

論文 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

佐藤幸三^{*1}・松井健一^{*2}・中嶋清実^{*3}・河野伊知郎^{*4}

要旨：過去の研究において、もみがら灰の有効性は確認されている。しかし、それらの研究においては、実験に供するためにもみがらを少量焼成・粉碎してもみがら灰を製造している。本研究では、もみがら灰の実用化を念頭に置いて、管理された方法で大量に焼成したもみがらを連続粉碎して得られたもみがら灰が、同じように有効であるかを検証した。その結果、従来の研究結果と同様に、10%もみがら灰を混入したコンクリートでは強度、耐久性とも無混入のコンクリートより優れ、シリカフェームを混入したコンクリートとも同等程度の性能を有することが確認された。

キーワード：もみがら灰、混和材、硬化コンクリート、シリカフェーム

1. はじめに

農業生産の副産物であるもみぐらは、もみ質量の約25%を占めている。そのもみぐらを焼却して得られるもみがら灰 (Rice Husk Ash: 以下, RHAと記す) は、SiO₂が質量で80%以上含まれている。この含有率はフライアッシュよりも高く、シリカフェームとほぼ同等である。このようなRHAを製造する場合、SiO₂を結晶化させないために、焼却温度は700℃程度以下が良いとされる。非晶質なRHAは、セメントの水和反応によって生成する水酸化カルシウムと反応して固まるポゾラン材料である。

米国では、Mehta^{1) 2)}らがRHAをセメントの一部としたコンクリートの研究、高強度マスコンクリートの温度低減用にRHAを利用した研究等を行っている。

我が国では、杉田³⁾らが高活性RHAの製造方法と、それを混入したコンクリートの研究、中嶋⁴⁾らによる外国

産RHAを混入したコンクリートの研究、浅井⁵⁾によるRHA混入によるアルカリ骨材反応抑制効果に関する研究、月岡ら⁶⁾によるRHAを混入したコンクリートの特性に関する研究等がある。これらの研究から、RHAのコンクリート用混和材料としての有用性の確認はされている。しかし、それらの実験で用いたRHAは、比較的小さな炉や、野焼きで焼かれたものをボールミル等で少量製造したものを使用しているので、実用化に向けての安定供給、経済性等に関してさらなる検討を加える必要がある。

本研究は、実用化に向けての一研究として、米国のもみがら発電所から連続的に製造されたもの、および、国産のRHAを簡単な設備で大量製造できるくん炭の製造法に従って焼成したものを粉碎したRHAが、過去の研究から得られたものと同程度の性能を有しているかを検証したものである。

※1 西松建設(株) 技術研究所 係長 (正会員)

※2 西松建設(株) 技術研究所 課長 (正会員)

※3 豊田工業高等専門学校 教授 環境都市工学科, 工博 (正会員)

※4 豊田工業高等専門学校 助手 環境都市工学科, 工修 (正会員)

2. RHAの製造方法

今回使用した、RHAの焼成方法を図-1に示す。国産RHA（以下、JR）は、上面が解放となっているくん炭焼成炉に、もみがらを少量敷き並べそれに点火後、残りのもみがらを積み上げる。下部に設置された煙道から空気を引き込むことによって700℃程度で蒸し焼きとする。その灰は比較的白く、コンクリートに混入しても色の変化が少ないという特徴を有している。米産RHA（以下、AR）はもみがら発電所の焼却炉で700℃程度で連続的に焼成されたものを、下方から収集する。その灰は黒色であり、コンクリート色が黒変するという問題がある。このように焼成されたもみがらを粉砕してRHAとして製造した。

3. 実験概要

3.1 使用材料

使用材料は、セメント：普通ポルトランドセメント，粗骨材：神奈川県酒匂川水系川砂利（表乾比重=2.70，粗粒率=6.41，吸水率=0.84%），細骨材：神奈川県酒匂川水系川砂（表乾比重=2.55，粗粒率=2.55，吸水率=1.76%），混和剤：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤およびAE助剤，混和材：米産および国産RHAとシリカフェーム。

