

# 論文 都市ゴミ溶融スラグのコンクリート用細骨材としての有効利用に関する研究

添田 政司\*1・折田 紘一郎\*2・大和 竹史\*3

要旨：本研究では、炉形式の異なる数種の溶融スラグを用いて、コンクリート用細骨材として使用した場合の粒度分布の影響、粒子形状の影響および置換率の影響について検討を行った。その結果、JIS規格である細骨材の粒度分布の平均値となるように粒度調整を行った場合は、置換率の増加にともなうフレッシュ性状の悪化および圧縮強度の低下を抑制することが可能となり、また、耐久性についても問題ないことが明らかとなった。

キーワード：溶融スラグ、粒度調整、圧縮強度、耐久性

## 1. はじめに

近年、溶融スラグのコンクリート用細骨材としての適用に関する検討は、急速にその事例が増加してきている。これにより溶融スラグの品質や基礎物性に関わるデータが蓄積されてきたことを受けて、2002年7月に「TR A 0016：一般廃棄物、下水汚泥等の溶融固化物を用いたコンクリート用細骨材」<sup>1)</sup>が公表された。しかしながら、廃棄物を溶融固化する際、元となるゴミ質、溶融炉形式および冷却方法などの相違により、出来上がった溶融スラグは化学的・物理的性質が大きく異なり、細骨材としての品質および性能に差異が生じる。そのため、溶融スラグを細骨材として用いる場合に安定した供給が困難となる問題が生じると考えられる。

また、溶融スラグのコンクリート用細骨材としての積極的な利用を妨げている一要因として、溶融スラグは粒子が角張っており、針状の粒子を含有しているなど粒子形状が悪いことや、細粒分が極端に少なく、粒径が単一的であり粒度分布が悪いことが挙げられる。そのため、溶融スラグを細骨材として使用した場合、フレッシュ性状の悪化や強度および耐久性の低下を引き起こす可能性があり<sup>2)</sup>、何らかの方法で溶融スラグの品質を改善させる必要があると考えられる。

その一例として、摩砕による表面加工等が報告されているが<sup>3)</sup>、使用する機械の種類等による品質の差異や、コスト増加の問題が考えられる。

そこで本研究では、より簡易で安定的な加工方法として、JIS規格である細骨材の粒度範囲の平均値となるように粒度調整を行った溶融スラグを用いてモルタルおよびコンクリートを作製し、コンクリート用細骨材としての有効利用の可能性について検討を行った。

## 2. 溶融スラグの物理的・化学的性状

### 2.1 本実験で用いた溶融スラグの概要

本研究では炉形式の異なるスラグA(直接式ガス化溶融、水砕、1700～1800)、スラグB(キルン式ガス化溶融、水砕、約1300)およびスラグC(酸素式熱分解直接溶融、水砕、1650～1800)の3種類の溶融スラグを用いて、無加工および粒度調整を行った場合について検討を行った。表-1に溶融スラグの加工条件および加工方法を示す。

本研究で用いた溶融スラグの外観を写真-1に、溶融スラグの粒度分布を図-1に示す。写真-1より、いずれの溶融スラグも粒子形状は角張っており、針状の粒子の存在を確認する事がで

\*1 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学専攻 助教授 博士(工学)(正会員)

\*2 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 修士(工学)(非会員)

\*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 教授 博士(工学)(正会員)



スラグA			スラグB			スラグC		
色	表面	針状粒子	色	表面	針状粒子	色	表面	針状粒子
灰色	ざらついた砂状	小さく、やや少ない	赤みがかった黒色	比較的滑らか	やや多い	黒色	非常に滑らか	比較的大きく、多い

写真-1 溶融スラグの外観

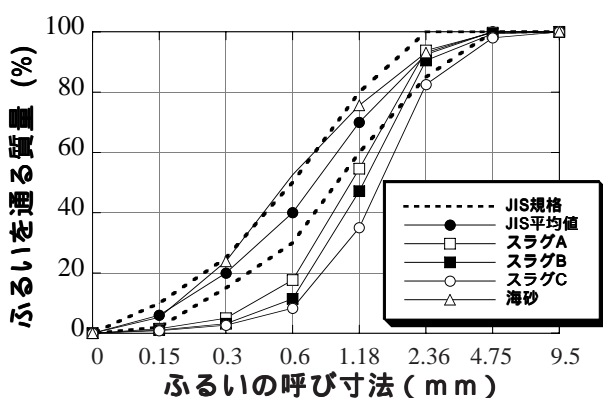


図-1 細骨材の粒度分布

きる。また、図-1よりいずれの溶融スラグにおいても粒径0.3mm以下の細粒分が極端に少なく、粒径0.6mm～2.36mmの部分約80%を占める単一的な粒度分布を示しているのが確認できる。

