

論文

[1012] 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度に及ぼす練り混ぜ方法の影響

正会員○檀 康弘 (新日鐵化学㈱高炉セメント技術センター)

正会員 牧角龍憲 (九州大学工学部)

正会員 阪本好史 (新日鐵化学㈱高炉セメント技術センター)

小森達也 (九州大学大学院)

1. まえがき

高炉スラグ微粉末 (以下GBFSと称する) は、コンクリートの耐久性や水密性の改善に極めて有効であり、特にアルカリ骨材反応の抑制や硫酸塩抵抗性などに優れている。この特長を利用して、海洋構造物など過酷な環境下のコンクリートに、普通ポルトランドセメント (以下OPCと称する) や早強セメントの混和材として使用するという検討が各方面で行われている。しかしながら一方で、GBFSを混和材として使用する場合には、コンクリートの初期強度が低いためOPC以上に十分な初期養生あるいは湿潤養生が必要とされ、このことがGBFSの混和材としての課題になっている。また、低温時の強度発現性状がOPCと比較して低下するとされており¹⁾、GBFSを混和材として使用する上では、低温時の初期強度発現性状の改善も求められている。

そこで著者らは、GBFSを混和材として通常のコンクリート施工に適用するために、GBFSを用いたコンクリートの初期強度を改善する方法を検討し、その耐久性や水密性を十分に生かしたセメントコンクリートの開発を行っている。GBFSを用いたコンクリートの初期強度発現性状を改善する方法としては、ブレン値6000~8000cm²/gといった超微粉末のGBFSを用いる方法²⁾や、促進型のAE減水剤を用いる方法³⁾等が報告されている。このとき、ブレン値4000~5000cm²/gのGBFSの生産性が高いことを考慮すれば、後者がより実用的である。この改善効果をさらに高めるために著者らは、GBFSに対するアルカリ刺激に着目して、GBFSとOPCをそれぞれ別々に練り混ぜるという方法 (以下分割練り混ぜと称する) による、初期強度増進を試みた。すなわち、別々に練り混ぜた後にそれらを混合することにより、あらかじめ接水させたGBFSをpH12以上の状態のセメントペースト中に混入することになり、より効果的なアルカリ刺激が得られて、GBFSの反応が促進できると考えている。

先に行ったモルタルによる実験の結果⁴⁾、この分割練り混ぜによって材令3日の圧縮強さが10~15%程度増進することが確認された。そこで本研究では、さらにコンクリートとしての性状を把握することを目的として、分割練り混ぜが長期も含めた強度に及ぼす影響と、耐久性の一つの指標となる細孔径分布に及ぼす影響を検討した。また養生条件を変えた実験を行い、養生温度や初期水中養生期間の影響も検討した。

その結果、低温や気中などの悪条件も含めたいずれの養生条件においても、材令7日までの初期の強度が増進し、全細孔量も減少した。ここにその報告をする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

OPCは、JISモルタルの圧縮強さが

材令3日で 155kgf/cm^2 、7日で 217kgf/cm^2 のA社製のを、GBFSはせっこう無添加のSK社製のをを用いた。その化学成分を表-1に示す。細骨材は粗粒率2.41で比重2.65の海砂を、粗骨材は最大寸法20mmで比重2.59の碎石を用いた。AE減水剤はリグニンスルホン酸系のN社製で、空気量の調整にAE助剤を用いた。

2.2 実験概要

(1) コンクリート試験：コンクリートの配合は表-2に示す。尚、目標スランプは及び目標空気量は練り混ぜNにおいて $8 \pm 1\text{cm}$ ならび

に $4 \pm 1\%$ とし、S1・S2はそれと同一配合とした。練り混ぜは図-1に示すように、可傾式ミキサ（容量50ℓ）2機と2軸の強制式ミキサ（容量100ℓ）1機

を用いて、表-2中にある配合A、Bをそれぞれ可傾式ミキサに投入して練り混ぜ、4分後に強制式ミキサに同時に投入し、さらに2分間練り混ぜた。

分割練り混ぜ時のAE減水剤の添加方法は、OPCとGBFSに半量ずつ添加

するもの（記号S1）と、GBFS側に全量添加するもの（記号S2）とし、通常練り混ぜ方法（記号N）と比較した。

打ち込み及び養生温度は5、20、30℃とし、成形後24時間で脱型した。養生方法は、脱型後試験まで水中養生のもの、同じく湿度 $65 \pm 3\%$ の気中養生のもの、材令3日並びに7日まで水中養生した後湿度 $65 \pm 3\%$ の気中養生するものの4水準とした。なお試験は、材令1日は脱型直後に、またその他は各養生状態から取り出した後直ちに行った。

