

焼却灰溶融スラグのコンクリートへの適用性

学生氏名 粕谷 菜穂
指導教員名 小玉 克己

現在、循環型社会の構築へ向けた取組みが求められ、最終処分場の延命化対策として溶融スラグが開発された。今後大量の溶融スラグが生産されることによる環境への負荷が予測されるため、溶融スラグの有効利用が望まれている。溶融スラグに関する研究・技術開発は数多く報告されているが、コンクリート用骨材としての品質の確保が困難であり、コンクリートへの活用が少ないのが現状である。

本研究では、「溶融スラグ骨材を使用したコンクリートの性状」及び「溶融スラグ粗骨材コンクリートの品質改善」について実験的検討を行った。結果、溶融スラグ細骨材コンクリートの実用化は可能であるが、溶融スラグ粗骨材コンクリートの実用化は困難であることが確認された。

Key Words : molten slag aggregate, bond strength, mechanical properties, drying shrinkage

1 はじめに

わが国における社会経済活動が拡大し、国民生活が豊かになる一方で、廃棄物の排出量の高水準での推移、最終処分場の残余容量の限界、廃棄物の焼却施設からのダイオキシン類の発生、不法投棄の増大等の廃棄物をめぐる様々な環境問題が指摘されてきた。今後は大量生産・大量消費・大量廃棄型の従来の社会の在り方や国民のライフスタイルを見直し、物質循環を確保することにより、天然資源の消費が抑制され、環境への負荷ができる限り低減される、いわゆる循環型社会の実現を図ることが必要である¹⁾。

今から 25 年ほど前、すでに最終処分場の限界が社会問題になり始めており、埋立処分場を延命させるための減容化を図る目的で溶融固化技術が生まれ、溶融スラグが製造されるようになった。しかし、焼却灰や汚泥を減容しても次々と溶融スラグは製造され、根本的に埋立処分場の延命化対策にはならないということから、溶融スラグの有効利用に関して研究されるようになり²⁾、廃棄物処理の安全性・信頼性の確保をするために溶融スラグに対して行政の取組みが進められてきた³⁾。生活環境の保全の観点から、溶融スラグの利用について十分留意しつつ、一般廃棄物の溶融固化の実施に当たり遵守することが望ましい事項を定め、これに基づく溶融スラグの適正な再生利用の実施に資することを目的⁴⁾とした指針が各地方自治体から作成されており、溶融スラグの資源化を推進している。それらの指針で定められている溶融スラグの利用用途は、路盤材、コンクリート・アスファルト混合物用骨材、埋戻し材など^{4),5)}である。また、溶融スラグのコンクリート用骨材としての利用は、現在インター

ロッキングブロックや積みブロックなどのプレキャスト製品の骨材としての利用に限られている⁶⁾。

このように最終処分場の延命化対策として開発された溶融スラグの有効利用が望まれているが、使用用途での需要量を供給量(発生量)が上回るために少しずつ蓄積されており、今後大量の溶融スラグが生産されることによる環境負荷への影響が予測される。よって溶融スラグの土木業界および他の分野へのマテリアルリサイクルが積極的に図られ、早急に実現することが重要である。

そこで本研究では、コンクリートの粗骨材あるいは細骨材全量に溶融スラグ骨材を用いてコンクリートを施工し、普通骨材コンクリート・再生骨材コンクリートと比較することによって、フレッシュコンクリートの性状および硬化コンクリートの力学的性質や収縮性状を把握することを目的とし、実験・検討した。

2 溶融スラグ骨材を使用したコンクリート その¹⁾ (W/C=60% , 混和剤の使用量一定)

本章では、水セメント比 W/C=60% , 普通骨材コンクリートの混和剤と同量にした溶融スラグ骨材を使用したコンクリートを、普通骨材コンクリート・再生骨材コンクリートと比較し、溶融スラグ骨材を使用したコンクリートの品質を検討した。

2.1 使用材料

(使用骨材の物理的性質は表-1 を参照)

表-2 配合表

配合名	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	水 W	セメント C	単位量 (kg/m ³)							
						細骨材			粗骨材			混和剤	
						NS	RS	MS	NG	RG	MG	AE減水剤	AE助剤
NG-NS	20	60	48	175	292	862	-	-	958	-	-	2.92	2.63
RG-RS						-	703	-	-	851	-	2.92	2.63
MG-NS						862	-	-	-	-	980	2.92	2.63
MG-RS						-	703	-	-	-	980	2.92	2.63
NG-MS						-	-	888	958	-	-	2.92	2.63
RG-MS						-	-	888	-	851	-	2.92	2.63
MG-MS						-	-	888	-	-	980	2.92	2.63

細骨材... MS :溶融スラグ細骨材

NS :普通細骨材

RS :再生細骨材

粗骨材... MG :溶融スラグ粗骨材

RG :再生粗骨材

NG :普通粗骨材

セメント... C :普通ポルトランドセメント

(比重 3.16 , 比表面積 3280cm²/g)

混和剤... AE減水剤・AE剤

練混ぜ水... 上水道水

なお ,再生骨材の原コンクリートは ,PC 枕木廃材 (製造時の材齢 28 日圧縮強度=60N/mm²)である .

2.2 配合

配合条件を W/C=60%として ,混和剤の使用量を普通骨材コンクリート (NG-NS)と同量にして ,表-2 に示す配合を決定した .

本章で使用した配合名は ,使用粗骨材 - 使用細骨材を表している .

2.3 試験項目

フレッシュコンクリート及び硬化後のコンクリートの性質は ,表-3 に示す試験を JIS 等の規格に準拠して実施した .

2.4 フレッシュコンクリートの性質

図-1 に溶融スラグ骨材を使用したコンクリートのスランプ・空気量を示す . 溶融スラグ骨材 (MG ,MS)を使用することによって ,普通骨材コンクリート・再生骨材コンクリートよりスランプと空気量は増加している .

スランプ増加の原因は , 溶融スラグ骨材 (MG ,MS)の表面が普通骨材 (NG ,NS)や再生骨材 (RG ,RS)より滑らかなガラス質であるために保水性がなく ,水を弾く性質があるため ,溶融スラグ粗骨材 (MG)とモルタルおよび溶融スラグ細骨材 (MS)とセメントペーストとの付着が弱くなり ,流動性が高くなったと推測できる . さらに溶融スラグ細骨材 (MS)使用時のスランプが溶融スラグ粗骨材 (MG)使用時より増加している . 一般的にコンクリート中の細骨材がセメントペーストと接する表面積の方

表-1 使用骨材の物理的性質

	細骨材			粗骨材			
	MS	NS	RS	MG	NG	RG	
比重	表乾	2.63	2.51	2.17	2.79	2.68	2.39
	絶乾	2.59	2.43	1.91	2.79	2.67	2.21
吸水率 (%)	1.67	3.45	11.8	0.18	0.50	8.56	
単位容積質量 (t/m ³)	1.55	1.56	1.45	1.63	1.61	1.43	
実積率 (%)	60.1	64.3	75.0	58.6	60.3	65.0	
粗粒率F.M.(%)	3.00	2.94	3.04	6.69	6.77	6.74	
破砕値 (%)	?	?	?	32.2	6.92	21.9	

表-3 コンクリートの試験方法

フレッシュコンクリート		硬化コンクリート	
試験項目	方法	試験項目	方法
スランプ	JIS A 1101	圧縮強度	JIS A 1108
空気量	JIS A 1128	ヤング係数	ASTM C 469
単位容積質量	JIS A 1116	凍結融解	ASTM C 666

