

報告 寒冷地において8～9年屋外暴露養生した溶融スラグ細骨材コンクリートの品質

串田 真基^{*1}・中田 善久^{*2}・斉藤 丈士^{*3}・大塚 秀三^{*4}

要旨：溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの長期的な品質変化を検討するために、比較的厳しい環境である寒冷地において供試体の屋外暴露実験を行った。条件として、溶融スラグ細骨材に石灰岩砕砂を混合した場合および溶融スラグ細骨材に改質処理を施した場合のコンクリートの経時に伴う品質変化について検討を行った。その結果、溶融スラグ細骨材に石灰岩砕砂を混合することで、コンクリートの品質は向上した。また、溶融スラグ細骨材に改質処理を施すことでも同様の結果が得られた。

キーワード：溶融スラグ細骨材, 暴露養生, 寒冷地, 圧縮強度, 中性化深さ, 塩分浸透深さ

1. はじめに

溶融スラグ細骨材を天然の細骨材に置換して用いたコンクリートは、一般に溶融スラグ細骨材の置換率が50%以上に高くなるとブリーディング量が多くなる、圧縮強度が低下するなど、品質が低下する傾向にある¹⁾。この傾向は、溶融スラグ細骨材の粗粒率を小さくする、水セメント比を小さくするなどの対策をとることにより概ね解消する²⁾。また、溶融スラグ細骨材に改質処理を施すことで置換率50%を大きく超えて使用できることがわかっている³⁾。しかし、溶融スラグ細骨材はその副産量がそれほど多くないため置換率を高くすることは現実的でなく、また置換率が30%以内では溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質は溶融スラグ細骨材を用いない普通コンクリートに概ね遜色ない²⁾ため、実用化への近道は比較的低い置換率で用いることと考えられる。この場合には、溶融スラグ細骨材の品質だけでなく、溶融スラグ細骨材と混合する細骨材の種類や品質も、コンクリートの性状に影響を及ぼすと考えられる。

一方で、溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートに関

しては実験室内における検討が多く、特に耐久性に関わる品質項目については促進試験による報告がほとんどであり、実際の使用状況に近い環境でこれらを検討した事例は極めて少ない⁴⁾ため、実用化へ向けては屋外暴露などを行った場合の溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質変化に関する知見を増加させる必要がある。

そこで、本報告は、溶融スラグ細骨材を用いたコンクリート(以下、スラグコンクリートと称する)の比較的長期における品質変化を検討するために、混合対象とする細骨材の種類または溶融スラグ細骨材の改質処理の有無を変化させたスラグコンクリートについて、コンクリートの耐久性の観点からは比較的厳しい環境の寒冷地海岸付近における屋外暴露実験を行った結果を述べるものである。

2. 混合対象とする細骨材の種類が異なるスラグコンクリートの屋外暴露実験による品質変化

2.1 実験概要

ここでは、混合対象とする細骨材の種類が異なるスラ

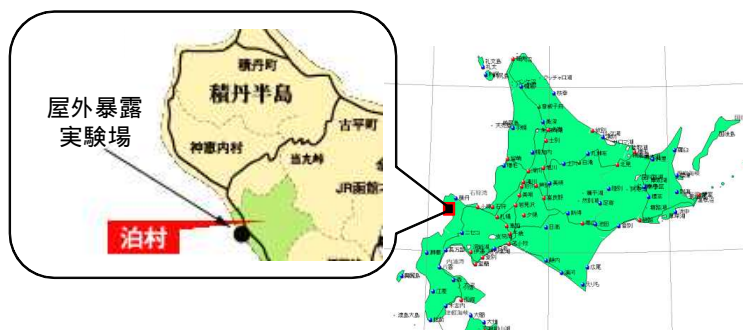


図 - 1 屋外暴露実験場の位置



写真 - 1 供試体の設置状況

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科 准教授 博士(工学) (正会員)

