

論文 高炉スラグ細骨材がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響

浦野 真次^{*1}・田中 博一^{*2}・藤井 隆史^{*3}・綾野 克紀^{*4}

要旨: 高炉スラグ細骨材を用いると、AE 剤を用いることなく高い耐凍害性が得られること等が知られている。しかし、高炉スラグ細骨材は、骨材表面がガラス質であるために保水性が悪く、ブリーディングを抑えながら良好な施工性を有するコンクリートを製造することが難しい材料である。特に、BFS1.2 に区分される高炉スラグ細骨材を全量使用すると、スランブは著しく低下する。本論文では、細骨材率、増粘剤の使用および練混ぜ時間等の検討を行うことにより、高炉スラグ細骨材を用いても、良好な施工性を有するコンクリートを製造できることを示した。

キーワード: 高炉スラグ細骨材、粒度分布、単位水量、材料分離抵抗性、凍結融解抵抗性

1. はじめに

高炉スラグ細骨材は鉄鉱石から銑鉄を製造する過程で発生する副産物である。反応性の高い非晶質の高炉スラグ細骨材を細骨材として使用することにより、耐凍害性、耐塩害性などの耐久性の高いコンクリートを製造することができるとされる研究報告^{1),2)}と、その反対に、高炉スラグ細骨材を用いると、耐凍害性が著しく劣り、AE 剤によって良質な空気を多めに混入させる必要があるとする研究報告³⁾がある。相反する結果となるのは、後者の試験に用いたコンクリートのスランブが 18cm 程度になるよう製造されたため、0.6~1.0cm³/cm² ものブリーディングが生じたことが原因と考えられる。高炉スラグ細骨材は、一般の細骨材と粒子形状や粒度分布が異なることから、細骨材として全量使用すると、骨材の分離が生じたり、ブリーディングが増大するなど、良好なフレッシュ性状が得られず、施工性が著しく低下する。そのため、高性能 AE 減水剤や高性能減水剤のみでスランブを大きくしたコンクリートでは、ブリーディングが必然的に大きくなり、AE 剤を用いても所要の耐凍害性が得られない場合がある。これに対して、増粘剤を用いブリーディングを抑えれば、同じ配合であっても AE 剤を用いずに高い耐凍害性が得られることが報告されている⁴⁾。

本研究では、硬化後の耐久性確保を目的に細骨材として高炉スラグ細骨材を全量使用する条件で、単位水量を増大させることなく良好なフレッシュ性状を確保するための検討を行った。高炉スラグ細骨材に、BFS1.2 に区分される細目のものを主として使用しても、細骨材率、増粘剤の使用および練混ぜ時間等の検討を行うことにより、ブリーディングや骨材の分離を生じることなく、作業性の高い、場所打ちが可能なコンクリートが製造できるこ

とを示した。また、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートが、フレッシュ性状の劣るものであっても、増粘剤を用いれば、AE 剤を用いることなく、高い耐凍害性は得られることを示した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1 に示す。セメントは、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種の 2

表-1 使用材料

種類	記号	仕 様
セメント	NC	普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3280cm ² /g）
	BB	高炉セメント B 種（密度：3.04g/cm ³ ，比表面積：3910cm ² /g）
細骨材	BFS1	高炉スラグ細骨材（BFS1.2）（表乾密度：2.73g/cm ³ ，吸水率：0.82%，粗粒率：2.14）
	BFS2	高炉スラグ細骨材（BFS5-0.3）（表乾密度：2.56g/cm ³ ，吸水率：5.90%，粗粒率：3.77）
	磨砕加工有無	磨砕加工前（表乾密度：2.57g/cm ³ ，吸水率：1.79%，粗粒率：3.16） 磨砕加工後（表乾密度：2.65g/cm ³ ，吸水率：0.69%，粗粒率：2.00）
	S	君津産山砂（表乾密度：2.62g/cm ³ ，吸水率：1.49%，粗粒率：2.56，実積率：68.7%）
粗骨材	G	硬質砂岩碎石（最大寸法：20mm，表乾密度：2.64g/cm ³ ，吸水率：0.90%）
混和剤	SP1	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
	SP2	増粘剤一液型高性能減水剤
	SP3	ポリカルボン酸系高性能減水剤
	AE	AE 剤（アルキルエーテル系）
	DF	消泡剤（ポリアルキレングリコール）

