論文　もみ殻灰混和モルタルの振動締固め効果に関する研究

徳重　英信[*1]・川上　洵[*2]・和田　一朗[*3]

要旨：低水結合材比のもみ殻灰混和コンクリートはフレッシュ時に高粘性を有し，適切な締固め方法を選定する必要がある。本研究は、もみ殻灰混和コンクリートの締固め方法に関する基礎的検討として，フロー一定のもみ殻灰混和モルタルを使用し、振動締固め時の振動数と振動時間がエントラップドエア量に及ぼす影響を明らかにした。また，硬化後の力学的性質との関係，さらに混和材無混和モルタルおよびシリカフューム混和モルタルの振動締固め効果との比較・検討を行ったものである。その結果，エントラップドエア量および硬化後の力学的特性に対し，振動数が最も大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

キーワード：もみ殻灰，振動締固め，振動数，振動時間，空気量，圧縮強度，弾性係数

1.　はじめに

近年の環境負荷低減に関する活動の活発化に伴い，コンクリートの環境負荷を低減する方法の一つとして、フライアッシュやシリカフューム等のポゾラン材料のセメント代替材料としての利用がさらに増加することが考えられる。著者らは農業廃棄物であるもみ殻を燃焼したもみ殻灰を，高活性ポゾラン材料としてコンクリート混和材料に適用する研究を継続しており，550℃以下の低温で 50 分以上の長時間，もみ殻を燃焼することにより，比表面積が大きく，強熱減量の小さいもみ殻灰の製造が可能[1)]となることを明らかにしている。また，低水結合材比でこのもみ殻灰を混和したモルタルおよびコンクリートは高強度を呈し[2)]，さらに塩化物イオン浸透性や耐凍害性等の耐久性についても高い性能を示す[3)]ことも明らかにしてきた。

高活性もみ殻灰を混和したコンクリートは，高強度・高耐久性を有するコンクリートに適用することが可能であるが，高活性もみ殻灰の比表面積が一般のポゾラン材料に比べて非常に大きいため，フレッシュ時の粘性が高くなる。そのため，振動締固めを行ってもエントラップドエアの除去が困難となり，硬化後に安定した力学的特性を得るためには，施工時の締固め方法を適切に選定することが重要となる。

本研究では，もみ殻灰混和コンクリートを振動締固めにより施工する際に，締固め時間，振動数を選定するための基礎的資料として，フロー一定のもみ殻灰混和モルタル，シリカフューム混和モルタルおよび混和材無混和モルタルを用い，振動締固め効果について空気量の観点から検討を行ったものである。

2.　実験概要

2.1　使用材料，配合および練混ぜ

(1)　使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3）を，細骨材には玄武岩質安山岩系の岩手県米里産砕砂(最大粒径：5mm, F.M.：2.97, 表乾密度：2.76g/cm^3, 吸水率：1.5%)を使用した。混和材にはもみ殻灰（RHA）およびシリカフューム（SF）を使用した。**Table 1** に混和材の物理的および化学的性質を示す。また，高性能減水剤(SP)にはポリカルボン酸系のものを使用した。

(2)　配合

*1 秋田大学講師　工学資源学部土木環境工学科　博士（工学）　(正会員)
*2 秋田大学教授　工学資源学部土木環境工学科　工博　(正会員)
*3 エコサイエンス代表　博士（工学）　(正会員)

Table 1 Physical Properties and Chemical Compositions of Rice Husk Ash (RHA) and Silica Fume (SF)

	Density (g/cm^3)	Average Particle Size (μm)	BET-Specific Surface Area (m^2/g)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	ig. loss (%)
RHA	2.15	5.85	112.1	94.2	0.18	0.10	0.32	0.16	0.09	1.53	1.46
SF	2.20	0.15	18.9	88.7	0.93	0.09	0.45	1.97	0.54	1.67	3.50

Table 2 Mixture Proportions of Mortar

Mixture Number	Flow	W/CM* (%)	Ad**/CM* (%)	Unit Weight (kg/m^3)					SP***/CM* (%)
				W	C	RHA	SF	S	
30-C	200±10	30	0	268	892	-	-	1247	0.7
30-R20			20	255	681	170	-		3.1
30-S20				256	683	-	171		2.6

Note; *: Cementitious Materials (C + RHA or C+SF)
**: Admixture (RHA or SF)
***: Superplasticizer

