論文 多量のフライアッシュおよび高炉スラグ細骨材の使用による低度処 理再生粗骨材コンクリートの耐凍害性向上に関する研究

平田 大希*1・橋本 親典*2・横井 克則*3・渡邉 健*4

要旨:低度処理再生粗骨材を使用したコンクリートの耐凍害性向上を目的に、フライアッシュ(以降,FAと称す)を内割 40%混和,細骨材の全量を高炉スラグ細骨材に置換,およびその両方を同時に行った低度処理 再生粗骨材コンクリートの耐凍害性に関する実験を行った。その結果,本実験で作製した供試体の気泡間隔 係数はすべて 250µm 以下であったにも関わらず,低度処理再生粗骨材コンクリートに内割 40%の FA を混和 した際は耐凍害性が若干向上し,高炉スラグ細骨材を使用した際は普通コンクリートと同程度の耐凍害性を 有した。しかし,FA と高炉スラグ細骨材を同時に使用した場合,粗骨材に関わらず耐凍害性が低下した。 キーワード:再生粗骨材,フライアッシュ,高炉スラグ細骨材,圧縮強度,凍結融解抵抗性,気泡間隔係数

1. はじめに

コンクリートの劣化の要因の一つに凍害が存在し,凍 害に対する抵抗性を耐凍害性と呼ぶ。コンクリートの耐 凍害性を確保するためには,適切な気泡の連行が必要と される。コンクリート中の水分が凍結することで発生す る膨張圧はコンクリート内部に伝わるが,近くに気泡が 存在すると凍結していない自由水を通して膨張圧を逃が すことが可能となる。このとき,コンクリート中の空気 量が同じ場合,隣り合う気泡間の距離が小さくなるほど その効果は大きくなる。そのため,気泡の平均間隔を表 す気泡間隔係数が,コンクリートの耐凍害性を評価する 上で用いられる¹⁾。

一方,循環型社会の形成が求められており,コンクリ ート業界においても産業副産物を使用した環境負荷低減 型コンクリートの必要性の認識が高まっている。しかし ながら,産業副産物を使用したコンクリートは,普通コ ンクリートと比較して強度や耐久性を低下させる恐れが ある。廃棄コンクリートを破砕・洗浄し,粒度調整をし たのみの低度処理再生骨材を使用したコンクリートは, 再生骨材の吸水率が高く,強度および耐久性を低下させ るとされており,特に耐凍害性に関しては,AE剤の使 用により適切な気泡を連行しても低下する。

この現状を踏まえ,本研究室では低度処理再生骨材を 使用したコンクリートの品質改善を目的に実験を行って きた^{2),3)}。その結果,再生骨材コンクリートは普通コン クリートと比較してフライアッシュ(以降,FAと称す) を混入したことによる強度増進率が大きくなることを確 認した。これは,初期材齢において再生骨材に付着して いる水酸化カルシウムにより早期ポゾラン反応が起こる ためであると考えられる。しかしながら,耐凍害性に関 しては,細骨材に吸水率の小さな普通骨材の使用および 水セメント比を低減させることによって,耐凍害性の向 上を確認することができたものの,その耐凍害性は普通 コンクリートと比較すると低下する。

これに対し,最近の藤井ら⁴⁾の研究では,高炉スラグ 細骨材を使用することによって,粗骨材とモルタルとの 界面に析出する水酸化カルシウムが少ないために,AE 剤を使用することなく高い耐凍害性を得ることが出来る ことを明らかにした。

著者らは、この藤井らの研究成果を参考にし、高炉ス ラグ細骨材を使用することで、低度処理再生粗骨材コン クリートの耐凍害性を向上できる可能性について検討し た。すなわち、低度処理再生粗骨材コンクリートに高炉 スラグ細骨材の使用をパラメータとして追加し、既往の 研究より再生骨材と組み合わせることにより強度増進率 が大きくなるとされる FA の多量混和と高炉スラグ細骨 材の使用が、再生粗骨材コンクリートの強度特性および 耐凍害性に与える影響に関する実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料の産地・物性を示す。高炉スラグ細 骨材は、「JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材第 1 部:高炉スラグ骨材」に適合するものを使用した。普通 粗骨材は、青梅産5号砕石と青梅産6号砕石を質量比1: 1の割合でブレンドしたものを使用した。再生粗骨材は、 電柱として使用され廃品となったプレストレストコンク リートポール(水セメント比 30%、単位セメント量

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)