*1 清水建設（株） 技術研究所 建設基盤技術センター 博(工)（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所 社会システム技術センター 博(工)（正会員）

*3 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博(工)（正会員）

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博(工)（正会員）

表-2 コンクリートの配合

No.	配合名	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤の添加率(C×%)							
					W	C	S	BFS1	BFS2	G	SP	AE	DF					
1	S40-175N	40	45	4.5	175	438(NC)	756	0	0	931	0.60(SP1)	0.004	0.000					
2	BFS40-175N							788		903	0.80(SP1)	0.000	0.005					
3	BFS35-175N	35						764			903			0.80(SP1)				
4	BFS40-175BB	40						781			923			0.45(SP1)				
5	BFS35-175BB	35						756			894							
6	BFS30-155-40	30	40		517(BB)	0	688	998	1.00(SP1)	0.004	0.010							
7	BFS30-155-50		50				860		832			1.30(SP1)						
8	BFS35-155-40	35	40		443(BB)		714		1036			1.00(SP1)						
9	BFS35-155-50		50				893		864			1.30(SP1)						
10	BFS35-155-39		39		155		443(NC)		0	729	1102	1.50(SP2)	0.000	0.000				
11	BFS35-155-41		41					766		1066								
12	BFS35-155-43		43					803		1030								
13	BFS35-155-45		45					841		994								
14	BFS35-155-47		47					878		958								
15	BFS35-155-42-0	42						785		1048	0.80(SP3)	0.000	0.010					
16	BFS35-155-42-10							702						78				
17	BFS35-155-42-30							539						231				
18	BFS35-155-42-50							380	380									

種類を用いた。高炉スラグ細骨材は、BFS1.2に区分される細目のものと、BFS5-0.3に区分される粗目のものを用いた。高炉スラグ細骨材の粒度分布を図-1に示す。本実験で用いた細目のBFS1.2の粒度分布は、単独で用いた場合、JIS A 5308の砂の粒度範囲から逸脱するもので、一般の細骨材と比較して1.2～5mmの範囲の骨材が大幅に減少することとなる。粗目のBFS5-0.3は、2.5mm以下の骨材が大幅に少ない細骨材である。また、高炉スラグ細骨材の磨砕加工の効果を検討するために、製鉄所で水砕加工のみ行われたスラグと、円盤粉砕機を用いて磨砕加工を行った高炉スラグを用いた。比較用の一般の細骨材には、君津産の山砂を用いた。混和剤は、一般の高性能AE減水剤、高性能減水剤と、材料分離抵抗性が付与された増粘剤一液型の高性能減水剤の3種類を用いた。

2.2 試験の概要

(1) モルタルの流動性試験

高炉スラグ細骨材がモルタルの流動性に及ぼす影響を調べるために、水セメント比が30%で、砂セメント比が1.33で、セメント量に対して0.8%の高性能AE減水剤(SP1)を用いたモルタルのフロー試験を行った。セメントは、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の2種類を用いた。なお、モルタルの練混ぜおよびフローの測定は、JIS R 5201に規定される方法に従って0打フローの測定を行った。

(2) コンクリートの流動性試験

フレッシュ性状の検討を行った配合を表-2に示す。配合No.1～5までは単位水量を175kg/m³とし、水セメント比を35%および40%とした配合である。なお、配合No.2～5については、通常の練混ぜ方法に加え、分割練

