

## 論文

## [1068] 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

中嶋清実\*<sup>1</sup>・河野伊知郎\*<sup>2</sup>・吉田弥智\*<sup>3</sup>・原田耕司\*<sup>4</sup>

## 1. はじめに

近年、混和材としてその効果が注目されているものにシリカフェームがある。日本においてもその関心が高く、シリカフェームを混和材として利用する研究は数多くなされておられ、その成果が報告されている[1]。しかし、日本では良質のシリカフェームは生産されておらず、量にも限界がある。外国産のシリカフェームを購入して使用する場合には、コストおよび安定供給という面で問題がある。

一方、アメリカにはもみがらを燃料とする発電所が各地に点在しており、そこから多量のもみがら灰が廃出されている。このもみがら灰は適切な燃焼方法により100%のアモルファスのもみがら灰となる。そこで、コンクリートに対する品質の改善効果はシリカフェームに似ていて、さらに製造費も安価で、多量に安定供給できる可能性のあるアモルファスのもみがら灰は、これからのコンクリート用混和材として大変有用と考えられる。

もみがら灰のコンクリートへの利用に関する研究はカルフォルニア大学バークレー校のMehta教授が、1974年頃から行っており、その成果が報告されている[2]。日本では、山本、杉田、原田らの研究[3~5]があるが、それらの研究はモルタルが主体で、コンクリートに使用する場合はまだ十分行われていない。また、Mehta教授の研究成果を日本のコンクリートにそのまま適用するには問題がある。従って、今回の研究は、アメリカおよびメキシコの発電所から廃出された3種類のもみがら灰を使用し、コンクリートの諸性質にどのような効果があるかを明らかにしようとしたものである。あわせてシリカフェームを用いたコンクリートと比較検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料など

使用材料は、セメント：普通ポルランドセメント、粗骨材：静岡県天竜川産の川砂利（粗粒率=7.12, 表乾比重=2.65, 吸水率=0.84%）、細骨材：岐阜県揖斐川産の粗砂（粗粒率=2.98, 表乾比重=2.63, 吸水率=1.79%）と愛知県木曾川産の細砂（粗粒率=1.61, 表乾比重=2.55, 吸水率=1.87%）の8：2の混合砂、混和剤：ポリカルボン酸系を主成分としたT社製高性能AE減水剤、混和材：3種類のもみがら灰と1種類のシリカフェームである。

表-1にもみがら灰の物理的性質を示す。表中の比重試験はJIS A 6201-1991に準拠し、比表面積はBET法、電気伝導率差は1989年、Luxanらによって提案されたポゾラン材の活性評価法の一つである電気伝導率試験[6]、非晶率はX線回折法で測定した。

表-2にもみがら灰の化学成分を示す。研究に供したもみがら灰(RHA)は、アメリカおよびメキシコの発電所で焼成温度500℃~700℃で比較的長い時間焼成することによって製造された

\*1 豊田工業高等専門学校 助教授 環境都市工学科、工博（正会員）

\*2 豊田工業高等専門学校 助手 環境都市工学科、工修（正会員）

\*3 名古屋工業大学 学長、工博（正会員）

\*4 西松建設(株)技術研究所主任技師、工修（正会員）

ものである[2]。ただし、メキシコ産もみがら灰に関しては二度焼きが行われ、炭素(C)の量が少なくなっている。比較のために用いたシリカフェームは、比表面積(BET法)=約20m<sup>2</sup>/g、SiO<sub>2</sub>=90%以上、比重=2.20である。

表-1 もみがら灰の物理的性質

種類	比重	比表面積(m <sup>2</sup> /g)	平均粒径(μ)	電気伝導率差(ms/cm)	非晶率(%)
ルイジアナ産(RHA I)	2.18	7.92	6.47	0.91	94.7
テキサス産(RHA II)	2.15	16.23	6.39	1.51	81.6
メキシコ産(RHA III)	2.21	24.44	5.18	3.67	86.5

