論文　都市ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの物性に関する研究

高田　聡恵[*1]・糸山　豊[*2]・上原　匠[*3]・梅原　秀哲[*4]

要旨：都市ごみ溶融スラグは，含有する金属アルミニウムがコンクリート中のアルカリと反応してコンクリートを膨張させ，その物性に影響を及ぼすことが懸念されている。そこで簡易的な膨張量試験方法を提案し，都市ごみ溶融スラグを混入したコンクリートの膨張現象の把握を行うとともに，３種類のスラグについて置換率を変え，スラグの違いによるコンクリートの性状の違いについて検討した。また，スラグ置換率一定のもと混和剤添加率や単位水量を変えて物性試験を行い，膨張現象と強度特性について考察した。

キーワード：都市ごみ溶融スラグ，膨張，膨張量試験，スラグ置換率，金属アルミニウム

1.　はじめに

都市ごみ溶融スラグ（以下，スラグと記述）とは，各家庭からの生活廃棄物や企業からの事業系廃棄物を，間接または直接1200℃以上の高温の下，溶融炉で溶融処理した残渣である[1)]。スラグは，その製造過程でダイオキシンを発生しないだけでなく，化学的に安定し，品質も比較的均一であることからコンクリート用骨材としての利用が期待されている。しかし，一部のスラグでは膨張する性状も確認されている[2)]ことから，スラグを混入したコンクリートについて，膨張する性質を含めた物性を把握することによって，スラグのコンクリート用骨材としての適用性を検討することが必要であるといえる。

そこで本研究では，スラグを混入したコンクリートのフレッシュ時における膨張性状を把握する試験方法を提案するとともに，愛知県で排出される３種類のスラグを対象に膨張量試験を行い，同時にフレッシュ時および硬化後の物性についても実験を基に検討した。

また，明らかな膨張現象が確認されるスラグ（Sg1）については，種々の配合の下で実験を行い，シリーズごとの結果を分析し，膨張現象と硬化後の物性について考察を行った。

2.　使用材料

本研究で用いたスラグは，酸素式熱分解直接溶融炉より排出される Sg1（可燃ごみ，不燃ごみを溶融した後水砕），プラズマ式溶融炉より排出される Sg2（主灰，飛灰，不燃物残渣を溶融後水砕），ならびに電気抵抗式溶融炉より排出さ

表－１　都市ごみ溶融スラグの化学組成

化学組成（%）					
成分名	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
Sg 1	46.4	16.7	5.5	19.5	2.9
Sg 2	38.0	21.0	1.7	30.0	2.9
Sg 3	42.8	16.0	0.5	29.5	1.8

表－２　都市ごみ溶融スラグの骨材試験結果

試験項目			単位	Sg1	Sg2	Sg3
粗粒率			－	3.78	3.38	4.32
洗い試験			%	0.7	0.8	0.4
単位容積質量			kg/m^3	1430	1680	1680
実績率			%	53.9	58.2	59.8
有機不純物			%	淡い	淡い	淡い
密度	表乾		g/cm^3	2.68	2.89	2.8
	絶乾		g/cm^3	2.66	2.88	2.8
吸水率			%	0.76	0.44	0.05
安定性試験			%	6.2	6.8	4.2
塩化物			%	0.008	0.21	0.01
すり減り減量			%	45.4	78.9	36.5
ASR	化学	Rc	mmol/l	79.2	16.7	6.7
		Sc	mmol/l	34.7	2.4	1.1
	ﾓﾙﾀﾙﾊﾞｰ		%	0.013	0.015	-0.014

※1 名古屋工業大学大学院　工学研究科都市循環システム工学専攻（正会員）
※2 名古屋工業大学助手　工学部社会開発工学科 修(工)（正会員）
※3 名古屋工業大学助教授　工学部社会開発工学科 工博（正会員）
※4 名古屋工業大学大学院教授　工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D.（正会員）

