

高炉スラグ細骨材を使用したモルタル・コンクリートの
中性化に関する研究
A STUDY ON THE NEUTRALIZATION OF MORTAR AND CONCRETE
USING BLAST FURNACE SLAG FINE AGGREGATE

彦根俊海
Toshimi HIKONE

It is said that the neutralization of Concrete with blast furnace slag fine aggregate(BFS) is slow compared to that with normal aggregate, but opposite case are also reported.

In this experiment, the factors are kind of fine aggregate, water cement ratio and curing method. After examining the fresh properties and mechanical properties of mortar measurement was performed at the prescribed ages of neutralization and mass change, and it was confirmed that the neutralization of mortar with BFS is slower than that with natural sand.

Keywords : Blast furnace slag fine aggregate, Mortar, Fresh properties, Mass change, Compressive strength,
高炉スラグ細骨材, モルタル, 中性化, フレッシュ性状, 質量変化, 圧縮強度

1. はじめに

近年、天然骨材の採取制限や環境配慮の面から、鉄鉱石から銑鉄を製造したときの副産物として生産される高炉スラグ細骨材を有効活用する必要性が今まで以上に出てきている。一般に高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、通常の細骨材を使用したものに比べて中性化が遅いとされている¹⁾⁴⁾が、そうでない事例も報告されている⁵⁾⁸⁾。しかし、その理由は明確にされていない。本実験ではその理由を明らかにするための第一歩として、まずモルタルを用いて、中性化と質量の測定を併行して実施し、高炉スラグ細骨材を使用したものと、通常の細骨材を使用したものの中性化の差を確認することとし、促進中性化試験を行った。

2. 実験概要

表-1 に実験の要因と水準を示す。使用した細骨材は、天然砂については、標準砂 (H)、大井川水系陸砂(O)、佐野産砕砂(C) の 3 種類で、高炉スラグ細骨材については JIS 外も含め、吸水率の異なる 3 銘柄 (K, B, Y) を使用した。

3. 実験方法

3.1 使用材料

セメントは、密度 3.16 g/cm³ の普通ポルトランドセメント、練混ぜ水は東京都八王子市上水道水、骨材は表-2 に物性値を示す細骨材を使用した。図-1 に細骨材の粒度分布を示す。

3.2 練混ぜ

練混ぜにはモルタルミキサを 2 台使用し、各 1ℓ ずつ練り混ぜ、その後、一つに合わせ試験の試料とした。練混ぜ方法は、JIS R 5201 に準じて行った。

3.3 調合およびフレッシュ性状

表-3 に本実験で用いたモルタルの調合、フレッシュ性状および 4 週間強度試験結果を示す。各細骨材を用いたモルタルのフレッシュ性状については、フロー試験、空気量試験、単位容積質量試験、プリ

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
骨材の種類	標準砂(H)、大井川陸砂(O)、佐野石灰石砕砂(C) 高炉スラグ細骨材(K、B、Y)
水セメント比	45%、55%、65%
中性化試験前養生方法	20℃標準水中養生、20℃封かん養生
供試体の種類	促進中性化試験用供試体、質量測定用供試体

表-2 細骨材の物性値

種類	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒粉量 (%)	単位容積質量 (kg/L)	粗粒率	実積率 (%)
H	2.61	2.60	0.54	0.31	1.76	2.41	67.8
O	2.59	2.54	1.83	1.25	1.70	2.77	66.8
C	2.66	2.64	1.05	3.17	1.70	3.03	64.4
K	2.55	2.41	5.78	0.76	1.36	2.62	56.3
B	2.73	2.68	2.09	3.28	1.37	2.57	54.3
Y	2.87	2.85	0.54	2.54	1.75	2.39	61.7