表-2 もみがら灰の化学成分

資料名	SiO <sub>2</sub> (%)	C(%)	K <sub>2</sub> O(%)	MgO(%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO(%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O(%)	Cr(%)	Zn(%)	Cu(%)
ルイジアナ産	93.30	4.66	1.51	0.08	—	0.35	0.04	—	0.003	0.005	0.001
テキサス産	93.00~97.00	3.00~7.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	—	—
メキシコ産	97.50	1.50	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	—	—	—

実験Ⅰの配合は単位セメント量350kg/m<sup>3</sup>、W/C=35%、スランプの範囲は15±1cmとした。所定のスランプ値になるように高性能減水剤の量で調整した。混和材のおきかえ率は単位セメント量の10%である。表中のプレーンⅠコンクリートとはおきかえ率0%のコンクリートで、プレーンⅡコンクリートとは10%のセメント量を差し引いたものである。このような条件のもとで決定された配合を表-3に示す。

表-3 コンクリートの配合(実験Ⅰ)

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	空気量(%)	水セメント比	細骨材率s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
						水W	セメントC	細骨材		粗骨材G	混和材	高性能AE減水剤
								細砂S <sub>1</sub>	粗砂S <sub>2</sub>			
プレーンⅠコンクリート	25	15±1	2.0±0.5	35	39	115	350	171	589	1211	0	C×2.1% 7.35
プレーンⅡコンクリート	25	15±1	2.0±0.5	39	40	115	315	179	616	1211	0	C×2.25% 7.09
RHAⅠコンクリート	25	15±1	2.0±0.5	35	39	116	315	171	589	1211	C×10% 35	(C+R)×2.0% 7.00
RHAⅡコンクリート	25	15±1	2.0±0.5	35	39	114	315	171	589	1211	C×10% 35	(C+R)×2.5% 8.75
RHAⅢコンクリート	25	15±1	2.0±0.5	35	39	109	315	171	589	1211	C×10% 35	(C+R)×4.0% 14.00
シリカフェームコンクリート	25	15±1	2.0±0.5	35	39	117	315	171	589	1211	C×10% 35	(C+R)×1.5% 5.25

実験Ⅱの配合は、実験Ⅰと単位セメント量、W/C、スランプが同一であるが、混和材のおきかえ率を単位セメント量に対し、0、5、10、15、20、25、30%と変化させたものである。

実験Ⅲの基本配合を表-4に示す。この配合ではスランプを7.5±1.0cmとし、W/Cを45、55、65%と変化させた場合のプレーンコンクリートの配合である。この場合の混和材のおきかえ率は単位セメント量の10%とした。

実験Ⅳの配合は骨材のアルカリ骨材反応性試験方法(JIS A 5308、附属書8)に準じて行い、混和材のおきかえ率を単位セメント量の0、5、10、15、20%とした。今回使用の細骨材は愛

表-4 コンクリートの基本配合表（実験Ⅲ）

水セメント比 w/c(%)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント C	細骨材		粗骨材	混和剤
						細砂 S <sub>1</sub>	粗砂 S <sub>2</sub>		
4.5	7.5 ±1.5	1.5	3.9	20.4	40.8	7.0	52.3	10.4	2.8
5.5			4.1	20.4	33.4	8.0	59.5	10.4	3.3
6.5			4.3	20.4	28.3	8.7	64.5	10.4	2.8

知県瀬戸市陣屋産の堆積チャートを粉砕したもの（粗粒率=2.8, 表乾比重=2.66, 吸水率=0.88）を用いた。これは JIS A 5308 化学試験法で有害と判定されたものである。実験Ⅰ～Ⅲのコンクリートの練り混ぜは 100ℓ のパン型強制練りミキサーを使用した。実験Ⅳのモルタルの練り混ぜは電動式モルタルミキサーを使用した。コンクリートおよびモルタルの練り混ぜ時間は4分間である。

