

論文 粉体状産業廃棄物を多量に混入したコンクリートの配合設計方法に関する研究

桜井邦昭*1・丸山久一*2・下村 匠*3・木村 仁*4

要旨: 粉体状の産業廃棄物を多量にコンクリート材料として用いる場合の配合設計方法を提案し, その有効性を実験的に検討した。その結果, 粗骨材容積が $300\text{L}/\text{m}^3$ 程度, かつモルタル中の細骨材容積比が 0.3 程度以下の場合, ペーストおよびモルタルフロー試験から, スランプ 5cm 程度のコンクリート配合を概ね推定できることが明らかとなった。

キーワード: 粉体状産業廃棄物, リサイクル, 配合設計, フロー試験

1. はじめに

産業廃棄物を処理する管理型埋立て処分場の残余年数はあと僅かであり, 産業廃棄物を何らかの方法で再利用することが急務となっている。コンクリートの分野においても産業廃棄物を再利用する研究が盛んに行われているが, それらの多くはあらゆるコンクリート構造物への適用を目的としているため, 結果として少量の産業廃棄物しか混入できていないのが現状である。そこで, 著者らは適用箇所を消波ブロックなどの強度や耐久性をあまり必要としない無筋コンクリート構造物に限定する代わりに, 産業廃棄物をできるだけ多量にコンクリート材料として再利用することを目的とした。そして, 鋳物工場から排出される粉塵である鋳物灰や電気炉から排出される還元スラグを $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 混入したコンクリートにおいても, $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度が得られることを既に確認している¹⁾(図-1)。しかしながら, これら粉体状産業廃棄物は排出される工場の違いなどによる品質変動が激しく, 同じ混入量でも同一スランプを得るための単位水量が大きく異なる(図-2)。そのため, 廃棄物が変わる度に多くの試験練りを行い,

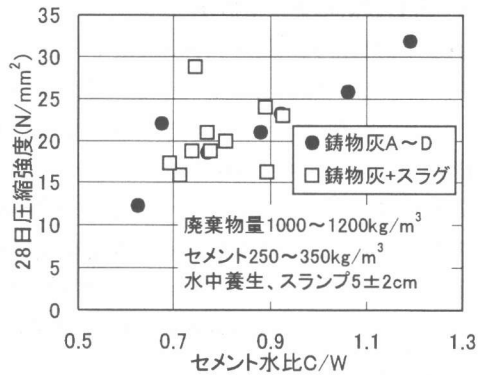


図-1 廃棄物を多量に混入したコンクリートの C/W と圧縮強度

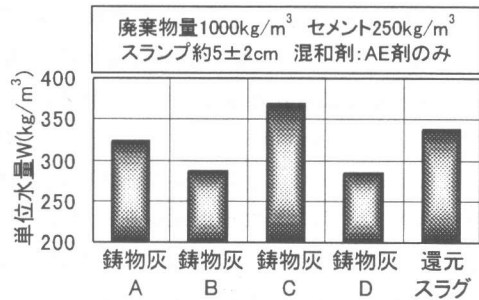


図-2 廃棄物の違いによる単位水量の変化

最適配合を検討しなければならない。そこで, 試験練りを行わずとも, 消波ブロックなどの

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系 Ph.D (正会員)

*3 長岡技術科学大学助教授 工学部 環境・建設系 工博 (正会員)

*4 中越環境開発(株)

無筋コンクリート構造物を施工する際に必要と考えられるスランプ5cm程度のコンクリート配合を推定する方法を検討することにした。

2. 使用材料

使用材料を表-1に示す。また、産業廃棄物の写真を図-3に示す。なお、新潟県長岡市周辺のみで、鋳物灰は年間約5,000t、還元スラグは約18,000t排出されており、全量が管理型埋立て処分場に廃棄されている。