れる Sg3（飛灰，廃ガラスを溶融後空冷）の３種類である。各スラグの化学組成を**表－１**に示す。スラグの主成分は SiO_2，Al_2O_3，CaO であり，重金属についてはいずれのスラグも環境庁告示 46 号の溶出基準を満たしている。

骨材試験結果を**表－２**に示す。いずれのスラグも粗粒分が多く土木学会の細骨材の標準粒度から外れるが，その他の品質は天然骨材とほぼ同等である。また，アルカリ骨材反応性（ASR）は無害であることが認められている[3)]。

他の使用材料は，普通ポルトランドセメント，山砂 S1（豊田産，γ=2.56，F.M=2.83）または山砂 S2（豊田産，γ=2.55，F.M=2.76），砕石 G1（春日井産，G_{max}=20mm，γ=2.69，F.M=6.80）または砕石 G2（瀬戸産，G_{max}=20mm，γ=2.72，F.M=6.74）である。混和剤は高性能 AE 減水剤，AE 助剤を使用した。

3.　膨張量試験方法の検討

3.1　実験概要

対象にした３種類のスラグには，いずれも金属アルミニウムの含有が確認されているが[4)]，コンクリートに用いた場合に必ずしも膨張傾向を示すとは限らないことや，同種のスラグを用いても膨張する場合としない場合があり，細骨材として使用するスラグの膨張性能を簡易的に確認することが必要である。そこで，プラスチック型枠と発泡スチロールを用いた膨張量試験を提案し，試験方法の検討を行った。試験項目は，スランプ試験（JIS A 1101-1998），空気量試験（JIS A 1118-1997），膨張量試験である。

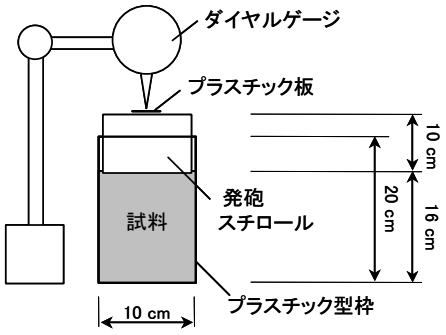
3.2　膨張量試験

図－１に膨張量試験の方法を示す。この試験は，φ10×20cm の市販されているプラスチック型枠に高さ 16cm 程度まで試料を充填し，上部にφ10×10cm の発泡スチロール製フロートを載せ，フロートの上下移動量をダイヤルゲージによって計測することで，フレッシュコンクリートの膨張を確認するものである。試験は供試体を２本ずつ作製して行い，室温 20℃の恒温室で 30 分ごとに計測を行った。なお，この試験で得られる値は，ブリーディング水による膨張を除く膨張率（%）である。

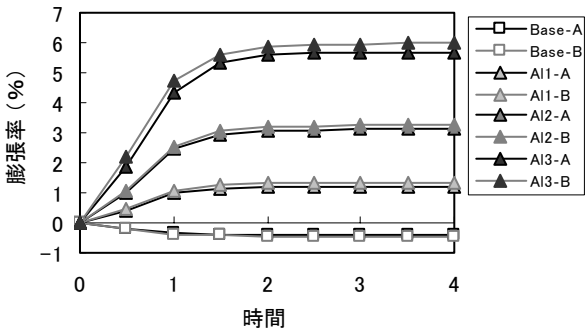
3.3　配合および結果・考察

配合およびフレッシュ試験結果を**表－３**に示す。試験目的を膨張量試験方法の検討としたことから，コンクリートを確実に膨張させるアルミニウム粉末を混入した３ケースと，比較のための Base（Al 粉末 0%）を設定した。

図－２に膨張量試験結果を示す。いずれの供試体も材齢２時間後までに膨張現象が終了し，アルミニウムの添加量が増加するにつれて膨張



図－１　膨張量試験方法



図－２　膨張量試験結果(1)

