

名古屋工業大学博士論文

甲第557号(課程修了による)

平成18年3月23日授与

熔融スラグのコンクリートへの有効利用に関する研究

2006年

高田 聡 恵

溶融スラグのコンクリートへの有効利用に関する研究

目次

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的	1
1. 2 本論文の構成	2
1. 3 研究の流れ	3
参考文献	7

第2章 溶融スラグに関する研究の現状と課題

2. 1 概要	8
2. 2 溶融方式の分類	8
2. 3 物理的・化学的性質	9
2. 3. 1 焼却灰の性状・組成	9
2. 3. 2 溶融スラグの物理的・化学的性質	10
2. 4 環境基準	12
2. 5 溶融スラグを使用したコンクリートに関する既往の研究	13
2. 5. 1 コンクリートの膨張	13
2. 5. 2 置換率および溶融スラグの品質が圧縮強度に及ぼす影響	13
2. 5. 3 水セメント比と圧縮強度の関係	15
2. 6 まとめ	15
2. 7 既往の研究から得られた課題	16
参考文献	17

第3章 溶融スラグを使用したコンクリートの膨張現象

3. 1 概要	18
3. 2 使用材料	18
3. 3 練混ぜ方法	22
3. 4 膨張率試験方法の提案と検討	23
3. 4. 1 実験概要	23
3. 4. 2 結果および考察	24
3. 5 3種類の溶融スラグによるコンクリートの膨張率試験	25
3. 5. 1 実験概要	25
3. 5. 2 結果および考察	26

3. 6	膨張現象と強度特性	30
3. 6. 1	実験概要	30
3. 6. 2	単位水量の影響	31
3. 6. 3	AE 添加率の影響	34
3. 6. 4	SP 添加率の影響	37
3. 6. 5	膨張現象と強度特性	39
3. 7	使用した溶融スラグの適用性	42
3. 8	TR との整合性	42
3. 9	まとめ	43
	参考文献	44

第4章 溶融スラグを使用したコンクリートの物性

4. 1	概要	45
4. 2	使用材料	45
4. 3	溶融スラグを使用したコンクリートの物性試験	47
4. 3. 1	実験概要	47
4. 3. 2	結果および考察	49
4. 4	溶融スラグを混合使用したコンクリートの物性試験	53
4. 4. 1	実験概要	53
4. 4. 2	結果および考察	54
4. 5	使用した溶融スラグの適用性	56
4. 6	まとめ	56
	参考文献	57

第5章 溶融スラグとフライアッシュを併用したコンクリートの物性

5. 1	概要	58
5. 2	使用材料	58
5. 3	溶融スラグとフライアッシュを併用した普通コンクリートの物性試験	59
5. 3. 1	実験概要	59
5. 3. 2	結果および考察	60
5. 4	溶融スラグとフライアッシュを併用した高流動コンクリートの物性試験	61
5. 4. 1	実験概要	61
5. 4. 2	結果および考察	63
5. 5	使用した溶融スラグの適用性	65
5. 6	まとめ	66
	参考文献	67

第6章 溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性	
6.1 概要	68
6.2 使用材料	68
6.3 溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性試験	69
6.3.1 実験概要	69
6.3.2 フレッシュ試験・強度試験結果および考察	70
6.3.3 耐久性試験結果および考察	73
6.4 使用した溶融スラグの適用性	75
6.5 まとめ	76
参考文献	77
第7章 結論	78
謝辞	82

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的

近年、廃棄物の処理方法や再利用への意識が高まるなか、ごみの分別回収の徹底や容器包装リサイクル法の推進により、最終処分量は減少傾向にあるといえる。しかし、廃棄物の大半が焼却され、焼却残渣として埋立処分される現状では、最終処分場の確保難は依然として重要な問題である。

こうした中、平成9年1月には「ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン」が環境省（旧厚生省）より発表された。このガイドラインは、ごみの高温での熔融固化処理または脱塩素化処理を義務付けることにより、ごみの減量化とダイオキシン発生の防止を目的としたものである。これをうけて、新設されるごみ焼却施設は熔融炉を兼ね備えたものとなり、今後も熔融炉から排出される熔融固化物の排出量は増加していくと考えられる。

熔融固化物については、平成10年3月に「一般廃棄物の熔融固化物の再生利用の実施の促進について」が環境省（旧厚生省）より発表され、熔融固化物の用途として、路盤材、コンクリート用骨材、アスファルト混合物用骨材、埋め戻し材、コンクリート二次製品用材料（歩道用ブロック、空洞ブロック、透水性ブロック）等が考えられる、としている。この熔融固化物は、原料や使用目的の違いから、都市ごみ熔融スラグ、下水汚泥熔融スラグ等の様々な呼び方があり、各機関で統一されていないものの、最も一般的な呼び名が「熔融スラグ（ここでは下水汚泥を原料とするものは含めない）」であるといえる。

平成14年7月には、熔融スラグの TRA 0016 の公表^[1]がなされ、資源の枯渇が叫ばれるコンクリート用骨材の代替品として規格化が進められていることから、熔融スラグのコンクリート材料としての普及が一層期待されているといえる。

現在、熔融スラグに関する種々の研究が進められているものの、原料となるごみの種類および熔融方式、作製条件^[2]の影響に加え、排出する炉の形式等によって熔融スラグの品質が異なる場合も明らかにされていることから、熔融方式ならびに熔融施設の異なる熔融スラグを対象に、比較検討を行う必要があるといえる。また、既往の研究^[3]において、一部の熔融スラグではコンクリートを膨張させる性質が確認されるなど、熔融スラグの使用がコンクリートの物性に影響を及ぼすことが示唆されており、実用化するにあたっては課題が累積しているのが現状である。したがって、熔融スラグの有効利用を図るには、コンクリートに使用した場合の膨張の有無を確認するとともに、フレッシュおよび硬化後の一時的な物性の把握に加え、耐久性についても明らかにし、熔融スラグのコンクリート用材料としての使用の可否を明らかにする必要があるといえる。

そこで本研究では、溶融スラグのコンクリートへの有効利用を目的に、溶融スラグをコンクリート用材料、特に、骨材の代替品と位置付けて使用した種々の実験を行い、物性および耐久性について、適用性の観点から検討を行った。

本研究では、溶融スラグを、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℃以上の高温下^[4]で溶融、冷却して製造された溶融固化物と定義し、TR等の規定範囲にこだわらず、幅広い解釈でコンクリート用材料として使用した。

1. 2 本論文の構成

本論文は全7章で構成し、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、研究の背景と目的、論文の構成、研究の流れについて述べた。

第2章では、溶融スラグの分類および物理的・化学的性質、溶融スラグを用いたコンクリートの性質について、既往の研究をまとめるとともに、現状での課題を提示した。

第3章では、溶融スラグを使用したコンクリートの膨張現象の把握を目的に、フレッシュ時における膨張性状を把握する膨張率試験方法を提案し、検討するとともに、異なる3種類の溶融スラグを対象に膨張率試験を行い、同時にフレッシュ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溶融スラグについては、種々の配合のもとで実験を行うことにより、膨張現象と硬化後の物性について考察した。

第4章では、溶融スラグを使用したコンクリートの基本的な物性の把握を目的に、愛知県内の異なる溶融施設から排出された7種類の溶融スラグを対象に、配合を変化させ、膨張率試験を含めた物性試験を行い、フレッシュおよび硬化後の物性について実験を基に検討した。更に、数種類の溶融スラグを混合して用いた配合や保管状態の違いによる影響についても検討した。

第5章では、溶融スラグとフライアッシュを併用したコンクリートの基本的な物性の把握を目的に、フライアッシュの有する流動特性の改善効果を生かし、溶融スラグを骨材、フライアッシュを粉体増量材として使用した普通コンクリートと高流動コンクリートを対象に、フレッシュおよび硬化後の物性について実験を行い、異なる産業副産物の混合使用の可能性について検討した。

第6章では、溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性の把握を目的に、異なる3種類の溶融スラグを対象に、フレッシュおよび硬化後の物性試験に加えて耐久性試験を行った。なお、溶融スラグとフライアッシュを混合した配合に対しても実験を行い、フレッシュ性状、強度特性および耐久性能について検討した。

第7章では、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について述べた。

1. 3 研究の流れ

(1) 全体の流れ

図 1-1 に本研究全体の流れを示す。本研究は、都市ごみの高温処理の義務化による溶融スラグ排出量の増加を背景とし、溶融スラグのコンクリートへの有効利用を促進するため、溶融スラグを使用したコンクリートの物性の把握を行うとともに、溶融スラグのコンクリート用材料としての適用性について検討したものである。

まず、膨張率試験方法を提案し、試験方法の検討を行った。また、提案した膨張率試験を使用し、膨張現象の確認される溶融スラグに対して、膨張現象と強度特性について実験を基に考察した。次に、種々の溶融スラグについて、膨張率試験を含めた物性試験を行うとともに、混合して用いた配合、保管状態の違いによる影響についても検討を行った。また、溶融スラグとフライアッシュを併用したコンクリートについても検討した。最後に、溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性について検討を行った。

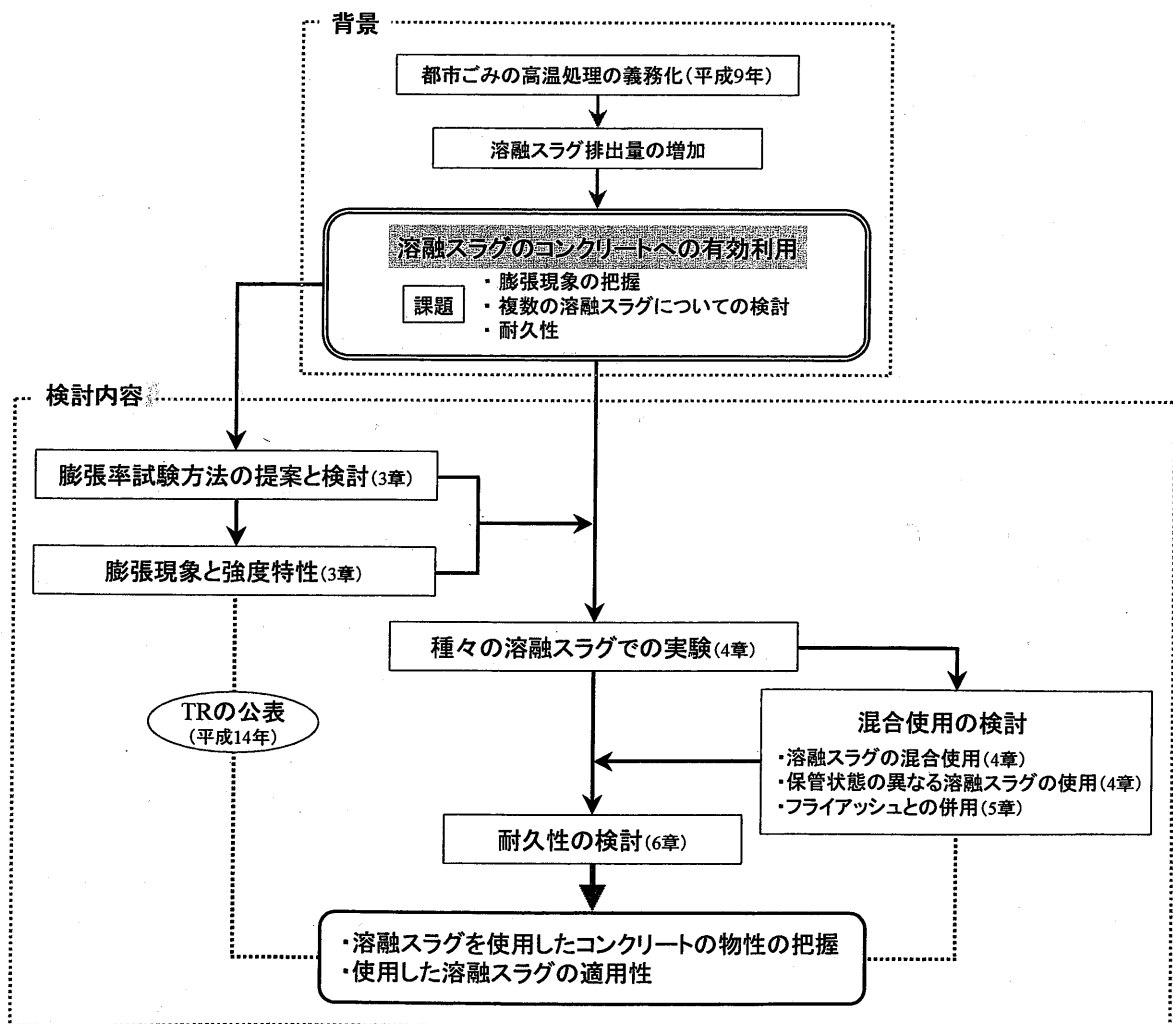


図 1-1 本研究の流れ

なお、平成14年のTRの公表を受け、4章の「混合使用」以降は膨張性状を有する溶融スラグを実験対象から除外した。

以下に3章から6章の研究の流れについて述べる。

(2) 3章の流れ

図1-2に3章の流れを示す。3章ではまず、コンクリートの膨張率試験方法を提案し、アルミニウム粉末を添加したコンクリートを対象に、膨張率試験方法の検討を行った。次に、提案した試験方法を使用し、金属アルミニウムの含有が懸念される異なる3種類の溶融スラグについて置換率を変化させ、膨張率試験および強度試験を行った。ここで、膨張率の増加に伴う圧縮強度の低下が確認されたことから、強度低下の原因を明らかにするため、膨張が確認される溶融スラグを対象に、置換率一定の下、種々の配合下での膨張率試験と強度試験を行うことにより、膨張現象と強度特性について検討を行った。

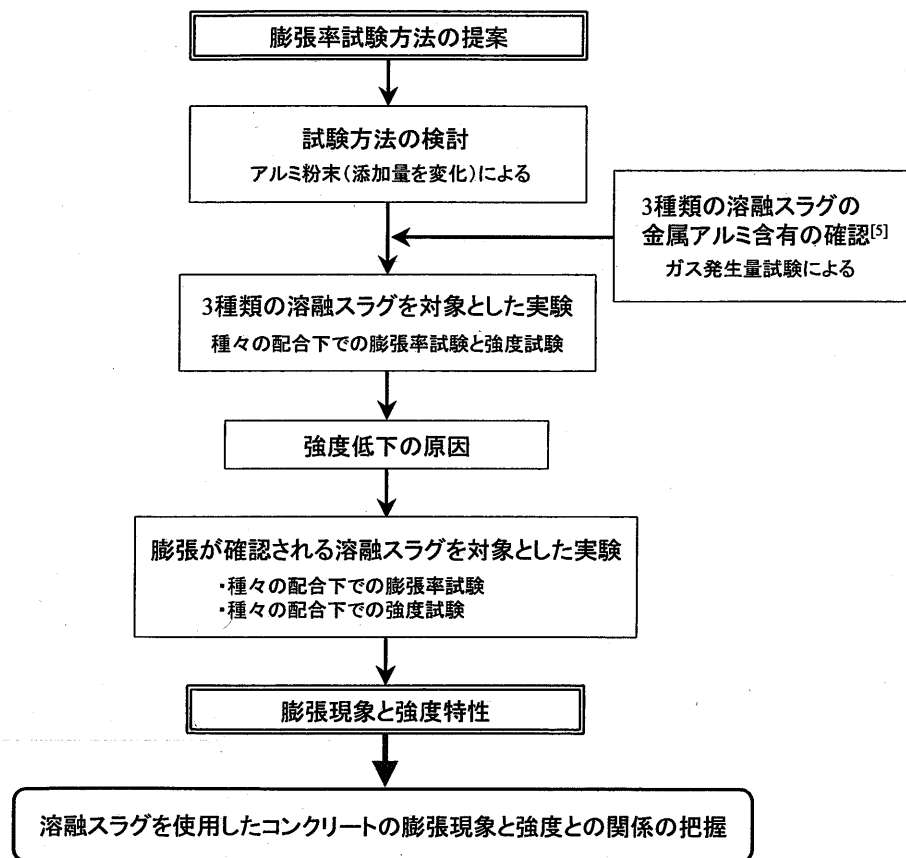


図1-2 3章の流れ

(3) 4章の流れ

図1-3に4章の流れを示す。4章ではまず、愛知県内の溶融施設で排出された7種類の溶融スラグを使用し、3章で提案した膨張率試験を含めた物性試験を行い、そのうち膨張

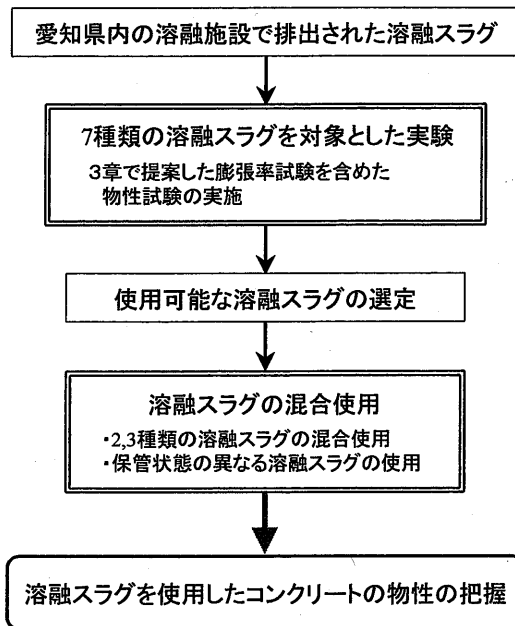


図 1-3 4章の流れ

現象の確認されない使用可能な溶融スラグ 6 種類を選定した。次に、磨砕処理した溶融スラグ同士、排出する溶融施設の近い溶融スラグ同士に分け、混合して用いた配合に対して実験するとともに、溶融スラグの保管状態の違い（絶乾状態および湿潤状態）による影響についても同様に検討を行うことにより、溶融スラグを使用したコンクリートの物性の把握を行った。

(4) 5章の流れ

図 1-4 に 5 章の流れを示す。5 章では、4 章で膨張現象が確認されなかった 6 種類の溶融スラグと、愛知県内の火力発電所から排出されたフライアッシュとを併用した普通コン

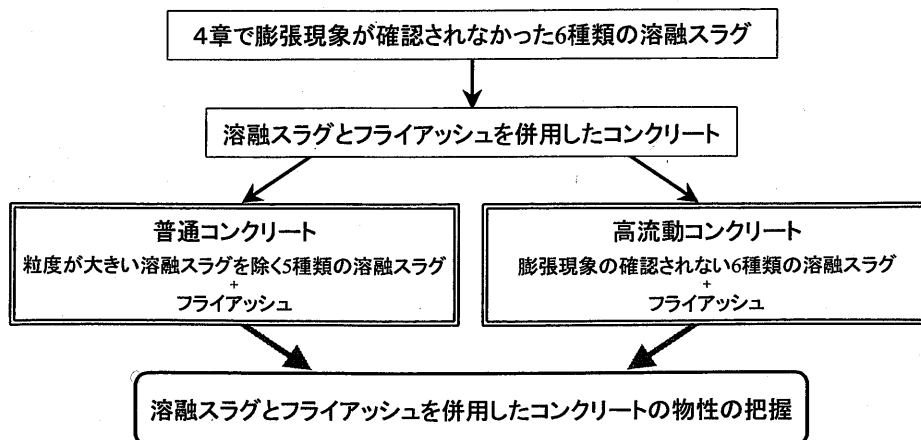


図 1-4 5章の流れ

クリートと高流動コンクリートについて実験を行い、溶融スラグとフライアッシュの併用の可能性について、コンクリートの物性の把握により検討した。

(4) 6章の流れ

図 1-5 に6章の流れを示す。6章では、4章で膨張現象が確認されなかった溶融スラグのうち、粒度が異なる3種類の溶融スラグを対象に、コンクリート（フライアッシュを混合した配合も設定）の耐久性試験を行い、溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性の把握を行った。

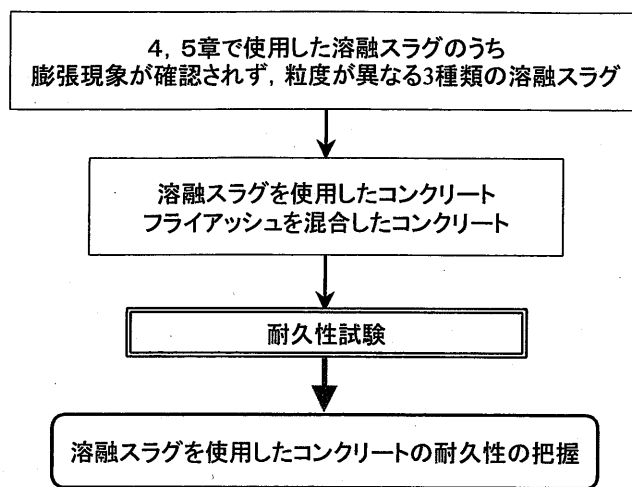


図 1-5 6章の流れ

参考文献

- [1] 日本工業標準調査会：「TRA 0016 一般廃棄物，下水汚泥等の熔融固化物を用いたコンクリート用細骨材（コンクリート用熔融スラグ細骨材）」，2002.7.20
- [2] 白子定治，曾山照明，花嶋正孝，田中勝：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
- [3] 北辻政文，藤居宏一：ごみ焼却灰熔融炉熔融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
- [4] 建設省土木研究所：公共事業における試験施工のための他産業再生資材試験評価マニュアル案，建設省土木研究所資料第 3667 号，pp.19~39，1999.9
- [5] 鈴木憲司，堀口真由美：都市ゴミ熔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

第2章 溶融スラグに関する研究の現状と課題

2.1 概要

本章では、溶融スラグの溶融方式や物理的・化学的性質、溶融スラグを使用したコンクリートの物性等、溶融スラグに関する研究の現状について、既往の研究をまとめた。また、既往の研究から得られた課題として、本研究の位置付けを述べた。

2.2 溶融方式の分類^[1]

溶融方式の分類を図2-1、表2-1に示す。溶融方式は、廃棄物を焼却してからその焼却残渣を溶融する方式と、廃棄物を直接溶融する方式に大別される。前者の焼却残渣溶融方式は、灯油やコークス等の燃料を燃焼し、その熱で溶融する燃料燃焼方式と、電気から得られた熱エネルギーにより溶融する電気方式とに区分される。一方、後者の廃棄物を直接溶融する方式は、ガス化溶融方式と呼ばれ、廃棄物中の有機物をガス化し無機物を溶融する方式である。溶融炉については、ガス化と溶融を一つの炉で行う方式（写真2-1）と、分離した炉で行う方式の二種類がある。基本的には、焼却残渣溶融方式では主灰または主灰+飛灰が、直接溶融方式では可燃物+不燃物（ごみを選ばず処理可能）が原料となる。直接

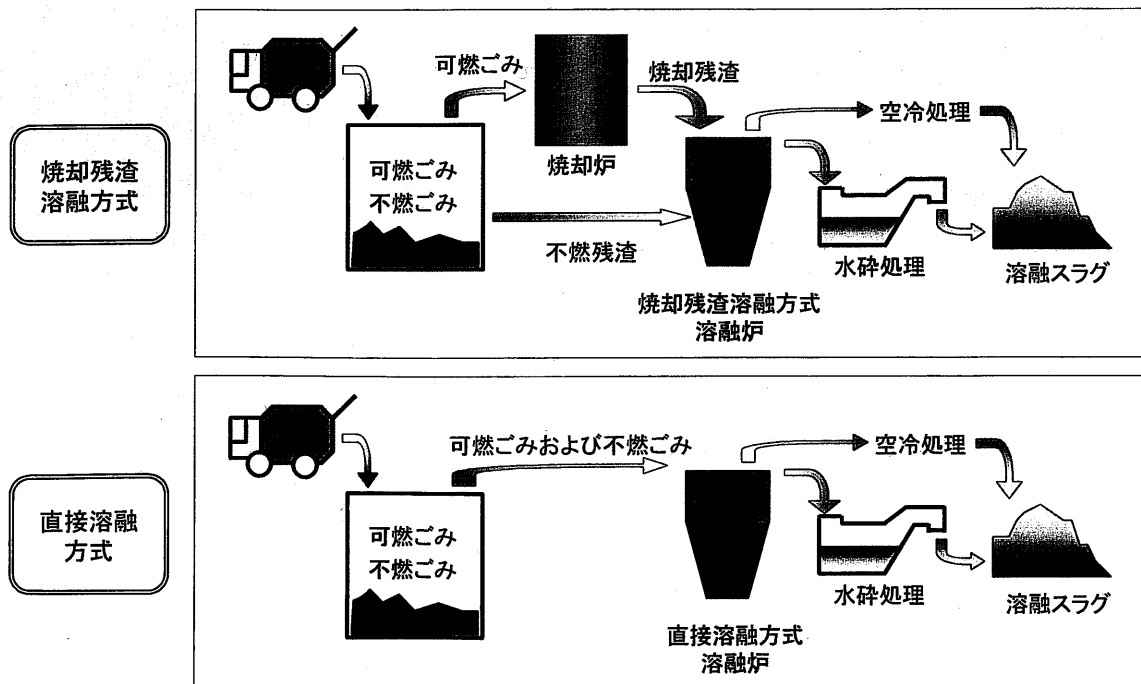


図2-1 溶融方式の分類（焼却残渣方式と直接溶融方式）

表 2-1 溶融方式の分類

1. 焼却残渣溶融方式	1. 燃料燃焼式	1. 回転表面溶融炉
		2. 反射式表面溶融炉
		3. 輻射式表面溶融炉
		4. 旋回流式溶融炉
		5. ロータリーキルン式溶融炉
		6. コークスベッド式溶融炉
	2. 電気式	1. 交流アーク式溶融炉
		2. 交流電気抵抗式溶融炉
		3. 直流電気抵抗式溶融炉
		4. プラズマ式溶融炉
2. 直接溶融方式	1. ガス化溶融一体型	1. シャフト炉式ガス化溶融炉
	2. ガス化溶融分離型	1. キルン式ガス化溶融炉
		2. 流動床式ガス化溶融炉

溶融方式では、ごみを選ばずに処理が可能であるが、金属が酸化物とならず単体で存在する比率が高くなる。現在、主流となっているのは、焼却残渣溶融方式である。

溶融スラグは冷却方法により、水砕スラグ、空冷スラグおよび徐冷スラグに大別される。水砕スラグは、水と直接接触させて急冷した溶融スラグであり、ガラス質で細粒状または砂状であることを特徴とする。空冷スラグは、結晶化を目的として大気中で放冷した溶融スラグで、塊状であることが特徴である。徐冷スラグは、特に冷却速度を遅くして結晶化が進んだ塊状スラグである。空冷スラグの生産工程で冷却を十分ゆっくりとし、塩基度（水硬性を化学組成から判断する際の指標。塩基度が大きいと反応性も大きくなる。但し、必要以上に大きいと長期強度が低下する^[2]）を適切に保つと結晶化が完全に進んだ結晶質スラグとなるが、制御が十分でないと結晶化せず、ガラス質スラグとなる。



写真 2-1 高温ガス化溶融炉での出滓

2. 3 物理的・化学的性質^{[1], [3]}

2. 3. 1 焼却灰の性状・組成

溶融方式に加え、焼却灰等廃棄物（原料）の組成は、生成される溶融スラグの性状に影響を与える重要な因子である。図 2-2 に主灰と飛灰の違いを、表 2-2 に焼却灰の組成例を示す。主灰（炉下に堆積する灰）の主成分は、ガラス質の成分である二酸化珪素（ SiO_2 ）