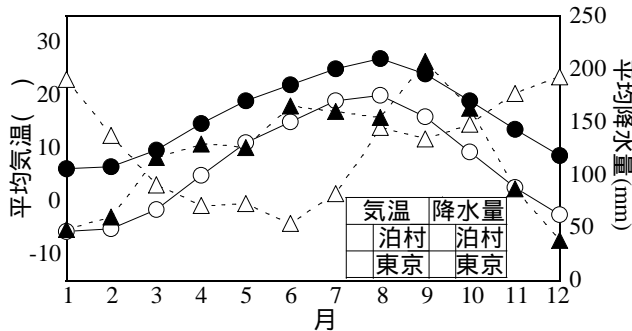


図 - 2 平年における月間の平均気温および降水量の推移⁵⁾

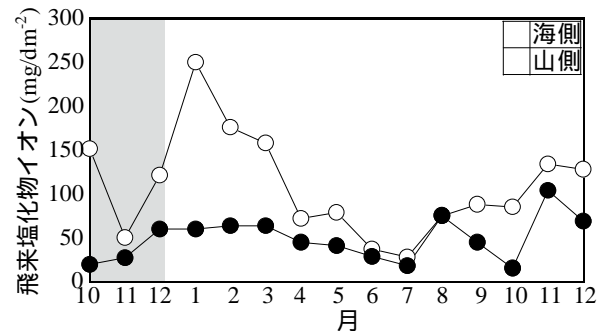


図 - 3 屋外暴露実験場における飛来塩化物イオン量の測定結果⁵⁾

グコンクリートを寒冷地の屋外暴露実験場において暴露養生し、その品質変化について検討を行った。

(1) 屋外暴露実験場の概要

屋外暴露実験場は、北海道古宇郡泊村の海岸にあり(図 - 1)、西側約 50m には海岸線がある。本実験では、ここに単管パイプおよびグレーチングを用いてひな壇を設け、日射の影響を均等に受けるように供試体を設置した(写真 - 1)。また、屋外暴露実験場がある泊村は東京と比べて冬期における平均気温が低く降水量が多いため積雪の影響を受ける地域である。したがって、屋外暴露実験場は塩害および凍害の影響を受ける、コンクリートの耐久性の観点からは厳しい条件にあるものといえる。屋外暴露実験場の平均気温、降水量および飛来塩化物イオンの測定例⁵⁾を図 - 2 および図 - 3 に示す。

(2) 使用材料

使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、練混ぜ水に上水道水、細骨材に山砂(君津市産)、溶融スラグ細骨材(N市産、以下、スラグ A と称する)および石灰岩砕砂(佐野市産)、粗骨材に砕石 2005(栃木市産珪岩、絶乾密度 2.64g/cm³、粗粒率 6.65)、化学混和剤に高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系化合物)および AE 助剤を用いた。なお、使用したスラグ A は、N 市(人口約 17 万人)の一般廃棄物処理施設に設置された直接溶

融炉(シャフト式炉)から副産したものである。砂、スラグ A および石灰岩砕砂の品質を表 - 1 に示す。

(3) コンクリートの調合

コンクリートの調合は、水セメント比が 45%、溶融スラグ細骨材の砂への置換率が容積で 0 および 30% の 2 水準、目標スランブおよび空気量を 18.0 ± 2.5cm および 4.5 ± 1.5% とし、化学混和剤の使用量により調整した。変化要因は溶融スラグ細骨材と混合する細骨材の種類であり、ここでは、調合の水準を砂 100%(以下、砂 100 と表記)、砂 70% + 溶融スラグ 30%(以下、砂 70 + スラグ A30 と表記) および砂 50% + 溶融スラグ 30% + 石灰岩砕砂 20%(以下、砂 50 + スラグ A30 + 石灰 20 と表記) の 3 水準とした。コンクリートの調合を表 - 2 に示す。

(4) 供試体の概要および取扱い

供試体は、100 × 200(mm) の円柱供試体および 100 ×

表 - 1 細骨材の品質

骨材の種類	砂	スラグ A	石灰岩砕砂
粗粒率(F.M.)	2.49	2.43	2.79
表乾密度(g/cm ³)	2.59	2.77	2.67
吸水率(%)	1.97	0.53	1.41
微粒分量(%)	2.63	3.14	3.89
単位容積質量(kg/l)	1.70	1.65	1.74
実積率(%)	66.5	62.1	69.1

表 - 2 コンクリートの調合

細骨材の種類	使用割合(vol.%)			W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
	砂	スラグ A	石灰岩砕砂		W	C	S			G
					水	セメント	砂	スラグ A	石灰岩砕砂	砕石
砂 100	100	-	-	45	175	378	818	-	-	925
砂 70 + スラグ A30	70	30	-				573	263	-	
砂 50 + スラグ A30 + 石灰 20	50	30	20				409	263	168	

