

# 枯渇する海砂を補うため溶融スラグ細骨材 を利用した混合細骨材としての適用

AN APPLICATION OF SAND MADE FROM MOLTEN SLAG OF  
SOLID MUNICIPAL WASTE AS FINE AGGREGATES

高山俊一  
by Shunichi TAKAYAMA

## 1. まえがき

環境保全の立場から、海砂の採取が厳しい制限を受けるようになった。採取場所の制限により、採取された海砂の粗粒率が年々減少傾向にある。一方、都市ごみの減容化のため、ごみ処理場ではガス化溶融炉が設置され、溶融スラグ細骨材が製造されている。製造された溶融スラグ細骨材は、コンクリート用細骨材として利用するための実験研究が各所で行われている。このような状況の中で最近、溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートで、スラグ細骨材のポップアウト現象が生じたとTVや新聞などで報道された。これは溶融温度が1200℃未満の比較的低温度で製造された溶融スラグ細骨材のため、スラグ中の残留アルミニウム化合物の膨張が原因と考えられる。したがって、都市ごみ溶融スラグには種々の物質が混入するため溶融温度は極めて大切であると考えられる。本研究で使用した溶融スラグ細骨材は、1500℃以上で溶融処理されたものを使用した。このような状況下、枯渇する海砂の代替品として、溶融スラグ細骨材を積極的に使用するため、海砂との混合細骨材としたコンクリートの強度および耐久性に関する実験的研究を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

実験に使用した溶融スラグ細骨材は、北九州市新門司工場(2007年3月に製造を開始)で都市ごみをシャフト式ガス化溶融炉にて1500℃以上で溶融処理(溶融帯1700℃以上である)し、急冷して製造されたものである。溶融スラグはガラス質(ガラス化率100%)の固形物であり、色は黒色である。光に当てると、骨材表面がキラキラと輝いて見える。使用した溶融スラグはJIS A5031を満足している。したがって、カドニウム、鉛および六価クロムなどの重金属は規制値を満足している。使用した骨材の物理的性質を表-1に示す。溶融スラグの密度は2.77g/cm<sup>3</sup>で、海砂より若干大きい。溶融スラグの粗粒率は2.45であり、海砂①に比べて大きく、

海砂②より若干小さかった。溶融スラグの実積率は62.9%であり、両海砂のそれより若干小さかった。海砂①はモルタルで、海砂②はコンクリートの実験でそれぞれ使用した。

### 2.2 実験方法

実験は表-2に示すように3シリーズに分けて行った。まず、シリーズ1で溶融スラグ細骨材と海砂①を混合した混合細骨材によるモルタルのフロー値および強度を調べた。溶融スラグの置換率(容積比)は0,20,40および100%とした。4×4×16cmの供試体を作製し、曲げ強度および圧縮強度の各試験を行った。モルタルの配合を表-3に示す。シリーズ2ではフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの諸性質を調べた。さらに、シリーズ3では耐久性の試験を行った。水中凍結融解試験はJIS A 1148に、促進中性化試験(二酸化炭素濃度5%, 20℃)はJIS A 1153にそれぞれ従って行った。また、モルタルおよびセメントペースト部分の微細構造を調べるため、水銀圧入式ポロシメータによって細孔径および分布を調べた。コンクリートの配合の一部を表-4に示す。水セメント比は62%(目標スランプ18cm)、55%(目標スランプ8cm)の2種類とし

表-1 骨材の物理的性質

種類	密度 g/cm <sup>3</sup>	吸水 率 %	粗粒 率	単位容 積質量 kg/l	実積 率 %
海砂①	2.61	1.80	2.17	1.77	69.1
海砂②	2.61	1.05	2.63	1.735	65.3
溶融スラグ	2.77	0.77	2.45	1.72	62.9
粗骨材	2.66	0.67	6.96	1.617	61.0

表-2 実験項目

シリーズ	試験項目
1	(1) 骨材の物理的性質 (2) モルタルの試験 (フロー値、強度)
2	(1) コンクリートの諸性質 (W/C62, 55%) ・スランプ (8, 18 cm), 空気量, ブリーディング ・圧縮強度 (2) 強度の増進 ・高炉スラグ微粉末の混合
3	(1) 凍結融解試験、中性化試験 (2) 細孔径と分布の測定