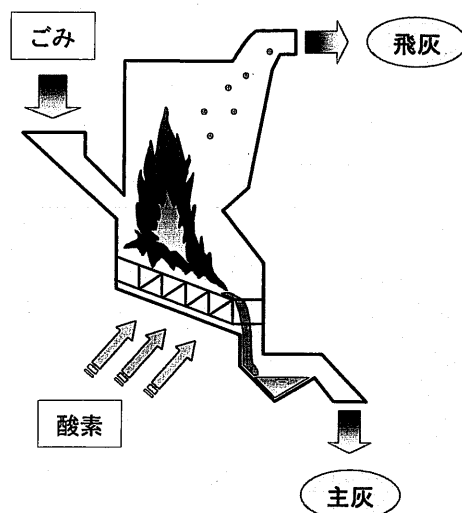


図 2-2 主灰と飛灰

表 2-2 主灰および飛灰の組成例

題目		主灰単独		飛灰単独	
		水砕スラグ	空冷スラグ	水砕スラグ	空冷スラグ
成分	SiO ₂ (%)	36.1~57.2	35~49.4	30.5~35.4	19~48.4
	Al ₂ O ₃ (%)	15.3~26.6	16.2~26.8	18.3~18.7	7.3~18.4
	CaO (%)	10.4~32.49	13.1~22	27.1~37.5	27.7~41.8
	Fe ₂ O ₃ (%)	0.71~10.2	<0.01~13	0.37~5.41	0.61~10.4
	MgO (%)	1.3~5.22	3.07~4.5	4.37~5.5	1.99~5.5
	Na ₂ O (%)	2.66~7.8	2.9~7.13	0.38~3.74	0.27~3.3
	K ₂ O (%)	0.57~1.7	0.48~2.8	0.12~1.7	0.14~1.5
	Cu (%)	0.02~0.09	<0.01~1.4	0.02~0.16	<0.01~0.03
	Pb (%)	<0.01~0.06	0.0042~0.022	0.0008~0.04	0.0005~0.03
	Zn (%)	0.01~0.67	<0.01~0.15	0.04~0.15	0.01~0.55
	Cl (%)	0.03~1.1	<0.1~0.4	0.002~0.64	0.15~8.6
微量成分	Cd (mg/kg)	<0.005~5	<5	<0.4	<0.001~5.51
	As (mg/kg)	<0.5~10	<0.05~3.4	<0.5	<0.001~1.45
	Hg (mg/kg)	<0.005~0.5	<0.01~0.072	<0.01	<0.01~0.43

酸化カルシウム (CaO), 酸化アルミニウム (Al₂O₃) である。飛灰 (集塵機に捕捉される灰) の主成分は酸化カルシウム (CaO), 二酸化珪素 (SiO₂) である。有害ガス除去装置などで使用する生石灰や消石灰に起因し、主灰と比較して塩化物 (Cl) の割合が高い。

2. 3. 2 熔融スラグの物理的・化学的性質

水砕スラグ, 空冷スラグの物理性状例を表 2-3 に示す。

水砕スラグの物理性状は以下のとおりである。表乾密度は 2.7g/cm³ 程度で天然砂の一般

表 2-3 水砕スラグ，空冷スラグの物理性状例

	水砕スラグ	空冷スラグ
	平均	平均
見掛け密度 (g/cm ³)	2.74	—
表乾密度 (g/cm ³)	2.73	2.80
絶乾密度 (g/cm ³)	2.70	2.80
単位容積質量 (kg/l)	1.51	1.70
吸水率 (%)	1.03	1.10
実積率 (%)	60.5	54.8
安定性 (%)	5.08	0.60
洗い試験 (%)	1.3	0.2
ロサンゼルスすり減り減量 (%)	37.3	25.7
最大乾燥密度 (t/m ³)	1.71	2.40
最適含水比 (%)	9.2	2.5
修正CBR (%)	19.3	53.8

値である 2.6~2.7g/cm³ と比較してやや重く，吸水率は平均値 1.0% で天然砂の値 1.5~2.5% と比較して小さく緻密である。

空冷スラグはデータが少なく，徐冷スラグも含めて整理してあるが，その物理性状は以下のとおりである。表乾密度は 2.8g/cm³ で天然砂の一般値と比較してやや重く，吸水率は平均値 1.1% で天然砂と比較して小さな値である。

水砕スラグの粒度分布例を図 2-3 に示す。水砕スラグは細骨材の粒度分布範囲より粗く，粒径 0.6mm 以下の細粒分が少ない。このため，熔融スラグを単独で細骨材としてそのまま使用するには，やや粒径が粗すぎるため，破碎による粒度調整や，粗粒率の小さい骨材との混合が必要であると考えられる。

熔融スラグの主成分は，焼却灰の主成分である SiO₂，CaO，Al₂O₃ であり，合計で約 80% を占めている。その構成比率は，処理対象物の成分および添加剤（塩基度調整剤としての

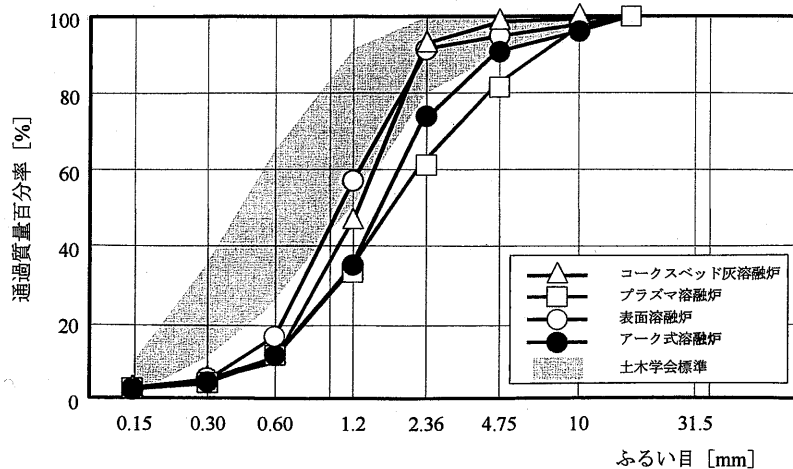


図 2-3 水砕スラグの粒度分布例

石灰石)の有無に依存する。

水砕スラグの重金属含有量例を表 2-4 に示す。熔融スラグ中の重金属含有量は、処理対象物の成分および熔融炉の形式や処理条件(温度等)に依存すると考えられ、変動幅が大きい。

表 2-4 水砕スラグの重金属含有例

	最大	最小
Hg (mg/kg)	0.0707	<0.001
Cd (mg/kg)	0.53	<0.5
Pb (mg/kg)	440	7.8
Cu (mg/kg)	2,300	26.8
Zn (mg/kg)	5,870	15.4
Cr (mg/kg)	1,300	1.7
As (mg/kg)	100	0.402
B (mg/kg)	1,800	29.9
Mo (mg/kg)	86	<1
Ni (mg/kg)	110	<10
Sb (mg/kg)	100	<0.5
Se (mg/kg)	38	<0.1

2. 4 環境基準

熔融スラグを利用する際は、適切な環境基準を満たすことを確認する必要があり、現時点では「一般廃棄物の熔融固化物の再生利用の実施の促進について(平成10年3月26日厚生省通達, 生衛発第508号)」に従うことで対応している。熔融スラグは、1200℃以上で高温熔融する過程において、ダイオキシン類やPCB等は分解されるため、溶出基準の対象物質はカドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀およびセレンの6項目とされている。各溶出基準値を表 2-5 に示す。

利用にあたっては「土壌の汚染に係わる環境基準について(平成3年8月23日環境庁告示第46号)」による方法により、安全を確認する必要がある。

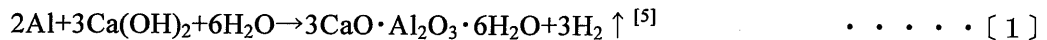
表 2-5 有害物質の溶出基準

溶出試験分析値 (mg/l)						
成分名	Cd	Pb	Cr6+	As	T-Hg	Se
溶出基準(報告46号)	≤0.01	≤0.01	≤0.05	≤0.01	≤0.0005	≤0.01

2. 5 溶融スラグを使用したコンクリートに関する既往の研究

2. 5. 1 コンクリートの膨張

溶融スラグには通常、アルミナ（酸化アルミニウム）が存在しているが、一部の溶融スラグにおいては、金属アルミニウム粒が含まれていることが確認されている^[4]。化学反応式〔1〕に示すように、不安定な金属アルミニウムはコンクリートのアルカリと反応して水素ガスを発生^[5]し、これに伴いコンクリートは膨張する^[4]。膨張によりコンクリート中に空隙が生じ、コンクリートの強度を低下させる可能性がある。このことから、金属アルミニウムの存在の確認、ならびに使用量の制限等が必要であるといえる。



コンクリートの膨張を抑制する方法としては、溶融固化処理工程での対応と溶融スラグの特性に基づく使用量の制限、石灰乳による溶融スラグの安定化^[6]などが挙げられる。溶融固化処理工程での対応としては、溶融温度をある程度（1400℃）以上に高くすること、あるいは溶融物の炉内滞留時間をある程度（例えば30分以上、しかし、実際には溶融炉ごとに適正な滞留時間を測定することが求められる）長く設定すること等が挙げられる。しかしそれ以上に、溶融スラグの原料となるごみおよびその焼却残渣の種類が膨張特性へ及ぼす影響は大きいものであると考えられる^[7]。

したがって、溶融スラグを使用したコンクリートの膨張性能の簡易的な判定、特性や用途を考慮した利用量等の設定が今後必要であるといえる。

2. 5. 2 置換率および溶融スラグの品質が圧縮強度に及ぼす影響^[8]

図2-4に圧縮強度試験結果の一例を示す。横軸は置換率である。この試験例において使用された溶融スラグは、焼却灰を1400℃の高温の下、灯油バーナー式ごみ焼却灰溶融炉により溶融し、水冷固化したものである。この溶融スラグを粒度調整して川砂に置換し、細骨材として使用している。この場合、モルタルによる膨張現象の確認では、置換率50%以上で膨張現象が確認されている。この試験例では全ての材齢において類似の傾向を示し、溶融スラグ置換率25%をピークに、その後は置換率の増加に伴い、圧縮強度が低下している。このことから、膨張現象ならびに溶融スラグの物性が圧縮強度に影響を及ぼすと考えられる。

図2-5に別の種類の溶融スラグを対象とした圧縮強度試験結果の一例を示す。この試験例において使用された溶融スラグは、主灰を1400~1500℃の高温の下、電気アーク式溶融

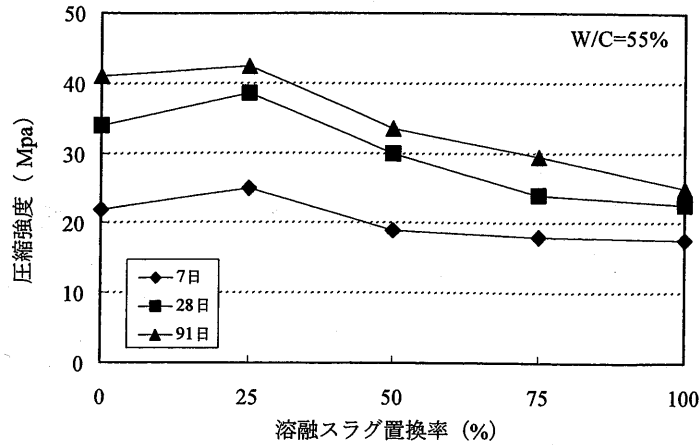


図 2-4 溶融スラグ置換率と圧縮強度の関係 (1)

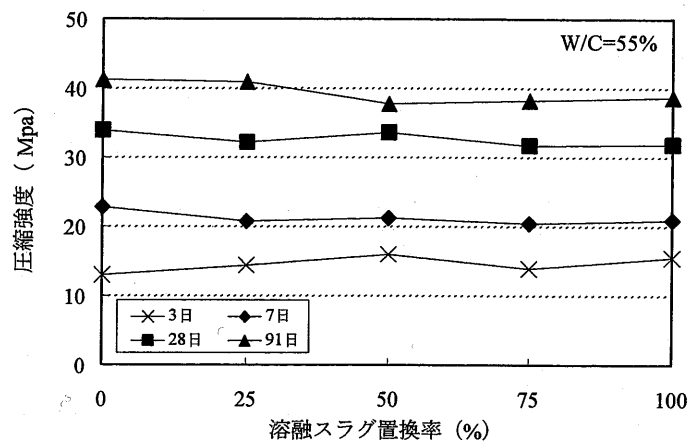


図 2-5 溶融スラグ置換率と圧縮強度の関係 (2)

炉により溶融し、水冷固化したものである。この溶融スラグも粒度調整して川砂に置換し、細骨材として使用している。この場合、モルタルでは膨張現象は確認されていない。この試験例では溶融スラグ置換率に拘らず、全ての材齢において川砂のみのコンクリートと同等の強度が得られている。このことから、使用された溶融スラグには不安定な金属アルミニウムが含まれず、コンクリートを膨張させなかったため、川砂のみのコンクリートと同程度の強度を示したと考えられる。また、溶融スラグ自身の強度等が川砂と同程度であったと推測される。

この2つの試験例より、溶融スラグを使用したコンクリートの圧縮強度には、膨張性能を含む溶融スラグの品質が関係することが明らかとなった。したがって、溶融スラグをコンクリート用材料として使用する場合は、事前に膨張率試験や圧縮強度試験を行うことにより、溶融スラグを使用した場合のコンクリートの性質を把握し、溶融スラグ置換率を決めて使用することが望ましいと考えられる。

2. 5. 3 水セメント比と圧縮強度の関係^[9]

図 2-6 に圧縮強度試験結果の一例を示す。この図は、参考文献^[9]における試験結果を基に、グラフ化したものである。この試験例で使用した溶融スラグは、焼却灰をプラズマ式溶融炉により溶融した水砕スラグである。溶融スラグは、ロッドミルを用いた破碎処理によりコンクリート用砕砂の粒度に調整した Sg、および、Sg に高 pH 熱水（消石灰飽和水溶液）による表面処理を行った処理済 Sg の 2 種類を対象とし、比較のための基準配合 (Base: 溶融スラグ無混入) も設定している。この試験例では、Sg においても基準配合同様、水セメント比の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向を示し、処理済 Sg では、基準配合と同等の圧縮強度を有する結果となっている。このことから、溶融スラグを使用したコンクリートも通常のコンクリート同様、水セメント比の違いによって圧縮強度が増減し、圧縮強度の低下傾向は、溶融スラグに高 pH 熱水などによる表面処理を施すことにより、改善されると考えられる。

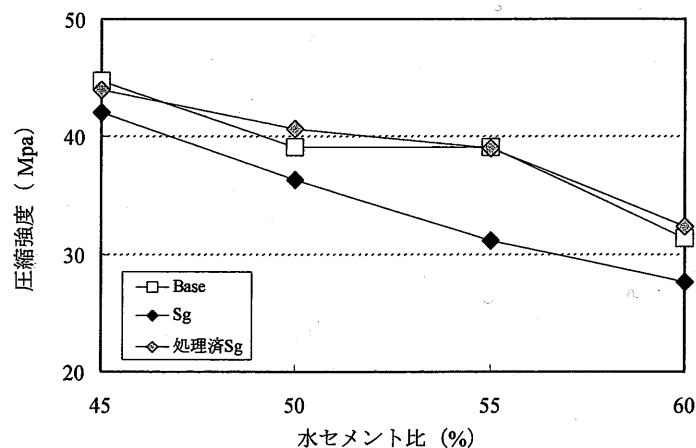


図 2-6 圧縮強度試験結果の一例

2. 6 まとめ

- (1) 溶融スラグは、廃棄物および焼却残渣を原料に、様々な溶融方式によって製造されており、その特性は、原料（処理対象物）の成分、溶融炉の形式および処理条件（温度等）に依存する。
- (2) 溶融スラグ中には酸化アルミニウムが存在するが、化学的に不安定な金属アルミニウムが含まれる場合も想定され、金属アルミニウムとセメント中のアルカリとが反応して水素ガスを発生し、コンクリートを膨張させる可能性がある。膨張によりコンクリート中に空隙が生じ、コンクリートの強度を低下させるため、溶融スラグ中の金属アルミニウムの存在の確認ならびに使用量の制限等が必要である。

- (3) 溶融スラグを使用したコンクリートの圧縮強度には、膨張性能を含む溶融スラグの品質が関係するため、溶融スラグを使用する場合は、事前に膨張率試験や圧縮強度試験を行うことにより、コンクリートの物性を把握し、溶融スラグ置換率を決めて使用することが望ましい。
- (4) 溶融スラグを使用したコンクリートも通常のコンクリート同様、水セメント比の違いによって圧縮強度が増減する。また、圧縮強度の低下傾向は、溶融スラグに表面処理を施すことで改善されると考えられる。

2. 7 既往の研究から得られた課題

これまでに述べた既往の研究より、溶融スラグは、原料の成分や溶融炉の形式、処理条件に依存することが判明した。また、溶融スラグ中に化学的に不安定な金属アルミニウムが含まれる場合には、セメント中のアルカリとの反応からコンクリートを膨張させることが懸念されるため、コンクリートの膨張現象を把握し、置換率等、配合に生かす必要があるといえる。また、溶融スラグの事前処理の有無や配合がコンクリートの性状に影響を及ぼす場合があるため、例えば、磨砕処理の有無の影響や、種々の配合下での影響の把握が必要である。更に、研究例の少ない溶融スラグの混合使用や他の産業副産物との併用、溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性についても検討が求められる。

以上のことから、本研究では、簡易的なコンクリートの膨張率試験方法を提案し、膨張現象を把握するとともに、異なる溶融施設から排出された種々の溶融スラグをそれぞれ使用したコンクリートについて物性試験を行うこととした。また、種々の配合下での物性や、異なる溶融スラグ同士の混合、他の産業副産物との併用についても検討し、最終的に、溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性の把握を行い、溶融スラグを使用したコンクリートの物性について考察することとした。

参考文献

- [1] 建設省土木研究所：公共事業における試験施工のための他産業再生資材試験評価マニュアル案，建設省土木研究所資料第 3667 号，pp.19~39，1999.9
- [2] 長瀧重義，山本泰彦：コンクリート用語辞典，山海堂，p54，2000
- [3] (財) 廃棄物研究財団：スラグの有効利用マニュアル（一般廃棄物の溶融固化物の再生利用に関する指針解説），1999
- [4] 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
- [5] 岡田清，六車熙：コンクリート工学ハンドブック改定新版，p.711，1987
- [6] 鈴木憲司，堀口真由美：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
- [7] 白子定治，曾山照明，花嶋正孝，田中勝：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
- [8] 北辻政文，藤居宏一：ごみ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，第 67 巻，第 2 号，pp.223~231，1999
- [9] 斉藤丈士：ごみ溶融スラグ細骨材の改質がコンクリートの性状に及ぼす影響，日本建築学会関東支部研究発表会，2001

第3章 溶融スラグを使用したコンクリートの膨張現象

3.1 概要

既往の研究^[1]では、溶融スラグに含まれる金属アルミニウムがコンクリートを膨張させ、物性に影響を及ぼす可能性があることを示唆している。しかし、同種の溶融スラグを用いても、膨張が確認される場合とされない場合があり、細骨材として使用する場合は、溶融スラグを使用したコンクリートの膨張性状の有無を簡便に確認する必要がある。コンクリート材料に起因する膨張に関する試験としては、モルタルによる試験方法(JSCE-F522-1999, TRA 0016による膨張率試験^[2]等)があるが、コンクリートを対象とした簡便な確認方法は確立されていない。そこで本章では、フレッシュコンクリートの膨張を簡易的に確認することを目的とした膨張率試験方法を提案し、アルミニウム粉末を用いて提案した試験方法の検討を行うとともに、3種類の溶融スラグについてそれぞれ置換率を変えてコンクリートに使用し、膨張率試験を行った。また、膨張現象の確認される溶融スラグに関しては、膨張と強度の関係について実験を基に考察した。

3.2 使用材料

本章では、表 3-1 に示す材料を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は、「3.4 膨張率試験方法の提案と検討」、「3.5 3種類の溶融スラグによるコンクリートの膨張率試験」では春日井産砕石(G1)を、「3.6 膨張現象と強度特性」では瀬戸産砕石(G2)を、細骨材は豊田産山砂(3.4ならびに3.5ではS1, 3.6で

表 3-1 使用材料

使用材料	種類	記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.15g/cm ³ , 比表面積: 3340cm ² /g
細骨材	山砂(豊田市田村山産)	S1	密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 1.71%, 粗粒率: 2.83, 実積率: 67.2%
	山砂(豊田産)	S2	密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 1.56%, 粗粒率: 2.76, 実積率: 65.3%
粗骨材	砕石(春日井市外之原産)	G1	密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.61%, 粗粒率: 6.80, 最大寸法: 20mm
	砕石(瀬戸市下半田川町産)	G2	密度: 2.72g/cm ³ , 吸水率: 0.63%, 粗粒率: 6.74, 最大寸法: 20mm
溶融スラグ	酸素式熱分解直接溶融炉	Sg1	密度: 2.68g/cm ³ , 吸水率: 0.76%, 粗粒率: 3.78, 実積率: 53.9%
	プラズマ式溶融炉	Sg2	密度: 2.89g/cm ³ , 吸水率: 0.44%, 粗粒率: 3.38, 実積率: 58.2%
	電気抵抗式溶融炉	Sg3	密度: 2.80g/cm ³ , 吸水率: 0.05%, 粗粒率: 4.32, 実積率: 59.8%
化学 混和剤	高性能AE減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸系
	AE助剤	AE	主成分: 樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤

は S2) を使用した。化学混和剤には高性能 AE 減水剤および AE 助剤を使用した。

熔融スラグは、愛知県内の熔融施設から排出された、熔融方式の異なる Sg1 (酸素式分解直接熔融炉)、Sg2 (プラズマ式熔融炉)、Sg3 (電気抵抗式熔融炉) の 3 種類を使用した。なお、実験では、5mm ふるいを通過した熔融スラグのみを使用した。写真 3-1～3 に、使用した熔融スラグ Sg1、Sg2、Sg3 を示す。各熔融スラグの表面は滑らかであり、状は角張っているものが多く、針状のものも含まれていた。Sg1 はごみを直接熔融することにより製造された水砕スラグであり、表 2-1 の 2-1-1 に分類される。Sg2 は焼却残渣を融することにより製造された水砕スラグであり、表 2-1 の 1-2-4 に分類される。Sg3 は焼却残渣を熔融することにより製造された空冷スラグであり、表 2-1 の 1-2-2 に分類される。Sg1 は直接熔融方式であるため、可燃物、不燃物を原料としている。Sg2 は主灰、飛灰不燃物を原料としている。Sg3 は飛灰に消石灰、ソーダ灰を加え混合灰とし、廃ガラスらびに特殊調質剤を加え原料としている。その比率は、混合灰 62%、ガラスカレット 30% 添加剤 8% である。



写真 3-1 Sg1



写真 3-2 Sg2



写真 3-3 Sg3

表 3-2 に熔融スラグの化学組成を示す。いずれの熔融スラグも二酸化珪素 (SiO₂)、酸化カルシウム (CaO)、酸化アルミニウム (Al₂O₃) が主成分であり、酸化アルミニウムの含有率は 16~21%を占める。

表 3-2 熔融スラグの化学組成

化学組成 (%)								
成分名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	その他
Sg1	46.4	16.7	5.5	19.5	2.9	2.8	1.8	4.4
Sg2	38.0	21.0	1.7	30.0	2.9	1.8	0.5	4.1
Sg3	42.8	16.0	0.5	29.5	1.8	7.4	0.5	1.5

表 3-3 に粒度分布を、図 3-1 に粒度分布から求められる熔融スラグの粒度分布曲線を示す。いずれの熔融スラグも土木学会標準範囲内に収まっておらず、粗いものであることが分かる。したがって、熔融スラグの使用によりフレッシュ性状は荒々しくなることが予測される。

表 3-4 に有害物質の溶出試験結果を示す。表 2-5 の基準値と比較すると、いずれの熔融スラグにおいても溶出基準を満たしていることが分かる。

図 3-2, 図 3-3 に、熔融スラグに含まれる金属アルミニウムの検出を目的に実施された、ガス発生量試験結果の一例を示す。これらの図は、鈴木らの研究^[3]によるデータを基に、

表 3-3 熔融スラグの粒度分布

粒度分布 (%)								洗い損失量 (%)
ふるい目 (mm)	5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.2	Pan	
Sg1 残留率	0.2	28.7	39.0	20.0	7.1	2.7	2.3	0.66
Sg2 残留率	0.2	10.3	39.1	33.3	12.5	3.6	1.0	0.83
Sg3 残留率	2.7	57.9	24.7	10.4	4.7	1.7	0.9	0.36

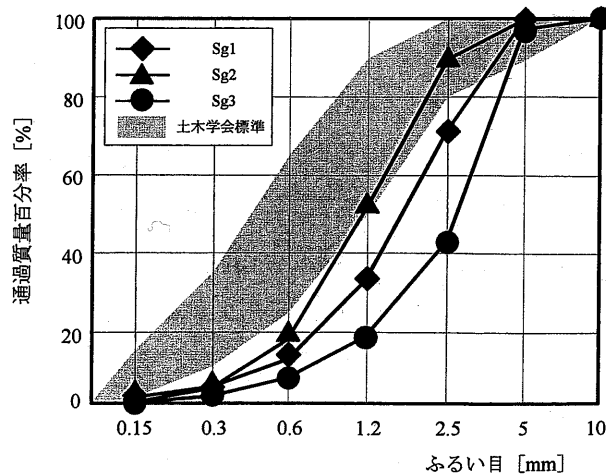


図 3-1 熔融スラグの粒度分布曲線

表 3-4 有害物質の溶出試験結果

溶出試験分析値 (mg/l)						
成分名	Cd	Pb	Cr6+	As	T-Hg	Se
Sg1	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.005
Sg2	<0.001	0.001	<0.005	<0.001	<0.0005	<0.001
Sg3	<0.001	<0.005	<0.04	<0.005	<0.0005	<0.002
溶出基準 (報告46号)	≤0.01	≤0.01	≤0.05	≤0.01	≤0.0005	≤0.01

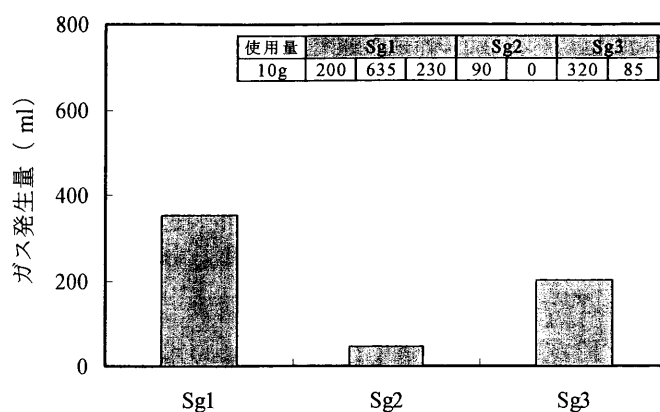


図 3-2 ガス発生量試験結果 (10g ずつ使用)