表 - 3 試験項目および方法

試験項目	試験方法	供試体寸法(mm)	備考
質量および寸法	-	100 × 200	電子天秤およびノギス
一次共鳴振動数	JIS A 1127		-
圧縮強度	JIS A 1108		-
静弾性係数	JIS A 1149		-
中性化深さ	JIS A 1152		割裂面に噴霧
塩化物イオン量	JIS A 1154	100 × 100 × 200	イオンクロマトグラフ法

100 × 200(mm)の角柱供試体であり、実験室内で作製し4週間の水中養生を経たのちに屋外暴露実験場に運搬し設置した。なお、100 × 100 × 200(mm)の供試体については、海岸側を向いた100 × 100(mm)の面以外の5面をすべてエポキシ樹脂によりシールした。

(5) 試験項目および方法

試験は、屋外暴露期間が1年および8年の時点でそれぞれ供試体を回収して行った。試験項目および方法は表-3に示すものとした。また、試験方法はJISの方法に準じて行った。

2.2 実験結果および考察

(1) 圧縮強度

暴露期間と圧縮強度の関係を図-4に示す。なお、図中には標準養生を行った材齢28日(暴露養生前)の圧縮強度も併せて示した。砂100および砂70 + スラグA30の場合、暴露期間1年と8年の圧縮強度は概ね同等であった。また、砂50 + スラグA30 + 石灰20の場合、圧縮強度は暴露期間が長くなると若干増加する傾向を示した。これは既往の文献⁶⁾における傾向と同様に、石灰岩骨材を使用すると骨材界面においてカルシウムカーボアルミネートが生成され⁷⁾、砂(天然の細骨材)よりも骨材とペーストとの付着力が高くなる⁸⁾ことが影響していると考えられる。

(2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。なお、図中には標準養生を行った材齢28日(暴露養生前)の静弾性係数も併せて示した。圧縮強度と静弾性係数の関係はJASS5式と概ね同等であり、砂50 + スラグA30 + 石灰20において静弾性係数がやや高くなった。これは、砂50 + スラグA30 + 石灰20の圧縮強度がやや高かったことおよび砂50 + スラグA30 + 石灰20でコンクリートの単位容積質量が若干大きかったことが影響していると思われる。

(3) 中性化深さ

暴露期間と中性化深さの関係を図-6に示す。暴露期間が1年の場合、全ての調査において中性化は認められなかった(中性化深さ0mm)が、暴露期間が8年の場合は

砂100 > 砂70 + スラグA30 > 砂50 + スラグA30 + 石灰20の順に中性化深さが小さくなった。これは、砂50 + スラグA30 + 石灰20において組織が最も密実で物質浸透性が低くなり、中性化の原因となる炭酸ガスの浸透が抑制されたためと考えられ、このことは石灰岩骨材を使用すると圧縮強度が増進する傾向にあることの理由として骨材界面部においてカルシウムカーボアルミネートが生成され組織が緻密化する⁷⁾ことを裏付ける結果となっている。

(4) 塩化物イオン量

暴露面からの深さと塩化物イオン量の関係を図-7に示す。混合する細骨材の種類にかかわらず、塩化物イオン量は暴露面に最も近い測定箇所でも最も多く、暴露面からの深さが深いほど少なくなる傾向を示した。また、暴露面からの深さが同一の測定箇所では、砂100が最も多く、次いで砂70 + スラグA30となり砂50 + スラグA30 + 石灰20で最も少なかった。なお、塩化物イオン量が最も多かった砂100では、暴露面からの深さが22.5 ~ 30.0mmの部分まで塩化物イオンが浸透していた。これは、中性化深さと概ね同様の傾向であり、組織の緻密さが異なることによる物質浸透性の違いが影響したものと考えられる。

2.3 まとめ

- 1) 砂50 + スラグA30 + 石灰20においては、暴露期間が1年を経過したあとも圧縮強度が増進していた。
- 2) 中性化深さおよび塩化物イオン量はともに砂50 + スラグA30 + 石灰20において最も小さくなった。