表-1にRHAおよびシリカフェームの物性値を示す。

RHAは、シリカフェームに比べて炭素量が多く、 SiO_2 の含有量が少ない結果となっているが、比表面積はかなり大きくなっている。これが混和材としての効果を生み出すものと期待される。写真-1にJR，写真-2にARの電子顕微鏡写真を示す。電顕写真からも、RHAは比表面積が大きいことが解る。両者を比較すると、JRには大小粒が見られ、炭素量も少ないことからARに比べ若干結晶質度が高いようである。

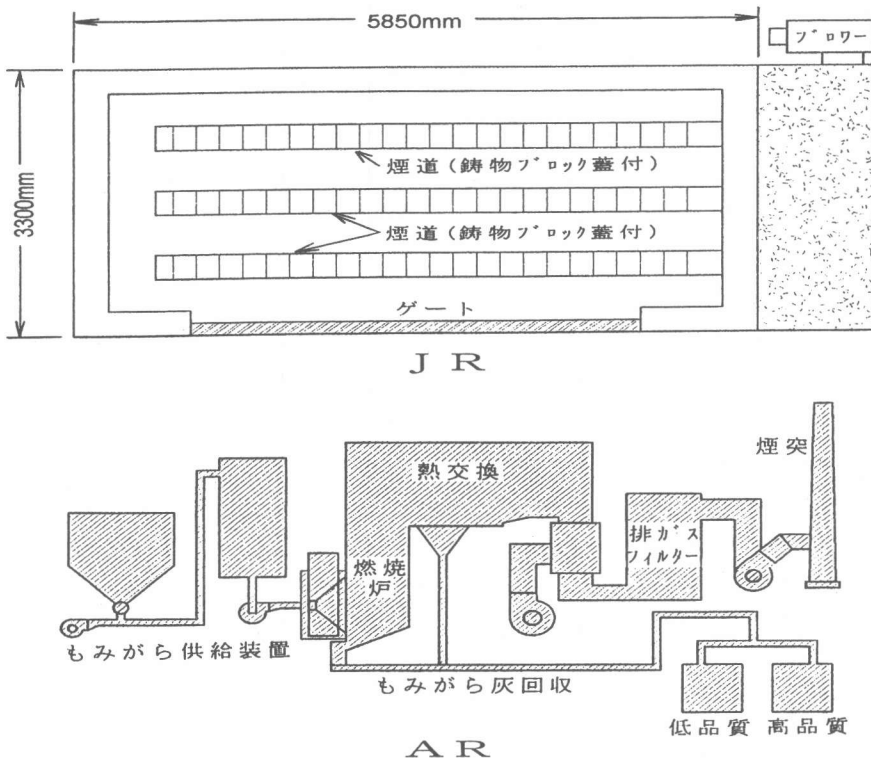


図-1 RHAの焼成方法

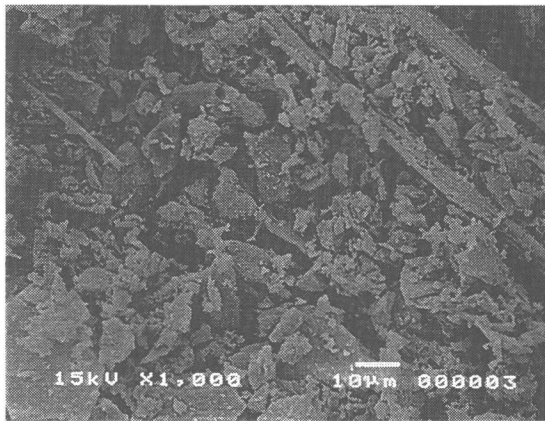


写真-1 JR電顕写真(×1,000)