表-3 モルタルの配合

スラグ置換率 (%)	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	海砂	スラグ	AE 減水剤
0				1334	0	
20				1108	277	3.9
40	55	268	488	863	575	(C × 0.8%)
60				598	897	
100				0	1599	

表-4 コンクリートの配合の一部

目標スランプ cm	空気量 %	W/C %	細骨材率 %	単位量 kg/m <sup>3</sup>		スラグ置換率 容積比%
				W	C	
18	4.5	62	45	186	300	0,20
8		55		164	298	40,100

表-5 細骨材の破碎値

種類	容器に詰めた質量 W1 g	載荷後 0.3mmふるい通過量 W2 g	破碎値 W2/W1 × 100 %
海砂	375.8	101.3	26.9
熔融スラグ	353.9	114.6	32.3

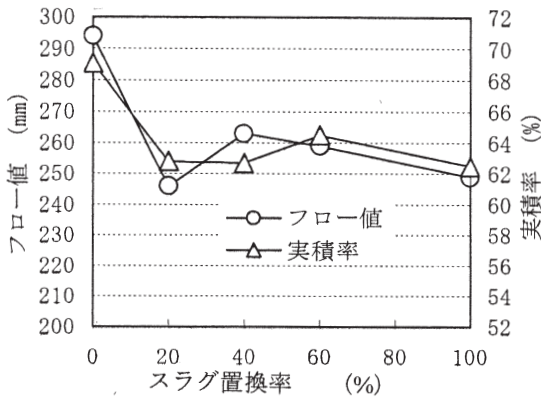


図-1 スラグ置換率とフロー値および実積率

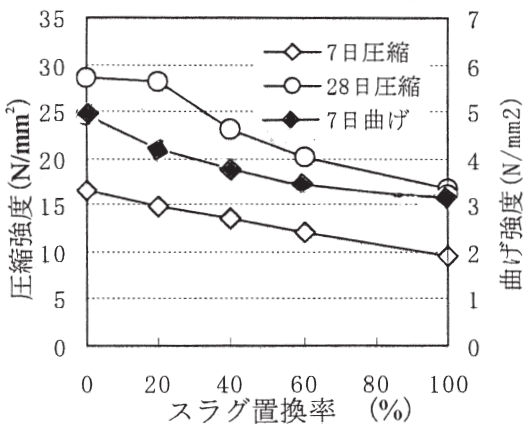


図-2 モルタルの圧縮強度 (W/C=55%)

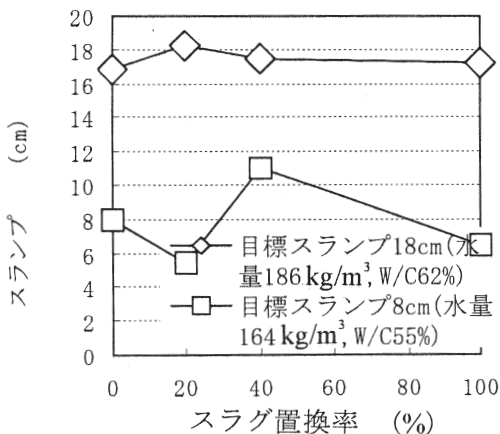


図-3 スラグ置換率とスランプ

た。さらに、熔融スラグ混合コンクリートの強度改善のため、超微粒子高炉スラグ微粉末(以下、高炉スラグ微粉末と略す)を混合したコンクリートの強度を調べた。

### 3. モルタルによる結果および考察

#### 3.1 フロー値と実積率

図-1 はスラグ置換率とモルタルのフロー値および実積率の変化を示す。フロー値は海砂 100%でのモルタルの場合が約 294mm で最大となり、置換率が 20% 以上でのフロー値は 245~260mm とほぼ同程度を示した。実積率は海砂 100%の場合で 69%と最も大きいですが、混合細骨材ではすべて 62~64%とほぼ同一であった。したがって、混合細骨材の実積率がほぼ一定であるため、フロー値も同程度になったものと考えられる。

#### 3.2 モルタルの圧縮強度

図-2 にモルタルの圧縮強度および曲げ強度の変化を示す。同図によると、熔融スラグ混合量が多くなると、両強度とも減少傾向を示し、熔融スラグ 100% の場合が最小の強度であった。スラグ量 0%での強度に対する減少率は、スラグ量 40%の場合、圧縮強度(28日)および曲げ強度が 19%および 23%、スラグ量 100%の場合、圧縮強度(28日)が 42%、曲げ強度が 36%であった。

