

論文 ごみ熔融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する基礎的研究

河野 伊知郎^{*1}・中嶋 清実^{*2}・齊藤 和秀^{*3}・林 孝明^{*4}

要旨: 本研究は豊田市渡刈クリーンセンターにて製造されたごみ熔融スラグを川砂と置換し、細骨材として用いた場合、その置換率がブリーディング、圧縮強度、凍結融解抵抗性等にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的として行ったものである。実験結果から、本研究で用いた配合ではスラグ置換率が高くなるに従ってブリーディング率が高くなるが置換率が50%であっても4.2%未満であること、スラグ置換率が50%までについては大きな圧縮強度の低下を生じないこと、細骨材のスラグ置換率が50%までならば凍結融解に対して高い抵抗性を有していること、等の知見を得た。

キーワード: ごみ熔融スラグ、ブリーディング、破砕値、圧縮強度、相対動弾性係数、質量減少率

1. はじめに

日本では毎年、膨大な量の生活廃棄物や事業系廃棄物が排出されており、その多くがクリーンセンターなどで焼却処分されている。しかし、焼却処理の際に発生する焼却灰などの廃棄物を埋め立てる最終処分場が不足してきており大きな社会問題となっている。これらの廃棄物を有効利用することにより埋立て処理しなければならない廃棄物を減らすことは、資源の循環型社会を構築していくと言う点においても非常に重要である。

さらに近年、建設業界では長年のインフラ整備によりコンクリート構造物が多く建設され、国内の天然骨材は年々減少しており、骨材の調達難が取り沙汰されている。また、生態系の保護という面からも天然骨材採取による環境破壊につながる行為には規制がかけられている。

このような現状の中で、近年、廃棄物として最終処分場で処理されてきた焼却灰を熔融処理することによりごみ熔融スラグ（以後、熔融スラグと略す）を製造し、これを建設資材として利用する試みが行われている¹⁾。熔融スラグをコンクリートの骨材として有効利用するために、多くの研究者が熔融スラグの物性値やコンクリートに混入した際の性状に関する研究を行っている^{2)~7)}。しかしながら、これまでの研究では流動床式ガス化熔融炉によって製造された熔融スラグの研究、砂との高置換率のコンクリートの諸性状および熔融スラグ細骨材の強度を評価した研究は少ない⁸⁾。

豊田市では2007年4月から渡刈クリーンセンターが稼働しているが、このクリーンセンターで製造されている熔融スラグを有効利用する場合のデータがないことから、筆者らは数年前から基礎的研究を行っている⁹⁾。研

究では、コンクリートの水セメント比および熔融スラグの混入量を変化させて種々の試験を行うとともに、熔融スラグの骨材強度を評価する方法がなかったため、BS812を応用した破砕試験を実施し、他のクリーンセンターで製造されたごみ熔融スラグと比較を行った。

2. 実験概要

2.1 熔融スラグ

本研究で用いた熔融スラグは豊田市渡刈クリーンセンターにて廃棄物を高温で燃焼させた後、水砕により冷却固化することにより製造された熔融スラグである。豊田市渡刈クリーンセンターでは流動床式ガス化熔融炉を採用しており、1200~1300℃以上の高温で熔融している。

図-1に豊田市渡刈クリーンセンターにて製造された製造時期が異なる熔融スラグ Lot No.1(2007年5月)、Lot No.2(2009年5月)、Lot No.3(2011年4月)の粒度曲線を示す。この図から製造時期により粒度にばらつきはあるが、大きな差異は認められない。また、ふるい目の寸法0.6mmにおいて土木学会により定められた標準粒度範囲の下限値を下回るものもあるが、その値は非常に小さかったため細骨材と置換しても問題ないと判断した。

2.2 使用材料

本研究で用いた使用材料は以下の通りである。

セメント：普通ポルトランドセメント、粗骨材：静岡県天竜川産川砂利(最大寸法25mm, 表乾密度2.61g/cm³, 吸水率0.77%, 粗粒率6.44), 細骨材：静岡県天竜川産川砂(表乾密度2.63g/cm³, 吸水率1.03%, 粗粒率2.55), 熔融スラグ：豊田市渡刈クリーンセンターで製造されたごみ熔融スラグ、混和剤：リグニンスルホン酸塩系 AE