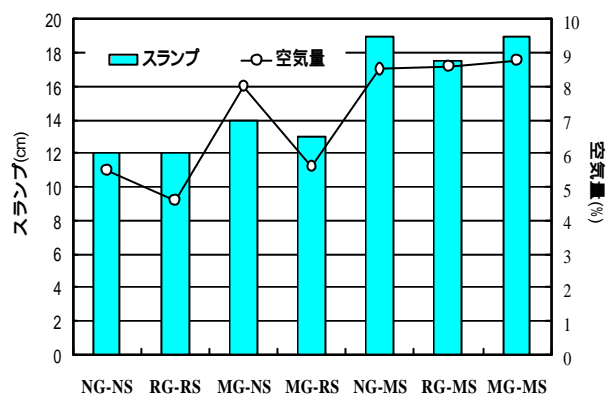


図-1 スランプと空気量

が ,粗骨材とモルタルが接する表面積よりも大きいと言われている . よって , 溶融スラグ粗骨材 (MG)に比べ溶融スラグ細骨材 (MS)の表面積が大きいため ,溶融スラグ細骨材 (MS)使用時に ,より多く水を弾いたためであると考えられる .

通常のコンクリートでは ,スランプを 1cm 増減させるために単位水量を 1.2% 増減させる必要がある . つまり ,溶融スラグ骨材 (MG ,MS)を使用したコンクリートでは ,単位水量や単位セメント量の調節による水セメント比の低減が重要視されることが確認できた .

空気量に関しては既往の研究より溶融スラグ骨材を使用すると ,エントラップドエア (自然に混入する不規則な形状の空気)が増加することが報告されている⁶⁾ .これ

は、溶融スラグ骨材 (MG・MS) が他の骨材に比べて実積率が低いこと空気を行きやすい⁸⁾ことが原因であると考えられる。さらに本実験では、混和剤によって必要以上のエントレインドエア (AE 剤または AE 減水剤) によってコンクリート中に生じた微細な気泡からなる空気を混入し、溶融スラグ粗骨材 (MG) や溶融スラグ細骨材 (MS) の使用時に空気量が大幅に増加した。

以上より、溶融スラグ骨材を使用したコンクリートに対して、今回の混和剤の使用量が過剰であり、混和剤の使用量の調節による空気量の調整が必要であることが確認できた。

2.5 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度

図-2 に 7 種類の配合における各材齢の圧縮強度を示す。溶融スラグ骨材 (MG, MS) を使用することによって、普通骨材コンクリート (NG-NS) または再生骨材コンクリート (RG-RS) より圧縮強度が低下することが確認できる。溶融スラグ骨材 (MG, MS) はガラス質で、骨材自体の表面が滑らかであるため、溶融スラグ骨材 (MG, MS) を使用したコンクリートでは、溶融スラグ粗骨材 (MG) とモルタルとの界面が、もしくは溶融スラグ細骨材 (MS) とセメントペーストとの界面における付着力が弱くなり、圧縮強度の低下を引き起こしていると推察される。さらに溶融スラグ粗骨材 (MG) を使用したコンクリートの強度低下に影響した原因として、溶融スラグ粗骨材 (MG) は破砕値が非常に大きく (2.1 使用材料参照)、粗骨材自体に亀裂が入りやすいことが挙げられる。

溶融スラグ細骨材を使用したコンクリート (NG-MS, RG-MS, MG-MS) は、溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリート (MG-NS, MG-RS) より圧縮強度が低い。2.4 「フレッシュコンクリートの性質」で述べたように、溶融スラグ細骨材を使用したコンクリート (NG-MS, RG-MS, MG-MS) のスランブ・空気量は非常に大きい値を示した。

以上より、流動性が高く必要以上の空気量を混入すると、圧縮強度が低下することが確認できた (図-1 参照)。

(2) ヤング係数

図-3 に各配合のヤング係数と単位容積質量の関係を示す。図-3 より溶融スラグ骨材 (MG, MS) の使用によってヤング係数が増加し、単位容積質量は同程度またはそれ以上の値を示している。溶融スラグ骨材 (MG, MS) が、ガラス質であるために変形しにくく、脆弱である性質と、溶融スラグ骨材 (MG, MS) の比重が影響を及ぼした結果であると推測できる。一般的に圧縮強度とヤング係数は相関関係にあるが、溶融スラグ骨材 (MG, MS) を使用したコンクリートに関しては必ずしも成り立たず、使用骨材の比重によってヤング係数を把握できることが認識できた。

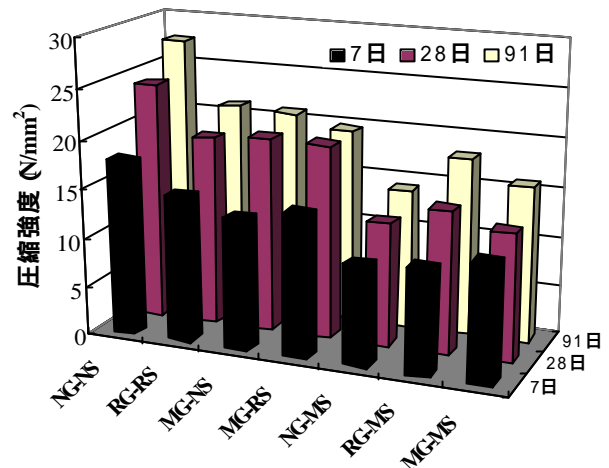


図-2 種類の配合における各材齢の圧縮強度

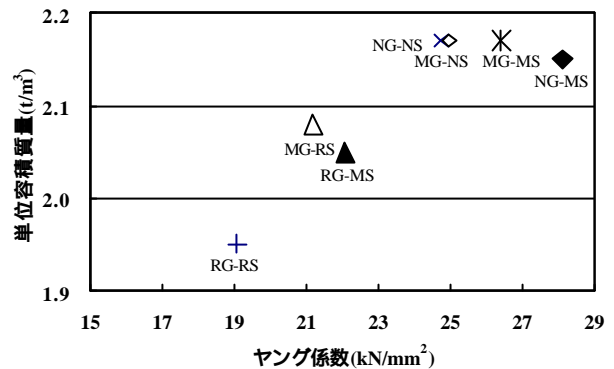


図-3 各配合のヤング係数と単位容積質量の関係

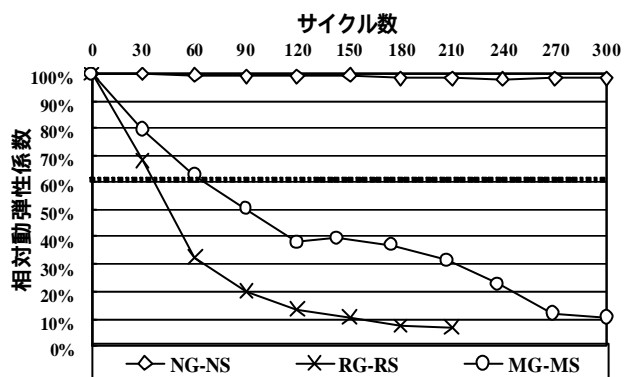


図-4 3 配合における凍結融解試験結果

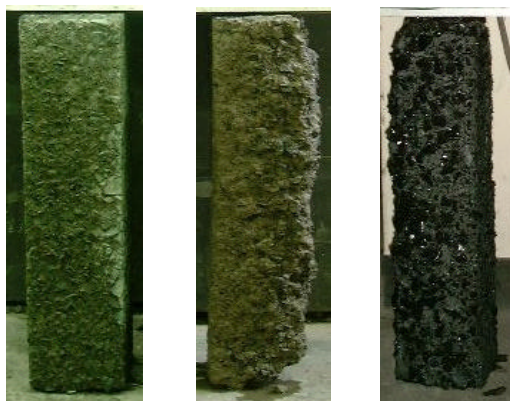
(3) 耐凍害性 (凍結融解抵抗性)

