

論文 もみ殻灰を多量に用いたコンクリートの強度発現性状

和田 一朗*¹・前田 直己*²・久松 光世*³・川上 洵*⁴

要旨：セメントの70%以上をもみ殻灰、水酸化カルシウム、および無水セッコウで置換したモルタルおよびコンクリートの強度発現性状を検討した。その結果、もみ殻灰および水酸化カルシウムを混和したモルタルおよびコンクリートは、初期材齢で強度が低いものの、材齢28日では、セメントのみを用いたものと同程度の圧縮強度を示した。

キーワード：もみ殻灰、圧縮強度、ポゾラン反応、水酸化カルシウム、無水セッコウ

1. はじめに

土木・建築・セメント業界においても環境負荷低減に関する取組みが活発化し、ここ数年の間に、解体コンクリートの再利用をはじめ、リサイクル技術が急速に広がっている。また、耐久性に優れたコンクリート構造物を構築し、長期間使用することにより消費される資源やエネルギーを削減する、といった提案も行われるようになりつつある。

コンクリートの環境負荷を低減させる方法の一つとして、その製造に伴い多量のCO₂を発生させるセメントの使用量を少なくし、ポゾラン等のセメント代替材料を使用することが考えられる^{1), 2)}。ポゾランの利用は、CO₂発生量の削減のみならず、資源の有効利用という観点からも評価できる。しかしながら、ポゾランを用いたコンクリートでは、一般に初期材齢の強度発現性が悪いとされている。

もみ殻は米の脱穀により毎年定量的に副産され、世界全体では年間約1億トンのもみ殻が発生しているものの、有効に利用されているとは言いがたい。もみ殻を焼成して得られるもみ殻灰は、高いポゾラン活性を有し、セメント代替材料としての利用が期待でき、これまで、国内

外の研究機関により、もみ殻灰のコンクリート混和材としての利用に関する多くの研究がなされてきた^{3), 4)}。また、ポゾラン活性度の高いもみ殻灰の製造に関する研究も行われている⁵⁾。もみ殻の焼成によってもCO₂が発生するが、このCO₂は植物が生長する過程で固定化したものであり、大気中のCO₂濃度を高くするほどのものではない。

本論文では、セメントの70%以上をもみ殻灰、水酸化カルシウム、および無水セッコウで置換したモルタルおよびコンクリートの強度発現性状を明らかにするものである。

2. 試験概要

2.1 使用材料

結合材として、普通ポルトランドセメント(C, 密度: 3.16g/cm³)、もみ殻灰(RHA)、水酸化カルシウム(CH, 密度: 2.30g/cm³, Ca(OH)₂: 97.0%)、およびⅡ型無水セッコウ(CS, 密度: 2.92g/cm³, Ca(SO)₄: 96.2%)を用いた。RHAの物理的性質および化学組成を表-1に示す。

細骨材(S)および粗骨材(G)には岩手県米里産砕砂および碎石を使用した。それらの物理的性質を表-2に示す。

* 1 (株)前田先端技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)

* 2 (株)前田先端技術研究所 社長

* 3 マエタ エコ ケア(株) 常務取締役 (正会員)

* 4 秋田大学教授 工学資源学部 土木環境工学科 工博 (正会員)

表-1 RHAの物理的性質および化学組成

物理的性質			化学組成 (%)								
密度 (g/cm ³)	平均粒径 (μ m)	比表面積 (m ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	ig.loss
2.14	6.86	32.4	86.5	0.2	2.2	0.6	2.2	0.0	0.1	0.0	4.4

高性能減水剤(SP)として、ポリカルボン酸系のものを使用した。

2.2 配合

モルタルおよびコンクリートの配合を表-3から表-5にそれぞれ示す。それぞれの配合名は、水結合材比、モルタル(M)またはコン

表-2 骨材の物理的性質

骨材の種類	最大寸法 (mm)	粗粒率	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
細骨材	5.0	2.79	2.77	1.37
粗骨材	20.0	6.79	2.80	0.46

表-3 モルタルの配合 (水結合材比: 0.60)

配合名*	水結合材比	RHA 置換率 (%)	CH 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					SP添加率 (%)	フロー
				W	C	RHA	CH	S		
60M-10 0 0	0.60	0	0	323	539	0	0	1351	0	235
60M-3 7 0		70	0	290	145	338	0	1351	2.5	190
60M-361CH		60	10	290	145	290	48	1351	2.0	172
60M-352CH		50	20	290	145	242	97	1351	2.0	204

注*: 水結合材比 モルタル・C RHA CHの割合

表-4 モルタルの配合 (水結合材比: 0.90)