## 2.2 溶融スラグの化学的性状

表-2に溶融スラグの化学成分を示す。いずれもCaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびSiO<sub>2</sub>が構成成分の約80%を占めている。特にスラグAではCaOの含有率が比較的高い値を示したことから、スラグBおよびCと比較して塩基度が若干高い値となった。しかしながら、高炉スラグ微粉末の塩基度の規格値である1.60と比較するといずれも低い値であり、潜在水硬性による長期強度の増進は期待できない。また、溶融スラグ中の全硫黄および三酸化硫黄が多いと、コンクリート硬化体が異常膨張する

表-2 溶融スラグの化学成分

種類	化学成分 (%)								塩基度 (b)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
スラグA	41.00	14.30	0.90	0.64	36.20	1.72	4.25	0.61	1.27
スラグB	45.80	13.10	6.00	1.21	19.50	2.41	6.45	2.13	0.76
スラグC	42.30	17.50	7.10	1.39	22.60	2.59	2.53	1.31	1.01

\*塩基度 (b) = (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + MgO) / SiO<sub>2</sub>

表-1 溶融スラグの加工条件

溶融スラグ	CASE	加工条件	無加工	溶融スラグをそのまま使用
A	1	無加工	粒度調整	網ふるいをを用いて溶融スラグを粒径0mm～4.75mmまでの6段階に分級し、JIS A 6204に示す細骨材の粒度範囲の平均に粒度調整。なお、含有量の少ない0.3mm以下の粒子の補充のため、含有量の多い0.6mm以上の粒子を粉碎し、溶融スラグの全量使用を行った。
	2	粒度調整		
B	3	無加工		
	4	粒度調整		
C	5	無加工		
	6	粒度調整		

表-3 重金属溶出量

項目	重金属溶出量 (mg/l)			
	スラグA	スラグB	スラグC	溶出基準
カドミウム	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
鉛	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
六価クロム	<0.02	<0.02	<0.02	0.05
砒素	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
総水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005
セレン	<0.002	<0.002	<0.002	0.01

事や、コンクリート中の鋼材を腐食させる恐れがあるため、TR A 0016において全硫黄が2.0%以下、三酸化硫黄が0.5%以下と規定されているが、いずれの溶融スラグからも検出されなかった。表-3に溶融スラグからの重金属の溶出量を示す。本研究で用いた溶融スラグはいずれも一般廃棄物の溶融固化物に係わる溶出基準を満足して

表-4 溶融スラグの物性値

試験項目	単位	試験方法	試料								規定値
			スラグA		スラグB		スラグC		海砂		
			CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6			
絶乾密度	g/cm <sup>3</sup>	JIS A 1109	2.57	2.63	2.69	2.73	2.79	2.79	2.56	2.5	
表乾密度	g/cm <sup>3</sup>	JIS A 1109	2.60	2.66	2.71	2.73	2.81	2.80	2.59	-	
吸水率	%	JIS A 1109	1.00	1.05	0.65	0.13	0.65	0.45	1.27	3.0	
粗粒率	-	JIS A 1102	3.28	2.72	3.47	2.72	3.73	2.72	2.50	-	
実績率	%	JIS A 1104	57.0	60.8	59.2	65.7	59.0	68.2	65.6	-	
粒径判定実績率	%	JIS A 5005	51.6	50.4	56.2	55.5	57.6	57.6	60.7	53.0	
単位容積質量	kg/l	JIS A 1104	1.48	1.62	1.60	1.79	1.66	1.91	1.70	-	

表-5 コンクリートの配合

溶融スラグ	置換率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (C*%)	AE (cc)
				W	C	S	Slg	G		
無混和	0	50	45	172	344	783	0	1027	0.05	1548
スラグA CASE2	50	50	44	172	344	386	396	1034	0.60	585
	75	50	44	172	344	194	597	1031	0.70	619
	100	50	45	172	344	0	802	1033	0.98	860
スラグC CASE6	50	50	44	172	344	384	414	1042	0.10	1204
	75	50	44	172	344	193	624	1038	0.14	1101
	100	50	45	172	344	0	838	1033	0.15	860
無混和	0	30	40	172	573	615	0	1007	0.52	4871
		40	42	172	430	694	0	1047	0.40	2580
スラグC CASE6	100	30	41	172	573	0	681	988	0.53	7449
		40	43	172	430	0	768	1027	0.42	2795