使用材料	産地・種類	記号	性状等				
セメント	普通ポルトランドセメント	С	密度: 3.16 g/cm ³ ,比表面積: 3370 cm ² /g				
混和材	フライアッシュ Ⅱ 種	FA	密度:2.25g/cm ³ ,比表面積:3290cm ² /g				
細骨材	君津産砕砂	NS	表乾密度:2.67g/cm ³ ,吸水率:1.26%,粗粒率:2.51				
	福山産高炉スラグ細骨材	BS	表乾密度:2.74g/cm ³ ,吸水率:0.49%,粗粒率:2.53				
粗骨材	青梅產 5 号砕石	NC	表乾密度:2.65g/cm ³ ,吸水率:0.49%,実積率:62.2%				
	青梅産 6 号砕石	NU	表乾密度:2.65g/cm ³ ,吸水率:0.60%,実積率:61.7%				
	再生粗骨材	RG	表乾密度:2.54g/cm ³ ,吸水率:3.67%,実積率:57.8%				
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系				
	AE 剤	AEA	高アルキルカルボン酸系				
	消泡剤	DeF	ポリアルキレングリコール誘導体				

表-1 使用材料の産地・物性

表-2 示方配合

町へ々	W/B	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)						(B × %)			Slump	Air	
配合名	(%)	(%)	(%)	W	С	FA	NS	BS	NG	RG	SP	AEA	DeF	(cm)	(%)
NSNG	-	39			397	_	692	_	1074	_	0.8	0.012	_	16.0	4.5
NSNG(F)		65			238	159	670	—	1041	—	0.6	0.400	0.01	16.0	5.0
BSNG		39			397	—	—	710	1074	—	0.8	0.020	_	20.0	7.0
BSNG(F)	20	65	20	155	238	159	—	688	1041	—	0.6	0.400	0.01	18.0	6.0
NSRG	- 39	39	- 39	155	397	—	692	—	_	1029	0.8	0.020	_	20.0	6.0
NSRG(F)	-	65			238	159	670	—	_	998	0.6	0.400	0.01	16.0	4.5
BSRG		39			397	—	_	710	_	1029	1.0	0.020		16.0	4.0
BSRG(F)		65			238	159	_	688	_	998	0.6	0.400	0.01	18.5	6.0

500kg/m³程度)を破砕・洗浄し、5mm~20mmの範囲に 粒度調整したのみの低度処理のものを使用した。

2.2 配合

表-2 に配合および練混ぜ直後の空気量を示す。水結 合材比,単位水量および細骨材率は,それぞれ,39%, 155kg/m³および 39.0%の一定とした。FA の混和は,質 量内割 40%の一定とした。また,FA の置換率は,FA を 置換した場合の水セメント比が,凍結融解作用が起こる 環境条件下のゆるい地域での施工の上限とされている 65%⁵⁾となるよう設定した。目標空気量は5.5±1.5%とし た。高性能 AE 減水剤は,スランプが 18cm 程度となる ように添加した。FA を用いた場合に巻き込まれるエント ラップトエアを取り除くために,FA を混和した配合は消 泡剤を用いた。

2.3 試験項目および方法

(1) フレッシュコンクリートの空気量測定方法

JIS A 1128:2005「フレッシュコンクリートの空気量の 圧力による試験方法-空気室圧力方法」に準じた。

(2) 圧縮強度試験方法

JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」 に準じた。試験材齢は、7、14、28、91 日の4 材齢とし



写真-1 気泡組織測定時の様子

た。

(3) 気泡組織測定方法

画像処理による硬化コンクリート気泡計測装置を用い, 画像処理である面積比法にて測定を行った。測定時の様 子を**写真-1**に示す。パソコン画面上に映し出されてい る円形の色がついている部分は,蛍光塗料が浸透してい る気泡を指し,周囲の黒い部分はコンクリートを指す。 供試体を縦横に移動可能なステージ上に設置し,測定時 は予め指定した60mm×60mmの範囲内を4mm×4mm ごとに分割して順次撮像して測定を行った。各視野の測 定データは画像処理装置に蓄積され,全視野の測定終了 後に空気量,気泡間隔係数等の出力値を算出した。コン クリートの気泡間隔係数は、セメントペースト中におい て、N個の同じ寸法の球体の気泡を単純立方格子に配置 したとき、立方体の対角の長さの1/2から気泡半径を引 いた距離として定義され、式(1)によって算出した¹⁾。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right]$$
 (1)

ここに,L:気泡間隔係数(mm)