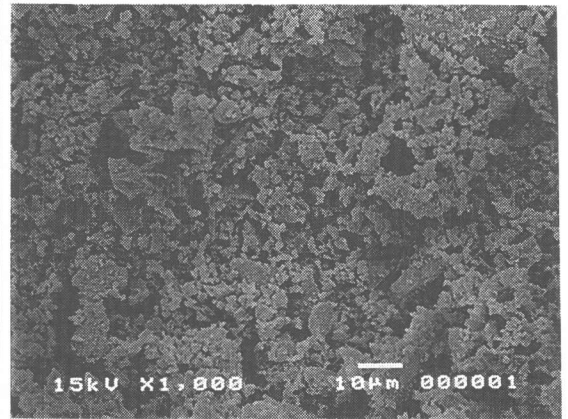


写真-2 AR電顕写真(×1,000)

表-1 混和材料物性値

試料名	化学成分(%)								比重	比表面積 (BET法) m ² /g
	C	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃		
JR	5.34	83.4	0.41	0.40	0.20	1.53	0.40	0.20	2.13	65.5
AR	5.75	85.4	0.10	0.20	0.20	3.16	0.20	0.10	2.12	42.0
SF	1.43	91.8	0.26	0.85	0.70	0.94	0.30	1.00	2.20	20.0

③空気量 4.0~5.0%
(水結合材比40%のもの)

④スランプ 15±2cm

⑤混和材置換率 10% (内割り)
である。

ただし、水結合材比50%のものは、混和剤の影響を排除するために混和剤を無添加としたので、単位水量を調整することによってスランプを一定とした。

以上の配合条件を満たすために試験練りを行い、表-3に示すような配合を決定した。

4. 実験結果および考察

4.1 初期水和発熱測定試験

表-4に3日までの初期水和発熱の測定結果を示す。この表から、JRの初期水和発熱が大きいことが解る。

4.2 圧縮強度試験

図-2に水結合材比50%の圧縮強度試験結果を示す。この図からJRは、3日お

3. 2 試験項目

今回の試験項目および試験方法を表-2に示す。

表-2 試験項目および方法

試験項目	試験方法 他
スランプ試験	JIS A 1101
空気量試験	JIS A 1118
初期水和発熱測定試験	6点式微小熱量計を用い、水結合材比50%のペーストを20℃恒温室で測定した。
圧縮強度試験	JIS A 1108 材齢3, 7, 28, 91, 182, 364日
凍結融解試験	JIS A 6204 附属書2
塩化物イオン浸透性試験	AASHTO, T227-83
中性化促進試験	測定日4, 8, 12週

3. 3 配合

配合条件は、

①水結合材比 40%, 50%

②粗骨材最大寸法 20mm

表-3 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

コンクリートの種類	G _{max} (mm)	W/(C+RHA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							フレッシュ性状	
				W	C	Ad.	S	G	SP (C×%)	AE助剤 (C×%)	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)
P	20	40	40	167	418	0	669	1063	0.55	0.0005	16.0	4.0
SF				167	376	42	663	1053	0.75	0.0005	15.0	5.0
JR				167	376	42	661	1050	1.20	0.007	17.0	4.5
AR				167	376	42	662	1052	0.65	0.003	13.0	4.4
P	20	50	40	175	349	0	694	1065	—	—	14.2	0.5
SF				226	406	45	604	923	—	—	14.8	0.3
JR				203	365	41	641	984	—	—	14.5	1.5
AR				184	332	37	674	1032	—	—	15.7	0.5

表-4 水和発熱量測定結果

セメントの種類	水和発熱量 (cal/g)			
	1h	12h	1d	3d
P	4.98	25.79	44.63	67.29
SF	5.91	27.64	44.58	64.73
JR	6.04	28.74	47.59	68.06
AR	5.27	26.08	43.70	62.46