(2) 細孔径分布試験：配合は表-2に示す配合より粗骨材を取り除いたものとした。練り混ぜはモルタルホバート2機を用いて、配合A、Bをそれぞれ4分間練り混ぜた後にBをAに投入し、さらに2分間練り混ぜた。また、養生条件は強度試験と同じとした。細孔径分布の測定には水銀圧入式ポロシメーターを用い、同一試料で圧縮強度試験を行った。

表-1 化学成分 (%)

	比重	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃
OPC	3.15	1.6	21.3	5.5	2.7	63.8	2.0
GBFS	2.91	0.1	34.8	14.0	0.5	40.9	0.7

表-2 配合

混 合 方 法	単 位 量 (kg/m ³)							
	W	OPC	GBFS	S	G	AE減水剤 (cc)	AE助剤	
N	A	80	80	80	383	595	800	2A
	B	80	80	80	383	595	800	2A
S1	A	80	160	---	383	595	800	2A
	B	80	---	160	383	595	800	2A
S2	A	80	160	---	383	595	----	--
	B	80	---	160	383	595	1600	4A

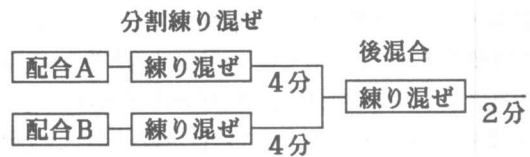


図-1 練り混ぜ方法

表-3 スランプ及び空気量試験結果

温 度 (°C)	スランプ (cm)			空気量 (%)		
	混練方法			混練方法		
	N	S1	S2	N	S1	S2
20	8.4	7.6	9.0	3.5	3.5	3.7
5	8.7	8.8	---	4.0	4.4	---
30	7.7	6.8	---	4.1	3.5	---

3. 実験結果 及び 考察

フレッシュコンクリートのスランプと空気量の結果を表-3に、またコンクリートならびにモルタルの圧縮強度、及び平均細孔径と試料1g当りの細孔量を表-4に示す。なお表中養生方法で3日、7日とあるのは、初期水中養生期間のことである。

表-4 強度試験 及び 細孔径分布試験結果

温度 ℃	養生 方法	混 練 方法	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)						平均細孔径		全細孔量		
			コンクリート			モルタル			(Å)		(x10 ⁻¹ cc/g)		
			材令			材令			材令		材令		
			1	3	7	28	91	7	28	7	28	7	28
20	水	N	21	119	189	393	515	227	366	136.6	108.9	1.012	0.672
		S1	29	134	219	397	480	242	371	128.2	110.6	0.837	0.649
		S2	24	124	207	370	502	265	421	122.2	105.5	0.798	0.519
	気	N	同	125	214	367	429	233	337	214.2	221.7	1.040	0.790
		S1	水	147	234	378	409	257	426	153.9	145.4	0.876	0.679
		S2	中	150	225	336	377	281	423	163.3	164.4	0.875	0.630
	3	N	同	同	206	405	496	257	400	143.0	165.9	0.924	0.729
		S1	水	水	247	427	454	269	446	122.4	134.2	0.900	0.709
		S2	中	中	218	394	420	315	500	120.5	106.8	0.812	0.492
	7	N	同	同	同	371	506	234	393	139.8	177.0	1.037	0.757
		S1	水	水	水	420	470	254	421	131.8	168.2	0.951	0.753
		S2	中	中	中	395	421	264	440	123.7	157.2	0.878	0.626
5	水	N	2	48	123	254	371	161	290	173.6	142.8	1.015	0.757
	S1	2	62	137	265	377	161	317	177.1	131.9	1.033	0.808	
	S2	---	---	---	---	---	174	346	180.6	126.4	1.053	0.698	
30	水	N	57	159	259	437	533	302	494	133.7	126.3	0.540	0.467
	S1	91	193	270	436	478	366	500	120.4	116.6	0.606	0.380	
	S2	---	---	---	---	---	374	527	136.7	115.3	0.551	0.304	