α: 気泡比表面積(mm²/mm³)

P:ペースト容積比(%)

A:硬化コンクリートの空気量(%)

供試体は厚さ 2cm 程度で, φ100 × 200mmの円柱供試 体の両端面付近および中心付近の 3 箇所をコンクリート カッターで切断したものを用いた。切断面,特に測定面 は高性能研磨機で研磨剤を用いて研磨を行い,表面の凹 凸を除去した後,洗浄し不純物を除去した。乾燥後,測 定面に蛍光塗料を塗布し,真空デシケータに入れて真空 引きを行い気泡部分に蛍光塗料を浸透させ,その後余分 な塗料を除去し乾燥後,再度研磨を行い,供試体の完成 とした。

(4) 凍結融解試験方法

JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法(A 法)」に準じた。試験開始材齢は 28 日とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験の結果

図-1に圧縮強度試験結果を示す。FAは内割で置換し ているため, FA を混和した配合は無混和の配合と比較し て強度が低下した。また、全材齢において再生粗骨材コ ンクリートである NSRG の強度は普通コンクリートであ る NSNG の強度の 70~75%に留まっている。このことよ り、普通コンクリートに再生粗骨材を使用したことによ る強度低下が確認できる。一方、普通コンクリートおよ び再生粗骨材コンクリートそれぞれに高炉スラグ細骨材 を使用した BSNGと BSRG を比較すると全材齢で強度は 同程度であり、NSNGの強度とも同程度であった。この ことより、高炉スラグ細骨材を使用することで、再生粗 骨材による強度低下を抑えることができる可能性が示唆 された。詳細は不明であるが、高炉スラグ細骨材は溶融 状態の高炉スラグを水で急冷したものであるため、再生 粗骨材に残っていたアルカリ分と反応したために強度低 下を抑えることができた可能性があると考えられる。

3.2 気泡組織測定および凍結融解試験の結果

(1) フレッシュ時および硬化後の空気量の関係

フレッシュ時と硬化後の空気量を図-2 に示す。全配 合において,変化量に多少の違いはあるものの,フレッ シュ時よりも硬化後の方が空気量が少なくなった。これ



図-2 フレッシュ時と硬化後の空気量の関係

は、型枠詰め込み時に内部振動機による締固めを行った ことによる空気量の減少^のおよび凝結過程における気泡 の消失などによるもの⁷⁷と考えられる。

(2) 硬化後の空気量および気泡間隔係数の関係

硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係を図 -3 に示す。全配合において、硬化コンクリートの空気 量の範囲は3.0±1.0%であり、気泡間隔係数は耐凍害性 が向上するとされている250µm以下であった⁷⁾。一般に, 硬化コンクリートの空気量が多いほど気泡間隔係数が小 さくなる傾向になるとされているが、硬化コンクリート の空気量が 3.0%付近においても気泡間隔係数が小さく なった。これは、式(1)より、気泡間隔係数が空気量とと もに比表面積にも左右される値であるためである。図-4 に 10µmの範囲ごとの各気泡径の気泡分布を示す。同図 に表されるように、全配合において 150µm 未満の気泡径 の空気量が多く存在し、150µm以上の気泡径の空気量は 少ない。そのため、比表面積が大きくなり、気泡間隔係 数も小さくなった。また,NSRG(F)は,他の配合と比較 して 50µm程度気泡間隔係数が大きくなった。これは, 硬化後の空気量が小さかったことおよび、図-4より、 150µm 未満の気泡径が他配合より少なく、比表面積が大 きくなったためである。しかしながら,NSRG(F)の配合 でも気泡間隔係数は250μm以下であり、耐凍害性に優れ

た指標であると言える⁷⁾。

(3) 凍結融解試験結果

図-5 に凍結融解試験結果を, 表-3 に耐久性指数を示 す。普通コンクリートである NSNG は耐久性指数 90 以 上の高い耐凍害性を示した。また,再生粗骨材コンクリ ートである NSRG においても,凍結融解の繰返しを 300 サイクル与えてもコンクリートの相対動弾性係数が 60% を上回った。これは、今回実験で使用したコンクリート の気泡組織が良好であったこと、および本実験で使用し た再生粗骨材の原コンクリートが高強度のコンクリート であったために低下を抑えることができたと考えられる。 しかしながら、再生粗骨材を使用したことにより、NSRG の耐久性指数は NSNG と比較して 30 程度低下した。