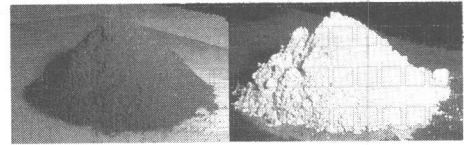
3. 配合設計における仮定

粉体状産業廃棄物を 1000kg/m^3 、セメントを 250kg/m^3 程度混入したコンクリートは、ペースト容積(水+セメント+廃棄物)が約 700L/m^3 以上を占めるため、大部分がペースト成分から構成されることになる。そこで、本研究で対象とするような粉体状産業廃棄物を多量に混入するコンクリートは、「コンクリートの変形性はペーストの変形性に支配され、骨材の噛合いによる影響はほとんどない」と仮定することにした。この仮定が成立すれば、コンクリートの単位水容積(V_w)は、粉体および骨材が拘束する水容積(V_{w1})と粉体(ペースト)が変形するのに必要な水容積(V_{w2})との和により求めることができると考えられる。

$$V_w = V_{w1} + V_{w2} \quad (1)$$

この式を用いれば、コンクリートの試験練りを行わずとも必要な単位水量を推定することが可能であると考えられるが、そのためには、仮定の成立範囲を検討するとともに、ペーストの変形性の評価方法および粉体と骨材の拘束水比の算定方法を確立する必要がある。そこで、以下の4項目について実験的検討を行うことにした。

- ① ペーストの変形性と水粉体容積比の関係
- ② ペーストとモルタルの変形性が等しい範囲(細骨材がモルタルの変形性に影響しない範囲)
- ③ 細骨材の拘束水比



鋳物灰 A

還元スラグ

図-3 実験に用いた粉体状産業廃棄物

表-1 使用材料の物性値

粉体種類		密度 (g/cm^3)	比表面積(cm^2/g)	
粉体	普通ポルトランドセメント	3.15	3170	
	石灰石微粉末 LS	2.76	4090	
	フラッシュ FA	2.31	3440	
産業廃棄物	鋳物灰 A	2.66	1660	
	鋳物灰 B	2.54	1100	
	鋳物灰 C	2.69	2500	
	鋳物灰 D	2.56	3270	
	鋳物灰 E	2.95	3400	
	還元スラグ	3.30	1340	
骨材種類		密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M.)
細骨材	山砂	2.65	1.56	2.65
	砕砂	2.70	1.27	2.61
	川砂	2.64	1.47	1.81
	粗骨材	2.71	1.45	7.08

- ④ コンクリートの変形性とペーストおよびモルタルの変形性の定量的な関係
なお、粗骨材は粒子径が大きいため拘束水はほとんどないと仮定し考慮しないことにした。

4. ペーストおよびモルタルフロー試験

4.1 ペーストの変形性評価と細骨材の拘束水比の算出方法

水粉体容積比(V_w/V_p)とペーストの相対フロー面積比(Γ_p)の間には、粉体種類によらずほぼ直線関係が成立すること、また、モルタル中の細骨材容積比(s/m)を一定とした場合、モルタルの相対フロー面積比(Γ_m)と水粉体容積比(V_w/V_p)にも直線関係が成立することが既に明らかにされている^{2), 3)}。そこで本研究でも、この関係を用いペーストの変形性および細骨材の拘束水比(β_s)を算定することにした。細骨材がモルタルの変形性に寄与しないならば、ペーストおよび s/m を一定としたモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比

の関係は図-4に示すようになると考えられる。図中の近似直線は、ペーストおよびモルタルの拘束水比を β_p および β_m 、変形係数を E_p および E_m とすれば以下の式で表される³⁾。

$$\frac{V_w}{V_p} = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \quad \text{or} \quad \frac{V_w}{V_p} = E_m \cdot \Gamma_m + \beta_m \quad (2)$$

$$\Gamma_p = \left[\frac{F_p}{100} \right]^2 - 1 \quad \text{or} \quad \Gamma_m = \left[\frac{F_m}{100} \right]^2 - 1 \quad (3)$$

ここで、 F_p はペーストフロー、 F_m はモルタルフローである。なお、本研究でいうフローとはJIS A 5201に準じフローテーブルを用いた落下運動を与えた後のフローのことである。図中の関係が成立すれば、ペーストとモルタルの変形係数は等しいことになる($E_p = E_m$)。また、上方に平行移動した分が細骨材の拘束する水量を表すと考えられ、細骨材の拘束水比(β_s)は最終的に式(7)で算定できる。ペーストの拘束水比(β_p)は粉体に拘束される水容積(V_{wp})と粉体容積(V_p)との比であり、モルタルの拘束水比(β_m)は V_{wp} と細骨材に拘束される水容積(V_{ws})の和と V_p との比であるから、