*1 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科教授 工学博士 (正会員)

*3 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部コンクリートグループ (正会員)

*4 豊田市 環境部 清掃施設課 (非会員)

減水剤，である。なお，熔融スラグを使用したコンクリートには適宜，消泡剤を使用した。

また，熔融スラグ骨材の粒度分布，強度を比較するために豊田市渡刈クリーンセンター以外の4つのクリーンセンターで製造された熔融スラグを用いた。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合は水セメント比 (W/C) を 40%，50% および 55% の 3 種類とした。コンクリートに混入した熔融スラグは全て豊田市渡刈クリーンセンターにて製造された熔融スラグである。スラグ置換率とは細骨材をスラグで置き換えた割合を示す値であり，スラグの質量を細骨材の総質量で除した値を百分率で表したものである。ブリーディング試験や強度試験等ではスラグ置換率を 0% (無置換)，10%，30%，40%，50% とした。ただし，ブリーディング試験の W/C50% についてはスラグ置換率 100% (全置換) のコンクリートを用いた試験も実施した。また，凍結融解試験については水セメント比を 50% とし，スラグ置換率を細骨材の 0%，30%，50%，70%，90%，100% (全置換) とした。なお，コンクリートの配合条件は目標スランプ値を $12 \pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。表-1 にコンクリートの基本配合 (スラグ置換率 0% の配合) を示す。この表の細骨材を種々の置換率で熔融スラグと置換する。ここで，表中の WC40，WC50 および WC55 はそれぞれ，水セメント比 40%，50% および 55% のコンクリートを示している。

2.4 試験項目および方法

試験項目は，骨材のふるい分け試験 (JIS A 1102)，破碎試験 (BS812 を応用して実施)，ブリーディング試験 (JIS A 1123)，圧縮強度試験 (JIS A 1108)，静弾性係数試験 (JIS A 1149)，割裂引張強度試験 (JIS A 1113)，凍結融解試験 (JIS A 1148) である。

ここで，破碎試験は熔融スラグ骨材の強度を知るために行った試験である。BS812 に規定された破碎試験は粗骨材を対象とした試験であるため，そのまま細骨材に用いることはできない。そこで，細骨材に均等に荷重が作用するように内径が $\phi 50\text{mm}$ の特注の鋼鉄製のシリンダーとプランジャーを用いて実験することにした。以下にその試験方法を記す。

始めに，スラグを 105°C で炉乾燥した後，デシケーター

内で常温となるまで放置する。その後，5mm のふるいを通して 2.5mm に留まるスラグ I と，2.5mm を通過し 1.2mm に留まるスラグ II を用意する。次にふるい分けた 2 種類のスラグ I，II をそれぞれ所定の計量容器 ($\phi 115\text{mm} \times 180\text{mm}$) に投入し， $\phi 9\text{mm}$ の鉄棒を用いて 1 層 15 回で突き固めた後，余分なスラグをエッジで削り取る。そのスラグの質量 ($M_{I,II}$) を計量した後，スラグを $\phi 50\text{mm}$ の鋼製シリンダーに移し，鋼製のプランジャーを上部から差し込込み，10kN の荷重を載荷しスラグを破碎する。その後，シリンダー内のスラグを 2.5mm および 1.2mm のふるいで再度ふるい分け，ふるいを通したスラグの質量 ($m_{I,II}$) を計測し，載荷前の質量 ($M_{I,II}$) で割り，破碎値とする。破碎値 I は 2.5mm でふるったスラグの破碎値，破碎値 II は 1.2mm でふるったスラグの破碎値を示