よび7日の早期強度においてP, S, ARに比べて高い値を示している。これは、初期水和発熱量測定結果からも解るが、JRのポズラン反応が早期から起きているためであると考えられる。しかし、28日以降の長期強度ではARの方が良好な伸びを示している。このことから、電顕写真および炭素量から推測されたように、JRがARよりも若干結晶質であることがうかがえる。図-3に水結合材比40%の圧縮強度試験結果を示す。この場合は、3日強度でJRはS, Pより低い値となっており、混和剤無添加の場合と違い初期の強度発現があまり見られない。これは、JRは他の混和材料に比べて高性能AE減水剤を多量に必要とすることから、混和剤による遅延現象であると考えられる。

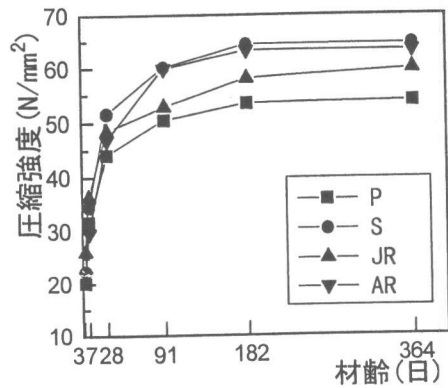


図-2 圧縮強度試験結果 (水結合材比50%, 混和剤無添加)

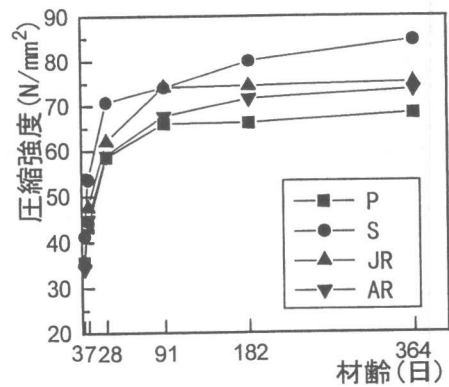


図-3 圧縮強度試験結果 (水結合材比40%, 混和剤添加)

4.3 凍結融解試験

図-4に水結合材比40%の凍結融解試験結果を示す。300サイクルでは、混和材の添加による影響は顕著に出ていない。

しかし、500サイクルの時点では混和材を添加したものに比べ、混和材無添加のものの劣化が大きくなっている。また、RHAを添加したもののほうが、シリカフュームを添加したものより劣化の程度が低いことがうかがえる。このことから、RHAを添加することによってシリカフュームと同等以上の耐久性が得られることが解った。

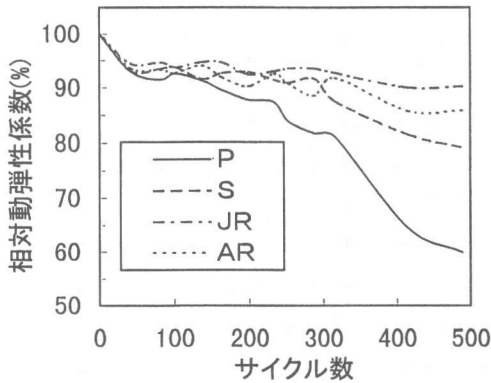


図-4 凍結融解試験結果
(水結合材比40%, 混和剤添加)

4.4 塩化物イオン浸透性

表-5に塩化物イオン浸透性の評価方法を、表-6に塩化物イオン浸透性試験結果を示す。これらの表から混和材を添加したものは無添加のものに比べて良好な値を示している。特に、S, JRは同様に「低い」の範囲内に入っていることから、組織の緻密度が高いと言える。

表-5 塩化物イオン浸透性の評価基準

電流量 (クーロン)	塩化物イオン 浸透性
> 4,000	高い
2,000~4,000	中位
1,000~2,000	低い
100~1,000	非常に低い
< 100	ほとんどない