### 2. 2 試験方法

試験項目はスランプ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1128）、凝結硬化速度試験（ASTM C 403-65T）、透水試験（インプット法[7]）、圧縮強度試験（JIS A 1108）およびアルカリ骨材反応性試験（JIS A 5308, 附8）を行った。供試体はφ15×30cmの円柱供試体であり、21日間水中養生した後7日間恒温室内（60～70%RH、温度20℃）で自然乾燥させたものである。材令28日を経た後、試験水の圧力の作用する面が、供試体成形時の上面となるように透水試験装置に据え、供試体の側面にはS社製の樹脂を塗布した。透水試験の圧力は20kg/cm<sup>2</sup>であり、透水日数は3日であった。試験が終わったら供試体を取り出し、直ちに割裂試験を行い、水の浸透部を墨汁により着色した。その後、断面を撮影して、印画紙上で水の浸透部の面積をプランメーターを用いて測定し、平均浸透深さを計算し、コンクリート中の水の拡散係数を算定した。

### 3. 試験結果および考察

図-1は実験Ⅰの場合のスランプの経時変化試験結果である。もみがら灰およびシリカフェームをセメントに置換したコンクリートはRHAⅠ（ルイジアナ産）を用いたものを除いて、プレーンコンクリートと比較してスランプロスが大きくなることが認められた。これはもみがら灰とシリカフェームの比表面積が大きいことと、水酸化カルシウムときわめて短期間に反応してゲル状物質を生成することからスランプロスが大きくなったものと考えられる。また、もみがら灰を用いたコンクリートはシリカフェームを用いたコンクリートよりもスランプロスが小さくなる傾向が認められた。特にルイジアナ産のRHAⅠコンクリートにおいては、プレーンコンクリートとほぼ同一の値を示した。これは、他のもみがら灰と比較して比表面積が著しく小さいこと、また電気伝導率差が0.91（一般に1.2以上ポゾラン活性良好）と小さいことからポゾラン活性が非常に低いと考えられる。

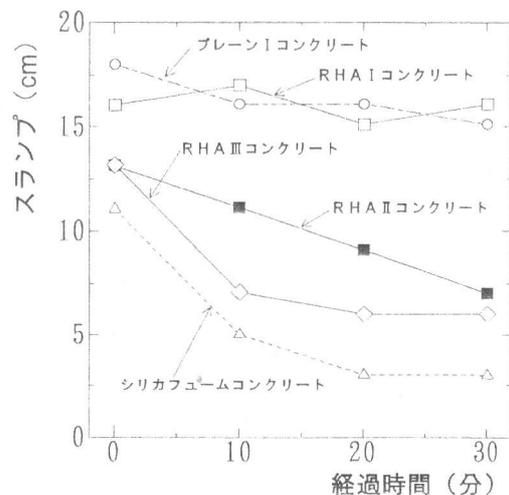


図-1 スランプと経時変化の関係（実験Ⅰ）

図-2は実験Iの配合での凝結硬化速度試験結果である。プレーンIコンクリートと比較すると、RHA I（ルイジアナ産）コンクリートは始発が2時間程度、終結が2時間30分程度遅れた。これはスランプの経時変化のところで述べた理由と同じで、ルイジアナ産は比表面積および電気伝導率差が小さいためである。RHA II（テキサス産）コンクリートはプレーンIコンクリートと比較して始発、終結とも30分程度早くなった。RHA III（メキシコ産）コンクリートは始発、終結とも3時間程度早くなった。この理由はRHA Iと比較して、RHA IIおよびRHA IIIでは比表面積および電気伝導率差が大きいことから分かるように、ポゾラン活性が良好なためである。RHA IIIコンクリートについてはシリカフェームコンクリートよりも始発が30分程度早くなった。これはRHA IIIの比表面積が $24.44 \text{ m}^2/\text{g}$ とシリカフェームの比表面積  $18.50 \text{ m}^2/\text{g}$ に比べて非常に大きいこと、さらにはRHA IIIの電気伝導率差は2.21、シリカフェームでは2.00で、RHA IIIの方が大きいことなどによるためと考えられる。