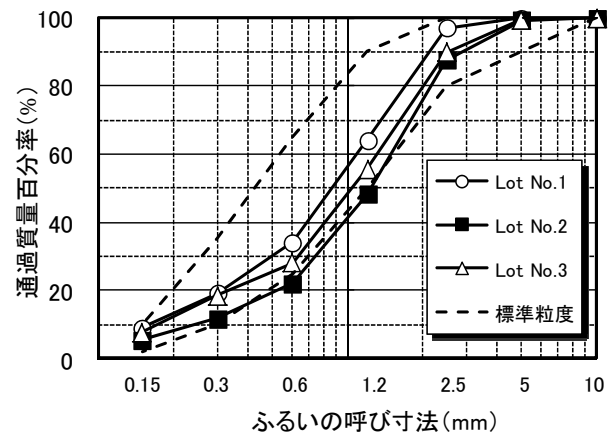


図-1 豊田市渡刈クリーンセンターで製造された熔融スラグの粒度曲線



写真-1 破碎試験の試験状況

表-1 コンクリートの基本配合

コンクリートの種類	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 (g/m^3)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
WC40	40	182	455	695	952	4550
WC50	50	177	354	769	969	3620
WC55	55	174	316	806	978	3050

している。以下に破砕値の計算式を式(1)に示す。

$$\text{破砕値 I, II} = \frac{m_{1,II}}{M_{1,II}} \times 100(\%) \quad (1)$$

この値が低いほど骨材の強度が高いことになる。写真-1に破砕試験の試験状況を示す。

実験に用いた供試体は圧縮強度試験には円柱供試体(φ100×200mm)、割裂引張強度試験には円柱供試体(φ150×300mm)、凍結融解試験には角柱供試体(100×100×400mm)を用いた。なお、供試体の養生は恒温恒湿室内の水温20℃の水槽にて水中養生とした。

3. 実験結果および考察

3.1 熔融スラグの物理的性質

豊田市渡刈クリーンセンターにて製造された熔融スラグとその他の都市のクリーンセンターで製造された熔融スラグの物性値を比較するために熔融スラグの物性値等の調査を行った。

表-2に静岡県天竜川産川砂および各地のクリーンセンターにて製造された熔融スラグの物性値を示す。ここで、表中では天竜川産川砂をRS、豊田市渡刈クリーンセンターで製造された熔融スラグをスラグT、それ以外のクリーンセンターにて製造されたスラグをスラグA~Dと表す。この表より、全ての熔融スラグの吸水率は川砂と比較すると非常に低い値となっている。これは本実験で用いた熔融スラグの粒子表面がガラス質であるためである。吸水率と密度に関係性が見られないのは熔融方法が異なるためと考えられる。表乾密度および実積率については川砂と各種スラグとは比較的近い値を示している。粗粒率については、熔融スラグにより値に差異が生じている。これらの値からスラグTは今回用いた熔融スラグの中では川砂(RS)に近い値であることがわかった。

図-2にふるい分け試験より得られた5種類の熔融スラグ(スラグT, A~D)の粒度分布を示す。この図よりスラグCはふるい目の寸法1.2mm以下で標準粒度範囲の下限値から大きく逸脱しているが、それ以外の熔融スラグの粒度は標準粒度の範囲に近い値を示していることがわかる。

図-3に本研究で用いた川砂(RS)と5種類の熔融スラグ(スラグT, A~D)の破砕値を示す。破砕値Iにつ

いてはスラグT, A, Bでは43.5%, 40.5%, 31.1%となっており、川砂よりも20%~30%高い値を示している。スラグC, Dの破砕値Iはどちらも70%以上となっており、川砂よりも50%以上の高い値を示している。次に、破砕値IIについてはスラグT, A, Bでは18.0%, 18.5%, 23.5%となっており、川砂よりも6%~10%高い値を示している。スラグC, Dについては55%以上となっており、川砂よりも40%以上の高い値と示している。このように今回用いた全てのスラグにおいて破砕値Iは破砕値IIよりも高い値を示した。