熔融スラグ細骨材自体の強度を、BS 破碎値試験方法 (BS812)によって調べた<sup>1) 2)</sup>。φ56mm×100mm の鋼製容器に詰めた試料を試験容器(鋼製、φ73×85mm)に入れ、プランジャー(鋼製、φ70mm)を上に乗せ、100kN の荷重で載荷し、0.3mm ふるいを通過した量を破碎値とした。表-5 に破碎試験結果を示す。熔融スラグの破碎値は 32.3%であり、海砂のそれより約 5% 大きくなった。したがって、使用した熔融スラグ自体の強度は、海砂のそれに比べ若干劣るものと考えられる。また、スラグ自体がガラス質であるため、骨材表面とセメントペーストとの付着が、海砂の表面に比べて

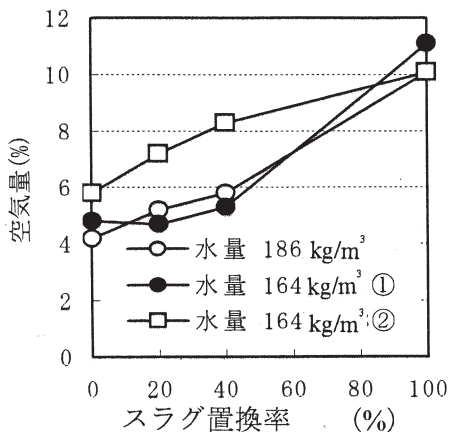


図-4 スラグ置換率と空気量

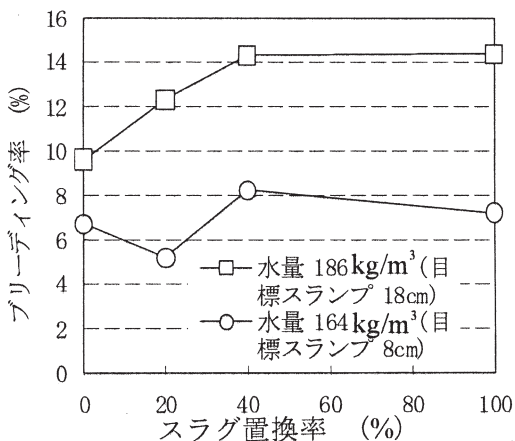


図-5 スラグ置換率とブリーディング率

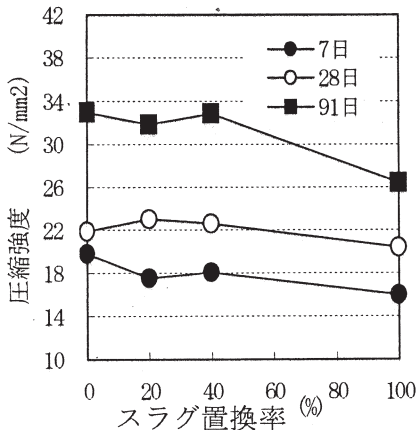


図-6 コンクリートの圧縮強度 (W/C=62%)

小さいことが考えられる。以上の理由から、熔融スラグ量が多くなるほどモルタルの圧縮強度が低下したの  
と考える。

4. フレッシュおよび硬化コンクリートの諸性質

4. 1 空気量およびブリーディング量

図-3 はスラグ置換率とスランプの関係を示す。単位水量 (表-4) は一定として目標スランプを 18 cm および 8 cm とした。コンクリートには AE 減水剤を使用し、AE 補助剤をスラグ置換率 0% および 20% の場合の

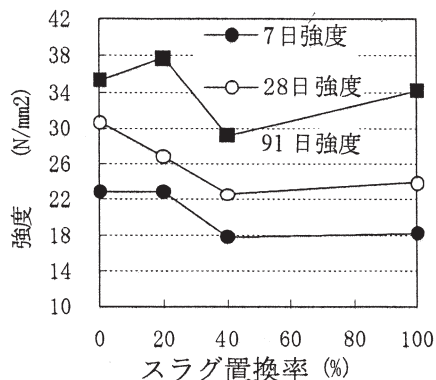


図-7 コンクリートの圧縮強度 (W/C=55%、目標スランプ 8cm)