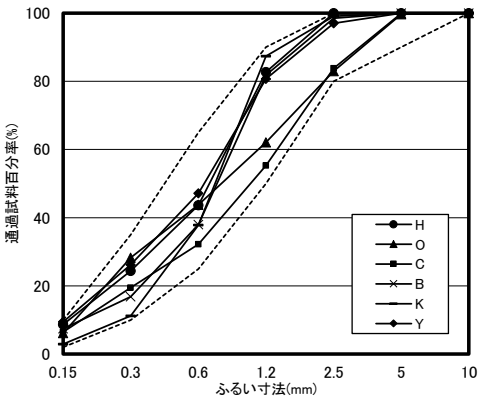


図-1 粒度分布

表-3 調査およびフレッシュ性状

骨材種類	促進前養生	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			フレッシュ性状						4 週強度試験結果	
			W	C	S	空気量 (%)	フロー(mm)		単位容積質量 (kg/m ³)	温度 (℃)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	超音波伝播速度 (km/s)	圧縮強度 (N/mm ²)
								平均					
H	標準	45	260	578	1418	3.4	175×174	175	2.22	20	0.361	4.43	47.2
	水中養生	55	260	473	1506	6.0	206×200	203	2.15	20	0.448	4.34	36.3
		65	260	400	1567	4.3	182×178	180	2.17	20	0.535	4.20	24.6
	封かん	55	260	473	1506	6.6	202×201	202	2.13	20	0.463	4.10	36.4
O	標準	45	280	622	1303	1.6	198×195	197	2.21	21	0.366	4.33	63.8
	水中養生	55	280	509	1396	1.4	199×195	197	2.20	19	0.290	3.97	39.6
		65	280	431	1460	-1.7	211×210	211	2.23	20	0.387	4.13	30.9
	封かん	55	280	509	1396	0.1	211×208	210	2.23	19	0.321	4.03	43.2
C	標準	45	280	622	1338	0.3	198×194	196	2.28	20	0.310	4.52	58.3
	水中養生	55	280	509	1433	0.5	190×182	186	2.26	20	0.361	4.19	49.9
		65	280	431	1499	-0.0	194×194	194	2.26	20	0.489	4.36	39.5
	封かん	55	280	509	1433	0.5	203×200	202	2.26	20	0.412	4.39	50.2
K	標準	45	300	667	1196	3.3	206×207	207	2.14	20	0.412	4.41	46.0
	水中養生	55	300	545	1294	5.2	189×187	188	2.07	20	0.433	4.31	33.6
		65	300	462	1362	4.8	174×169	172	2.06	20	0.519	4.05	25.3
	封かん	55	300	545	1294	4.4	194×193	194	2.06	20	0.580	4.22	39.3
B	標準	45	300	667	1280	8.2	185×177	181	2.11	21	0.601	4.40	45.6
	水中養生	55	300	545	1385	9.7	160×155	158	2.05	21	0.703	3.96	30.8
		65	300	426	1458	10.9	154×144	150	2.02	21	0.580	3.64	20.2
	封かん	55	300	545	1385	9.4	157×154	156	2.06	21	0.662	4.14	36.2
Y	標準	45	300	667	1346	3.7	222×221	222	2.27	21	0.458	4.51	53.0
	水中養生	55	300	545	1456	4.5	225×224	225	2.24	21	0.626	4.50	44.6
		65	300	462	1532	4.5	232×230	232	2.24	20	0.789	4.20	31.8
	封かん	55	300	545	1456	3.7	238×222	230	2.26	21	0.657	4.40	43.1

