

# 論文 亜鉛スラグを使用したセメントモルタル及びコンクリートの基礎的性質

寒河江 賢伍<sup>\*1</sup>・出村 克宣<sup>\*2</sup>・草野 仁司<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、亜鉛スラグを細骨材として使用するか又は、セメントを亜鉛スラグ微粉末で置換したセメントモルタル並びに、細骨材を亜鉛スラグで置換したセメントコンクリートの基礎的性質について検討している。その結果、亜鉛スラグを細骨材としたモルタルの曲げ及び圧縮強さ並びに熱伝導率は、標準砂を用いたモルタルのそれらに比べて小さい傾向にある。一方、セメントに対する亜鉛スラグ微粉末置換率の増加に伴って、モルタルの曲げ及び圧縮強さは減少するが、その熱伝導率は増加する。又、細骨材を亜鉛スラグで置換した場合、コンクリートの圧縮及び曲げ強度は、その置換率が 50～70% までは増大する傾向にある。

**キーワード**：細骨材, 亜鉛スラグ, 亜鉛スラグ微粉末, 強度, 熱伝導率

## 1. はじめに

骨材はコンクリート中において 60% 以上の容積を占めている。そのため、フレッシュコンクリートの性状については、骨材の粒子形状、粒度分布、微粒分量などが大きく影響し、硬化コンクリートの性状においては、弾性係数、長さ変化などの変形性能、凍結融解抵抗性などの耐久性に多大な影響を与えている<sup>1)</sup>。これまで、コンクリート用骨材として天然骨材が使用されてきたが、近年、骨材資源の枯渇化、自然保護問題などにより採取規制が厳しくなったことなどの理由から、天然骨材の入手が困難な状況となり、その供給量が年々減少している傾向にある<sup>2)</sup>。このため、天然骨材に代わる骨材の必要性が高まってきている。このような中で、資源の有効利用の観点から、再生骨材や産業副産物を骨材として利用ことが活発化している。これまで、高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグ、電気炉酸化スラグなどがコンクリート用スラグ骨材として研究開発され、JIS 化されている。又、高炉スラグ微粉末などは高強度コンクリート用混和材としても使用されている<sup>3)</sup>。このように、産業副産物であるスラグがコンクリート用スラグ骨材として有効利用されている中で、電気炉鋼製ダストから亜鉛を精製する際に副産物として発生する亜鉛スラグについては、セメントモルタル及びコンクリート用材料としての検討はほとんど成されていない。更に、亜鉛スラグは処分場に埋め立てられているが、その処分場が飽和状態になっているのが現状である。

そこで、本研究では、亜鉛スラグの有効利用を目的として、亜鉛スラグを細骨材として使用するか又は、セメントを亜鉛スラグ微粉末で置換したセメントモルタルの強さ性状及び熱伝導性並びに、細骨材を亜鉛スラグで

置換したセメントコンクリートのフレッシュ時の性質及び強度性状について検討している。

## 2. 使用材料

### 2.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定される普通ポルトランドセメントを使用した。その性質を **Table 1** に示す。

**Table 1 Physical Properties and Chemical Compositions of Ordinary Portland Cement.**

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine Specific Surface (cm <sup>2</sup> /g)	Setting Time (h-min)	
		Initial Set	Final Set
3.16	3310	2-17	3-15
Compressive Strength of Mortar (MPa)			
		3d	7d
		30.7	45.6
			28d
			61.3
Chemical Compositions (%)			
MgO	SO <sub>3</sub>	ig. loss	
1.44	2.05	1.70	

### 2.2 細骨材

モルタル用細骨材としてはセメント強さ試験用標準砂を、コンクリート用細骨材としては阿武隈川産川砂を使用した。それらの性質を **Table 2** 及び **Table 3** に示す。

**Table 2 Properties of Standard Sand.**

Size (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water Absorption (%)
≤2.5	2.64	0.42

\*1 (株) エービーシー建材研究所 修士 (工学) (正会員)

\*2 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

\*3 旭鉦末(株)