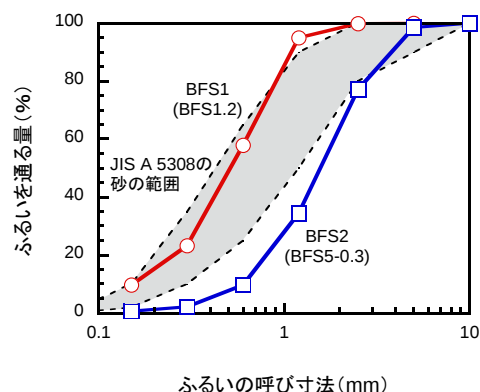


図-1 高炉スラグ細骨材の粒度分布

混ぜ方法での練混ぜも行った。通常の練混ぜは、全材料投入後120秒間練り混ぜた。分割練混ぜ方法は、1次水の水セメント比を22%とし、セメント、細骨材、水のみで120秒間練り混ぜた。その後、2次水に混和剤を混入し、粗骨材とともに60秒間練り混ぜた。

配合No.6～9は、単位水量を155kg/m³とし、水セメント比を30%および35%として、細骨材率の影響を調べた配合である。高性能AE減水剤にはSP1を使用した。なお、細骨材として高炉スラグ細骨材を全量使用すればAE剤を用いることなく凍結融解抵抗性を向上させることが可能であるが³⁾、フレッシュ性状の改善を期待し、目標空気量4.5%となるようAE助剤を使用した。

配合No.10～14も、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状に細骨材率の与える影響を調べた配合である。単位水量を155kg/m³とし、混和剤には、増粘剤一液型高性能減水剤のSP2を用いている。

配合No.15～18は、高炉スラグ細骨材の品質の影響を調べるために、BFS1.2の高炉スラグ細骨材とBFS5-0.3

表－3 モルタルフロー試験結果		
要因	種類	JIS フロー値
細骨材	NC+BFS1	110mm
	NC+S	223mm
セメント	NC+BFS1	110mm
	BB+BFS1	218mm

の高炉スラグ細骨材とを混合して用いた配合である。細骨材率は 42%で、BFS5-0.3 の高炉スラグ細骨材を、0%、10%、30%および 50%混合した配合になっている。

(3) コンクリートの凍結融解試験

コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148 に規定される水中凍結融解方法 (A 法) に準拠して行った。ただし、凍結水には、凍結融解作用による劣化が促進されるように⁵⁾、質量パーセント濃度で 10%の塩化ナトリウム水溶液を用いた。供試体は、打込み後 18±2 時間で脱型し、脱型後は試験開始まで 20±2℃の水中で養生を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 モルタルの流動性

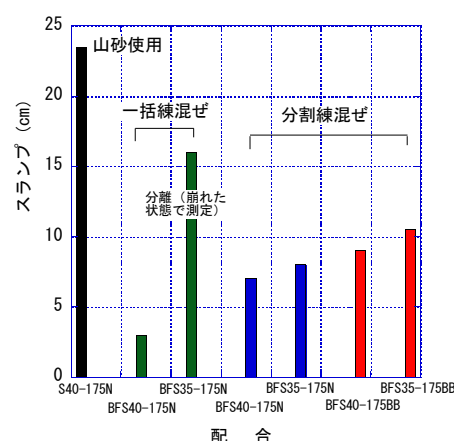
表－3 に、高炉スラグ細骨材がモルタルの流動性に及ぼす影響を調べた試験結果を示す。この表から明らかに、高炉スラグ細骨材を使用したモルタルのフローは、山砂を細骨材に用いたモルタルに比べて流動性が低いことが分かる。高炉スラグ細骨材の粒度が細かく比表面積が大きくなるために、流動に寄与するセメントペーストが相対的に減少することが原因と考えられる。また、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べて、高炉セメント B 種を用いたもののフローが大きくなるのは、水セメント比が同じ場合、高炉セメント B 種の密度が普通ポルトランドセメントに比べて小さいために粉体体積が増加し、流動性が向上するものと考えられる。すなわち、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの流動性改善効果の観点からは、高炉セメント B 種の使用は効果的であると思われる。