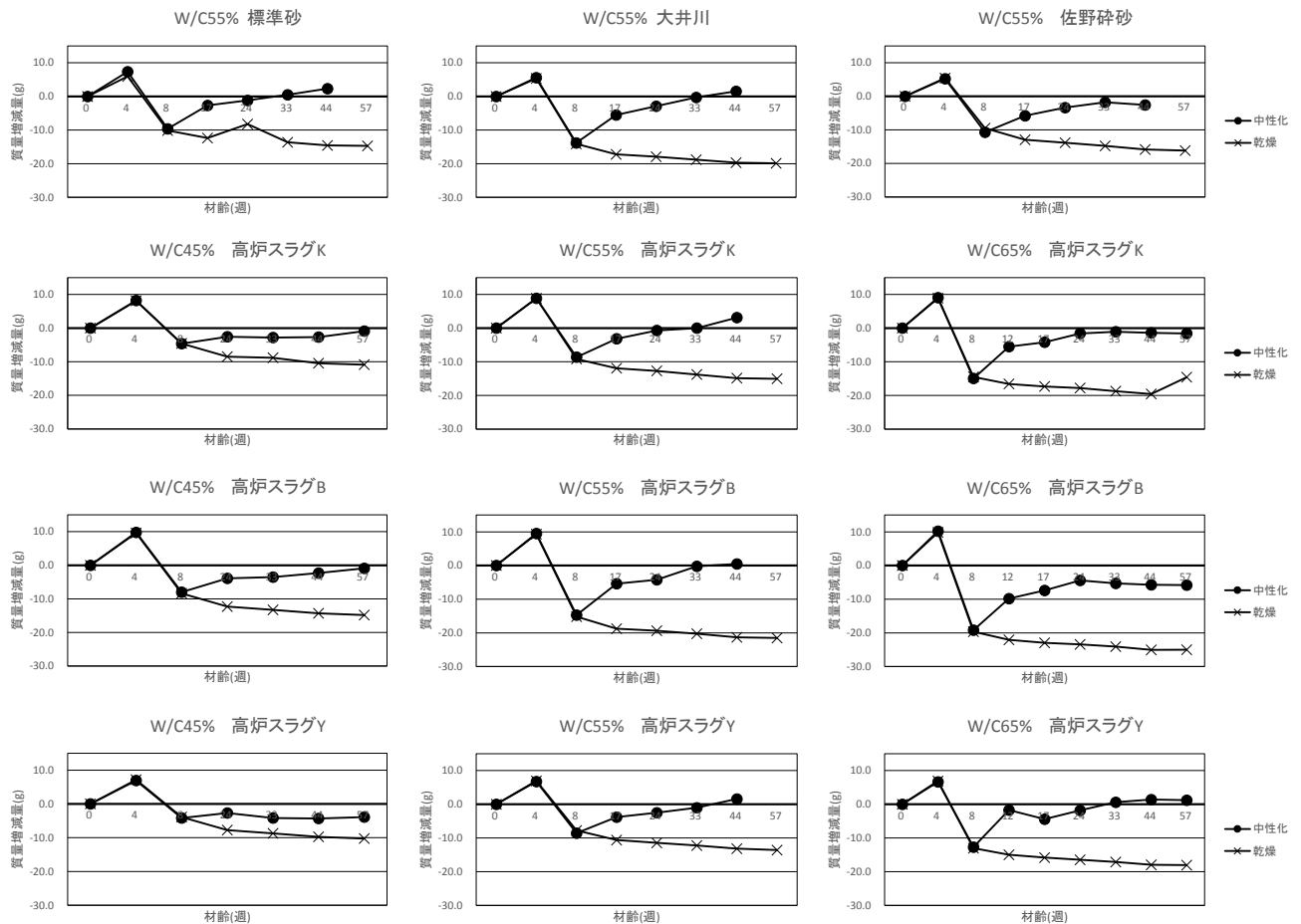


図-2 質量増減の経時変化

ーディング試験および練上がり温度についての試験を行った。

フローおよび単位容積質量試験は、JIS R 5201 に準じ行った。フローについては、フローコーンへ2層に分け試料を詰め、所定の突き棒で各層15回突き、フローコーンを上げた後、フローテーブルに1秒につき1回、計15回の落下運動を与え、広がり長径とそれに直交する箇所をmm単位で計測した。単位容積質量試験については、400ccの鋼製容器へ試料を2層に分け詰め、各層25回φ9mmの突き棒で突き、突き後がなくなる程度木槌で側面を叩き、その後、上面をコテで均し、質量を測定した。

ブリーディング試験について、本実験では、φ50×100mmの軽量型枠に他の供試体と同様の方法で試料を詰め、上面をコテで均した後30分ごとに浮いた水をスポイトで吸い取り、型枠ごと供試体の質量を測定する方法を用いた。

3.4 供試体の作製および取扱い

供試体の作製には、φ50×100mmの軽量型枠を使用した。供試体は、促進中性化試験用供試体4本、質量測定用供試体2本、圧縮強度試験用供試体2本を骨材ごと、水セメント比ごとに作製した。また、促進中性化試験の前養生方法での違いを比べるため、水セメント比55%のみ標準養生用、封かん養生用の2種類を作製し、他のものに関しては、標準養生に限定した。標準養生のものに関しては、温度20℃の水中養生を4週間行った後、温度20℃、湿度60%で4週間気中養生を行った。封かん養生のものに関しては、温度20℃、湿度60%で4週間の封かん養生の後、同じ条件で4週間気中養生、その後、いずれも促進中性化を開始した。

3.5 質量および中性化の測定

中性化の測定は、中性化深さが8mm程度になる促進期間から行うこととし、水セメント比65%で促進期間4週から、55%で9週から、45%で16週から測定を開始した。測定箇所は長辺片側5点、計10点とした。

質量測定用の供試体は、温度20℃湿度60%で養生を行い、促進中性化用供試体と同じ促進期間でそれぞれ質量を測定した。また、水セメント比65%のものに関しては、完全に中性化した後も中性化によって生じた水の動きを把握するため、質量測定用供試体、促進中性化用試験体ともに、定期的に質量の測定を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 調査とフレッシュ性状

4.1.1 単位水量について

単位水量とフロー値の関係を図-3に示す。今回の実験では、細骨材の種類ごとに単位水量を一定にしており、既往の文献⁹⁾によると、単位水量とフロー値の関係は図中白抜きの記号で示すようになる。これより推測すると、高炉スラグ細骨材を使用した調査には、多少幅はあるものの、天然砂を使用した調査より単位水量は多くなるといえる。

4.1.2 フロー値について

水セメント比とフロー値の関係を図-4に示す。天然砂を使用したものは、水セメント比が高くなるにつれ、フロー値が大きくなるという一般的な傾向を本実験でも示した。それに対し、高炉スラグ細骨材を使用したものについては水セメント比が高くなるにつれ、フロー値が小さくなった。しかし、使用骨材Yのみ天然砂と同じく、