**Table 3 Properties of River Sand.**

Size (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water Absorption (%)	Fineness Modulus
≤2.5	2.64	2.32	2.62

### 2.3 粗骨材

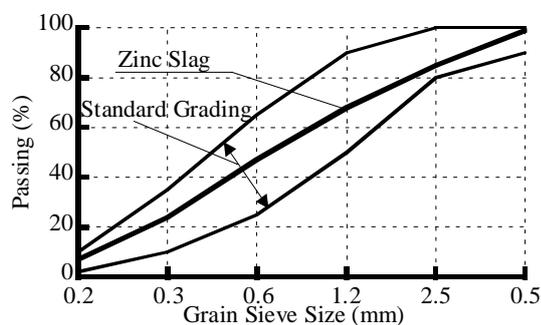
コンクリート用粗骨材として、砂岩砕石を使用した。その性質を **Table 4** に示す。

**Table 4 Properties of Coarse Aggregate.**

Size (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water Absorption (%)	Fineness Modulus
5~20	2.60	1.13	7.00

### 2.4 亜鉛スラグ

亜鉛スラグとしては、電気炉製鋼ダストから亜鉛を回収する際に発生するものを使用した。なお、細骨材として使用する亜鉛スラグについては、JASS 5 に規定される標準粒度分布の範囲になるようにふるい分けたものを使用した。その粒度分布、物理的性質及び化学成分を、それぞれ、**Fig.1**、**Table 5** 及び **Table 6** に示す。又、亜鉛スラグ微粉末については、亜鉛スラグをブレン比表面積 5500cm<sup>2</sup>/g になるように微粉碎したものをを使用した。その物理的性質を **Table 7** に示す。更に、**Photo 1** には、亜鉛スラグの組織構造を示す。



**Fig.1 Particle Size Distribution of Zinc Slag.**

**Table 5 Physical Properties of Zinc Slag.**

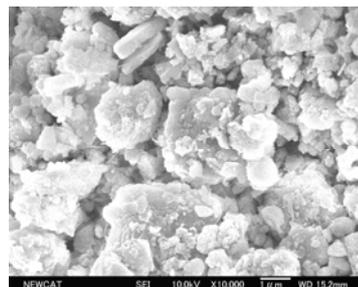
Size (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water Absorption (%)	Solid Content (%)
≤2.5	2.77	4.48	64.5

**Table 6 Chemical Compositions of Zinc Slag.**

Chemical Compositions (%)							
FeO	ZnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	PbO	Cr	S
60.1	15.6	13.3	4.5	4.0	0.6	0.4	0.2

**Table 7 Physical Properties of Granulated Zinc Slag.**

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water Absorption (%)	Blaine Specific Surface (cm <sup>2</sup> /g)
3.43	1.54	5500



**Photo 1 Microstructure of Zinc Slag (×10000).**

### 2.5 練混ぜ水及び混和剤

練混ぜ水としては、水道水を用いた。又、混和剤としては、主成分がリグニンスルホン酸化合物及びポリオール複合体の AE 減水剤を使用した。

## 3. 試験方法

### 3.1 モルタルの試験

#### 3.1.1 供試体の作製

JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じて、**Table 8** 及び **Table 9** に示す調合の供試モルタルを練り混ぜた。なお、標準砂を用いた場合にフロー値が 170±5 となるように練混ぜ水量を求め、水セメント比を決定した。次に、強さ試験用供試モルタルを寸法 40×40×160mm、熱伝導率試験用供試モルタルを寸法 100×100×40mm に成形し、1d 湿空 [20℃, 90% (RH)] 及び 27d 水中 (20℃) 養生を行って、モルタル供試体を作製した。

#### 3.1.2 曲げ及び圧縮強さ試験

JIS R 5201 に従って、供試体の曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

#### 3.1.3 熱伝導率試験

JIS A 1412-2 (熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第 2 部: 熱流計法) に従って、供試体の熱伝導率試験を行った。

### 3.2 コンクリートの試験

#### 3.2.1 コンクリートの調製

JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) に従って、**Table 10** に示す調合で供試コンクリートを練り混ぜ、調製した。