表－３　配合および試験結果(1)

シリーズ	W/C (%)	単位量 (kg/m³)				SP (%)	AE (%)	Al粉末 (%)	フレッシュ試験結果		
		W	C	S1	G1				Sl (cm)	Air (%)	練温(℃)
Base	50	180	360	812	925	C×0.2	C×0.002	—	9.5	3.1	28.0
Al1								C×0.01	9.5	2.6	27.0
Al2								C×0.02	8.7	3.2	27.0
Al3								C×0.03	8.3	3.2	27.0

率も増加する傾向がみられ，各２本の結果の差が Base を含め小さいことから，今回提案した試験方法で膨張現象の把握が可能であることが明らかとなった。

4.　スラグを混入したコンクリートの膨張

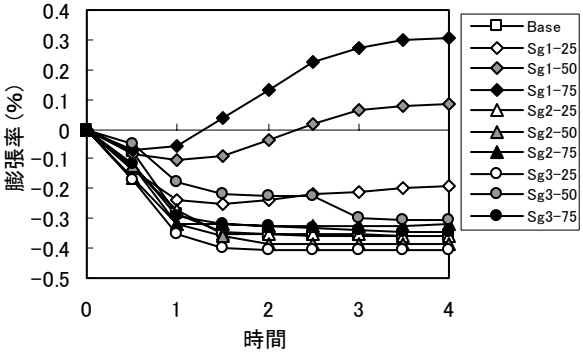
4.1　実験概要

溶融方式の異なる３種のスラグについて，それぞれ置換率を変えて用いたコンクリートの膨張現象の有無を，提案した膨張量試験によって確認し，硬化後の物性についても検討を行った。試験項目は，スランプ試験，空気量試験，ブリーディング試験（JIS A 1123-1997），膨張量試験，圧縮強度試験（JIS A 1108-1999）である。

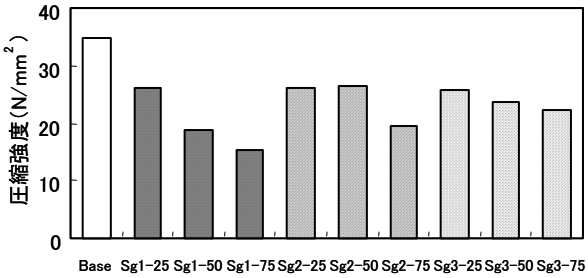
4.2　配合および結果・考察

配合およびフレッシュ試験結果を**表－４**に示す。スラグ置換率は 0，25，50，75%の４水準とした。スランプの増減現象がスラグによって異なる結果となったのは，スラグの表面形状の違いによるものと考えられる。また，いずれのスラグも置換率の増加に伴い空気量が増加する結果となったのは，スラグの実積率が細骨材と比較して低く，間隙に空気が入り込みやすいためだと考えられる。また，Sg1 はスラグ置換率が大きくなるに従ってブリーディング率が小さくなり，他のスラグは逆に大きくなる傾向を示した。これは，各スラグの置換率の増加に対するスランプの変化に対応する結果となった。

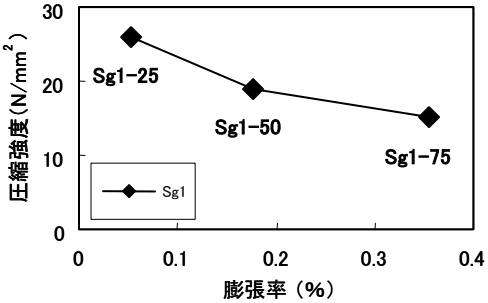
図－３に膨張量試験結果を示す。いずれの供試体も材齢４時間後までに膨張現象が終了し，Sg1-50，Sg1-75 では膨張が確認された。また，Sg1 シリーズにおいては置換率の増加に伴い膨張率が増加する結果となった。Sg2，Sg3 にも金属アルミニウムは含有するが，コンクリートに用いた場合には膨張現象は見られなかった。この原因には，スラグの原料となるごみの種類および熔融方式，作製条件[5] 等の影響に加え，鈴木らの研究[4]によれば，スラグ中の CaO の影響