図-4 に 3 配合における凍結融解試験結果を示した。相対動弾性係数とは、凍結融解に対する抵抗性を表す指標であり、相対動弾性係数が 60% 以上であれば耐凍害性に対して安定していると判断することができる。

普通骨材コンクリート (NG-NS) の相対動弾性係数は 300 サイクル終了時に 98.6% であるのに対し、溶融スラグ骨材コンクリート (MG-MS) は再生骨材コンクリート (RG-RS) より良好な結果を示しているが、60~90 サイクルの間に 60% を下回り、最終的には 10.3% と非常に低い値になっている。よって、溶融スラグ骨材コンクリート (MG-MS) の凍結融解に対する抵抗性は極めて低い結果となった。

溶融スラグ骨材コンクリート (MG-MS) の凍結融解に対する抵抗性が低い原因として、連行した空気量と付着力が考えられる。今回の実験では、普通骨材コンクリート (NG-NS) の空気量が 5.5% であるのに対し、溶融スラグ骨材コンクリート (MG-MS) は 8.8% と多くの空気量を含み、その中のエントラップドエアの割合が大きいと考えられる。そのためにコンクリート中の気泡が大きく⁹⁾、¹⁰⁾、吸収した水分による膨張圧も大きくなり、内部にひび割れが生じたと推測できる。さらに溶融スラグ骨材 (MG, MS) は、表面が滑らかなため、普通骨材 (NG, NS) より付着力が弱まり、溶融スラグ粗骨材 (MG) とモルタルとの界面、溶融スラグ細骨材 (MS) とセメントペーストとの界面ではく離が生じやすく、破壊直前に至った (写真-1) と推測される。

以上より、溶融スラグ骨材をコンクリート用骨材として使用するためには、水セメント比を低減させ、さらに混和剤の使用量を調節し、スランブと空気量を調整することが非常に重要であると確認された。



NG-NS RG-RS MG-MS
写真-1 凍結融解試験後の供試体

3. 溶融スラグ骨材を使用したコンクリート その2 (W/C=50%, スランブ・空気量一定)

本章での水セメント比 W/C=50% として、混和剤の使用量を調節し、スランブ・空気量を一定とした溶融スラグ骨材を使用したコンクリートの硬化性状と収縮性状について検討を行なった。

3.1 使用材料

使用材料は、「2.1 使用材料」と同様である。

3.2 配合

本章の研究では、前章で挙げられた問題点を改善するために、単位セメント量を増加させ、水セメント比を削減し、水セメント比 W/C=50% にした。スランブ=12 ± 1.5cm、空気量=4.5 ± 1.5% になるように、混和剤 (AE減水剤・AE剤) の使用量を調節し、試し練りを繰り返した。決定した7種類の配合を表-4に示した。

3.3 試験項目

フレッシュコンクリート及び硬化後のコンクリートの性質は、表-5に示す試験をJIS等の規格に準拠して実施した。

3.4 フレッシュコンクリートの性質

決定した各配合において練り混ぜた結果、表-4に示した通り所要のスランブ・空気量を確保した。そこで、溶融スラグ骨材と普通骨材を使用したコンクリート (MG-NS, NG-MS) は普通骨材コンクリート (NG-NS) と、溶融スラグ骨材と再生骨材を使用したコンクリート (MG-RS, RG-MS) は再生骨材コンクリート (RG-RS) と比較すると、溶融スラグ骨材 (MG, MS) を用いた場合に使用した混和剤量は減少している。これより、溶融スラグ骨材 (MG, MS) の表面が滑らかでガラス質であるため、吸水率が小さく親水性が低い¹¹⁾ことにより、流動性が高くなる傾向が見られた。ゆえに打込み終了後、ブリーディングによる浮き水が多少見られた。また、溶融スラグ骨材 (MG, MS) は普通骨材 (NG, NS) や再生骨材 (RG, RS) より実積率が若干低いためにコンクリート中に空気を連行しやすい⁸⁾と考えられる。

以上より、溶融スラグ骨材をコンクリートに使用する場合は更なる単位水量の減少や水セメント比の低減が可能であることが確認された。

表-5 コンクリートの試験方法

フレッシュコンクリート		硬化コンクリート	
試験項目	方法	試験項目	方法
スランブ	JIS A 1101	圧縮強度	JIS A 1108
空気量	JIS A 1128	曲げ強度	JIS A 1106
単位容積質量	JIS A 1116	引張強度	JIS A 1113
		ヤング係数	ASTM C 469
		乾燥収縮	JIS A 1129

表-4 配合表

配合名	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg m ⁻³)									スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)			
				水		セメント		細骨材			粗骨材					混和剤		
				W	C	NS	RS	MS	NG	RG	MG	AE減水剤				AE助剤		
NG-NS	20	50	48	175	350	806	-	-	933	-	-	3.50	3.15	11.0	5.5	2.15		
RG-RS						-	697	-	-	832	-	-	4.20	3.15	11.5	5.2	2.04	
MG-NS						806	-	-	-	-	971	2.45	2.45	13.5	5.5	2.21		
MG-RS						-	697	-	-	-	971	3.85	3.50	12.0	6.0	2.16		
NG-MS						-	-	845	933	-	-	1.05	2.45	12.0	5.0	2.32		
RG-MS						-	-	845	-	832	-	1.40	2.45	11.0	5.0	2.21		
MG-MS						-	-	845	-	-	971	0.70	1.40	13.0	3.0	2.40		

3.5 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度

図-5 に溶融スラグ骨材と普通骨材を使用したコンクリート(MG-NS, NG-MS)および普通骨材コンクリート(NG-NS)の各材齢における圧縮強度を示した。

溶融スラグ細骨材と普通粗骨材を使用したコンクリート(NG-MS)は、初期材齢(7日)における強度発現が良好であり、普通骨材コンクリート(NG-NS)の圧縮強度よりも大きく、長期強度は普通骨材コンクリート(NG-NS)と同等の圧縮強度を示している。

一方、溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS)は、普通骨材コンクリート(NG-NS)よりも圧縮強度が下回っている。

図-6 に溶融スラグ骨材と再生骨材を使用したコンクリート(MG-RS, RG-MS)および再生骨材コンクリート(RG-RS)の各材齢における圧縮強度を示した。初期材齢での圧縮強度は、3配合とも同程度の値を示している。溶融スラグ細骨材と再生粗骨材を使用しているコンクリート(RG-MS)の長期強度は再生骨材コンクリート(RG-RS)よりも上回っている。吸水率の高い再生粗骨材と吸水率の低い溶融スラグ細骨材との組み合わせが良好であることが判明した。

一方、溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS)は初期材齢以降の強度増進が見られず、再生骨材コンクリート(RG-RS)よりも下回る結果となった。これは再生細骨材の吸水率が非常に高いことが影響していると考えられる。

図-7 に溶融スラグ骨材コンクリート(MG-MS)・普通骨材コンクリート(NG-NS)・再生骨材コンクリート(RG-RS)の各材齢における圧縮強度を示した。溶融スラグ骨材コンクリート(MG-MS)の初期材齢における強度発現は良好であるが、初期以降の材齢では普通骨材コンクリート(NG-NS)より下回っている。しかし再生骨材コンクリート(RG-RS)より長期強度が高いことがわかる。