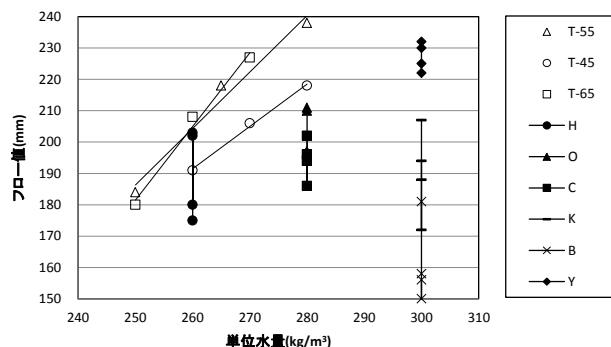


図-3 単位水量とフロー値

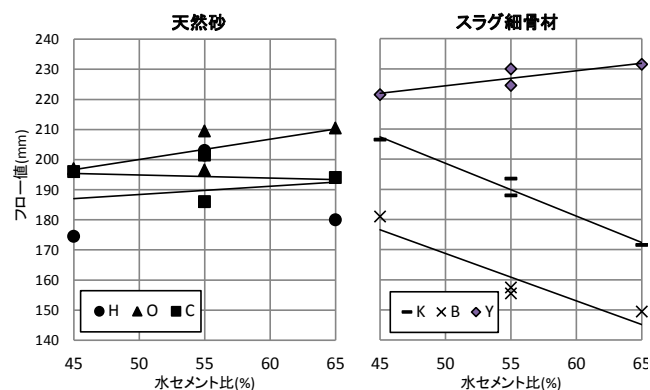


図-4 水セメント比とフロー値

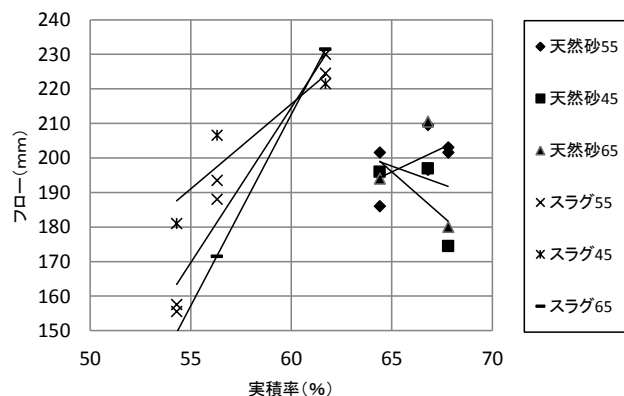


図-5 実積率とフロー値

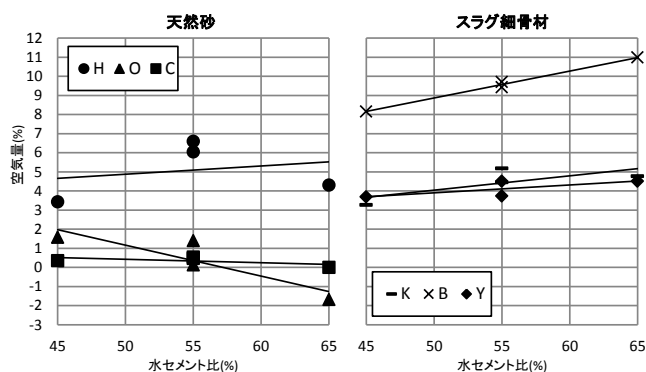


図-6 水セメント比と空気量

水セメント比が高くなるにつれフロー値も大きくなった。

高炉スラグ細骨材を使用したものがこのような結果になったのは、粒形や微粒分量が原因であると考えられる。水セメント比が小さいときはセメントペーストの粘性が高く、細骨材の粒形の影響を受けにくい、水セメント比が高くなるにつれ、セメントペーストの粘性が下がり、細骨材の粒形の影響を大きく受けるためと考えられる。

ここで、図-5 に実積率とフロー値について、天然砂、高炉スラグ細骨材それぞれ水セメント比ごとの関係を示す。高炉スラグ細骨材を使用したものに関しては、実積率が高いものはフロー値も大きくなり、実積率が低いものはフロー値も小さくなるという傾向がみられた。しかし、天然砂に関しては、実積率の差があまりなく、顕著な傾向はみられなかった。

4.1.3 空気量について

水セメント比と空気量についての関係を図-6 に示す。空気量は、天然砂を使用したものに比べ、高炉スラグ細骨材を使用したものが大きくなった。また、高炉スラグ細骨材を使用したものは、水セメント比が高くなるにつれ空気量も大きくなった。一般的に、高炉スラグ細骨材は天然砂に比べて粒形が角張っているとされており、それにより、天然砂を使用したものに比べ空気を多く巻き込んでしまったためと考えられる。

4.1.4 ブリーディングについて

水セメント比とブリーディング量の関係を図-7 に示す。天然砂、高炉スラグ細骨材、どちらを使用したものも、多少のばらつきはあるが、水セメント比が高くなるとブリーディング量が多くなる傾向がみられた。また、一般的にいわれているように、天然砂を使用したものに比べ、高炉スラグ細骨材を使用したものは、ブリーディング量は多くなった。