\* : 消泡剤

おり、溶融スラグからの重金属の溶出は認められなかった。

### 2.3 溶融スラグの物理的性状

表-4に溶融スラグの物性値を示す。海砂と比較して、スラグAでは密度および吸水率ともに同程度の値を示し、スラグBおよびスラグCでは密度は高く、吸水率は低い値を示している。実績率はスラグA、スラグBおよびスラグCともに、粒度調整を行うことで60%以上の値を示した。しかしながら、粒径判定実績率においてはいずれも低い値を示している。特にスラグAではJIS規定値である53%を下回っており、今回用いた溶融スラグの中で、最も粒子形状が悪いと考えられる。

## 3. 実験概要

### 3.1 使用材料

結合材として普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm<sup>3</sup>,略号:C),細骨材として海砂(略号:S)および溶融スラグA,BおよびC(略号:Slg),粗骨材として砕石2005(密度:2.75g/cm<sup>3</sup>,吸水率:0.90%,略号:G),混和剤として

高性能AE減水剤(消泡剤混入タイプ,略号:SP)およびAE剤(略号:AE)を使用した。また、スラグAでは粒径判定実績率が極端に低く、コンクリート中のエントラップドエアが増加するため、消泡剤(略号:AE)を添加することにより目標の空気量(4.5±1.5%)への調整を行った。

### 3.2 配合

強度試験用のモルタルの配合は、JSCE-F505に準じて、膨張率試験用のモルタルの配合はTR A 0016(付属書1)に準じて、それぞれW/C=50%とし、溶融スラグA,BおよびCを体積比で50,75,100%の割合で海砂と代替した。コンクリートの配合は、W/C=50%,スランブ8±2.5cm,空気量4.5±1.5%とし、CASE2およびCASE6の溶融スラグを体積比で50,75,100%の割合で海砂と代替した。また、溶融スラグの高強度コンクリートへの適用性の検討として、スラグCのCASE6(置換率100%)を用いてW/C=30%およびW/C=40%のコンクリート供試体を作成し、溶融スラグ無混和の場合との比較を行った。表-5にコンクリートの配合表を示す。

### 3.3 試験方法

表-6にモルタルおよびコンクリートでの試験項目および試験方法を示す。コンクリートの圧縮強度試験は 10 × 20cm の円柱供試体を用いて所定の水中養生期間を経た後、JIS A108 に準じて行った。中性化促進試験における中性化深さの測定は、10 × 10 × 40cm の角柱供試体を1週間毎に端部より5cm 間隔に割裂した後、フェノールフタレイン1%エタノール溶液を吹き付け、非変色面を中性化部としてノギスを用いて測定した。なお、1面に対して5点、計20点測定し、そのうちの最大値および最小値を除外した18点の平均値を算出した。

表-6 試験項目および試験方法

供試体	試験項目	試験方法
モルタル	圧縮強度試験	JIS R 5201
	膨張率試験	TR A 0016 (付属書1)
コンクリート	スランブ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128
	圧縮強度試験	JIS A 1108
	静弾性係数試験	JIS A 1149
	中性化促進試験	温度40、湿度40%、CO <sub>2</sub> ガス濃度10%の条件下で、70日間の促進試験
	凍結融解試験	JIS A 1148

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 モルタル供試体での実験結果

図-2および図-3にモルタルの圧縮強度を示す。無加工であるCASE1, 3および5では置換率の増加にともない強度は低下する傾向にある。この要因として、図-1および表-4より、細粒分が少なく粒度分布が悪いことや粒子形状が悪いことから、流動性が低下し、空気量が増加したためであると考えられる。特にCASE1では粒径判定実績率の値が最も低く、CASE3および5と比較して置換率の増加にともなう強度低下がより顕著に現れた。しかしながら、粒度調整を行ったCASE2, 4および6では置換率の増加にともなう強度低下が抑制され、無混和と同等の強度を示した。