#### 3.2.2 スランブ及び空気量試験

調製したコンクリートについて、JIS A 1101 (コンクリートのスランブ試験方法) に従ってスランブ試験を、JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法) に従って空気量試験を行った。

#### 3.2.3 供試体の作製

調製したコンクリートを寸法 φ10×20cm 及び 10×10×40cm に成形した。その後、1d 湿空 [20℃, 90% (RH)] 及び 27d 水中 (20℃) 養生を行って、コンクリート供試体を作製した。

**Table 8 Mix Proportions of Mortars Using Zinc Slag as Fine Aggregate.**

Cement : Sand (by mass)	W/C (%)	Mix Proportions(kg/m <sup>3</sup> )				Flow
		Water	Cement	Standard Sand	Zinc Slag	
1:2	38	248	653	1305	0	170±5
1:2.5	43	241	560	1401	0	
1:3	50	243	486	1458	0	
1:2	38	259	682	0	1363	155
1:2.5	43	253	588	0	1471	150
1:3	50	255	510	0	1530	142

**Table 9 Mix Proportions of Mortars Containing Granulated Zinc Slag.**

Cement : Sand (by mass)	Water-Binder* Ratio (%)	Replacement of Granulated Zinc Slag to Cement (%)	Mix Proportions(kg/m <sup>3</sup> )			
			Water	Cement	Standard Sand	Granulated Zinc Slag
1:3	50	0	243	486	1458	0
		5	244	462		24
		10	245	437		49
		15	246	413		73
		20	247	389		97

Note, \* : Binder=Cement+ Granulated Zinc Slag.

**Table 10 Mix Proportions of Concretes Using Zinc Slag as Fine Aggregate.**

W/C (%)	Replacement of Zinc Slag to Fine Aggregate* (%)	Mix Proportions (kg/m <sup>3</sup> )					AE-WRA** (%)
		Water	Cement	Fine Aggregate	Zinc Slag	Coarse Aggregate	
45	0	170	378	748	0	978	0.945
	15			636	118		
	30			524	235		
	50			374	392		
	70			224	549		
	100			0	785		
50	0	173	346	775	0	970	0.872
	15			659	122		
	30			543	244		
	50			388	407		
	70			233	569		
	100			0	813		
55	0	176	320	798	0	961	0.8
	15			678	126		
	30			559	251		
	50			399	419		
	70			239	586		
	100			0	837		

Notes, \* : Replacement of Zinc Slag in concrete by volume.

\*\* : Air entraining and water-reducing admixture content to cement by mass.

### 3.2.4 圧縮及び曲げ強度試験

養生後の供試体について、JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に従って圧縮強度試験を、JIS A 1106（コンクリートの曲げ強度試験方法）に従って曲げ強度試験を行った。

## 4. 試験結果及び考察

Fig.2 及び Fig.3 には、細骨材として亜鉛スラグ及び標準砂を用いたモルタルの曲げ及び圧縮強さとセメント細骨材比の関係を示す。細骨材の種類にかかわらず、セメント細骨材比の増加に伴ってモルタルの曲げ及び圧縮強さは減少する傾向にある。これは、セメント細骨材比の増加に伴い水セメント比が増加したためと推察される。又、亜鉛スラグ細骨材を用いたモルタルの曲げ及

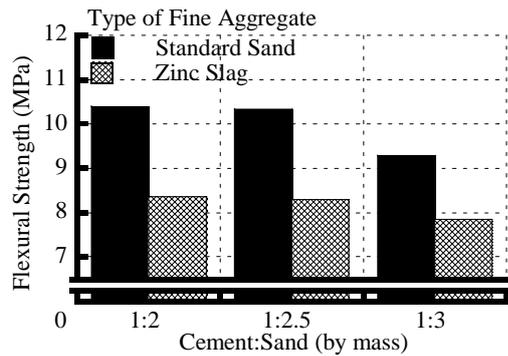


Fig.2 Cement Sand Ratio vs. Flexural Strength of Mortars Using Zinc Slag and Standard Sand.