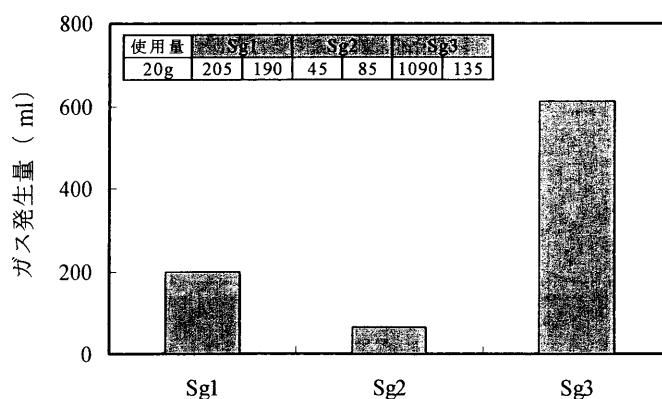


図 3-3 ガス発生量試験結果 (20g ずつ使用)

グラフ化したものである。試験は、乳鉢で粉砕した溶融スラグと石灰乳の混合物をガスパック中に保管し、室温で1日静置した後、溶融スラグ中の金属アルミニウムと石灰の反応により発生したガス量を、ガスメーターにより測定するものであり、ガス発生の有無により、金属アルミニウム含有の可能性を判定している。石灰乳とは、消石灰 (Ca(OH)₂) を水に飽和以上に混じた白濁の液体である。図 3-4 に、溶融スラグの代わりにアルミニウム (Al 箔) を用いた場合に発生したガスの、ガス種分析結果例を示す。Al 箔と石灰乳の混合物から発生したガスを、Q-mass により分析している。水素、窒素、酸素、水がほとんどであり、水素の存在比は 57% となっている。水素は、Al と Ca(OH)₂ が反応し、Ca(AlO₂)₂ と共に得られたものであると考えられる。なお、窒素および酸素はその存在比から、空気がリークしたもの、水は石灰乳からのものであると考えられる。ガスの発生は、Sg1, Sg2,

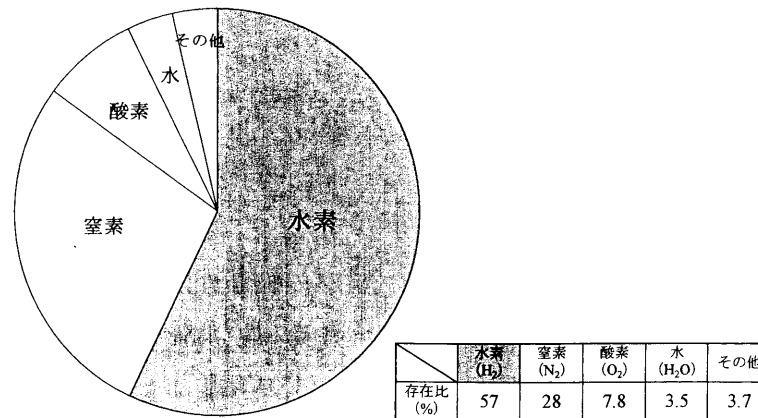


図 3-4 ガス種分析結果 (AI による)

Sg3 の全てにおいて認められたが、発生量は測定の都度、大きく異なる結果となっている (図中の表を参照)。以上のことから、対象とした溶融スラグにはいずれも金属アルミニウムが偏在して含まれており、コンクリートを膨張させる可能性を有していると判断した。また、同一の溶融スラグにおいても、測定の都度、ガス発生量が大きく異なる場合があることから、同様の溶融炉から排出された溶融スラグでも品質にバラツキがあり、その膨張現象に差がみられる可能性があるといえる。

なお鈴木らは、2 回目の浸漬ではガスの発生が確認されなかったことから、石灰乳による浸漬処理により、溶融スラグに含まれる金属アルミニウムの活性が失われることを明らかにしている。したがって、溶融スラグの利用については、膨張現象の抑制を目的とした前処理の観点からも、検討を行うことが重要であると考えられる。

3. 3 練混ぜ方法

本章の実験において、以下の手順に従い、練混ぜを行った。

細骨材および粗骨材は、表面乾燥状態 (以下、表乾状態と略記) のものを打ち込み前日までに準備し保管した。コンクリートの練混ぜは、公称容量 0.05m^3 のパン型強制練りミキサーを用いて練混ぜ量 0.02m^3 で行った。まず、セメントと細骨材および溶融スラグを十分攪拌するため、細骨材の半分、セメント、溶融スラグ、残りの細骨材の順番で材料を投入し、30 秒間の空練りを行った。空練り後、ミキサー壁面に付着した材料をスコップでかき落とし、引き続き粗骨材、練混ぜ水 (化学混和剤を含む) を投入した。練混ぜ時間は全材料投入後 90 秒間とした。練混ぜ終了後、コンクリートを練り板に排出し、均一になるように練り板上で切り返しを行った後、直ちに試験を行った。

なお、硬化後の物性試験用供試体は、各試験の供試体を条件に応じて製作し、脱型後、試験材齢まで 20°C の水中養生を行った。

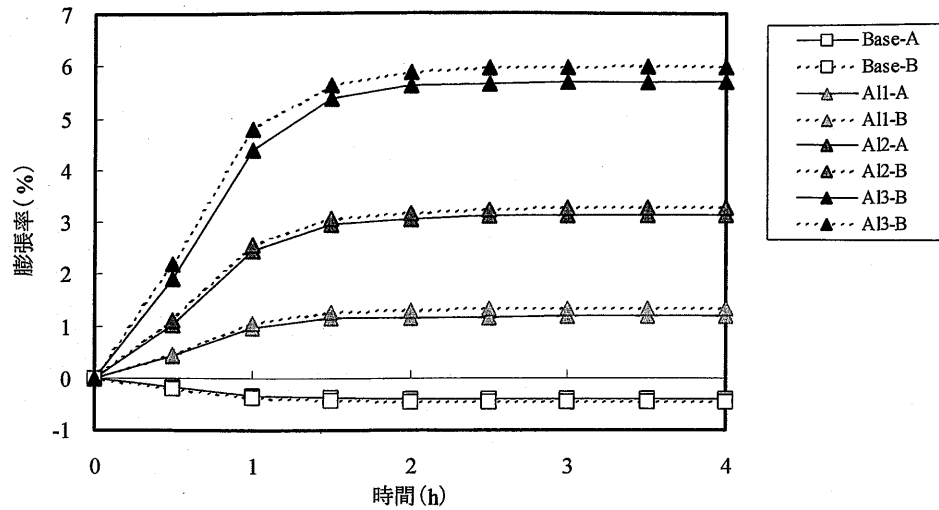


図 3-6 膨張率試験結果

3. 5 3 種類の溶融スラグによるコンクリートの膨張率試験

3. 5. 1 実験概要

(1) 実験配合

3. 4 の実験結果から、提案した膨張率試験により、膨張現象の把握が可能であることが明らかとなった。そこで本節では、金属アルミニウムの含有が懸念される Sg1, Sg2, Sg3 の 3 種類の溶融スラグを使用し、溶融スラグの品質（原料）の違いによる膨張現象の有無を確認するとともに、硬化後のコンクリートの物性についても検討を行った。

配合を表 3-7 に示す。土木用コンクリートを想定し、目標スランプ 8cm, 目標空気量 4.5%, 水セメント比 50%とした。配合は水、セメント、粗骨材の量を一定とした。溶融スラグは 5mm ふるいを通過したものを細骨材と容積置換し、細骨材に対する溶融スラグの置換率は

表 3-7 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	置換率 (%)	配合量 (kg/m ³)					SP (%)	AE (%)
			W	C	S1	G1	Sg		
Base	50	0	180	360	812	925	—	C×0.10	C×0.008
Sg1-25		25			609		213		
Sg1-50		50			406		425		
Sg1-75		75			203		637		
Sg2-25		25			609		229		
Sg2-50		50			406		458		
Sg2-75		75			203		687		
Sg3-25		25			609		222		
Sg3-50		50			406		444		
Sg3-75		75			203		666		

25, 50, 75%とした。この熔融スラグを使用した3水準に、比較のための基準配合 (Base : 熔融スラグ置換率 0%) を加えた4水準を設定した。化学混和剤には高性能 AE 減水剤および AE 助剤を使用した。本章では、熔融スラグの品質の違いによるコンクリートの物性への影響を検討することを目的としたため、各材料の単位量、化学混和剤の添加量は統一し、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。

(2) 試験項目

フレッシュ試験については、スランプ試験、空気量試験、単位容積質量試験、ブリーディング試験 (JIS A 1123-1997「コンクリートのブリーディング試験方法」)、膨張率試験の各項目とともに、硬化後の物性として、圧縮強度試験 (JIS A 1108-1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」) および静弾性係数試験 (JSCE-G 502-1999「コンクリートの静弾性係数試験方法」) の各項目を行った。

本節においてはブリーディング現象も観察可能とするため、膨張率試験には市販の透明ペット容器 (φ10×20cm) を用いた (写真 3-5)。

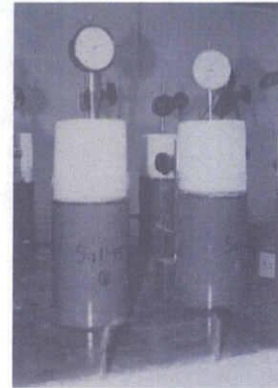


写真 3-5 膨張率試験状況

3. 5. 2 結果および考察

(1) フレッシュ試験結果

表 3-8 にフレッシュ試験結果、図 3-7 にスランプ試験結果、図 3-8 に空気量試験結果を示す。

スランプ試験結果において、Sg1 は置換率 75% の場合、目標スランプである $8 \pm 1.5\text{cm}$ の範囲より低い値となり、Sg2 はいずれの置換率においても目標スランプの範囲を満たした。Sg3 は置換率 25% の場合は目標スランプの範囲を満たしたが、置換率 50%、75% の場合は目標スランプの範囲より高い値となった。置換率によるスランプの増減現象が熔融スラグによって異なる結果となったのは、熔融スラグの形状が、Sg1 には針状のものが他と比較して多く含まれたため、置換率の増加に伴ってスランプが低下したものと考えられる。

空気量試験結果において、Sg1 は置換率 25% の場合は目標空気量である $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲を満たしたが、置換率 50%、75% の場合は目標空気量の範囲より高い値となった。Sg2 は置換率 75% の場合に、Sg3 は置換率に拘らず目標空気量の範囲より高い値となった。また、いずれの熔融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。熔融スラグの使用により空気量の増加が確認されたのは、熔融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。

表 3-8 フレッシュ試験結果

配合	SI (cm)	Air (%)	Br率 (%)	膨張率 (%)		単位容積質量 (kg/l)
				計測値	平均値	
Base	8.0	4.9	3.98	-0.46	-0.36	2.28
				-0.26		
Sg1-25	7.3	6.0	4.47	-0.18	-0.19	2.27
				-0.21		
Sg1-50	7.5	7.4	3.81	0.11	0.08	2.24
				0.06		
Sg1-75	5.3	8.4	3.81	0.28	0.30	2.22
				0.33		
Sg2-25	8.3	5.3	3.16	-0.34	-0.36	2.30
				-0.37		
Sg2-50	8.5	5.6	3.74	-0.39	-0.39	2.30
				-0.39		
Sg2-75	9.5	8.9	4.57	-0.32	-0.32	2.24
				-0.33		
Sg3-25	9.0	6.8	3.65	-0.40	-0.40	2.25
				-0.41		
Sg3-50	11.7	7.5	4.73	-0.41	-0.30	2.25
				-0.20		
Sg3-75	11.0	8.4	5.90	-0.36	-0.35	2.24
				-0.34		

Br率：ブリーディング率

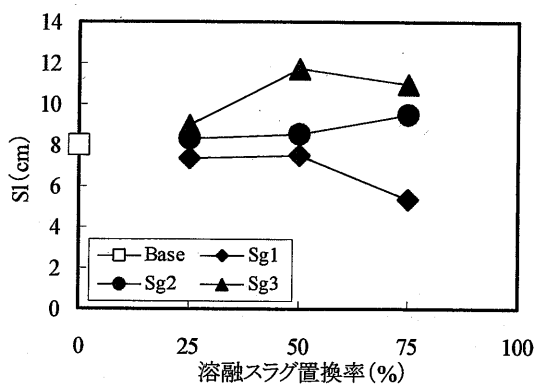


図 3-7 スランプ試験結果

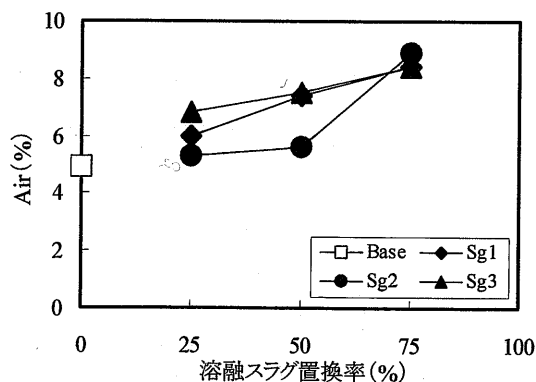


図 3-8 空気量試験結果

スランプ試験および空気量試験において、目標空気量や目標スランプを満たさないものがあつたが、化学混和剤等による配合の調整によりこれらの制御は可能であり、溶融スラグ利用上の問題はないと考えられる。

単位容積質量はいずれの配合も空気量を反映し、空気量の増加に伴い単位容積質量が小さくなる傾向を示した。

図 3-9 にブリーディング試験結果を示す。Sg1 は溶融スラグ置換率の増加に伴って小さくなり、他の溶融スラグは逆に大きくなる傾向を示した。これは、各溶融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つた。

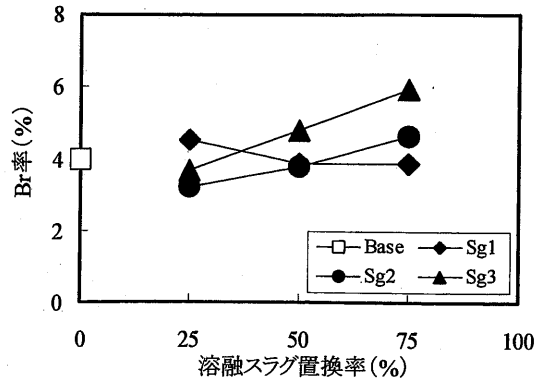


図 3-9 ブリーディング試験結果

(2) 膨張率試験結果

図 3-10 に膨張率試験結果を示す。Sg1 は置換率の増加に伴い膨張率も増加する結果となったが、Sg2、Sg3 は置換率に拘らず基準配合と同程度の収縮量を示し、明確な膨張現象は確認されなかった。膨張現象は材齢 4 時間後までに終了し、基準配合では約 0.4%の収縮、Sg1-25 では約 0.2%の収縮、Sg1-50 では約 0.1%の膨張、Sg1-75 では約 0.3%の膨張、Sg2-25 では約 0.4%の収縮、Sg2-50 では約 0.4%の収縮、Sg2-75 では約 0.3%の収縮、Sg3-25 では約 0.4%の収縮、Sg3-50 では約 0.3%の収縮、Sg3-75 では約 0.3%の収縮が確認された。また、表 3-8 より、配合毎の膨張率のバラツキが小さいことから、今回使用した溶融スラグにおいては、溶融スラグの品質が比較的均一だったと考えられる。

使用した溶融スラグ 3 種類全てに金属アルミニウムの含有が認められているものの、Sg1 のみに膨張現象が確認され、Sg2、Sg3 には確認されなかった。この原因として、原料となるごみの種類および溶融方式、作製条件^[4]等の影響に加え、鈴木らの研究^[3]によれば、溶融スラグ中の CaO 含有量が影響すると考えられる。表 3-2 に示す化学組成より、Sg2、Sg3 には Sg1 に比べ CaO の含有量が多いことから、コンクリート中のアルカリとの反応に加え、

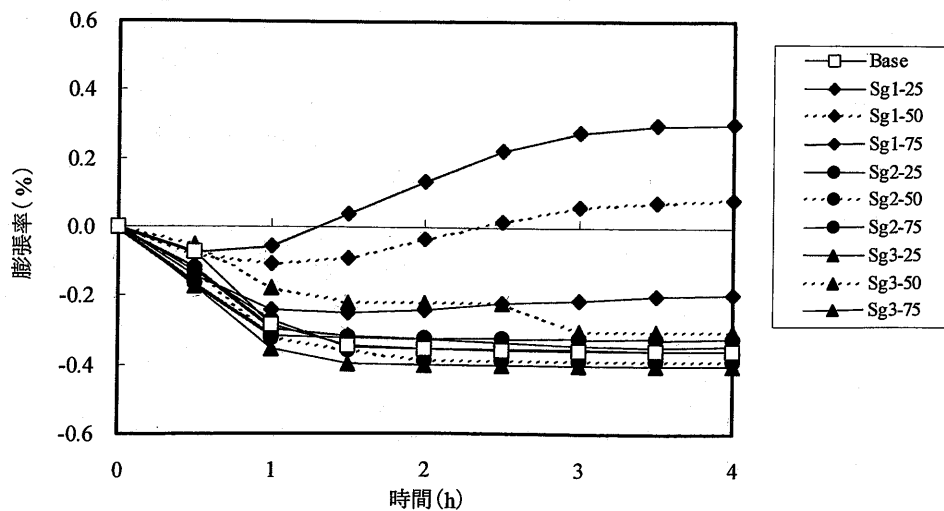


図 3-10 膨張率試験結果

練り混ぜを含むフレッシュコンクリートの初期に金属アルミニウムと石灰との反応が進み、膨張を抑制したものと考えられる。

(3) 圧縮強度試験・静弾性係数試験および割裂引張強度試験結果

表 3-9 および図 3-11 に圧縮強度試験結果および静弾性係数試験結果を示す。

材齢 7 日では、Sg1 では置換率の増加に伴い強度が低下する傾向を示した。Sg2 では置換率 25%と 50%との間には明確な強度の低下は確認されなかったが、置換率 50%と 75%では強度の低下が確認された。Sg3 では置換率の増加に伴う明らかな強度の変化は確認されなかった。材齢 28 日では、置換率の増加に伴う強度の低下は Sg1 と Sg2 において材齢 7 日と同様の傾向を示した。また Sg3 でも置換率の増加に伴う強度の低下が確認された。圧縮強度試験結果から、熔融スラグの種類、置換率、材齢に拘らず、熔融スラグの使用による強度低下が認められたが、強度の低下は、熔融スラグの使用により空気量が増加したこと、熔融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。

表 3-9 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

配合	圧縮強度(N/mm ²)		静弾性係数(×10 ⁴ N/mm ²)
	材齢7日	材齢28日	材齢28日
Base	25.58	34.81	2.98
Sg1-25	20.50	26.07	2.55
Sg1-50	15.99	18.85	2.56
Sg1-75	14.31	15.25	2.60
Sg2-25	21.45	26.18	3.57
Sg2-50	21.84	26.31	2.78
Sg2-75	15.49	19.41	2.52
Sg3-25	20.51	25.69	2.82
Sg3-50	20.60	23.80	2.76
Sg3-75	20.74	22.41	2.93

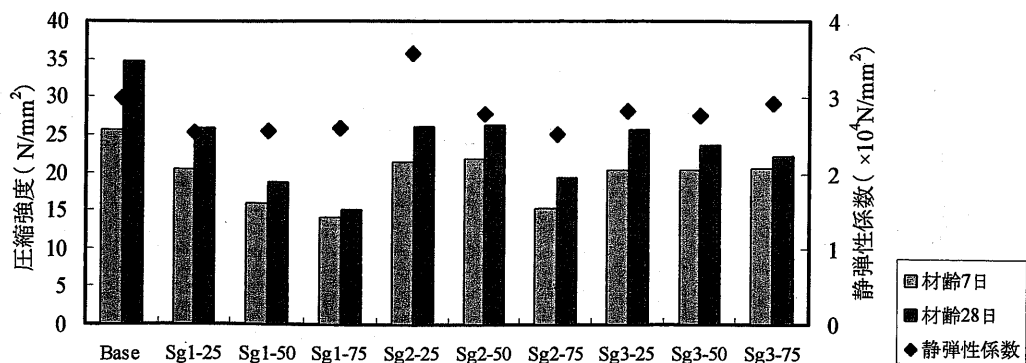


図 3-11 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

静弾性係数試験では、Sg2 と Sg3 の静弾性係数は圧縮強度試験結果を反映した結果となった。Sg1 において、置換率が大きくなるにしたがって静弾性係数が僅かに増加したが、その原因については今回の実験からは判断できなかった。

図 3-12 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 3-10 の最終値から最低値を減じた値とした。図中に示した式は、実験結果を近似し、圧縮強度 (f) を膨張率 (Ex.) で表したものである。膨張率の増加と溶融スラグ置換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、この強度低下が溶融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。

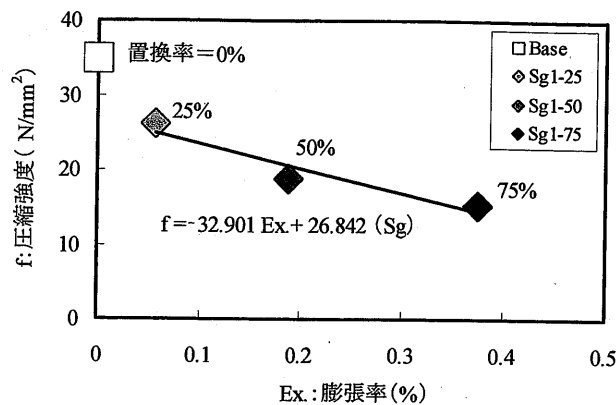


図 3-12 膨張率と圧縮強度の関係

3. 6 膨張現象と強度特性

3. 6. 1 実験概要

前節の実験では、Sg1 について、溶融スラグ置換率の増加に伴う膨張率の増加と圧縮強度の低下が確認されたが、この強度低下が溶融スラグ置換率の増加によるものか、膨張率の増加によるものかは判断できなかった。そこで本節では、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、膨張が懸念される Sg1 を対象に、溶融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。まず、溶融スラグを使用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、次に全体的な膨張の傾向と強度の特性について考察を行った。

試験項目は、フレッシュ試験については、スランプ試験、空気量試験、単位容積質量試験、ブリーディング試験の各項目とともに膨張率試験を、硬化後の物性として、圧縮強度試験、割裂引張強度試験 (JIS A 1113-1999 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」)、静弾性係数試験の各項目を実施した。

3. 6. 2 単位水量の影響

(1) 配合およびフレッシュ試験結果

配合およびフレッシュ試験結果を表 3-10 に示す。本実験では、単位水量の違いのみによるコンクリートの物性の違いを検討するため、化学混和剤の添加量を統一し、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。単位水量は $165, 185\text{kg/m}^3$ の 2 水準とし、熔融スラグとの反応性を考慮して単位セメント量を同程度とするため、それぞれ水セメント比を 47, 53%とした。目標スランプは 4.0cm (W/C=47%) および 14.5cm (W/C=53%)、目標空気量は 4.5%とした。配合は熔融スラグ置換率 50%の下、セメント、細骨材をほぼ一定量とした。化学混和剤には高性能 AE 減水剤と AE 助剤を使用した。なお、比較のため、基準配合 (Base: 熔融スラグ置換率 0%) と、基準配合にアルミニウム粉末を加えた配合 (Al) も設定した。

図 3-13 にスランプと単位水量の関係を示す。全ての配合において単位水量の増加に伴いスランプも増加し、熔融スラグを使用した配合が他の配合と比較して全体的に低スランプとなった。単位水量 185kg/m^3 の場合には目標スランプの範囲より低い値をとっているのは、熔融スラグの使用がコンクリートの流動性に影響した結果であるといえる。

図 3-14 に空気量と単位水量の関係を示す。全ての配合において単位水量の増加に伴う空気量の低下が確認された。単位水量 165kg/m^3 の場合は、全ての配合において目標空気量で

表 3-10 コンクリートの配合およびフレッシュ試験結果

配合	W/C (%)	配合量 (kg/m^3)					SP (%)	AE (%)	Al粉末 (%)	SI (cm)	Air (%)	Br率 (%)	単質 (kg/l)
		W	C	S2	G2	Sg							
Base-W-1	47	165	351	770	1027	C×0.3	C×0.004	0	5.5	3.5	2.61	2.39	
Base-W-2	53	185	349	768	977				14.5	2.2	4.39	2.42	
Sg1-W-1	47	165	351	385	1027				4.0	3.5	2.82	2.38	
Sg1-W-2	53	185	349	384	977				10.5	2.7	5.35	2.37	
Al-W-1	47	165	351	770	1027			C×0.02	5.8	3.3	1.58	2.38	
Al-W-2	53	185	349	768	977				16.8	3.1	3.15	2.35	

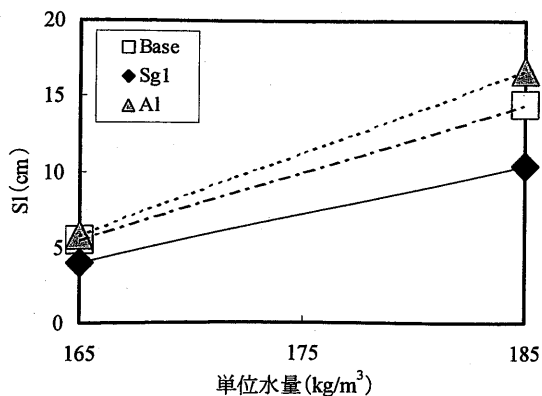


図 3-13 スランプと単位水量の関係

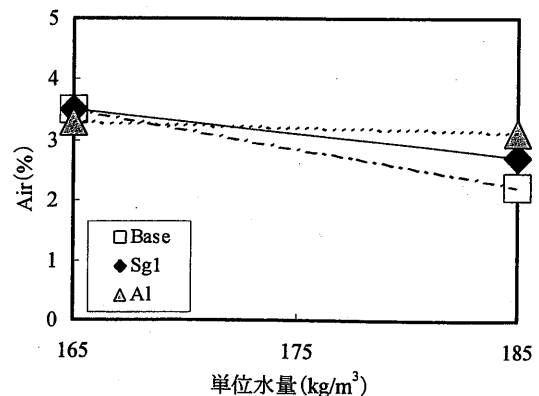


図 3-14 空気量と単位水量の関係

ある $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲を満たしたが、単位水量 185 kg/m^3 の場合には基準配合、Sg1 の両配合とも目標空気量の範囲より低い値となった。

図 3-15 にブリーディング率と単位水量の関係を示す。全ての配合において単位水量の増加に伴ってブリーディング率が増加する結果となった。Sg1 を使用した配合のブリーディング率が基準配合と比較して僅かに大きな値となったのは、熔融スラグの表面が平滑で保水性が小さいことが原因である^[5]と考えられる。また、アルミニウム粉末を用いた配合のブリーディング率が他に比べて小さく現れたのは、アルミニウム粉末との反応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。