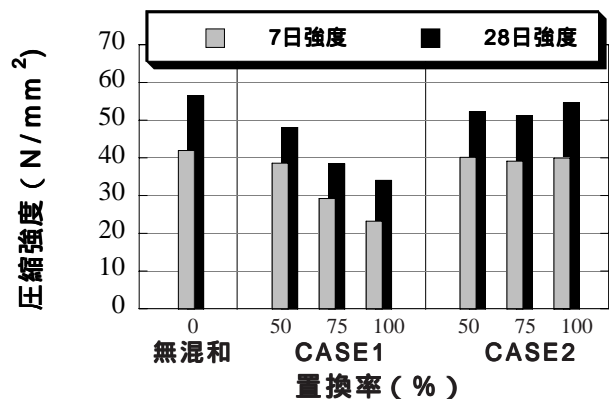


図-2 モルタルの圧縮強度 (スラグ A)

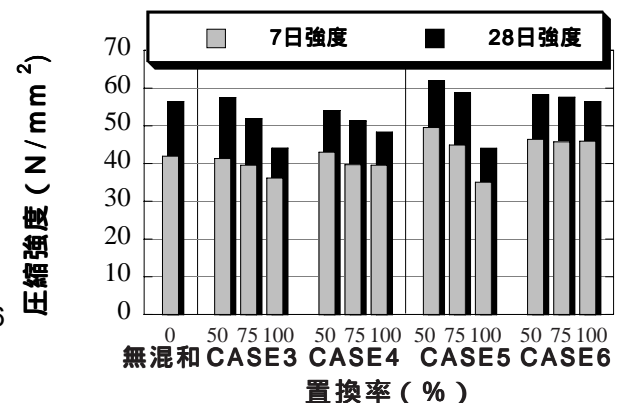


図-3 モルタルの圧縮強度 (スラグ B, C)

図-4にモルタルの膨張率を示す。TR A 0016において溶融スラグ中の金属アルミニウムに起因するモルタルの膨張率は2.0%以下であることと規定されている。スラグA, BおよびCともに置換率の違いによるばらつきはあったものの、膨張は見られなかった。いずれも溶融温度が高く、溶融スラグ中の金属アルミニウムは酸化アルミニウムとして安定していると考えられ、溶融スラグの混入によるモルタルの膨張はないと考えられる。

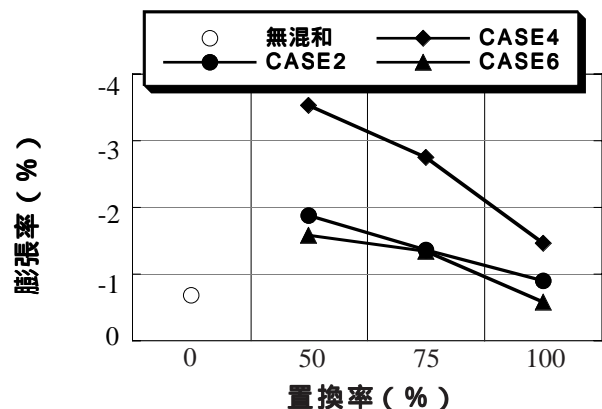


図-4 モルタルの膨張率

モルタルでの実験結果より、粒度調整を行った溶融スラグを用いることで置換率の増加にともなう強度低下を抑制することが確認された。そこで、スラグAのCASE2およびスラグCのCASE6を用いてコンクリート供試体を作製し、検討を行った。

#### 4.2 コンクリート供試体での実験結果

図-5にW/C50%における無混和、CASE2およびCASE6でのコンクリートの圧縮強度を示す。CASE2では無混和と比較していずれの置換率もほぼ同等の値を示し、溶融スラグ混入による急激な強度低下はみられなかった。また、CASE6においても置換率の増加にともなう強度低下は見られなかったが、無混和と比較すると材齢7日および28日ともに強度は1割強の低下を示し、材齢91日での強度増進はほとんど見られない。この要因として、スラグCであるCASE6では、表面が非常に滑らかであり、また、針状粒子を比較的多く含んでいるため、溶融スラグを含むモルタル部分と粗骨材との付着力が減少したためであると考えられる。

図-6に無混和およびCASE6(置換率100%)におけるW/Cと圧縮強度の関係を示す。材齢7日では無混和と比較してCASE6は低い値を示したが、近似式の傾きは同程度となっている。しかしながら、材齢28日ではCASE6の近似式の傾きは小さくなり、W/C40%では無混和の7日強度と同程度の値を示した。また、W/C30%においては無混和の7日強度よりも低い値を示した。この要因として、前述したようにモルタル部分と粗骨材との付着力が減少したためであると考えられる。結果として、CASE6は圧縮強度50N/mm<sup>2</sup>以上の高強度領域に入ってくると、強度の伸びが小さくなり、W/Cの減少による圧縮強度の大幅な増加は期待できないと考えられる。