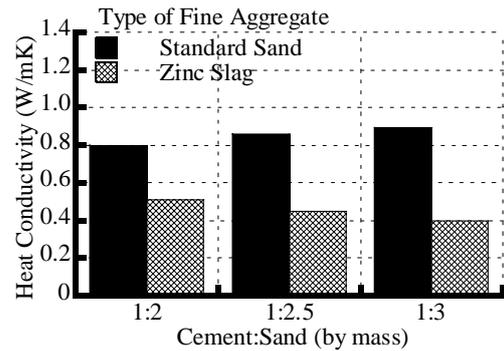


Fig.4 Cement Sand Ratio vs. Heat Conductivity of Mortars Using Zinc Slag and Standard Sand.

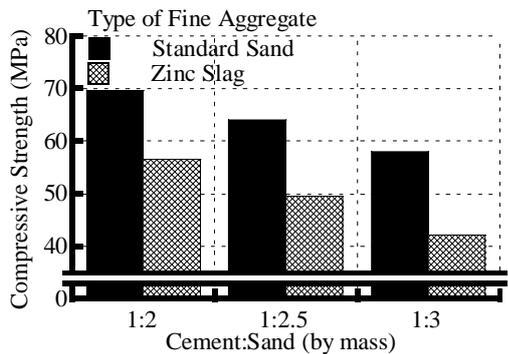


Fig.3 Cement Sand Ratio vs. Compressive Strength of Mortars Using Zinc Slag and Standard Sand.

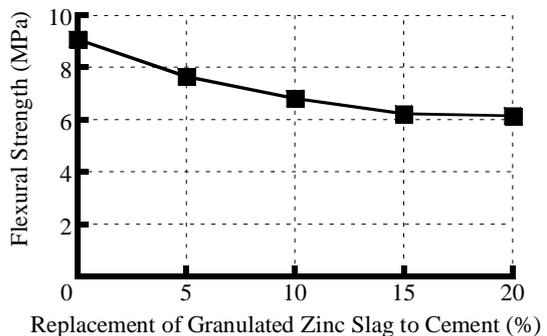


Fig.5 Replacement of Granulated Zinc Slag to Cement vs. Flexural Strength of Mortars.

び圧縮強さの発現は、標準砂を用いたそれらの 80%程度である。亜鉛スラグを細骨材とした場合に強度発現が劣るのは、亜鉛スラグは、その内部に多量の空隙を有していることに起因して強度が小さいためと考える。

Fig.4 には、細骨材として亜鉛スラグ及び標準砂を用いたモルタルの熱伝導率とセメント細骨材比の関係を示す。いずれのセメント細骨材比においても、亜鉛スラグを細骨材としたモルタルの熱伝導率は、標準砂を用いたものそれよりも小さい。又、標準砂を用いたモルタルの熱伝導率は、セメント細骨材比が大きくなると増加する傾向にある。このことから、マトリックスのセメントペーストに比べて、標準砂の熱伝導率は大きいことが示唆される。それに比べて、亜鉛スラグを用いたモルタルの熱伝導率は、セメント細骨材比が大きくなると減少する。ここで、モルタルの熱伝導率は、その内部の空隙量に依存すると仮定すれば、亜鉛スラグはその内部に多くの空隙を含むことから、セメント細骨材比が大きくなると、その熱伝導率は減少するものと推察される。

Fig.5 及び Fig.6 には、セメント: 細骨材=1:3 (質量比)とし、細骨材として標準砂を使用して、セメントの 0, 5, 10, 15 及び 20%を亜鉛スラグ微粉末で置換したモルタルの曲げ及び圧縮強さと亜鉛スラグ微粉末置換率の関係を示す。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートでは、

