 3-20 単位粉殻灰量と凝結時間の関係

図 3-20 に、凝結試験結果 (No.36~38) を示す。粉殻灰混入量が多いほど始発、終結ともに早くなる結果となった。これはコンクリートに占める総粉体量が増え、粉体の総比表面積が増大することにより練混ぜ水と接する面積が多くなり、反応初期段階において粉殻灰に水分が吸着され、流動性の低下と見かけの水セメント比の低下が生じその影響が凝結時間の差になったと考えられる。後述する図 3-22 の結果から粉殻灰の混入による強度増進は明らかであり、凝結時間にも影響を与えていると思われるが、今回の試験結果からは粉殻灰の混入が初期の水和反応促進に直接関与したことを示すデータはなく、明らかにできなかった。また、一般的に高性能 AE 減水剤が増えると凝結は遅延するが、今回の試験からは確認されなかった。高性能 AE 減水剤を多量に使うことによる悪影響は少なく鈍感に作用することが確認された。

図 3-21 に、ブリーディング試験結果 (No.36~38) を示す。粉殻灰混入量が多いほどブリーディングが抑制されることが確認された。これは、1つの要因として粉殻灰が練混ぜ水を保水するためと考えられるが、今回の試験からは粉体量が増加したことによるものなのか、それとも粉殻灰の混入量が多くなることによる特有の効果 (保水効果) なのかは判別できなかった。また 75R-60-B (No.38) の配合ではブリーディング量は 0 との結果となったが、目視による試験体上面の乾燥はなくプラスチック収縮ひび割れの発生について懸念されることはないと判断した。

(b)硬化性状

表 3-5 にシリーズ B の硬化性状試験結果を示す。図 3-22、図 3-23 に、シリーズ B の材齢 7、28、91、182 日での圧縮強度および静弾性係数を、図 3-24 に、材齢 28 日に対する各材齢の圧縮強度比を示す。

図 3-22、図 3-23 から、圧縮強度試験結果および静弾性係数について、RHA コンクリートは材齢とともに強度、静弾性係数ともに増加する傾向にあり、粉殻灰を混入する量が多いほど高い強度が得られることが明らかとなった。粉殻灰が無混入または 50kg/m³ 混入した配合、Non-AE コンクリート (No.17~25) では No.17、18、20、21、23、24、AE コンクリート (No.26~38) では No.26、27、29、30、33、34、36、37 に着目すると、材齢 7 日から 28 日にかけての強度発現にはばらつきが生じているが、75~100kg/m³ 混入した配合、Non-AE コンクリート (No.17~25) では No.19、22、25、AE コンクリート (No.26~38) では No.28、31、32、35、38 に着目すると、強度発現の伸びが安定して大きいことが明らかとなった。

表 3-5 硬化性状試験結果一覧(粉殻灰をセメントの外割置換した配合)

No.	種別	圧縮強度(N/mm ²)					静弾性係数(KN/mm ²)					26週時点の長さ変化率(μ)	相対動弾性係数(300サイクル時)(%)
		材齢7日	材齢28日	材齢91日	材齢182日	材齢365日	材齢7日	材齢28日	材齢91日	材齢182日	材齢365日		
17	Base-60-B0 ⁶⁾	29.5	38.7	45.4	-	-	-	36.3	37.9	-	-	-	-
18	50R-60-B0 ⁶⁾	39.0	56.1	63.3	-	-	-	38.1	40.3	-	-	-	-
19	100R-60-B0 ⁶⁾	40.4	59.4	72.0	-	-	-	37.3	40.9	-	-	-	-
20	Base-55-B0 ⁶⁾	34.4	47.1	53.7	-	-	-	36.9	39.0	-	-	-	-
21	50R-55-B0 ⁶⁾	36.9	43.5	56.3	-	-	-	31.9	40.3	-	-	-	-
22	100R-55-B0 ⁶⁾	44.8	65.1	76.0	-	-	-	38.0	39.3	-	-	-	-
23	Base-50-B0 ⁶⁾	41.5	52.8	58.9	-	-	-	41.4	41.8	-	-	-	-
24	50R-50-B0 ⁶⁾	39.1	52.9	58.8	-	-	-	38.3	36.9	-	-	-	-
25	100R-50-B0 ⁶⁾	51.1	69.9	82.0	-	-	-	38.9	41.6	-	-	-	-
26	Base-50-B00-2 ⁷⁾	29.6	37.8	43.6	46.3	-	30.3	36.4	35.4	37.3	-	-	-
27	50R-50-B00 ⁷⁾	35.2	42.6	53.9	59.4	-	30.4	33.1	36.5	37.4	-	-	-
28	75R-50-B00 ⁷⁾	37.1	48.3	56.5	62.1	-	29.0	35.1	37.7	37.8	-	-	-
29	Base-60-B00 ⁷⁾	22.7	30.4	34.9	36.8	-	24.2	28.6	32.1	34.7	-	-	-
30	50R-60-B00 ⁷⁾	25.4	34.5	44.3	47.6	-	26.4	31.4	35.4	39.0	-	-	-
31	75R-60-B00-2 ⁷⁾	27.5	39.9	46.6	50.7	-	23.5	32.4	34.4	41.3	-	-	-
32	100R-60-B00 ⁷⁾	29.7	46.8	52.0	58.6	-	28.7	33.0	35.7	39.3	-	-	-
33	Base-50-B	30.0	38.2	44.1	47.1	-	31.3	36.9	35.9	37.9	-	788	81
34	50R-50-B	37.2	44.6	55.9	61.4	-	31.4	34.1	37.5	38.4	-	768	93
35	75R-50-B	38.1	49.3	57.5	63.1	-	29.5	34.1	36.1	37.1	-	725	94
36	Base-60-B	21.6	31.6	38.3	42.3	-	23.3	26.9	33.8	34.5	-	818	64
37	50R-60-B	25.4	37.8	48.9	54.3	-	25.6	31.4	34.1	37.9	-	808	92
38	75R-60-B	25.9	38.8	49.0	58.5	-	22.5	33.4	34.5	38.0	-	759	91

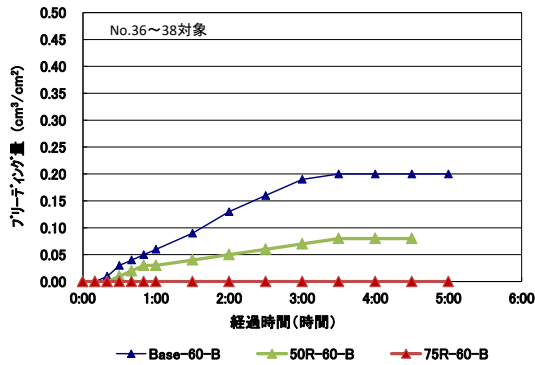


図 3-21 単位珪砂灰量とブリーディング量の関係

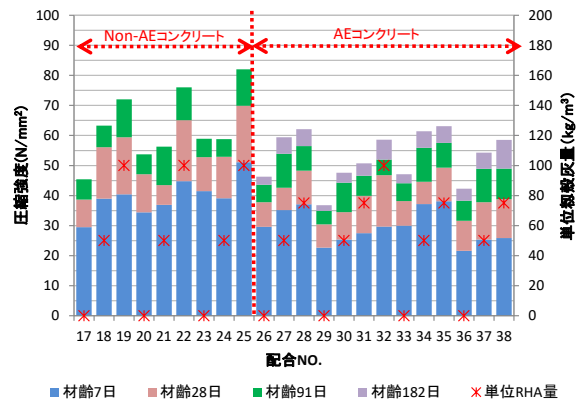


図 3-22 各配合における圧縮強度試験結果

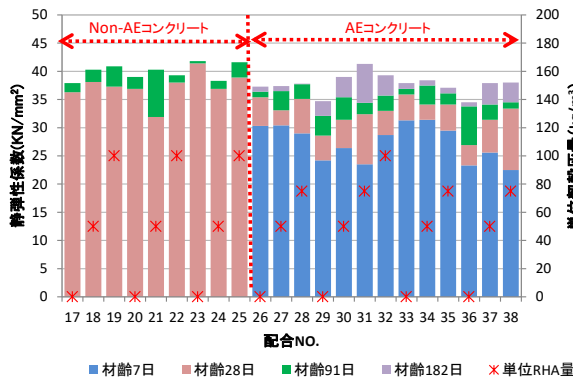


図 3-23 各配合における静弾性係数試験結果

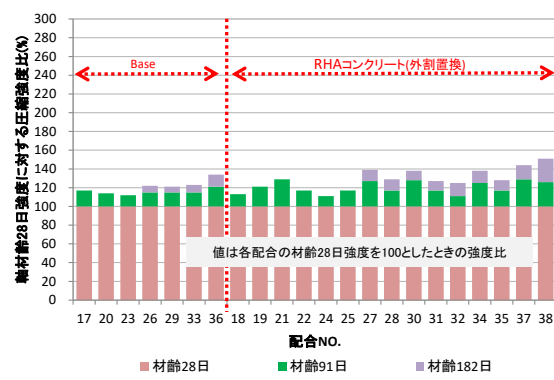


図 3-24 材齢 28 日に対する圧縮強度比の関係

図 3-24 より、外割置換した配合においても、RHA コンクリートは、Base コンクリートと同様に、材齢 28 日以降の強度増進が確認できる。また、材齢 182 日までの強度試験を実施した AE コンクリートに着目すると、Base コンクリート (No.26、29、33、36) を除いて、材齢 28 日に対する材齢 182 日の強度比が 120%程度 (No.36 は 135%程度) に対して、RHA コンクリート (No.27~38) は 120~150%程度と Base コンクリート (No.26、29、33、36) と比べて、最大で 1.25 倍程度の強度比になることから、長期強度発現性にも優れていることが認められた。すなわち、長期的にポズラン反応が発揮され、コンクリート内部組織が緻密になることで長期強度増進に繋がるということが明らかとなった。

図 3-25 に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図 3-25 中に示す示方書⁶⁾の関係と比較すると、いずれの結果も強度と弾性係数の相関性は高いことが明らかとなった。図 3-9 と比較して強度、弾性係数ともに高い値を示していることから、珪砂灰は内割 (シリーズ A) で使用するよりも、外割 (シリーズ B) で使用することで効果的に強度および弾性係数に寄与すると考えられる。

図 3-26 に、単位珪砂灰量と圧縮強度の関係 (No.33~35) を、図 3-27 に、単位珪砂灰量と圧縮強度の関係 (No.36~38) を示す。単位珪砂灰量と圧縮強度は極めて高い相関関係が