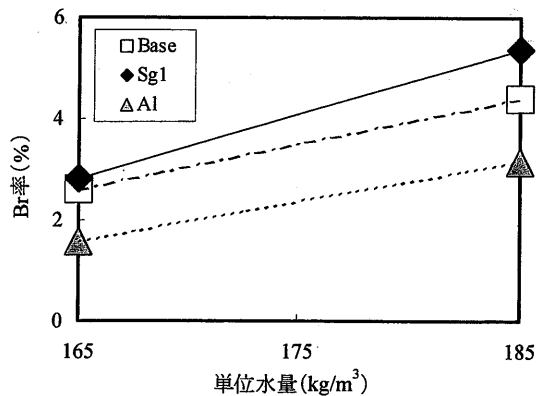


図 3-15 ブリーディング率と単位水量の関係

(2) 膨張率試験結果

図 3-16 に膨張率試験結果を示す。全ての配合において膨張現象は材齢 4 時間後までに終了し、基準配合、Al の各配合では単位水量の違いによる膨張現象の差はみられなかった。

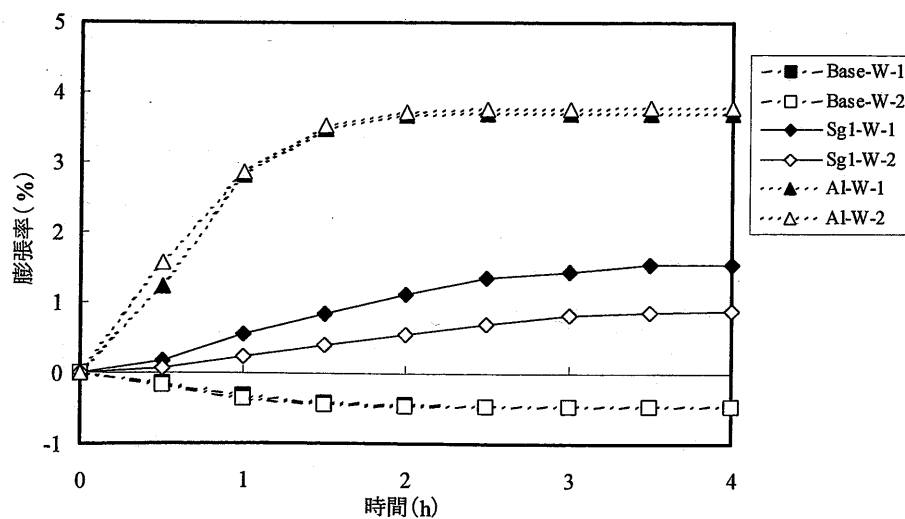


図 3-16 膨張率試験結果

しかし、Sg1を使用した配合において、単位水量の少ないSg1-W-1 (W=165kg/m³)の膨張現象が、単位水量の多いSg1-W-2 (W=185kg/m³)よりも大きく現れる結果となった。

(3) 強度試験および静弾性係数試験結果

図 3-17 に圧縮強度試験結果 (材齢 28 日) を示す。全ての配合において単位水量の増加に伴う圧縮強度の低下が確認され、Sg1, Al の各配合は基準配合と比較して小さな値となった。

図 3-18 に割裂引張強度試験結果 (材齢 28 日) を示す。基準配合では圧縮強度の 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、Sg1, Al の各配合においては圧縮強度の 5~6 分の 1 程度と高い値を示し、溶融スラグやアルミニウム粉末の使用に拘らず、基準配合とほぼ同じ程度の引張強度となった。これは、圧縮強度試験の際には、水素の発生によって生じた供試体上部の空隙が、欠陥として強度の低下を引き起こすものの、割裂引張強度試験の際には供試体を横向きに据えるため、端部の欠陥が引張強度に影響を及ぼさなかったためと考えられる。

図 3-19 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。全ての配合において、圧縮強度の増加に伴い静弾性係数も増加する傾向がみられた。

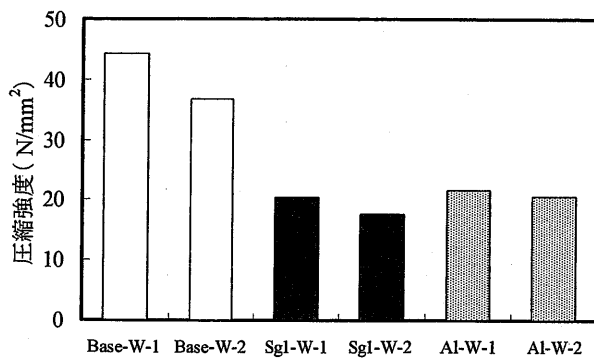


図 3-17 圧縮強度試験結果 (材齢 28 日)

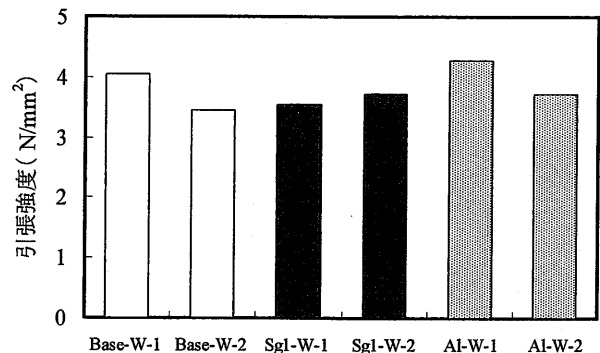


図 3-18 割裂引張強度試験結果 (材齢 28 日)

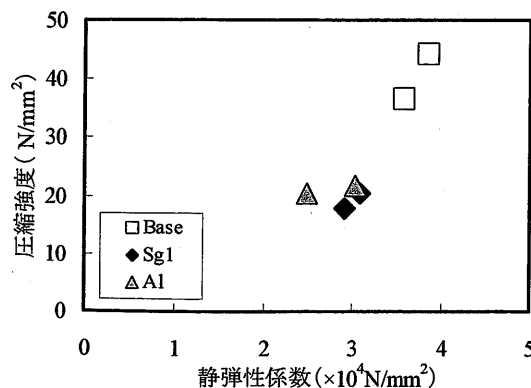


図 3-19 静弾性係数と圧縮強度の関係

3. 6. 3 AE 添加率の影響

(1) 配合およびフレッシュ試験結果

配合およびフレッシュ試験結果を表 3-11 に示す。本実験では、AE 添加率の違いのみによるコンクリートの物性の違いを検討するため、化学混和剤以外の配合量を統一し、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。AE (AE 助剤) 添加率は、各配合につきセメント質量に対して 0, 0.002, 0.004% の 3 水準を設定した。目標空気量は 4.5% とし、目標スランプは 9.5cm とした。水セメント比は 50% とし、SP (高性能 AE 減水剤) 添加率はセメント質量に対して 0.2% で一定とした。なお、比較のため、基準配合 (Base: 溶融スラグ置換率 0%) と、基準配合にアルミニウム粉末を加えた配合 (Al) も設定した。

図 3-20 にスランプと AE 添加率の関係を示す。基準配合, Al の各配合において、AE 添加率の違いに拘らずスランプ値は一定となった。Sg1 を使用した配合においては AE 添加率の増加に伴うスランプの増加が確認されたが、目標スランプである 9.5 ± 2.5 cm の範囲を満たしており、問題はないと考えられる。

図 3-21 に空気量と AE 添加率の関係を示す。全ての配合において、AE 添加率の増加に

表 3-11 コンクリートの配合およびフレッシュ試験結果

配合	W/C (%)	配合量 (kg/m ³)					SP (%)	AE (%)	Al粉末 (%)	Sl (cm)	Air (%)	Br率 (%)	単質 (kg/l)
		W	C	S2	G2	Sg							
Base-AE-1	50	175	350	769	1002	403	C×0.2	0	8.0	1.7	3.76	2.40	
Base-AE-2									7.5	2.2	4.60	2.39	
Base-AE-3									8.6	4.2	3.90	2.33	
Sg1-AE-1				385	1002	403			8.5	1.2	4.86	2.43	
Sg1-AE-2									8.5	3.2	4.17	2.38	
Sg1-AE-3									11.2	4.2	4.24	2.35	
Al-AE-1				769	1002	403			0	6.3	1.5	2.22	2.39
Al-AE-2										6.5	3.3	3.24	2.36
Al-AE-3										6.0	4.0	1.36	2.35

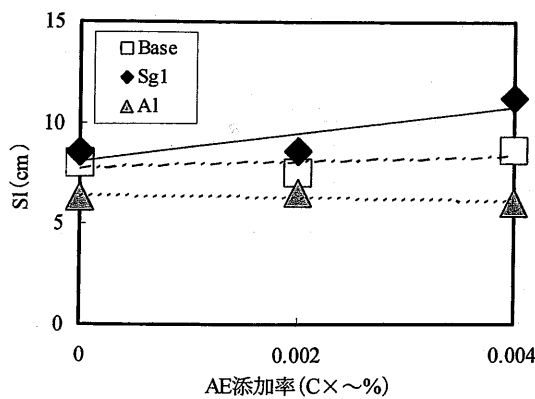


図 3-20 スランプと AE 添加率の関係

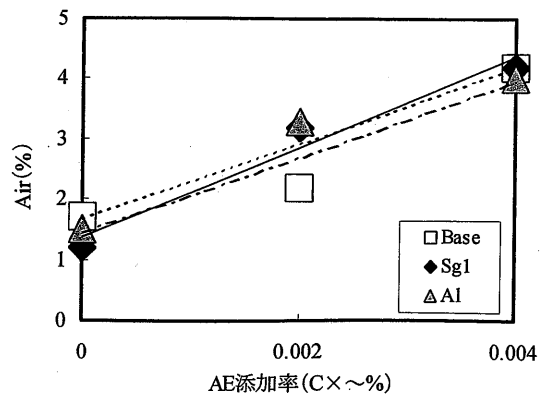


図 3-21 空気量と AE 添加率の関係

に伴い空気量が増加する結果となった。

図 3-22 にブリーディング率と AE 添加率の関係を示す。ブリーディング試験結果より、全ての配合において、AE 添加率の違いに拘らずブリーディング値はほぼ一定となった。

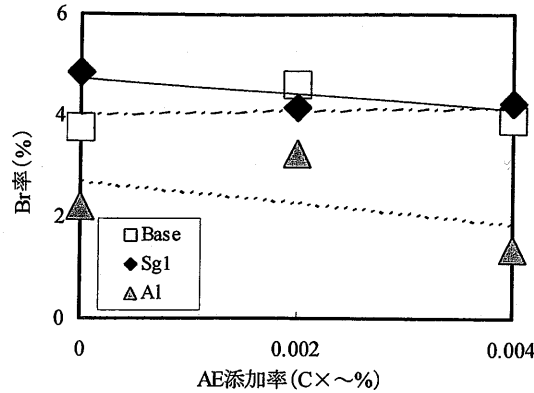


図 3-22 ブリーディング率と AE 添加率の関係

(2) 膨張率試験結果

図 3-23 に膨張率試験結果を示す。全ての配合において、膨張現象は材齢 3 時間後までに終了している。各配合において、AE 添加率の違いに拘らずほぼ同様の膨張率を示したことから、AE 助剤は膨張現象に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

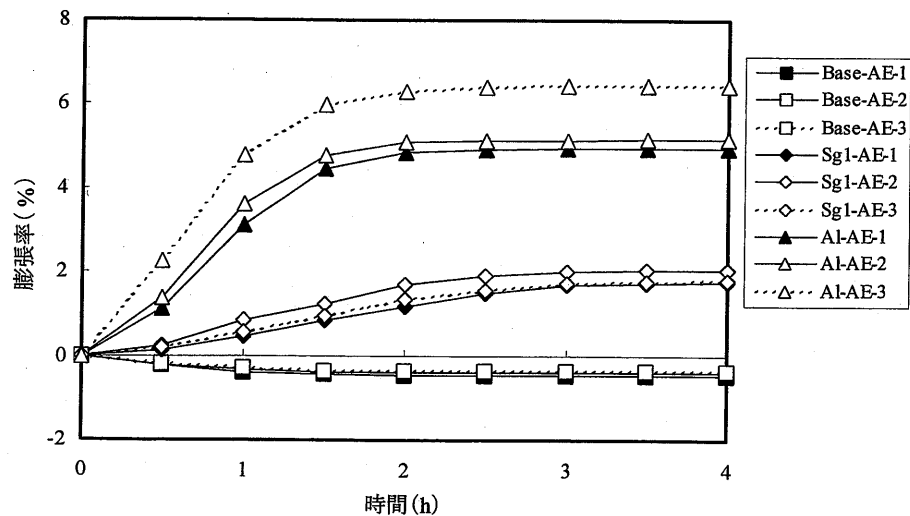


図 3-23 膨張率試験結果

(3) 強度試験および静弾性係数試験結果

図 3-24 に圧縮強度試験結果 (材齢 28 日) を示す。全ての配合で AE 添加率の増加に伴う圧縮強度の低下が確認され、Sg1, Al の各配合は、基準配合と比較して低い値となった。

図 3-25 に割裂引張強度試験結果（材齢 28 日）を示す。基準配合では圧縮強度の 8～10 分の 1 程度であり、圧縮強度の低下に伴い引張強度も低下する結果となったが、Sg1 を使用した配合においては圧縮強度の 3～5 分の 1 程度、アルミニウム粉末を用いた配合においては圧縮強度の 4～6 分の 1 程度と高い値を示し、Sg1、Al の両配合とも基準配合と比較して僅かな強度低下しか確認されなかった。

図 3-26 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。全ての配合において、圧縮強度の増加に伴い静弾性係数も増加する傾向がみられた。

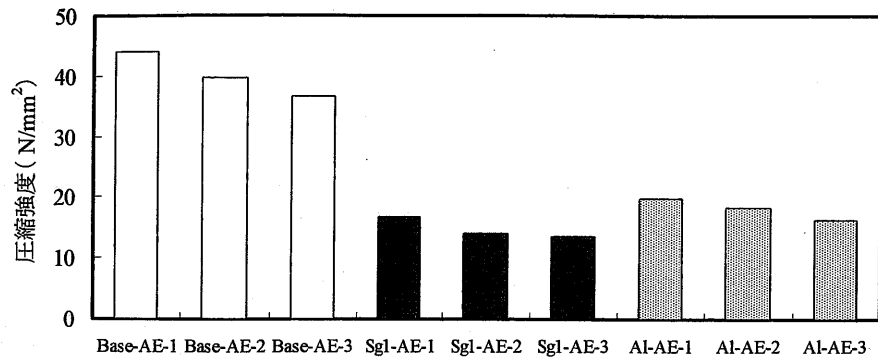


図 3-24 圧縮強度試験結果（材齢 28 日）

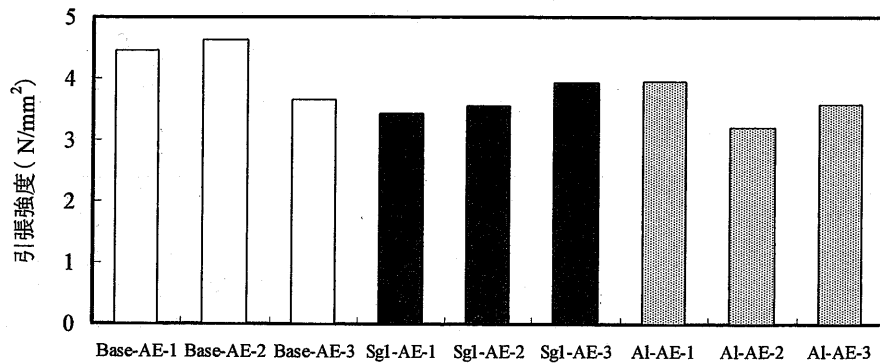


図 3-25 割裂引張強度試験結果（材齢 28 日）

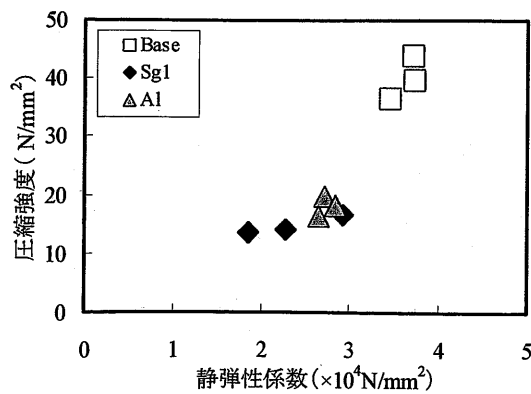


図 3-26 静弾性係数と圧縮強度の関係

3. 6. 4 SP 添加率の影響

(1) 配合およびフレッシュ試験結果

配合およびフレッシュ試験結果を表 3-12 に示す。本実験では、SP 添加率の違いのみによるコンクリートの物性の違いを検討するため、化学混和剤以外の配合量を統一し、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。SP (高性能 AE 減水剤) 添加率は、Sg1 を使用した配合についてはセメント質量に対して 0.1, 0.2, 0.3, 0.4% の 4 水準、アルミニウム粉末を使用した配合についてはセメント質量に対して 0.1, 0.4% の 2 水準を設定した。目標空気量は 4.5%，目標スランプは 9.5cm として配合計算を行い、実験では 7.0cm (SP=C×0.1%) から 12cm (SP=C×0.4%) とした。水セメント比は 50% とし、AE 添加率はセメント質量に対して 0.006% で一定とした。なお、比較のため、熔融スラグ置換率 0% の配合にアルミニウム粉末を加えた配合 (Al) も設定した。

図 3-27 にスランプと SP 添加率の関係を示す。Sg1, Al の両配合とも SP 添加率の増加に伴いスランプが増加する結果となった。

図 3-28 に空気量と SP 添加率の関係を示す。Sg1 を使用した配合においては多少のばらつきが見られるが、SP 添加率に拘らず空気量はほぼ一定であり、目標空気量の範囲内に収まる結果となっている。ばらつきの原因として、熔融スラグの粒形が不均一であることに

表 3-12 コンクリートの配合およびフレッシュ試験結果

配合	W/C (%)	配合量 (kg/m ³)					SP (%)	AE (%)	Al粉末 (%)	Sl (cm)	Air (%)	Br率 (%)	単質 (kg/l)
		W	C	S2	G2	Sg							
Sg1-SP-1	50	175	350	385	1002	403	C×0.006	0	4.0	4.1	4.11	2.33	
Sg1-SP-2									6.8	3.4	4.79	2.34	
Sg1-SP-3									9.5	5.7	2.88	2.29	
Sg1-SP-4									9.0	4.1	3.36	2.34	
Al-SP-1				5.0	3.0	2.07			2.33				
Al-SP-4	9.1	5.4	1.16	2.28									

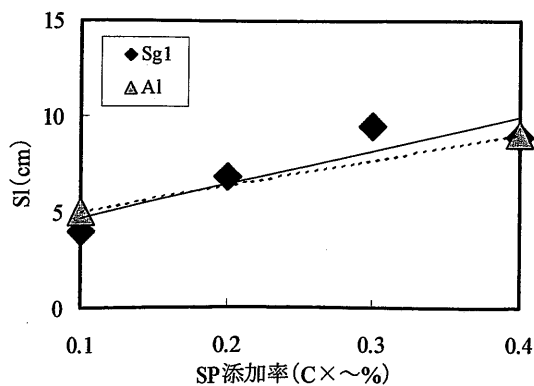


図 3-27 スランプと AE 添加率の関係

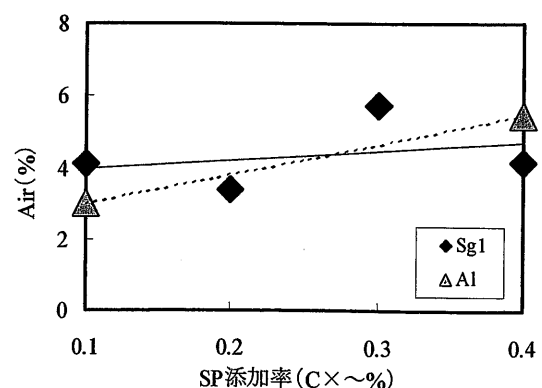


図 3-28 空気量と AE 添加率の関係

よる実績率の差が挙げられる。アルミニウム粉末を使用した配合においては SP 添加率の増加に伴う空気量の増加が確認されたが、これも目標空気量の範囲内に収まる値であり、問題はないと考えられる。

図 3-29 にブリーディング率と SP 添加率の関係を示す。Sg1, Al の両配合とも SP 添加率の増加に伴いブリーディング率が減少し、高性能 AE 減水剤の特性を反映した結果となっている。

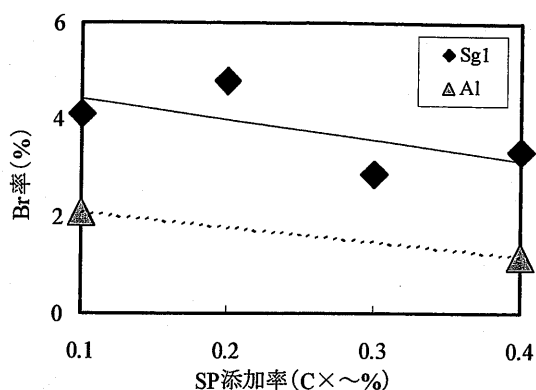


図 3-29 ブリーディング率と AE 添加率の関係

(2) 膨張率試験結果

図 3-30 に膨張率試験結果を示す。全ての配合において、膨張現象は材齢 4 時間後までに終了している。各配合において、SP 添加率の違いに拘らずほぼ同様の膨張率を示したことから、高性能 AE 減水剤は膨張現象に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

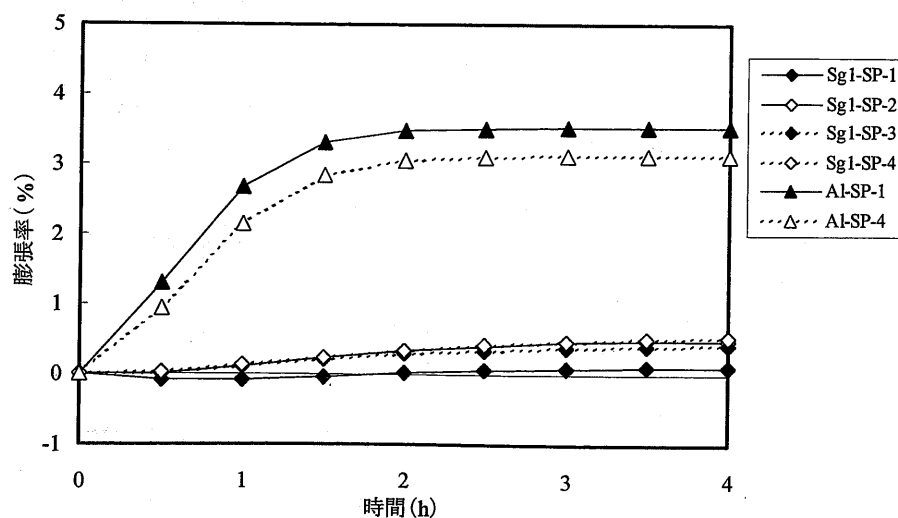


図 3-30 膨張率試験結果

(3) 強度試験および静弾性係数試験結果

図 3-31 に圧縮強度試験結果（材齢 28 日）を示す。Sg1, Al の各配合とも SP 添加率の違いに拘らずほぼ一定の値となっている。

図 3-32 に割裂引張強度試験結果（材齢 28 日）を示す。Sg1, Al の各配合とも SP 添加率の違いに拘らずほぼ一定の値となっている。

図 3-33 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。アルミニウム粉末を用いた配合において、圧縮強度の増加に伴い静弾性係数も増加する傾向がみられたが、Sg1 を使用した配合においては圧縮強度に拘らずほぼ一定の静弾性係数値を示した。

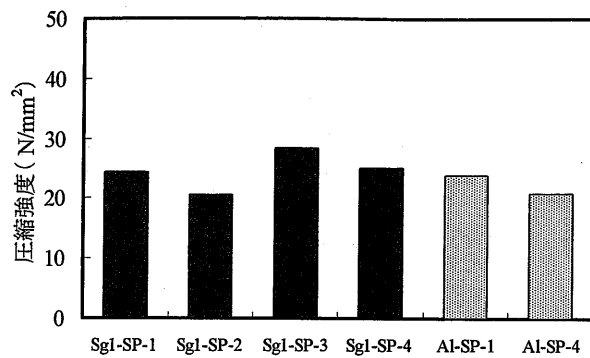


図 3-31 圧縮強度試験結果
（材齢 28 日）

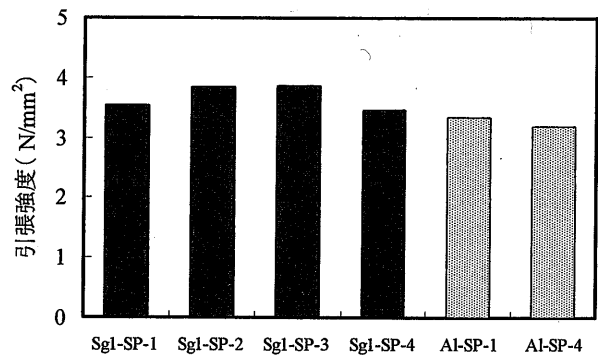


図 3-32 割裂引張強度試験結果
（材齢 28 日）

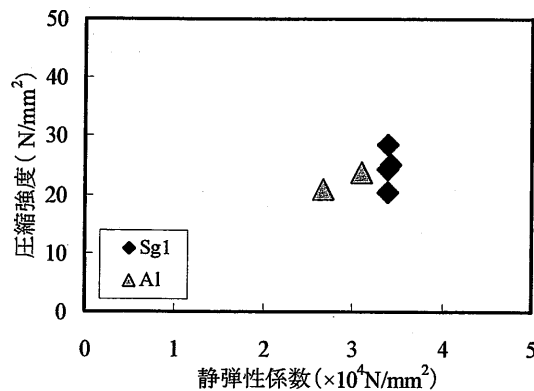


図 3-33 静弾性係数と圧縮強度の関係

3. 6. 5 膨張現象と強度特性

3. 6. 2 から 3. 6. 4 の実験結果に基づき、膨張現象と強度特性について考察を行った。また、3. 5 の実験データを比較対象として用いた。

(1) 膨張率と圧縮強度の関係

図 3-34 に膨張率と圧縮強度の関係を示す。図中の膨張率は、膨張率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基準配合においては、有意な関係はみられなかったが、Sg1, Al の各配合において、膨張率の増加に伴い圧縮強度も低下する傾向を示した。同様の熔融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、熔融スラグ (Sg1) を使用した配合の強度低下は、膨張に起因するものであることが明らかとなった。

図 3-35 に、図 3-34 と図 3-12 における Sg1 を使用した配合の膨張率と圧縮強度の関係を示す。図中に示した式は、実験結果を近似し、圧縮強度 (f) を膨張率 (Ex.) で表したものである。図中に示した 2 式を比較すると、切片は同程度の値を、傾きは 5 分の 1 程度の値を示した。これは、3.5 での強度低下が膨張率の増加と置換率の増加という二つの要