配合名	水結合材比	RHA 置換率 (%)	CH or CS 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)						フロー
				W	C	RHA	CH	CS	S	
90M-10 0 0	0.90	0	0	384	426	0	0	0	1279	-
90M-3 7 0		70	0	367	122	285	0	0	1223	190
90M-361CH		60	10	367	122	245	41	0	1225	172
90M-352CH		50	20	368	123	204	82	0	1226	188
90M-271CH		70	10	365	81	284	41	0	1217	174
90M-262CH		60	20	366	81	244	81	0	1219	178
90M-361CS		60	10	367	122	245	0	41	1225	203
90M-352CS		50	20	368	123	204	0	82	1226	215
90M-271CS		70	10	365	81	284	0	41	1217	192
90M-262CS		60	20	366	81	244	0	81	1219	204

表-5 コンクリートの配合

配合名	水結合材比	RHA 置換率 (%)	CH or CS 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)
				W	C	RHA	CH	CS	S	G	
90C-3 7 0	0.90	70	0	219	73	170	0	0	730	1106	11.5
90C-361CH		60	10	219	73	146	24	0	730	1108	12.0
90C-352CH		50	20	219	73	122	49	0	731	1108	13.0
90C-271CH		70	10	218	48	170	25	0	727	1103	8.5
90C-262CH		60	20	219	48	146	48	0	728	1104	9.5
90C-361CS		60	10	220	73	146	0	24	732	1109	11.0
90C-352CS		50	20	220	74	122	0	49	734	1113	13.5
90C-271CS		70	10	219	49	170	0	25	729	1106	7.0
90C-262CS		60	20	219	48	146	0	48	732	1109	12.5

クリート(C)の種別, セメント, RHA, および CHまたはCSの割合を表す。モルタルの配合は, 水結合材比を0.60または0.90, RHA置換率は, 50~70%, CHまたはCS置換率は0~20%とした。水結合材比が0.60のモルタルには, 高性能減水剤を用いた。コンクリートの配合は, 水結合材比が0.90のモルタルと同様のRHA置換率, CHまたはCS置換率とし, 高性能減水剤は用いなかった。高性能減水剤を用いずに, RHA置換率50~70%とした場合, 水結合材比が小さいと流動性が得られないため, 水結合材比を0.90と選定した。水結合材比が0.90のモルタルの単位結合材量を図-1に示す。

2.3 試験方法

(1) 供試体の作製

モルタルおよびコンクリートは, 結合材および骨材を投入し1分間空練りし, その後練混ぜ水および高性能減水剤を加えて3分間練り混ぜて調製した。

調製した後, モルタルは寸法 $\phi 5 \times 10$ cmに, コンクリートは寸法 $\phi 10 \times 20$ cmに成形し, 1日湿空養生(20℃, 85%R.H.)後, 所定の材齢まで水中養生(20℃)を行い, 供試体とした。

(2) 強度試験

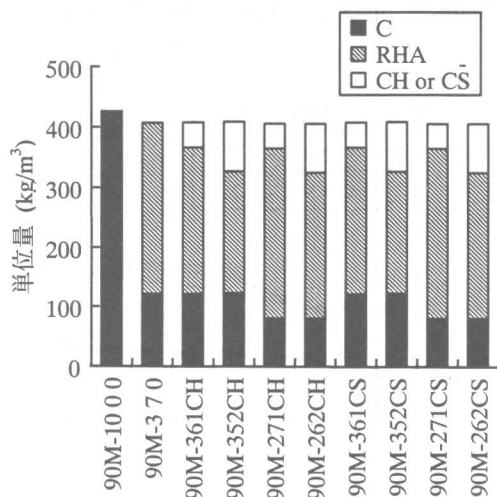


図-1 水結合材比0.90のモルタルの単位結合材量

モルタルおよびコンクリートは, 所定の材齢において, 供試体の圧縮強度試験をJIS A 1108に準じて行った。また, 材齢28日において, コンクリートの引張強度試験をJIS A 1113に準じて行った。

3. 試験結果および考察

水結合材比が0.5以下の配合では, RHAを多量に混和した場合, モルタルおよびコンクリートの粘性が高くなり, ワーカビリティの低下が問題となるが, 今回試験した配合の範囲では, いずれの配合においても良好なワーカビリティを示した。配合の種類に関わらず, RHAを多量に用いたモルタルおよびコンクリート共に, ブリーディングは認められなかった。