これらの実験結果から各クリーンセンターで製造された熔融スラグは製造方法が異なることから物性値、粒度分布、骨材強度などに差異があることが確認された。

3.2 ブリーディング試験

図-4にW/C 50%のブリーディング試験結果を示す。

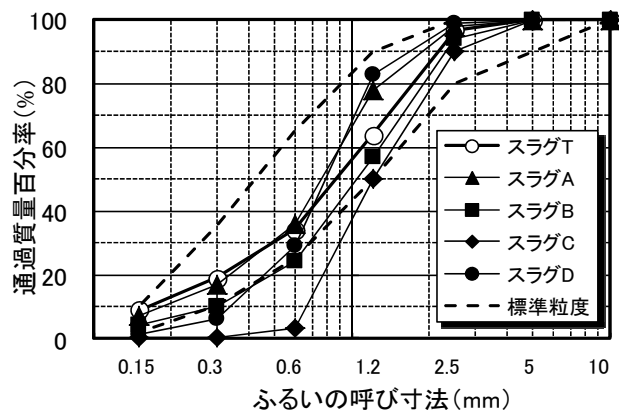


図-2 熔融スラグの粒度曲線

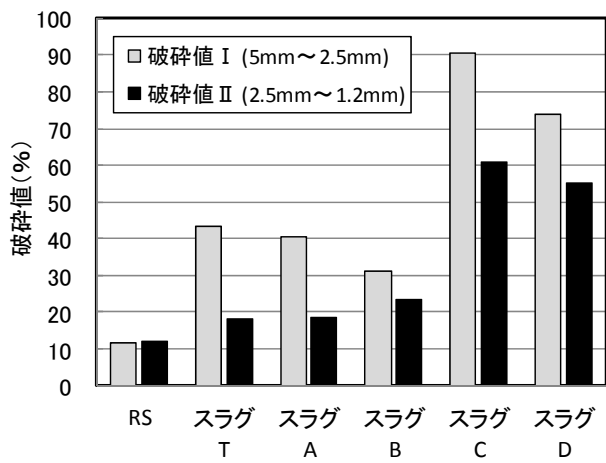


図-3 破砕試験結果

表-2 熔融スラグの物性値

細骨材	RS	スラグT	スラグA	スラグB	スラグC	スラグD
吸水率(%)	1.03	0.64	0.62	0.52	0.23	0.65
表乾密度(g/cm ³)	2.63	2.85	2.58	2.54	2.50	2.66
実積率(%)	64.5	68.9	66.7	73.5	61.9	60.1
粗粒率	2.55	3.80	3.62	4.10	1.57	2.82

ここで、キャプションの WC の後の数字は水セメント比、- の後の数字は熔融スラグの置換率を表している。

この図より無置換の WC50-00 では時間の経過とともにブリーディング率が増加し、300 分で 0.88% となり、それ以降は一定の値となっている。スラグ置換率 10% の WC50-10 については WC50-00 とほぼ同等の値を示しており、スラグ置換の影響は見られない。WC50-20, 30, 40, 50 については、スラグ置換率が増加するに従ってブリーディング率が増加し、最もブリーディング率が高い WC50-50 では 480 分において 2.30% まで増加している。WC50-100 については、細骨材を熔融スラグで全て置換したため、480 分において 4.14% までブリーディング率が増加している。

なお、W/C が 40% におけるスラグ置換率 0% および 50% のブリーディング率は 1.0% および 1.6% であり、W/C が 55% では 3.1% および 4.1% であった。

これらの実験結果から W/C 40%, 50%, 55% と水セメント比が高くなるにつれてブリーディング率が高くなっている。また、コンクリートに悪影響を及ぼすほどではないが、スラグ置換率が高くなるに従ってブリーディング水が増加する結果となっている。これは、川砂に比べて熔融スラグの保水性が小さいためと考えられる。

3.3 圧縮強度試験

図-5, 6, 7 に W/C 40%, 50%, 55% の圧縮強度と材齢の関係を示す。

図-5 の W/C 40% について見てみると、熔融スラグ無置換の WC40-00 では材齢 3 日においては 26.6N/mm^2 、材齢 7 日では 38.2N/mm^2 、材齢 28 日では 47.5N/mm^2 を示している。その後、緩やかに強度増進し、材齢 91 日では 52.4N/mm^2 となっている。スラグ置換を行った WC40-10, 20, 30, 40, 50 については、材齢 3 日の若材齢においてスラグ置換率が高い供試体で圧縮強度が 20N/mm^2 以下となっているものもあるが、材齢 7 日においては全ての供試体が 35.0N/mm^2 以上を示している。さらに材齢が進むと WC40-00 とほぼ同等の圧縮強度を示している。