表-6 塩化物イオン透過性試験結果

種類	電流量 (クーロン)	平均値 (クーロン)	塩化物イオン浸透性の評価
P	1	3318	中位
	2	3768	
	3	3234	
S F	1	1356	低い
	2	1338	
	3	1260	
J R	1	1842	低い
	2	1986	
	3	1938	
A R	1	2532	中位
	2	2616	
	3	2610	

4.5 中性化促進試験

図-5に水結合材比40%の中性化促進試験結果を示す。試験開始から91日経過した時点では、混和材無添加のものが中性化深さが小さくなっている。混和材を添加したものは、セメントの水和反応によって生成する水酸化カルシウムと結合しこれを消失させるため、組織が緻密化したにもかかわらず中性化が速くなったと考えられる。

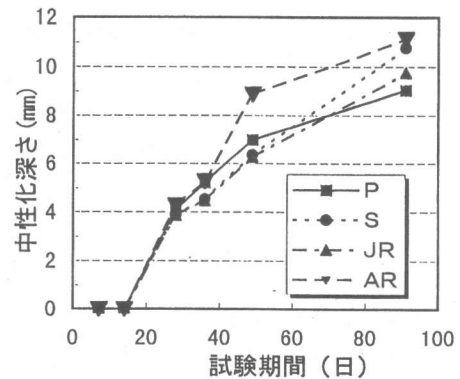


図-5 中性化促進試験結果
(水結合材比40%, 混和剤添加)

5. まとめ

今回、コンクリートの性状改善に対して有効であるとされているRHAを大量焼成した場合の性状に関して、シリカフュームと比較する形で実験を行った。その結果をまとめたものを以下に記す。

- 1) 水結合材比50%で混和剤無添加の場合、JRはポゾラン反応が早期に起こり、初期強度の発現性は良好である。これは、初期水和発熱量の測定結果とも一致する。しかし、水結合材比を下げた場合、同一スランプを得るための混和剤量が他の混和材に比べて多量であるため、初期強度の発現性が悪化した。
- 2) 凍結融解抵抗性試験から、RHAを添加したものはシリカフュームを添加したものと同等以上の耐久性を有していることが解った。
- 3) 混和材を添加することによって、塩化物イオン浸透性に関しても性状改善の効果が得られる。特にJRを添加したものは、シリカフュームと同等の性状改善効果が得られることが解った。
- 4) 混和材を添加混入することによって中性化が進む結果となった。これは、セメントの水和によって生成する水酸化カルシウムと混和材が結合して、これを消失させてしまうことが組織の緻密化を上回ったためと考えられる。

6. おわりに

過去の研究においてRHAの有効性は確認されているが、焼成方法を変えて大量に供給できるようにした場合、その有効性が低下するのでは無いかと危惧された。しかし、今回の実験結果

を見る限りにおいては、混和剤無添加のコンクリートより優れた性状を有し、シリカフュームと同等程度の品質であると確認された。しかし、国産RHAにおいては混和剤を多量に必要とする問題がある。これは、焼成方法をより適切なものにするによって改善されると思われる。

参考文献

- 1) Mehta,P.K.: "Rice Husk Ash-A Unique Supplementary Cementing Material" Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology, Athens, Greece, May, V.M. Malhotra, ed., pp.407 ~ 430
- 2) Mehta,P.K.: Properties of blended cements made from rice husk ash, ACI Journal, 74(9), PP.440 ~ 442(1997)
- 3) 杉田修一, 広谷征美, 磯島康雄: 高活性もみがら灰製造法とそれを用いたコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文報告集15(1), PP. 321~326(1993)
- 4) 中嶋清実, 河野伊知郎, 吉田弥智, 原田耕司: 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報告集16(1), PP. 419~424(1994)
- 5) 浅井喜代治: 粉殻灰混入によるアルカリ骨材反応抑制に関する研究, 農業土木学会論文集187, PP. 145~150(1997)
- 6) 月岡存, 高山高伸: 粉殻灰を混入したコンクリートの特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集19(1), PP. 301~306(1997)