$$\beta_p = \frac{V_{wp}}{V_p} \quad (4)$$

$$\beta_m = \frac{V_{wp} + V_{ws}}{V_p} \quad (5)$$

式(4)と式(5)を変形すれば式(6)が得られる。細骨材の拘束水比(β_s)は V_{ws} と細骨材容積(V_s)との比であるから、式(7)が得られる。

$$\frac{V_{ws}}{V_p} = (\beta_m - \beta_p) \quad (6)$$

$$\beta_s = \frac{V_{ws}}{V_s} = \frac{V_{ws}}{V_p} \cdot \frac{V_p}{V_s} = (\beta_m - \beta_p) \frac{V_p}{V_s} \quad (7)$$

ただし、式(7)中の V_p は拘束水比時にモルタル中に占める粉体容積である。

4.2 ペーストフロー試験

表-2に各種粉体を用いたペーストフロー試験結果を示す。表中の相関係数は相対フロー面積比(Γ_p)と水粉体容積(V_w/V_p)との関係を直線近似した式(2)の相関係数である。この結果より、今回のようにフローテーブルを用い

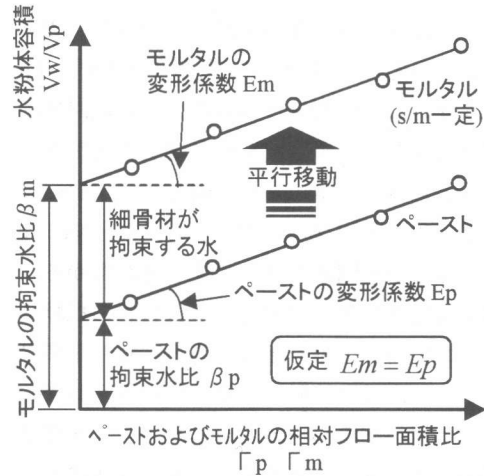


図-4 相対フロー面積比と水粉体容積比

表-2 ペーストおよびモルタルフロー試験結果

粉体種類	ペースト			s/m=0.2のモルタル		
	拘束水比 β_p	変形係数 E_p	相関係数 R^2	拘束水比 β_m	変形係数 E_m	相関係数 R^2
セメント	0.714	0.089	0.987	0.749	0.085	0.998
LS	0.461	0.079	0.999	0.508	0.091	0.998
FA	0.455	0.044	0.997	0.499	0.040	0.996
鋳物灰A	0.599	0.090	0.996	0.709	0.092	0.998
鋳物灰B	0.468	0.040	0.993	0.581	0.049	0.997
鋳物灰C	0.751	0.073	0.998	0.810	0.073	0.994
鋳物灰D	0.413	0.043	0.996	0.471	0.046	0.986
鋳物灰E	0.832	0.115	0.990	0.872	0.122	0.993
還元スラグ	0.763	0.045	0.980	0.812	0.051	0.999

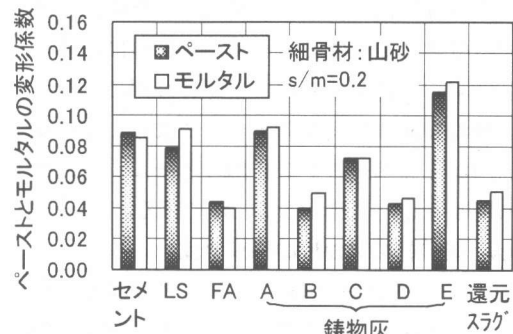


図-5 各種粉体を用いたペーストとモルタルの変形係数の比較

たフロー試験においても粉体種類に関わらず、 Γ_p と V_w/V_p の間にはほぼ線形関係が成立すると見なすことができると考えられる。

4.3 モルタルの変形性に及ぼす細骨材の影響

図-5に細骨材容積を $s/m=0.2$ で一定とした

場合のモルタルの変形係数とペーストの変形係数を示す。粉体の種類に関わらず E_m と E_p はほぼ等しく、細骨材容積が小さい範囲では細骨材はモルタルの変形性にほとんど影響しないことがわかる。また、表-2 から、 s/m を一定としたモルタルにおいても Γ_m と V_w/V_p にはほぼ線形関係が成立することがわかる。