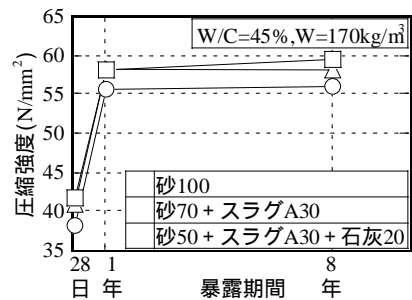


図-4 暴露期間と圧縮強度の関係

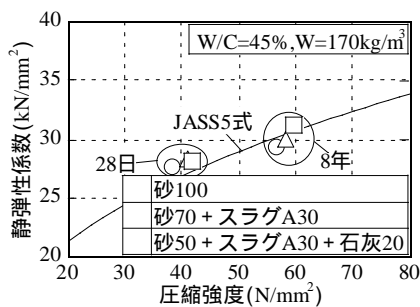


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

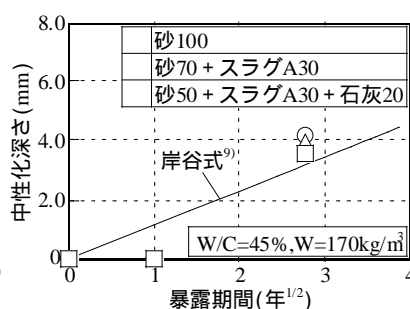


図-6 暴露期間と中性化深さの関係

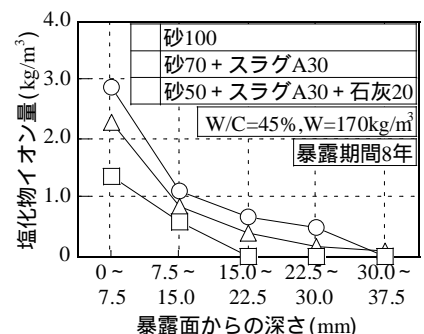


図-7 暴露面からの深さと浸透塩化物イオン量の関係

3. 水砕後に改質処理を施したスラグコンクリートの屋外暴露実験による品質変化

3.1 実験概要

ここでは、水砕後に改質処理を施した熔融スラグ細骨材を用いたコンクリートを寒冷地に屋外暴露し、その品質変化について検討を行った。

(1) 屋外暴露実験場の概要と供試体の概要

実験は、前述(図 - 1)と同じ屋外暴露実験場において行った。また、供試体の種類も前述の実験と同様に、100 × 200(mm)の円柱供試体および100 × 100 × 200(mm)の角柱供試体であり、実験室内で作製し4週間の水中養生を経たのちに屋外暴露実験場に運搬し設置した。なお、100 × 100 × 200(mm)の供試体については、海岸側を向いた100 × 100(mm)の面以外の5面をすべてエポキシ樹脂によりシールした。

(2) 使用材料

使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)、練混ぜ水に上水道水、細骨材に山砂(君津市産)および熔融スラグ細骨材(F市産およびO市産)、粗骨材に砕石2005(栃木市産硅岩、絶乾密度2.64g/cm³、粗粒率6.65)、化学混和剤に高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系化合物)およびAE助剤を用いた。なお、使用したスラグBは、F市(人口約5万人)の一般廃棄物処理施設に設置された電気式熔融炉(プラズマ式炉)から、スラグCはO市(人口約4万人)の一般廃棄物処理施設に設置された燃料式熔融炉(バーナ式炉)から副産したものを軽破砕し製粒したものである。また、スラグbおよびスラグcは、図 - 8 に示す回転式の熔融スラグ改質装置を用いてスラグBおよびスラグCを高pH熱水(95 の消石灰飽和水溶液)中に約1時間(装置の上段と下段各30分程度)滞留させ、熔融スラグの粒子表面にCaOとSiO₂の水和物(C-S-H)による微細な凹凸を生じさせることにより表面改質した¹⁰⁾ものである。表面改質前後における熔融スラグ細骨材表面のSEM観察写真の例²⁾を写真 - 2 に示す。使用した細骨材の品質を表 - 7 に示す。