4.1.5 圧縮強度について

セメント水比と圧縮強度の関係を図-8 に示す。セメント水比が高くなれば、圧縮強度も高くなるという一般的な傾向が本実験でもみられた。また、天然砂を使用したものに比べて、高炉スラグ細骨材を使用したものは圧縮強度が小さくなる傾向がみられた。しかし、高炉スラグ細骨材を使用したものに関しては、天然砂を使用したものに比べて空気量が多く入っているため、セメント水比ではなく、単位水量に空気量による補正を行ったものを図-9 に示す。空気量の補正を行うと、天然砂を使用したものと高炉スラグ細骨材を使用したものは、ほぼ類似の値となった。ただし、高炉スラグ細骨材で銘柄 K のものは、他のものより小さい値となった。これは、吸水率が高かったためと推測される。

4.1.5 動弾性係数・超音波伝播速度について

圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図-10 に示す。天然砂、高炉スラグ細骨材を使用したものいずれも圧縮強度が高くなると超音波伝播速度の値は大きくなる結果が得られた。また、天然砂を使用したものは、高炉スラグ細骨材を使用したものに比べて、圧縮強度が小さいときは超音波伝播速度の値は大きい、圧縮強度が高くなると、高炉スラグ細骨材を使用したものに比べ値は小さくなった。これは得られた圧縮強度の範囲が天然砂に比べて高炉スラグ細骨材の方が小さかったためと考えられる。なお、動弾性係数については、今回妥当な結果が得られなかったため掲載していない。