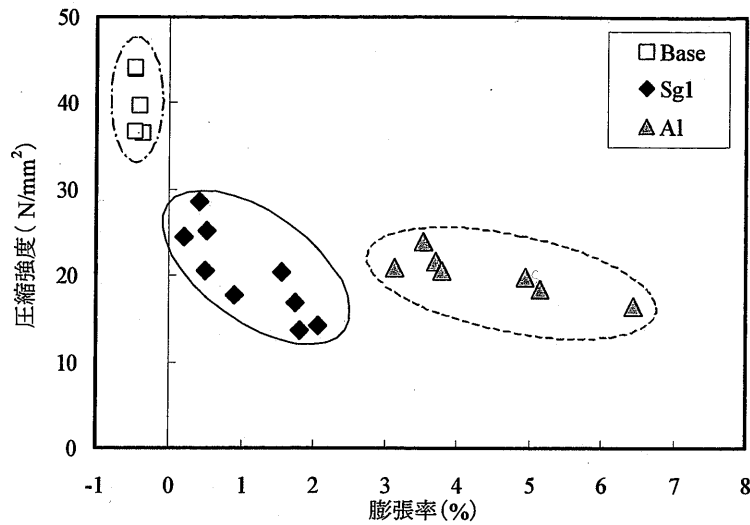


図 3-34 膨張率と圧縮強度の関係

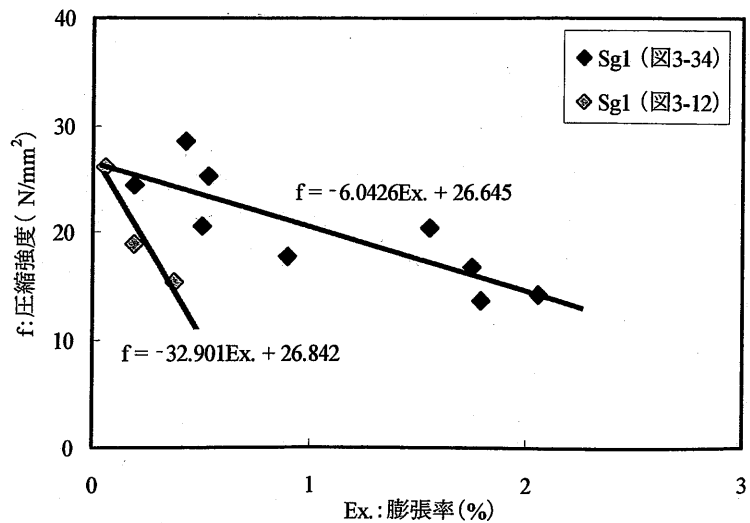


図 3-35 膨張率と圧縮強度の関係 (Sg1)

素に起因したものであるのに対し、本章での強度低下は膨張率の増加の影響のみを反映したものであるためと考えられる。

以上のことから、溶融スラグを使用したコンクリートの圧縮強度は、「溶融スラグ置換率（溶融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。また、本研究における圧縮強度の低下において、溶融スラグ置換率の増加は膨張率の増加の影響よりも大きいものであることが明らかとなった。

(3) 引張強度と圧縮強度の関係

図 3-36 に引張強度と圧縮強度の関係を示す。基準配合では、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、Sg1 および Al の各配合では、圧縮強度に拘らずほぼ一定の引張強度を示した。これは、圧縮強度試験の際には、供試体上部の空隙が欠陥としてキャッピング等の不具合に直接影響を及ぼし、圧縮強度が低下したためであると考えられる。これに対し、割裂引張強度試験の際には供試体を横向きに据えるため、端部の欠陥の影響を受けにくいことが原因の一つであると考えられる。

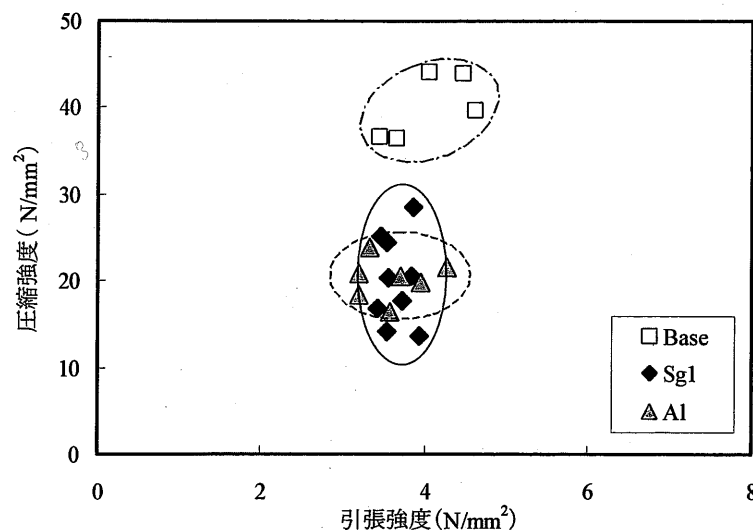


図 3-36 引張強度と圧縮強度の関係

(4) 静弾性係数と圧縮強度の関係

図 3-37 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。全ての配合において、圧縮強度の増加に伴う静弾性係数の増加が確認されたことから、静弾性係数と圧縮強度の関係において、溶融スラグを使用したコンクリートも普通コンクリート同様の傾向があるといえる。

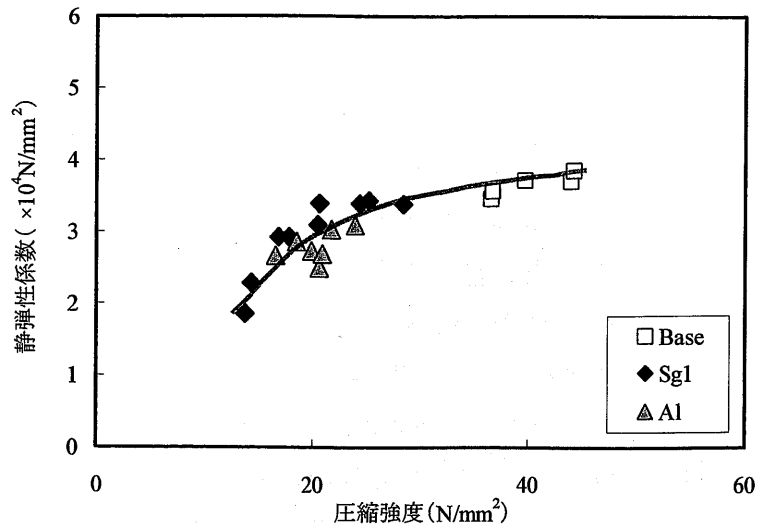


図 3-37 静弾性係数と圧縮強度の関係

3. 7 使用した熔融スラグの適用性

本章で使用した熔融スラグ (Sg2, Sg3) は、圧縮強度の低下が確認されたものの、用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより、コンクリートへの使用が可能であると考えられる。但し、Sg1 に関しては、膨張現象が確認され、「熔融スラグ置換率」の影響に加え、「膨張率」の増加による強度の低下が懸念されることから、コンクリートへの使用に適さないと考えられる。

また、同様の熔融炉から排出された熔融スラグでも品質にバラツキがあり、その膨張現象に差がみられることがあるため、使用時には膨張率試験ならびに圧縮強度試験に基づき、置換率を検討する必要がある。

膨張現象が確認される場合 (例えば Sg1) は、圧縮強度試験とともに割裂引張強度試験を行い、圧縮強度の低下に拘らず引張強度が一定である場合は膨張による空隙が供試体の整形に悪影響を及ぼしている可能性が高いため、コンクリート打ち込み面上部の適切な処理が必要であると考えられる。

3. 8 TR との整合性^[2]

平成 14 年 7 月、「JIS 化のための標準情報 TR A 0016 (以下 TR と記す)」が JISK (日本工業標準調査会) より公表され、現在、熔融スラグをコンクリート用細骨材として使用する際の判断の指標となっている。TR では、熔融スラグの種類、区分および呼び方、品質等を規定しており、耐久性を確保するため、コンクリートの水セメント比は 55%以下とし

ている。また、溶融飛灰を原料としたものは対象に含めていない。付属書としてモルタルの膨張率試験方法が規定され、試験によるモルタルの膨張率は、2.0%以下を適用範囲としている。

本章で提案したコンクリートの膨張率試験方法は、TRでの試験値と比較し、膨張率が小さく現れる（粗骨材による拘束とブリーディング水を加算しないためと考えられる）ものの、溶融スラグを使用しない基準配合との比較により、十分に膨張現象の有無が確認でき、コンクリートでの簡易的な試験方法として有効であるといえる。

TRの適用範囲から推測すると、本章で使用した溶融スラグは、Sg2およびSg3については、粒度調整を行い、水セメント比55%以下とした場合であれば、設計基準強度 24N/mm^2 以下のプレキャスト無筋コンクリート製品等に使用可能であると考えられる。しかし、Sg1に関しては、コンクリートの膨張率が2.0%以上のものもみられ、適用範囲外であると推察される。

3. 9 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率試験方法の提案を行い、この試験方法による膨張現象の把握が可能であることが明らかとなった。
- (2) 溶融スラグを使用したコンクリートの圧縮強度は、「溶融スラグ置換率」と「膨張率」の2つの要因によって決定され、溶融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確認されることが明らかとなった。
- (3) 膨張現象が確認される溶融スラグに対しては、膨張による空隙が供試体の整形に悪影響を及ぼしている可能性が高いため、コンクリート打ち込み面上部の適切な処理が必要であると考えられる。
- (4) 本章で使用した溶融スラグは、膨張現象の確認されるSg1を除き、膨張率試験ならびに圧縮強度試験に基づいて置換率を検討し、用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより、使用可能であると考えられる。また、TRの適用範囲から推測すると、Sg2、Sg3については粒度や配合の調整により細骨材として適用可能であると考えられるが、Sg1については適用範囲外であると考えられる。

参考文献

- [1] 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 卷，第 6 号，pp.725~732，1997
- [2] 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（コンクリート用溶融スラグ細骨材）」，2002.7.20
- [3] 鈴木憲司，堀口真由美：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
- [4] 白子定治，曾山照明，花嶋正孝，田中勝：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
- [5] 斉藤丈士：都市ごみ溶融スラグの有効利用に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2000

第4章 溶融スラグを使用したコンクリートの物性

4.1 概要

本章では、愛知県内の異なる溶融施設から排出された7種類の溶融スラグを対象に、水セメント比、置換率を変化させ、膨張率試験を含めたコンクリートの物性試験を行った。また、7種類のうち、膨張現象の確認された1種を除く6種類の溶融スラグについては、混合して用いた配合に対してフレッシュおよび硬化後の物性試験を行った。更に、溶融スラグを事前に絶乾状態および湿潤状態とし、保管状態の影響についても実験を基に検討を行った。

4.2 使用材料

本章では、表4-1に示す材料を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は瀬戸産砕石を、細骨材は豊田産山砂を使用した。化学混和剤には高性能AE減水剤およびAE助剤を使用した。

溶融スラグは、愛知県内の溶融施設から排出された溶融方式の異なる7種類を使用した。写真4-1～4-7に、使用した溶融スラグSgA～SgGを示す。各溶融スラグの特徴として、SgAは黒色で、酸化した金属の塊のようなものを含んでおり、SgBは黒色で、粒径は比較的均一である。SgCは灰色がかった黒色をしており、粒径は細かい。SgDは黒色で、SgB等と比べると粒径が若干大きい。SgEは緑色をしており、粒径が大きく、明らかなガラス質である。SgFは全体的に黒色で、細粒分は白く、粒径は細かく均一である。SgGは、SgFと似ているものの、細粒分がやや黄色であった。SgHは茶色がかった色をしており、粒径がやや大きかった。

表4-2に、各溶融スラグの物性を示す。SgAの吸水率と微粒分量が、他の溶融スラグと比べて非常に高いことが特徴といえる。一部の溶融スラグはTRの適用範囲^[1]を外れているが、今

表4-1 使用材料

使用材料	種類	記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3340cm ² /g
細骨材	山砂（豊田産）	S	表乾密度：2.57g/cm ³ ，絶乾密度：2.53g/cm ³ ，吸水率：1.55%，粗粒率：2.67 実積率：61.3%，単位容積質量：1.63kg/l，微粒分量：1.40%
粗骨材	砕石（瀬戸産）	G	表乾密度：2.73g/cm ³ ，絶乾密度：2.72g/cm ³ ，吸水率：0.38%，粗粒率：6.65 実積率：59.5%，単位容積質量：1.62kg/l，微粒分量：1.28%，硬質砂岩：2005
化学 混和剤	高性能AE減水剤	SP	主成分：ポリカルボン酸系
	AE助剤	AE	主成分：樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤

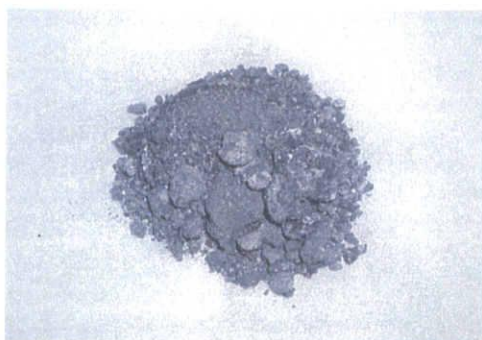


写真 4-1 SgA

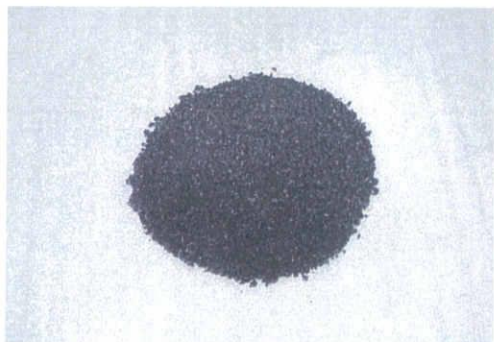


写真 4-2 SgB



写真 4-3 SgC



写真 4-4 SgD

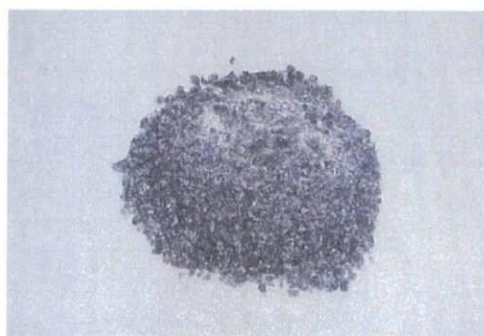


写真 4-5 SgE



写真 4-6 SgF



写真 4-7 SgG

回の実験では搬入時の状態での有効利用を想定し、粒度調整等の事前処理は行わなかった。

図4-1に各溶融スラグの粒度分布曲線を示す。SgEは、5mm以上のものが40%あり、粒径の大きいものが多い。SgC、SgF、SgGには、磨砕処理が施されているため、細かいものの占め

表 4-2 使用した熔融スラグ

使用材料	熔融方式区分	炉の型式	記号	物性
熔融スラグ	直接熔融炉	内部熔融方式	SgA	密度：2.16g/cm ³ ，吸水率：7.88%，粗粒率：3.87，実積率：49.2% 粒径（5mm以下 92%，5mm以上 8%）
	灰熔融炉	コークスベッド式	SgB	密度：2.68g/cm ³ ，吸水率：0.63%，粗粒率：3.76，実積率：59.0% 粒径（5mm以下 99%，5mm以上 1%）
	直接熔融炉	コークスベッド式	SgC	密度：2.68g/cm ³ ，吸水率：0.63%，粗粒率：3.76，実積率：59.0% 粒径（5mm以下 99%，5mm以上 1%）
	灰熔融炉	プラズマ式熔融炉	SgD	密度：2.83g/cm ³ ，吸水率：0.94%，粗粒率：3.16，実積率：60.0% 粒径（5mm以下 98%，5mm以上 2%）
	灰熔融炉	電気抵抗式熔融炉	SgE	密度：2.70g/cm ³ ，吸水率：0.52%，粗粒率：5.16，実積率：60.5% 粒径（5mm以下 60%，5mm以上 40%）
	灰熔融炉	交流電気抵抗式灰熔融炉	SgF	密度：2.78g/cm ³ ，吸水率：0.34%，粗粒率：2.54，実積率：63.9% 粒径（5mm以下 100%，5mm以上 0%）
	熱分解ガス化熔融炉	熱分解高温燃焼熔融炉	SgG	密度：2.83g/cm ³ ，吸水率：0.23%，粗粒率：2.30，実積率：61.7% 粒径（5mm以下 100%，5mm以上 0%）

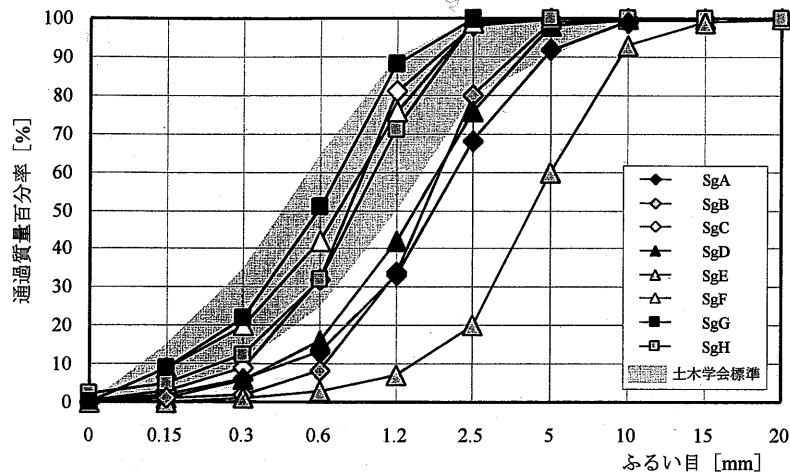


図 4-1 熔融スラグの粒度分布曲線

る割合が多い。SgA，SgB，SgD，SgHは5mm以内の粒径のものがほとんどであるが，SgC，SgF，SgGと比べると粒径が大きいものが多い。なお，重金属についてはいずれの熔融スラグも環境庁告示46号の溶出基準（表2-5を参照）を満たしている。

4. 3 熔融スラグを使用したコンクリートの物性試験

4. 3. 1 実験概要

(1) 実験配合

異なる7種類の熔融スラグを対象に，水セメント比，置換率を変化させ，膨張率試験を含めた物性試験を行った。

試験に用いたコンクリートの配合を表 4-3 に示す。今回の実験では，有効利用の観点か

ら、実現され得る配合として置換率を 20%以下と設定した。水セメント比は 40%と 55%の 2 水準、溶融スラグ置換率は 10%と 20%の 2 水準設定した。骨材との置換量は、各溶融スラグを 5mm を境に 2 種類に分けて考え、それぞれを粗骨材と細骨材とに置換することとし、総量が骨材容積に対して 10%、20%となるように配合を算定した。単位水量 170kg/m³一定の下、水セメント比 2 水準、溶融スラグ置換率 2 水準の計 4 シリーズで比較実験を行い、その際の化学混和剤の使用量は、その都度基準配合 (Base : 溶融スラグ置換率 0%) での適正值とした。基準配合の目標スランプは 12±2.5cm、目標空気量は 4.5±1.5%に設定し、溶融スラグを使用した配合においては、許容範囲を外れても調整は行わなかった。また、表および図中では、SgA を使用した配合を A、SgB を使用した配合を B と表記した。練混ぜは、3. 3 の手順に従って行った。但し、本章では練混ぜ量を 0.04m³とした。

表 4-3 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	置換率 (%)	配合量 (kg/m ³)					SP (%)	AE (%)
			W	C	S	G	Sg		
Base-40	40	0	170	438	689	1018	0	C×0.4	C×0.0040
A-40-10		10			537	1004	138		
B-40-10					526	1017	172		
C-40-10					524	1018	182		
D-40-10					527	1015	181		
E-40-10					590	948	173		
F-40-10					524	1018	178		
G-40-10					524	1018	181		
Base-40					40	0	170		
A-40-20	20	386	990	277					
B-40-20		363	1015	344					
C-40-20		359	1018	364					
D-40-20		366	1011	363					
E-40-20		491	878	346					
F-40-20		359	1018	356					
G-40-20		359	1018	363					
Base-55		55	0	170		309		791	1035
A-55-10	10		629		1020		148		
B-55-10			616		1033		184		
C-55-10			614		1035		195		
D-55-10			618		1031		194		
E-55-10			685		960		185		
F-55-10			614		1035		191		
G-55-10			614		1035		194		
Base-55			55		0		170	309	791
A-55-20	20	466		1005	297				
B-55-20		441		1031	368				
C-55-20		438		1035	390				
D-55-20		445		1027	389				
E-55-20		579		885	371				
F-55-20		438		1035	382				
G-55-20		438		1035	389				

(2) 試験項目

スランプ試験, 空気量試験, 単位容積質量試験, ブリーディング試験, 膨張率試験 (3. 4. 1) の各項目に加え, 硬化後の物性として, 圧縮強度試験および静弾性係数試験, 割裂引張強度試験の各項目を実施した。

4. 3. 2 結果および考察

(1) フレッシュ試験結果

表 4-4 にフレッシュ試験結果, 図 4-2~4-5 にスランプおよび空気量試験結果を示す。配

表 4-4 フレッシュ試験結果

配合	Sl (cm)	Air (%)	Br率 (%)	膨張率 (%)	単位体積質量 (kg/l)
Base-40	12.5	5.0	1.2	-0.42	2.29
A-40-10	3.0	0.7	0.4	0.08	2.37
B-40-10	11.5	4.3	1.1	-0.18	2.32
C-40-10	12.2	4.4	1.0	-0.18	2.32
D-40-10	14.5	5.6	1.4	-0.18	2.27
E-40-10	13.7	6.0	1.1	-0.20	2.28
F-40-10	13.1	5.0	1.0	-0.20	2.30
G-40-10	11.3	4.9	1.0	-0.16	2.31
Base-40	13.5	5.3	1.2	-0.23	2.28
A-40-20	2.6	0.4	1.1	0.49	2.36
B-40-20	11.0	3.8	0.7	-0.15	2.33
C-40-20	15.0	5.2	1.1	-0.14	2.30
D-40-20	17.5	5.3	0.9	-0.10	2.30
E-40-20	16.5	4.8	1.1	-0.09	2.30
F-40-20	17.7	5.6	1.2	-0.15	2.30
G-40-20	15.0	5.3	1.1	-0.14	2.30
Base-55	13.5	4.7	3.4	-0.17	2.27
A-55-10	6.0	0.5	2.1	0.07	2.36
B-55-10	14.1	4.3	3.2	-0.26	2.29
C-55-10	16.0	5.8	3.6	-0.26	2.25
D-55-10	18.3	5.1	4.5	-0.18	2.27
E-55-10	18.3	4.9	5.1	-0.22	2.27
F-55-10	12.5	5.1	3.5	-0.25	2.27
G-55-10	14.5	5.2	3.1	-0.22	2.27
Base-55	12.0	5.3	2.8	-0.22	2.25
A-55-20	3.5	0.8	1.2	0.32	2.33
B-55-20	16.5	5.4	3.9	-0.26	2.27
C-55-20	10.7	4.8	6.7	-0.26	2.29
D-55-20	18.6	5.9	5.3	-0.17	2.26
E-55-20	14.0	6.0	3.8	-0.19	2.25
F-55-20	16.0	6.4	3.3	-0.18	2.25
G-55-20	12.7	6.6	3.5	-0.25	2.26

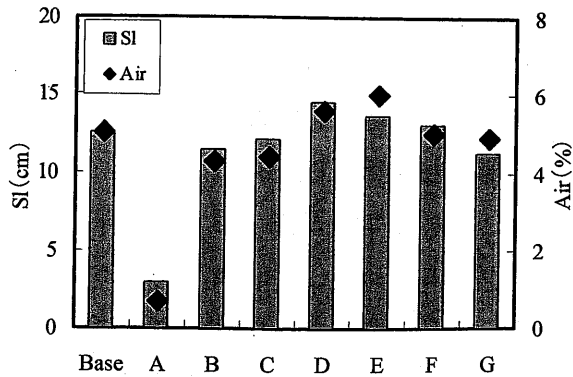


図 4-2 スランプおよび空気量試験結果 (W/C=40% , 置換率 10%)

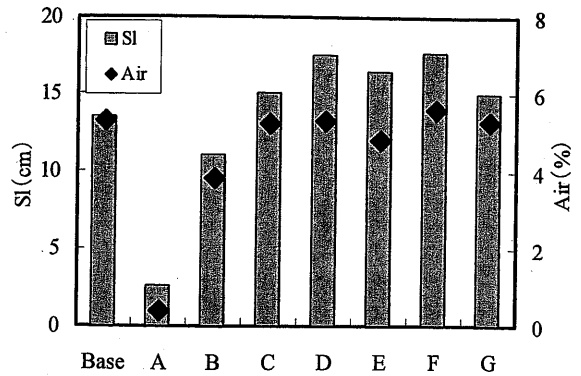


図 4-3 スランプおよび空気量試験結果 (W/C=40% , 置換率 20%)

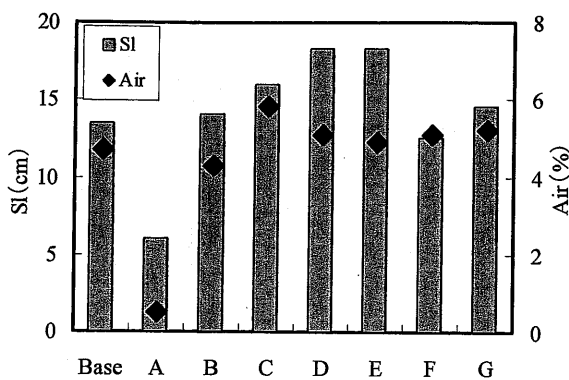


図 4-4 スランプおよび空気量試験結果 (W/C=55% , 置換率 10%)

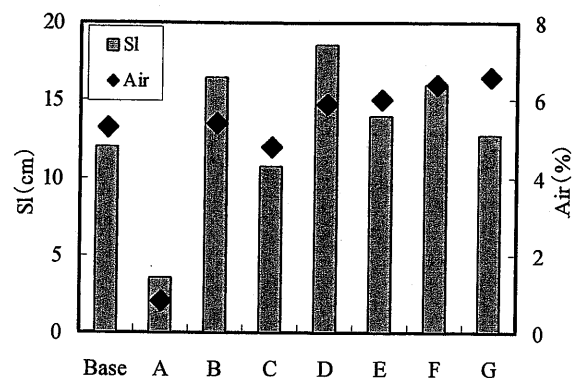


図 4-5 スランプおよび空気量試験結果 (W/C=55% , 置換率 20%)

合 A は他の溶融スラグを使用した配合に比べ、水セメント比および溶融スラグ置換率に拘らずスランプ、空気量共に著しく低い値となった。これは SgA の吸水率が他の溶融スラグと比較して高いためと考えられる。また、W/C=40%のシリーズでは、A 以外の配合において、置換率の増加に伴うスランプの増加が確認された。これは、各溶融スラグの練混ぜ水の吸着能力の差によるものと推測される。

ブリーディング試験において、配合 A のブリーディング率は、水セメント比 40%、溶融スラグ置換率 20%のシリーズを除き、他と比べて低い値を示した。これは SgA の吸水率が他の溶融スラグに比べ高いためと考えられる。また、SgA を除くいずれの溶融スラグを使用した場合も、水セメント比 40%の下では基準配合とほぼ同じブリーディング率を示し、置換率の影響はみられなかった。水セメント比 55%の下では置換率の増加に伴い現象に差がみられたが、データ数が少なく、各シリーズでの有意な傾向は確認できなかった。