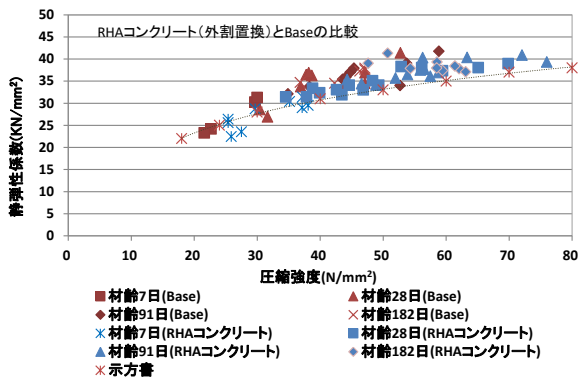


図 3-25 圧縮強度と静弾性係数の関係

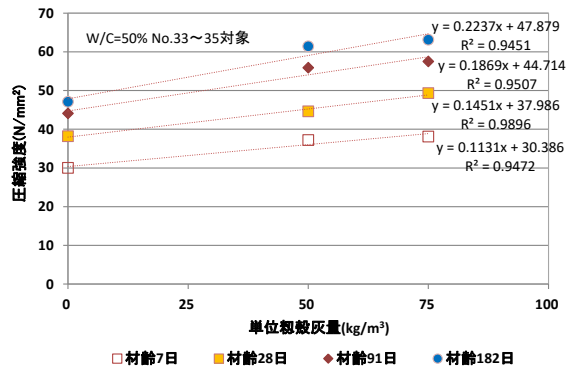


図 3-26 単位珪灰量と圧縮強度の関係 (No.33~35)

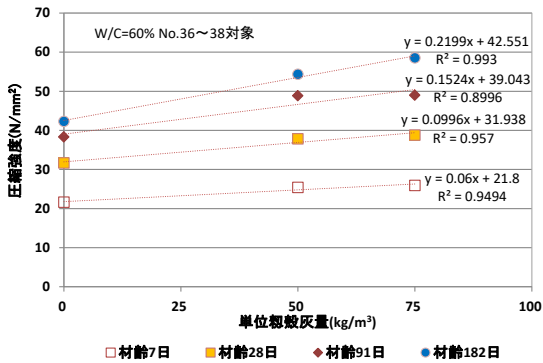


図 3-27 単位珪灰量と圧縮強度の関係 (No.36~38)

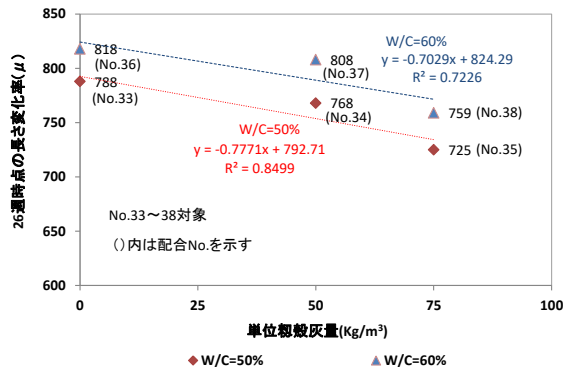


図 3-28 単位珪灰量と 26 週時点の長さ変化率の関係

あることが明らかとなった。また、図 3-26、図 3-27 に示した回帰式の傾きが材齢ごとに大きくなっていることから、配合 No.33~38 中の RHA コンクリートは長期強度発現性が良好であることが明らかとなった。

図 3-28 に、単位珪灰量と 26 週時点の長さ変化率の関係を示す。(No.33~38) 一般に水セメント比 (以下 W/C と表記) が大きいと乾燥収縮が大きくなる傾向にある。RHA コンクリートも同様に W/C が高いと乾燥収縮がおおきくなることが図中から読み取れる。珪灰の混入量に着目すると 50 kg/m³ 混入した RHA コンクリートよりも 75 kg/m³ 混入した RHA コンクリートの方が W/C=50%、60%の両ケースともに乾燥収縮が小さくなることが認められた。これは、上述した強度試験の結果からも 75 kg/m³ 混入した RHA コンクリートは、50kg/m³ 混入した RHA コンクリートと比較して強度増進が大きく、コンクリートの内部組織が緻密化したことで、乾燥収縮の影響を受けにくくなったと考えられる。ただし、75 kg/m³ の珪灰混入量が乾燥収縮抑制に寄与する最適な混入量であるかどうかは今回の試験結果のみからは判断できない。

図 3-29 に、空気量と相対動弾性係数の関係を示す。相対動弾性係数が 90%以上であるこ

とから外割置換による RHA コンクリートは高い耐凍害性を有することが確認された。内割配合による RHA コンクリートの凍結融解試験結果（図 3-13）と比較して良好な結果となった要因として、単位水量が少ないことや、空気量が若干多めであることが考えられるが、今後さらなるデータの蓄積と考察が必要である。

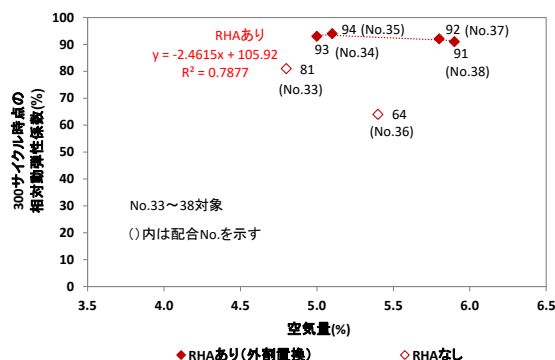


図 3-29 空気量と 300 サイクル時相対動弾性係数の関係

3.5 まとめ

以下に、本章で明らかとなったことを示す。

(1) 粉砕灰を結合材として利用する場合には、単位水量を $20 \sim 70 \text{kg/m}^3$ 増加させることでスランプ制御が容易となり、適正な混入量は $25 \sim 80 \text{kg/m}^3$ の範囲内にあることが明らかとなった。また乾燥収縮を抑制するには単位粗骨材量を増加させること、耐凍害性を向上させるには空気量を多く設定することで効果的な利用となるが明らかとなった。

(2) 粉砕灰を混和材として利用する場合には、単位水量 175kg/m^3 、水セメント比 60% の配合において、粉砕灰を $50 \sim 75 \text{kg/m}^3$ 混入することで、無混入と比べ凝結時間の短縮、ブリーディング量の低減、圧縮強度との高い相関、高い耐凍害性を示し、コンクリートの性能向上が図られることが明らかとなった。

(3) 粉砕灰を結合材として利用する場合は、混和材として利用する場合と比較して、コンクリート標準示方書の推奨値よりも 20kg/m^3 程度多くの単位水量を必要とし、単位水量の増加にともない単位セメント量も多く必要とする不経済な配合となるため、混和材として利用することが望ましいことが明らかとなった。

粉砕灰の適切な利用形態と今後の展望として、粉砕処理を施さない粉砕灰混入コンクリートのフレッシュ性状を確保するには、化学混和剤量、細骨材率、練混ぜ方法を適宜調整することよりも単位水量を増やすことが効果的であることが明らかとなった。その際に懸念される、乾燥収縮や耐凍害性においては、 20kg/m^3 程度の単位水量増加では問題ないこともわかった。ただし、粉砕灰を結合材として使用した配合は、混和材として使用した配合と比較して、単位水量の増加にともない単位セメント量も多く必要とする配合となる。

今回設定した配合での結果に大きな不具合は見られなかったが、粉砕灰の置換率によっては、フレッシュ性状および硬化物性の制御が困難な場合も考えられる。配合条件は限定されるが混和材として使用した場合、高い耐凍害性を得ていること、示方書に準拠した単位水量の上限値で施工可能であることを考慮すると、本研究で用いた粉砕処理を施していない粉砕灰の有効利用は、混和材として使用することが望ましいと言える。

3.6 参考文献

- 1) 梶原教裕ほか：火力発電所から排出される粉砕灰を用いたコンクリートの配合設計に関する研究、セメントコンクリート論文集 No.63、pp.554-561、2009
- 2) 梶原教裕ほか：粉砕を燃料とした火力発電所から排出される粉砕処理を施さない粉砕灰を混入したコンクリートの耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、pp.1558-1563、2012
- 3) コンクリート標準示方書、施工編 2007 年制定
- 4) 梶原教裕：火力発電所より排出される粉砕灰の有効利用に関する基礎的研究、セメントコンクリート論文集 No.61、pp.565-571、2007
- 5) 梶原教裕ほか：火力発電所より排出される粉砕灰の有効利用に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、pp.1873-1878、2009
- 6) コンクリート標準示方書、構造性能照査編 2002 年制定、pp.28-29
- 7) 公益社団法人精密工学会、ホームページ
- 8) 木村信孝ほか：暴露条件・粗骨材種別が高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、pp.745-750、2005
- 9) 青野義道ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼすマイクロクラックの影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、pp.1117-1122、2005

第4章 粉殻灰混入コンクリートの養生条件が強度特性に与える影響の把握およびRC梁部材へ適用した際の破壊挙動

4.1 実験概要

第3章にて、粉殻灰混入コンクリート(以下 RHA コンクリートと表記)の特性およびその適切な利用形態について検討した。その結果、第3章で設定した配合条件において、細骨材と置換する混和材料として有効利用した場合、高い耐凍害性を有すること、示方書に準拠した単位水量の上限値で施工可能であることから、本論文で用いた粉殻灰の最適な利用形態は、混和材料として使用することが望ましいことを明らかにした。

ところで、第3章にて RHA コンクリートのフレッシュ性状は、無混入のコンクリート(以下 Base コンクリートと表記)と比較して、粘性が高くなり流動性が低下することが確認された。その要因の1つに、RHA コンクリートの内部で粉殻灰が練混ぜ水を拘束(保水)することで流動性が低下した可能性が考えられる。

そこで、本章では異なる養生条件下(水中養生および気中養生)の強度発現性を比較し、RHA コンクリートの練混ぜ水を粉殻灰が拘束(保水)することの妥当性を検証した。すなわち、粉殻灰が練混ぜ水を拘束(保水)するのであれば、脱型後の RHA コンクリート供試体内部において、練混ぜ水が粉殻灰に拘束され、保水効果が一定期間持続されることが予測される。つまり、気中養生条件下においても RHA コンクリート内部の粉殻灰に拘束されている練混ぜ水の給水効果により、水中養生と同程度の強度発現性が期待される。

そこで、養生方法の違い(水中養生および気中養生)が強度特性に与える影響について実験をもとにその有用性の検証を試みた。

さらに、RHA コンクリートの特性を生かした実用化に向けた用途開発への適用の観点から、混和材料として粉殻灰を用いた RC 梁部材の破壊挙動を実験に基づき検討した。