(1) 分割練り混ぜの効果

図-2に養生温度20℃の場合の練り混ぜNに対するS1、S2の強度比を示す。またモルタルの全細孔量を図-3に示す。

図-2より分割練り混ぜの強度は、材令7日までは練り混ぜNよりも大きく、材令28日以降はNと同程度あるいは小さくなっている。また図-3で示すように、練り混ぜNと比較して材令7日の全細孔量が20~30%少なくなった。

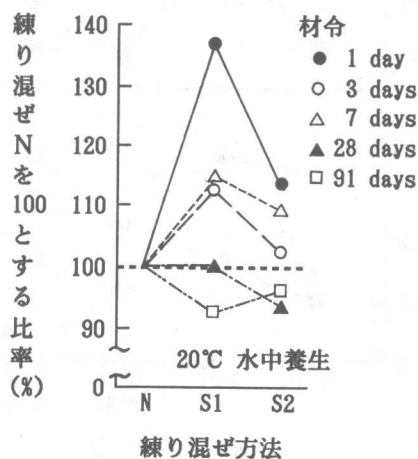


図-2 練り混ぜ方法と強度比

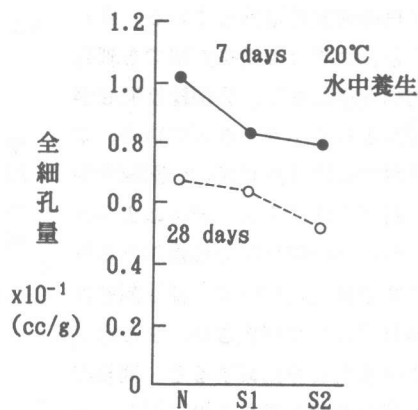


図-3 練り混ぜ方法と全細孔量

大門の報告⁵⁾では、GBFSは接水直後にGBFS粒子の周囲に約0.2 μm程度の透過性の悪い被膜を生成すると報告している。通常練り混ぜと分割練り混ぜでは、GBFSに対するCa(OH)₂のアルカリ刺激の時間的なずれにより、被膜を生成する速度やその厚さが異なると考えられる。このことが、分割練り混ぜにより強度が増進したことや細孔径が小さくなったことと何等かの関係があると思われるが、不明な点が多く、今後さらに検討を進める予定である。

またモルタルとコンクリートではS1とS2の強度傾向に差がみられるが、これは魚本ら⁶⁾が報告しているように、ミキサの違いや減水剤の添加方法の違いにより、凝結やコンシステンシー性状等の影響によるものと考えられ、今後の検討が必要である。

(2) 初期水中養生期間の影響

図-4に材令7日のコンクリートとモルタルの各練り混ぜ方法における養生方法と強度の関係を、また図-5に平均細孔径と全細孔量の関係を示す。

図-4に示すように、いずれの養生方法においても、またコンクリート、モルタルいずれの場合も、分割練り混ぜにより材令7日の強度は増進している。また図-5から、いずれの養生方法でも細孔量、平均細孔径ともに、分割練り混ぜが練り混ぜNよりも小さくなっている。また全細孔量では練り混ぜN、分割練り混ぜとも、養生方法によって差はあまりみられないが、平均細孔径では差がみられる。特に気中養生において、練り混ぜNと分割練り混ぜの差が大きい。また水中養生と気中養生とを比較すると、練り混ぜNでは差が約80 Åであるのに対し、S1、S2ではそれぞれ25、40 Å程度である。つまり分割練り混ぜすると、養生方

