

論文 粉砕した国内産もみ殻灰のコンクリートへの適用に関する検討

島山 繁忠*1・佐川 康貴*2・原田 耕司*3・木村 宇希*4

要旨：国内のもみ殻処理炉により排出されたもみ殻灰のコンクリート用結合材への有効利用を目的に、まずもみ殻灰の粉砕方法の違いによるモルタルのフレッシュ性状および強度発現性について検討を行った。次に、モルタルの結果を踏まえて決定したもみ殻灰を混和したコンクリートのフレッシュ性状および強度特性の検討を行った。モルタルの結果より、粉砕の生産性も踏まえるとハンマーミルにより粉砕したもみ殻灰が最も結合材として適していることを確認した。コンクリートでは、もみ殻灰の混和により混和剤の使用量は増えるものの、圧縮強度ならびに割裂引張強度の長期強度発現性を確認した。

キーワード：もみ殻灰, フレッシュ性状, 圧縮強度, 割裂引張強度

1. はじめに

もみ殻は、もみ（米）の質量の約 20%の割合で農業残渣として必ず排出され、日本国内では年間約 170 万トンのもみ殻が発生している¹⁾とされている。また、排出されたもみ殻の約 3 割は活用されておらず²⁾、その利活用が課題となっている。そのため著者らは、非晶質でポゾラン活性を有するもみ殻灰を安定的に焼成可能な国内のもみ殻処理炉³⁾から排出されるもみ殻灰を、コンクリート用結合材として有効活用することを目的に、基礎検討として未粉砕のもみ殻灰混和モルタルのフローおよび圧縮強度について、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和したモルタルと比較検討を行った⁴⁾。その結果、圧縮強度の長期強度はフライアッシュと同程度となることを確認したものの、もみ殻灰混和モルタルを他の試験体と同程度のフローとするためには混和剤を多量に用いなければならない、既往の研究⁵⁾と同様、使用したもみ殻灰においてもフレッシュ性状に課題が残った。

もみ殻灰を混和した場合のフレッシュ性状に関する既往の研究について、梶原ら⁶⁾は未粉砕のもみ殻灰では単位水量の増加、あるいは水セメント比を高めることにより、もみ殻灰を混和材として利用可能としている。また、石黒⁷⁾らはもみ殻灰をボールミルによる粉砕で、もみ殻灰の粒度を粉砕時間により調節し、粒度の細かいもみ殻灰の方が粗いものよりも高性能 AE 減水剤の使用量が少なくかつフロー値の低下は小さいことを確認している。森脇ら⁸⁾はもみ殻中のアルカリ金属などの不純物を除去する処理を行ってから焼成したもみ殻灰に、さらに球状化処理を行ってボールベアリング効果を有するもみ殻灰を生成することで、フロー値の改善を確認している。

本研究では、粉砕によりもみ殻灰のフレッシュ性状の改善を、粉砕作業の生産性を踏まえた上で検討するため、

石うすまたはハンマーミルを用いて粉砕を行ったもみ殻灰について検討を行った。まず粉砕方法の違いによる影響について、モルタルによりフローおよび強度発現性の検討を行った。次に、モルタルの試験を踏まえて決定したもみ殻灰を用いて、コンクリートのフレッシュ性状および強度発現性について検討を行った。

2. もみ殻灰の基礎物性

2.1 粉砕方法

もみ殻灰の粉砕は石うすまたはハンマーミルを用いて行った。石うすは直径 30cm の石うすを用い、人力にて石うすを回してもみ殻灰を挽き、粉末状に粉砕した。ハンマーミルはスイングハンマー式粉砕機を用い、ハンマー回転速度は 8,500rpm、スクリーンは φ1.0mm とした。