また、上記の実験に加え、高炉セメント B 種を用い、減水剤を用いることなく水セメント比を 50%としたセメントペーストに 0.3mm 以下の細骨材を砂セメント比で 0.3 としたモルタルフロー試験を行った。その結果、0.3mm 以下の山砂を用いた場合のフローは 214mm で、0.3mm 以下の高炉スラグ細骨材を用いた場合のフローは 209mm となり、ほとんど差がなかった。すなわち、高炉スラグ細骨材の微粒分の凝集などによって、モルタルの流動性が低下する可能性は小さいと考えられる。

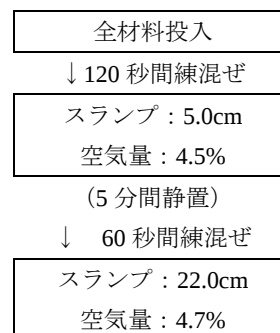
3.2 コンクリートの流動性

(1) 水セメント比および練混ぜ方法の影響

表－2 に示した単位水量が 175kg/m³の配合 No.1～5 の



図－2 水セメント比がスランプに与える影響



図－3 練混ぜ方法による影響

コンクリートのスランプを図－2 に示す。山砂を用いた配合 No.1 の S40-175N は、高性能 AE 減水剤を 0.6%添加してスランプ 23.5cm であった。これに対し、高炉スラグ細骨材を用いた配合 No.2 の BFS40-175N は、高性能 AE 減水剤を 0.8%としてもスランプ 3cm となり、著しくスランプが低下した。これは試験に用いた高炉スラグ細骨材が BFS1.2 であり、粒度が山砂より細かく、細骨材の比表面積が増大して流動性に寄与するセメントペーストが減少したためと考えられる。水セメント比が 35%の配合 No.3 の BFS35-175N は、単位セメント量が配合 No.2 に比べて多いために、スランプの値は大きくなっているが、分離してスランプが崩壊する状態であった。

これに対して、分割練混ぜ方法により練り混ぜた結果が図－2 に示される青色と赤色のものである。高性能 AE 減水剤量はセメント量の 0.45%と一括練混ぜの場合の約半分であっても、スランプが大きくなっている。分割練混ぜ方法により、セメント粒子等の微粒分が均等に分散することが、スランプが大きくなることに寄与したものと考えられる。

図－3 は、表－2 に示した単位水量が 155kg/m³の配合 No.6 の BFS30-155-40 を用いて、通常の練混ぜ後、5 分間静置し 60 秒間の練混ぜを行った結果である。全材料投入後 120 秒間練り混ぜた通常の練混ぜ後に測定したスランプは、5.0cm であった。しかし、その後ミキサ内にて 5 分間静置し、さらに 60 秒ほど練り混ぜた後のスランプは

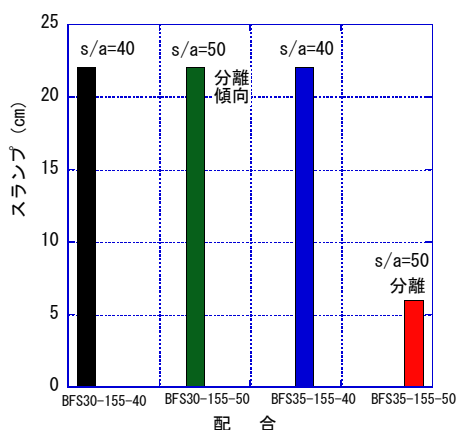


図-4 細骨材率の与える影響

22cm まで増大した。スランプ試験において単位水量が 175kg/m^3 の場合のようなスランプの崩壊や材料分離は認められず、空気量も、練混ぜ時間を増大させても新たな空気の巻き込みは生じていない。通常の練混ぜ後に静置し、さらに練混ぜを行う方が、分割練混ぜ方法よりも、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性をより良く改善できるといえる。