(3) コンクリートの調合

コンクリートの調合は、水セメント比が55%、熔融スラグ細骨材の砂への置換率が容積で0および30%の2水準、目標スランプおよび空気量を18.0 ± 2.5cmおよび4.5 ± 1.5%とし、化学混和剤の使用量により調整した。変化要因は熔融スラグ細骨材の種類(炉型式の違いおよび改質の有無)および単位水量の違いであり、ここでは、細骨材の種類の水準を砂100%(以下、砂100と表記する)、砂70% + 熔融スラグ細骨材30%を熔融スラグ細骨材の種類ごとに4水準(以下、使用するスラグごとにそれぞれ砂70 + スラグB30、砂70 + スラグb30、砂70 + スラグC30、砂70 + スラグc30と表記)の計5水準とした。

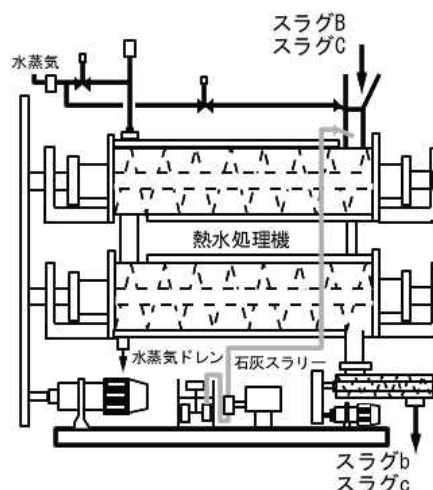


図 - 8 熔融スラグ改質装置の概略図

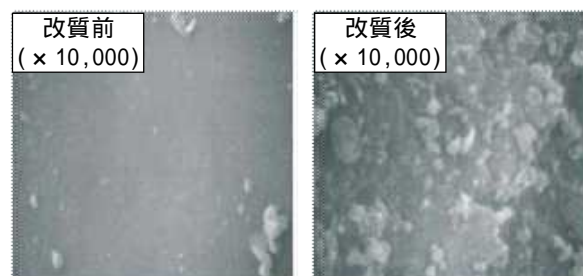


写真 - 2 熔融スラグ細骨材表面のSEM観察写真の例²⁾

表 - 7 細骨材の品質

骨材の種類	砂	スラグ			
		B	b	C	c
		破碎	改質	破碎	改質
粗粒率(F.M.)	2.49	2.41	2.45	2.81	3.00
表乾密度(g/cm ³)	2.59	2.76	2.74	2.68	2.68
吸水率(%)	1.97	0.80	1.15	1.05	1.44
微粒分量(%)	1.30	3.60	4.00	2.20	3.20
単位容積質量(kg/l)	1.70	1.73	1.76	1.74	1.77
実積率(%)	66.5	63.8	65.7	64.7	66.0

表 - 8 コンクリートの調合

細骨材の種類	処理	熔融スラグ置換率(%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S		G
				水	セメント	砂	スラグ	砕石
普通	-	-	55	165	367	842	-	925
				170	378	818	-	
				175	389	798	-	
スラグB	破碎	30	55	165	367	591	269	
				170	378	572	260	
				175	389	559	252	
スラグb	改質	30	55	165	367	591	267	
				170	378	572	258	
				175	389	559	250	
スラグC	破碎	30	55	170	378	572	258	
スラグc	改質	30	55	170	378	572	258	

また、細骨材の種類が砂100、砂70 + スラグB30および砂70 + スラグb30の場合には単位水量を165、170および175kg/m³の3水準で変化させた。コンクリートの調合を表-8に示す。

(4) 試験項目および方法

試験項目および方法は、前述(表-3)と同様である。また、試験は、屋外暴露期間が0.5、1、3および9年の時点でそれぞれ供試体を回収して行った。

3.2 実験結果および考察

(1) 圧縮強度

暴露期間と圧縮強度の関係を図-9に示す。なお、図中には標準養生を行った材齢28日(暴露養生前)の圧縮強度も併せて示した。暴露期間0.5年の場合の圧縮強度は、砂100と砂70 + スラグB30で逆転が見られたものの、暴露期間1年以降では全体に砂70 + スラグB30または砂70 + スラグC30 < 砂100 < 砂70 + スラグb30または砂70 + スラグc30の順に大きく、表面改質を行った溶融スラグ細骨材を砂への置換率30%で用いると圧縮強度はやや大きくなり、改質した溶融スラグ細骨材を用いて標準養生を行った材齢7~91日の場合²⁾と同様の傾向を示した。