4.2 養生条件の違いが粉殻灰を混入したコンクリートの強度特性に与える影響

4.2.1 実験概要

前述したように、養生方法の違い(水中養生および気中養生)が強度特性に与える影響について実験をもとに検証を試みた。また、第3章で明らかにされていない RHA コンクリートの翌日脱型強度(化学混和剤使用量増加に伴う凝結遅延の影響の把握)および促進中性化試験の中性化深さの把握に加えて、乾燥収縮、耐凍害性を改めて検討し、その再現性および妥当性について確認した。

4.2.2 使用材料

本章でもセメント、細骨材、粗骨材は第3章と同じ材料を使用し実験した。

4.2.3 試験配合

配合表を表4-1に示す。試験配合の単位水量を 175kg/m^3 、水セメントを60%の1水準とし、粉殻灰の影響を把握するため、単位粉殻灰置換量は 0 、 25 、 50 、 75kg/m^3 と、4水準設

表 4-1 配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(Kg/m ³)					計
			W	C	RHA	S	G	
Base60	60	39.5	175	292	-	729	1127	2323
25R60		38.6			25	702		2321
50R60		37.6			50	673		2317
75R60		36.6			75	646		2315

定した。また、併せて水セメント比が高い配合に懸念される長さ変化、耐凍害性、中性化の影響を改めて把握するため長さ変化率試験、凍結融解試験、促進中性化試験を実施した。

目標スランプおよび目標空気量は一般的な土木配合を想定し、12±2.5cm および 4.5±1.5% とした。

4.2.4 供試体の作製方法および養生方法

(1)練混ぜ方法

第3章と同様の手順で実施した。

(2)供試体の作製方法

所定のフレッシュ性状(目標スランプ 12±2.5cm 目標空気量 4.5±1.5%) が得られたことを確認した後、圧縮強度試験用、長さ変化率試験用、凍結融解試験用、促進中性化試験用の供試体を JIS に準拠して作製した。

(3)供試体の養生方法

本試験では養生方法の違いによる強度特性の把握を目的に、RHA コンクリートと Base コンクリートに対して、それぞれ気中養生と水中養生を実施した。養生は、脱型前材齢 1 日までは 20±2.5°C の部屋に静置して型枠養生を行い、材齢 1 日後に脱型し 20±2.5°C、60±20% の環境下にて、気中養生、水中養生を行った。ただし、翌日脱型強度用試験体(材齢 1 日強度試験体)は、注水から 24 時間後に圧縮強度試験を実施するため、強度試験直前に脱型し、3 本の試験体の 2 本目が丁度注水から 24 時間後となるように試験を実施した。また、乾燥収縮、耐凍害性、中性化の影響を把握するため長さ変化率試験、凍結融解試験、中性化試験を JIS に準拠して実施した。

4.2.5 試験項目および試験方法

(1)スランプ試験

スランプ試験は、JIS A1101-1998「コンクリートのスランプ試験方法」に基づいて行った。

(2)空気量試験

空気量試験は、JIS A1118-1997「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に基づいて行った。

(3)単位容積質量試験

単位容積質量試験は、JIS A1116-1998「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法

および空気量の質量による試験方法」に基づいて行った。

(4)ブリーディング試験

JIS A1123-2011「コンクリートのブリーディング試験方法」に準じて行った。

(5)圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づいて行った。試験材齢は水中養生、気中養生ともに材齢7日（初期強度発現性の比較）、28日（標準材齢での比較）、91日（長期強度発現性の比較）で行い、各シリーズ3本の値の平均値をそのシリーズでの圧縮強度とした。また、併せて材齢1日強度も実施した。

(6)静弾性係数試験

静弾性係数試験は、JIS A1149-2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づいて行った。試験材齢は水中養生、気中養生ともに材齢7日（初期強度発現性の比較）、28日（標準材齢での比較）、91日（長期強度発現性の比較）で行い、各シリーズ3本の値の平均値をそのシリーズでの静弾性係数とした。

(7)長さ変化率試験

長さ変化率試験は、JIS A 1129-3-2001 に基づいて行った。

(8)凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148-2001 に基づいて行った。

(9)促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153 に基づいて行った。

4.2.6 試験結果および考察

(1)フレッシュ性状

表 4-2 にフレッシュ性状試験結果を示す。Base コンクリート、RHA コンクリートともに目標スランプ、目標空気量の範囲内に収まった。第3章の RHA コンクリートと同様に、本章の RHA コンクリートにおいても Base コンクリートと比較して粘性は高い傾向にある。（単位粗骨灰量が増加するほど粘性が高いコンクリートとなり、ハンドリング低下が認められた）

しかしながら、スランプ試験終了後にタンピング試験¹⁾（表 4-3 参照。スランプ板の四隅に質量 1.2kg の棒を 500mm の高さから落下させコンクリートの変形を観察）を実施し、RHA コンクリートの変形特性を観察した所、試料全体が一体となって変形し、その後形状を保つことから十分施工可能なワーカビリティを有することが認められた。スランプ値においても目標スランプの範囲内となったことから RHA コンクリートは単位セメント量が少ない配合や粘性（材料分離抵抗性）が必要となる用途に優位にはたらく混和材料であることが明らかとなった。また、単位粗骨灰量が増加すると化学混和剤の添加量は多くなることも確認された。したがって、第3章の RHA コンクリートのフレッシュ特性と同様の傾向が確認されたことから、その再現性は妥当であるといえる。

表 4-2 フレッシュ性状試験結果

配合名	化学混和剤		スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り 温度 (°C)
	SP (B×%)	AE (B×%)			
Base60	0.30	0.010	11.0	5.4	24.0
25R60	0.45	0.013	11.5	5.3	24.5
50R60	0.60	0.018	11.5	5.6	24.5
75R60	1.20	0.020	11.5	5.8	24.5

表 4-3 タンピング試験の目視による評価

変形形態	具体的な性状
良好	十分な材料分離抵抗性を有し、タンピングの際、 試料全体が一体となって変形する。
崩壊	セメント量の少ないコンクリートは材料分離抵抗性が不十分であり、 タンピングによる衝撃を加えると、変形の過程で崩壊する。
分離	粗骨材量の多いコンクリートは材料分離抵抗性が不十分であり、 衝撃を加えると、モルタルまたはペーストのみ流動する。

図 4-1 に 珪 灰 混 入 量 と ブリーディングの関係を示す。単位量珪灰が増えるにしたがいブリーディング量、ブリーディング率ともに減少することが明らかとなった。また、珪灰置換量とブリーディング量の相関係数が 0.9941、珪灰置換量とブリーディング率の相関係数が 0.9939 と極めて高い相関関係があることが明らかとなった。ただし、この試験結果が 1m³ 中に粉体量が増加したことによるブリーディング低減効果なのか、今回使用した珪灰特有の低減効果なのか、または双方の相乗効果なのかは今回の試験結果からは明らかにできなかった。

(2)硬化性状

圧縮強度試験結果を図 4-2 に、水中養生強度と気中養生強度の関係を図 4-3 に、静弾性係数試験結果を図 4-4 に示す。

図 4-2 より、Base60、25R60、50R60 の気中養生条件下における圧縮強度試験結果を比較すると、珪灰混入量が多い、50R60、25R60、Base60 の順に強度発現が大きく、気中養生条件下においても RHA コンクリートは無混入と比較して強度発現性が高くなることが明らかとなった。(25R60 は Base60 の 1 割程度、50R60 は Base60 の 2 割程度強度増進)

図 4-3 より、気中養生条件下で養生した圧縮強度試験結果は水中養生条件下で養生した圧縮強度試験結果より圧縮強度発現性が小さいことがわかる。この傾向は試験材齢が長くなるほど顕著化することが認められた。さらに、気中養生条件下と比べて水中養生条件下で