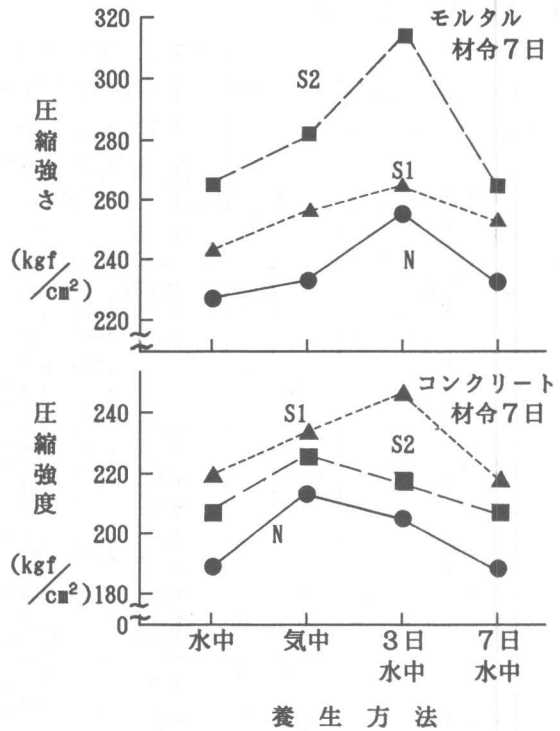


図-4 養生方法と強度の関係

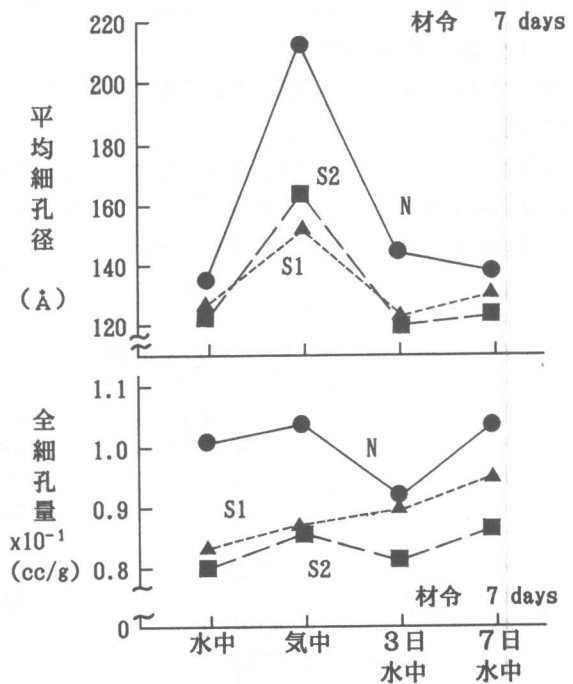


図-5 養生方法と全細孔量の関係

法によって全細孔量には差がないが、細孔径が全体に小さい方へシフトする。そのために分割練り混ぜは、練り混ぜNよりも乾燥の影響を受け難いと考えられる。

(3) 養生温度の影響

図-6に各養生温度における、練り混ぜNの強度(100とする)に対するS1の強度比を示す。

また図-7に各養生温度における1日当りの強度の進展量を示す。図-7中の点線は、通常の高炉セメントB種のものである⁷⁾。

図-6よりいずれの養生温度においても、分割練り混ぜにより初期の強度が増進していることが認められる。ただしその強度増進の程度は養生温度により異なり、特に材令1日において養生温度による差が顕著で、温度が高くなるにつれて分割練り混ぜと練り混ぜNの強度の差が大きくなっている。さらに強度の進展量をみると、30℃の場合は材令1日にそのピークが現れているが、20℃、5℃の場合は3日にそのピークが移っている。特に5℃の場合は材令1日ではほとんど強度が発現されていない。つまり養生温度が低い場合でも、分割練り混ぜにより強度を増進させるものの、OPCを含めて全体の反応がゆるやかであるために、ピークが遅れて発現する。養生温度が上昇するにつれて全体の反応が活発になり、それとともに分割練り混ぜによる極初期反応、あるいはアルカリ刺激が活発になり、より早期に強度が発現した