粉砕前後のもみ殻灰の外観を写真-1 に示す。粉砕前は繊維状の形状が判別できるが、粉砕後は繊維状のものは残っておらず、目視で粉状になっていることを確認した。写真-2 に各もみ殻灰の SEM 画像を示す。未粉砕のものは比較的大きな板状のもみ殻灰が散見される。一方、石うすとハンマーミルで粉砕したもみ殻灰は、板状のもみ殻灰はあるものの、その大きさは未粉砕と比較して小さい。また、ハンマーミルで粉砕したものは石うすに比べ、全体的に粒度が細かいことが確認できる。



(a) 粉砕前

(b) 粉砕後（石うす）

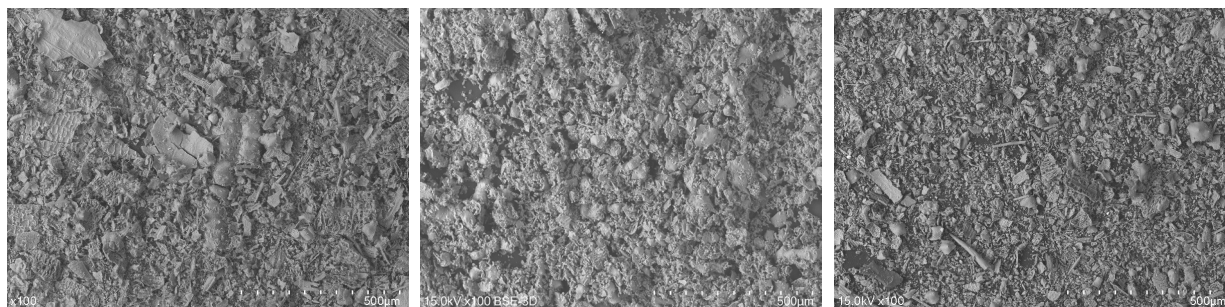
写真-1 もみ殻灰外観

*1 (株)富士ピー・エス 土木本部工務部 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 西松建設(株) 技術研究所 マイスター 博士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学府土木工学専攻



(a) 未粉砕

(b) 石うす

(c) ハンマーミル

写真-2 もみ殻灰 SEM 画像 (倍率×100)

表-1 成分分析結果 (単位: mass%)

	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
もみ殻灰	5.87	88.53	0.16	0.51	0.57	0.34	0.12	0.05	2.97	0.01	0.59	0.13	0.13

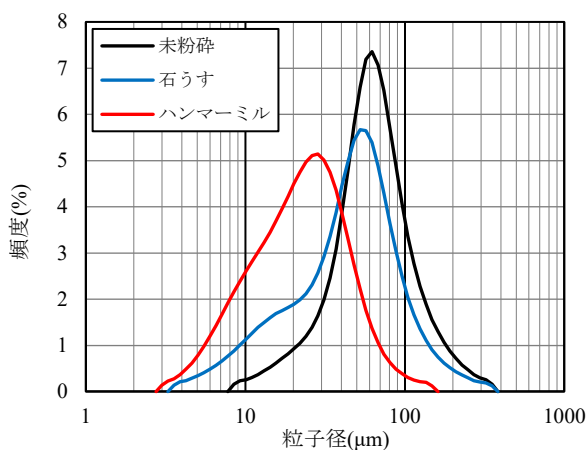


図-1 もみ殻灰の粒度分布

2.2 粒度

図-1 にもみ殻灰の粒度分布を示す。粒度分布は、マイクロトラック粒度分布計を用いたレーザー回折・錯乱法により測定した。図より、未粉砕の粒子径の頻度のピークは60 μm 、石うすは50 μm と、両者のピーク位置の粒径はさほど差はなく、また、最大径はどちらも352 μm であるものの、40 μm 以下の分布では石うすの方が多く、最小径も未粉砕は8.5 μm 、石うすは3.6 μm と粉砕により粒径が細くなっていることが分かる。一方、ハンマーミルで粉砕したもみ殻灰の粒子径の頻度のピークは29 μm 、最大径は148 μm 、最小径は3.0 μm と、石うすよりもさらに細かい結果となり、写真-2に示したSEM画像でももみ殻灰の性状と傾向は一致している。