水結合材比が0.60のモルタルの圧縮強度を図-2に示す。セメントのみを用いたプレーンモルタル(60M-10 0 0)と, RHAをセメントの70%と置換したモルタル(60M-3 7 0)との比較では, いずれの材齢においてもプレーンモルタルの方が若干高い圧縮強度を示す。RHAは, セメントの水和に伴い生成される水酸化カルシウムとポゾラン反応し, ケイ酸カルシウム水和物を生成するが, RHAをセメントの70%と置換した

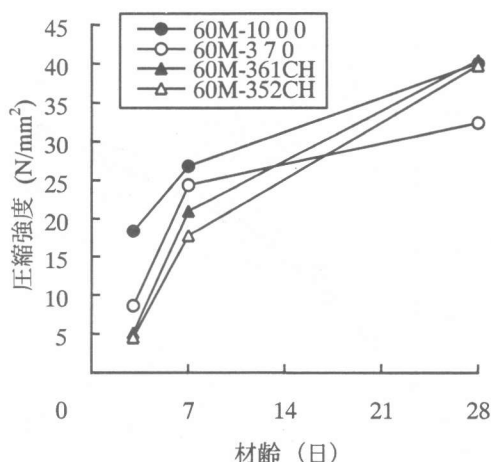


図-2 モルタルの圧縮強度発現 (水結合材比: 0.6)

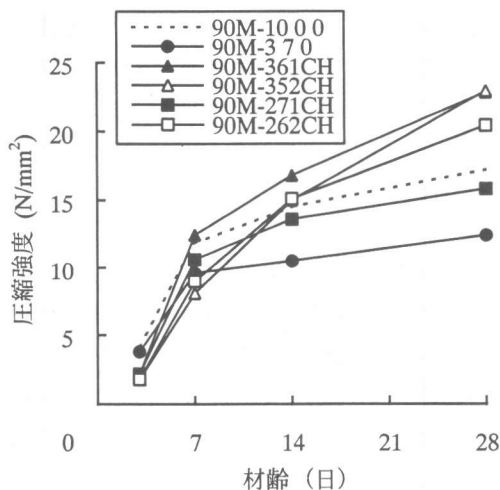


図-3 モルタルの圧縮強度発現
(水結合材比: 0.90, CH添加系)

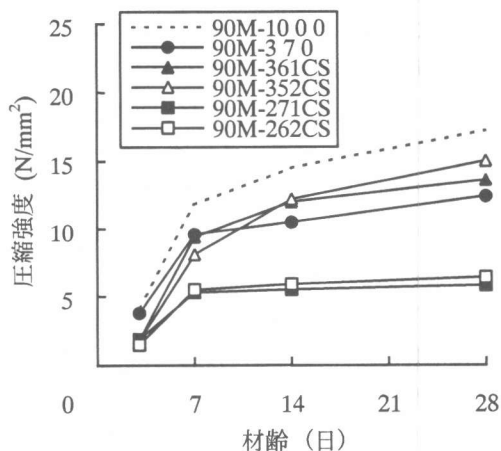


図-4 モルタルの圧縮強度発現
(水結合材比: 0.90, CS添加系)

場合では、ポゾラン反応に必要な水酸化カルシウムが不足していることが考えられる。CHを添加したモルタルにおいては、初期材齢ではCHを添加しないモルタルに比べて強度が低いものの、材齢28日ではプレーンモルタルと同程度の圧縮強度を示し、更に長期材齢ではプレーンモルタルよりも高い強度を示すことが予想される。

水結合材比が0.90のモルタルの圧縮強度を図-3および図-4に示す。水結合材比が0.60のモルタルと同様に、セメントのみを用いたプレ

ーンモルタル(90M-1000)とRHAをセメントの70%と置換したモルタル(90M-370)を比較すると、いずれの試験材齢においてもプレーンモルタルの方が若干高い圧縮強度を示す。CH添加系では、CHを添加したモルタルの圧縮強度は、初期材齢ではCHを添加しないモルタルに比べて低いものの、材齢28日ではプレーンモルタル以上の圧縮強度を示す。CS添加系では、特に初期材齢における圧縮強度が小さい。CSを10%置換したモルタルの材齢28日における圧縮強度は、RHAをセメントの70%と置換して、

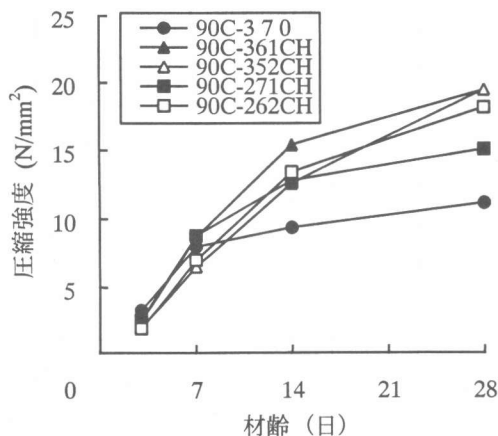


図-5 コンクリートの圧縮強度発現
(CH添加系)