図-3はもみがら灰の違いによる圧縮強度と材令の関係である。プレーンIコンクリートと比較するとRHA I（ルイジアナ産）コンクリートでは1日強度が5%、3日強度が1%、7日強度が11%、28日強度が10%の強度減少を示し、91日強度では1%の強度増加を示した。RHA II（テキサス産）コンクリートでは1日強度が6%、3日強度が2%、7日強度および28日強度が1%の強度増加を示し、91日強度では2%の強度減少を示した。RHA III（メキシコ産）コンクリートでは1日強度が45%、3日強度が4%の強度増加を示し、7日強度が6%、28日強度が10%、91日強度では4%の強度減少を示した。シリカフェームコンクリートと比較すると、初期強度ではシリカフェームコンクリートを上回るが、長期強度では6~10%下回る結果となった。そして、プレーンIIコンクリートと比較することにより、混和材のポゾラン反応がどの程

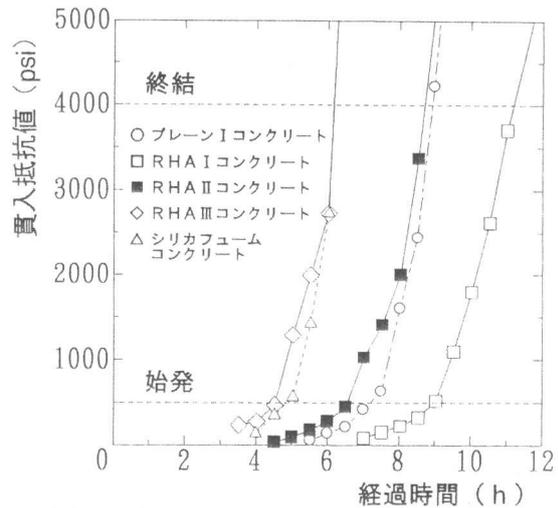


図-2 もみがら灰の違いによる貫入抵抗値と経過時間の関係

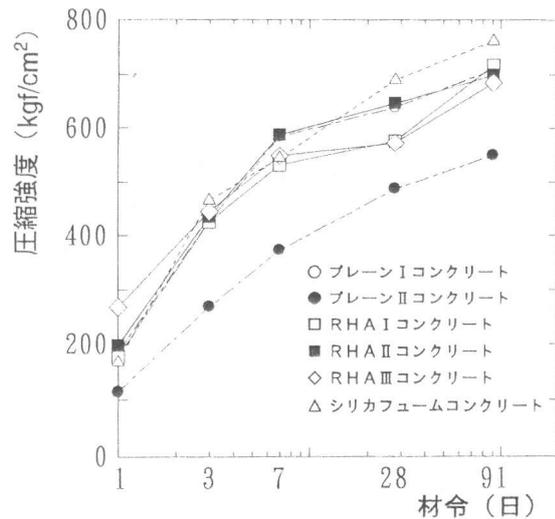


図-3 もみがら灰の違いによる圧縮強度と材令の関係

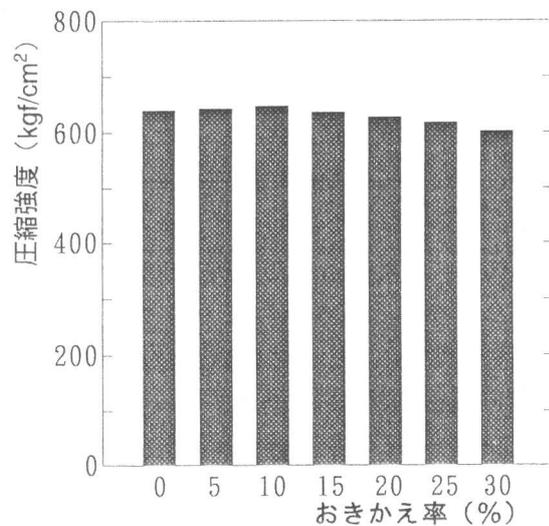


図-4 RHA IIコンクリートのおきかえ率と圧縮強度の関係

度強度増加に寄与しているかが分かるが、もみがら灰は初期強度、長期強度とも強度増加に寄与していることが分かる。

図-4はRHAⅡ（テキサス産）を用いたコンクリートの材令28日におけるおきかえ率と圧縮強度の関係である。この結果から分かるように、おきかえ率10%までは、おきかえ率が増加するに従い、強度は増加し、それ以上のもとではおきかえ率が増すに従い、強度は減少した。ちなみに0%と比較して10%では1.2%の強度増加であり20%、30%では1.9%、6.0%の強度減少であった。