2.3 化学成分

化学成分の分析は、蛍光X線分析装置を用いたFP法による半定量分析により実施した。本研究で用いたもみ殻灰の化学成分を表-1に示す。もみ殻灰の主成分は二酸化ケイ素(SiO₂)で含有率は約90%と、一般的なフライアッシュと比べて、もみ殻灰のSiO₂の含有率は高いことが分かる。

表-2 Luxan 法における電気伝導率差の評価⁹⁾

ポゾラン活性	伝導率差 Δ_0 (mS/cm)
なし	$\Delta_0 < 0.4$
普通程度	$0.4 \leq \Delta_0 \leq 1.2$
良好	$1.2 < \Delta_0$

表-3 各もみ殻灰の電気伝導率差試験結果

もみ殻灰	Δ_0 (平均値)(mS/cm)
未粉砕	1.13
石うす	1.13

表-4 各もみ殻灰の密度、比表面積および吸湿率

種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (m ² /g)	吸湿率 (%)
未粉砕	2.26	31.79	4.85
石うす	2.21	25.92	4.41
ハンマーミル	2.19	27.40	4.71

2.4 電気伝導率差

粉砕前後のもみ殻灰のポゾラン活性を調べるため、非晶質判定をLuxan法⁹⁾により実施した。表-2にLuxan法における電気伝導率差 Δ_0 (mS/cm)の評価基準を、表-3に試験結果を示す。もみ殻灰の電気伝導率差 Δ_0 の平均値は未粉砕で1.13、石うすによる粉砕で1.13と粉砕の前後で数値に差はなく、いずれも普通程度であり、また、本研究の範囲内では粉砕によるポゾラン活性への影響はほとんどないと考えられる。なお、ハンマーミルで粉砕したもみ殻灰の比表面積は、未粉砕と石うすの間であったことから、電気伝導率差は同程度と考えられる。

2.5 密度、比表面積および吸湿率

表-4に各もみ殻灰の密度(ガス置換法)、比表面積(BET法)および吸湿率(井上らの方法¹⁰⁾を示

す。密度は、粉砕の前後において大きな変化はないものの、比表面積は未粉砕が最も大きい結果となった。これは、もみ殻は非常に多孔質であるため、焼成後のままの状態では比表面積は大きく、一方である程度の粉砕を行うと、多孔質なもみ殻灰が潰されることにより比表面積は減少する傾向が既往の研究¹¹⁾で確認されており、本研究においても同様の傾向であった。また、吸湿率は比表面積に正比例する傾向であり、井上らの結果¹⁰⁾と傾向が一致している。

3. モルタルによる検討

3.1 実験概要

本研究で使用したもみ殻灰の粉砕方法の違いによる影響を確認するため、モルタルのフローおよび圧縮強度試験による強度発現性の検討を行った。

(1) 使用材料

使用材料を表-5に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、水は水道水、細骨材はいわき市好間産の砕砂、もみ殻灰は富山県産米のものを用いた。また、混和剤としてポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能減水剤を使用した。

(2) 配合、練混ぜおよび試験体作製

配合は合計9要因とし、後述するように3回に分けて作製した。モルタルの1バッチ当たりの配合を表-6に示す。事前の試験練りから砂セメント比はS/C=2.0とした。基準試験体となる無混和モルタルをC、C'およびC''、粉砕前のもみ殻灰混和モルタルをR、石うすまたはハンマーミルにより粉砕したもみ殻灰混和モルタルをそれぞれRp、Rphとした。また、セメント質量に対するもみ殻灰の置換率をそれぞれの記号に付記した。なお、Rphの試験体は、試験の都合上20%置換のみとした。

それぞれの置換率で同程度の添加率となるよう、高性能減水剤を表-6に示す割合で添加した。なお、試験体作製時期がCおよびRは夏季(9月)、C'およびRpは冬季(2月)、C''およびRphは春~夏季(6月)と養生温度が異なるため、後述の圧縮強度試験で基準試験体同士でも強度にばらつきが生じていることに留意されたい。