今回、同一の配合において、溶融スラグの種類によりスランプや空気量に差はみられたが、SgA を除き、化学混和剤により制御可能であると判断される。

(2) 膨張率試験結果

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、水セメント比、溶融スラグ置換率に関係なく、配合 A のみ膨張し、他の配合はバラツキがあるものの、0.1~0.4%程度収縮した。図 4-6, 4-7 にフレッシュコンクリートの膨張率試験結果（基準配合、配合 A のみ）を示す。配合 A については、水セメント比一定の下で、溶融スラグ置換率の増加に伴い膨張率が大きく増加する傾向がみられた。このことから、今回使用した SgA には、金属アルミニウムが多く含まれていると考えられる。また、置換率 10% の場合、水セメント比の増加に伴う膨張率の変化は殆ど確認されなかったのに対し、置換率 20% の場合は、水セメント比の増加（単位セメント量の減少）に伴う膨張率の低下が確認された。これは、単位セメント量と溶融スラグ使用量の組合せによる金属アルミニウムとアルカリとの反応量が影響したと考えられる。

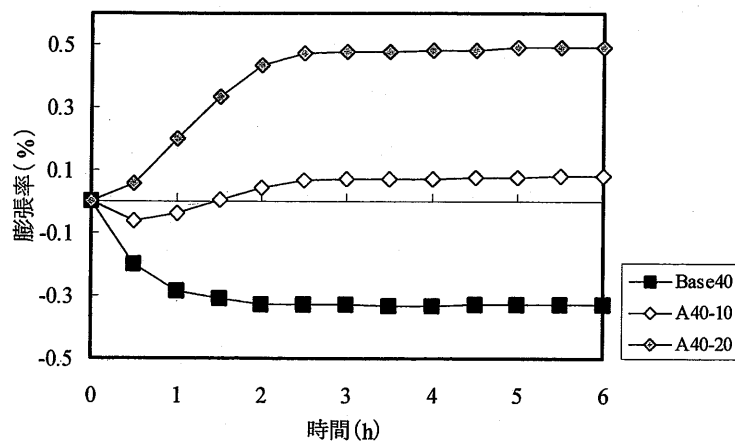


図 4-6 膨張率試験結果 (W/C=40%)

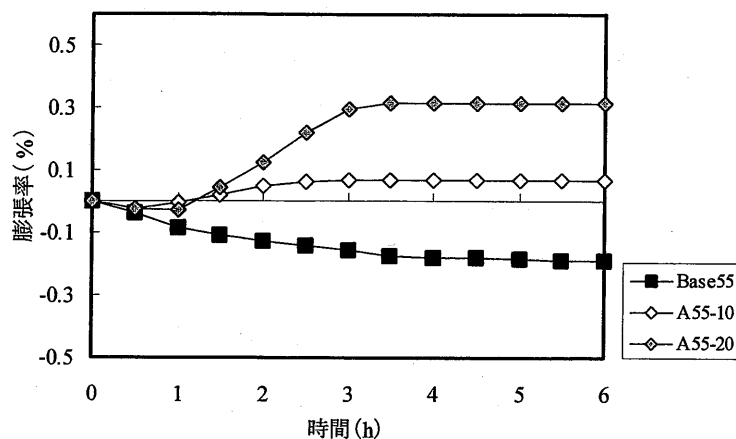


図 4-7 膨張率試験結果 (W/C=55%)

(3) 圧縮強度試験・静弾性係数試験および割裂引張強度試験結果

表 4-5 に材齢 28 日での圧縮強度試験，静弾性係数試験，割裂引張強度試験結果を，図

4-8 に圧縮強度および静弾性係数試験結果を示す。圧縮強度については、熔融スラグ置換率 10% の場合は基準配合とほぼ同程度であり、置換率 20% の場合は、基準配合と比較して 20% 程度低い値を示すものもみられた。配合 A については、W/C の低下と置換率の増加に伴い強度低下が顕著になり、基準配合と比較して半分以下の場合もみられた。このことか

表 4-5 強度試験結果

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
Base-40	44.5	3.83	3.2
A-40-10	30.8	3.37	3.6
B-40-10	46.0	3.87	3.4
C-40-10	45.3	3.77	3.8
D-40-10	43.3	3.70	3.5
E-40-10	42.8	3.60	3.7
F-40-10	43.6	3.47	4.1
G-40-10	44.4	3.70	4.0
Base-40	45.9	3.87	3.5
A-40-20	21.7	2.85	3.3
B-40-20	46.6	3.80	3.8
C-40-20	46.2	4.07	4.1
D-40-20	43.1	3.23	3.4
E-40-20	42.7	3.43	3.5
F-40-20	42.5	3.77	3.7
G-40-20	45.8	3.90	3.9
Base-55	36.6	3.33	3.4
A-55-10	32.4	2.97	3.1
B-55-10	37.3	3.67	2.9
C-55-10	34.9	3.33	3.2
D-55-10	35.0	3.63	3.2
E-55-10	32.1	3.83	3.0
F-55-10	34.2	3.30	3.0
G-55-10	36.3	3.33	3.2
Base-55	35.9	3.03	3.2
A-55-20	19.6	2.92	2.6
B-55-20	32.7	3.20	3.0
C-55-20	34.1	3.20	3.4
D-55-20	29.1	3.10	3.2
E-55-20	28.2	2.87	3.0
F-55-20	29.4	2.70	2.8
G-55-20	31.9	3.47	2.9

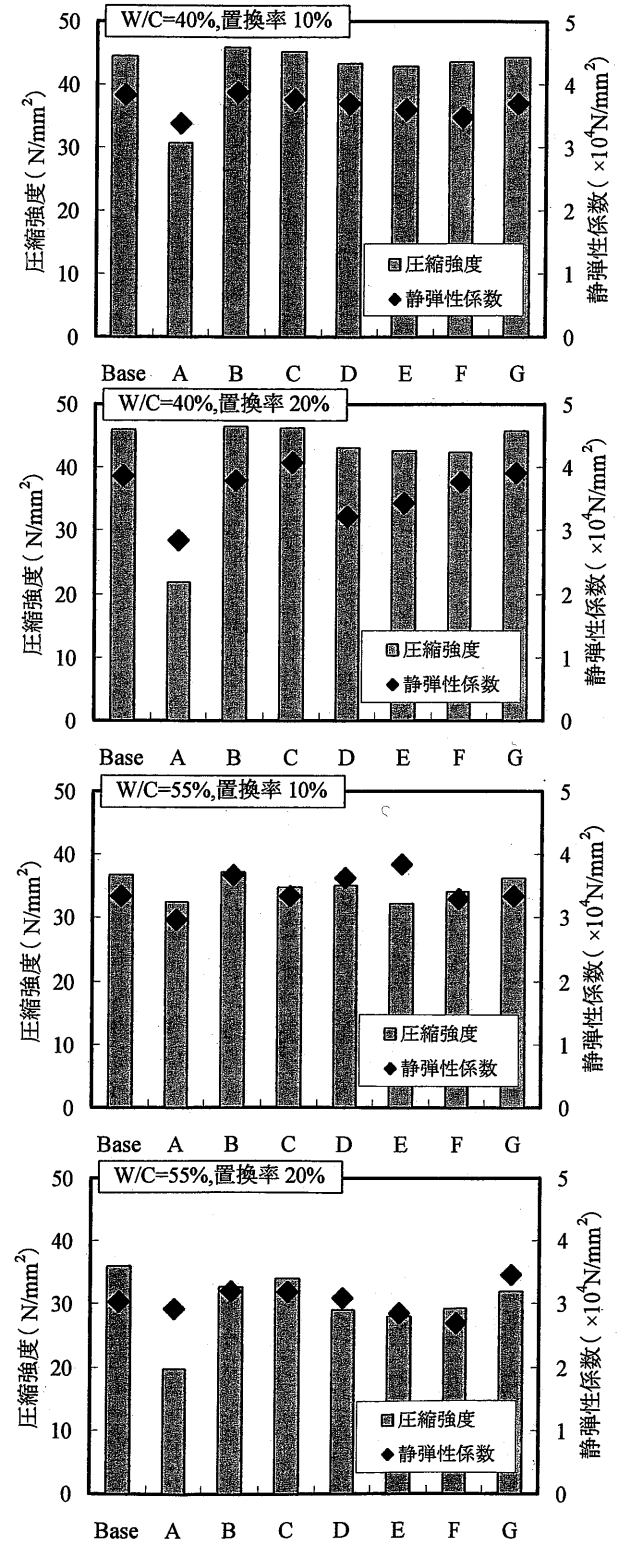


図 4-8 圧縮強度および静弾性係数試験結果

ら、SgA を除き、20%までの置換であれば強度への影響は問題ない程度であると判断される。弾性係数は、配合 A を除き、通常のコンクリートとほぼ同じ傾向を示した。

図 4-9、4-10 に引張強度比を示す。基準配合を含め、全ての配合でほぼ同程度の強度を示し、圧縮強度の低下がみられる配合 (A) においても顕著な強度低下は確認されなかった。

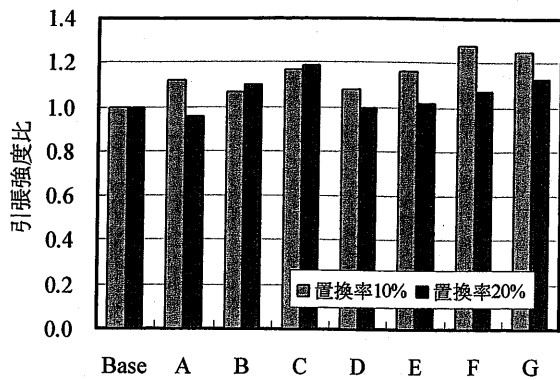


図 4-9 引張強度比 (W/C=40%)

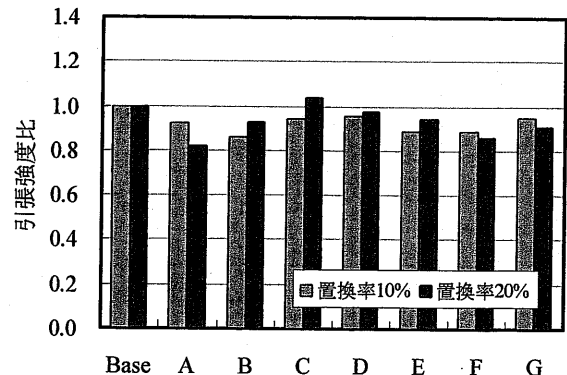


図 4-10 引張強度比 (W/C=55%)

4. 4 溶融スラグを混合使用したコンクリートの物性試験

4. 4. 1 実験概要

(1) 実験配合

4. 3 で膨張現象の確認された SgA を除いた 6 種類の溶融スラグを使用し、混合使用について検討を行った。数種類の溶融スラグを、磨砕処理を施した溶融スラグ同士、溶融施設の近い溶融スラグ同士に分け、混合して用いた配合に対して実験するとともに、溶融スラグを事前に絶乾状態および湿潤状態とし、保管状態の違いによる影響についても同様に検討を行った。

試験に用いたコンクリートの配合を表 4-6 に示す。保管状態の違いに関しては、溶融方式が同じで 5mm 以下の粒径が多く、吸水率の異なる SgD (以下 D) と SgF (以下 F) を対象とした。混合使用の対象とした溶融スラグは、膨張現象の確認されなかった B, C, D, E, F, G とし、混合する溶融スラグの組合せに際しては、実現され得る配合として、磨砕処理を施した溶融スラグ同士 (C+F+G)、ごみ焼却施設の近い溶融スラグ同士 (B+D, D+F, E+F) を設定した。また、比較のため、基準配合 (Base: 溶融スラグ置換率 0%) も設定した。水セメント比と置換率は、溶融スラグの影響が最も大きいと考えられる水セメント比 40%、置換率 20%とした。化学混和剤の使用量は基準配合での適正值とし、基準配合の目標スランプは $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ に設定した。溶融スラグを使用した配合

表 4-6 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	置換率 (%)	配合量 (kg/m ³)					SP (%)	AE (%)
			W	C	S	G	Sg		
Base	40	20	170	438	689	1018	0	C×0.4	C×0.0040
D(乾)					366	1011	363		
D(湿)					366		363		
F(乾)					359	1018	356		
F(湿)					359		356		
C+F+G					359	1018	C:121		
							F:119		
							G:121		
B+D					364	1013	B:172		
							D:181		
D+F					363	1015	D:172		
							F:178		
E+F	425	948	E:170						
			F:178						

においては、許容範囲を外れても調整は行わなかった。

練混ぜは、3.3の手順に従って行った。但し、本章では練混ぜ量を0.04m³とした。

(2) 試験項目

フレッシュ試験については、スランプ試験、空気量試験、単位容積質量試験、ブリーディング試験、膨張率試験を、硬化後については圧縮強度試験、静弾性係数試験の各項目を行った。

4.4.2 結果および考察

(1) フレッシュ試験結果

表 4-7 にフレッシュ試験結果、図 4-11 にスランプおよび空気量試験結果を示す。

基準配合と比較して、溶融スラグを使用した配合はいずれもスランプ、空気量ともに高

表 4-7 フレッシュ試験結果

配合	SI (cm)	Air (%)	Br率 (%)	膨張率 (%)	単位体積質量 (kg/l)
Base	13.0	4.7	0.54	-0.22	2.29
D(乾)	20.3	7.3	0.94	-0.11	2.26
D(湿)	20.7	6.5	1.35	-0.11	2.30
F(乾)	19.0	6.0	0.76	-0.15	2.29
F(湿)	20.7	6.4	1.16	-0.17	2.28
C+F+G	18.5	5.9	1.07	-0.19	2.28
B+D	20.3	6.8	1.28	-0.15	2.28
D+F	20.5	6.8	1.06	-0.16	2.26
E+F	20.2	6.5	1.62	-0.19	2.27

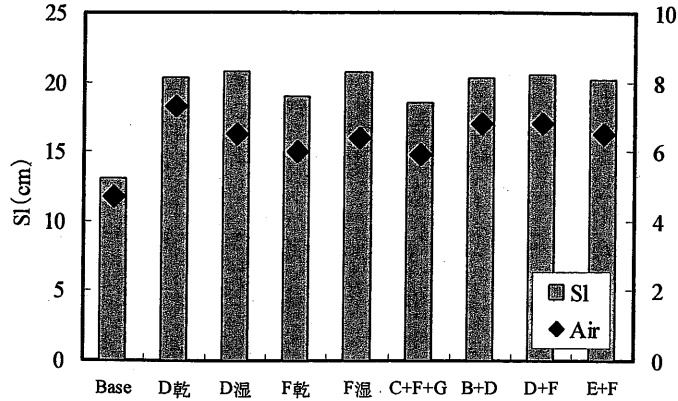


図 4-11 スランプおよび空気量試験結果

い値となった。保管状態および混合使用によるスランプ、空気量への影響は殆どみられなかった。なお、湿潤状態では絶乾状態よりブリーディング率が僅かに大きくなる傾向を示した。スランプおよび空気量は、混合する種類によって化学混和剤による調整が必要であるといえる。

膨張率試験においては、いずれの供試体も膨張現象は確認されなかった。このことから、単独の使用で膨張現象が確認されない溶融スラグは、混合使用時においても膨張しないことが明らかとなった。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

図 4-12 に圧縮強度試験結果および静弾性係数試験結果を示す。溶融スラグを使用した場合、基準配合に比べて圧縮強度が僅かに低くなったが、バラツキはみられなかった。各溶融スラグを単独で用いた場合と比較し、保管状態、混合使用のいずれもその影響はみられなかった。

以上の試験結果より、混合使用および保管状態（湿潤、絶乾）による硬化コンクリートへの影響はないと判断される。

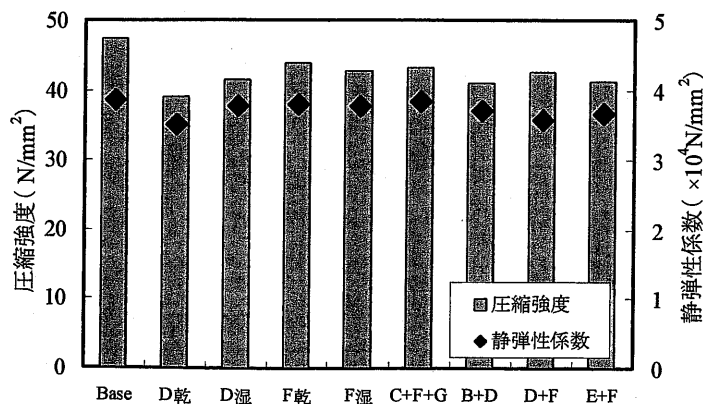


図 4-12 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

4. 5 使用した溶融スラグの適用性

本章で使用した溶融スラグ (SgA, SgB, SgC, SgD, SgE, SgF, SgG) は, SgA を除き, 通常のコンクリートと同程度の圧縮強度を発現し, スランプ, 空気量ともに基準配合と比較して高い値が得られるなど, フレッシュ性状も良好であることが確認された. このことから, 用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより, 使用可能であると考えられる. 実際の使用に際しては, 更に配合の水準を増やして実験を行うとともに, 耐久性等についても検討を行う必要があるといえよう.

但し, SgA に関しては, 低スランプ, 低空気量であり, 膨張現象も確認されるなど, 基準配合とは異なる物性を示した. また, 圧縮強度の著しい低下に拘らず, 引張強度は他の配合と同程度発揮したことから, 膨張により供試体下部と上部に強度のバラツキが生じていることが予測される^[2]. このことから, SgA は通常のコンクリートへの使用に適さないと考えられる.

保管状態 (湿潤, 絶乾) によるフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートへの影響はないと判断される. また, 各溶融スラグがコンクリートに適用可能であると判断される場合は, 混合使用においても問題は無いと考えられる. 但し, 混合使用による相乗効果は, 今回の試験結果からは確認されなかった.

4. 6 まとめ

- (1) SgA を除く 6 種類については, 溶融スラグの種類によりスランプや空気量に差がみられたが, 化学混和剤により制御可能であると判断される. また, 20%までの置換であれば強度への影響は問題ないと判断される.
- (2) SgA については, 低スランプ, 低空気量を示し, ブリーディング率も他と比較して低い値となった. また, 膨張現象も顕著に現れたことから, 金属アルミニウムが多く含まれていると考えられる. 硬化後は, W/C の低下と置換率の増加に伴い, 圧縮強度の低下が確認されたものの, 引張強度については基準配合と同程度となった.
- (3) 混合使用および保管状態 (湿潤, 絶乾) によるフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートへの影響はないと判断される.
- (4) 本章で使用した溶融スラグは, SgA を除き, 用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより, 使用可能であると考えられる. 但し, SgA は通常のコンクリートへの使用に適さないと考えられる. また, 各溶融スラグがコンクリートに適用可能であると判断される場合は, 混合使用においても問題は無いと考えられる. ただし, スランプ, 空気量は混合する種類によって化学混和剤による調整が必要であるといえる.

参考文献

- [1] 日本工業標準調査会：「TRA 0016 一般廃棄物，下水汚泥等の熔融固化物を用いたコンクリート用細骨材（コンクリート用熔融スラグ細骨材）」，2002.7.20
- [2] 高田聡恵，糸山豊，上原匠，梅原秀哲：都市ごみ熔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，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1409~1414，2003.7

第5章 溶融スラグとフライアッシュを併用したコンクリートの物性

5.1 概要

溶融スラグの有効利用が望まれるとともに、産業副産物であるフライアッシュもコンクリート用混和材としての一層の利用が期待されている。また、フライアッシュの有する流動特性の改善効果により、溶融スラグを多量に使用したコンクリートに対しては、ワーカビリティの向上が期待できる。しかし、異なる産業副産物を同時に用いたコンクリートに関する研究例は少なく、その基礎物性を明らかにする必要があるといえる。そこで本章では、4章で使用した7種類の溶融スラグの内、膨張現象が確認されたSgAを除く、SgB～SgGの6種類を対象に、溶融スラグを骨材、フライアッシュを粉体増量材として使用したコンクリートの物性試験を行った。試験は普通コンクリートと高流動コンクリートを対象に実施し、異なる産業副産物の併用の可能性について検討した。

5.2 使用材料

本章では、表5-1に示す材料を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は、瀬戸産砕石を、細骨材は豊田産山砂を使用した。フライアッシュは、愛知県内の火力発電所から産出されたものを使用した(写真5-1)。化学混和剤にはAE減水剤, AE助剤,

表 5-1 使用材料

使用材料	種類	記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3340cm ² /g
細骨材	山砂（豊田産）	S	表乾密度：2.57g/cm ³ ，絶乾密度：2.53g/cm ³ ，吸水率：1.55%，粗粒率：2.67 実積率：61.3%，単位容積質量：1.63kg/l，微粒分量：1.40%
粗骨材	砕石（瀬戸産）	G	表乾密度：2.73g/cm ³ ，絶乾密度：2.72g/cm ³ ，吸水率：0.38%，粗粒率：6.65 実積率：59.5%，単位容積質量：1.62kg/l，微粒分量：1.28%，硬質砂岩：2005
溶融スラグ	表4-2参照	SgB ～SgG	表4-2参照
フライアッシュ	JIS A 6201 II種	FA	密度：2.18g/cm ³
化学 混和剤	AE減水剤	SV	主成分：オキシカルボン酸塩
	AE助剤	AE4	主成分：ロジン系界面活性剤
	高性能AE減水剤	SF	主成分：ポリカルボン酸系
	高性能AE減水剤	NV-G5	主成分：ポリカルボン酸系
	フライアッシュ用AE助剤	AE600	主成分：多価アルコール系特殊非イオン界面活性剤
	抑泡剤	AFK-2	主成分：ポリエーテル系

高性能 AE 減水剤，フライアッシュ用 AE 助剤に加え，高流動コンクリートについては熔融スラグの使用による空気量の増加を抑えることを目的に，抑泡剤を使用した。

熔融スラグは，4章で使用した熔融スラグ SgA～SgG の内，膨張現象が確認された SgA を除く SgB～SgG の6種類を対象とした。

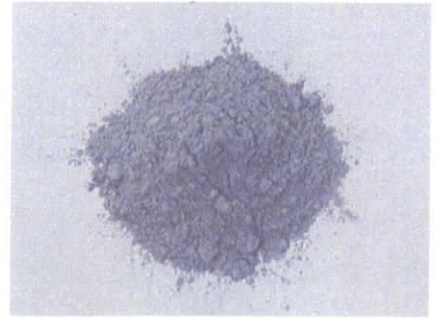


写真 5-1 フライアッシュ

5. 3 熔融スラグとフライアッシュを併用した普通コンクリートの物性試験^[1]

5. 3. 1 実験概要

(1) 実験配合

普通コンクリートについては，粒径の大きなものを多く含む SgE を除く，SgB, SgC, SgD, SgF, SgG の5種類の熔融スラグにフライアッシュを併用して実験を行った。

試験に用いた普通コンクリートの配合を表 5-2 に示す。単位水量，単位セメント量は一定とした。熔融スラグは5種類を等容量混合し，熔融スラグの利用拡大の可能性の検討を目的に，細骨材全量と置換した。熔融スラグの使用にあたっては，単位水量，単位セメント量および空気量を除くコンクリートに対して熔融スラグを45%使用し，残りの容積を粗骨材とした。フライアッシュは，施工性と耐久性を考慮し，単位量を0, 100, 150, 200kg/m³の4水準とし，熔融スラグの使用による容積増加分は粗骨材容積により調整した。また，比較のため，熔融スラグもフライアッシュも使用しない配合1も設定した。化学混和剤の使用量は配合毎の適正值とし，目標スランプは8±2.0cm，目標空気量は4.5±1.5%である。

練混ぜは3. 3の手順に従って行った。但し，本章では練混ぜ量を0.04m³とした。

表 5-2 普通コンクリートの配合

配合 No.	W/C (%)	置換率 (%)	配合量 (kg/m ³)										AE4 (SV) (%)	AE500 (SF) (%)														
			W	P		S	G	Sg																				
				C	FA			B	C	D	F	G																
1	60	0	162	270	0	833	1047	0	0	0	0	0	P×0.80	P×0.0035														
2		0			0										932	171	181	180	177	180	P×1.00	P×0.0025						
3		100																					867	P×0.50	P×0.0150			
4		150																								802	P×0.45	P×0.0200
5		200																										

配合1では化学混和剤にはSVおよびSFを使用した

(2) 試験項目

スランプ試験，空気量試験，ブリーディング試験，膨張率試験（3. 4. 1）の各項目

に加え、硬化後の物性として、圧縮強度試験および静弾性係数試験の各項目を実施した。但し、配合5については、ブリーディング試験および膨張率試験を実施しなかった。

5. 3. 2 結果および考察

(1) フレッシュ試験結果

表 5-3 にフレッシュ試験結果、図 5-1 にスランプおよび空気量試験結果、図 5-2 にブリーディング試験結果を示す。

スランプおよび空気量試験において、熔融スラグのみを使用した配合2では、微粒分が少ないため流動性が低下し、低スランプとなったが、熔融スラグとフライアッシュを併用した配合3~5においては、所定の性状を確保できた。また、フライアッシュ使用量の増加に伴いスランプは僅かに低下し、空気量は増加する傾向がみられた。ところで、切返し時や供試体作製時の判断から、フライアッシュの単位量が 200kg/m^3 (配合5) の場合は十分な施工性を確保できず、妥当でない判断した。したがって、細骨材全量を熔融スラグで置換した場合に併用するフライアッシュの単位量は、 $100\sim 150\text{kg/m}^3$ 程度が望ましいといえる。

ブリーディング試験において、フライアッシュ、熔融スラグとも使用していない配合1の値が最も大きく、熔融スラグのみを使用した配合2でその8割程度となっている。フライアッシュを併用した配合3、4は使用量の増加に伴い値が低下しており、 150kg/m^3 併用した配合4においては配合1の1/10以下の値となった。これは、粉体量が増加し、ブリー

表 5-3 フレッシュ試験結果

配合 No.	SI (cm)	Air (%)	Br率 (%)	膨張率 (%)	単位体積質量 (kg/l)
1	8.5	4.7	5.8	-0.30	2.27
2	4.5	6.2	4.9	-0.06	2.33
3	9.5	4.0	4.5	-0.29	2.37
4	9.0	4.0	0.4	-0.17	2.37
5	8.0	4.5	—	—	2.32

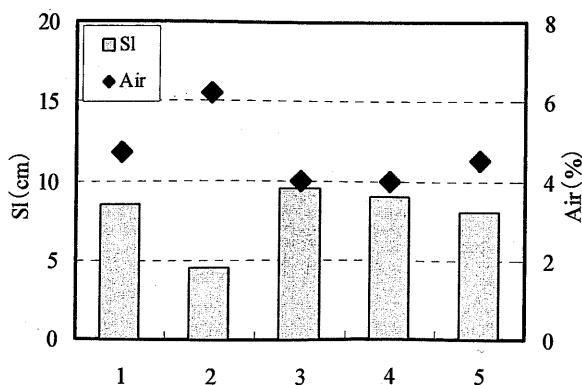


図 5-1 スランプおよび空気量試験結果

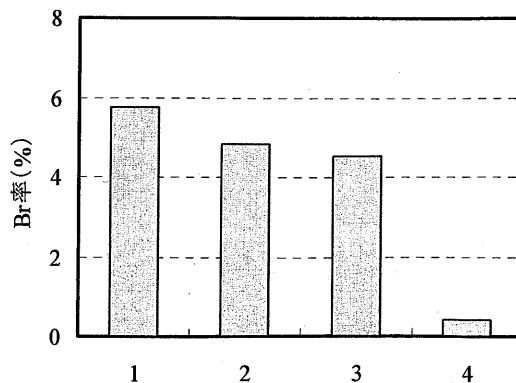


図 5-2 ブリーディング試験結果

ディングを抑制したことが原因であると考えられる。

膨張率試験においては、いずれの供試体も膨張現象は確認されなかった。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