(2) 細骨材率の影響

図-4 は、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのスランプに細骨材率が与える影響を示したものである。これらの結果は、表-2 に示した No.6～9 の配合を用いて、図-3 の練混ぜ方法によって得られたものである。水セメント比が 30% の BFS30-155-40 および BFS30-155-50 は、高性能 AE 減水剤の添加量をそれぞれ 1.0%, 1.3% とすることによりスランプは 22cm となったが、細骨材率が 50% の BFS30-155-50 は、材料分離傾向にあり、スランプの形状はやや崩れた形となった。一方、水セメント比が 35% の BFS35-155-40 および BFS35-155-50 では、細骨材率が 40% のコンクリートは材料分離を生じることなくスランプが 22cm となったが、細骨材率が 50% のものは材料分離が生じ、スランプも 6cm 程度であった。表-4 は、図-4 に示したコンクリートのスランプの形状を示したものである。細骨材率の大きいものの方が、プラスティシティーに欠け、材料分離の傾向が大きいことが分かる。

図-5 は、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのスランプに与える細骨材率の影響を示したものである。なお、水セメント比は 35% としている。この図から明らかなように、細骨材率が高いほどスランプが小さくなっている。細骨材率が高く、高炉スラグ細骨材の使用量が増えるとともに高炉スラグ細骨材の比表面積が増大し、流動性に寄与するセメントペースト量が減少することで、スランプが小さくなるものと考えられる。すなわち、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、細骨材率が

表-4 単位水量 155kg/m^3 の配合のスランプ状況

	s/a=40%	s/a=50%
W/C=30%	 BFS30-155-40	 BFS30-155-50
W/C=35%	 BFS35-155-40	 BFS35-155-50

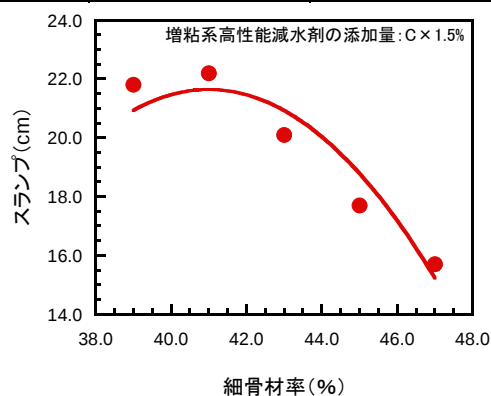


図-5 細骨材率とのスランプの関係

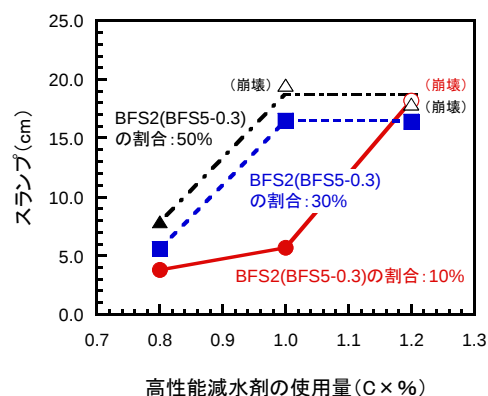


図-6 高炉スラグ細骨材の粒度分布の影響

高く、流動性に寄与するセメントペースト量が相対的に少ない配合では、高性能 AE 減水剤あるいは高性能減水剤の添加でスランプを大きくさせようとしても、セメントペーストの粘性が下がるために、材料分離が生じ易くなるものと推察される。

(3) 高炉スラグ細骨材の品質の影響

BFS1.2 の高炉スラグ細骨材と BFS5-0.3 の高炉スラグ細骨材と混合し、粒度分布の調整によってフレッシュ性が改善される効果を調べた結果を図-6 に示す。これらの結果は、表-2 に示した No.16～18 の配合を用いて得られたものである。混和剤には、増粘剤および AE 剤を含まない一般の高性能減水剤を用いている。BFS1.2 の高炉スラグ細骨材に BFS5-0.3 の高炉スラグ細骨材を