練混ぜはJIS R 5201に基づいて行った。圧縮強度試験用の試験体は、φ50×100mmのプラスチック製円柱型枠で作製した。型枠に流し込んでから約24時間は外気温と同程度の室内に静置し、脱型後は水温20℃で水中養生を行った。

(3) 試験項目

試験はフロー試験および圧縮強度試験を実施した。フロー試験はJIS R 5201に基づき、モルタル練上がり後に15秒間で15回の落下運動を与えてフロー値を測定した。圧縮強度試験はJIS A 1108を参考にして行った。圧縮強

表-5 使用材料

種類	記号	密度 (g/cm ³)	備考
水	W	1.00	いわき市水道水
セメント	C1	3.16	普通ポルトランドセメント
	C2	3.14	早強ポルトランドセメント
もみ殻灰	RHA	2.26	富山県産米 (上段:未粉砕 中段:石うす 下段:ハンマーミル)
		2.21	
		2.19	
粗骨材	G	2.61	東白川郡棚倉町産 砕石 2005
細骨材	S	2.73	いわき市好間産 砕砂
混和剤	SP1	1.06	高性能減水剤 ポリカルボン酸系
	SP2	1.06	AE剤 アルキルエーテル硫酸塩系

表-6 モルタルの配合 (1バッチ当たり)

試験体名	W/B (%)	W (g)	C1 (g)	RHA (g)	S (g)	SP1 ((C+RHA)×%)
C	50	225	450	—	900	0.5
R10			405	45		1.0
R20			360	90		3.0
C'			450	—		0.5
Rp10			405	45		0.9
Rp20			360	90		1.5
Rp30			315	135		2.8
C''			450	—		0.5
Rph20			360	90		1.5

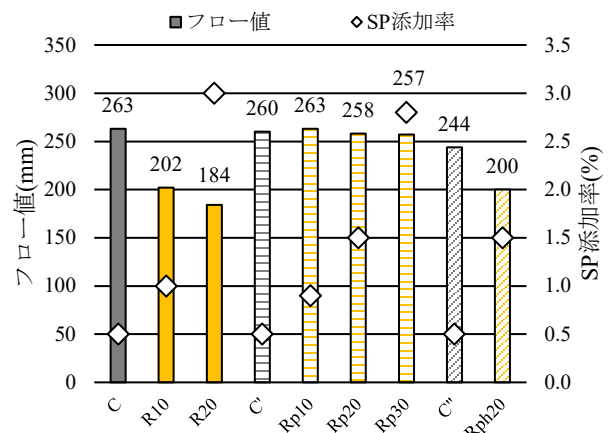


図-2 フロー値およびSP添加率関係

度試験の材齢は、C、R、C'およびRpは材齢1、3、7、28、91日(Rp30のみ2、7、28、91日)において、C''およびRphは試験の都合上材齢3、7、28日において、各要因3体ずつ行った。

3.2 結果および考察

(1) フロー試験

図-2にフロー値およびSP添加率の関係を示す。CとC'およびC''を比較すると、同じSP添加率で同程度のフ

ローであるため、本研究で実施したフロー試験は試験体作製時期によらないと考えられる。それを踏まえて R と Rp の同置換率で比較すると粉砕によるフローの改善効果がよく分かり、特に 20%置換では R の 2 分の 1 の SP 添加率で Rp のフローは 70mm 以上大きい。粉砕によりもみ殻灰の比表面積が減少し、もみ殻灰への水の吸着が減少したため、Rp のフローは R と比べて改善したものと考えられる。Rp と Rph を比較すると、Rp の方が 58mm フロー値は大きい結果であった。これは、Rph の粒度が細かいために粘性が大きくなり、Rp よりもフロー値は小さくなったと考えられる。R と Rph を比較すると Rph は R の SP 添加率の 2 分の 1 で同程度のフロー値であることから、R と比べ Rph もフレッシュ性状は改善していることが確認できる。