また図-5 と図-6 から、溶融スラグ細骨材(MS)を使用したコンクリートの方が溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートよりも圧縮強度が高くなることを確認できた。溶融スラグ細骨材(MS)は針状の粒子を多量に含んでいる¹²⁾のに対し、溶融スラグ粗骨材(MG)は丸みを帯びているため、その形状による付着力の低下や粗骨材内部に微細なクラックが生じやすく割れやすく脆い⁶⁾性質であることが影響を及ぼしていると考えられる。

(2) ヤング係数

図-8 に各配合におけるヤング係数と単位容積質量の関係を示す。溶融スラグ骨材(MG, MS)の使用によって、普通骨材コンクリート(NG-NS)・再生骨材コンクリート(RG-RS)以上のヤング係数になり、ヤング係数と単位容積質量と相関関係にある¹³⁾ことが確認できる。

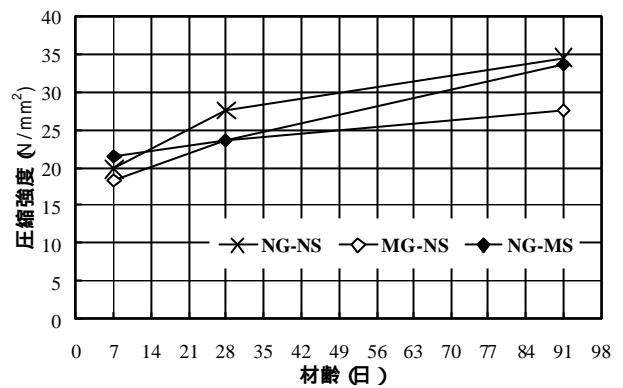


図-5 各材齢における圧縮強度 (NG-NS, MG-NS, NG-MS)

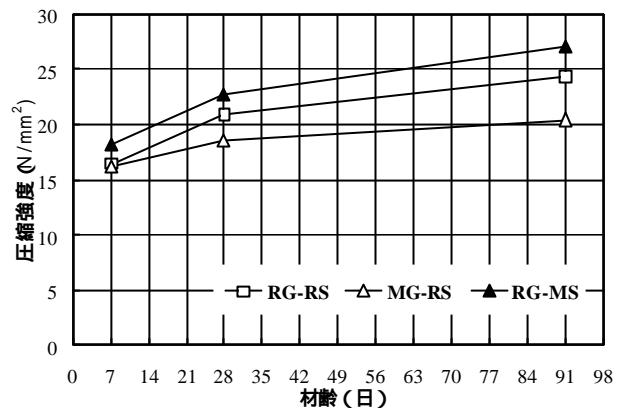


図-6 各材齢における圧縮強度 (RG-RS, MG-RS, RG-MS)

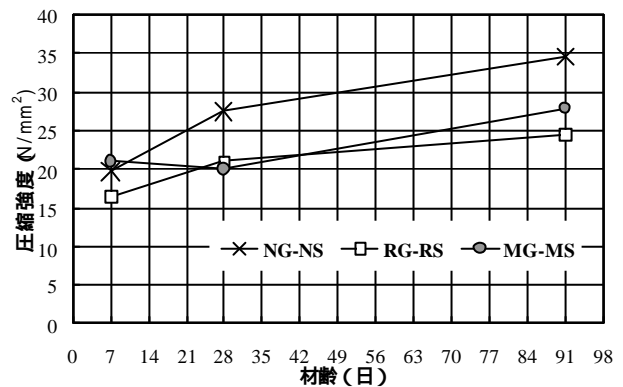


図-7 各材齢における圧縮強度 (NG-NS, RG-RS, MG-MS)

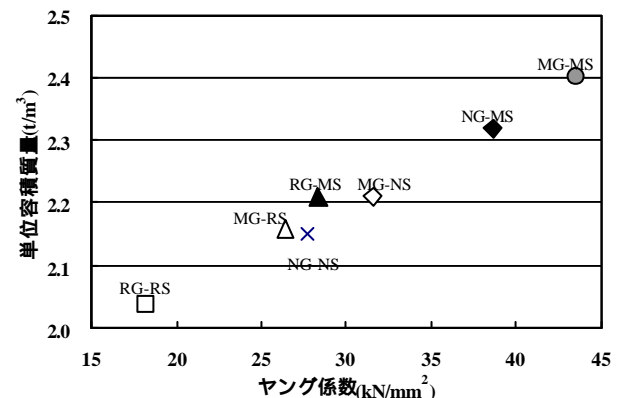


図-8 ヤング係数と単位容積質量の関係

③ 曲げ・圧縮強度

図-9, 10は材齢28日における圧縮強度と曲げ強度および引張強度の関係を示したものである。一般のコンクリートの場合、曲げ強度は圧縮強度の $1/5 \sim 1/8^{14)}$ 、引張強度は $1/10 \sim 1/15^{12)}$ であり、その範囲を図中に示している。

溶融スラグ骨材 (MG・MS)の使用によって、曲げ・引張強度は低下する傾向が見られる。骨材表面の付着力は、圧縮強度への影響と同様に曲げ・引張強度に対しても悪影響を及ぼしていることが推測される。しかし、実験値のバラつきが目立ったため再検討の必要があると考えられる。

溶融スラグ骨材 (MG, MS)を使用したコンクリートの曲げ強度および引張強度と圧縮強度の比は、一般的なコンクリートとほぼ同等の関係にあることが判った。

(4) 収縮性状 (乾燥収縮)

乾燥収縮は、コンクリート中の水分の蒸発に伴い長さや体積が変化する性状で、コンクリート中の水分含有量や使用骨材の吸水率・弾性係数などによって大きく左右される¹⁰⁾現象である。

図-11 に溶融スラグ骨材と普通骨材を使用したコンクリート (MG-NS, NG-MS) および普通骨材コンクリート (NG-NS) の材齢経過に伴う乾燥収縮ひずみを示した。ただし図中の材齢とは、コンクリート打設後標準水中養生を7日間した後乾燥収縮試験を実施してからの経過日数を示している。

溶融スラグ骨材と普通骨材を使用したコンクリート (MG-NS・NG-MS) は、普通骨材コンクリート (NG-NS) に比べて収縮しにくく、長期材齢では普通骨材コンクリート (NG-NS) の収縮ひずみの約 1/2 程度であった。

図-12 に溶融スラグ骨材と再生骨材を使用したコンクリート (MG-NS, NG-MS) および再生骨材コンクリート (RG-RS) の材齢経過に伴う乾燥収縮ひずみを示した。初期材齢では、再生骨材コンクリート (RG-RS) に比べ、溶融スラグ骨材を使用したコンクリート (MG-RS・RG-MS) の収縮ひずみが大きくなっている。材齢経過に伴い、溶融スラグ細骨材を使用したコンクリート (RG-MS)・溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリート (MG-RS)・再生骨材コンクリート (RG-RS) の順に収縮ひずみの変化量が減少し、最終的に材齢 84 日で再生骨材コンクリート (RG-RS) が最も大きく収縮していることがわかる。溶融スラグ骨材 (MG, MS) を使用した際、骨材の吸水率が低いためにモルタルに含まれる水分が多くなり、初期材齢の収縮が比較的大きくなるが、材齢経過に伴い骨材が吸水していた水分を蒸発するために起こった現象であると考えられる。また 3 種類 (MG-NS, NG-MS, RG-RS) の配合では、再生骨材 (RG, RS) を使用しているためにコンクリート自体の吸水率が大きく、普通骨材 (NG, NS) 使用時より収縮ひずみが大きくなっている。