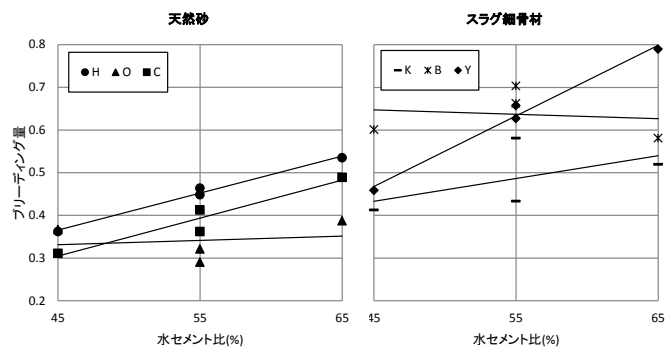


図-7 水セメント比とブリーディング量

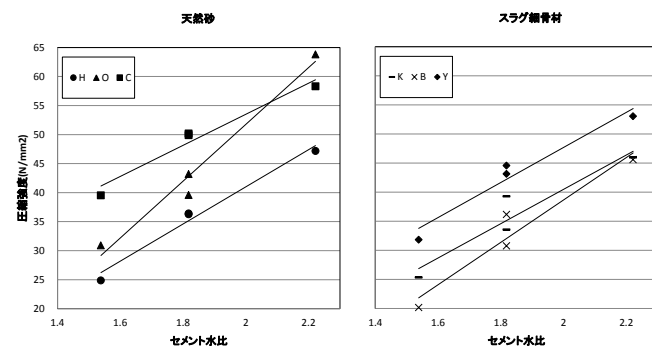


図-8 セメント水比と圧縮強度

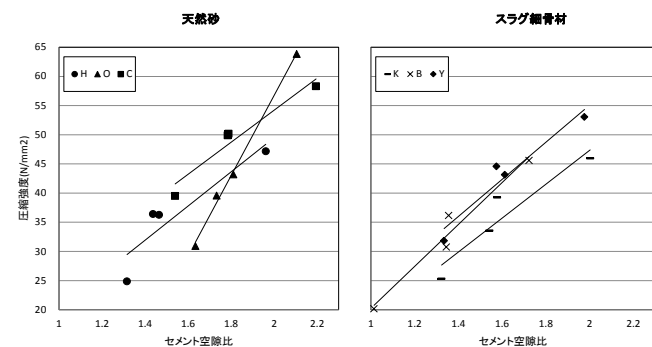


図-9 セメント空隙比と圧縮強度

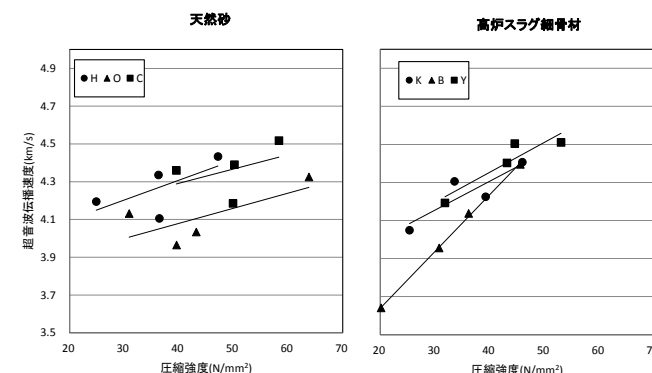


図-10 圧縮強度と超音波伝播速度

4.2 促進中性化について

本実験では、円柱供試体を使用して中性化促進試験を行ったため、中性化深さではなく、供試体の中性化部分の体積を用いて結果を考察することとした。

4.2.1 中性化部分の体積と中性化深さの関係

中性化部分の体積は、供試体全体の体積から未中性化部分の体積を引くことで求めた。

4.2.2 材齢と質量増減の関係

図-2 に質量増減の経時変化を示す。水セメント比が小さいものは質量の増減も小さくなり、水セメント比が大きいものは大きくなった。

W/C65%の促進中性化用供試体は、完全に中性化するまでは質量が増加していったが、その後質量の増加は止まり、減少していった。

4.2.3 促進期間と中性化部分の体積の関係

図-11 に促進期間と中性化部分の体積の関係を示す。この図から累乗近似曲線を用いて回帰式 $y=ax^b$ の係数を求めた。この式の係数 b は比較的類似していたため、W/C55%の全体平均0.35 を用いて作製したグラフを図-12 に示す。この図の線形近似直線から回帰式 $y=a \cdot x$ の係数 a を求め、中性化係数とし、表-4 にまとめた。以降、中性化係数と表記する。

4.2.4 空隙セメント比と中性化係数の関係

図-13 に空隙セメント比と中性化係数の関係を示す。また、空隙セメント比は、以下の式より求めた。

$$\text{空隙セメント比} = \frac{W + A}{C}$$

空隙セメント比が大きくなると中性化係数も大きくなった。また、高炉スラグ細骨材を用いると、天然砂より中性化係数は小さくなった。

4.2.5 CO₂ 量と中性化係数の関係

図-14、15 にそれぞれ天然砂、高炉スラグ細骨材の吸収した CO₂ 量と中性化係数の関係を示す。高炉スラグ細骨材に比べて天然砂は一定の体積を中性化させるために必要な CO₂ 量が少ないことが分かる。しかし、単位セメント量が骨材ごとに違うので、陸砂を基準にセメント量の補正をかけた。その結果、同一のセメント量であるなら一定の体積を中性化させるために必要な CO₂ 量は、使用した骨材に関わらず、ほぼ同等であることがわかった。

4.2.6 圧縮強度と中性化係数の関係

図-16 に圧縮強度と中性化係数の関係を示す。圧縮強度が小さいものほど中性化が早く進む一般的な傾向が見られた。

高炉スラグ細骨材に比べ、天然砂は標準砂を除き傾きが緩やかであった。高い圧縮強度では高炉スラグ細骨材を使用したものは天然砂に比べ中性化しにくいことがわかる。

4.2.7 塩酸溶解による骨材表面観察

塩酸溶解後の細骨材の写真を、天然砂は大井川を、高炉スラグ細骨材は銘柄 K についてそれぞれ写真-1、写真-2 に示す。高炉スラグ細骨材を使用したものにはひび割れの入った白色のものが多く見られたが、天然砂を使用したものにはあまり見られなかった。