図-6 の W/C 50% について見てみると、WC50-00 では材齢 3 日においては 21.5N/mm^2 、材齢 7 日では 27.9N/mm^2 、材齢 28 日では 37.7N/mm^2 、材齢 91 日では 48.5N/mm^2 となっている。スラグ置換を行った WC50-10, 20, 30, 40 については、全ての材齢において WC50-00 と同程度の圧縮強度を示している。最もスラグ置換率が高かった WC50-50 では他の供試体よりも僅かに低い強度を示している。

図-7 の W/C 55% について見てみると、WC55-00 では材齢 3 日においては 16.7N/mm^2 、材齢 7 日では 25.3N/mm^2 、材齢 28 日では 35.2N/mm^2 、材齢 91 日では 39.7N/mm^2 となっており、W/C 40%, 50% の無置換の供

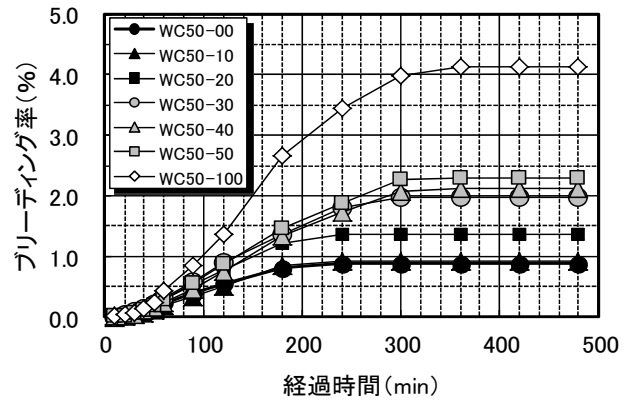


図-4 ブリーディング試験結果 (W/C 50%)

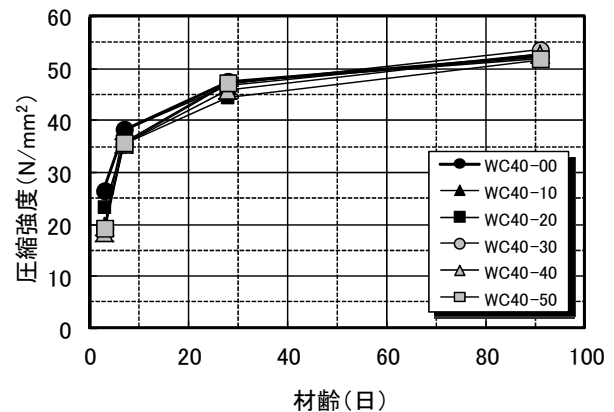


図-5 圧縮強度と材齢の関係 (W/C 40%)

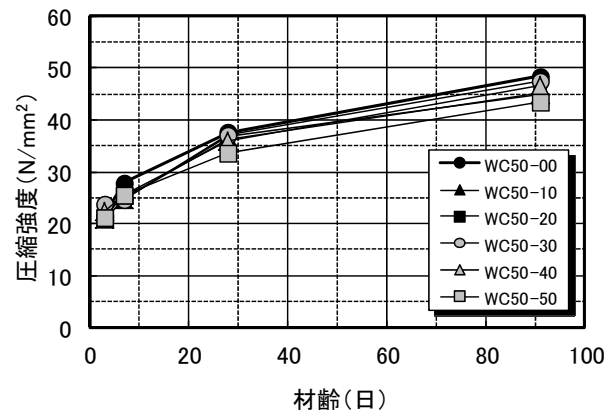


図-6 圧縮強度と材齢の関係 (W/C 50%)