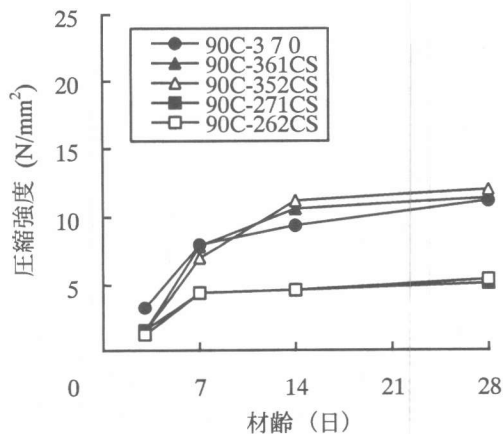


図-6 コンクリートの圧縮強度発現
(CS添加系)

CS未添加モルタル（90M-3 7 0）に比べれば、若干高い圧縮強度を示すが、セメントのみを用いたプレーンモルタルの圧縮強度よりは低い。CSを20%添加したモルタルでは、他の配合のモルタルに比べて圧縮強度が低く、特に材齢7日以降の強度の増進がほとんど認められない。これは、添加率20%ではCSが過剰であり、エトリンガイトの生成量が多いために強度が低いものと考ええる。

コンクリートの圧縮強度を図-5および図-6に示す。RHAのみを用いたコンクリート（90C-3 7 0）は、CHまたはCSを添加したコンクリートに比べて材齢3日では最も高い圧縮強度を示すが、材齢7日以降の強度増進の程度が小さい。CHを添加したコンクリートでは、材齢14日までは、ほぼ直線的に強度が増加し、材齢28日ではCHを添加しないコンクリートに比べて30%以上高い圧縮強度を示す。初期材齢においては、CH置換率の増加に伴い、圧縮強度が低くなる傾向が認められるが、材齢の経過に伴い、その傾向は認められなくなり、モルタルの結果と同様に、長期材齢では最も高い圧縮強度を示すものと考えられる。一方、CSを混和したコンクリートでは、特に材齢3日での圧縮強度が低い。また、いずれの材齢においてもCHを混和したコンクリートに比べて圧縮強度は低い傾向にある。

水結合材比が0.90で、同一RHA置換率および同一CHまたはCS置換率のモルタルの圧縮強度とコンクリートの圧縮強度の関係を図-7に示す。両者の間には高い相関関係が認められる。本研究の範囲では、コンクリートはモルタルに比べて低い圧縮強度を示し、モルタルの圧縮強度の約87%である。

コンクリートの材齢28日における引張強度を図-8および図-9に示す。圧縮強度と同様に、CHを添加したコンクリートの引張強度は、RHAのみでセメントを置換したものに比べて高い値を示す。また、置換率にかかわらず、CS