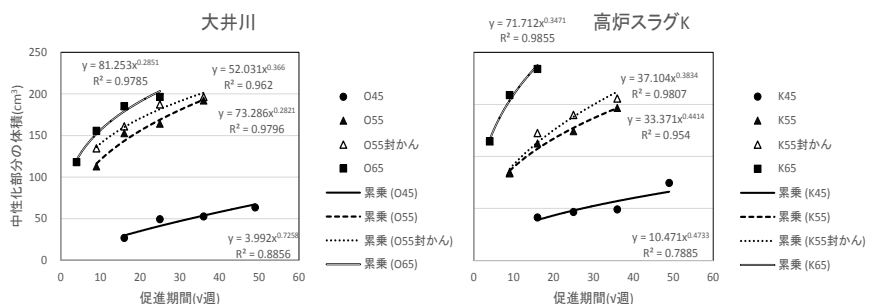


図-11 促進期間と中性化部分の体積

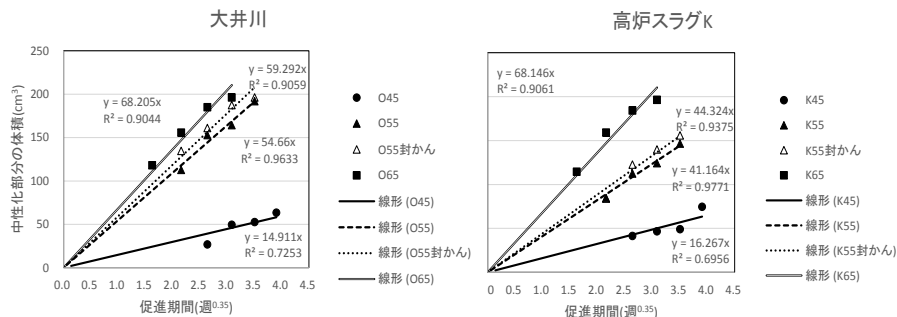


図-12 促進期間^{0.35}と中性化部分の体積

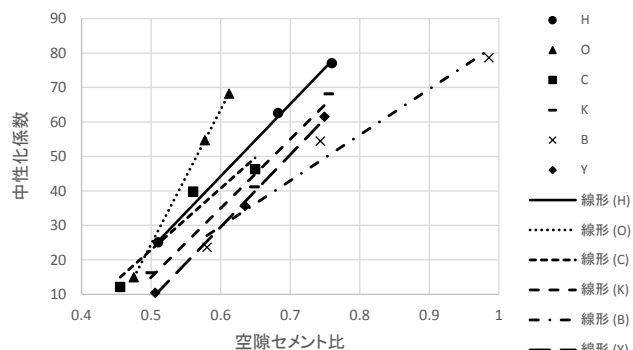


図-13 空隙セメント比と中性化係数

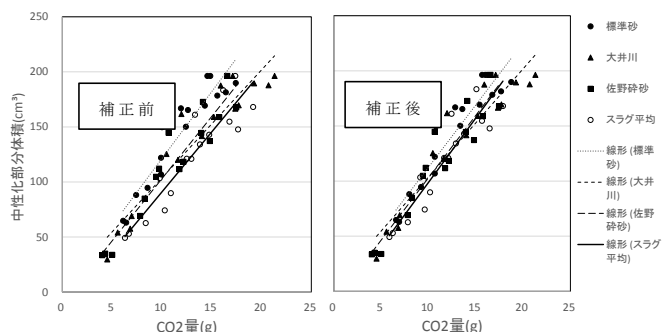


図-14 天然砂 CO₂ 量と中性化部分体積

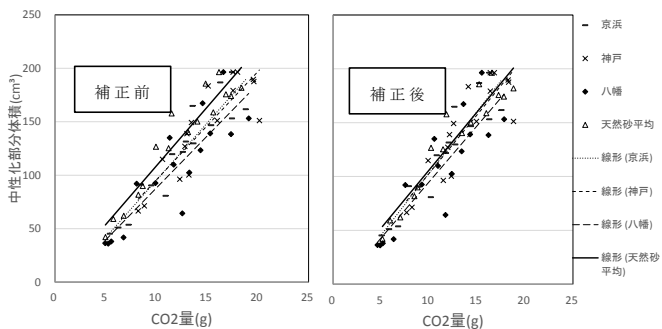


図-15 高炉スラグ CO₂ 量と中性化部分体積

5. まとめ

本実験は次のようにまとめられる。

- ・水セメント比が高くなるにつれ、天然砂を使用したものはフロー値が大きくなり、高炉スラグ細骨材を使用したものは小さくなる傾向を示した。
- ・高炉スラグ細骨材を使用したものは、実積率が高いもののフロー値も大きくなる。
- ・天然砂を使用したものに比べて、高炉スラグ細骨材を使用したものは空気量が多くなる。
- ・天然砂を使用したものに比べて、高炉スラグ細骨材を使用したものはブリーディング量が多くなる。
- ・空気量の補正を行うと、天然砂を使用したものと、高炉スラグ細骨材を使用したものはほぼ類似の圧縮強度を示した。ただし、吸水率の高いものは小さい値となった。
- ・天然砂、高炉スラグ細骨材いずれを使用した場合も、圧縮強度が高くなると、超音波伝播速度の値も大きくなることが確認された。
- ・圧縮強度が小さい時は天然砂を使用したものが超音波伝播速度は大きい、圧縮強度が高くなると高炉スラグ細骨材を使用したものが超音波伝播速度は大きくなった。
- ・材齢と質量増減の関係では、促進中性化を行ったものは質量が増加していったが、完全に中性化したものについては質量の増加は止まり、徐々に減少する傾向であった。
- ・促進期間と中性化部分の体積の関係では、回帰式から中性化係数を求めることができた。
- ・空隙セメント比と中性化係数の関係から、高炉スラグ細骨材を用いると天然砂より中性化が遅いことがわかった。
- ・天然砂に比べて高炉スラグ細骨材は、中性化するためには多くのCO₂量が必要であるが、セメント量の補正をかけると一定の体積を中性化させるのに必要なCO₂量は同等であることが分かった。
- ・高い圧縮強度では、天然砂に比べて高炉スラグ細骨材を使用したものは中性化しにくいことが分かった。

表-4 中性化係数(y=a'x^{0.35})