(2) 圧縮強度

図-3 に各材齢における圧縮強度試験結果を示す。前述のとおり試験体の養生温度が異なるため、基準試験体である C、C'および C''は、同配合であるにもかかわらず強度にばらつきが生じたと考えられる。そのため、R、Rp および Rph を単純に横並びで強度比較はできないと考えられ、ここでは同時期に作製した試験体における置換率の影響について述べる。

まず粉砕前のもみ殻灰である R について、いずれの材齢においても置換率が増えるにつれて基準試験体 C に対して強度が低くなっていることが分かる。これは、もみ殻灰への水の吸着が大きく、セメントとの水和反応があまり進まなかったと推察される。石うすで粉砕したもみ殻灰の Rp では、材齢 7 日までは R と同様に置換率が増えるにつれて強度低下が大きくなっている。一方、材齢 28 日以降では基準試験体 C'に対しての強度低下は小さく、特に材齢 91 日ではほとんど差はない。R と比べてもみ殻灰の比表面積が小さくなったことにより、もみ殻灰への水の吸着が R よりも少なくなり、セメントの水和反応ならびにポズラン反応が進行したためと考えられる。Rph はさらに強度低下は小さく、材齢 28 日では基準試験体 C''の強度を超える結果であった。

図-4 に各材齢における活性度指数を示す。R は C を、Rp は C'を、Rph は C''をそれぞれ基準としている。図より、材齢 91 日において R20 は 80%未満であるのに対し、Rp はいずれの置換率も 90%を超えており、特に Rp10 は 99%と、C'と同等の強度発現であった。さらに、Rph20 では材齢 7 日時点で 95%であり、材齢 28 日で 103%であった。このことから、本研究の範囲内ではもみ殻灰のハンマーミルによる粉砕が最も強度発現に寄与すると考えられた。

(3) もみ殻灰の粉砕方法の決定

以上の検討より、フレッシュ性状は石うすの方がハン

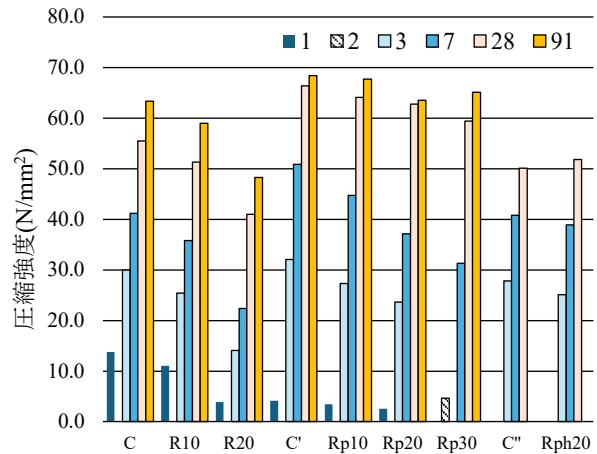


図-3 各材齢における圧縮強度試験結果

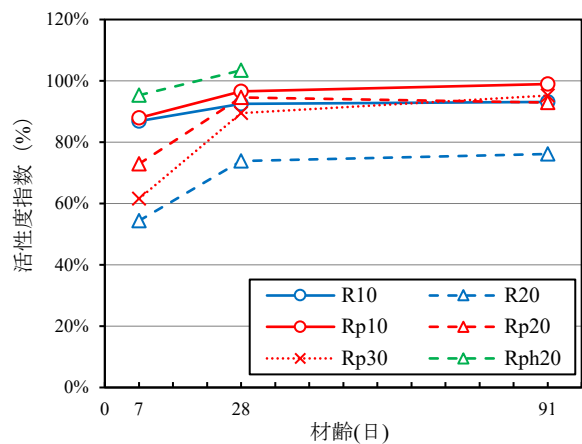


図-4 各材齢における活性度指数

マーミルよりも良好な結果であったが、強度発現性はハンマーミルの方が優れる結果であった。もみ殻灰の粉砕の生産性も考慮し、コンクリートにおけるフレッシュ性状および強度発現性の実験は、ハンマーミルにより粉砕したもみ殻灰にて検討を行うこととした。