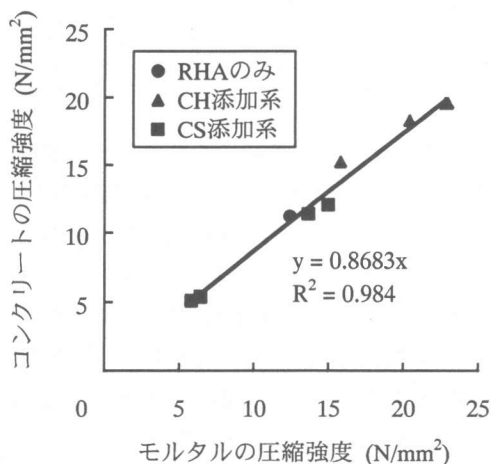


図-7 モルタルの圧縮強度とコンクリートの圧縮強度の関係

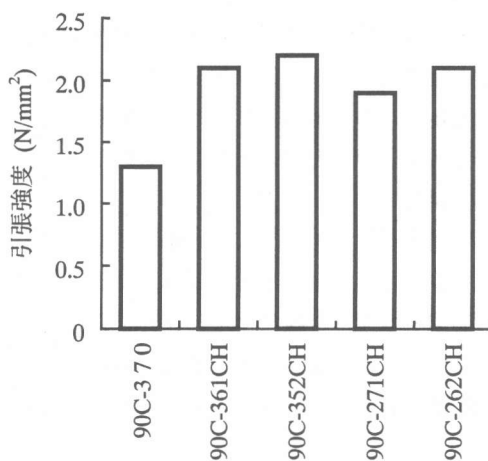


図-8 コンクリートの引張強度（CH添加系）

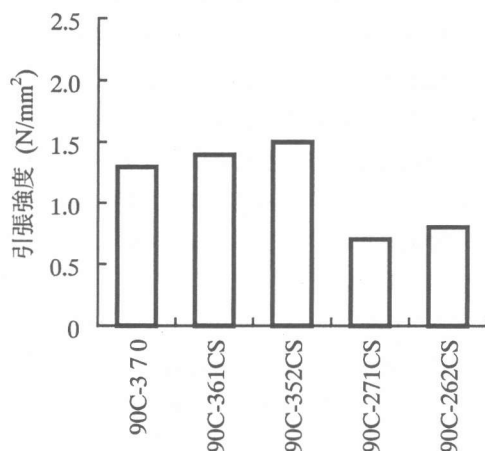


図-9 コンクリートの引張強度（CS添加系）

を混和したコンクリートの引張強度は、CHを混和したコンクリートに比べて低いことが分かる。

コンクリートの材齢28日における圧縮強度と引張強度の関係を図-10に示す。CH添加系、CS添加系共に、コンクリートの圧縮強度と引張強度の間の相関性は高い。すべての配合のコンクリートについて、圧縮強度と引張強度の関係を一次式に近似し、その傾きからぜい度係数(f_t/f_c)を求めると約8.5であり、同程度の強度のコンクリートと大きな違いはない。

4. 結論

本研究の結果を以下に要約し、結論とする。

- (1) 水結合材比が0.60では、セメントの70%をもみ殻灰および水酸化カルシウムで置換したモルタルの材齢28日における圧縮強度は、セメントのみを用いたプレーンモルタルと同程度である。
- (2) 水結合材比が0.90では、水酸化カルシウムを添加したモルタルおよびコンクリートは、初期材齢では水酸化カルシウムを添加しないモルタルに比べて強度が低いものの、材齢28日ではプレーンモルタル以上の圧縮強度を示す。
- (3) モルタルの圧縮強度とコンクリートの圧縮強度の間には高い相関関係が認められる。本研究の範囲では、コンクリートはモルタルに比べて低い圧縮強度を示し、モルタルの圧縮強度の約87%である。
- (4) もみ殻灰および無水セッコウでセメントを置換したモルタルおよびコンクリートは、水酸化カルシウムを添加したものに比べて強度が低い。
- (5) すべての配合のコンクリートにおいて、圧縮強度と引張強度との間には高い相関性があり、コンクリートのぜい度係数は約8.5である。

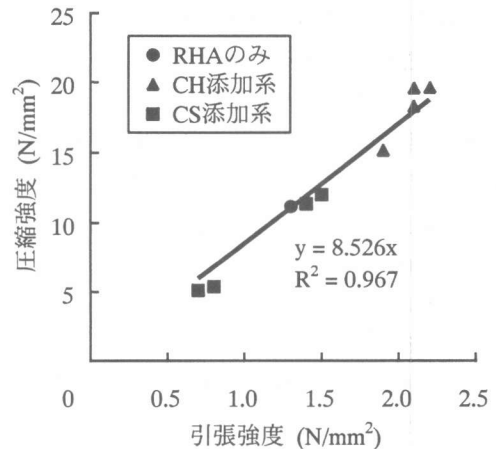


図-10 コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係

参考文献

- 1) Mehta, P.K.: Concrete Technology for Sustainable Development, Concrete International, Vol.21, No.11, pp.47-53, Nov. 1999
- 2) Mehta, P.K. and Nakagawa, I.: Role of Rice-Husk Ash and Silica Fume in Sustainable Development, International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development in the Twenty-First Century, Hyderabad, India, pp.222-241, Feb. 1999
- 3) Mehta, P.K.: Rice Husk Ash--A Unique Supplementary Cementing Material, Advances in Concrete Technology (2nd Edition, Editor: V.M. Malhotra), CANMET, pp.419-443, 1994
- 4) 和田一朗, 河野俊夫, 川上洵, 前田直己: 高活性もみ殻灰の混和がコンクリートの強度特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.175-180, 1999
- 5) Wada, I., Kawano, T. and Maeda, N.: Development of a Stirring Furnace for Production of High Reactive Rice Husk Ash, Proceedings of the International Agricultural Engineering Conference, Bangkok, Thailand, pp.541-549, Dec. 1998