表-6 超微粒子高炉スラグ微粉末の密度、化学分析

密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	塩基度
2.60	21390	24	9.5	11.8	24.9	7.2	1.81

表-6 スランプおよび空気量

W/C	熔融スラグ%	高炉スラグ	スランプ cm	空気量%
55%	0%	0%	18.0	6.1
			16.0	-
			17.0	10.0
	20%	20%	6.0	-
			5.5	6.9
			2.5	5.9

みに使用した。事前の実験で、スラグ細骨材の置換率が少ない場合は、空気量が少なくなることが分かっていたため、一部の配合のみ AE 補助剤を添加した。単位水量 164kg/m<sup>3</sup> で、スラグ置換率 20% および 40% でスランプ

がばらついているが、スランプはほぼ所要の値を示したものと考える。図-4 はスラグ置換率と空気量の関係を示す。空気量は熔融スラグ量が多くなるにしたがって増加している。特に、スラグ置換率 100% の場合には、空気量が約 10% となり、海砂 100% の場合の約 2 倍にも達している。川上らも、熔融スラグ混合量が多くなるほど、空気量が増大することを示している<sup>3)</sup>。熔融スラグ細骨材は空気の流れを増大する性質を有しているものとする。このことから、熔融スラグ細骨材を多量に使用する場合、空気量の管理に注意しなければならないものとする。図-5 はスラグ置換率とブリーディング率の関係を示す。水量が 186kg/m<sup>3</sup> であるコンクリートのブリーディング率は、水量 164kg/m<sup>3</sup> に比べて 3~6% ほど大きくなっている。熔融スラグ量が多くなると、ブリーディング率の増加が認められた。

これは、熔融スラグの密度が海砂に比べて約 0.15g/cm<sup>3</sup> 大きいこと<sup>4)</sup>、熔融スラグ自体がガラス質で



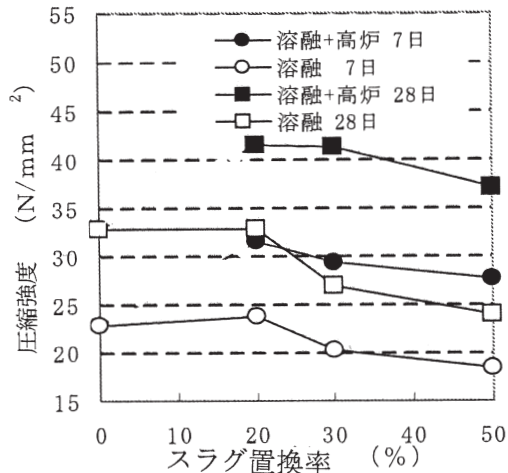


図-8 高炉スラグ微粉末混合による強度の増進 (W/C=55%、高炉20%)

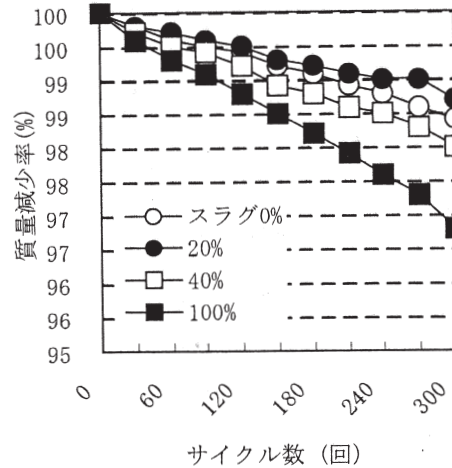


図-10 質量減少率とサイクル数

表-8 耐久性に使用したコンクリートの性質

スラグ置換率	W/C	s/a	水量 kg/m³	スランプ cm	空気量 %
0%	55%	45%	150	15.5	5.8
20%			150	11.5	7.2
40%			158	11.0	8.3
100%			164	5.5	10