4. コンクリートでの実験

4.1 実験概要

(1) 使用材料

使用材料はモルタルと同様に表-5 に示したものをを使用した。セメントはプレキャスト製品への適用を考慮して早強ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は東白川郡棚倉町産の 2005 砕石を用いた。また、AE 剤としてアルキルエーテル硫酸塩を主成分とするものを使用した。

(2) 配合および練混ぜ

コンクリートの配合を表-7 に示す。配合は計 3 種類とし、基準試験体を N、セメントの 10%、20%をもみ殻灰に質量置換したものをそれぞれ Rph10、Rph 20 とした。また、セメントともみ殻灰を結合材とし、水結合材比 W/B は 50.0%、細骨材率 s/a は 47.0%とした。なお、目標

表-7 コンクリートの配合およびフレッシュ試験結果

試験体	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
			W	C2	RHA	S	G	SP1	SP2			
N				330	0	843	991	3.30 (1.0%)	0.04 (0.012%)	12.0	4.7	27
Rph10	50.0	47.0	165	297	33	838	984	4.62 (1.4%)	0.06 (0.018%)	13.5	6.0	26
Rph20				264	66	832	978	6.93 (2.3%)	0.11 (0.032%)	18.0	4.5	25

*()内は結合材 (C2+RHA) に対する混和剤の添加率

スランブは 12.0±2.5cm, 目標空気量は 4.5±1.5%とした。練混ぜは 2 軸強制練りミキサを用いて行った。まず細骨材, セメント, もみ殻灰の順に投入した。30 秒間空練りした後にミキサを停止し, 粗骨材, 水の順に投入してから累計 2 分間練り混ぜた。試験体の作製は JIS A 1132 に準拠し, φ100×200mm のプラスチック製円柱型枠で作製した。試験体打設後の約 24 時間は外気温と同程度の室内に静置し, 脱型後は水温 20°C の養生槽で水中養生を行った。なお, いずれの配合も夏季 (8 月および 9 月) に行った。

(3) 試験項目

試験はフレッシュ試験 (スランブ試験および空気量試験), 圧縮強度試験 (JIS A 1108), 静弾性係数試験 (JIS A 1149) および割裂引張強度試験 (JIS A 1113) を行った。圧縮強度試験は材齢 3, 7, 28, 91 日において, 割裂引張強度試験は材齢 7, 28, 91 日において各要因 3 体ずつ行った。

4.2 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ試験の結果を表-7 に示す。なお, Rph20 のスランブは 18.0cm と目標値を大きく超えているが, 直前の試験において, SP1, SP2 の添加率がそれぞれ 2.5%, 0.012% の時, スランブおよび空気量はそれぞれ 18.0cm, 1.6%, SP1, SP2 の添加率がそれぞれ 2.0%, 0.030% の時, スランブおよび空気量はそれぞれ 6.5cm, 4.0% となり, 材料のストックの都合上, Rph20 の試験体は表に示すフレッシュ性状のコンクリートで作製した。それらの結果を踏まえた上で考察すると, コンクリートにおいても, もみ殻灰の置換率が増えるにつれ, 目標スランブおよび空気量を満たすための混和剤量は増える結果であった。

(2) 硬化性状

圧縮強度試験の結果を図-5 に, 割裂引張強度試験の結果を図-6 にそれぞれ示す。いずれの強度試験も材齢 7 日までは基準試験体 N が最も強度は高いが, 材齢 28 日以降は Rph20, Rph10, N の順に高くなり, 特に材齢 91 日においては, Rph20 は N に対しいずれの強度も 20% 以上高くなった。これは, もみ殻灰のポズラン反応により長期強度が増進したと考えられる。