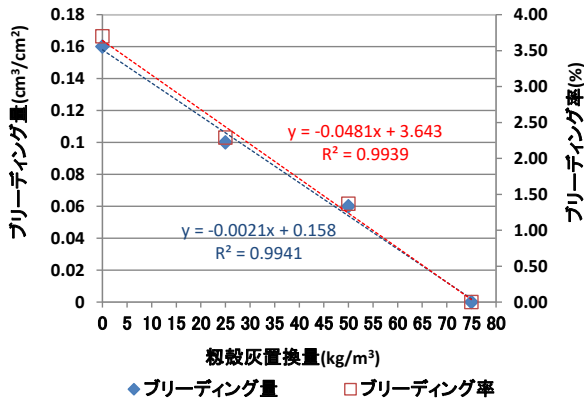


図 4-1 単位粉砕灰量とブリーディングの関係

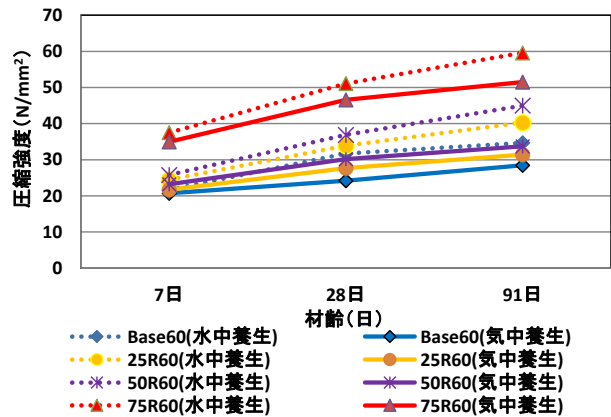


図 4-2 圧縮強度試験結果

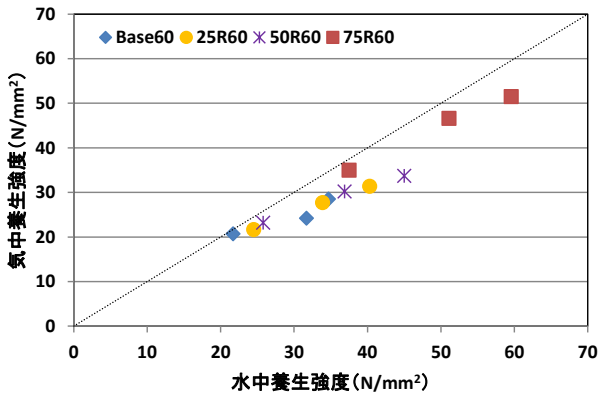


図 4-3 水中養生強度と気中養生強度の関係

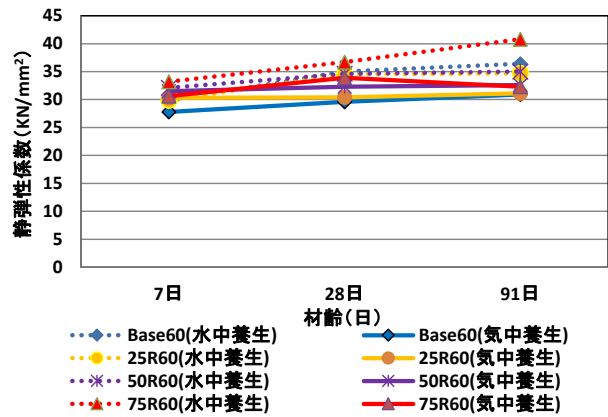


図 4-4 静弾性係数試験結果

は2~3割程度強度増進することが読み取れるから、RHA コンクリートの強度発現性を高めるためには水中養生（水分供給）が極めて効果的であることが明らかとなった。

ところで、図 4-2 より、50R60（気中養生）と Base60（水中養生）の各材齢の強度発現を比較すると養生方法が異なるにも関わらず強度発現性がほぼ一致すること、上述したブリーディング試験結果より、粉砕灰混入量の増加に伴いブリーディング量が低下することから、本試験で使用した粉砕灰は特有の保水機能（給水効果）を兼ね備えると考えられる。すなわち、RHA コンクリートは、単位水量の一部が粉砕灰内部に吸着され、その内部で保水されることで水中養生と同等の効果をもたらす自己養生機能が備わっていることが認められた。ただし、今回の試験から自己養生効果をもたらすための最適な粉砕灰置換量は明らかにならず、今後の更なるデータの蓄積とメカニズムの解明が期待される。また、材齢 1 日の圧縮強度試験結果はそれぞれ Base60:3.35N/mm²、25R60:4.35 N/mm²、50R60:5.48 N/mm²、75R60:6.12 N/mm² となったことから、化学混和剤使用量が多くなることによる凝結遅延の影響はないことが明らかとなった。

次に、図 4-4 より、気中養生条件下における Base60、25R60、50R60 の静弾性係数試験結

果を比較すると、圧縮強度試験と同様に粉砕灰混入量が多い、50R60、25R60、Base60 の順に静弾性係数も大きくなることが明らかとなった。また、水中養生条件下においても同様の傾向だが、絶対値は大きく、養生方法で比較すると水中養生が効果的であることが明らかとなった。

長さ変化率試験結果を図 4-5 に、質量変化率を図 4-6 に示す。Base60、25R60、50R60、75R60 ともに大きな差は見受けられず、粉砕灰の有効利用上問題ないことが明らかとなった。また、第 3 章と同様の傾向を得たことから、再現性が高いことが明らかとなった。

凍結融解試験結果を図 4-7 に、質量変化率を図 4-8 に示す。Base60、25R60、50R60、75R60 と単位粉砕灰量が増加するにつれて顕著に耐凍害性が向上することが明らかとなり第 3 章と同様の傾向を得たことから、再現性が高いことが明らかとなった。

促進中性化試験結果を図 4-9 に示す。材齢初期（特に 1 週）の段階では RHA コンクリートは Base コンクリートと比較して中性化深さが小さいことが確認されたが、材齢 26 週では RHA コンクリートと Base コンクリートに大きな差はなく同程度の中性化深さとなることが確認された。これは、材齢初期の段階では粉砕灰を混入することによる細孔構造の緻密化あるいは水和反応で自己乾燥しうる細孔が粉砕灰の内部養生効果により飽和されている可能性が考えられるが、今後検討する必要がある。また、材齢が長中期と進むにつれて中性

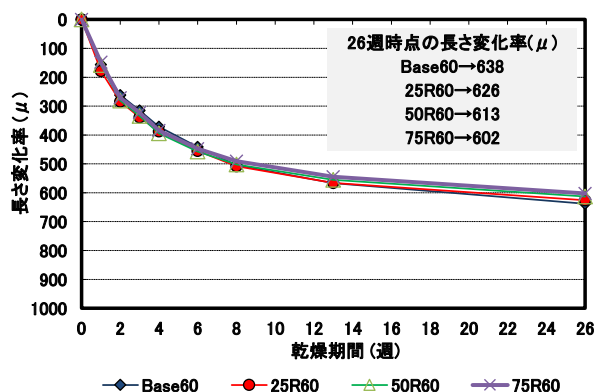


図 4-5 長さ変化率試験結果

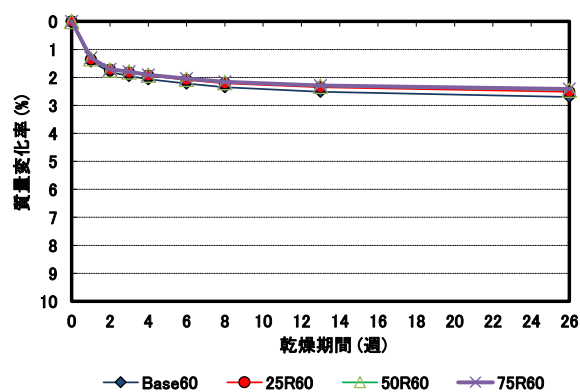


図 4-6 質量変化率試験結果

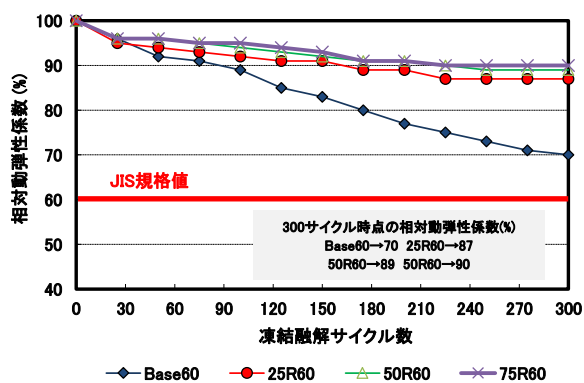


図 4-7 凍結融解試験結果

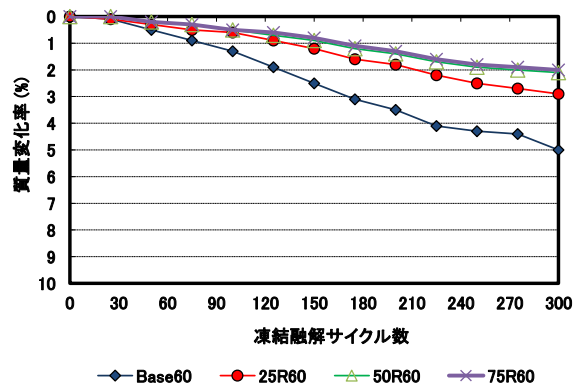


図 4-8 質量変化率試験結果

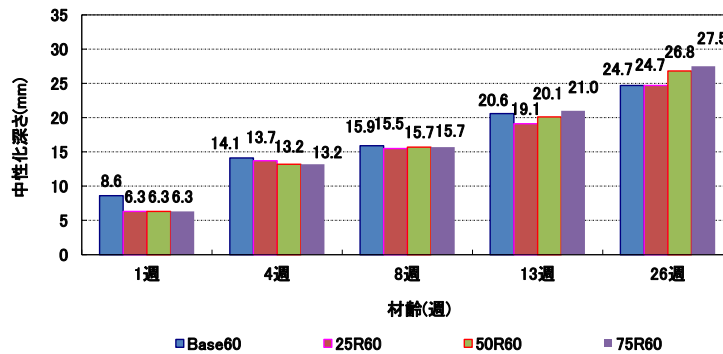


図 4-9 促進中性化試験結果

化深さが同等となるのは、ポズラン反応による細孔構造の緻密化と相反する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費により、RHA コンクリートが透気しやすい構造へと変化したためと考えられるが、今後のデータの蓄積を待って、メカニズムの解明につなげたい。

4.3 珪殻灰混入コンクリートの RC 梁部材への適用

4.3.1 実験概要

前述したように、RHA コンクリートを実構造物で用いることを想定し、一般の珪殻灰を混入しない RC 梁部材と珪殻灰を用いた RC 梁部材の諸性状を比較することにより、RHA コンクリートの RC 梁部材への適用性を明らかにすることを目的に曲げ破壊試験を行った。

図 4-10 に RC 梁部材の形状寸法を、写真 4-1 および写真 4-2 に曲げ破壊試験用試験体における鉄筋配筋状況を示す。幅 200mm、高さ 300mm、部材長 2000mm の鋼製型枠に、主鉄筋として D19(SD345)の異形棒鋼を配置した。また載荷試験中のせん断破壊を防止するために、D10(SD295)の異形棒鋼をスターラップとして 100mm 間隔で配置した。打設時はコンクリートを 2 層に分けて詰め込みを行い、棒状バイブレータで入念に締固めを行った。試験体は各配合について 1 本ずつ作製し、合計 2 本作製した。

フレッシュ試験および強度試験を通して、RHA コンクリートの施工性および力学特性について確認した後に、同じ配合で作製された RC 梁部材に対して、2 点載荷による曲げ破壊試験を実施し、計測された実験結果について比較検討した。さらに、土木学会コンクリート標準示方書の有効曲げ剛性モデルおよび示方書に準じた曲げモーメントの算定式により求められたそれぞれの計算値と実測値とを比較することにより、珪殻灰を用いた RC 梁部材の力学的挙動について有効利用の観点から評価を行った。

4.3.2 使用材料

本章でも第 2 章で提示した材料を使用して実験を実施した。

RC 梁部材の主鉄筋には D19(SD345)を、スターラップには D10(SD295)の異形棒鋼を使用した。表 4-4 に使用した主鉄筋およびスターラップの規格値、力学的性質、機械的性質を示す。

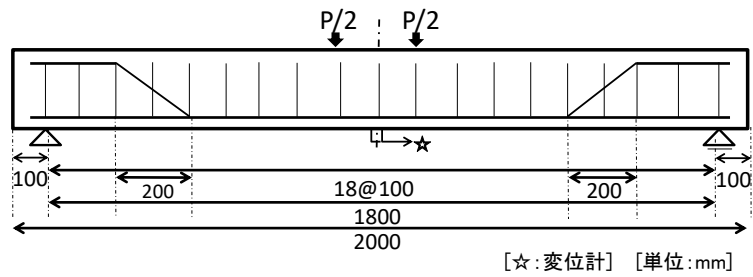


図 4-10 寸法および鉄筋の配置



写真 4-1 供試体の鉄筋配筋状況 1

写真 4-2 供試体の鉄筋配筋状況 2

4.3.3 試験配合

第 3 章より粉砕灰を混和材料として使用した場合の適正混入量は、粉砕灰を $50\sim 75\text{kg/m}^3$ の範囲で使用することが望ましいとの知見を得たことから、上限値の 75kg/m^3 使用を採用し、Base コンクリートとの破壊挙動の差異を検証することとした。配合を表 4-5 に示す。なお、目標スランプおよび目標空気量はそれぞれ $12\pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5\pm 1.5\%$ とした。