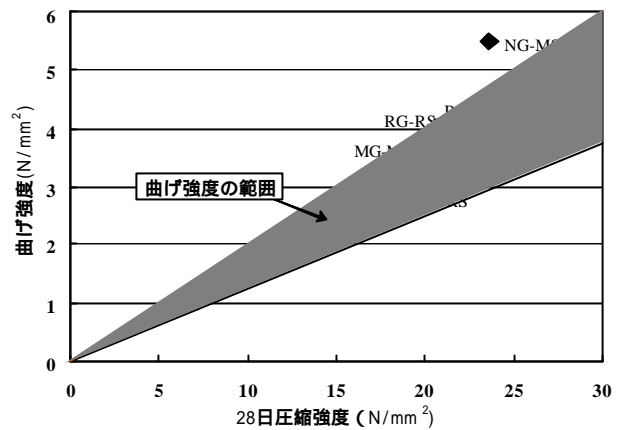


図-9 材齢 28 日における圧縮強度と曲げ強度の関係

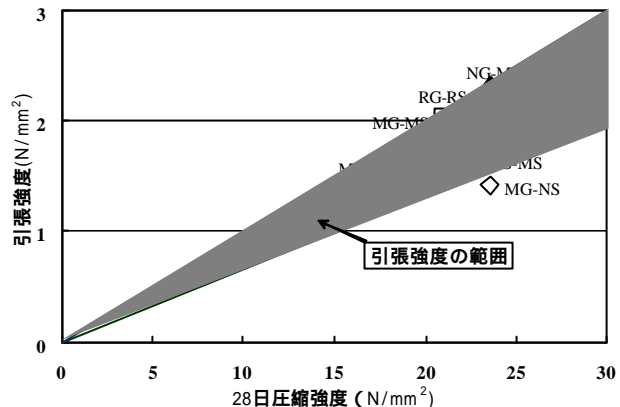


図-10 材齢 28 日における圧縮強度と引張強度の関係

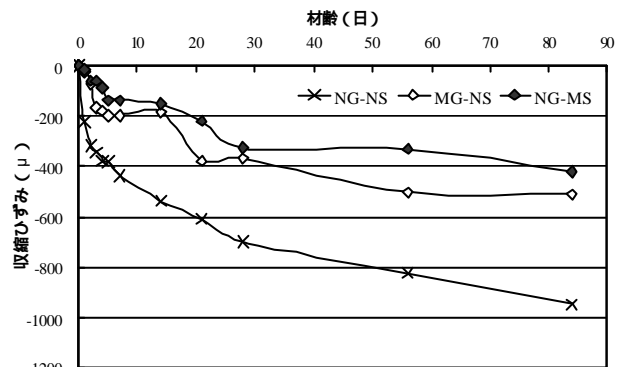


図-11 NG-NS, MG-NS, NG-MS の材齢経過に伴う乾燥収縮ひずみ

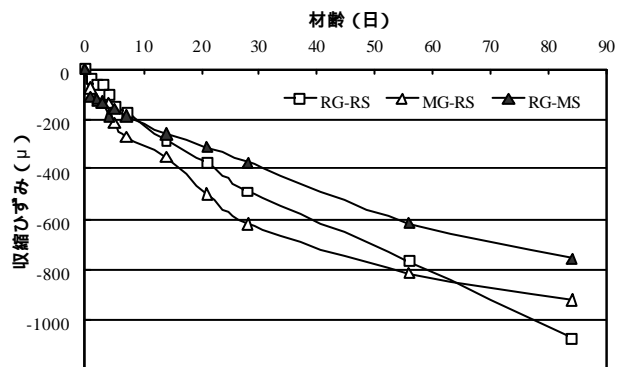


図-12 RG-RS, MG-RS, RG-MS の材齢経過に伴う乾燥収縮ひずみ

図-13 に溶融スラグ骨材コンクリート(MG-MS)・普通骨材コンクリート(NG-NS)・再生骨材コンクリート(RG-RS)の乾燥収縮ひずみと材齢の関係を示した。溶融スラグ骨材コンクリート(MG-MS)は、普通骨材コンクリート(NG-NS)と再生骨材コンクリート(RG-RS)に比べ、初期から長期材齢までの収縮ひずみ量が極めて少なく、最終的には普通骨材コンクリート(NG-NS)と再生骨材コンクリート(RG-RS)の約1/3程度の収縮ひずみであった。

溶融スラグ骨材(MG,MS)は普通骨材(NG,NS)や再生骨材(RG,RS)より非常に吸水率が低い。ゆえに、溶融スラグ骨材(MG,MS)を使用したコンクリートに含まれた供試体自体の吸水量が普通骨材コンクリート(NG-NS)・再生骨材コンクリート(RG-RS)より少なく、材齢の経過に伴って大気中に発散(蒸発)する水分量が減少し、変形しにくい性状になると推測される。

図-14 に各配合の材齢84日での乾燥収縮ひずみとヤング係数の関係を示す。ヤング係数が高いほど、収縮ひずみが小さくなっている。供試体のヤング係数は使用骨材の弾性係数を反映したものと予測されるため、溶融スラグ骨材(MG,MS)は、普通骨材(NG,NS)・再生骨材(RG,RS)より弾性変形が小さい骨材であると言える。よって、溶融スラグ骨材(MG,MS)によってセメントペーストへ働く拘束力が強いことが起因していると考えられる。

したがって、骨材の弾性係数がコンクリートの弾性変形に影響するので、コンクリートのヤング係数と乾燥収縮に良い相関関係がある¹⁰⁾ことがわかる。

以上より、コンクリート用骨材として溶融スラグ細骨材(MS)は有効利用の可能性があるが、溶融スラグ粗骨材(MG)の使用は現段階では困難であり、品質を見直す必要があることが確認された。

4. 溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの品質改善

本章では、溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの水セメント比を低減させ、品質改善の検討を行なった。同時に、第3章と第4章の結果も比較・評価した。

4.1 使用材料

使用材料は、「2.1 使用材料」と同様である。ただし、溶融スラグ細骨材(MS)は使用していない。

4.2 配合

前章の配合における混和剤の使用量およびスランブ・空気量を表-6 に示した。溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリート(MG-NS, MG-RS)の混和剤は、普通

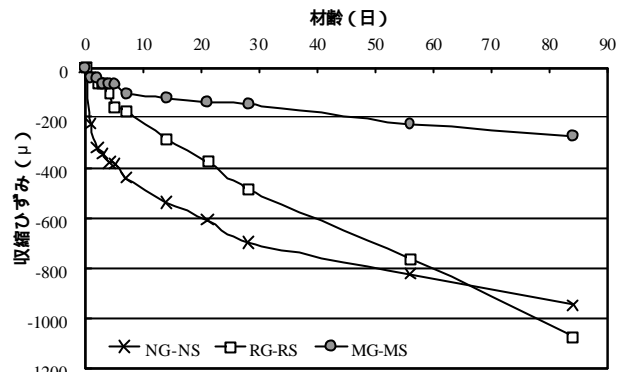


図-13 NG-NS, RG-RS, MG-MS の材齢経過に伴う乾燥収縮ひずみ

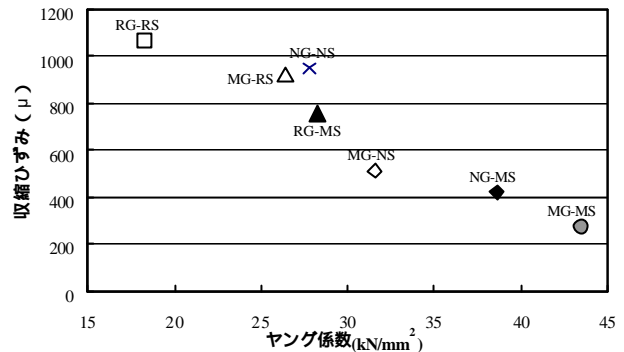


図-14 材齢84日での乾燥収縮ひずみとヤング係数の関係

表-6 前章の配合における混和剤の使用量およびスランブ・空気量

配合名	混和剤		スランブ (cm)	空気量 (%)
	AE減水剤	AE助剤		
NG-NS	3.50	3.15	11.0	5.5
RG-RS	4.20	3.15	11.5	5.2
MG-NS	2.45	2.45	13.5	5.5
MG-RS	3.85	3.50	12.0	6.0