図－３　膨張量試験結果(2)



図－４　圧縮強度試験結果(1)



図－５　膨張率と圧縮強度の関係(1)

表－４　配合および試験結果(2)

シリーズ	W/C (%)	単位量（kg/m³）					SP (%)	AE (%)	フレッシュ試験結果			
		W	C	S1	G1	Sg			Sl(cm)	Air(%)	Br(%)	練温(℃)
Base	50	180	360	812	925	—	C×0.1	C×0.008	8.0	4.9	3.98	27.0
Sg1-25				609		213			7.3	6.0	4.47	27.0
Sg1-50				406		425			7.5	7.4	3.81	28.0
Sg1-75				203		637			5.3	8.4	3.81	28.0
Sg2-25				609		229			8.3	5.3	3.16	28.0
Sg2-50				406		458			8.5	5.6	3.74	28.0
Sg2-75				203		687			9.5	8.9	4.57	28.0
Sg3-25				609		222			9.0	6.8	3.65	27.0
Sg3-50				406		444			11.7	7.5	4.73	28.0
Sg3-75				203		666			11.0	8.4	5.90	28.0

Sl ･･･スランプ，Air ･･･空気量，Br ･･･ブリーディング率

が考えられる。すなわち，Sg2，Sg3 には Sg1 に比べ CaO の含有が多いことから，コンクリート中のアルカリとの反応に加え，練り混ぜ中に金属アルミニウムと石灰との反応が進むことが考えられる。

図－４に圧縮強度試験結果（28 日強度）を示す。スラグ置換率の増加に伴い強度が低下する傾向を示し，スラグを混入したケースは Base と比較して小さな値となった。強度の低下は，スラグの混入により空気量が増加したこと，スラグ自身の強度が低いこと等が要因であると考えられる。

図－５に膨張率と圧縮強度の関係を示す。図中の膨張率は，膨張の確認された Sg1 について**図－３**の最終値から最低値を減じた値とした。膨張率の増加に伴って圧縮強度が低下する傾向を示したが，今回の結果からはこの強度低下がスラグ置換率の増加によるものか膨張によるものかは判断できなかった。

5.　スラグの強度特性と膨張現象

5.1　実験概要

強度低下の要因を明らかにし，膨張の傾向を把握するため，膨張が確認される Sg1 を対象にスラグ置換率一定のもと，単位水量，AE 添加率, SP 添加率の３項目について配合を変えて実験を行った。先ず，スラグを混入したコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の物性について検討を行い，次に膨張の傾向と強度の特性について考察を行った。なお，配合による影響を明らかにするため，スランプおよび空気量が目標許容値をはずれても調整は行わなかった。