Table 3 Parameter of Vibrating Compaction for Measuring Air Content of Mortars

Mixture Number	Frequency (Hz)	Amplitude (mm)	Maximum Acceralation in Vibrating Compaction (m/s^2)	Vibrating Time (s)
30-C	30	0.6	39.0	0, 30, 60, 120, 180, 240
	50		130.1	0, 30, 60, 120, 180, 240, 300
	100		402.3	0, 10, 20, 30, 60
30-R20	30		39.0	0, 60, 120, 180
	50		130.1	0, 30, 60, 120
	100		402.3	0, 10, 20, 30, 60, 120
30-S20	30		39.0	0, 10, 30, 60, 120, 180, 240
	50		130.1	0, 30, 60, 120, 180
	100		402.3	0, 10, 20, 30, 60

モルタルの配合は骨材容積率を 45%，水結合材比を 30%とし，もみ殻灰およびシリカフュームの混和率はセメントの内割りで 20%とした。モルタルのフローは 200±10 となるように高性能減水剤の添加率を変えて調整した。モルタルの配合を **Table 2** に示す。

(3) 練混ぜ

すべてのモルタルは、セメント、混和材および骨材を投入し 1 分間空練りし、その後、水および混和剤を加えて 4 分間練り混ぜ行った。

2.2 フローおよび粘性の測定

練混ぜ直後に，各モルタルのフローおよび粘性の測定を行った。フロー試験は JIS R 5210 にしたがい，各配合において 200±10 の範囲内に入っていることを確認した。粘性は，JIS K 7117 に準じて, BH 型回転粘度計によりずり速度（D）とずり応力（S）を測定し，各配合の塑性粘度および降伏値を求めた。

2.3 振動締固め効果の検討

(1) 空気量の測定

振動締固めにはテーブル型振動台（振幅±0.6mm，周波数：0～108Hz に可変）を用いた。空気量の測定は，ϕ110mm×110mm のモルタルエアメータを **Fig.1** のように上部を開口して振動台に固定し，各配合での所定の振動時間経過後に，上部の余分なモルタルを取り除いて空気量の測定を行った。**Table 3** に，各配合の振動数および振動時間を示す。予備試験により振動時間は各配合において空気量がほぼ一定になるまでの時間を計測し，この値を基に，振動時間を

設定している。

(2)　強度試験用供試体の作製

空気量と振動数および振動時間の関係を各配合について求めた後，振動締固めを行わず成型したもの，空気量遷移時のもの，および空気量が一定になったときのものについて，強度試験用供試体（ϕ50mm×100mm）を作製した。締固めは空気量測定時と同様に上部を開口した状態で６本の型枠を振動台に固定して行い，空気量測定と供試体作製時の振動締固め効果に質量の影響が及ぼさないように締固めを行った。各供試体は水中養生を行い，端部を研磨した後に，材齢 28 日での圧縮強度と弾性係数の測定を行った。

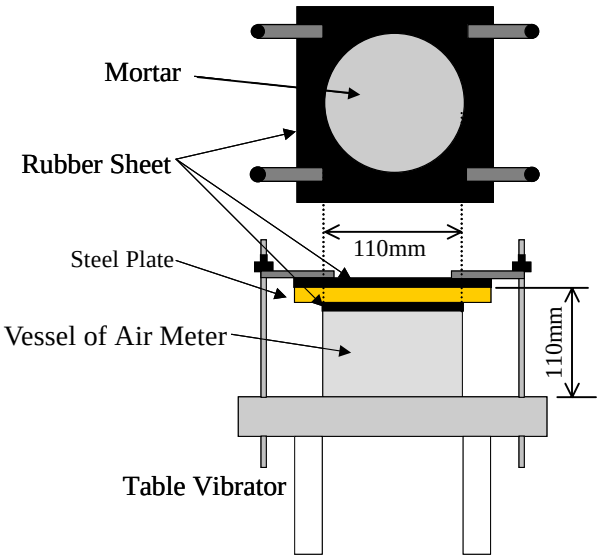

Fig.1 Fixing Air Meter with Table Vibrator

3.　実験結果および考察

3.1　各配合の粘性

各配合のモルタルについて，練混ぜ直後に測定したずり速度（S）とずり応力（D）の関係を **Fig.2** に示す。図中のずり速度とずり応力の相関関係より求めた，塑性粘度および降伏値を **Fig.3** に示す。塑性粘度は RHA を混和したものが最も大きい値を示し，混和材無混和モルタルの 1.5 倍程度および SF 混和モルタルの 1.3 倍程度の値を示した。また降伏値は SF 混和モルタルが最も高い値を示した。同じフローであっても混和材の有無および種類によって粘性が異なることが明らかとなった。