骨材コンクリート(NG-NS)より少ない使用量であるのに対してスランブは増加している。また溶融スラグ骨材(MG,MS)を使用した際にブリーディングが見られたため、本章での目標スランブを普通骨材コンクリート(NG-NS)の結果である11cmと設定した。混和剤を水セメント比W/C=50%時と同量使用し、単位水量の削減によって水セメント比W/Cを減少させ、試し練りを行なった。試し練りの結果、溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートに関する問題点を改善するために、単位水量4%の減少による水セメント比W/Cを2%削減し、水セメント比W/C=48%にした配合を決定した(MG-NS48, MG-RS48)。決定した配合と本章までの配合を表-7 に示した。

本章で使用した配合名は、使用粗骨材 - 使用細骨材 水セメント比 W/Cを表している。

表-7 配合表

配合名	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
				水 W	セメント C	細骨材			粗骨材			混和剤	
						NS	RS	MS	NG	RG	MG	AE減水剤	AE助剤
NG-NS60	20	60	48	175	292	752	-	-	870	-	-	2.92	2.63
NG-NS50		350			794	-	-	919	-	-	3.50	3.15	
MG-NS60		292			752	-	-	-	-	906	2.92	2.63	
MG-NS50		350			794	-	-	-	-	956	2.45	2.45	
MG-NS48		48			168	350	803	-	-	-	967	2.45	2.45
RG-RS60		60			292	-	650	-	-	776	-	2.92	2.63
RG-RS50		50		175	350	-	687	-	-	819	-	4.20	3.15
MG-RS60		60		292	-	650	-	-	-	906	2.92	2.63	
MG-RS50		50		175	350	-	687	-	-	956	3.85	3.50	
MG-RS48		48		168	350	-	694	-	-	967	3.85	3.50	

4.3 試験項目

試験項目は、「3.3 試験項目」と同様である。なお、乾燥収縮試験は実施していない。

4.4 フレッシュコンクリートの性質

表-8 に普通骨材コンクリート(NG-NS60, NG-NS50)および溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50, MG-NS48), 再生骨材コンクリート(RG-RS60, RG-RS50)および溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50, MG-RS48)のスランブ・空気量および配合上の相違点(単位水量 W, 単位セメント量 C, 混和剤の使用量)を示した。

普通骨材コンクリート(NG-NS60, NG-NS50)は、水セメント比 W/C を 10% 減少させた際に、使用した混和剤量を増加させて所要のスランブ・空気量を確保している。これに対し、溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50)は水セメント比 W/C を 10% 減少させても水セメント比 W/C=60% (MG-NS60) よりも少ない混和剤量で同等のスランブを得ている。

さらに溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS50, MG-NS48)では、単位水量を 4% 低減させたことによって、スランブが 2.5cm 減少している。

再生骨材コンクリート(RG-RS60, RG-RS50)でも、水セメント比 W/C を 10% 減少させた際に同程度のスランブ・空気量を得るために、使用した混和剤量を増加させた。溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50)においても同様のことが言える。これは、溶融スラグ粗骨材(MG)の使用による保水性の低下が及ぼす影響よりも非常に高い吸水率である再生細骨材の使用による影響が大きいことが原因であると考えられる。

また溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS50, MG-RS48)では、単位水量を 4% 低減させたことによって、スランブが 1.5cm 減少した。

一般的なコンクリートでは、単位水量の 1.2% の増減によってスランブは 1cm 増減する。よって、溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートでは、大幅に単位水

表-8 各配合のスランブ 空気量および配合上の相違点

配合名	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)		スランブ (cm)	空気量 (%)
			AE減水剤	AE助剤		
NG-NS60	175	292	2.92	2.63	12.0	5.5
NG-NS50		350	3.50	3.15	11.0	5.5
MG-NS60		292	2.92	2.63	14.0	8.0
MG-NS50	350	2.45	2.45	13.5	5.5	
MG-NS48	168	350	2.45	2.45	11.0	4.5
RG-RS60	175	292	2.92	2.63	12.0	4.6
RG-RS50		350	4.20	3.15	11.5	5.2
MG-RS60		292	2.92	2.63	13.0	5.6
MG-RS50		350	3.85	3.50	12.0	6.0
MG-RS48	168	350	3.85	3.50	10.5	5.0

量を低減させても流動性に与える影響が少ないことが判明した。

以上より、溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートでは、単位水量の低減によって水セメント比を減少させることはフレッシュ性状に対して有効的であることが認識できた。

4.5 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度

図-15 に普通骨材コンクリート(NG-NS60, NG-NS50)および溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50, MG-NS48)の各材齢における圧縮強度を示した。

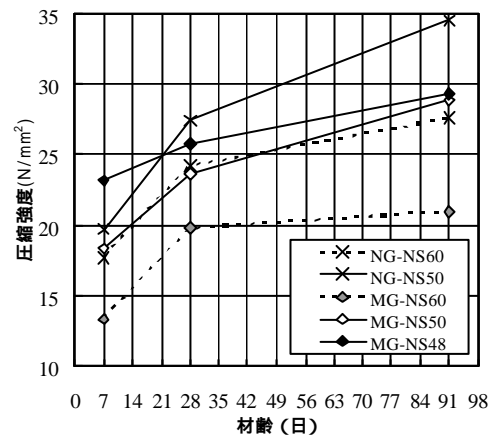


図-15 普通骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリートの各材齢における圧縮強度

溶融スラグ粗骨材および普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50, MG-NS48)では水セメント比 W/C の低減により, MG-NS50 は NG-NS60 と同程度の圧縮強度を示し, MG-NS48 は MG-NS60 の圧縮強度を上回っている. よって水セメント比 W/C の低下による圧縮強度の改善が若干認められる.

表-9 に普通骨材コンクリート(NG-NS60, NG-NS50)および溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50, MG-NS48)の圧縮強度伸び率を示した. 設計基準強度である材齢 28 日圧縮強度を 100% として, 材齢 7 日・91 日での圧縮強度の発現を把握する目的である.

普通骨材コンクリート(NG-NS60, NG-NS50)は, 水セメント比 W/C の低減に伴う初期(材齢 7 日)強度の発現に変化が見られないが, 材齢 28 日~91 日にかけての強度伸び率が增加していることがわかる.

一方, 溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50, MG-NS48)では水セメント比 W/C の低減に伴って, 初期材齢(材齢 7 日)での強度発現が大きくなり, 長期材齢(材齢 91 日)にかけての伸び率は普通骨材コンクリート(NG-NS60, NG-NS50)より小さくなっている.