単位水量と圧縮強度の関係を図-10に示す。細骨材の種類にかかわらず暴露期間9年における圧縮強度は単位水量が多いほど小さくなる傾向にあった。また、単位水量にかかわらず砂70 + スラグB30は砂100および砂70 + スラグb30よりもやや圧縮強度が低くなる傾向を示した。

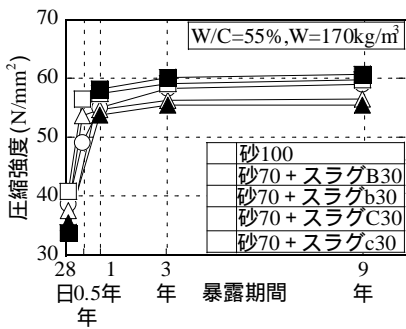


図-9 暴露期間と圧縮強度の関係

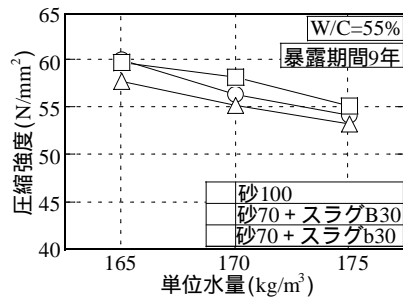


図-10 単位水量と圧縮強度の関係

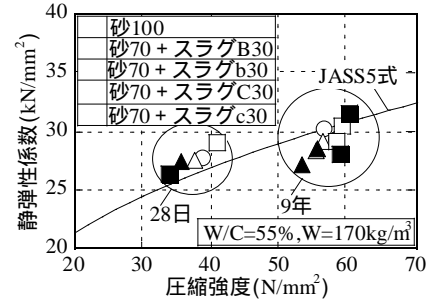


図-11 圧縮強度と静弾性係数の関係

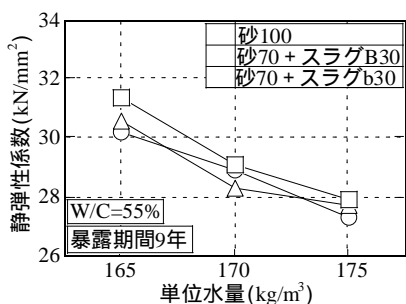


図-12 単位水量と静弾性係数の関係

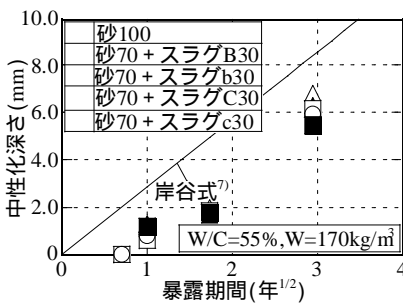


図-13 暴露期間と中性化深さの関係

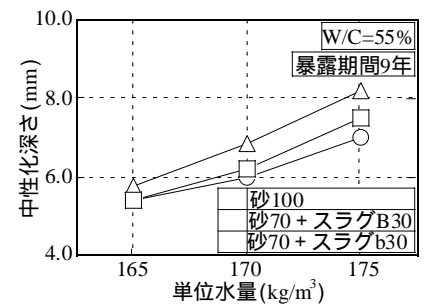


図-14 単位水量と中性化深さの関係

(2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-11に示す。なお、図中には標準養生を行った材齢28日(暴露養生前)の静弾性係数も併せて示した。圧縮強度と静弾性係数の関係は全体にJASS5式に近似しており、溶融スラグ細骨材または改質した溶融スラグ細骨材を砂に50%置換して水中養生を28日間行ったコンクリート²⁾よりも圧縮強度に対する静弾性係数はやや小さくなる傾向にあった。

単位水量と静弾性係数の関係を図-12に示す。単位水量が多いほど静弾性係数は小さくなる傾向にあり、また、砂70 + スラグb30は単位水量にかかわらず他の調合よりも若干静弾性係数が大きかった。単位水量が多いほど静弾性係数が小さくなったのは、単位水量の増加に伴いコンクリート中に占めるセメントペースト量が多くなったためと考えられる。

(3) 中性化深さ

暴露期間と中性化深さの関係を図-13に示す。中性化深さは全体に岸谷式⁷⁾よりも小さくなり、前述のスラグAのケースとは異なる傾向を示したが、この原因は明らかでない。