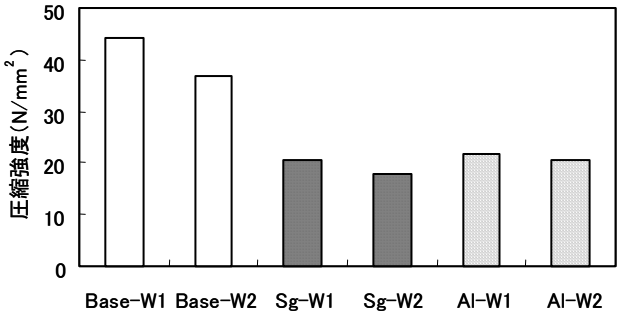
5.2　フレッシュ性状と強度特性

(1) 単位水量の影響

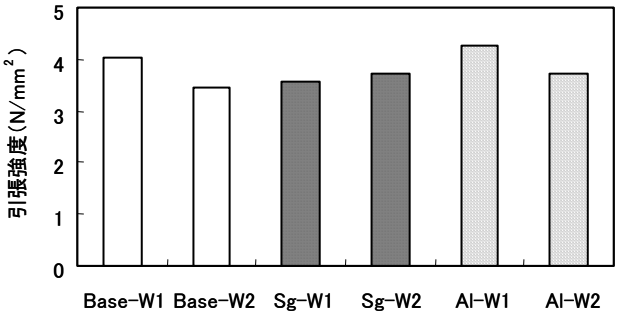
配合およびフレッシュ試験結果を**表－５**に示す。水セメント比は 47，53%の２水準を設定した。Sg シリーズのブリーディング率が Base と比較してわずかに大きな値となったのは，スラグの表面が滑らかで保水性が小さいことが原因であると考えられる。また，Al シリーズのブリーディング率が他に比べて小さく現れたのは，アルミニウムによるフレッシュコンクリートの急速な膨張がセメント粒子や骨材の沈降を防ぎ，練混ぜ水の遊離により引き起こされるブリーディング現象が現れにくくなったためであると考えられる。

図－６に圧縮強度試験結果を示す。全てのシリーズにおいて水セメント比の増加に伴う圧縮強度の低下が確認され，Sg，Al の各シリーズは Base シリーズと比較して小さな値となった。

図－７に割裂引張強度試験結果を示す。Base



図－６　圧縮強度試験結果(2)



図－７　割裂引張強度試験結果

表－５　配合および試験結果(3)

シリーズ	W/C (%)	単位量(kg/m³) W	C	S2	G2	Sg	SP (%)	AE (%)	Al粉末 (%)	フレッシュ試験結果 Sl(cm)	Air(%)	Br(%)	練温(℃)
Base-W1	47	165	351	770	1027	0	C×0.3	C×0.004	0	5.5	3.5	2.61	27.0
Base-W2	53	185	349	768	977					14.5	2.2	4.39	26.0
Sg-W1	47	165	351	385	1027	403				4.0	3.5	2.82	26.0
Sg-W2	53	185	349	384	977	402				10.5	2.7	5.35	27.0
Al-W1	47	165	351	770	1027	0			C×0.02	5.8	3.3	1.58	27.0
Al-W2	53	185	349	768	977					16.8	3.1	3.15	27.0

シリーズでは圧縮強度の１１分の１程度の強度を示し，圧縮強度の低下に伴って引張強度も低下する結果となったが，Sg，Al の各シリーズにおいては圧縮強度の５～６分の１程度と高い値を示し，スラグやアルミニウムの混入に拘らず Base とほぼ同じ程度の引張強度となった。これは，圧縮試験の際には，水素の発生によって供試体上部に偏って生じた空隙が強度の低下を引き起こすものの，割裂試験の際には供試体を横向きに据えるため，上部の空隙が引張強度に影響を及ぼさなかったためと考えられる。

(2) AE 添加量の影響

配合および試験結果を**表－６**に示す。AE 添加率は，各シリーズにつき C×0，0.002，0.004%の３水準を設定した。全てのシリーズにおいて AE 添加率の増加に伴い空気量が増加し，スランプ値は AE 添加率に拘らずほぼ一定となった。

圧縮強度試験においては全てのシリーズで AE 添加率の増加に伴う圧縮強度の低下が確認され，Sg，Al の各シリーズは Base シリーズと比較して小さな値となった。

割裂引張強度試験において，Base シリーズでは圧縮強度の８～１０分の１程度であり，圧縮強度の低下に伴って引張強度も低下する結果となったが，Sg シリーズにおいては圧縮強度の３～５分の１程度，Al シリーズにおいては圧縮強度の４～６分の１程度と高い値を示し，Sg，Al の両シリーズとも Base と比較して僅かな強度低下しかみられなかった。