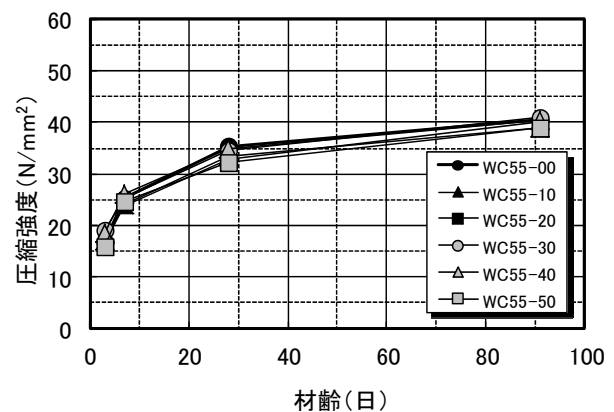


図-7 圧縮強度と材齢の関係 (W/C 55%)

試体と比較した場合、水セメント比の増加により圧縮強度は小さい値を示した。スラグ置換を行った WC55-10, 20, 30, 40, 50 については、W/C 40%, 50%の実験結果と同様、無置換の供試体と同程度の圧縮強度を示している。

これらの実験結果から、今回用いた W/C 40%, 50%, 55%の配合ではスラグ置換率が 50%までについては圧縮強度にあまり影響を及ぼさないことが明らかになった。

3.4 静弾性係数試験

図-8 に材齢 28 日における W/C 50%の各スラグ置換率における静弾性係数試験結果を示す。この図より、スラグ置換率 0%の供試体の静弾性係数は $3.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ となっている。スラグ置換率を 10%にした場合の静弾性係数は $2.95 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、置換率 20%の場合は $2.93 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ となっている。さらに置換率を増加させた場合でも静弾性係数は $2.8 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 程度となっており、スラグ置換率の増加に伴う静弾性係数の低下は非常に小さいことが明らかになった。

3.5 引張強度試験

図-9 に材齢 28 日における W/C 50%の各スラグ置換率における引張強度試験結果を示す。この図より、スラグ置換率 0%の供試体の引張強度は 3.14N/mm^2 となっているが、スラグ置換率が増加するに従って引張強度は小さくなり、スラグ置換率 50%では引張強度は 2.30N/mm^2 となっている。このようにスラグ置換率が高くなるにつれて引張強度が小さくなった要因としては、熔融スラグの表面はガラス質であるため、セメントペーストとの付着力が川砂よりも低いため、スラグ置換率が高い供試体の引張強度が小さくなったものと考えられる。

3.6 凍結融解試験

図-10 に W/C 50%の相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係を示す。相対動弾性係数は 60%がコンクリート劣化の許容限界の目安とされていることから、今回行った凍結融解試験では相対動弾性係数が 60%未満になった時点で、試験を終了している。この図より、WC50-00では相対動弾性係数が 300 サイクルまでほとんど低下しておらず、300 サイクルで約 95%以上の値を示している。熔融スラグで置換した WC50-10, 30, 50 についても 300 サイクルで 90%以上と高い値を示しており、熔融スラグ置換に伴う相対動弾性係数の低下はほとんど見られない。これは AE 減水剤および消泡剤を推奨値の範囲で使用したことにより適量のエントレインドエアが確保されていたこと、ブリーディング率が 2.5%以下であったこと等が考えられる。次に、WC50-70 では 36 サイクルから徐々に相対動弾性係数が低下し始め、250 サイクルでは 62%、300 サイクルでは 51%まで低下している。さらに熔融スラグで置換した WC50-90, 100 については実験開始直後から相対動弾性係数が低下し、36 サ

イクルで 80%を下回り、WC50-70は 108 サイクルで 55%、WC50-100は 72 サイクルで 55%まで低下している。このようにスラグ置換率を 70%以上にしたコンクリートの相対動弾性係数の値が低下した理由としては、ブリーディングによる毛管空隙が増加したことと、熔融スラグの表面がガラス質でありセメントペーストとの付着強度が小さくなったこと等が影響していると考えられる。