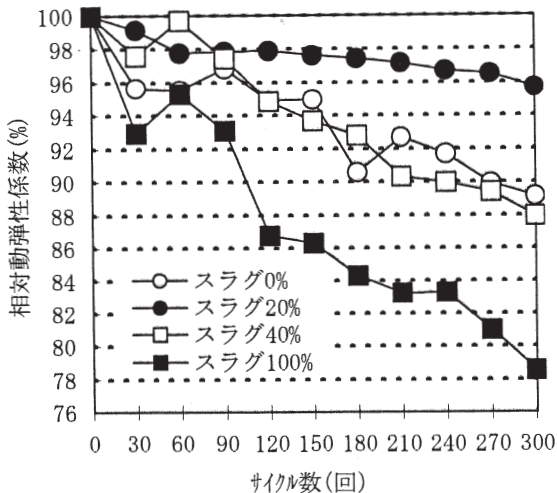


図-9 凍結融解における相対動弾性係数

あるため水の保水性が小さいことが考えられることなどが原因であると判断される。

#### 4.2 コンクリートの圧縮強度

図-6 は水セメント比 62%、図-7 は水セメント比 55%の圧縮強度の変化を示す。スラグ置換率 100%のコンクリートでは、空気量が約 10%と著しく大きくなったため、スラグ置換率 100%の場合のみについて図中の強度は空気量による補正を行った<sup>5)</sup>。水セメント比が 62%の場合、スラグ置換率 20%および 40%の圧縮強度は、海砂 100%の場合とほぼ同程度であったが、

融融スラグ置換率 100%の圧縮強度は若干低下している。図-7 の水セメント比 55%の場合、海砂 100%の圧縮強度が最も大きく、スラグ量が多くなると圧縮強度の低下を示している。しかしながら、スラグ置換率 20%の圧縮強度は材齢 28 日で強度の低下がみられたが、材齢 91 日では逆に海砂 100%の場合より増大している。戸田らもガラス質の融融スラグ量が多くなるほど、強度低下が認められたことを示している<sup>6)</sup>。以上のことから、融融スラグの混合量が 20%であれば、強度のばらつきは見られるが海砂 100%の場合とほぼ同程度であると考えられる。

#### 4.3 高炉スラグ微粉末による圧縮強度の改善

融融スラグ細骨材を混合したコンクリートの圧縮強度が低下するため、表-6 に示す比表面積 21390cm<sup>2</sup>/g の超微粒子の高炉スラグ微粉末を混合し、強度の増進が可能であるか検討した。高炉スラグの塩基度が 1.81 であるため、潜在水硬性が十分に期待できるものと考えられる。表-7 に供試体を作製したコンクリート(W/C = 55%)のスランプおよび空気量を示す。高炉スラグ微粉末の置換率は、セメント量の容積比で 20%とした。図-8 は高炉スラグ微粉末を混合した場合の圧縮強度の変化を示す。融融スラグ混合のみのコンクリートでは、融融スラグ量が多くなるにしたがって強度の低下が認められる。特に、融融スラグ置換率が 30%および 50%と多くなると、材齢 28 日で 5~8N/mm<sup>2</sup>の強度低下が認められる。しかしながら、高炉スラグ微粉末(記号●, ■)混入コンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日で 8~10N/mm<sup>2</sup>と著しい増加を示した。このことから、比表面積が大きい高炉スラグ微粉末を混合すれば、圧縮強度の増加に著しく効果があることが分かる。