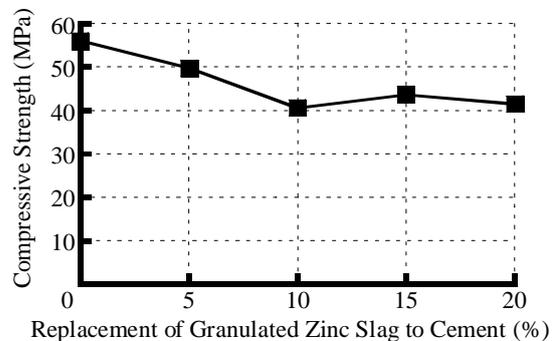
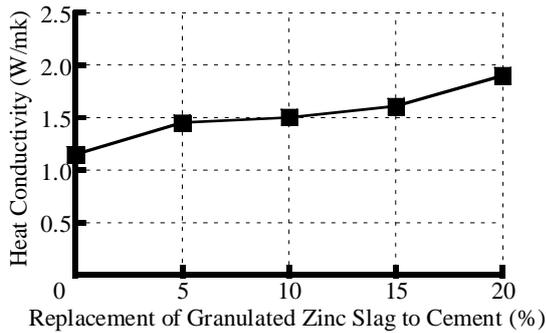


Fig.6 Replacement of Granulated Zinc Slag to Cement vs. Compressive Strength of Mortars.

高炉スラグ微粉末の比表面積が約  $5000\text{cm}^2/\text{g}$  のものを使用した場合、普通コンクリートと同等以上の圧縮強度を示すことが知られている<sup>4)</sup>。しかし、亜鉛スラグ微粉末を用いたモルタルの曲げ及び圧縮強さは、その置換率の増加に伴って低下する傾向にある。これは、亜鉛スラグ微粉末は潜在水硬性やセメントとの反応性を有しないためと推察される。しかし、亜鉛スラグ微粉末置換率が 15~20%においてモルタルの強さの低下はあまり認められない。

Fig.7 には、セメントを亜鉛スラグ微粉末で置換したモルタルの熱伝導率と亜鉛スラグ微粉末置換率の関係を、



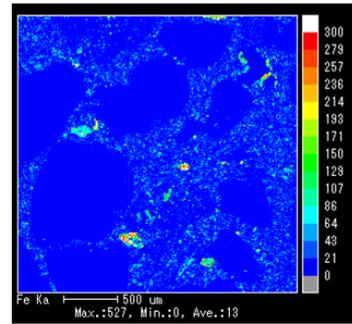
**Fig.7 Replacement of Granulated Zinc Slag to Cement vs. Heat Conductivity of Cement Mortars.**

**Photo 2** には、亜鉛スラグ微粉末置換率 5%としたモルタル中の Fe の濃度分布を示す。モルタルの熱伝導率は、亜鉛スラグ微粉末置換率の増加に伴い、増大する傾向にある。これは、亜鉛スラグを微粉末化することによって細骨材として用いた場合のような内部の空隙の影響を低減することができること、及び亜鉛スラグの化学成分の約 60%が Fe であり、Fe は熱伝導率が約 80W/mk と高いことによるものと考えられる。更に、亜鉛スラグ微粉末置換率を増加させることによって、Fe の濃度が高くなり熱伝導性を向上させることができるものと推察される。なお、**Photo 2** の EPMA 画像に示すように、結合材相には、Fe が均一に分散していることが分かる。

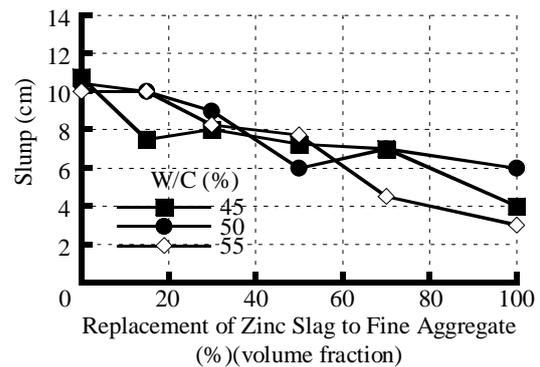
**Fig.8** には、細骨材を亜鉛スラグで置換したフレッシュコンクリートのスランプと亜鉛スラグ置換率の関係を示す。一般に、銅スラグや高炉スラグで細骨材を置換したコンクリートでは、スラグ表面がガラス質なため普通コンクリートと同等以上のワーカビリティを示すことが知られている<sup>5)</sup>。しかしながら、いずれの水セメント比においても、亜鉛スラグを用いたコンクリートのスランプは、亜鉛スラグ置換率の増加に伴って低下する傾向にある。これは、亜鉛スラグの吸水率が高く、亜鉛スラグ置換率の増加に伴って、コンクリート中の水分が吸収され、流動性が失われることによるものと考えられる。なお、本研究においては、普通骨材を表乾状態とする手順で亜鉛スラグをプレウエッティングして使用している。しかし、亜鉛スラグは粗な組織構造を持っていることから、その組織が飽水した状態にはならず、このような現象が生じるものと推察される。