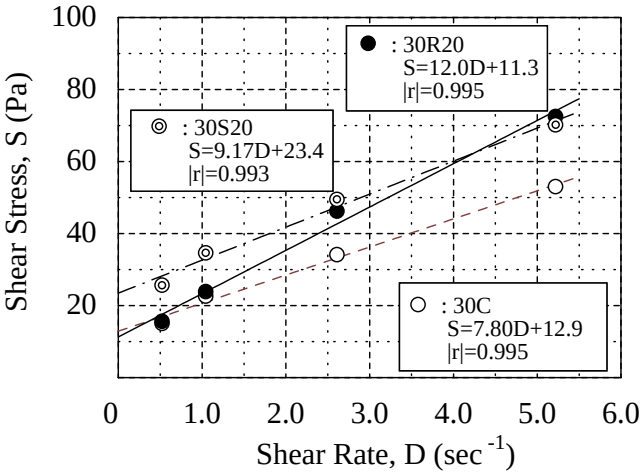

Fig.2 Shear Stress vs. Shear Rate

3.2　振動時間と空気量の関係

振動締固め時の，振動数をパラメータとした振動時間と 30-C，30-S20 および 30-R20 の空気量(エントラップドエア)との関係を **Fig.4**, **Fig.5** および **Fig.6** に示す。

混和材無混和モルタルの 30-C については，**Fig.4** に示すように，振動締固めを行わない場合には 2.8%のエントラップドエアを有し，30Hz で振動締固めを行うと徐々に空気量は低下し，180 秒後に 1.8%でほぼ一定値を示した。一方，50Hz 振動の時には 240 秒後に 0.6%まで低下し，100Hz 振動の場合には 30 秒で 0.2%まで空気量

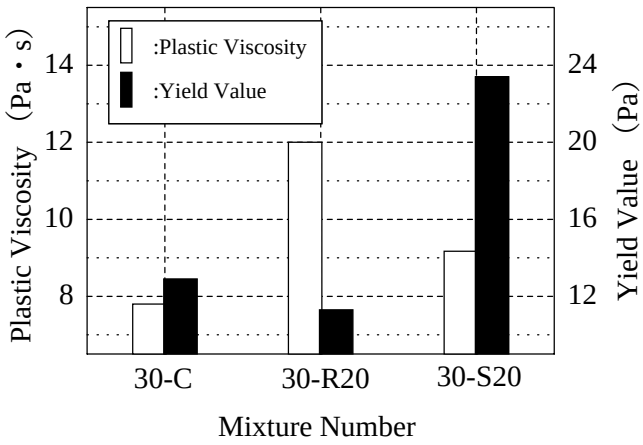

Fig.3 Plastic Viscosity and Yield Value

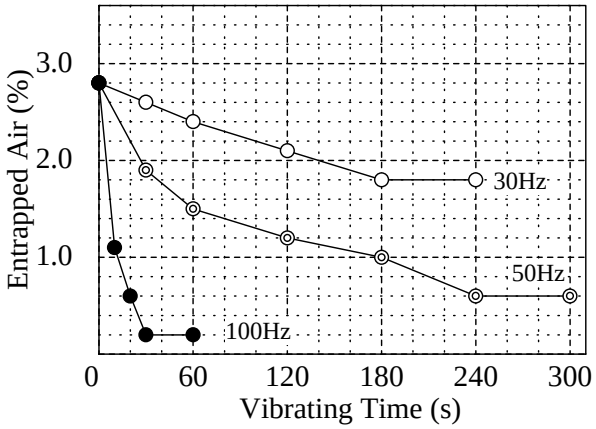

Fig.4 Entrapped Air in Vibrating Compaction (30-C)