図-5にアルカリ骨材反応試験結果を示す。この図はセメント重量の10%をもみがら灰でおきかえた場合の膨張率と経過時間（週）の関係である。モルタルの16週目の膨張率をみると、RHAⅠ（ルイジアナ産）モルタル、RHAⅡ（テキサス産）モルタル、RHAⅢ（メキシコ産）モルタルがそれぞれ0.001%、0.002%、0.003%となった。プレーンモルタルが0.065%であるから、もみがら灰により、アルカリ骨材反応による膨張率が抑制されたものと考えられる。他の混和材については、シリカフュームモルタルが0.001%、フライアッシュモルタルが0.003%となった。このことから、もみがら灰はシリカフューム、フライアッシュと同程度のアルカリ骨材反応に対する抑制効果があることが分かる。

図-6は透水試験結果である。この図の結果より、水セメント比45%の場合は、3種のもみがら灰を混入したコンクリートは、シリカフューム混入コンクリートよりも水密性が低くなった。しかしながら水セメント比が55%、65%と高くなるにつれて、もみがら灰混入コンクリートの方が、シリカフューム混入コンクリートよりも水密性が高くなった。

#### 4. まとめ

1) スランプの経時変化試験より、RHAⅠ（ルイジアナ産）のもみがら灰を用いたコンクリートのスランプロスはプレーンコンクリートと同程度で小さいが、RHAⅡ（テキサス産）およびRHAⅢ（メキシコ産）の場合はシリカフュームを用いたコンクリートと同様、スランプロスは大きくなった。この理由は、もみがら灰の物理試験結果より分かるように、RHAⅠ（ルイジアナ産）は比表面積、電気伝導率差とも他のものより小さく、水和反応は遅いが、RHAⅡ（テキサス産）およびRHAⅢ（メキシコ産）は比表面積、電気伝導率差がシリカフュームより大きいため、水和反応は極く早期より起こるためと考えられる。