4.3.4 供試体および試験体の作製方法

(1) 練混ぜ方法

第 3 章と同様の手順で実施した。

(2) 作製方法

所定のフレッシュ性状(目標スランプ $12\pm 2.5\text{cm}$ 目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$)が得られたことを確

表 4-4 主鉄筋およびスターラップの規格値、力学的性質、機械的性質

種別		主鉄筋		スターラップ		
規格値	呼び名	D19		D10		
	公称直径(mm)	19.1		9.53		
	公称周長(cm)	6.0		3.0		
	公称断面積(mm ²)	2.865		0.7133		
	節の平均間隔の 最大値 (mm)	13.4		6.7		
	節の高さの 最小値 (mm)	1.0		0.4		
	節の高さの 最大値 (mm)	2.0		0.8		
力学的性質	呼び名	D19		D10		
	弾性係数 (N/mm ²)	1.90×10 ⁵		1.71×10 ⁵		
	降伏点強度 (N/mm ²)	403		399		
	引張強度 (N/mm ²)	571		509		
機械的性質	種類の記号	SD345		SD295		
	降伏点 (N/mm ²)	345~440		295 以上		
	引張強さ (N/mm ²)	490 以上		440~660		
	引張試験片	2号に準 じるもの	14A号に準 じるもの	2号	14A号	
	伸び (%)	18 以上	19 以上	18 以上	19 以上	
	曲げ性	曲げ角度	180°		180°	
		内側半径	D16 を超え D41 以下 公称直径の 2 倍		径 16mm 以下 公称直径の 1.5 倍	

表 4-5 配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					計
			W	C	RHA	S	G	
Base コンクリート	60	39.5	175	292	-	725	1127	2310
RHA コンクリート		37.0			75	642		2314

認した後、圧縮強度試験用に φ100mm×200mm の供試体を作製した。養生は、脱型前材齢 1 日までは 20±2.5°C の部屋に静置して型枠養生を行い、材齢 1 日後に脱型し 20±2.5°C、60±20% の環境下にて、気中養生、水中養生を行った。

(3) 供試体の養生方法

本試験では 20±2.5°C、60±20% の環境下で養生した。RHA コンクリート、Base コンクリートに対してそれぞれ気中養生と水中養生を行い、養生方法の違いによる強度特性の把握を試みた。

なお、RC 梁部材は RHA コンクリート、Base コンクリートともに 20±2.5°C、60±20% の環境下で 91 日間気中養生を行った。

4.3.5 試験項目および試験方法

本章の配合により作製した円柱供試体ならびに RC 梁部材に対して、フレッシュ試験および各種強度試験等を、RC 梁部材については曲げ破壊試験を行った。フレッシュ試験の項目はスランブ試験、空気量試験および単位容積質量試験とし、強度試験の項目は圧縮強度試験、静弾性係数試験とした。

(1) スランブ試験

スランブ試験は、JIS A1101-1998「コンクリートのスランブ試験方法」に基づいて行った。

(2) 空気量試験

空気量試験は、JIS A1118-1997「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に基づいて行った。

(3) 単位容積質量試験

単位容積質量試験は、JIS A1116-1998「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法および空気量の質量による試験方法」に基づいて行った。

(4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づいて行った。試験材齢は水中養生、気中養生ともに材齢 7 日（初期強度発現性の比較）、28 日（標準材齢での比較）、91 日（長期強度発現性の比較）で行い、各シリーズ 3 本の値の平均値をそのシリーズでの圧縮強度とした。

(5) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は、JIS A1149-2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づいて行った。試験材齢は水中養生、気中養生ともに材齢 7 日（初期強度発現性の比較）、28 日（標

準材齢での比較)、91日(長期強度発現性の比較)各シリーズ3本の値の平均値をそのシリーズでの静弾性係数とした。

(6) RC 梁の曲げ破壊試験

珪殻灰を用いた RC 梁部材の力学的挙動を明らかにすることを目的に、曲げ破壊試験を行った。本試験においては 1000kN 構造試験機を使用した。図 4-1 に示すように、せん断スパン長($a=800\text{mm}$)および有効高さ($d=250\text{mm}$)として、材齢 91 日の試験体に対して、2 点荷重による曲げ破壊($a/d=3.2$)を想定し、試験を実施した。支点は一方を固定ヒンジ支承、他方を可動ヒンジ支承とし、荷重点の上に丸棒、荷重分配桁およびロードセルを載せ、曲げ破壊となるまで荷重した。

本試験における計測項目について以下に述べる。なお、2 本の変位計により変位を計測した。荷重試験前の様子を写真 4-3 に示す。



写真 4-3 荷重試験前の RC 梁部材の様子

4.3.6 材料特性試験結果および考察

(1)フレッシュ性状

フレッシュ性状試験結果を表 4-6 に示す。Base コンクリート、RHA コンクリートともにスランプ、空気量とも目標範囲内に収まり、フレッシュ性状は問題ないことが確認された。

(2)圧縮強度試験

圧縮強度試験の試験結果を表 4-7 に示す。

表 4-7 より、単位水量 175 kg/m^3 の水セメント比が高いコンクリートに混和材として珪殻灰を使用することで強度増進効果が得られることが明らかとなった。また、水中養生条件下だけでなく気中養生条件下においても顕著なこと(水中養生条件下では無混入の 3~4 割程度、気中養生条件下では無混入の 4~4.5 割程度強度増進)が確認された。すなわち、上述した試験との再現性が確認された。

(3)静弾性係数試験

静弾性係数試験の結果を表 4-8 に示す。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図 4-11 に示す。また、図 4-12~4-14 に各材齢における応力とひずみの関係を示す。

表 4-6 フレッシュ性状試験結果

配合名	化学混和剤		スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/L)	練上り 温度 (°C)
	SP (B×%)	AE (B×%)				
Base コンクリート	0.45	0.015	11.5	4.6	22.285	28.5
RHA コンクリート	1.20	0.020	12.0	4.7	22.130	29.0

表 4-7 各材齢における圧縮強度試験結果

材齢	水中養生		気中養生	
	Base コンクリート	RHA コンクリート	Base コンクリート	RHA コンクリート
7 日	21.6	29.0	20.7	30.1
28 日	32.5	42.0	27.6	38.9
91 日	36.8	52.8	30.3	42.0

* 値は 3 本の平均値を記載 [単位:N/mm²]

表 4-8 各材齢における静弾性係数試験結果

材齢	水中養生		気中養生	
	Base コンクリート	RHA コンクリート	Base コンクリート	RHA コンクリート
7 日	28.75	28.35	28.37	29.01
28 日	31.57	33.26	27.70	30.37
91 日	36.48	36.23	30.19	30.91

* 値は 3 本の平均値を記載 [単位:KN/mm²]

Base コンクリートの気中養生を除きすべてのシリーズにおいて圧縮強度増加に伴う静弾性係数の増加が確認された。この結果から、RHA コンクリートは Base コンクリートと同様な傾向があるといえる。

また、図 4-12~4-14 より、珪灰の混入による応力とひずみ関係の違いは見られないことがいえる。

4.3.7 曲げ破壊試験結果および考察

(a) 全体挙動

図 4-15~4-16 に各 RC 梁試験体におけるひび割れ発生前および直後の荷重-たわみ曲線

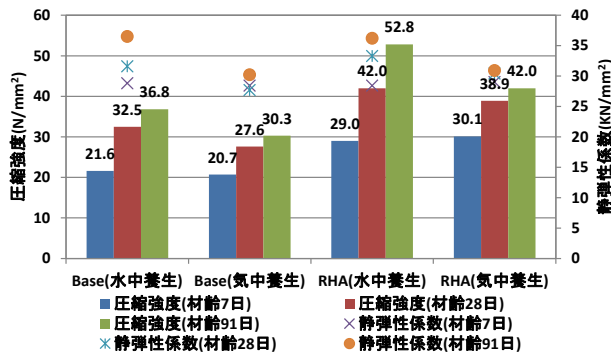


図 4-11 圧縮強度と静弾性係数の関係

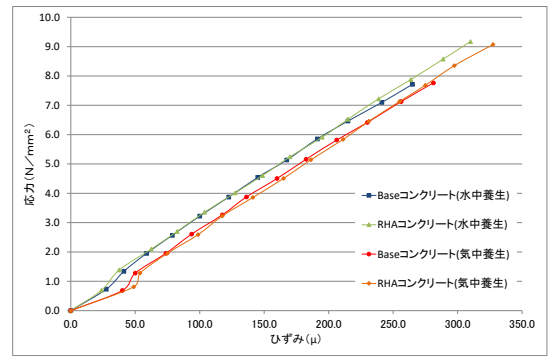


図 4-12 応力とひずみの関係(材齢 7 日)

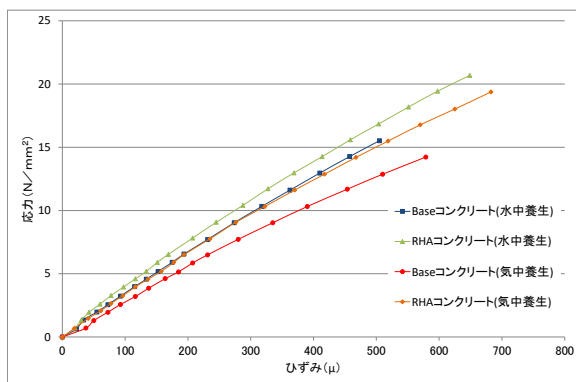


図 4-13 応力とひずみの関係(材齢 28 日)

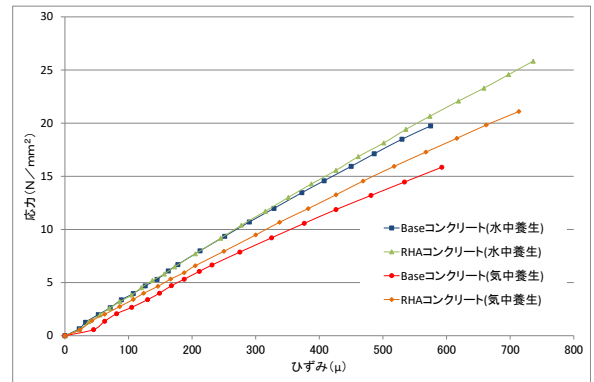


図 4-14 応力とひずみの関係(材齢 91 日)