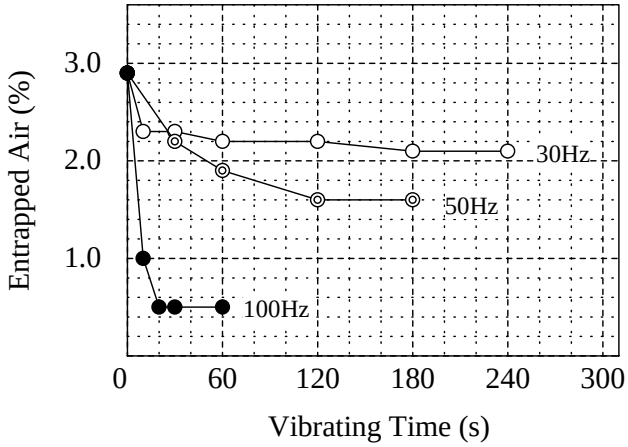

Fig.5 Entrapped Air in Vibrating Compaction (30-S20)

が低下した。

SF 混和モルタルの 30-S20 については **Fig.5** に示すように，振動締固めを行わない場合には 2.9%の空気量を有し，振動数 30Hz の場合には振動時間 10 秒で空気量 2.3%を示した後，値はあまり変わらず，180 秒で 2.1%となった後ほぼ一定値を示した。振動数 50Hz では 120 秒で 1.6%，振動数 100Hz では 20 秒で 0.5%まで低下し，ほぼ一定の空気量となった。

RHA を混和したモルタルの 30-R20 については **Fig.6** に示すように，振動締固めを行わない時には 3.4%の空気量を示したが， 30Hz では 180 秒で 2.4%, 50Hz では 120 秒で 1.3%となり，100Hz の振動数では 60 秒で 0.6%まで空気量が低下することが明らかとなった。

以上のように，フローが 200±10 と一定のモルタルの振動締固めを行った場合，混和材の有無および種類によって，塑性粘度および降伏値が異なり，振動締固めにおいては振動数によって残存空気量が一定値となるまでの時間が大幅に異なり，またその時の空気量も異なることが明らかとなった。

以上の結果より，**2.2** で述べたように，振動締固めを行わず成型したもの，空気量遷移時のもの，および空気量が一定になったときのものについて，**Table 4** に示す振動数および振動時間により強度試験用供試体の作製を行った。

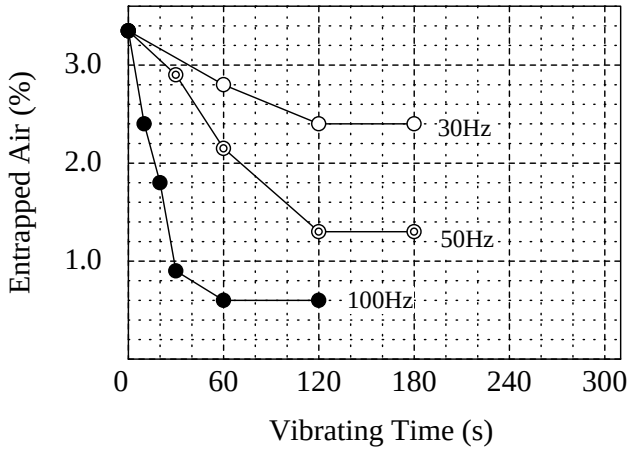

Fig.6 Entrapped Air in Vibrating Compaction (30-R20)

Table 4 Parameter for Vibrating Compaction of Specimens for Mechanical Test

Mixture Number	Frequency (Hz)	Vibrating Time (s)
30-C	30	0, 60, 180
	50	0, 60, 240
	100	0, 10, 30
30-R20	30	0, 60, 120
	50	0, 60, 120
	100	0, 20, 60
30-S20	30	0, 10, 180
	50	0, 30, 120
	100	0, 10, 20

3.3　振動エネルギーと空気量の関係

振動締固めにおける振動数，振幅および振動時間は，モルタルの締固めを行うための入力振動エネルギーとなる。本研究では，全ての振動締固めにおいて，供試体質量を一定としているため，質量の影響をとり除き，振動時の最大加速度（α）と振動時間（t）の積（αt）を，締固めに要した振動エネルギーとして定義する。

振動エネルギー（αt）と空気量の関係を **Fig.7** に示す。なお，**Fig.7** 中の空気量の各測定点は，**Table 4** に示した振動時間での値である。各配合において，振動エネルギーの増加とともに空気量は減少しており，振動数と振動時間の積により，振動締固めの選定が可能であるものと考えられる。しかし，混和材の有無および種類によって，この傾向は若干異なり，30-R20 は振動数に関係なく，振動エネルギーの増加に伴い，空気量が減少しているのに比べて，30-C および 30-S20 については 30Hz と 50HZ の振動数の場合には，振動エネルギーと空気量の関係にあまり差は認められないものの，100Hz になると急激に空気量が減少することが明らかとなった。これは **Fig.3** に示したように，30-R20 の塑性粘度が 30-C および 30-S20 の値の 1.3～1.5 倍程度の値であり，塑性粘度と降伏値のうち特に塑性粘度の差による影響であるものと考えられる。