図-11に W/C 50%の質量減少率と凍結融解サイクル

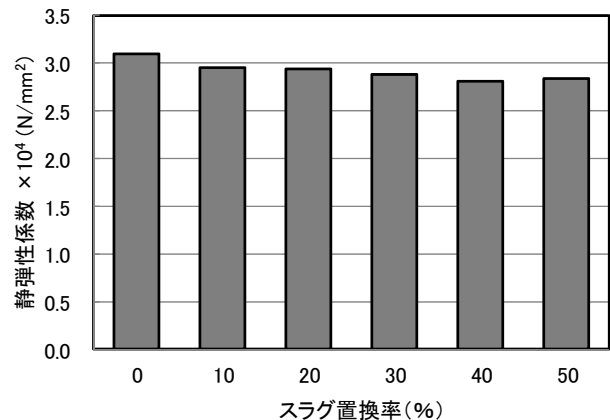


図-8 静弾性係数とスラグ置換率の関係 (W/C50%)

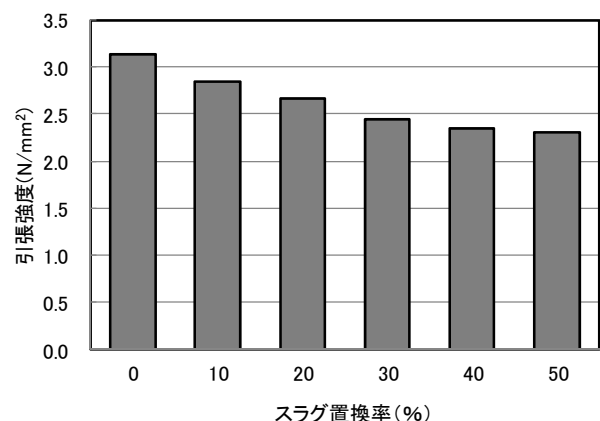


図-9 引張強度とスラグ置換率の関係 (W/C 50%)

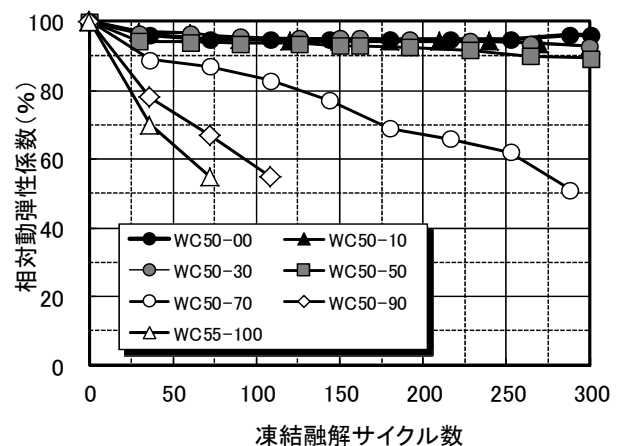


図-10 相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係 (W/C 50%)

ル数の関係を示す。この図より WC50-00 では凍結融解サイクル数が 120 サイクルまではほとんど質量減少率は変化していないが、サイクル数が進むにつれて徐々に増加し、300 サイクルで 2.0% となっている。溶融スラグで置換した WC50-10, 30, 50 についても 90 サイクルまでは質量減少率に大きな変化は見られないが、サイクル数が増すに伴って質量減少率が増加し、300 サイクルで 2.5% 程度まで増加している。さらにスラグ置換率 70% 以上の供試体については 300 サイクルに至るまでに相対動弾性係数が 60% を下回ってしまった。その時の質量減少率は、WC50-70 は 288 サイクルで 2.6%、WC50-90 は 108 サイクルで 0.8%、WC50-100 は 72 サイクルで 0.9%、である。