**Fig.9** には、細骨材を亜鉛スラグで置換したフレッシュコンクリートの空気量と亜鉛スラグ置換率の関係を示す。フレッシュコンクリートの空気量は、亜鉛スラグ置換率の増加に伴って若干減少するが、亜鉛スラグ置換率 50%以上では、ほぼ一定となる。なお、空気量の測定において、骨材修正係数による補正は行っていない。

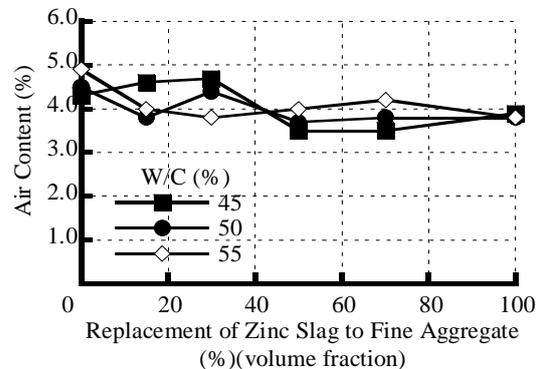
**Fig.10** 及び **Fig.11** には、細骨材を亜鉛スラグで置換し



**Photo 2 X-ray Image Map of Fe on Polished Surface Mortar Specimen.**



**Fig.8 Replacement of Zinc Slag to Fine Aggregate vs. Slump of Concretes.**



**Fig.9 Replacement of Zinc Slag to Fine Aggregate vs. Air Content of Concretes.**

たコンクリートの圧縮及び曲げ強度と水セメント比の関係を示す。亜鉛スラグを用いたコンクリートの曲げ及び圧縮強度は水セメント比の増加に伴って低下する。

**Fig.12** 及び **Fig.13** には、細骨材を亜鉛スラグで置換したコンクリートの圧縮及び曲げ強度と亜鉛スラグ置換率の関係を示す。一般廃棄物などの焼却灰の熔融固化物として得られる熔融スラグを用いたコンクリートでは、その圧縮強度は普通細骨材を用いた場合の 60~80%程度となる<sup>6)</sup>。しかし、一部のものを除いて、亜鉛スラグを用いたコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、それぞれ、亜鉛スラグ置換率 70%及び 50%で最大値を与える。これは、スラグ置換率の増加に伴ってスランプが低下し

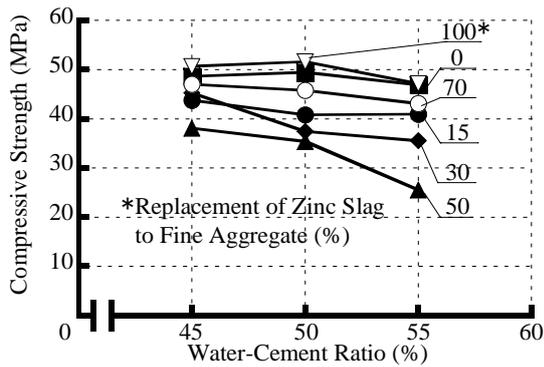


Fig.10 Water-Cement Ratio vs. Compressive Strength of Concretes

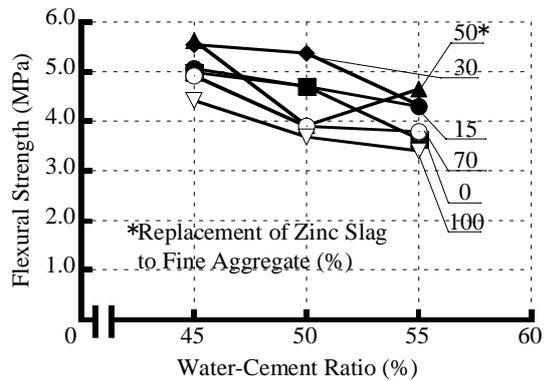


Fig.11 Water-Cement Ratio vs. Flexural Strength of Concretes.