単位水量と中性化深さの関係を図-14に示す。中性化深さは全体に単位水量が多いほど大きくなる傾向にあり、単位水量が同じ場合には砂70 + スラグB30で大きくなり、中性化に対する抵抗性は概ね圧縮強度と同様の傾向を示した。

(4) 塩化物イオン量

暴露面からの深さと塩化物イオン量の関係を図 - 15 に示す。最も暴露面に近い部分では、砂70 + スラグB30および砂70 + スラグC30で塩化物イオン量が多かったが、暴露面からの深さが7.5 ~ 15.0mmよりも深くなると、細骨材の違いによる傾向は明確でなかった。

単位水量と塩化物イオン積分値の関係を図 - 16 に示す。塩化物イオン積分値は、全体に単位水量が多いほど大きくなる傾向にあり、また、単位水量にかかわらず砂70 + スラグB30で他の調査よりも大きくなった。

これらの結果から、改質しない溶融スラグ細骨材を用いた砂70 + スラグB30および砂70 + スラグC30は、全体に砂100や砂70 + スラグb30および砂70 + スラグc30よりも組織が粗であり、物質浸透性がやや高いものと思われる。また、全体に単位水量が小さいほど組織は密になり物質浸透性が低くなるものと考えられる。なお、砂100ならびにいずれのスラグコンクリートにおいても強度や弾性係数などの急激な低下は見られず、寒冷地において暴露期間9年間を経たスラグコンクリートは、凍害の影響を大きく受けてはいないことが明らかとなった。

3.3 まとめ

- 1) 改質しない溶融スラグ細骨材を用いた調査では全体に強度や静弾性係数が低く中性化深さが大きいことから、組織が若干粗になっている。
- 2) 上記の傾向は、溶融スラグ細骨材を改質することにより全体に改善され、改質処理を行った溶融スラグ細骨材を用いた場合は、溶融スラグ細骨材を用いない砂100%よりも全体に品質が向上する傾向にあった。

謝辞

本実験を行うにあたり、新日鉄住金エンジニアリング株式会社ならびに、川崎重工業株式会社の方々より貴重な試料を頂きました。また、ものづくり大学の学生の方々より多大なご協力を頂きました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 斉藤丈士ほか：ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，pp.1 ~ 7，2004.10
- 2) 斉藤丈士ほか：表面改質したごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，pp.1 ~ 6，2005.3

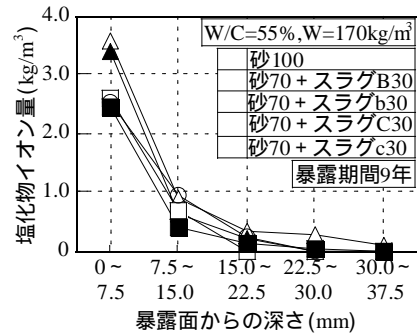


図 - 15 暴露面からの深さと塩化物イオン量の関係

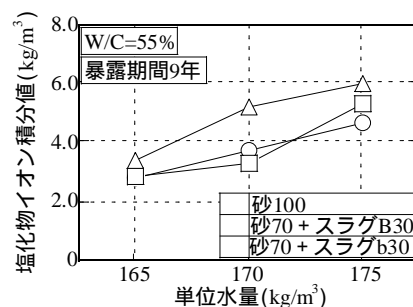


図 - 16 単位水量と塩化物イオン積分値の関係

- 3) 斉藤丈士ほか：各種ごみ溶融スラグ細骨材を用いた高性能AE減水剤コンクリートの性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，pp.1 ~ 7，2005.11
- 4) 川上勝弥ほか：溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの長期性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.103 ~ 108，2005.6
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，pp.60 ~ 61，2004.3
- 6) 中山英明ほか：各種セメントと石灰石骨材を使用した高強度コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.83 ~ 88，2010
- 7) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告F-46「石灰石骨材コンクリートに関する研究」，pp.41-44，1992.10
- 8) 小林正几ほか：芳香族系減水剤を用いたコンクリートの強度特性について，セメント技術年報No.28 pp.260-263，1974
- 9) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，pp.149 ~ 153，1963.2
- 10) 谷山教幸ほか：ごみ焼却残渣溶融スラグの安定化技術に関する研究，廃棄物学会論文誌Vol.10，No.3，pp.133-141，1999.3