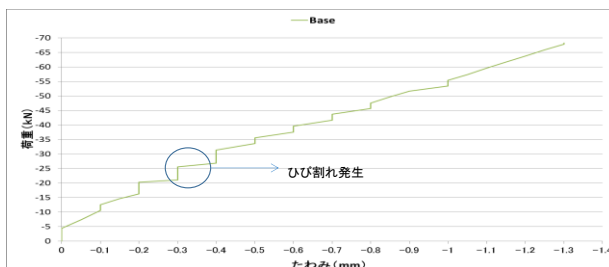


図 4-15 Base コンクリート荷重-たわみ曲線
(ひび割れ発生前および直後)

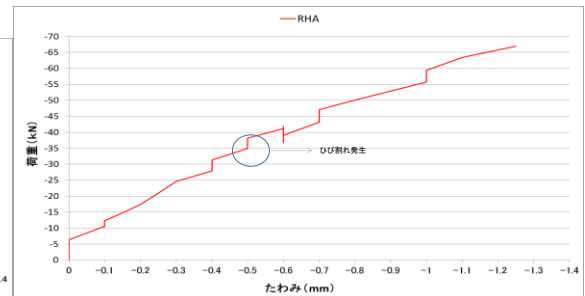


図 4-16 RHA コンクリート荷重-たわみ曲線
(ひび割れ発生前および直後)

を示す。また、図 4-17～4-18 に各 RC 梁試験体における曲げ破壊に至るまでの荷重-たわみ曲線を示す。

図 4-15～4-16 より Base の RC 梁では 25kN の時にひび割れが発生し、珪殻灰を混入した RC 梁では 35kN の時にひび割れが発生した。これは、珪殻灰を混入することで強度が増していることが要因だといえる。このことから、珪殻灰を混入することでひび割れの発生時期を遅らせる結果が得られた。

ひび割れ発生後においては、Base の RC 梁も珪殻灰を混入した RC 梁もたわみ量は、ほとんど同じように増加していくことがわかる。

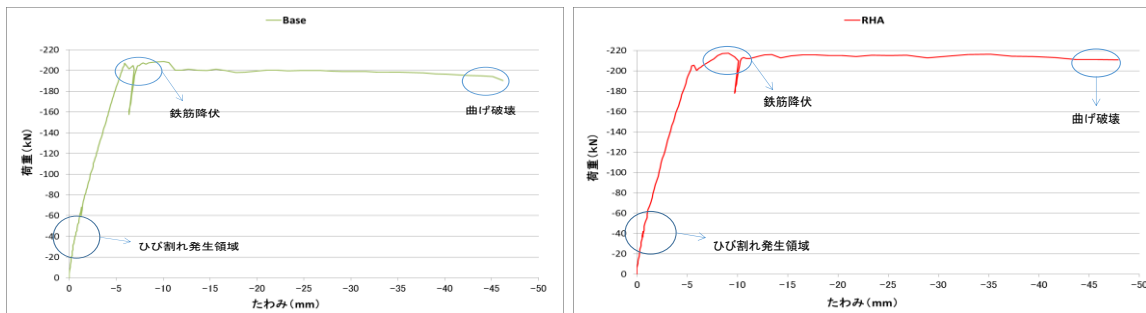


図 4-17 Base コンクリート荷重-たわみ曲線 図 4-18 RHA コンクリート荷重-たわみ曲線

図 4-17～4-18 に示す通り、Base の RC 梁は 206kN の時に比べ、珪殻灰を混入した RC 梁 216kN と鉄筋が降伏する段階での荷重がわずかではあるが大きく現れる結果となった。これもコンクリートの強度が増していることが要因だといえる。また、曲げ破壊に至るまでに Base の RC 梁とほぼ同じ荷重たわみ曲線を描くことから、珪殻灰の利用においては特に問題ないといえる。

また、破壊形態については、Base の RC 梁と同様に珪殻灰を混入した RC 梁でも、まず、曲げひび割れが発生し、次第にその本数が増加した。主鉄筋の降伏後、この曲げひび割れが大きく成長し、最終的にコンクリート圧縮域の破壊に至った。

(b) ひび割れ状況

各 RC 梁の両側面を A 面、B 面として図 4-19～4-21 にひび割れ発生時、鉄筋降伏時、曲げ破壊時における各配合のひび割れの状況を示す。また、図 4-19～4-21 に示したひび割れの間隔や長さは実際に発生したひび割れと比例するように写し描いたものである。

図 4-19 より、珪殻灰を用いた場合と用いていない場合の各配合では、ひび割れの発生本数および長さは Base とほぼ同じ結果が見られる。

図 4-20 に示すように、荷重が増加し鉄筋が降伏しつつある状況においても、ひび割れ発生時と同様に、珪殻灰を用いた配合では、ひび割れの発生本数に Base と大きな差はなく、ひび割れの長さも同様な結果を示している。

図 4-21 より、各 RC 梁が曲げ破壊に至ったとき、各段階と同様に、珪殻灰を用いた配合でのひび割れ本数および長さは Base と同様な結果が得られた。

(c) たわみの実測値と計算値の比較

(1) たわみの算定

構造物の設計においては、瞬時に生じる短期の変位・変形によって構造物の機能、使用性、耐久性および美観を損なわないように、荷重による部材の変位・変形を制御・検討する必要がある。ところが、LEE⁴⁾の研究では、人工軽量骨材または再生骨材を混入した RC 梁部材に対するたわみの算定実験において、実際に発生したたわみ量は予想されたたわみ量より 10%以上大きな値を示す結果を報告している。これを考慮して、珪殻灰を混入した場合の RC 梁部材についても、一般のたわみ算定式の安全性を確認する必要がある。

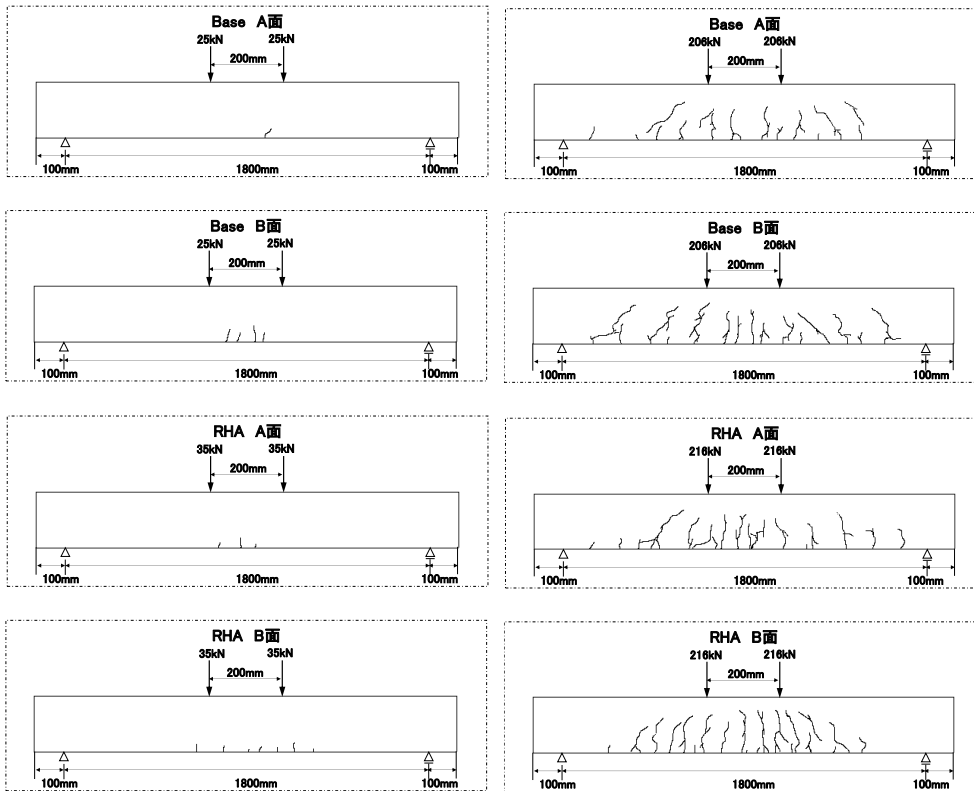


図 4-19 RC 梁ひび割れ発生時の状況

図 4-20 RC 梁鉄筋降伏時の状況

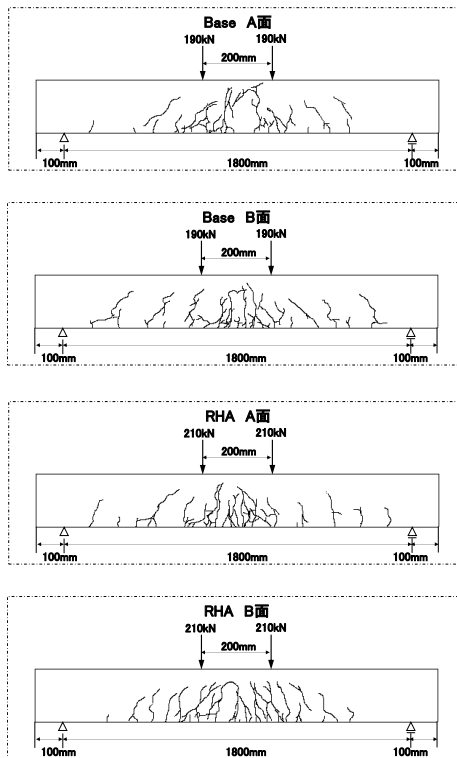


図 4-21 RC 梁曲げ破壊時の状況

そこで本研究では、土木学会コンクリート標準示方書の有効曲げ剛性モデル(式 4.1)を用い、各配合に対してたわみの算定を行った。また、算定されたたわみ量(以下、たわみの計算値)を曲げ破壊試験から計測されたたわみ量(以下、たわみの実測値)と比較し、式 4.1 による珪灰を混入した RC 梁部材のたわみ量の算定における安全性および適応性を検証した。なお、式 4.1 における内訳を式 4.2～式 4.7 に示す。また、式 4.4、式 4.6 および式 4.7 における f_t 、 E_c 、 f_c' には、材料特性試験を通して求められたコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および引張強度を用いた。また式 4.4 において、脱型の直後から曲げ破壊試験を実施する直前まで気中養生を行い続けた RC 梁部材において、乾燥や水和熱によるひび割れ強度の低下という影響が少ないと判断したため、 $k_{1b} = 1.0$ を設定した。

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right\} I_{cr} \quad (4.1)$$

ここに、
 I_e : 短期の有効換算断面二次モーメント(mm⁴)
 M_{cr} : 曲げひび割れ発生モーメント(N・mm)
 M_{max} : 短期の変位・変形量における曲げモーメントの最大値(N・mm)
 I_{cr} : 短期のひび割れ断面における図心まわりのひび割れ断面による断面二次モーメント(mm⁴)