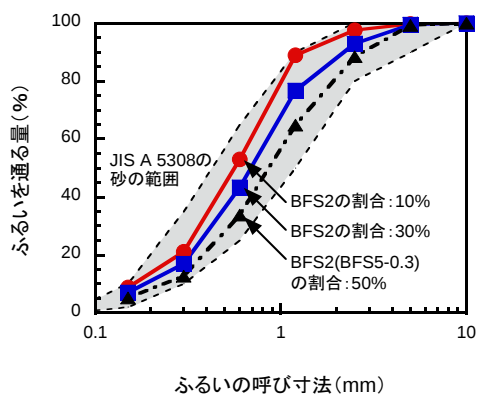


図-7 混合した高炉スラグ細骨材の粒度分布

10%、30%および50%混合して用いた場合の粗粒率は、それぞれ、2.31、2.63および2.96で、その粒度分布は図-7に示されるとおりである。図-6に示されるように、BFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を混合することで、少ない高性能減水剤の使用量でスランプが大きくなっている。また、表-5は、図-6に示したコンクリートのスランプの形状を撮影したものである。BFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を10%用いたものは、高性能減水剤の使用量を増加させても、BFS1.2の高炉スラグ細骨材のみを用いたときと同様にスランプは大きくならず、単位セメント量の1.2%の高性能減水剤を加えた場合は、コンクリートが崩れたことでスランプの値が大きくなった。これに対して、BFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を30%混合して用いた場合には、高性能減水剤の添加とともにスランプが大きくなっており、粒度分布の異なる高炉スラグ細骨材を混合することでも、フレッシュ性状を改善することが可能であることが分かる。さらに、BFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を50%まで用いた場合には、高性能減水剤を単位セメント量の1.2%まで用いると、中央部が粗骨材が残るスランプになっており、BFS1.2とBFS5-0.3の高炉スラグ細骨材には、適切な混合割合があることが分かる。

図-9は、図-8に示すBFS1.2の高炉スラグ細骨材とBFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を混合して用いたコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。配合は、目標空気量を2%とし、水セメント比が35%、細骨材率が46%、単位水量が155 kg/m³で、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。図-8に示すコンクリートには、増粘剤一液型高性能減水剤と消泡剤を添加し、故意に増粘剤一液型高性能減水剤のバランスを崩し、材料分離気味のコンクリートとしている。BFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を用いていないもの、および、BFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を15%用いているものには、幾分の水走りが生じており、BFS5-0.3の高炉スラグ細骨材を30%用いたものではスランプが崩れているが、型枠に打ち込んだ状態では、コンクリート表面に若干の浮き水が生じ

表-5 高炉スラグ細骨材の粒度分布の影響

BFS5-0.3 の割合	高性能減水剤の使用量		
	C×0.8%	C×1.0%	C×1.2%
10%	 SL=3.8cm	 SL=5.7cm	 SL=18.2cm
30%	 SL=5.6cm	 SL=16.5cm	 SL=19.5cm
50%	 SL=7.9cm	 SL=16.4cm	 SL=17.9cm



図-8 凍結融解試験を行ったコンクリートのフレッシュ性状

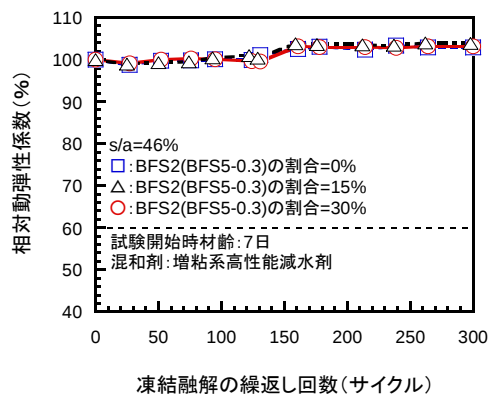


図-9 高炉スラグ細骨材の種類が凍結融解抵抗性に与える影響

る程度であった。なお、コンクリートの空気量は、いずれも2.2～2.7%であった。図-9から明らかなように、材料分離を生じていても、増粘効果の付与された高性能減水剤を用いていれば、300サイクルの凍結融解作用を与えても、相対動弾性係数は低下しないことが分かる。