普通コンクリートおよび再生粗骨材コンクリートそれ ぞれに FA を混和した NSNG(F)および NSRG(F)は、とも に凍結融解を 300 サイクル与えてもコンクリートの相対 動弾性係数が 60%を上回った。FA を内割で 40%混入し たことにより、水セメント比が大きくなることや気泡組 織の安定性の低下等による耐凍害性の低下が懸念された が、十分な耐凍害性を確保することができた。これは、 水結合材比が 39%と比較的低かったこと、および AE 剤 と消泡剤の使用による適切な気泡の連行によるものと考 えられる。また、NSNG(F)は NSNG と比較して耐凍害性 が低下したものの、NSRG(F)は NSRG と比較して耐凍害 性が向上した。FA の微粒分により密実度が高まったこと や、再生粗骨材に含まれる水酸化カルシウムの早期ポゾ ラン反応によるものであると推察される^{2),3}。

普通コンクリートおよび再生粗骨材コンクリートそれ ぞれに高炉スラグ細骨材を使用した BSNG および BSRG は、ともに耐久性指数が 90 以上と高く、NSNG と同等以 上の耐凍害性を示した。高炉スラグ細骨材を使用するこ とで、粗骨材の種類に関わらず耐凍害性を向上させる可 能性があることが示唆された。コンクリートに高炉スラ グ細骨材を使用することで、粗骨材とモルタルとの界面 に析出する水酸化カルシウムの量が少ないために,水酸 化カルシウムが溶け出した後にその間隙を埋める水が凍 ることによって発生する膨張圧が少ないためであると考 えられる⁴⁾。多くの溶質が、温度が高いほど溶解度も高 くなるのに対し、水酸化カルシウムは温度が低いほど溶 解度が高くなる⁴⁾。そのため,普通砕砂を用いたコンク リートは、骨材界面に析出した水酸化カルシウムが溶出 し、その後を満たした水が凍結することで膨張圧が生じ るが、高炉スラグ細骨材を用いることで骨材界面に水酸 化カルシウムが析出しないために骨材界面の膨張圧が緩 和され、再生粗骨材を用いても凍結融解抵抗性が向上し たと考えられる。

普通コンクリートおよび再生粗骨材コンクリートそれ



表-3 耐久性指数					
配合名	耐久性指数				
NSNG	92.8				
NSNG(F)	83.2				
BSNG	96.4				
BSNG(F)	23.5				
NSRG	64.2				
NSRG(F)	74.5				
BSRG	92.9				
BSRG(F)	47.0				

ぞれに FA と高炉スラグ細骨材を同時に使用した BSNG(F)と BSRG(F)は,ともに比較的早期のサイクルで 相対動弾性係数が 60%を下回った。このことより,FA と高炉スラグ細骨材を組み合わせた場合は耐凍害性が低 下する可能性が考えられる。これは、高炉スラグ細骨材 の潜在水硬性はアルカリが刺激剤として働き効果を現す が,FA を内割で 40%混入したことによりセメント量が 減少したことや、ポゾラン反応によって水酸化カルシウ ムが消費され、潜在水硬性の効果が発現しにくかったた めであると考えられる。

(4) 気泡間隔係数および耐久性指数の関係

気泡間隔係数および耐久性指数の関係を図-6 に示す。 一般に、コンクリートの耐凍害性に与える影響は水結合 材比や気泡間隔係数とされている⁷⁰が、今回行った実験 の範囲では水結合材比は 39%に、気泡間隔係数は 150µm から 250µm であるにも関わらず、耐久性指数にはばらつ きが生じている。これは、コンクリートに使用した材料 の違いによる影響であると考えられる。また、使用した 材料の組み合わせによっては、耐凍害性を低下させる可 能性があることが示唆された。