(3) SP 添加量の影響

配合および試験結果を**表－７**に示す。SP 添加率は，Sg シリーズについては C×0.1，0.2，0.3，0.4%の４水準，Al シリーズについては C×0.1，0.4%の２水準を設定した。両シリーズとも SP 添加率の増加に伴いブリーディング率が減少する傾向を示し，高性能 AE 減水剤の特性を反映した結果となっている。

圧縮強度試験および割裂引張強度試験においては両シリーズとも SP 添加率の違いに拘らずほぼ一定の値となった。

5.3 膨張現象と強度特性

5.2 の実験結果をもとに，膨張現象と強度特性について考察を行った。

(1) 膨張率と圧縮強度の関係

図－８に膨張率と圧縮強度の関係を示す。図中の膨張率は，膨張量試験によって得られた最終値から最低値を減じた値とした。膨張現象の確認されない Base シリーズにおいては有意な関係はみられなかったが，Sg，Al の各シリーズにおいて，膨張率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向を示した。同様のスラグ置換率のもとであっても強度の低下が確認されたことから，

表－６　配合および試験結果(4)

シリーズ	W/C	単位量(kg/m^3)					SP	AE	Al粉末	フレッシュ試験結果				強度(N/mm^2)	
	(%)	W	C	S2	G2	Sg	(%)	(%)	(%)	Sl(cm)	Air(%)	Br(%)	練温(℃)	圧縮	引張
Base-AE1	50	175	350	769	1002	0	C×0.2	0	0	8.0	1.7	3.76	24.0	44.0	4.5
Base-AE2								C×0.002		7.5	2.2	4.60	24.0	39.7	4.6
Base-AE3								C×0.004		8.6	4.2	3.90	24.0	36.6	3.7
Sg-AE1				385		403		0		8.5	1.2	4.86	23.0	16.8	3.4
Sg-AE2								C×0.002		8.5	3.2	4.17	23.5	14.2	3.5
Sg-AE3								C×0.004		11.2	4.2	4.24	23.5	13.7	3.9
Al-AE1				769		0		0	C×0.02	6.3	1.5	2.22	23.0	19.9	4.0
Al-AE2								C×0.002		6.5	3.3	3.24	23.0	18.4	3.2
Al-AE3								C×0.004		6.0	4.0	1.36	23.0	16.4	3.6

表－７　配合および試験結果(5)

シリーズ	W/C	単位量(kg/m^3)					SP	AE	Al粉末	フレッシュ試験結果				強度(N/mm^2)	
	(%)	W	C	S2	G2	Sg	(%)	(%)	(%)	Sl(cm)	Air(%)	Br(%)	練温(℃)	圧縮	引張
Sg-SP1	50	175	350	385	1002	403	C×0.1	C×0.006	0	4.0	4.1	4.11	22.5	24.4	3.5
Sg-SP2							C×0.2			6.8	3.4	4.79	22.5	20.5	3.8
Sg-SP3							C×0.3			9.5	5.7	2.88	27.0	28.5	3.9
Sg-SP4							C×0.4			9.0	4.1	3.36	22.5	25.2	3.5
Al-SP1				769		0	C×0.1		C×0.02	5.0	3.0	2.07	23.0	23.9	3.3
Al-SP2							C×0.4			9.1	5.4	1.16	22.5	20.9	3.2

5.2 の実験におけるスラグを混入したシリーズの強度低下は，膨張に起因するものであることが明らかとなった。

4.2 の結果をふまえると，スラグを混入したコンクリートの圧縮強度は「スラグ置換率（スラグ自身の圧縮強度が低い)」と「膨張率（コンクリート中の空隙の増加)」の２つの要因によって支配されることが明らかとなった。