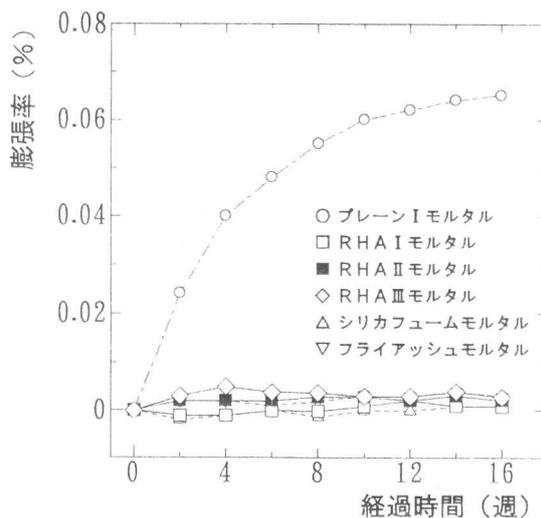


図-5 膨張率と経過時間の関係

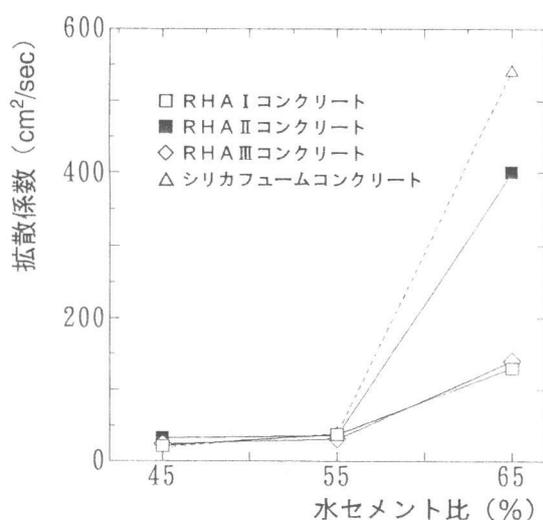


図-6 拡散係数と水セメント比の関係

- 2) 凝結硬化速度試験より、プレコンクリートと比較すると、RHA I (ルイジアナ産) コンクリートは始発が2時間程度、終結が2時間30分程度遅くなった。それに比べて、RHA II (テキサス産) コンクリートは、始発、終結とも30分程度早くなり、RHA III (メキシコ産) コンクリートでは始発、終結とも3時間程度早くなった。さらにRHA III コンクリートについてはシリカフェームコンクリートよりも始発が30分程度早くなった。この理由は、スランプの経時変化のところで述べたように、比表面積および電気電導率差の違いによるものと考えられる。
- 3) もみがら灰を用いたコンクリートの圧縮強度と材令の関係をプレーン I コンクリートと比較すると、RHA I (ルイジアナ産) コンクリートは、初期強度 (1日、3日) は低い長期強度 (91日) は同等以上となった。RHA II (テキサス産) コンクリートおよびRHA III (メキシコ産) コンクリートは、初期強度は高いが長期強度はプレーンコンクリートよりも同等以下となった。そして、3種のもみがら灰をシリカフェームコンクリートと比較すると、初期強度ではシリカフェームコンクリートを上回るが、長期強度では6~10%程度下回った。
- 4) RHA II (テキサス産) のおきかえ率と圧縮強度試験においては、おきかえ率10%までは、おきかえ率が増加するに従い、強度は増加し、それ以上になると強度は減少した。ちなみに0%と比較して10%では1.2%の増加であり、20%、30%では1.9%、6.0%の減少であった。
- 5) もみがら灰を用いたアルカリ骨材反応試験では、セメント量の10%をもみがら灰でおきかえれば16週目までの膨張率はほぼ0%となり、3種のもみがら灰ともアルカリ骨材反応の抑制効果があることが認められた。
- 6) 透水試験結果より、水セメント比45%の場合は、3種のもみがら灰を混入したコンクリートは、シリカフェームコンクリートよりも水密性が低くなった。しかしながら、水セメント比が55%、65%と高くなるにつれて、もみがら灰混入コンクリートの方が、シリカフェーム混入コンクリートよりも水密性が高くなった。

以上のことから、著者らの使用したもみがら灰はコンクリート用混和材として有用性の高いものであることが認められた。

#### 参考文献

- [1]土木学会：「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文集、1993. 11
- [2]P. K. Mehta: Rice Husk Ash-A Unigue Supplementary Cementing Material, *Advances in Concrete Technology*, pp. 407-431, May. 1992
- [3]Y. Yamamoto and S. M. Lankho, Production and Utilization of Active Rice Husk Ash as a Substitute for Cement, *Proc. of JSCE No. 32*, pp. 157-166, june. 1982
- [4]杉田修一・庄谷征美・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, Vol. 15, No. 1*, pp. 321-326, 1993
- [5]原田耕司・大矢一夫・松井健一：珪灰を混和したモルタルの基礎性状、*コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1*, pp. 327-332, 1993
- [6]Luxan, M. P., et al.: Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity of Natural Products by Conductivity Measurement, *Cement Concrete Research*, Vol. 19, pp. 63-68, 1989
- [7]国分正胤編：最新土木材料実験、技報堂出版、pp. 287-291、1976