たのと同様に、その増加に伴って、コンクリート中の水分が亜鉛スラグに吸収され、見掛け上、水セメント比が小さくなることに起因するものと考えられる。しかし、亜鉛スラグの置換率が過剰になると、スランブの低下が著しくなって、コンクリートの均質な組織形成が困難になると共に、亜鉛スラグ自体の低い強度が要因となり、圧縮及び曲げ強度が低下するものと考えられる。

## 5. 結論

本研究で得られた試験結果を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 本研究の限りでは、細骨材として亜鉛スラグを用いたモルタルは、標準砂を用いたもののそれに比べて80%程度の曲げ及び圧縮強さを示す。
- (2) 本研究の限りでは、亜鉛スラグを用いたモルタルの熱伝導率は、標準砂を用いたもののそれに比べて低い傾向にある。
- (3) セメントを亜鉛スラグ微粉末で置換すると、その置換率の増加に伴ってモルタルの強さは減少するが、熱伝導率は増加する。
- (4) 細骨材を亜鉛スラグで置換した場合、コンクリートの圧縮及び曲げ強度は、その置換率が50~70%

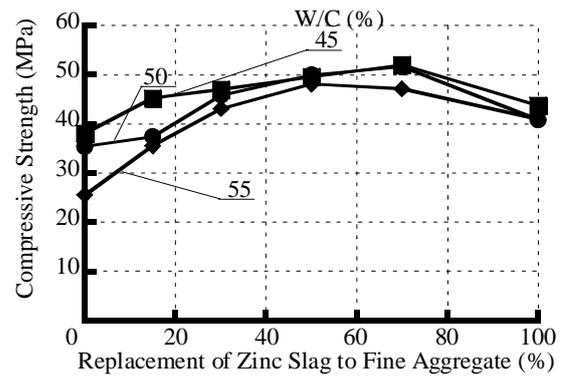


Fig.12 Replacement of Zinc Slag to Fine Aggregate vs. Flexural Strength of Concretes.

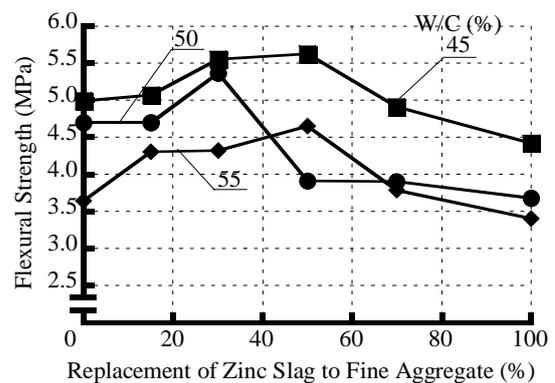


Fig.13 Replacement of Zinc Slag to Fine Aggregate vs. Compressive Strength of Concretes.

までは増大する傾向にある。

## 謝辞

本研究は、旭鉦末(株)宇智田俊一郎及び熊谷征二郎との共同によるものである。ここに記して、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会， pp.41-50, 2007
- 2) 阿部道彦：天然骨材の現状と課題，コンクリート工学， Vol.46, pp.4-10, 2008
- 3) 島崎信明ほか：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの諸性質，コンクリート工学年次論文集， Vol.13, No.1, pp. 275- 280, 1991
- 4) (社)日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック， pp. 326- 328, 2004
- 5) 中村信行ほか：高炉水砕スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの研究，コンクリート工学年次論文集， Vol.14, No.0, pp. 289- 292, 1986
- 6) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構，(財)建材試験センター編：溶融スラグ骨材コンクリート利用マニュアル， p.5, 2006