図 5-3 に圧縮強度試験および静弾性係数試験結果を示す。配合 2~4 においては、熔融スラグの使用に拘らず配合 1 と同等の値を示し、フライアッシュと熔融スラグの併用に問題は無いと考えられる。図 5-4 の応力-ひずみ関係からも、熔融スラグの使用が弾性係数に及ぼす影響は小さいと考えられる。

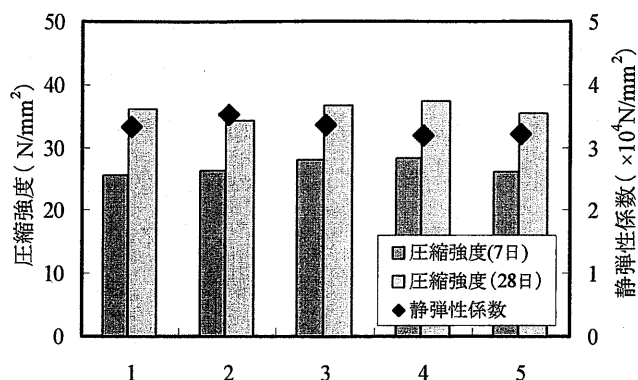


図 5-3 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

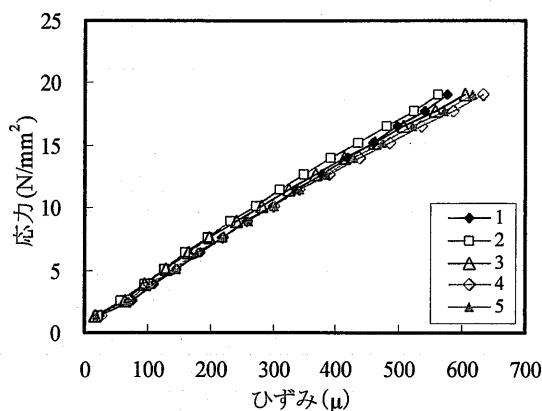


図 5-4 応力-ひずみ関係

5. 4 熔融スラグとフライアッシュを併用した高流動コンクリートの物性試験^[1]

5. 4. 1 実験概要

(1) 実験配合

5. 3 の実験結果から、普通コンクリートに熔融スラグとフライアッシュを併用した場合、その圧縮強度、静弾性係数に問題はみられず、熔融スラグとフライアッシュを併用し

た普通コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。そこで本節では、高流動コンクリートを対象に、SgB～SgG の 6 種類の溶融スラグにフライアッシュを併用して実験を行った。また、溶融スラグの使用が、高流動コンクリートの材料分離および充てん性に及ぼす影響を明らかにするため、U 字管を用いた充てん性試験を行った。

試験に用いた高流動コンクリートの配合を表 5-4 に示す。単位水量，単位セメント量を一定とし，溶融スラグは 5mm を境に 2 種類に分け，それぞれを粗骨材と細骨材とに容積置換して用いた。6 種類の溶融スラグは同量の割合で混合し，溶融スラグ全量の置換率は 0，10，20，30，100%（配合 5：細骨材に対する置換率）の 5 水準とした。フライアッシュは全ての配合で一定量（150 kg/m³）とした。高性能 AE 減水剤の使用量は配合毎の適正值とし，目標スランプフローは 650±50mm，目標空気量は 2.0±1.5%である。但し，細骨材の全量を溶融スラグに置換した配合 5 においては，許容範囲を外れても調整は行わなかった。

練混ぜは 3. 3 の手順に従って行った。但し，本章では練混ぜ量を 0.04m³とした。

表 5-4 高流動コンクリートの配合

配合 No.	W/C (%)	置換率 (%)	配合量 (kg/m ³)											NV-G5 (%)	AFK-2 (%)	
			W	P		S	G	Sg								
				C	FA			B	C	D	E	F	G			
1	50	0	175	350	150	831	816	0	0	0	0	0	0	0	P×0.80	P×0.1
2		10				683	804	28	29	29	28	29	29	P×0.80		
3		20				534	792	56	59	59	56	58	59	P×0.75		
4		30				386	780	83	88	88	84	87	88	P×0.70		
5		100				0	748	156	165	164	157	162	164	P×0.60		

(2) U 字管を用いた充てん性試験方法

図 5-5 に充てん性試験方法を，写真 5-1 に試験状況を示す。この試験は，充てんしたコ

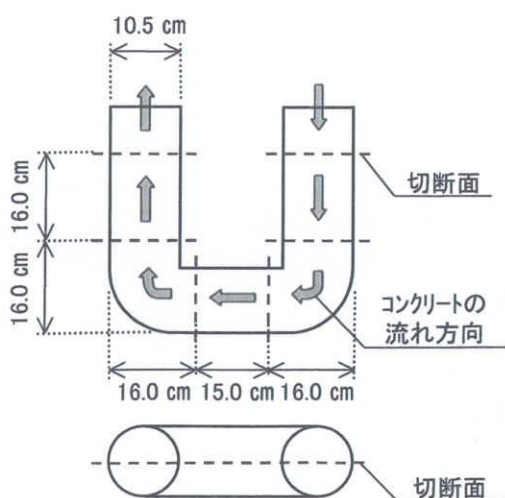


図 5-5 充てん性試験方法

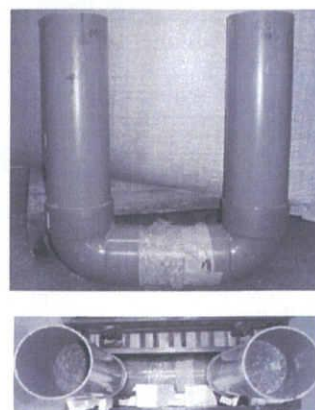


写真 5-1 充てん性試験状況

ンクリート試料を硬化後、任意点で切断し、断面の状況から材料分離および充てん性に及ぼす影響を確認するものである。試験は、高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法（案）（JSCE-F 511-1999）を参考に、 $\phi 10.5\text{cm}$ の U 字管を鉛直に設置して試料を片側の開口部より投入し、反対側の開口部上端に試料が上がる程度まで充てんして行った。今回の試験においては、材料分離および充てん性について検討するため、異形棒鋼による柵状の流動障害は設置しなかった。

(3) 試験項目

フレッシュ試験については、スランプフロー試験、空気量試験、単位容積質量試験、ブリーディング試験、膨張率試験の各項目とともに充てん性試験を、硬化後については圧縮強度試験、静弾性係数試験の各項目を実施した。但し、ブリーディング試験、膨張率試験および充てん性試験については、溶融スラグの使用の有無による違いを確認するため配合 1, 3 のみを対象とした。

5. 4. 2 結果および考察

(1) フレッシュ試験結果

表 5-5 にフレッシュ試験結果、図 5-6 にスランプおよび空気量試験結果、図 5-7 にフロー試験結果を示す。

スランプ試験および空気量試験において、配合 1（溶融スラグ不使用）、2, 3, 4 では、

表 5-5 フレッシュ試験結果

配合 No.	Sl (cm)	最終フロー (mm)		50cmフロー時間 (s)	最終フロー時間 (s)	Air (%)	Br率 (%)	膨張率 (%)	単位体積質量 (kg/l)
1	26.5	620	620	3.6	29.0	1.9	0.16	-0.29	2.33
2	26.8	640	604	4.8	29.3	2.1	—	—	2.34
3	28.0	620	600	5.4	29.5	2.5	0.14	-0.18	2.34
4	27.3	640	605	5.0	42.0	1.8	—	—	2.36
5	24.0	465	445	—	13.0	3.8	—	—	2.35

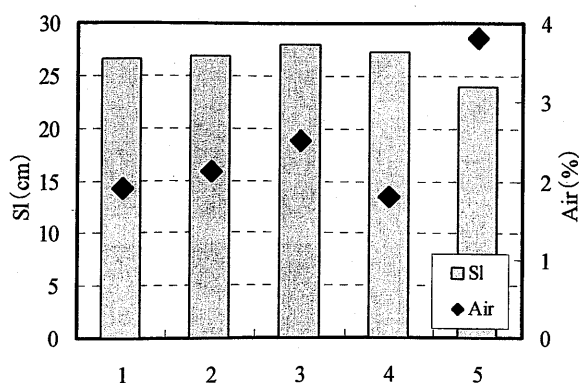


図 5-6 スランプおよび空気量試験結果

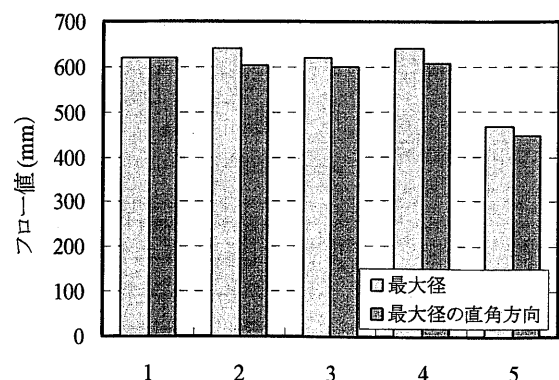


図 5-7 フロー試験結果

目標スランプ・空気量を得たが、配合 5 に関してはフロー値も 450mm 程度に留まり、空気量も他の配合と比較して大きな値となる等、所定のフレッシュ性状を確保できなかった。

ブリーディング試験において、配合 1, 3 共にブリーディング率は小さく、その差も僅かとなった。これは、フライアッシュの併用により粉体量が増加し、ブリーディングを抑制したことが原因であると考えられる。

膨張率試験において、計測を行った二つの配合では膨張現象は確認されず、今回の配合においては溶融スラグ使用上の問題は無いといえる。

このことから、溶融スラグ置換率 30% までの使用であれば、化学混和剤の調整によるフレッシュ性状の制御が可能であるといえる。但し、配合 5 に関しては、今回の結果からは化学混和剤による制御の可否は判断できなかった。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

図 5-8 に圧縮強度試験および静弾性係数試験結果を示す。材齢 7 日では、圧縮強度の差は殆どみられないが、材齢 28 日では、溶融スラグ置換率の増加に伴い強度低下が顕著となった。今回、単位体積あたりのフライアッシュ量が一定であることから、溶融スラグの物性が強度に影響を及ぼしたものと考えられる。弾性係数は、配合 5 で最も高い値となったが、図 5-9 の応力-ひずみ関係において、他と同様の傾向を示していることから、圧縮強

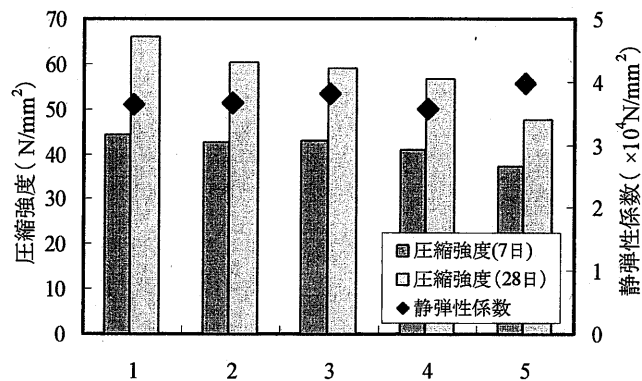


図 5-8 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

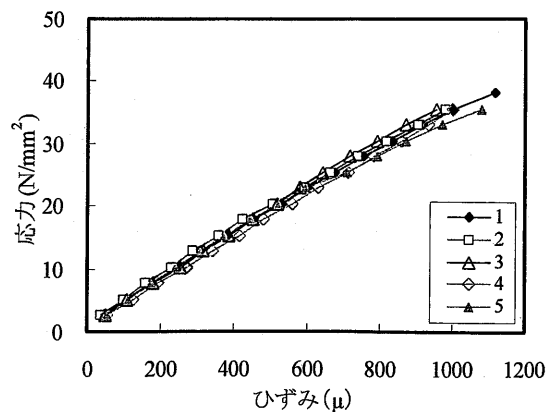


図 5-9 応力-ひずみ関係

度の低下に拘らず全ての配合でほぼ同じ弾性係数であると推察され、熔融スラグの使用が弾性係数に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(3) 充てん性試験結果

写真 5-2 に充てん性試験結果を示す。配合 1, 3 共に材料分離は確認されず、U 字管下部においても粗骨材および熔融スラグが均一となっていることから、材料分離、充てん性ともに問題ないと考えられる。

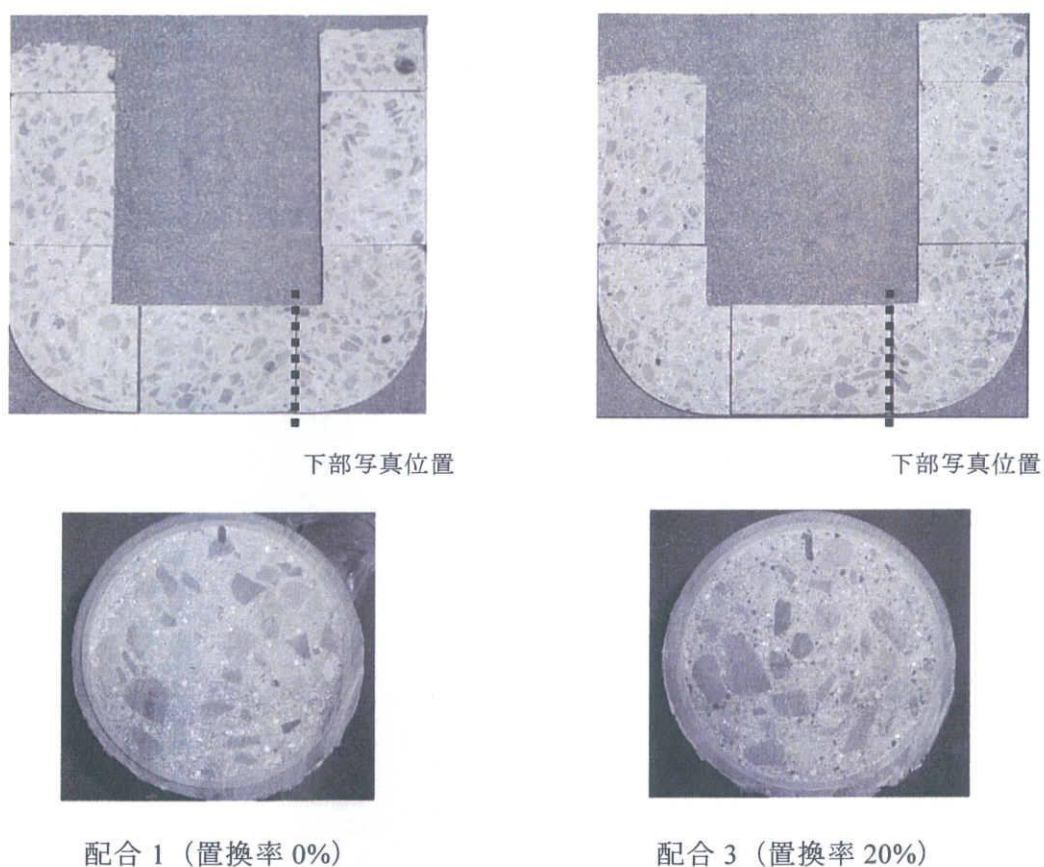


写真 5-2 充てん性試験結果 (切断状況)

5. 5 使用した熔融スラグの適用性

本章で使用した熔融スラグ (SgB, SgC, SgD, SgE, SgF, SgG) は、フライアッシュを併用した場合、その圧縮強度、静弾性係数に問題はみられず、熔融スラグとフライアッシュを組み合わせた普通コンクリートならびに高流動コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。但し、十分な施工性を確保するには、併用するフライアッシュの単位量を調整する必要があるといえる。また、高流動コンクリートにおいて、熔融スラグ置換

率 100%の配合で所定のフレッシュ性状を確保できず、また、置換率の増加に伴う強度低下がみられることから、強度の制御には溶融スラグ置換率の影響を考慮する必要があるといえよう。

5. 6 まとめ

- (1) 溶融スラグとフライアッシュを併用した普通コンクリートにおいて、細骨材全量を溶融スラグで置換した場合、フライアッシュの併用によりフレッシュ性状の制御が可能であり、併用するフライアッシュの単位量は、 $100\sim 150\text{kg/m}^3$ 程度である。
- (2) 溶融スラグとフライアッシュを併用した普通コンクリートにおいて、圧縮強度、静弾性係数の観点からもフライアッシュと溶融スラグの併用に問題は無いと考えられる。
- (3) 溶融スラグとフライアッシュを併用した高流動コンクリートにおいて、溶融スラグ置換率 30%までの使用であれば、化学混和剤の調整によるフレッシュ性状の制御が可能であることが明らかとなった。
- (4) 溶融スラグとフライアッシュを併用した高流動コンクリートにおいて、溶融スラグ置換率の増加に伴う圧縮強度の低下がみられるが、これは、溶融スラグの物性が強度に影響を及ぼしたものと考えられる。材料分離、充てん性の観点からは、問題ないと考えられる。
- (5) 本章で使用した溶融スラグは、フライアッシュを併用した場合、その圧縮強度、静弾性係数に問題はみられず、溶融スラグとフライアッシュを組み合わせた普通コンクリートならびに高流動コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。但し、十分な施工性を確保するには、併用するフライアッシュの単位量を調整する必要があるといえる。また、高流動コンクリートにおいて、置換率の増加に伴う強度低下がみられることから、強度の制御には溶融スラグ置換率の影響を考慮する必要があるといえる。

参考文献

- [1] 平野敏宏, 高田聡恵, 上原匠, 梅原秀哲: 溶融スラグとフライアッシュを混入したコンクリートの物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1411~1416, 2005.6

第6章 熔融スラグを使用したコンクリートの耐久性

6.1 概要

3章から5章において、熔融スラグを使用したコンクリートのフレッシュ性状、強度（短期）について実験を行い、物性の把握を基にその適用性について述べてきた。また、他材料との混合使用についても検討を行い、良好な結果を得ることができた。しかし、実際に熔融スラグをコンクリートに使用するには、耐久性や強度（長期）等を明らかにする必要があるといえる。ところが、長期的な性状については既往の研究例が少なく、熔融スラグを使用したコンクリートの耐久性能は未だ明らかにされていない。

そこで本章では、熔融スラグを使用したコンクリートの長期的な性状を明らかにすることを目的とし、5章で使用した6種類の内、粒度の異なる3種類の熔融スラグをそれぞれ使用した場合のフレッシュ性状、強度特性および耐久性能の把握を試みた。更に、フライアッシュを混合した配合も設定し、混合使用した場合の耐久性についても実験を基に検討を行った。

6.2 使用材料

本章では、表6-1に示す材料を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は、瀬戸産砕石を、細骨材は豊田産山砂を使用した。化学混和剤には高性能AE減水剤、AE助剤を使用した。

表6-1 使用材料

使用材料	種類		記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント		C	密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3340cm ² /g
細骨材	山砂（豊田産）		S	表乾密度：2.57g/cm ³ ，絶乾密度：2.53g/cm ³ ，吸水率：1.55%，粗粒率：2.67 実積率：61.3%，単位容積質量：1.63kg/l，微粒分量：1.40%
粗骨材	砕石（瀬戸産）		G	表乾密度：2.73g/cm ³ ，絶乾密度：2.72g/cm ³ ，吸水率：0.38%，粗粒率：6.65 実積率：59.5%，単位容積質量：1.62kg/l，微粒分量：1.28%，硬質砂岩：2005
熔融スラグ	灰熔融炉	プラズマ式	SgD	密度：2.83g/cm ³ ，吸水率：0.94%，粗粒率：3.16，実積率：60.0% 粒径（5mm以下98%，5mm以上2%）
	灰熔融炉	電気抵抗式	SgE	密度：2.70g/cm ³ ，吸水率：0.52%，粗粒率：5.16，実積率：60.5% 粒径（5mm以下60%，5mm以上40%）
	灰熔融炉	交流電気抵抗式	SgF	密度：2.78g/cm ³ ，吸水率：0.34%，粗粒率：2.54，実積率：63.9% 粒径（5mm以下100%，5mm以上0%）
フライアッシュ	JIS A 6201 II種		FA	密度：2.18g/cm ³
化学混和剤	高性能AE減水剤		SP	主成分：ポリカルボン酸系
	AE助剤		AE	主成分：樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤

溶融スラグは、4章、5章で使用した溶融スラグの内、同じ灰溶融方式により排出され、粒度の異なる SgD, SgE, SgF (4.2参照) を使用した。いずれも愛知県内の溶融施設で排出されたものであり、粒度調整等の事前処理は行わなかった。フライアッシュは、5章で使用したものと同一 JIS II 種に適合するものを使用した。

6.3 溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性試験

6.3.1 実験概要

(1) 実験配合

異なる3種類の溶融スラグおよびフライアッシュを使用し、耐久性について、実験を基に検討を行った。

試験に用いたコンクリートの配合を表6-2に示す。SgD, SgE, SgFをそれぞれ使用した配合D, E, Fと、SgFおよびフライアッシュを使用した配合F+FA, 比較のための基準配合(Base: 溶融スラグ置換率0%)の計5配合を設定した。配合は、単位水量を 170kg/m^3 、水セメント比を40%とし、溶融スラグ置換率は有効利用の観点から、実現され得る配合として20%とした^[1]。骨材との置換量は、各溶融スラグを5mmを境に2種類に分けて考え、それぞれを粗骨材と細骨材とに置換することとし、総量が骨材容積に対して20%となるように配合を算定した。ただし、F+FAに関しては、単位溶融スラグ量を、フライアッシュを使用しない配合と同量確保する目的から、全骨材容積に対する溶融スラグ置換率は20%以上となる。フライアッシュは作業性を考慮し、 100kg/m^3 に設定した。化学混和剤の使用量は配合毎の適正值とし、目標スランプは $12\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5\pm 1.5\%$ とした。表中のs/aは、基準配合でのs/aとF.M.(砂)を基準に、D~F+FAでのF.M.(砂+溶融スラグ, 砂+溶融スラグ+フライアッシュ)から算出した。

練混ぜは、3.3の手順に従って行った。但し、本章では総練混ぜ量を 0.07m^3 とし、1バッチ 0.035m^3 で2バッチに分けて練混ぜを行った。スランプ試験、空気量試験、単位容積質量試験は1バッチ毎に2回ずつ実施し、塩化物イオン濃度試験は1バッチ目を計測した。

表6-2 コンクリートの配合

配合	s/a (%)	W/C (%)	置換率 (%)	配合量 (kg/m^3)					SP (%)	AE (%)	
				W	C	S	G	Sg			FA
Base	41.8	40	0	170	425	698	1033	0	0	C×0.45	C×0.0040
D	44.1		20			409	985	368		C×0.40	C×0.0040
E	45.5		560			825	351	C×0.45		C×0.0045	
F	41.5		359			1038	361	C×0.40		C×0.0040	
F+FA	37.0		242			1038	361	100		C×0.55	C×0.0050

(2) 試験項目

スランプ試験，空気量試験，単位容積質量試験，塩化物イオン濃度試験（JIS A 1144-2001「フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度試験方法」）の各項目に加え，硬化後の物性として，圧縮強度試験，静弾性係数試験，割裂引張強度試験の各項目を実施した。

耐久性試験は，長さ変化試験（JIS A 1129-1-2001「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法—第1部：コンパレータ方法」），凍結融解試験（JIS A 1148-2001「コンクリートの凍結融解試験方法」），促進中性化試験（JIS A 1153-2003「コンクリートの促進中性化試験方法」），アルカリシリカ反応性試験（JIS A 1146-2001「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」）である。

圧縮強度，静弾性係数については材齢 28 日および 6 ヶ月，引張強度については材齢 28 日で試験を行った。耐久性試験は，各配合につき供試体 3 本を作製して実施し，各図の値はその平均値により求めた。但し，促進中性化試験については各配合につき 2 本とした。

6. 3. 2 フレッシュ試験・強度試験結果および考察

(1) フレッシュ試験結果

表 6-3 にフレッシュ試験結果，図 6-1 にスランプおよび空気量試験結果結果を示す。表および図の値は，2 回の計測とも目標値におさまったため，その平均値により求めた。

スランプおよび空気量試験において，熔融スラグの種類やフライアッシュの使用に拘ら

表 6-3 フレッシュ試験結果

配合	Sl (cm)	Air (%)	塩化物イオン量 (kg/m ³)				単位体積質量 (kg/l)
			計測値		平均値		
Base	11.8	4.6	0.053	0.049	0.049	0.050	2.25
D	10.8	4.5	0.049	0.051	0.049	0.050	2.26
E	11.8	4.8	0.048	0.044	0.044	0.045	2.25
F	12.0	4.5	0.048	0.048	0.049	0.048	2.26
F+FA	11.5	4.1	0.051	0.056	0.054	0.054	2.26

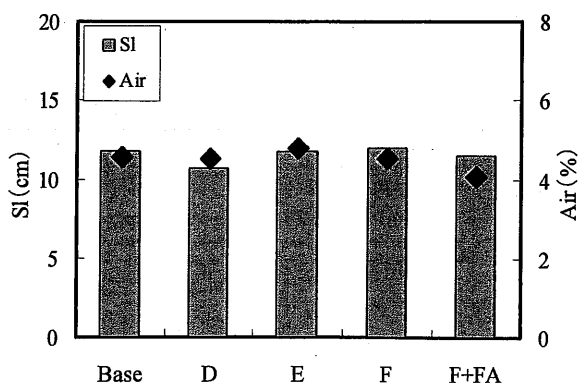


図 6-1 スランプおよび空気量試験結果

ず所定の性状を満たした。

図 6-2 にフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度試験結果を示す。塩化物イオン濃度試験においても、全ての配合で、基準値である 0.3kg/m^3 以下^[2]におさまり、問題は無いといえる。

塩化物イオン量を含めたフレッシュ性状が所定の値を満たしたことから、耐久性試験を行う上で支障はないと判断した。

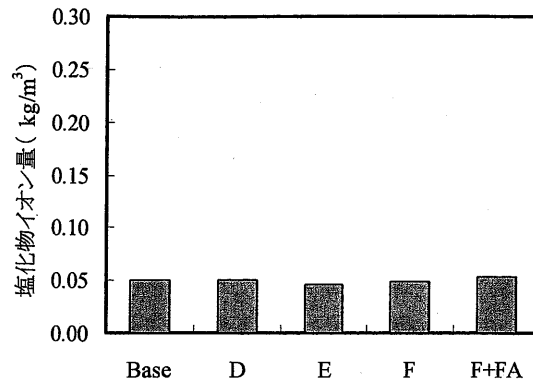


図 6-2 塩化物イオン濃度試験結果

(2) 圧縮強度試験・静弾性係数試験および割裂引張強度試験結果

表 6-4 に材齢 28 日および 6 ヶ月での圧縮強度試験、割裂引張強度試験、静弾性係数試験結果を、図 6-3、図 6-4 に圧縮強度試験および静弾性係数試験結果を示す。

材齢 6 ヶ月においても材齢 28 日と同様の傾向を示し、圧縮強度については、溶融スラグのみを使用した D, E, F で基準配合を僅かに下回ったものの、溶融スラグとフライアッシュを共に使用した F+FA では基準配合よりも大きな値となった。これは、フライアッシュのポゾラン反応により、長期強度が増進したものと考えられる^[3]。