図-6 は粉体種類を一定として細骨材の種類を変えた場合の結果を示している。粗粒率のほぼ等しい山砂と砕砂は同様の傾向を示しているが、粗粒率の小さい川砂は小さな s/m で変形係数が大きくなっており、モルタルの変形性は細骨材の粗粒率(細かさ)に大きく影響されることがわかる。これは、細かい細骨材粒子ほど粒子個数が多いため、粒子同士の接触回数が増加することによるものと考えられる。図-7 に同じ細骨材を用い、粉体種類を変えた場合の結果を示す。粗い粉体の鑄物灰 A を用いた場合の方がセメントの場合よりも若干小さな s/m で変形係数が増加している。粗い粉体ほど粒子個数が少ないので、細骨材粒子同士の接触確率が増加するためと考えられる。

このように、モルタルの変形性は細骨材、粉体両者の細かさの影響を受けるため、使用する材料によってモルタルの変形性に影響しない s/m の範囲は変化するが、今回の実験では概ね $s/m=0.3$ 程度である。つまり、その範囲内ならばペーストの変形性とモルタルの変形性は等しいと考えることができる。

4.4 細骨材の見かけの拘束水比

式(7)に従い細骨材の拘束水比の算定を行った。図-8 は細骨材を一定として、異なる粉体を用いたモルタルのフロー試験結果から算出した細骨材の拘束水比と使用した粉体の比表面積との関係を示している。同一の細骨材にも関わらず使用する粉体によって細骨材の拘束水比(β_s)は大きく変化し、細かい粉体の場合ほど β_s が小さくなる傾向が見られる。この理由について考察する。図-9 は細骨材にペーストが充填している様子を模式的に示し

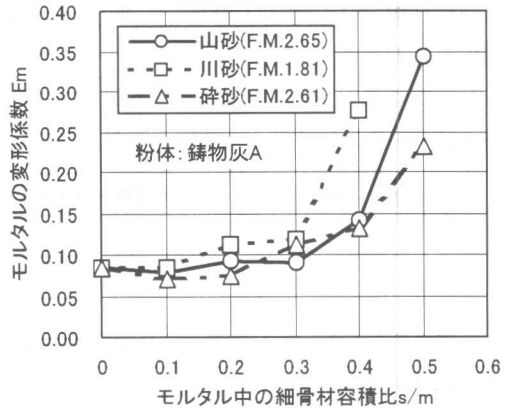


図-6 s/m とモルタルの変形係数(細骨材種類)

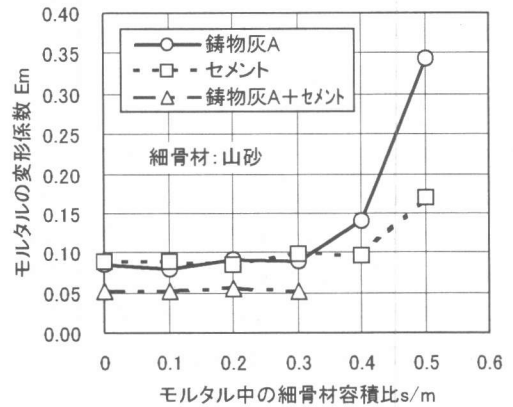


図-7 s/m とモルタルの変形係数(粉体種類)

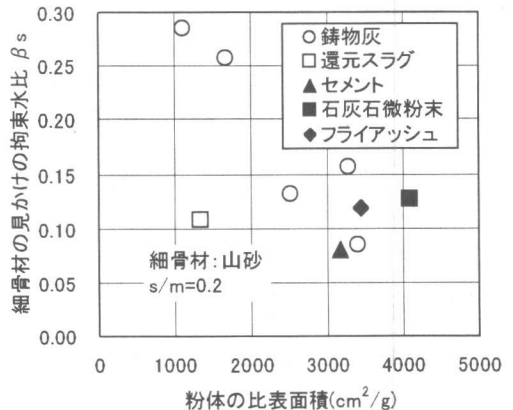


図-8 細骨材の見かけの拘束水比と粉体の比表面積

たものである。細骨材粒子間の空隙はまず粉体粒子が充填し、残った空隙を水が充填すると考えれば、粗い粉体粒子は細かい粉体粒子に比べ細骨材粒子間の空隙を充填できないか

ら、より多くの水を充填させる必要がある。そのため、見かけ上、粗い粉体粒子のペーストほど細骨材がより多くの水を拘束しているように算出されるのではないかと考えられる。しかしながら、還元スラグは比較的粗い粉体であるにも関わらず細骨材の拘束水比は小さく算出されており、細骨材の拘束水比には粉体の細かさだけでなく水との反応性や粒子形状など様々な要因が影響すると考えられる。