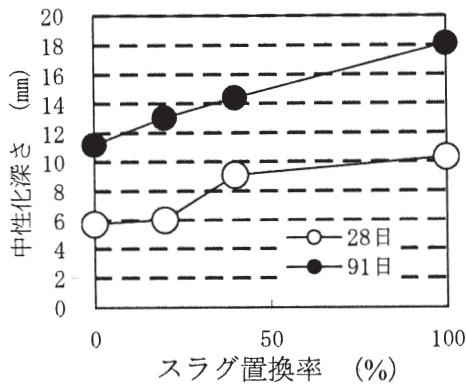


図-11 スラグ置換率と中性化深さ

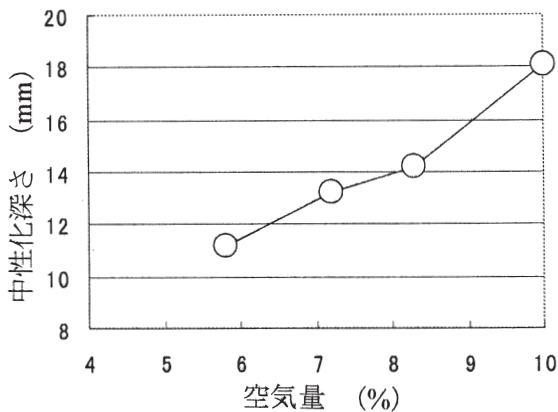


図-12 中性化深さと空気量

5. 溶融スラグ細骨材混合コンクリートの耐久性

表-8 は凍結融解および中性化の両耐久性試験に使用したコンクリートの性質を示す。土木用コンクリートを考えて目標スランプは 10cm, 目標空気量は 5.5% とした。空気量は高耐久性コンクリートとするため、表-4 の空気量より 1%大きくした。スランプは溶融スラグ量が少ないほど大きくなった。空気量はスラグ量が多くなるにしたがって増加を示した。空気量の結果は、図-4 の場合と同様の結果である。

5.1 凍結融解抵抗性

図-9 は相対動弾性係数を、図-10 は質量減少率の測定結果を示す。4 種類のコンクリートの相対動弾性係数は、サイクル数 300 回に達しても全て 60%以上あり、耐久性に優れているといえる。耐久性指数はスラグ置換率 20% の場合が 95.7% で最も大きく、次にスラグ置換率 0% および 40% の場合が 89.1% および 88.0% であった。スラグ置換率 100% での耐久性指数は 78.6% であり、他の 3 種類のコンクリートに比べて小さかった。質量減少率の変化は、相対動弾性係数と同じ傾向を示した。スラグ置換率 100% のコンクリートは、サイクル数 200 回を越える頃から表面のモルタルが若干スケーリングを生じるようになった。他の 3 種類のコ

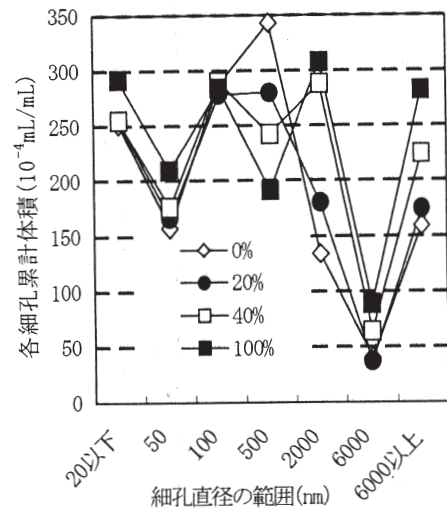


図-13 細孔直径と各細孔累計体積

ンクリート表面は、サイクル数 300 に達した場合でもスケーリングはほとんど認められなかった。

5.2 中性化深さ

図-11 は二酸化炭素 5% 濃度試験槽中で、28 日および 91 日間の促進中性化試験を行った中性化深さを示す。同図によると、スラグ置換率が多くなるほど、中性化深さは大きくなっている。試験期間 91 日での溶融スラグ 100% のコンクリートの中性化深さは約 18mm にも達し、海砂 100% の場合に比べて約 7mm の違いになっている。図-12 は空気量と中性化深さ(試験期間 91 日)の関係を示す。同図によると、中性化深さは空気量が大きくなるにしたがって増大している。中性化深さは空気量と比例関係が認められる。一般に空気量が 7% を越えると、コンクリートの水密性が減少するため、中性化深さが大きくなったものとする。このことから、スラグ置換率を変えても空気量を一定とした中性化試験を行わなければならないものとする。

5.3 細孔直径の各細孔累計体積と耐久性

コンクリートの微細構造を調べるため、水銀圧入式ポロシメータによって細孔直径と各細孔累計体積の関係を調べた。微細構造の増加はコンクリートの耐久性の向上に貢献するが、やや粗大な毛細管空隙の増加は耐久性の低下に影響するものとする。細孔直径と各細孔累計体積の関係を図-13 に示す。同図の横軸の細孔直径 500nm(10<sup>-9</sup>m)は、101~500nm の細孔直径の分布での累計体積(× 10<sup>-4</sup>ml/ml)を示している。100nm 以下の極小細孔直径の分布は、耐久性の向上に効果的に作用するものとする。逆に、2000nm 以上の比較的大きな細孔直径の分布は、耐久性を低下させる方向に作用するものとする。同図によると、細孔直径 2000nm および 6000nm 以上での細孔累計体積は、