記号	W/C	a	b					中性化係数 a'
			b	b平均	異常値 除去後	W/C55 平均	W/C55 全体平均	
H	45	16.6	0.468	0.454	0.468	0.324	0.350	25.1
	55	56.9	0.316		0.316			62.6
	55封かん	60.8	0.809		0.332			54.7
	65	103.0	0.224		0.224			77.0
O	45	4.0	0.726	0.415	0.726	0.324		14.9
	55	52.0	0.366		0.366			54.7
	55封かん	73.3	0.282		0.282			59.3
	65	81.3	0.285		0.285			68.2
C	45	5.8	0.549	0.427	0.549	0.384		12.1
	55	32.0	0.420		0.420			39.8
	55封かん	46.7	0.349		0.349			46.6
	65	57.1	0.393		0.393			46.3
K	45	10.5	0.473	0.411	0.473	0.412		16.3
	55	37.1	0.383		0.383			41.2
	55封かん	33.4	0.441		0.441			44.3
	65	71.7	0.347		0.347			68.1
B	45	18.4	0.422	0.358	0.422	0.359		23.7
	55	62.6	0.305		0.305			54.4
	55封かん	44.5	0.413		0.413			54.0
	65	89.5	0.294		0.294			78.6
Y	45	22.5	0.127	0.364	0.127	0.297		10.4
	55	40.5	0.307		0.307			35.6
	55封かん	52.3	0.642		0.287			49.6
	65	56.2	0.379		0.379			61.5

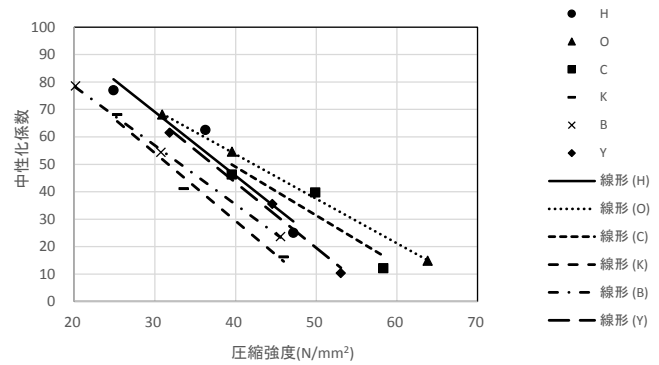


図-16 圧縮強度と中性化係数

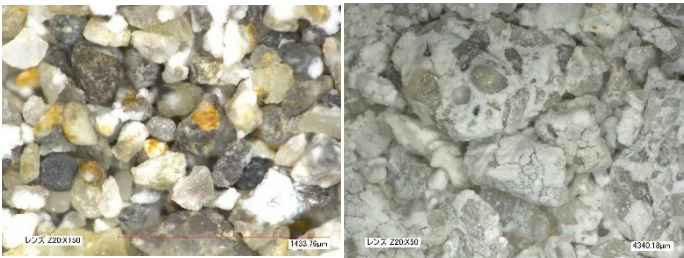


写真-1 大井川

写真-2 高炉スラグ K

謝辞

本研究の実施に当たり、工学院大学阿部研究室の卒論生の協力を得た。また、本研究で使用した高炉スラグ細骨材は、鉄鋼スラグ協会より提供いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの調査設計・施工指針・同解説, p.126, 2013.2
- 2) 奥村博昭、沼田晋一、野田鉄平：高炉スラグ細骨材を用いた高炉セメントコンクリートの長期性状、コンクリート工学年次講演論文集 第8巻, pp. 117-120, 1986
- 3) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を用いるコンクリートの施工についての調査研究（その3）報告書, p.36, 2012.3
- 4) 齊藤和秀、吉澤千秋、吉田亮、梅原秀哲：収縮低減剤と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの性質、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp. 439-444, 2013
- 5) 朝比奈俊和、緒方満成、中尾陽一：高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの基礎的性質、生コン技術大会研究発表論文集 第13巻, pp. 83-88, 1991
- 6) 石橋昌史、松下博通、佐川康貴、尾上幸浩：砕砂および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの配合および硬化性状に関する研究、日本コンクリート工学協会論文集 巻：JCI-C68, pp.113-118, 2005.12
- 7) 木村真也、關裕司、齊藤丈志、三本巖：機能性に着目した高炉スラグ細骨材の有効利用に関する基礎的研究、生コン技術大会研究発表論文集 第16巻, pp. 41-46, 2011
- 8) 李柱国、流田靖博：複数種のスラグ細骨材を用いたコンクリートの性能、日本建築学会技術報告集 第18巻, 第38号, pp. 5-10, 2012.2
- 9) 山口勇氣、藤井貴志、阿部道彦：モルタルのブリーディングに及ぼすセメントおよび混和剤の影響、日本建築学会 関東支部研究報告集, pp.121-124, 2012.3