図-7 に圧縮強度-静弾性係数関係を示す。グラフの

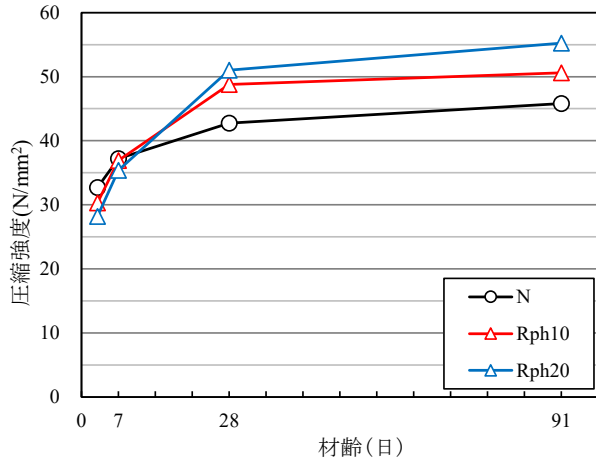


図-5 コンクリートの圧縮強度試験結果

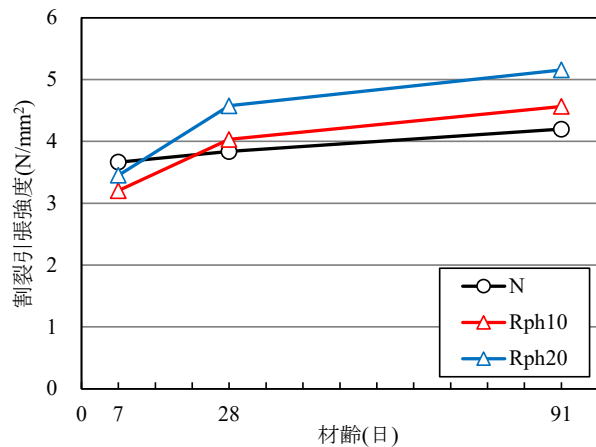
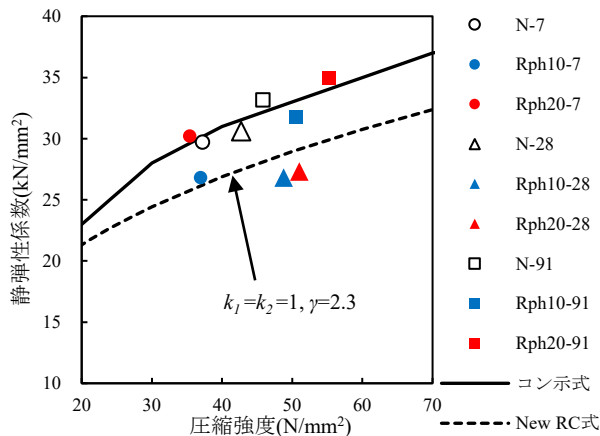


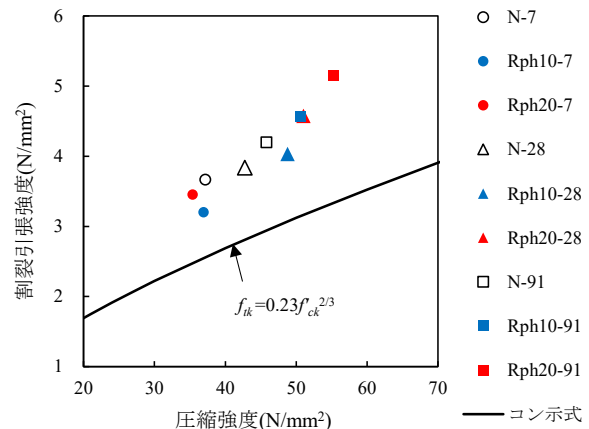
図-6 コンクリートの割裂引張強度試験結果

凡例は, プロットは「試験体名-材齢」で表している。また, 黒線はコンクリート標準示方書¹²⁾のコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係式 (以下, 割裂引張強度も合わせてコン示式と称す) を, 破線は JASS 5¹³⁾に記載されている New RC 式を示している。もみ殻灰を混和した一部試験体 (Rph10-7, Rph10-28, Rph20-28) はコン示式の静弾性係数を下回っており, この原因は現時点で把握できていない。その他の試験体においてはおよそコン示式に沿って分布していることが分かる。