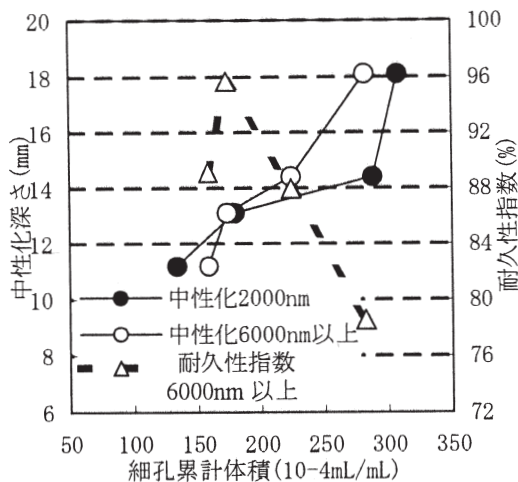


図-13 細孔累計体積と耐久性

熔融スラグ置換率 100%が最も多く、40%および 20%の順となり、スラグ置換率 0%の場合が最小の約  $150 \times 10^{-4}$  ml/ml を示した。

2000nm から 6000nm 以上の細孔累計体積が、凍結融解抵抗性および中性化深さに関係することが考えられるため、細孔累計体積と耐久性係数および中性化深さの関係を図-14 に示す。同図によると、耐久性指数は細孔直径 2000nm および 6000nm 以上での細孔累計体積大きくなるにしたがって減少傾向を示している。耐久性指数は細孔累計体積が大きくなるほど小さくなっている。細孔累計体積が大きくなることは、空げき部分が多くなることであるため、耐久性指数が低下することになるものと考えられる。また、細孔直径 2000nm および 6000nm 以上の比較的大きな細孔直径での細孔累計体積が大きくなると、中性化深さが増加するものと考えられる。比較的大きな細孔累計体積が多くなると、コンクリートの水密性は低下するために中性化深さが大きくなったものと考えられる。

## 6. まとめ

本研究から得られたことをまとめて記す。

- (1) 熔融スラグ細骨材の混入量が多くなると、コンクリートの空気量は増加傾向を示した。
- (2) コンクリートの圧縮強度は、スラグ置換率が大きくなると減少傾向を示した。この理由として、熔融スラグ自体がガラス質であるため、スラグ表面とセメントペーストとの付着が十分でないこと、スラグ細骨材の破砕値が大きいことなどが考えられる。

(3) 超微粉末の高炉スラグ微粉末を混入すると、熔融スラグ細骨材使用コンクリートの圧縮強度が  $8 \sim 10 \text{ N/mm}^2$  増大した。

(4) 熔融スラグ混入コンクリートの凍結融解抵抗性は、良好であるとの結果が得られた。

(5) 強度および耐久性の両面から、熔融スラグ細骨材の置換率 20~40%のコンクリートは、海砂使用コンクリートに比べて劣る点は認められなかった。したがって、熔融スラグ細骨材の置換率 20~40%は十分に使用できるものと考えられる。

終わりに、耐久性試験および細孔直径とその分布の測定にご協力を戴いた新日鐵高炉セメント(株)(北九州市)に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国分正胤編：土木材料実験，pp.109-112，1969
- 2) 高山俊一、小松真也、山田義雄、岩間守一：都市ごみ熔融スラグ細骨材を海砂代替品として使用するための基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.61(2007)，セメント協会，pp.632-637、2008.3
- 3) 川上勝弥、鈴木澄江、森田秀明、依田彰彦：熔融スラグ骨材コンクリートの普及に向けて，セメント・コンクリート，No.730，pp.21-31，2007.12
- 4) 竹中寛、笠井哲郎、磯貝寛幸：ごみ熔融スラグを用いたコンクリートの品質改善に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.61、2007、pp.579-585
- 5) 小林一輔：最近コンクリート工学、第3版、森北出版(株)、p.65、1993.9
- 6) 戸田勝哉ほか：ごみ焼却灰熔融スラグを骨材として用いたコンクリートの基礎的性状，石川島播磨技報，Vol.44，No.2，pp.108-116，2004.3
- 7) 羽原俊祐、上村祐一郎、市村牧彦：セメント・コンクリートの Nano テクノロジー、セメント・コンクリート、No.675、pp.1~9、May.2003

(2008年6月受付 2009年2月受理)