式 4.1 における短期の変位・変形量における曲げモーメントの最大値(M_{max})の算定式を以下に示す。

$$M_{max} = Pa \quad (4.2)$$

ここに、
 P : 荷重(N)
 a : せん断スパン長(mm)

式 4.1 における曲げひび割れ発生モーメント(M_{cr})の算定式を以下に示す。

$$M_{cr} = \frac{f_{bck} I_g}{y_2} \quad (4.3)$$

ここに、
 f_{bck} : 曲げひび割れ強度(N/mm²)
 I_g : 短期の全断面における図心まわりの全断面による断面二次モーメント(mm⁴)
 y_2 : 断面図心から下縁までの距離(mm)

式 4.3 における曲げひび割れ強度(f_{bck})の算定式を以下に示す。

$$f_{bck} = k_{0b} k_{1b} f_t \quad (4.4)$$

ここに、 k_{0b} : コンクリートの引張軟化特性に起因する引張強度と曲げ強度の関係を表す
係数

k_{1b} : 乾燥、水和熱など、その他の原因によるひび割れ強度の低下を
表す係数

f_t : 実験で求めたコンクリートの引張強度(N/mm²)

式 4.4 におけるコンクリートの引張軟化特性に起因する引張強度と曲げ強度の関係を表す
係数(k_{0b})の算定式を以下に示す。

$$k_{0b} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(h/l_{ch})} \quad (4.5)$$

ここに、 h : 部材の高さ(mm)

l_{ch} : 特性長さ(mm)

式 4.5 における特性長さ(l_{ch})の算定式を以下に示す。

$$l_{ch} = \frac{G_F E_c}{f_t^2} \quad (4.6)$$

ここに、 G_F : 破壊エネルギー(N/mm)

E_c : 実験で求めたコンクリートの静弾性係数(kN/mm²)

f_t : 実験で求めたコンクリートの引張強度(N/mm²)

式 4.6 における破壊エネルギー(G_F)の算定式を以下に示す。

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} f_c'^{1/3} \quad (4.7)$$

ここに、 G_F : 破壊エネルギー(N/mm)

d_{\max} : 粗骨材の最大寸法(mm)

f_c' : 実験で求めたコンクリートの圧縮強度(N/mm²)

以上の算定結果およびコンクリートの強度試験における実験結果を式 4.8 に代入し、たわみの
計算値を求めた。

$$\delta = \frac{Pa}{24E_c I_e} (3l^2 - 4a^2) \quad (4.8)$$

ここに、 P : 荷重(N)

l : 部材全長(mm)

a : せん断スパン長(mm)

E_c : 実験で求めたコンクリートの静弾性係数(kN/mm²)

I_e : 短期の有効換算断面二次モーメント(mm⁴)

(2)たわみの実測値と計算値の比較

Base のたわみの実測値と計算値の比較を表 4-9、RHA のたわみの実測値と計算値の比較を表 4-10 および図 4-22～4-24 に、式 3.1 による各配合におけるたわみの計算値と実測値の比較を示す。

試験結果より、いずれの RC 梁部材もたわみの計算値と実測値がほぼ同等であることから、短期たわみの計算に用いたコンクリート標準示方書の規定式が曲げ剛性の評価に適用できることが分かった。また、Base の RC 梁部材よりも珪灰を混入した RC 梁部材の短期たわみ量の実測値が小さくなった。これは、珪灰のポズラン反応による圧縮強度の長期的増加が曲げ剛性に影響していることから、珪灰を混入することにより安全側で設計されることが確認された。

表 4-9 たわみの実測値と計算値の比較(Base)

配合名	項目	125kN	135kN	145kN	154kN	164kN	175kN	184kN	195kN	205kN	
Base	実測値 (mm)	3.05	3.40	3.70	4.00	4.30	4.70	5.00	5.40	5.85	平均 値
	計算値 (mm)	3.46	3.71	3.96	4.20	4.46	4.76	4.98	5.26	5.54	
	比率	0.88	0.92	0.94	0.95	0.96	0.99	1.00	1.03	1.06	0.97

[比率=実測値/計算値]

表 4-10 たわみの実測値と計算値の比較(RHA)

配合名	項目	127kN	136kN	146kN	155kN	166kN	177kN	184kN	195kN	205kN	
RHA	実測値 (mm)	2.90	3.20	3.45	3.75	4.15	4.45	4.75	5.05	5.65	平均 値
	計算値 (mm)	3.20	3.47	3.75	4.00	4.31	4.62	4.83	5.11	5.41	
	比率	0.91	0.92	0.92	0.94	0.96	0.96	0.98	0.99	1.04	0.96

[比率=実測値/計算値]

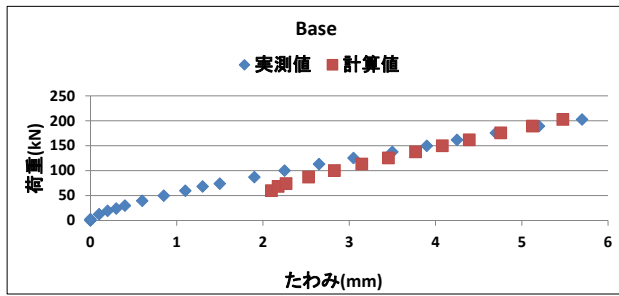


図 4-22 たわみの実測値と計算値の比較(Base)

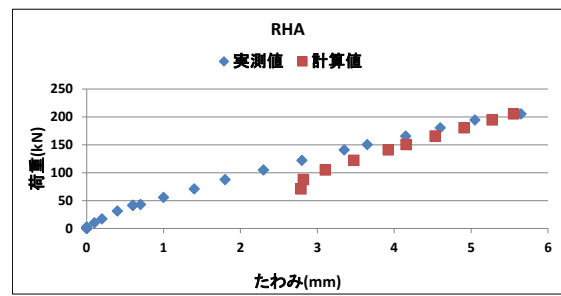


図 4-23 たわみの実測値と計算値の比較(RHA)

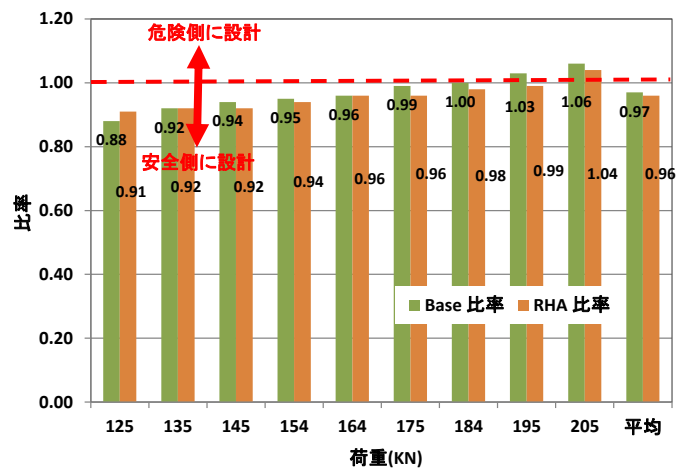


図 4-24 たわみの実測値と計算値の比較

(d)終局曲げモーメントの実測値と計算値の比較

(1)終局曲げモーメントの算定

終局曲げモーメントの計算において、コンクリート標準示方書に準じた終局曲げモーメントの算定式(式 4.9)が一般に多く用いられている。珪砂灰を混入した RC 梁部材に対しては、式 4.9 による終局曲げモーメントの算定についての安全性および適応性を検討する必要がある。そのため本研究では、式 4.8 によって算定された終局曲げモーメント(以下、終局曲げモーメントの計算値)を曲げ破壊試験から計測された終局曲げモーメント(以下、終局曲げモーメントの実測値)とで比較することにより、その安全性および適応性を検証した。なお、式 4.9 における f_y には表 4-4 に示したものを用い、 f_c' には材料特性試験を通して求められたコンクリートの圧縮強度を用いた。

$$M_u = A_s f_y \left(d - \frac{A_s f_y}{2 \times 0.85 f'_c b} \right) \quad (4.9)$$

ここに、 A_s : 引張側鉄筋の断面積(mm²)

d : 有効高さ(mm)

b : 部材幅(mm)

f_y : 引張側鉄筋の降伏強度(N/mm²)

f'_c : 実験で求めたコンクリートの圧縮強度(N/mm²)

(2)終局曲げモーメントの実測値と計算値の比較

表 4-11 および図 4-25 に終局曲げモーメントの実測値と計算値との比較を示す。表 4-9、4-10 では、計算値に対する実測値の比も示しているが、Base の RC 梁(0.95)と RHA の RC 梁(0.96)との結果からはほぼ同等の性能と考えられる。すなわち、コンクリート標準示方書に準じた終局曲げモーメントの算定が本研究に用いた梁部材の曲げモーメントを妥当に評価したといえる。

表 4-11 曲げモーメントの実測値と計算値の比較

配合名	曲げモーメント (N・mm)		実測値/計算値
	実測値	計算値	
Base	6.3×10^7	6.6×10^7	0.95
RHA	6.5×10^7	6.8×10^7	0.96

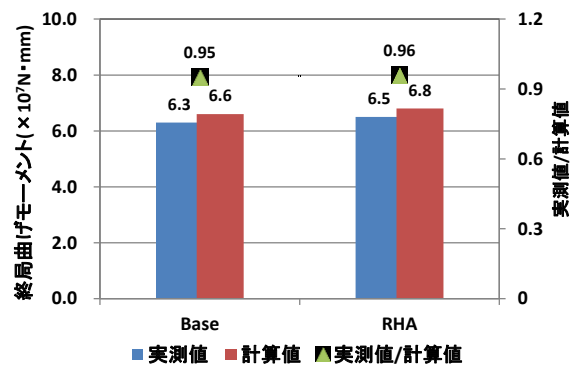


図 4-25 終局曲げモーメントの実測値と計算値の比較

4.4 まとめ

＜養生条件の違いが珪灰を混入したコンクリートの強度特性に与える影響＞

- (1) 珪灰無混入コンクリート、珪灰混入コンクリートともに目標空気量の範囲内に収まった。また、珪灰混入コンクリートは珪灰無混入コンクリートと比較して粘性が高く、ハンドリングは多少劣るが、タンピング試験より十分施工可能なワーカビリティを有することが認められた。
- (2) 単位珪灰置換量とブリーディング量の相関係数が 0.9941 と極めて高い相関関係であることから、珪灰混入コンクリートは単位珪灰置換量を $0\sim 75\text{kg/m}^3$ の範囲で調整することにより、ブリーディング低減効果が期待できる。
- (3) 単位水量 175 kg/m^3 、水セメント比 60%と比較的高いコンクリートに混和材として珪灰を混入することで強度増進効果を得られることの再現性が確認された。また、気中養生条件下においても強度増進効果が確認されたことから、本研究で使用した珪灰は自己養生機能を有することが確認された。
- (4) 材齢 1 日圧縮強度試験結果より、珪灰混入コンクリートは珪灰無混入コンクリートと比べて 1.3~1.8 割程度増加することが確認されたことから、極めて材齢初期の段階から強度発現性が高いことが明らかとなった。
- (5) 長さ変化率試験結果、凍結融解試験結果より、第 3 章と同様の試験結果となり再現性が確認された。また、促進中性化試験結果より、材齢 26 週において、珪灰混入コンクリートは珪灰無混入コンクリートと同程度の中性化深さとなることが確認された。