図-7に無混和、CASE2およびCASE6における圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。コンクリート標準示方書による値と比較するといずれも高い値を示している。既往の研究によると溶融スラグは密度が大きく吸水率が低いため、圧縮強度が同じ場合、無混和と比較して溶融スラグを混入したものはやや高い傾向にあると報告されているが<sup>4)</sup>、本研究においても同様の結果が得られた。また、CASE2とCASE6を比較するとCASE2の方が近似式の傾きは大きい、圧縮強度45N/mm<sup>2</sup>付近まではCASE6の方が高い静弾性係数を示すという結果が得られた。

図-8に中性化促進期間(日)と中性化浸透深さとの関係を示す。CASE2およびCASE6と

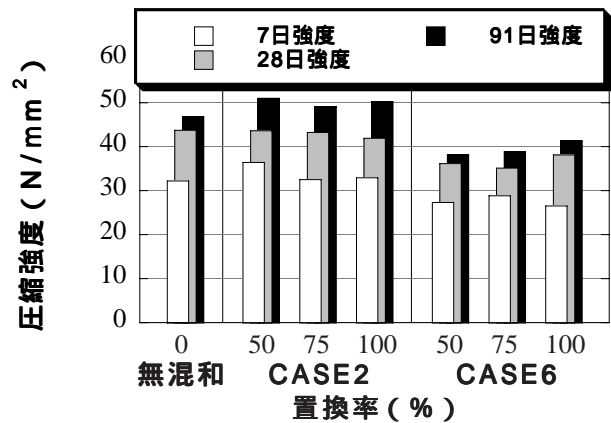


図-5 コンクリートの圧縮強度

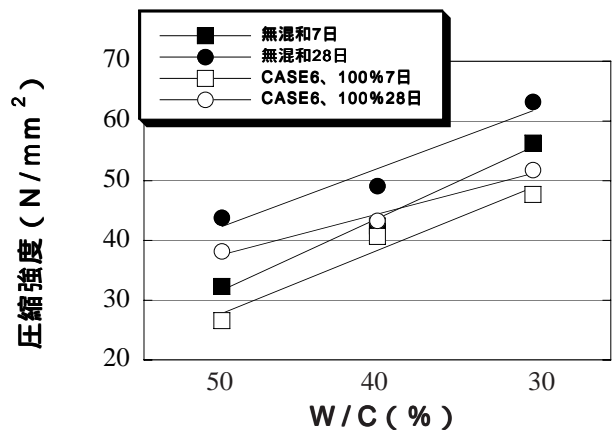


図-6 W/Cと圧縮強度の関係

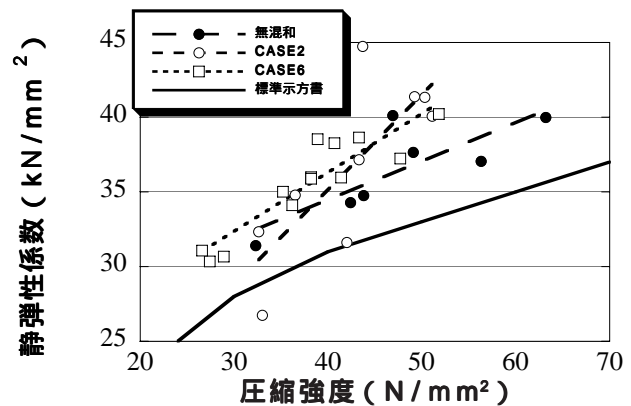


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

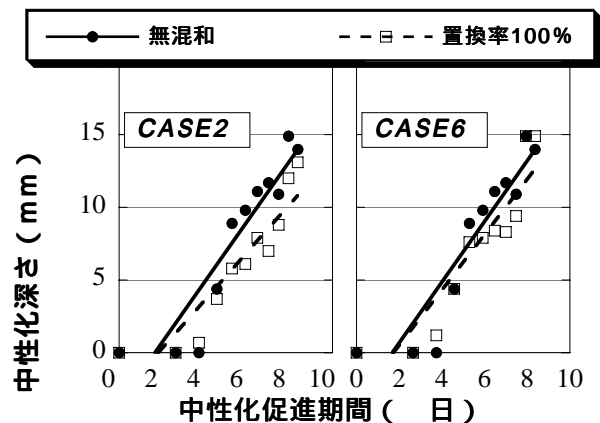


図-8 中性化促進期間と浸透深さの関係

もに、最終的な浸透深さおよび近似式の傾きは無混和と同等な値を示し、溶融スラグ混入による中性化への影響はないものと考えられる。図-5より、CASE6においては無混和と比較していずれも1割強の強度低下を示したが、この要因は溶融スラグ界面における付着力の低下によるものと考えられ、中性化へ及ぼす影響は無いものと考えられる。