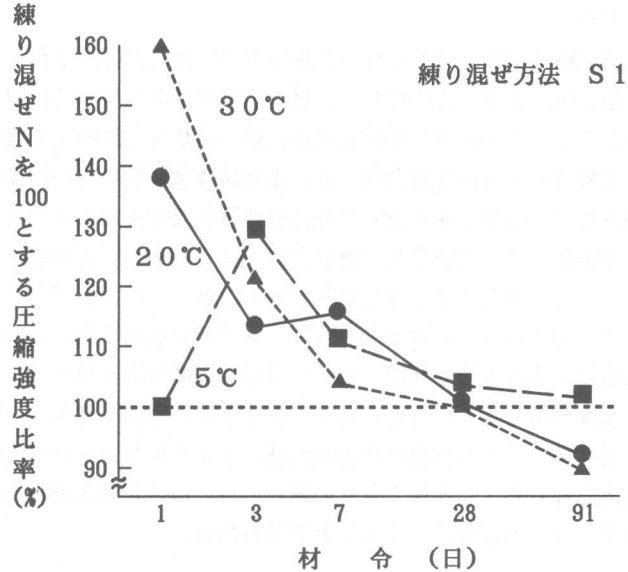


図-6 養生温度毎の練り混ぜS1とNの圧縮強度比率の関係

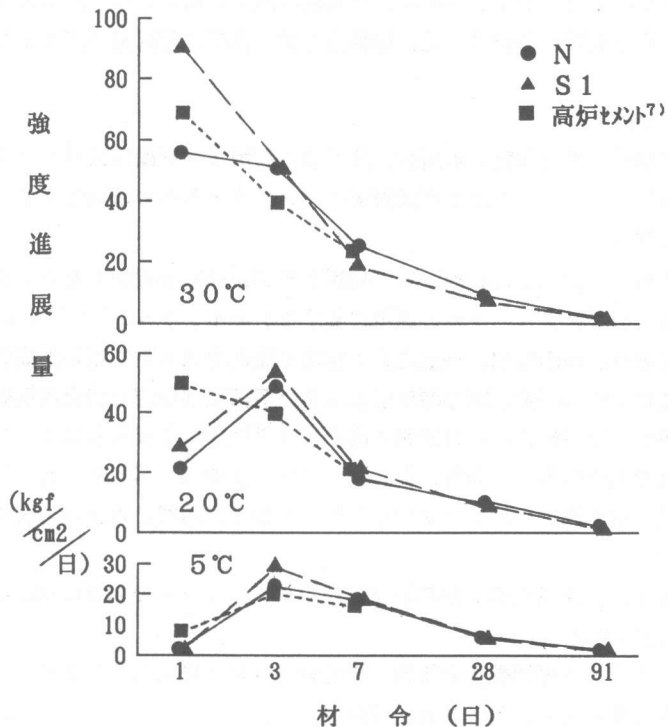


図-7 養生温度毎の練り混ぜ方法と圧縮強度進展速度の関係

と考えられる。

また通常の高炉セメントと比較しても強度進展の量が増加しており、分割練り混ぜによる初期強度増進の効果が認められる。

4. まとめ

(1) 分割練り混ぜを行うとGBFSの初期の反応が促進され、より早期に密実な構造を作り上げるため、練り混ぜNと比較して、材令7日で全細孔量が20%程度小さくなった。これにともなってコンクリートの初期の圧縮強度が、練り混ぜNと比較して材令1日で15~35%、3日で5~15%、7日で10~15%程度上回った。また材令28日以降の長期強度は、初期の反応が緩やかである練り混ぜNの伸びが大きくなり、分割練り混ぜの効果が小さくなる。

(2) 本実験で行ったいずれの養生方法においても分割練り混ぜにより初期強度の改善効果は発現された。また初期の水中養生期間の短いほど、その効果が大きい傾向にあった。

(3) 5~30℃のいずれの養生温度についても分割練り混ぜの効果が認められ、特に材令1日の強度発現に大きな影響を及ぼした。30℃の場合には練り混ぜNよりも60%程度も強度が増進するなど、温度が高くなるにしたがって、より早期に強度が発現する傾向にあった。

(4) 材令7日までの初期の圧縮強度は、モルタルではS2が最大であり、コンクリートではS1が最大となった。これはミキサの違いあるいはAE減水剤の添加方法の違いにより、凝結やコンシステンシーの影響によるものと考えられる。

〔謝辞〕

最後に、本研究を進めるにあたり実験に協力いただいた、九州大学工学部・土木工学科第4講座の古賀源象氏、赤嶺雄一氏、加藤能宏君、並びに研究室の方々に対し深く感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 遠藤裕悦、児玉和巳、中川修、高田誠：高炉スラグ微粉末がコンクリートの配合と強度に及ぼす影響について、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集、1987.3、pp73-80.
- 2) 今井益隆、大橋猛、斉藤敦志：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの諸性質、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム、1987.3、pp67-72.
- 3) 岡田研介、森山容州、長尾之彦：無塩化促進型減水剤を用いた高炉セメントコンクリートの初期強度に関する研究、昭和63年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp558-560.
- 4) 檀康弘、阪本好史、牧角龍憲：高炉スラグ微粉末を混入したセメントの初期強度増進のための練り混ぜ方法に関する研究、第43回セメント技術大会講演集、pp166-169.
- 5) 大門正機：高炉水砕スラグの水和反応の機構と速度、近藤連一先生追悼記念誌、1981.3、pp151-163.
- 6) 魚本健人、西村次男：練り混ぜ方法がコンクリートの品質に及ぼす影響、セメント技術年報41、pp189-192.
- 7) コンクリート専門委員会報告、最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その2)、F-36、1983.2.