弾性係数は、材齢 28 日では溶融スラグのみ使用した D, E, F, フライアッシュを混合した F+FA 共に、基準配合での値よりもやや高い値となったが、材齢 6 ヶ月では全ての配合で強度に拘らずほぼ同等の値となった。今回の結果からは、溶融スラグの及ぼす影響は

表 6-4 強度試験結果

配合	材齢28日			材齢6ヶ月	
	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)
Base	50.1	3.67	3.8	66.8	4.37
D	46.1	3.92	3.0	63.6	4.40
E	45.2	4.16	3.3	58.9	4.47
F	46.6	3.96	3.3	63.4	4.43
F+FA	53.5	4.21	3.8	76.4	4.53

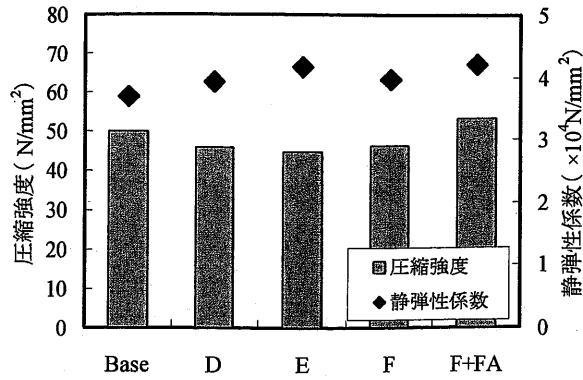


図 6-3 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果 (材齢 28 日)

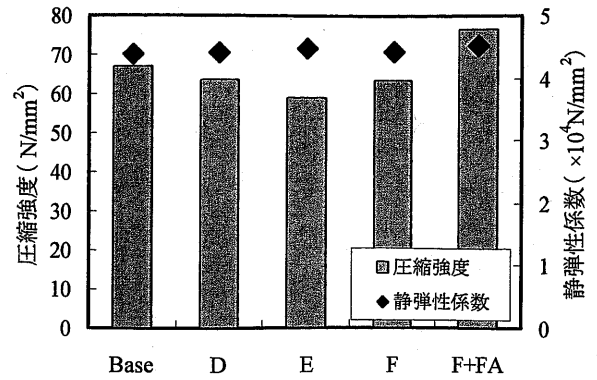


図 6-4 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果 (材齢 6 ヶ月)

明らかにできなかったものの、置換率 20%程度では長期的には溶融スラグの影響は小さいといえよう。

図 6-5, 図 6-6 に応力とひずみの関係を示す。表 6-4 において、材齢 28 日での弾性係数は F+FA で最も高い値となったが、応力-ひずみ関係では材齢 28 日, 6 ヶ月共に、全ての配合で同様の傾向を示した。このことから、圧縮強度の低下に拘らず全ての配合でほぼ同じ弾性係数であると推察され、溶融スラグの使用が弾性係数に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図 6-7 に材齢 28 日での割裂引張強度試験結果を示す。引張強度は、全体的に圧縮強度から予測される通常値 (圧縮強度の 10~13 分の 1) よりも若干小さく、13~15 分の 1 程度の値となった。配合毎の増減は、圧縮強度の値にほぼ対応する結果となった。フライアッシュのポゾラン反応による長期強度増進は引張強度において顕著に現れる^[4]が、今回、材齢 28 日のみの計測のため、フライアッシュによる長期強度の増加は確認できなかった。

以上の試験結果より、溶融スラグの使用による強度への影響は僅かであり、フライアッシュの溶融スラグとの併用は、長期強度の改善に効果があると考えられる。

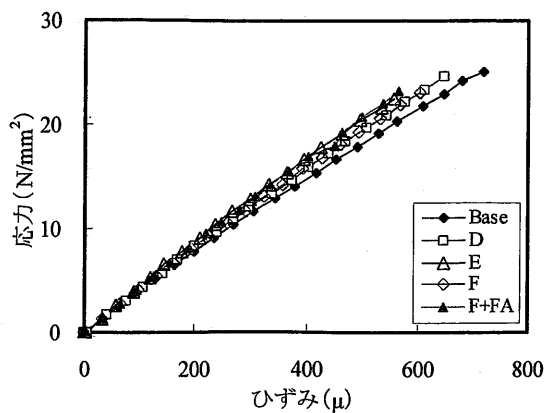


図 6-5 応力-ひずみ関係 (材齢 28 日)

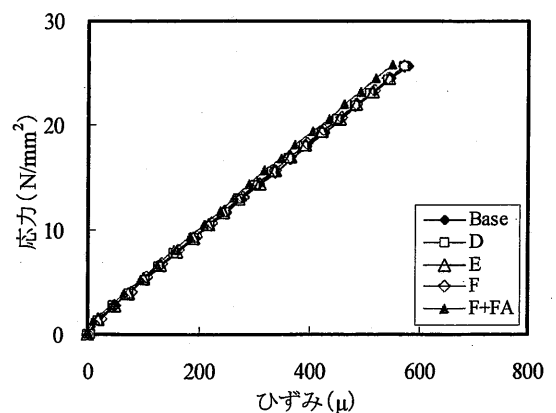


図 6-6 応力-ひずみ関係 (材齢 6 ヶ月)

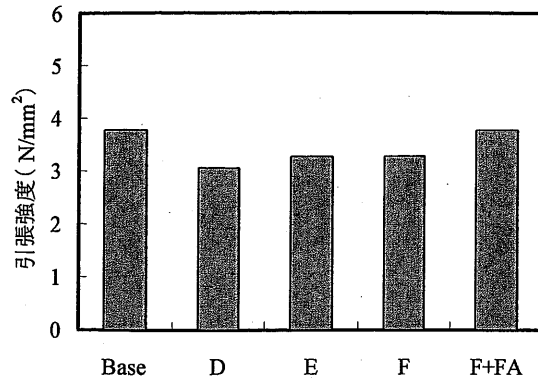


図 6-7 割裂引張強度試験結果 (材齢 28 日)

6. 3. 3 耐久性試験結果および考察

(1) 乾燥収縮試験結果

図 6-8, 図 6-9 に乾燥収縮試験結果を示す。長さ変化率 (図 6-8) については, フライアッシュを用いた F+FA の初期の変化率がやや大きいものの, 26 週目では $460 \sim 490 \times 10^{-4}\%$ であり, 全ての配合で同程度であった。また, 質量変化率 (図 6-9) においても, $110 \sim 130 \times 10^{-2}\%$ であり, 配合毎の差はみられなかった。このことから, 今回対象とした配合では, 乾燥収縮に関して問題無いと判断される。

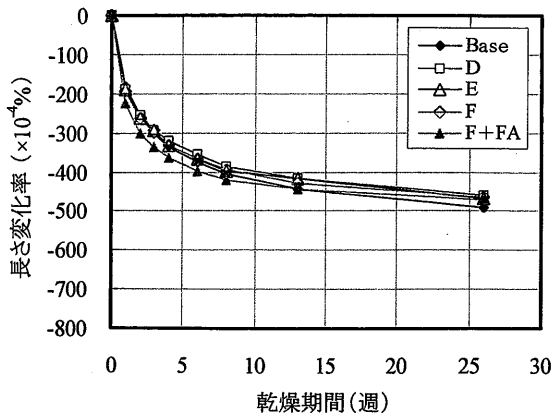


図 6-8 乾燥収縮試験結果 (長さ変化率)

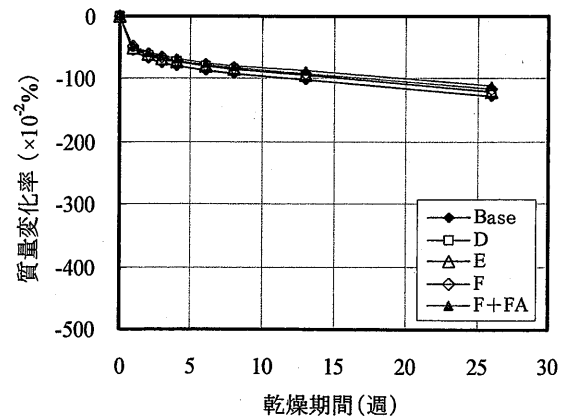


図 6-9 乾燥収縮試験結果 (質量変化率)

(2) 凍結融解試験結果

図 6-10, 図 6-11 に凍結融解試験結果を示す。相対動弾性係数 (図 6-10) は, 基準配合, D, F, F+FA で 95%以上であり, E では僅かに 95%を下回ったものの, 他との差は殆ど無く, 全ての配合において優れた凍結融解抵抗性が認められた。質量変化率 (図 6-11) は相

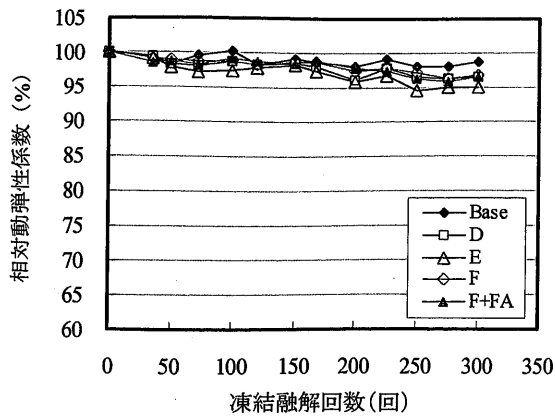


図 6-10 凍結融解試験結果
(相対動弾性係数)

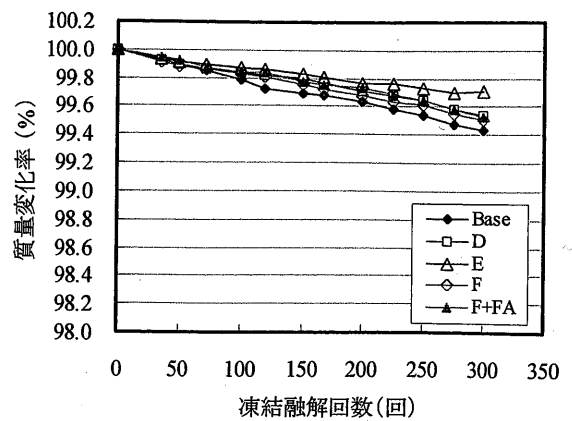


図 6-11 凍結融解試験結果
(質量変化率)

対動弾性係数に対応した結果となっている。このことから、今回対象とした配合では、凍結融解抵抗性に関して問題無いと判断される。

(3) 促進中性化試験結果

図 6-12 に促進中性化試験結果を示す。促進中性化試験は大気中、屋外 ($\text{CO}_2=0.03\%$ とする) の 167 倍の期間に相当するため、予測年数の算出には式〔1〕を用いる。

$$T = 167t / 52 \quad \dots \dots [1]$$

ここに T: 予測年数 (年)
t: 中性化促進期間 (週)

中性化速度が二酸化炭素濃度に比例すると考えれば、式〔1〕により 26 週の促進期間は 83.5 年に相当する。図 6-12 より、材齢 26 週時点での中性化深さは、基準配合、溶融スラグを使用したコンクリートとも 0~1mm 程度となっていることから、今回対象とした配合では、通常のコンクリートと遜色ない耐中性化性能を有していると考えられる。

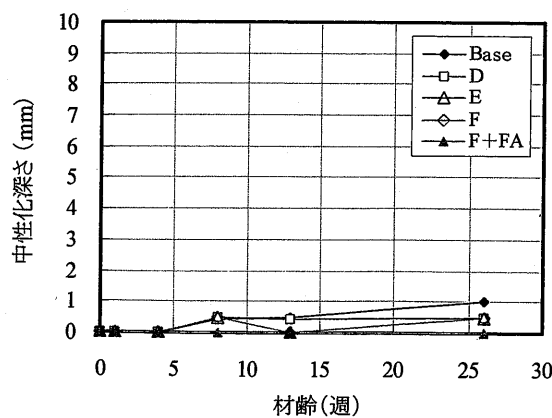


図 6-12 促進中性化試験結果

(4) アルカリシリカ反応性試験結果

試験はモルタル供試体で行った。

図 6-13, 図 6-14 にアルカリシリカ反応性試験結果を示す。膨張率 (図 6-13) は, 3 ヶ月での基準値が 0.05%, 6 ヶ月での基準値が 0.1% であり, D, E, F はほぼ同程度, F+FA では収縮が確認された。フライアッシュを用いると, 膨張率が小さくなる傾向が見られるが, これは, フライアッシュの有するアルカリシリカ反応抑制効果^[5]によるものと考えられる。溶融スラグを用いた配合は, いずれも基準値以下であり, 無害であるといえる。質量変化 (図 6-14) は, 配合毎の差はみられなかった。このことから, 今回対象とした配合では, アルカリシリカ反応性に関して問題無いと判断される。

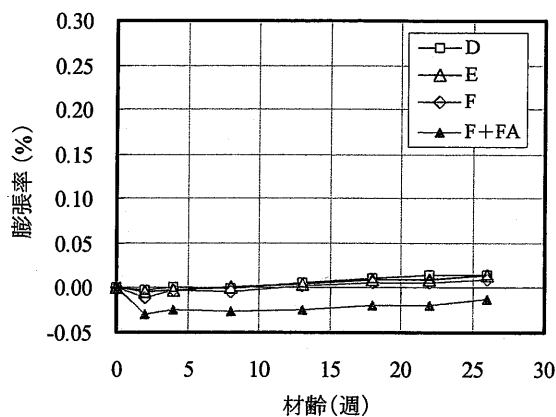


図 6-13 アルカリシリカ反応性試験結果
(平均膨張率)

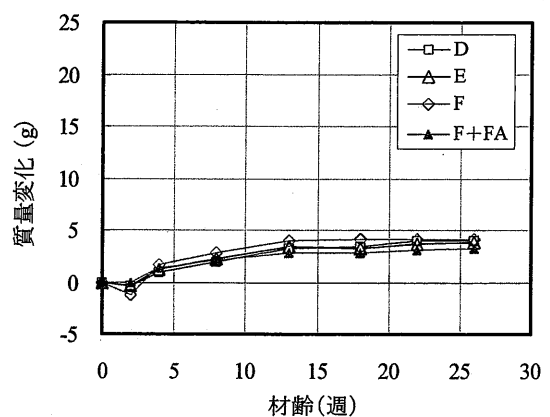


図 6-14 アルカリシリカ反応性試験結果
(質量変化)

6. 4 使用した溶融スラグの適用性

本章で使用した溶融スラグ (SgD, SgE, SgF) は, 通常のコングリートと同程度のスランプ, 空気量および塩化物イオン量が確認され, 圧縮・引張強度についても基準配合の 8 ~10 割を発現することが確認された。また, 通常のコングリートと同等の優れた耐久性能を有することが明らかとなった。このことから, 使用した 3 種類の溶融スラグは, 置換率 20% の下, 所定のフレッシュ性状を確保できた場合には, 耐久性の観点からも使用可能であると考えられる。

溶融スラグとフライアッシュの混合使用に関しては, 通常のコングリートと同等のフレッシュ性状と圧縮・引張強度を発揮するとともに, ポゾラン反応による長期強度の増進が確認された。また, アルカリシリカ反応性試験において膨張を抑制する効果がみられるなど, 耐久性能も満足している。このことから, 混合使用による問題はないといえる。

以上より, 本章において使用した溶融スラグは, コングリートの耐久性能を損なわない

といえる。このことから、使用した3種類の溶融スラグは、フライアッシュとの混合使用を含め、用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより、使用可能であると考えられる。

6. 5 まとめ

- (1) 溶融スラグを使用したコンクリートは、乾燥収縮，凍結融解抵抗性，耐中性化，アルカリシリカ反応性の観点からも問題はみられず，十分な耐久性能を有していることが明らかとなった。また，フライアッシュとの混合使用によるアルカリシリカ反応抑制効果も期待できる。
- (2) 本章で使用した溶融スラグは，フライアッシュとの混合使用を含め，その耐久性に問題はみられず，用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより，コンクリートに使用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 高田聡恵, 糸山豊, 上原匠, 梅原秀哲 : 熔融スラグのコンクリート用材料としての有効利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1629~1634, 2004.6
- [2] 土木学会 : コンクリート標準示方書 [施工編], p.25, 2002
- [3] 笠井芳夫, 小林正凡 : 改訂版セメント・コンクリート混和材料, 技術書院, pp.87~89, 2003
- [4] 國分正胤 : フライアッシュを用いた各種形式の大ダムにおけるコンクリートの配合設計, 大ダム, p.27, 1964
- [5] 土木学会 : フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案), pp.91~95, 1999

第7章 結論

本研究は、熔融スラグのコンクリートへの有効利用を目的に、熔融スラグをコンクリート用材料として使用した種々の実験を行い、熔融スラグを使用したコンクリートの物性および耐久性について、適用性の観点から検討を行ったものである。

まず、膨張率試験方法を提案し、試験方法の検討を行うとともに、3種類の熔融スラグを対象に、置換率を変えてコンクリートに使用し、膨張率試験を行った。また、膨張現象の確認される熔融スラグに対して、膨張現象と強度特性について実験を基に考察した。

次に、7種類の熔融スラグについて、配合を変化させ、膨張率試験を含めた物性試験を行うとともに、混合して用いた配合、保管状態の違いによる影響についても検討を行った。

また、熔融スラグを骨材、フライアッシュを粉体増量材として使用したコンクリートについては、普通コンクリートと高流動コンクリートを対象に実験を実施し、異なる産業副産物の混合使用の可能性について検討した。

最後に、熔融スラグを使用したコンクリートの耐久性について検討を行った。

以下に本論文で得られた知見をまとめて示す。

〔1〕 熔融スラグを使用したコンクリートの膨張現象（3章）

フレッシュコンクリートの膨張を簡易的に確認することを目的とした膨張率試験方法を提案し、アルミニウム粉末を用いて提案した試験方法の検討を行うとともに、3種類の熔融スラグ（Sg1～Sg3）についてそれぞれ置換率を変えてコンクリートに使用し、膨張率試験を行った。また、膨張現象の確認される熔融スラグに関しては、膨張と強度の関係について実験を基に考察した。その結果、以下の項目が明らかとなった。

- (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率試験方法の提案を行い、この試験方法による膨張現象の把握が可能であることが明らかとなった。
- (2) 熔融スラグを使用したコンクリートの圧縮強度は、「熔融スラグ置換率」と「膨張率」の2つの要因によって決定され、熔融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確認されることが明らかとなった。
- (3) 膨張現象が確認される熔融スラグに対しては、膨張による空隙が供試体の整形に悪影響を及ぼしている可能性が高いため、コンクリート打ち込み面上部の適切な処理が必要であると考えられる。

- (4) 3章で使用した溶融スラグは、膨張現象の確認される Sg1 を除き、膨張率試験ならびに圧縮強度試験に基づいて置換率を検討し、用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより、使用可能であると考えられる。また、TR の適用範囲から推測すると、Sg2, Sg3 については粒度や配合の調整により細骨材として適用可能であると考えられるが、Sg1 については適用範囲外であると考えられる。

〔2〕溶融スラグを使用したコンクリートの物性（4章）

愛知県内の異なる溶融施設から排出された7種類の溶融スラグ（SgA～SgG）を対象に、水セメント比、置換率を変化させ、膨張率試験を含めたコンクリートの物性試験を行った。また、7種類のうち、膨張現象の確認された1種を除く6種類の溶融スラグ（SgB～SgG）については、混合して用いた配合に対してフレッシュおよび硬化後の物性試験を行った。更に、溶融スラグを事前に絶乾状態および湿潤状態とし、保管状態の影響についても実験を基に検討を行った。その結果、以下の項目が明らかとなった。

- (1) SgA を除く6種類については、溶融スラグの種類によりスランプや空気量に差が見られたが、化学混和剤により制御可能であると判断される。また、20%までの置換であれば強度への影響は問題ないと判断される。
- (2) SgA については、低スランプ、低空気量を示し、ブリーディング率も他と比較して低い値となった。また、膨張現象も顕著に現れたことから、金属アルミニウムが多く含まれていると考えられる。硬化後は、W/C の低下と置換率の増加に伴い、圧縮強度の低下が確認されたものの、引張強度については基準配合と同程度となった。
- (3) 混合使用および保管状態（湿潤、絶乾）によるフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートへの影響はないと判断される。
- (4) 4章で使用した溶融スラグは、SgA を除き、用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより、使用可能であると考えられる。但し、SgA は通常のコンクリートへの使用に適さないと考えられる。また、各溶融スラグがコンクリートに適用可能であると判断される場合は、混合使用においても問題は無いと考えられる。ただし、スランプ、空気量は混合する種類によって化学混和剤による調整が必要であるといえる。

〔3〕溶融スラグとフライアッシュを併用したコンクリートの物性（5章）

4章で使用した7種類の溶融スラグの内、膨張現象が確認された SgA を除く、SgB～SgG

の6種類を対象に、溶融スラグを骨材、フライアッシュを粉体増量材として使用したコンクリートの物性試験を行った。試験は普通コンクリートと高流動コンクリートを対象に実施し、異なる産業副産物の併用の可能性について検討した。その結果、以下の項目が明らかとなった。

- (1) 溶融スラグとフライアッシュを併用した普通コンクリートにおいて、細骨材全量を溶融スラグで置換した場合、フライアッシュの併用によりフレッシュ性状の制御が可能であり、併用するフライアッシュの単位量は、 $100\sim 150\text{kg/m}^3$ 程度である。
- (2) 溶融スラグとフライアッシュを併用した普通コンクリートにおいて、圧縮強度、静弾性係数の観点からもフライアッシュと溶融スラグの併用に問題は無いと考えられる。
- (3) 溶融スラグとフライアッシュを併用した高流動コンクリートにおいて、溶融スラグ置換率30%までの使用であれば、化学混和剤の調整によるフレッシュ性状の制御が可能であることが明らかとなった。
- (4) 溶融スラグとフライアッシュを併用した高流動コンクリートにおいて、溶融スラグ置換率の増加に伴う圧縮強度の低下がみられるが、これは、溶融スラグの物性が強度に影響を及ぼしたものと考えられる。材料分離、充てん性の観点からは、問題ないと考えられる。
- (5) 5章で使用した溶融スラグは、フライアッシュを併用した場合、その圧縮強度、静弾性係数に問題はみられず、溶融スラグとフライアッシュを組み合わせた普通コンクリートならびに高流動コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。但し、十分な施工性を確保するには、併用するフライアッシュの単位量を調整する必要があるといえる。また、高流動コンクリートにおいて、置換率の増加に伴う強度低下がみられることから、強度の制御には溶融スラグ置換率の影響を考慮する必要があるといえる。

[4] 溶融スラグを使用したコンクリートの耐久性 (6章)

溶融スラグを使用したコンクリートの長期的な性状を明らかにすることを目的とし、5章で使用した6種類のうち粒度の異なる3種類の溶融スラグ(SgD~SgF)をそれぞれ使用した場合のフレッシュ性状、強度特性および耐久性能の把握を試みた。さらに、フライアッシュを混合した配合も設定し、混合使用した場合の耐久性についても実験を基に検討を行った。その結果、以下の項目が明らかとなった。

- (1) 溶融スラグを使用したコンクリートは、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、耐中性化、ア

ルカリシリカ反応性の観点からも問題はみられず、十分な耐久性能を有していることが明らかとなった。また、フライアッシュとの混合使用によるアルカリシリカ反応抑制効果も期待できる。

- (2) 6章で使用した熔融スラグは、フライアッシュとの混合使用を含め、その耐久性に問題はみられず、用途に合わせて水セメント比や化学混和剤を調整することにより、コンクリートに使用可能であると考えられる。

〔5〕今後の課題

本論文で得られた研究成果は上記の通りである。今後、熔融スラグのコンクリートへの有効利用について研究を進める際の課題を以下に列挙し、本論文の結びとする。

(1) 配合に関する課題

本論文では、熔融スラグを細骨材と置換した場合の実験に限定したため、より幅広い配合条件下での実験が望まれる。例えば、粒度の大きい熔融スラグを粗骨材と置換した場合の物性試験や、熔融スラグ置換率を高く設定した場合の耐久性試験等が挙げられる。

(2) 膨張性状を有する熔融スラグに関する課題

本論文では、4章の混合使用以降、膨張性状を有する熔融スラグを実験対象から除外したが、金属アルミニウムを含む熔融スラグに対しても、利用の可能性を考慮した対処が望まれる。例えば、膨張を抑制する処理を事前に施す（石灰に浸潤）こと等が挙げられる。あるいは、膨張を型枠等で拘束し、ケミカルプレストレスによる強度の増加を図るなど、膨張性状を敢えて利用する試みも検討する必要があると考えられる。

(3) 用途に関する課題

現在、熔融スラグの用途として主流となっているのは、路盤材やインターロッキングブロック等の道路用材や埋め戻し材、コンクリート二次製品等、非構造材料としての利用であり、構造材料としての使用に関しては、殆ど検討がなされていない。今後は、熔融スラグの構造材料としての適用性の判断に対しては、梁などのモデル供試体での実験の実施等が有効であると考えられる。また、用途拡大のためには、受け入れ側での基準の統一や、用途に合わせた簡便な物性試験方法の提案が重要であるといえる。

謝辞

本論文は、著者が名古屋工業大学大学院博士後期課程在学中に取り組んだ研究の成果をまとめたものです。本研究を遂行するにあたり、指導教官である梅原秀哲先生をはじめ、多くの方々の御協力と御指導を頂きました。皆様に心からの御礼を申し上げます。

名古屋工業大学大学院教授 梅原秀哲先生には、ご多忙の中、いつも熱心なご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言を賜りました名古屋工業大学大学院教授 市之瀬敏勝先生、堀越哲美先生、名古屋工業大学大学院助教授 河邊伸二先生、藤田素弘先生、名古屋工業大学大学院助手 田中稲子先生に、心から感謝申し上げます。

本研究を行うにあたり、愛知県溶融スラグ有効利用研究会のご協力を頂きました。ここに記して、会員の皆様に深く感謝申し上げます。

産業総合研究所名古屋大学エコトピア科学研究所 鈴木憲司先生には、「石灰によるスラグの安定化」についての貴重なデータを頂き、論文中に参考文献として使用させていただきました。ここに厚く御礼を申し上げます。

名古屋工業大学名誉教授 宇野泰章先生には、実験の際に装置を貸して頂くなど、ご迷惑をおかけしたことと思います。ここに厚く御礼を申し上げます。

名古屋工業大学大学院助教授 上原匠先生、名古屋工業大学大学院助手 糸山豊先生には、実験から論文作成に至るまで、いつも温かいご指導を賜りました。心からの御礼を申し上げます。

名古屋工業大学技官 平原英樹氏、名古屋工業大学大学院 VBL 元研究員 ナシル・シャヒド氏には、実験や論文作成の際にご協力頂くなど、本当にお世話になりました。深く感謝申し上げます。

同じ溶融スラグチームとして実験、研究を進めた内田博也氏、平野敏宏氏、張大志氏、小木曾大輔氏、中澤光氏、林純一氏、寺戸孝至氏、松村卓哉氏、山田雄介氏、祖父江宜士氏、後藤芳明氏、片桐孝治氏、知念春菜氏をはじめ、研究室の院生の皆様、卒業生の皆様に心から感謝申し上げます。

最後に、多大なご理解を賜りました富士エンジニアリング株式会社の皆様、いつも温かく見守ってくれた友人、常に支えてくれる両親に感謝し、謝辞といたします。

2006年3月 高田 聡恵