(2) 引張強度と圧縮強度の関係

図－９に引張強度と圧縮強度の関係を示す。Base シリーズでは圧縮強度の増加に伴い引張強度も増加する傾向を示したが，Sg および Al シリーズでは圧縮強度に関係なくほぼ一定の引張強度を示した。このことから，供試体下部に生じた空隙は型枠による拘束を受け，ケミカルプレストレスにより強度が増加することに対して，上部は空隙が欠陥として存在し，圧縮強度供試体のキャッピング等の不具合に直接影響を及ぼしたことが考えられる。

6. 骨材資源としての適用性

本研究において使用したスラグ（Sg1，2，3）は，圧縮強度の低下が確認されたが，用途に合わせて水セメント比や混和剤を調整することにより細骨材として使用可能であると考えられる。但し使用時には，膨張量試験ならびに圧縮強度試験に基づいて置換率を検討する必要がある。

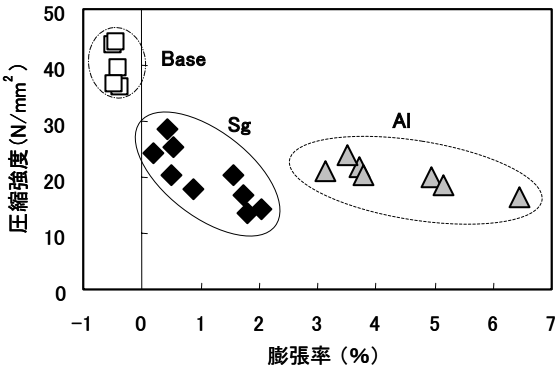
また，膨張現象が確認される場合（例えば Sg1）は，コンクリート打ち込み面上部の適切な処理が有効であると考えられる。

7. まとめ

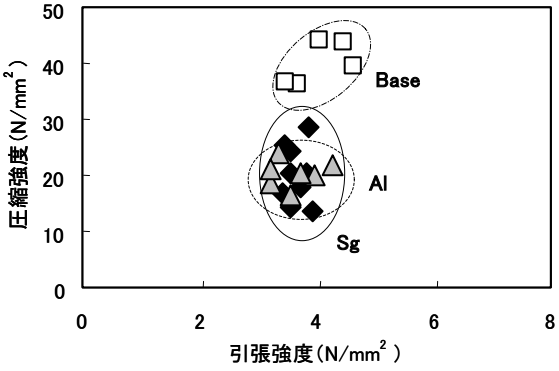
(1) フレッシュコンクリートの膨張を簡易的に確認する膨張量試験方法の提案を行い，この試験方法によって膨張現象の把握が可能であることが明らかとなった。

(2) スラグを混入したコンクリートの圧縮強度は「スラグ置換率」と「膨張率」の２つの要因によって決まり，スラグ置換率一定のもとであっても,膨張現象が大きく現れた場合は，これに伴う圧縮強度の低下が明らかとなった。

(3) 膨張現象が確認されるスラグに対しては，コンクリート打ち込み面上部の適切な処理が有効と考えられる。



図－８　膨張率と圧縮強度の関係(2)



図－９　引張強度と圧縮強度の関係

参考文献

1) 建設省土木研究所材料施工部新材料開発研究官：公共工事における試験施工のための他産業再生資材評価マニュアル案，土木研究所資料第 3667 号，1999.9

2) 北辻政文，藤居宏一：ごみ焼却灰溶融炉スラグのコンクリート用細骨材への適用に関する基礎的研究，農業土木学会論文集第 192 号，第 65 巻，第 6 号，pp.725~732，1997

3) 服部啓二 ほか：都市ゴミ溶融スラグのコンクリート用材料への適用に関する基礎的研究，土木学会中部支部平成12年度研究発表会講演概要集，第Ⅴ部門，2001.3

4) 鈴木憲司 ほか：都市ゴミ溶融スラグの石灰による安定化，日本セラミックス協会東海支部学術研究発表会，2001

5) 白子定治 ほか：スラグ作成条件の品質におよぼす影響，廃棄物学会論文誌，Vol.9，No.4，pp.133~140，1998