＜珪灰混入コンクリートの RC 梁部材への適用＞

- (1) 単位水量 175 kg/m^3 、水セメント比 60%と高い水セメント比のコンクリートに珪灰を単用量 75kg/m^3 使用することで水中養生条件下では無混入の 3~4 割程度、気中養生条件下では無混入の 4~4.5 割程度強度増進し、珪灰混入による強度増進効果の再現性が確認された。
- (2) 静弾性係数試験結果から、珪灰無混入コンクリートの気中養生を除きすべてのシリーズにおいて圧縮強度増加に伴う静弾性係数の増加が確認された。この結果から、珪灰を混入したコンクリートは珪灰無混入コンクリートと同様な相関関係があるといえる。
- (3) RC 梁部材の曲げ破壊試験結果から、珪灰を混入した RC 梁のひび割れ本数および長さは珪灰無混入コンクリートとほぼ同じ結果であることが確認された。
- (4) 珪灰を混入した RC 梁の破壊形態については、珪灰無混入コンクリートの RC 梁と同様に、まず、曲げひび割れが発生し、次第にその本数が増加した。主鉄筋の降伏後、この曲げひび割れが大きく成長し、最終的にコンクリート圧縮域の破壊に至った。
- (5) 標準示方書の有効曲げ剛性モデルを用いて、珪灰を混入した RC 梁部材の短期たわみ量を評価することは妥当であることが確認された。

- (6) 粉殻灰を混入した RC 梁部材の曲げモーメントの実測値／計算値の比が粉殻灰無混入コンクリートと同等であり、たわみの実測値／計算値の比が小さいことを示すことから、粉殻灰無混入コンクリートの RC 梁よりも安全側(保守側)の設計が可能となる。

4.5 参考文献

- 1) 榑原誠樹ほか：タンピング試験を用いたコンクリートの施工性簡易評価法、土木学会第 67 回年次学術講演会、pp.1203～1204
- 2) 二階堂泰之・伊藤巧・坂井悦郎・大門正機：超速硬セメントの初期水和におけるエトリングライト生成と微細組織、コンクリート工学会年次論文報告集、Vol17、No1、1995
- 3) 山本武志・金津 努：ポゾラン反応がもたらす組織緻密化のメカニズムと強度発現に関する考察、土木学会第 60 回年次学術講演会
- 4) LEE HAN CHIANG：瓦廢材を用いたコンクリートの物性および RC 梁部材の破壊挙動に関する研究、名古屋工業大学大学院 工学研究科 修士論文

第5章 結論

本論文では、バイオマス発電所から排出される籾殻灰を前処理を必要とせずの有効利用可能な副産物との観点から、環境負荷低減材料と位置付け、排出される状態での使用（粉碎処理を施さない状態での使用）を利用条件とした。その条件下でコンクリートに使用した際のコンクリートの特性およびRC梁部材へ適用した際の破壊挙動を検証した。

以下に本論文で得られた知見を示す。

5.1 籾殻灰を用いたコンクリートの特性および利用形態の検討

- (1) 籾殻灰を結合材として利用する場合には、単位水量を $20\sim 70\text{kg/m}^3$ 増加させることでスランプ制御が容易となり、適正な混入量は $25\sim 80\text{kg/m}^3$ の範囲内にあることが明らかとなった。また乾燥収縮を抑制するには単位粗骨材量を増加させること、耐凍害性を向上させるには空気量を多く設定することで効果的な利用となるが明らかとなった。
- (2) 籾殻灰を混和材として利用する場合には、単位水量 175kg/m^3 、水セメント比 60%の配合において、籾殻灰を $50\sim 75\text{kg/m}^3$ 混入することで、無混入と比べ凝結時間の短縮、ブリーディング量の低減、圧縮強度との高い相関、高い耐凍害性を示し、コンクリートの性能向上が図られることが明らかとなった。
- (3) 籾殻灰を結合材として利用する場合は、混和材として利用する場合と比較して、コンクリート標準示方書の推奨値よりも 20kg/m^3 程度多くの単位水量を必要とし、単位水量の増加にともない単位セメント量も多く必要とする不経済な配合となるため、混和材として利用することが望ましいことが明らかとなった。

籾殻灰の適切な利用形態と今後の展望として、粉碎処理を施さない籾殻灰混入コンクリートのフレッシュ性状を確保するには、化学混和剤量、細骨材率、練混ぜ方法を適宜調整することよりも単位水量を増やすことが効果的であることが明らかとなった。その際に懸念される、乾燥収縮や耐凍害性においては、 20kg/m^3 程度の単位水量増加では問題ないこともわかった。ただし、籾殻灰を結合材として使用した配合は、混和材として使用した配合と比較して、単位水量の増加にともない単位セメント量も多く必要とする配合となる。

今回設定した配合での結果に大きな不具合は見られなかったが、籾殻灰の置換率によっては、フレッシュ性状および硬化物性の制御が困難な場合も考えられる。配合条件は限定されるが混和材として使用した場合、高い耐凍害性を得ていること、示方書に準拠した単位水量の上限値で施工可能であることを考慮すると、本研究で用いた粉碎処理を施していない籾殻灰の有効利用は、混和材として使用することが望ましいと言える。

5.2 粉殻灰混入コンクリートの養生条件が強度特性に与える影響の把握および

RC 梁部材へ適用した際の破壊挙動

＜養生条件の違いが粉殻灰を混入したコンクリートの強度特性に与える影響＞

- (1) 粉殻灰無混入コンクリート、粉殻灰混入コンクリートともに目標空気量の範囲内に収まった。また、粉殻灰混入コンクリートは粉殻灰無混入コンクリートと比較して粘性が高く、ハンドリングは多少劣るが、タンピング試験より十分施工可能なワーカビリティを有することが認められた。
- (2) 単位粉殻灰置換量とブリーディング量の相関係数が 0.9941 と極めて高い相関関係であることから、粉殻灰混入コンクリートは単位粉殻灰置換量を $0\sim 75\text{kg/m}^3$ の範囲で調整することにより、ブリーディング低減効果が期待できる。
- (3) 単位水量 175kg/m^3 、水セメント比 60%と比較的高いコンクリートに混和材として粉殻灰を混入することで強度増進効果を得られることの再現性が確認された。また、気中養生条件下においても強度増進効果が確認されたことから、本研究で使用した粉殻灰は自己養生機能を有することが確認された。
- (4) 材齢 1 日圧縮強度試験結果より、粉殻灰混入コンクリートは粉殻灰無混入コンクリートと比べて 1.3~1.8 割程度増加することが確認されたことから、極めて材齢初期の段階から強度発現性が高いことが明らかとなった。
- (5) 長さ変化率試験結果、凍結融解試験結果より、第 3 章と同様の試験結果となり再現性が確認された。また、促進中性化試験結果より、材齢 26 週において、粉殻灰混入コンクリートは粉殻灰無混入コンクリートと同程度の中性化深さとなることが確認された。

＜粉殻灰混入コンクリートの RC 梁部材への適用＞

- (1) 単位水量 175kg/m^3 、水セメント比 60%と高い水セメント比のコンクリートに粉殻灰を単位量 75kg/m^3 使用することで水中養生条件下では無混入の 3~4 割程度、気中養生条件下では無混入の 4~4.5 割程度強度増進し、粉殻灰混入による強度増進効果が確認された。
- (2) 静弾性係数試験結果から、粉殻灰無混入コンクリートの気中養生を除きすべてのシリーズにおいて圧縮強度増加に伴う静弾性係数の増加が確認された。この結果から、粉殻灰を混入したコンクリートは普通コンクリートと同様な相関関係があるといえる。
- (3) RC 梁部材の曲げ破壊試験結果から、粉殻灰を混入した RC 梁のひび割れ本数および長さは粉殻灰無混入コンクリートとほぼ同じ結果であることが確認された。
- (4) 粉殻灰を混入した RC 梁の破壊形態については、粉殻灰無混入コンクリートの RC 梁と同様に、まず、曲げひび割れが発生し、次第にその本数が増加した。主鉄筋の降伏後、この曲げひび割れが大きく成長し、最終的にコンクリート圧縮域の破壊に至った。
- (5) 標準示方書の有効曲げ剛性モデルを用いて、粉殻灰を混入した RC 梁部材の短期たわみ量を評価することは妥当であることが確認された。

- (6) 珪灰を混入した RC 梁部材の曲げモーメントの実測値／計算値の比が珪灰無混入コンクリートと同等であり、たわみの実測値／計算値の比が小さいことを示すことから、珪灰無混入コンクリートの RC 梁よりも安全側(保守側)の設計が可能となる。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々の御指導、御助言、御協力のもとに完成させることができました。ここに、厚く御礼申し上げます。

上原匠先生には、指導教員として実験の段階から論文作成まで全てにおいて多くの助言をいただきました。この論文を作成できたのも先生のおかげだと心より思っております。また、投稿論文の作成の際にも数多くの助言をいただきました。ご迷惑をおかけすることが多かったにも関わらず、いつでも気さくに対応していただき、先生のもとで有用な研究ができたことに深く感謝しております。

梅原秀哲先生、河辺伸二先生、前田健一先生には、論文作成にあたり御指導・ご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

吉田亮先生には、実験遂行にあたり、沢山の御助言御協力いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

平原英樹技術職員には、実験に使用する用具の準備および、実験時のお手伝いをしていただき大変お世話になりました。実験がスムーズに進むように段取りをしていただいたことに感謝しております。

本研究の実験を快く手伝っていただいた研究室の皆様、これまでお世話になった先輩方、同期生、大学院生、学部生の皆様には深く感謝しております。研究室とともに学んできた皆様には、公私ともに本当にお世話になりました。

最後に、業務や論文の取りまとめのために、私の健康を気遣い、どんな時にでも私を支え、励ましてくれた家族を始め、皆様に心より感謝を込めて謝辞とさせていただきます。

梶原 教裕