以上のように，振動締固め時の残存空気（エントラップドエア）量は，無混和モルタル（30-C）およびシリカフューム混和モルタル（30-S20）については，100Hz の高振動で締固めを行うことが適切であると考えられる。しかし，もみ殻灰混和モルタルは塑性粘度が高いために，高振動数での締固めの場合でも空隙量が一定になるまでの時間が長くかかり，エントラップドエアを除去するためには振動時間を長くとり，振動エネルギーを大きくすることなど，最大加速度と振動時間の積によって適切な振動締固め方法を選定することが必要であると考えられる。

3.3　硬化後の力学的特性に及ぼす影響

硬化後の力学的特性に及ぼす振動締固めの影響については，**Table 4** に示した振動パラメータにより供試体を作製し，圧縮強度および弾性係数について検討を行った。

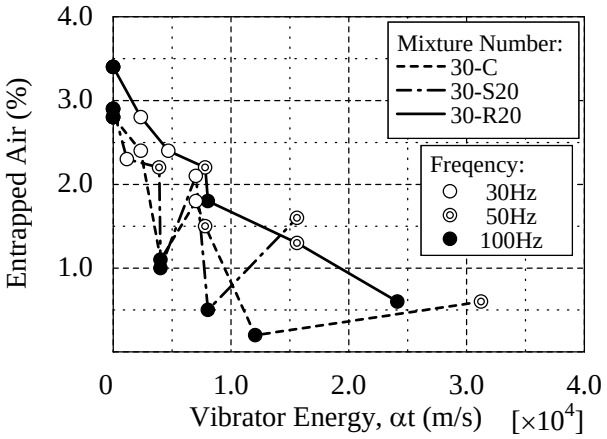

Fig.7 Entrapped Air vs. Vibration Energy

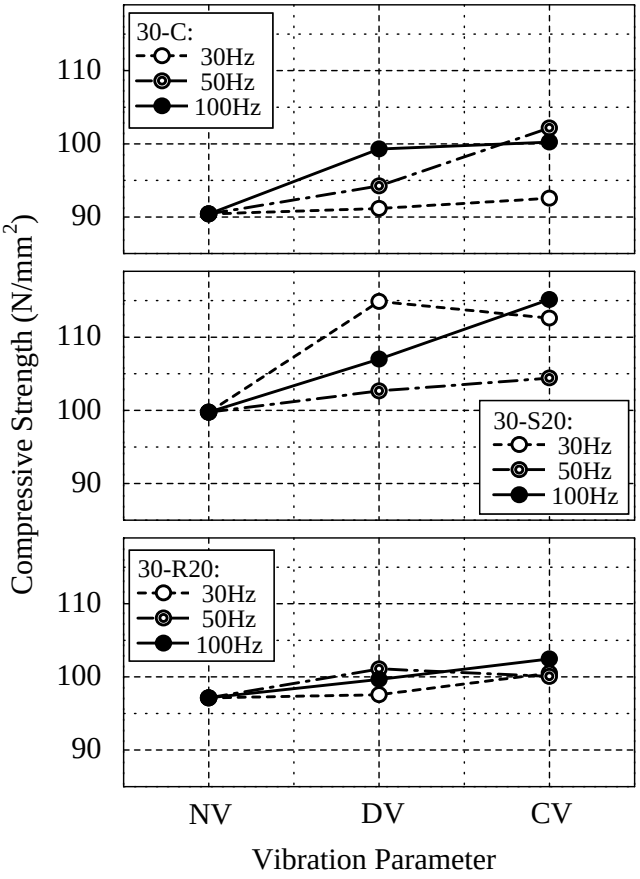

Fig.8 Compressive Strength of Mortars

各配合の，振動締固めを行わず成型したもの（NV），空気量遷移時のもの（DV），および空気量が一定になったときのもの（CV）の圧縮強度を **Fig.8** に示す。30-S20 についてのみ，30Hz