図-16 に再生骨材コンクリート(RG-RS60, RG-RS50)および溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50, MG-RS48)の各材齢における圧縮強度を示した.

図-16 において W/C=60% の配合(RG-RS60 と MG-RS60)と W/C=50% の配合(RG-RS50 と MG-RS50)をそれぞれ比較すると, 初期強度(材齢 7 日)での差は現れていないが, 材齢 28 日以降に再生骨材コンクリート(RG-RS60, RG-RS50)が上回る結果となっている.

溶融スラグ粗骨材および再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50, MG-RS48)では水セメント比 W/C を低減することにより, 圧縮強度が増加し, MG-NS48 は MG-NS60 の圧縮強度を上回った. よって水セメント比 W/C の低減による圧縮強度の改善が確認できた.

表-10 に再生骨材コンクリート(RG-RS60, RG-RS50)および溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50, MG-RS48)の圧縮強度伸び率を示した.

再生骨材コンクリート(RG-RS60, RG-RS50)は, 水セメント比 W/C の低減による初期(材齢 7 日)強度の発現に変化が見られないが, 材齢 28 日~91 日における強度伸び率が增加していることがわかる.

一方, 溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50, MG-RS48)では水セメント比 W/C の低減に伴って, 初期材齢(材齢 7 日)で

の強度発現が大きくなり, 長期材齢(材齢 91 日)にかけての強度伸び率は非常に小さい.

溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートは, 初期材齢において, 水セメント比の低減によるモルタルの自己収縮力が強化されるため溶融スラグ粗骨材(MG)の使用による付着力の弱さを若干補うが, 材齢の経過に伴い溶融スラグ粗骨材(MG)の脆弱さが顕著に現れた結果と推測される.

以上のことから, 溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートの水セメント比を低減させることによって, 圧縮強度は多少改善されるが, 材齢経過に伴う強度伸び率は非常に小さいことが確認された.

表-9 普通骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度伸び率

配合名	圧縮強度伸び率		
	7日	28日	91日
NG-NS60	73%	100%	114%
NG-NS50	72%	100%	126%
MG-NS60	67%	100%	106%
MG-NS50	78%	100%	122%
MG-NS48	90%	100%	114%

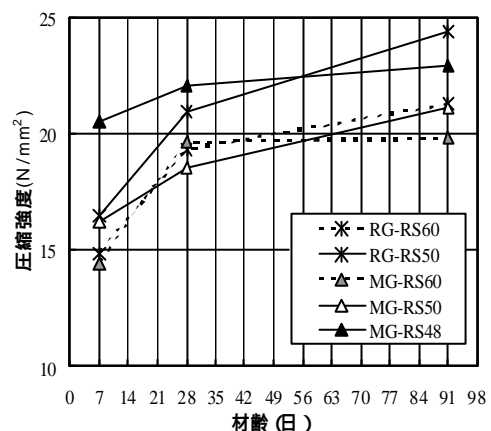


図-16 再生骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度

表-10 再生骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度伸び率

配合名	圧縮強度伸び率		
	7日	28日	91日
RG-RS60	77%	100%	110%
RG-RS50	78%	100%	117%
MG-RS60	73%	100%	101%
MG-RS50	87%	100%	114%
MG-RS48	93%	100%	104%

② ヤング係数

図-17 に普通骨材コンクリート(NG-NS60, NG-NS50)および溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50, MG-NS48)の, 図-18 に再生骨材コンクリート(RG-RS60, RG-RS50)および溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50, MG-RS48)の 28 日圧縮強度とヤング係数の関係を示した。

図-17 より溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS60, MG-NS50, MG-NS48)は, 水セメント比の低減によるモルタル部分の剛性の増加と変形しにくいという溶融スラグ粗骨材自体の性質が影響を及ぼし, 28 日圧縮強度およびヤング係数ともに増加している。これより, 水セメント比の低減に伴う材齢 28 日の圧縮強度とヤング係数が, 相関関係になっていることが確認できた。

図-18 より溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS60, MG-RS50, MG-RS48)では, 水セメント比の低減に伴い, ヤング係数は増加しているが, 28 日圧縮強度は変化していない。低品質な再生細骨材の圧縮強度に対して及ぼす影響が強く, 供試体の剛性に関連するヤング係数に使用骨材の剛性が関係するためと考えられる。よって, 溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS)では, 溶融スラグ粗骨材(MG)の使用による 28 日圧縮強度への影響は無いが, ヤング係数が高くなり, さらに水セメント比の低減によってもヤング係数が高くなることが確認できた。

③ 曲げ・引張強度

図-19 に普通骨材コンクリート(NG-NS50)および溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS50, MG-NS48)の, 図-20 に再生骨材コンクリート(RG-RS50)および溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS50, MG-RS48)の材齢 28 日における圧縮強度と曲げ・引張強度の関係を示した。なお, W/C=60% のコンクリートの曲げ・引張強度試験は実施しなかったため, W/C=50%・48% のコンクリートのみの記載となる。

図-19 において溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS50, MG-NS48)は, 水セメント比 2% 分の低減による曲げ強度への影響は見られませんが, 引張強度は増加する傾向が見られる。しかし溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリート(MG-NS50)の水セメント比を低減させても普通骨材コンクリート(NG-NS50)の約 8 割の曲げ・引張強度に留まっている。

図-20 において溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリート(MG-RS50, MG-RS48)は, 水セメント比の低減によって曲げ強度が増加し, 引張強度が低下

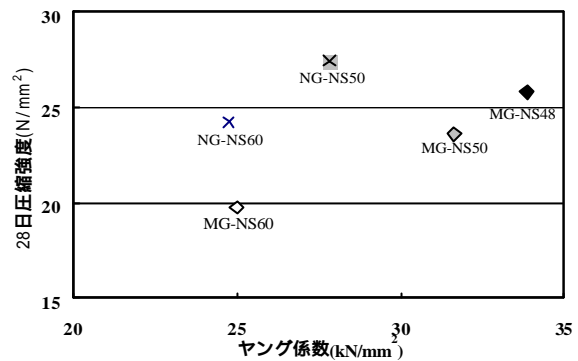


図-17 普通骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリートの材齢 28 日圧縮強度とヤング係数

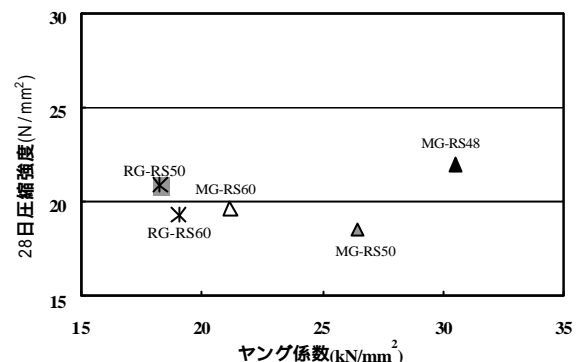


図-18 再生骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリートの材齢 28 日圧縮強度とヤング係数

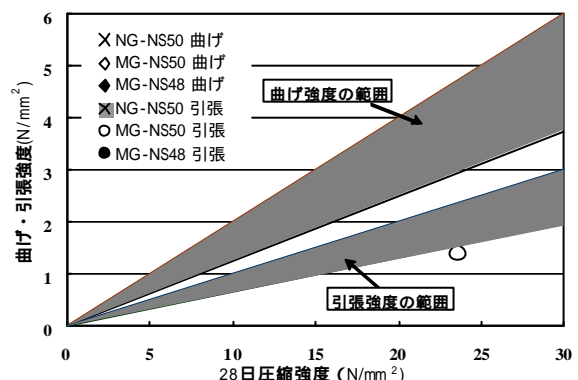


図-19 普通骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と普通細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度と曲げ・引張強度の関係