図-9に凍結融解試験300サイクルにおける相対動弾性係数を示す。CASE2では置換率50%および100%において若干の低下が見られたが、いずれも80%以上の値を示している。CASE6では置換率の違いによる顕著な差は見られず、いずれも95%以上の高い値を示した。CASE2および6ともに、300サイクル終了時において80%以上の値を示しており、耐凍害性について問題はないと考えられる。

図-10に凍結融解試験300サイクルにおける質量減少率を示す。CASE2では置換率の違いによる大きな差は見られず、無混和と同等の値を示した。しかしながら、CASE6ではモルタルと細骨材との付着が悪いと考えられるため、質量減少率が大きくなる傾向にあった。

## 5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである

- 1) モルタルでは、無加工の溶融スラグを用いた場合は、置換率の増加にともない強度は大幅に低下した。
- 2) 粒度調整を行った溶融スラグを用いることで、モルタルおよびコンクリートともに、置換率の増加にともなう圧縮強度の低下を抑制することが可能となった。
- 3) コンクリートにおいては、溶融スラグの表面が非常に滑らかである場合には、モルタル部分と粗骨材との付着力が低減すると考えられるため、無混和と比較して強度が低下し、高強度領域においては強度の増進が期待できない場合があることが確認された。
- 4) 粒度調整を行った溶融スラグを用いることで、置換率に関わらず良好な耐凍害性および中性化に対する抵抗性を有することが確認された。

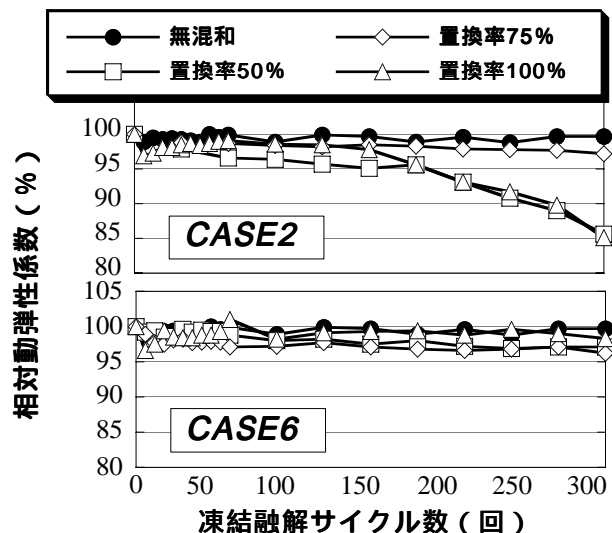


図-9 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

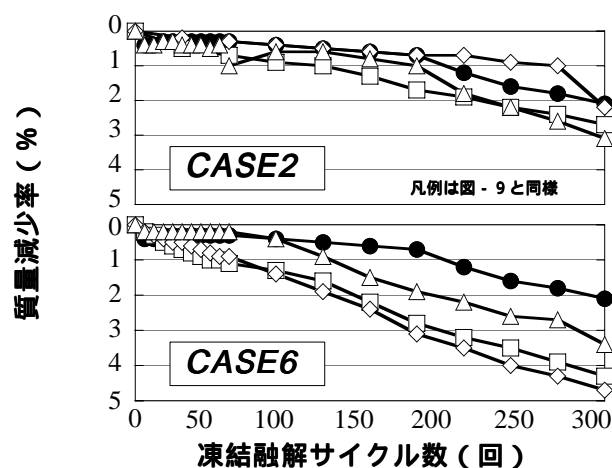


図-10 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

## 参考文献

- 1) 日本工業標準調査会：TR A 0016一般廃棄物、下水汚泥等の溶融固化物を用いたコンクリート用細骨材，2002，7
- 2) 北辻政文ほか：「ゴミ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質」，農業土木学会論文集，第200号，pp223～231，1999，4
- 3) 例えば，錦織和紀郎ほか：「焼却灰溶融スラグを用いたコンクリートの特性と実施工への適用」，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp169～174，1999
- 4) 齊藤丈士ほか：「ゴミ焼却灰溶融スラグを結晶化させた骨材がコンクリートの性状に及ぼす影響」，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp289～294，2000