このように、細骨材の拘束水比は使用粉体により異なるため、その都度モルタルフロー試験を行い算出する必要がある。

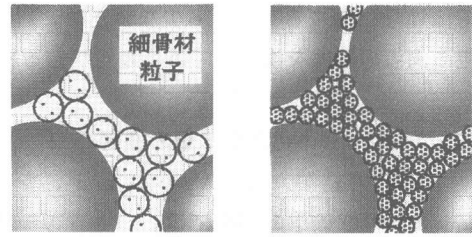
5. スランプと相対フロー面積比の関係

スランプと相対フロー面積比の関係を把握するために、様々な配合のコンクリートの試験練りを行い、スランプ試験を行うと同時に5mmふるいでウェットスクリーングをして粗骨材を除いたモルタルでフロー試験を行った。スランプと相対フロー面積比の関係に寄与する要因は粉体の種類と粗骨材容積であると考えられるため各要因について検討する。

図-10 に同一フローのモルタルからなるコンクリートのスランプと粗骨材容積の関係を示す。粗骨材容積 $V_g=300\text{L}/\text{m}^3$ 程度の範囲においては、 V_g の変化によらず、スランプとフローの関係はほぼ一定であることがわかる。

表-3 に、異なる粉体を用いたコンクリートのスランプとウェットスクリーングしたモルタルのフローを示す。なお、表中のコンクリートは粉体量が一定のため、骨材量が変化することになるが、 $s/m=0.2$ 程度、 $V_g=200\text{L}/\text{m}^3$ 程度以下であり、骨材がコンクリートの変形性に影響しないと考えられる範囲内である。この表から、全ての粉体においてスランプとフローの関係はほぼ同じであり、少なくともスランプ5cm程度の場合には、粉体種類によらずスランプとフローの間にはほぼ一定の関係が成立すると見なせるものと考えられる。

図-11 に各種粉体を様々な混入量で混入し



(a)粗い粉体の場合 (b)細かい粉体の場合

図-9 細骨材粒子間に充填するペーストの模式図

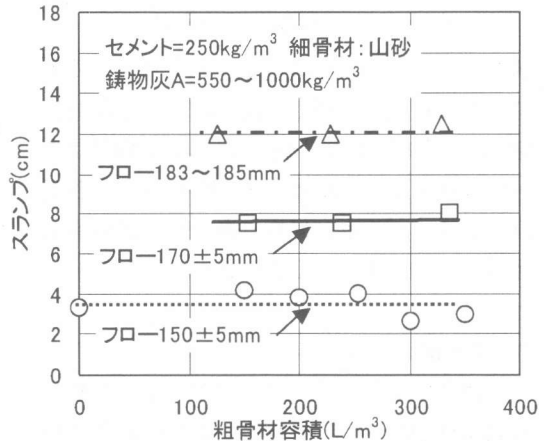


図-10 同一フローのモルタルからなるコンクリートのスランプと粗骨材容積

表-3 スランプとフローの関係

配合の種類	廃棄物種類	スランプ	外フロー
廃棄物を 1000kg/m ³ 混入 (セメント 250kg/m ³)	鋳物灰 A	4.1	155
	鋳物灰 B	3.2	142
	鋳物灰 C	5.0	157
	鋳物灰 D	6.4	170
	還元スラグ	4.8	163
鋳物灰と還元スラグを 600kg/m ³ ずつ混入 (セメント 300kg/m ³)	鋳物灰 A	3.7	150
	鋳物灰 B	3.5	144
	鋳物灰 C	3.0	128
	鋳物灰 D	3.2	138

た場合のスランプと相対フロー面積比の関係を示す。多少のバラツキはあるものの、粉体種類、粗骨材容積によらず両者にはほぼ一定の関係が存在していることがわかる。そのため、今回の実験の範囲内では、粗骨材容積および粉体種類に関わらず、実用上、スランプと相対フロー面積比の関係はほぼ一定であると見なせるものと考えられる。しかしながら、今回は粗骨材種類の検討をしておらず、また