図-8 に圧縮強度-割裂引張強度関係を示す。グラフの凡例のプロットは図-7 と同様に表している。また,



図一七 圧縮強度－静弾性係数関係



図一八 圧縮強度－割裂引張強度関係

黒線はコンクリート標準示方書¹⁾のコンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係式を示している。図より、いずれの試験体もコン示式を上回っており、本研究で使用したもみ殻灰を混和したコンクリートにおいても、割裂引張強度の式は適用できることが示唆された。

5. まとめ

フレッシュ性状の改善を目的に、石うすまたはハンマーミルを用いてもみ殻灰を粉砕し、モルタルおよびコンクリートにおいてフレッシュ性状および強度発現性の検討を行った。本研究で得られた知見を次に示す。

- (1) モルタルでの検討において、フレッシュ性状ではハンマーミルより石うすで粉砕したもみ殻灰の方が良好であったが、強度発現性ではハンマーミルの方が優れる結果であった。
- (2) コンクリートでの実験において、材齢 28 日以降の圧縮強度および割裂引張強度は、基準試験体を超える強度を確認した。ポゾラン反応による長期強度発現によるものと考えられた。
- (3) 静弾性係数について、もみ殻灰を混和した一部試験体でコン示式よりも低い結果であったが、その他はおおむねコン示式に沿って分布した。
- (4) 割裂引張強度もコン示式以上の強度を示し、本研究で使用したもみ殻灰を混和したコンクリートは、割裂引張強度の式を適用できることが示唆された。

参考文献

- 1) 環境省環境再生・資源循環局：令和 4 年度 廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量 実態調査報告書，p.7，2023.3
- 2) 農林水産省参考資料：https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/PDF/attach/pdf/keikaku_sakutei-30.pdf（閲覧日：2024 年 5 月 8 日）
- 3) NSIC(株)HP：https://www.nsic-silica.com/product/chaff/

（閲覧日：2025 年 1 月 8 日）

- 4) 畠山繁忠，佐川康貴，原田耕司，木村宇希：国内で排出されるもみ殻灰の利活用に関する検討，プレストレストコンクリート工学会 第 33 回シンポジウム論文集，pp.411-414，2024.10
- 5) たとえば，梶原教裕，上原匠，齋藤和秀，樋口祐治：火力発電所から排出される珪殻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.
- 6) 梶原教裕，上原匠，齋藤和秀：未粉砕処理の珪殻灰を混入したコンクリートの特性，コンクリート工学論文集，Vol.28，pp.1-13，2017
- 7) 石黒覚：珪殻灰混合セメントを用いたモルタルの強度特性，農業土木学会論文集，No.210，pp.83-88，2000.12
- 8) 森脇慶幸，周藤将司，梅田純子，道浦吉貞：バイオシリカのコンクリート混和材としての利用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.145-150，2017.
- 9) Luxan.M.P., et al.: Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement, Cement and Concrete Research, Vol.19, pp.63-68, 1989.1
- 10) 井上耕三，原尚道：もみがら灰の加熱条件とその性状，無機マテリアル，Vol.3，Jul. pp.312-318，1996
- 11) G. C. Cordeiro et al.: Use of ultrafine rice husk ash with high carbon content as pozzolan in high performance concrete. Materials and Structures, Vol.42, pp.983-992, 2009
- 12) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2023.3
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，p.55，2018.12