これらの実験結果から、W/C50% においてはスラグ置換率が 50% までならば凍結融解作用に対して高い抵抗性があると言える。

6. まとめ

本研究で明らかになったことを以下に示す。

- (1) 豊田市渡刈クリーンセンターにて製造された溶融スラグの粒度はロットによるばらつきが少なく、ほぼ標準粒度の範囲に収まっている。また、比較するために用いたその他のクリーンセンターで製造された溶融スラグの中では川砂に近い値を示す。
- (2) W/C 40%, 50%, 55% においてスラグ置換率が高くなるに従ってブリーディング率が高くなるが、スラグ置換率 50% まではコンクリートに悪影響を及ぼすほどではない。この要因としては川砂に比べて今回用いた溶融スラグがガラス質で保水性が小さいためと考えられる。
- (3) W/C 40%, 50%, 55% の配合では無置換の供試体と比較してスラグ置換率が 50% までについては材齢 91 日における圧縮強度の減少率は 10% 以下であった。
- (4) W/C 50% においてスラグ置換率 0% の供試体の静弾性係数は $3.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であるが、スラグ置換率 50% の場合でも静弾性係数は $2.8 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 程度であり、スラグ置換率の増加による静弾性係数の低下は非常に小さいことが明らかになった。
- (5) スラグ置換率が増加するに従って引張強度は小さくなる。スラグ置換率 0% と比較してスラグ置換率 50% の供試体の引張強度は 27% まで小さくなった。
- (6) W/C50% においてはスラグ置換率 50% までならば凍結融解試験において 300 サイクルで相対動弾性係数が 90% 以上と高い値を示し、質量減少率も 2.5% 以下となった。これらのことからスラグ置換率 50% までならば適量のエントレインドエアが確保され、ブリーディング率も小さくなり、凍結融解作用に対して高い抵抗性を得るものと言える。

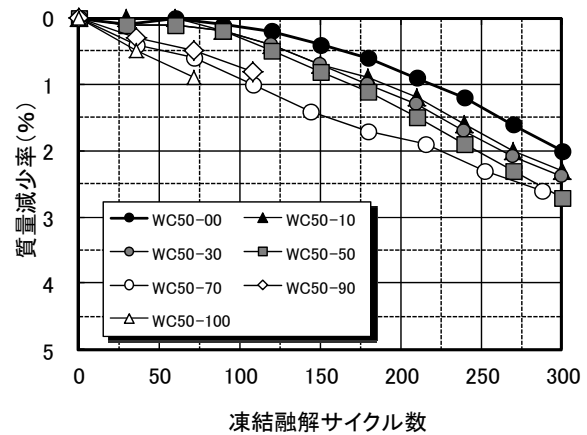


図-1-1 質量減少率と凍結融解サイクル数の関係 (W/C 50%)

参考文献

- 1) (社)日本産業機械工業会 エコスラグ利用普及センター：2010 年度版 エコスラグ有効利用の現状とデータ集, 2011.6
- 2) 高田聡恵, 糸山豊, 上原匠, 梅原秀哲：溶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報告集, Vol.26, No.1, pp.1629~1634, 2004.6
- 3) 中田善久, 斉藤丈士, 伊能泰夫, 大塚秀三：ごみ溶融スラグ細骨材の品質変動とこれと混合する細骨材に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.115~120, 2005.6
- 4) 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報告集, Vol.27, No.1, pp.499~504, 2005.6
- 5) 川上勝弥, 鈴木澄江, 森田秀明, 依田彰彦：溶融スラグ骨材コンクリートの普及に向けて, セメント・コンクリート, No.730, pp.21~31, 2007.12
- 6) 竹中寛, 磯貝寛幸, 笠井哲郎：ごみ溶融スラグの混合率向上に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.2, pp.1411~1416, 2008.6
- 7) 川上勝弥, 横室隆, 宮澤祐介：コンクリート用溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの材齢 10 年における性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.1, pp.137~142, 2011.6
- 8) 岩崎勝麻, 迫田恵三, 関勇治, 造道憲治：溶融方法の異なる都市ゴミ溶融スラグ細骨材を用いたモルタル, コンクリートの性質, セメント技術大会講演要旨, 63 巻, pp.160~161, 2009.4
- 9) 河野伊知郎, 中嶋清実, 鈴木雅也：都市ゴミ溶融スラグを細骨材の一部として用いたコンクリートの性状に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, V-583, pp.1165~1166, 2011.9