図-10は、磨砕加工を行う前と磨砕加工後の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状を比較したものである。ここで用いた高炉スラグ細骨材は、表-1に示した磨砕加工有無の品質のものである。配合は、目標空気量を2%とし、水セメント比が35%、細骨材率が46%、単位水量が175 kg/m³で、セメントは普通ポル

トランドセメントを使用した。表-1 に示すとおり、磨砕加工を行うことで、表乾密度は大きくなり、吸水率および粗粒率は小さくなっている。磨砕加工を行う前の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのスランブは16.3cmであるが、粗骨材が分離している。これに対して、磨砕加工を行った高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートはプラスチックな性状となりスランブは7.5cmであった。高炉スラグ細骨材の磨砕加工によって、コンクリートのフレッシュ性状が大きく変化することが分かる。また、図-11 は、磨砕加工がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を示したものである。磨砕加工を行う前のものは、材齢 63 日まで水中養生を行っても 200 サイクル程度で相対動弾性係数が低下したのに対し、磨砕加工を行うことで、450 サイクルを超えるまで相対動弾性係数が低下していない。磨砕加工によって骨材粒径が小さくなり、高炉スラグ骨材がセメントペーストと反応する表面積が多くなるため、凍結融解抵抗性が改善されたと思われる。磨砕加工を行うことで、フレッシュ性状とともに凍結融解抵抗性も大きく改善されると言える。

4. まとめ

本研究では、単位水量を増大させることなく、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状を改善する製造方法について検討を行った。以下に本研究で得られた結果を示し、本論文のまとめとする。

- (1) コンクリートの細骨材として BFS1.2 に区分される高炉スラグ細骨材を全量使用すると、スランブが著しく低下する。
- (2) 材料を一度練混ぜた後、5 分間ミキサ内で静置し、さらに練り混ぜる方法でコンクリートを製造すると、少ない高性能減水剤量でワーカブルなコンクリートを製造することができる。
- (3) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、細骨材率が大きくなるほど、スランブが低下する傾向にある。
- (4) BFS1.2 の高炉スラグ細骨材と BFS5-0.3 の高炉スラグ細骨材とを混合して用いることによりフレッシュ性状を改善させることができる。
- (5) 増粘効果の付与された高性能減水剤を使用すると、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状を改善するだけでなく、水走りや粗骨材の分離材料分離があったとしても、耐凍害性に優れたコンクリートを製造することができる。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議



SL=16.3cm

(a)磨砕加工前

SL=7.5cm

(b)磨砕加工後

図-10 磨砕加工がフレッシュ性状に与える影響

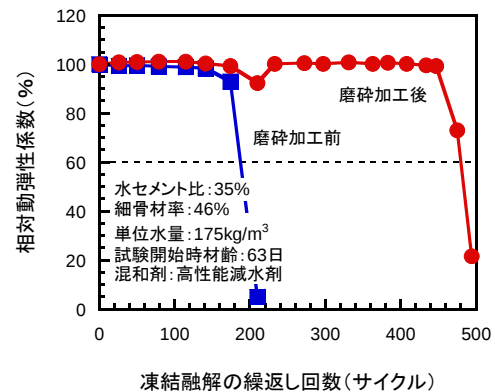


図-11 磨砕加工が凍結融解抵抗性に与える影響

の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)によって実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 綾野克紀，藤井隆史：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究，土木学会論文集 E2，Vol.70，No.4，pp.417-427，2014.12
- 2) 藤井隆史，細谷多慶，杉田篤彦，綾野克紀：高炉スラグを用いたコンクリートの中酸化，塩化物イオン浸透性および時間依存性変形に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.637-642，2015.6
- 3) 上本洋，阿部道彦，鹿毛忠継，浅野研一：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.119-124，2011.6
- 4) 藤井隆史，中溝翔，細谷多慶，綾野克紀：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に与えるブリーディングの影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 15，pp. 101-104，2015. 10
- 5) 竹田宣典，十河茂幸：凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.427-432，2009.6