(5) 凍結融解試験による質量減少率結果

図-7 に凍結融解試験による質量減少率結果を示す。 コンクリートにFAを内割で40%混入することによって、 細骨材の種類および粗骨材の種類に関わらず質量減少率 が大きくなった。凍結融解試験におけるスケーリングは 供試体のごく表面部分に限定される劣化減少であり、コ ンクリート表面の水が凍結する際の氷結圧にコンクリー ト表面の強度が耐えられずに表面組織が剥落する現象と 考えられる⁸⁾。したがって, FA を内割で混入したため水 セメント比が大きくなり、それに伴って強度も低下した ために質量減少率が大きくなったと考えられる。しかし ながら、普通コンクリートおよび再生粗骨材コンクリー トそれぞれに FA と高炉スラグ細骨材を同時に使用した BSNG(F)および BSRG(F)は, FA のみを使用した NSNG(F) および NSRG(F)と比較して、同一の水セメント比かつ同 程度の強度であったにも関わらず質量減少率は小さくな った。図-5より, BSNG(F)および BSRG(F)は早期のサ イクルから相対動弾性係数が低下しており、コンクリー ト内部にも早期のサイクルからひび割れが生じているこ とが考えられる。ひび割れが生じたことにより水が凍結 する際の氷結圧がひび割れ箇所でも発生し、コンクリー ト表面の氷結圧が弱まり,表面部分のスケーリングが抑 えられたため質量減少率が NSNG(F)および NSRG(F)と 比較して小さくなったと考えられる。

(6) 質量減少率および耐久性指数の関係

図-8 に 300 サイクル終了後の質量減少率および耐久 性指数の関係を示す。双方の間に明確な対応関係は見ら



れなかった。凍結融解試験におけるスケーリングは表層 から大きくても 10mm の範囲内であり、スケーリングに よって生じる質量減少率は供試体内部の劣化とは対応し ないと考えられる⁸。図-9 に凍結融解試験を 300 サイ クル終了した後のコンクリート供試体の外観を撮影した ものを示す。質量減少率の大きかった NSNG(F)および NSRG(F)では、供試体表面において骨材が浮かび上がる ほどスケーリングが生じていることが確認できる。一方、 早期のサイクルで相対動係数が 60%を下回った BSNG(F) および BSRG(F)では、供試体表面のスケーリングはざら つく程度であったものの、モルタル部分に目視で判別で



※DF:耐久性指数,W₃₀₀:300 サイクル終了後の質量減少率

図-9 凍結融解試験終了後のコンクリート供試体の外観

きるひび割れが確認できた。コンクリート供試体が凍結 融解作用によって破壊に至らない限り,質量減少率と耐 凍害性の強さには明確な相関はないと考えられる。

4. 結論

低度処理再生粗骨材を使用したコンクリートの耐凍 害性向上を目的に, FA を内割で 40%置換, 細骨材の全 量に高炉スラグ細骨材を使用, およびその両方を同時に 行った低度処理再生粗骨材コンクリートについて凍結融 解抵抗性および耐凍害性に関する実験を行った。本研究 で得られた知見を以下に記す。

- (1) 普通コンクリートと比較して再生粗骨材コンクリ ートの強度発現は70~75%に留まったが、再生粗骨 材コンクリートに高炉スラグ細骨材を使用するこ とで、普通コンクリートと同程度の強度発現を有し た。
- (2) 普通コンクリートに多量の FA を混和した際は耐凍 害性が低下したが,再生粗骨材コンクリートに多量 の FA を混和した際は耐凍害性が向上した。
- (3) 高炉スラグ細骨材を使用した再生粗骨材コンクリートの耐久性指数は90を超え、普通コンクリートと同程度の高い耐凍害性を有した。高炉スラグ細骨材の使用による耐凍害性の向上は、低度処理再生粗骨材を使用した場合においても確認することができた。
- (4) 多量のFAと高炉スラグ細骨材を組み合わせた場合, 粗骨材の種類に関わらず耐凍害性が著しく低下した。

参考文献

- 河野広隆,千歩修,田口忠雄,名和豊春,阿波稔, 近松竜一,片平博:コンクリートの凍結融解抵抗性 の評価方法に関する研究委員会,コンクリート工学 年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 2) 松坂裕介,宮崎健治,横井克則,上田隆雄:低度処 理骨材を用いた再生コンクリートの性能向上に関 する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.33, No.1, pp.1565-1569,2011
- 青江匡剛,平田大希,橋本親典,渡邉健:ハイボリ ュームフライアッシュ再生骨材コンクリートの硬 化性状に関する実験的検討,コンクリート工学年次 論文集, Vol.37, No.1, pp.145-150, 2015
- 5) 土木学会編:コンクリート標準示方書・施工編(2012 年制定),土木学会,2012.
- 6) 坂本久史,松岡克明,井上進作,横井克則:内部振 動機による締固めがコンクリート中の空気量およ び耐凍害性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論 文集, Vol.36, No.1, pp.1054-1059, 2014
- 7) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの 気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリ ート工学論文集, Vol.23, No.1, pp35-47, 2012
- 8) 片平博,渡辺博志:凍結融解作用を受けたコンクリート供試体の力学特性、コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.861-866, 2008