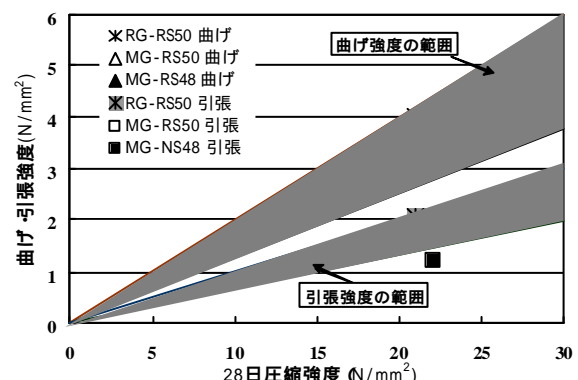


図-20 再生骨材コンクリートおよび溶融スラグ粗骨材と再生細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度と曲げ・引張強度の関係

している。通常、曲げ強度と引張強度の関係には相互作用があり¹⁴⁾、曲げ強度と引張強度が相反する結果になることは考えがたい。また MG-RS48 は、再生骨材コンクリート(RG-RS48)よりも曲げ強度が低く、それ以上に引張強度が低い。

図-19, 20 より溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートに対して水セメント比 W/C を 2% 低減させても曲げ・引張強度への影響は少なく、むしろ溶融スラグ粗骨材(MG)による付着力の低下や低品質な再生細骨材(RS)の使用による影響が大きい。曲げ強度および引張強度の結果にバラつきが見られた。しかし溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートの曲げ強度及び引張強度と圧縮強度の比は、ほぼ通常のコンクリートと同じ範囲内に収まっていることが確認できた。

以上より、溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートに対して、水セメント比 W/C の低減による曲げ強度および引張強度の強度改善を図ることはできなかった。

本章より溶融スラグ粗骨材(MG)を使用したコンクリートは強度面での品質に問題があり、現状での溶融スラグ粗骨材(MG)のコンクリート用骨材としての実用は困難であると言える。

5. 結論

5.1 まとめ

- 溶融スラグ骨材をコンクリート用骨材として使用する場合は、水セメント比や混和剤の使用量を調節し、所定のスランプ・空気量を得ることが必要である。
- 溶融スラグ細骨材と普通粗骨材を使用したコンクリートの各強度は、普通骨材コンクリートと同程度またはそれ以上であり、有効利用が可能であると考えられる。構造物への利用の可能性もある。
- 溶融スラグ細骨材と再生粗骨材を使用したコンクリートは、再生骨材コンクリートより良好な品質を確保したので、再生骨材コンクリートより有効的な利用が可能である。
- 溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの各強度は、普通骨材コンクリートや再生骨材コンクリートより劣っており品質の確保が難しいため、現段階での溶融スラグ粗骨材の利用は困難である。溶融スラグ粗骨材には、骨材自体が脆いことや丸みを帯びている形状等の問題点が挙げられるため、今後は骨材寸法や表面形状を変化させて利用する必要性が感じられる。

5.2 おわりに

循環型社会の構築へ向けてコンクリートの在り方を考え直す必要があると思われる。コンクリートに対して品質や耐久性を重視し、さらに向上させることが今までの研究の目的であった。これからは、要求される性能が低くても安全性だけを満足すれば十分であるといった部分には再生品を使用すべきである。環境負荷を低減させるためにも、低品質なコンクリートを使用せざるを得ない時代になっており、極力リサイクル骨材(溶融スラグ骨材・再生骨材等)によって施工するといった心がけが大切である。

本研究では、溶融スラグ骨材を使用したコンクリートに対する力学的性質と収縮性状を把握し、限定された使用用途を提案したため、コンクリートの耐久性に関する制限が無い条件で論じた結論であった。この先も溶融スラグ骨材の適正かつ効率的に利用できるための技術等の調査研究を継続的に進める必要があると当然考えられる。今後溶融スラグ骨材の研究・技術開発と実績データを挙げていくことによって、溶融スラグ骨材のコンクリート材料としての経済的優位性、構造材料としてのコンクリートの優位性、構造物としての優位性などを付与し、溶融スラグ骨材の活用を実現することが望まれている。

謝辞：本研究を行うにあたってコンクリート研究室の小玉克巳教授・栗原哲彦講師には、終始温かいご指導を頂きまして、ここに深く感謝いたします。材料提供等に協力して下さった横浜市環境事業局金沢工場、立石建設株式会社、株式会社八洋コンサルタントの皆様にもここに謝意を表します。また、本研究に協力して下さった平成12～14年度在籍のコンクリート研究室の皆さんにも心から感謝いたします。最後に、私の大学院生活を許し、支えてくれた父と母に感謝します。本当に有難うございました。

【参考文献】

- 1) 環境省：環境省告示第34号，2001.5.7
- 2) 社団法人 日本産業機械工業会：「エコスラグ情報コーナー」，<http://www.jsim.or.jp/>
- 3) 株式会社 泰成エンジニアリング：「環境インフォメーション，Vol.48」，2001.6
- 4) 旧厚生省：「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の実施の促進について」，1998.3.27
- 5) 七都府県市廃棄物問題検討委員会：「廃棄物処理に係る新技術の検討に関する調査」，1999.11
- 6) 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

- 7) 粕谷菜穂・小玉克巳・栗原哲彦：「熔融スラグ骨材を用いたコンクリートの性状」,第 29 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集,2002.3
- 8) 高田聡恵・Nasir Shahid・上原匠・糸山豊・梅原秀哲：「都市ゴミ熔融スラグを混入したコンクリートの膨張に関する研究」,土木学会第 57 回年次学術講演論文集,2002.9
- 9) 小林一輔・和泉意登志・出頭圭三・睦好宏史：「図解コンクリート事典」,オーム社,2001.12.1
- 10) 田澤榮一・佐伯昇：「コンクリート工学 微視構造と材料特性」,技報堂出版,1998.10
- 11) 北辻政文・田中礼治・遠藤孝夫・鳴海繁実：「都市ごみガス化熔融スラグのコンクリート用細骨材としての利用」,コンクリート工学論文集,Vol.13, No.2,2002.5
- 12) 錦織和紀郎・菅原邦彦・野口孝俊・小河洋夫：「焼却灰熔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.1,1999
- 13) 中村則清・鈴木澄江・池永博威：「熔融スラグ骨材を使用したコンクリートの基礎物性に関する実験研究 その 2.力学特性及び凍結融解抵抗性」,日本建築学会大会学術講演梗概集,2001.9
- 14) 田澤榮一ら：「エース コンクリート工学」,朝倉書店,2002.4

APPLICABILITY OF THE CONCRETE USING ASH MELTING SLAG

Naho KASUYA

The efforts toward the creation of a recycling society are presently required, so molten slag was developed to assist in trying to prolong the life of final dumping place. It is hoping for effective use of molten slag, because there is projected to environmental burden of generate enormous quantities in future. In consequence, a lot of research and technological development are being reported, it finds difficult to guarantee the quality of molten slag as aggregate of concrete. As for the present condition, there is little practical use to molten slag for concrete.

Experimental studies were carried out in aiming for utilization of molten slag as coarse and fine aggregate for concrete. Results obtained in the studies were ascertainment that it is possible for molten slag as fine aggregate to put in practical use, but utilization of molten slag as coarse aggregate can't use for concrete.