粉体種類に関するデータも少ないため、今後、更に両者の関係を検討していく必要がある。

6. コンクリートの単位水量の推定

本研究の結果から、 $V_g=300 \text{ L/m}^3$ 、かつ $s/m=0.3$ 程度以下の範囲では、コンクリートの単位水容積 V_w を概ね以下の式で求めることができると考えられる。

$$V_w = V_{w1} + V_{w2} \quad (8)$$

$$= (V_p \cdot \beta_p + V_s \cdot \beta_s) + \Gamma_p \cdot E_p \cdot V_p$$

式(8)を用いて、図-2 に示すコンクリートの単位水量を推定した結果を図-12 に示す。なお、図-11 よりスランプ 5cm に対応する相対フロー面積比を 1.5 と仮定した。図-12 から、若干計算値の方が小さい傾向にあるが、概ね単位水量が推定できていることがわかる。

7. まとめ

本研究の結果から、コンクリート中の粗骨材容積(V_g)が 300 L/m^3 程度、かつモルタル中の細骨材容積比(s/m)が 0.3 程度以下の場合、ペーストおよびモルタルフロー試験を行うことでスランプ 5cm 程度のコンクリートの配合を概ね推定できるがわかった。また、付随して以下の知見が得られた。

- (1) モルタルの変形性は粉体、細骨材両者の影響を受けるため、細骨材がモルタルの変形性に寄与しない範囲は使用材料により異なるが、概ね $s/m=0.3$ 程度以下である。そのため、 $s/m=0.3$ 以下ではモルタルとペーストの変形性は等しいものとして取り扱うことができると考えられる。
- (2) 細骨材の拘束水比(β_s)は粉体の細かさ(比表面積)により異なり、比表面積の大きい粉体からなるペーストを用いる場合ほど β_s は見かけ上小さくなる。これは、比表面積の大きい粉体ほど細骨材粒子間の空隙をより充填できるため、水が充填すべき空隙が少なくなるためと考えられる。
- (3) コンクリートのスランプとモルタルの相

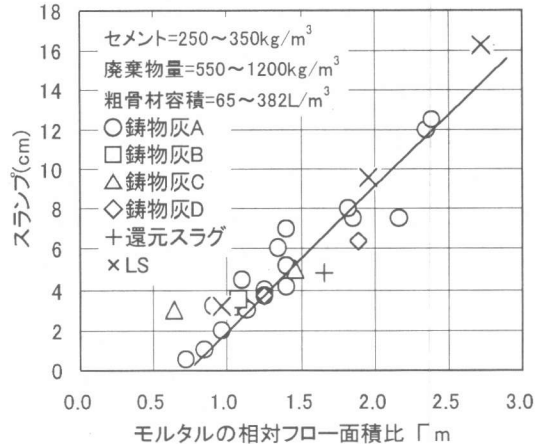


図-11 粉体種類や混入量を変化させたコンクリートのスランプと相対フロー面積比

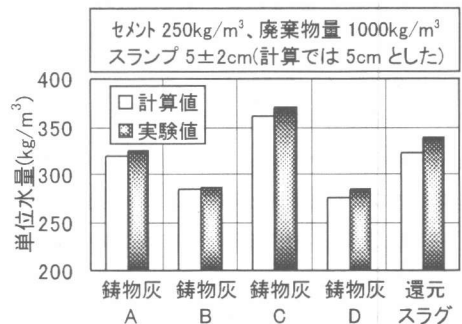


図-12 単位水量の実験値と計算値の比較

対フロー面積比の関係は粗骨材容積が $V_g=300 \text{ L/m}^3$ 程度の範囲内では、 V_g による影響をほとんど受けない。また、粉体種類が変化してもその関係はスランプ 5cm 程度の範囲ではほとんど変化しない。

参考文献

- 1) 桜井邦昭ほか：鑄物灰を多量に混入したコンクリートの圧縮強度特性，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.24-25，1999.9
- 2) 大内雅博ほか：フレッシュモルタルの変形性に及ぼす粉体特性の影響，土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.594-595，1991.9
- 3) 枝松良展ほか：モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化，土木学会論文集，No.538/V-31，pp.37-46，1996.5