の DV が最も高い圧縮強度を示しているが，30-C および 30-R20 については，空気量が一定になったときに圧縮強度は最も高い値を示しており，エントラップドエアの除去に伴い圧縮強度は増加している。また，30-R20 は 30-C および 30-S20 比べて, 締固めによる強度の増加割合が低い傾向を示しているが，振動締固め中に空気量の減少に伴い，空隙径の変化や分布に対して塑性粘度が影響を及ぼし，圧縮強度の増加傾向に影響を与えたのではないかと考えられる。同様に弾性係数について，**Fig.9** に示す。弾性係数は各々の配合において，100Hz の振動数で振動締固めを行った場合に高い値を示す傾向となり，30-R20 のみ，50Hz でも 100Hz の時とほぼ同様な値となることが明らかとなった。

力学的特性に与える振動締固めの影響を総合的に評価すると，低水結合材比でもみ殻灰を混和したモルタルは，安定した力学的特性を得るためには高振動で振動締固めを行うことが適当であり，同一フローのシリカフューム混和モルタルおよび混和材無混和モルタルの場合と異なるため，塑性粘度の差が締固め効果に及ぼす因子となっているものと考えられる。

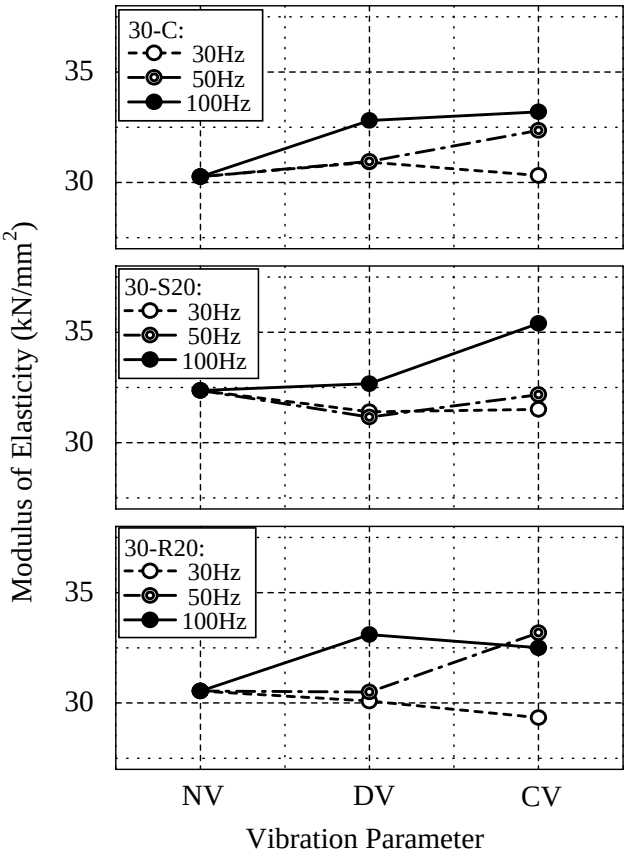

Fig.9 Modulus of Elasticity of Mortars

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりであり，もみ殻灰混和コンクリートの振動締固め方法の選定に対して有効な基礎的資料と成り得るものと考えられる。

(1) 混和材の有無および種類によって，塑性粘度および降伏値が異なり，振動締固めにおいては振動数によって残存空気量が一定値となるまでの時間が大幅に異なり，またその時の空気量も異なることが明らかとなった。

(2) 混和材無混和モルタルおよびシリカフューム混和モルタルについては，100Hz の高振動で締固めを行うことが適切であると考えられ，塑性粘度が高いもみ殻灰混和モルタルは，最大加速度と振動時間の積によって適切な振動締固め方法を選定することが必要であると考えられる。

(3) 低水結合材比でもみ殻灰を混和した場合，安定した力学的特性を得るためには高振動で振動締固めを行うことが適当であると考えられる。

[参考文献]

1) 和田一朗，河野俊夫，前田直己，川上 洵：高活性もみ殻灰の製造装置および製造方法の開発に関する研究，農業機械学会誌，Vol.61，No.4，pp.125-132，1999.

2) Ichiro Wada, Toshio Kawano, Makoto Kawakami, and Naomi Maeda: The Strength Properties of Concrete Incorporating Highly Reactive Rice Husk Ash, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.21, pp.57-62, 1999.

3) 和田一朗，河野俊夫，川上洵：モルタルおよびコンクリートの耐久性に及ぼすもみ殻灰混和の影響，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.340-346，1999.