

論文

[1059] 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐凍害性

正会員 ○ 近松竜一 (筑波大学大学院)
 正会員 山本泰彦 (筑波大学構造工学系)
 正会員 長合友造 (筑波大学大学院)

1. まえがき

近年においては、塩害やアルカリ骨材反応によるコンクリートの早期劣化が社会的問題となり、コンクリートの耐久性向上に対する要望が高まっている。高炉スラグ微粉末（以下スラグ微粉末と略称）は、これらの劣化要因に対する対策をはじめとしてコンクリートの品質改善に効果があることから、これを混和材として活用するための研究が活発に行われている。これらの研究成果によれば、十分な湿潤養生を行った場合には、スラグ微粉末の使用はコンクリートの耐凍害性の改善にも効果があることが示されている¹⁾。また、山本ら²⁾は、空気量を4.0～5.5%とし、セメント重量の55%をスラグ微粉末で置換したコンクリートの耐凍害性を調べ、スラグ微粉末を用いないコンクリートは、凍結融解の繰り返しとともに次第に劣化したのに対し、スラグ微粉末を用いたコンクリート（以下スラグコンクリートと略称）の場合には、相対動弾性係数が全く低下せず、凍結融解の繰り返しに伴って逆に増加することを報告した。本研究は、上記の結果にもとずき、スラグコンクリートに所要の耐凍害性を付与するのに必要な空気量の下限を明らかにするとともに、硬化コンクリートの気泡組織の測定を行ってスラグコンクリートの耐凍害性が大きくなる理由について検討した結果をまとめたものである。

2. 使用材料

使用したスラグ微粉末およびセメントの物理的性質と化学成分を表-1および表-2に示す。スラグ微粉末は、1種類の水砕スラグを4種類の粉末度に粉砕したものである。また、セメントは、銘柄の異なる3種類の普通ポルトランドセメントを等量ずつ混合して用いた。混和剤には、リグニン系のA E減水剤およびアルキルスルホン酸塩を主成分とする補助A E剤を用いた。細骨材には、富士川産川砂(比重:2.63、吸水率:1.63%、粗粒率:2.69)を用い、粗骨材には、笠間産砕石(最大寸法:20mm、比重:2.67、吸水率:0.52%、粗粒率:6.70)を用いた。なお、細骨材は、5～1.2mm、1.2～0.6mmおよび0.6mm以下の3種類に、また粗骨材は、5～10mm、10～15mm および15～20mmの3種類にそれぞれふるい分けて貯蔵しておき、使用時にこれらをコンクリート用化学混和剤規格に示された粒度範囲の中央に入るように混合した。

表-1 スラグ微粉末の物理的性質と化学成分

記号	比重	ブレン値, cm ² /g	化 学 成 分 (%)					塩基度 b*
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	
B 3	2.89	3290	42.4	32.2	14.8	1.6	6.0	1.96
B 4	2.89	4500	42.5	32.2	14.5	1.8	6.0	1.96
B 5	2.89	5580	42.5	31.8	14.8	2.1	5.7	1.98
B 8	2.90	7860	42.8	33.0	15.2	0.5	5.9	1.94

* b : (CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂

表-2 セメントの物理的性質と化学成分

記号	比重	ブレン値, cm ² /g	化 学 成 分 (%)					
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
C 1	3.16	3340	62.7	20.9	4.8	2.5	2.1	1.5
C 2	3.17	3270	63.5	22.1	4.8	3.0	1.8	1.6
C 3	3.16	3370	64.2	21.6	4.8	2.8	2.2	1.8

助A E剤を用いた。細骨材には、富士川産川砂(比重:2.63、吸水率:1.63%、粗粒率:2.69)を用い、粗骨材には、笠間産砕石(最大寸法:20mm、比重:2.67、吸水率:0.52%、粗粒率:6.70)を用いた。なお、細骨材は、5～1.2mm、1.2～0.6mmおよび0.6mm以下の3種類に、また粗骨材は、5～10mm、10～15mm および15～20mmの3種類にそれぞれふるい分けて貯蔵しておき、使用時にこれらをコンクリート用化学混和剤規格に示された粒度範囲の中央に入るように混合した。

3. 試験方法

コンクリートの配合は、単位結合材量を320kg/m³と一定にし、目標スランピングが8±1cmとなるように定めた。スラグ微粉末の置換率は55%としたが、B 4については35%とした場合も試験

した。A E 剤を用いたコンクリートの目標空気量は、3.0および3.5%とし、Non A E コンクリートについても試験した。これらの配合の詳細を表-3に示す。

コンクリートの練りませには、容量50ℓの可傾式ミキサを用い、1バッチ当りの練りませ量は40ℓとした。練りませに当たっては、予め捨て練りを行った。A E 減水剤と補助A E 剤は、それぞれの所定量を予め練りませ水に溶解させておいた。練りませは、全材料投入後3分間行った。練り終えたコンクリートは、練り板上で均一に混合した後、直ちにスランプおよび空気量を測定した。

また、同時に圧縮強度試験用および気泡組織測定用供試体(φ10x20cm)ならびに凍結融解試験用供試体(10x10x40cm)を作成した。以上のコンクリートの練りませならびに供試体の作成は、20℃の恒温室で行い、供試体は、翌日脱型した後、所定の材令まで20℃で水中養生した。

凍結融解試験は、試験開始材令を14日とし、同一バッチから作成した4本の供試体のうち、2本ずつを一槽式および二槽式の2種類の試験機で試験した。その他の詳細については、JIS A6204の附属書2に従った。また、硬化コンクリートの気泡組織の測定は、リニアトラバース法(ASTM C457-82a)に準じて行った。

4. 試験結果および考察

コンクリートの試験結果の一覧を表-4に示した。このうち、目標空気量を3%程度とし、スラグ微粉末の置換率を55%としたコンクリートならびにスラグ微粉末を用いないコンクリートの凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化を図-1に示す。また、図-2には、この場合の凍結融解300サイクル終了時の各供試体の重量減少率を示した。さらに、図-3には、凍結融解開始材令(14日)ならびに材令28日および91日における各コンクリートの圧縮強度をスラグ微粉末を用いない場合の値に対する比で示した。

図-1によれば、スラグ微粉末を用いないコンクリートの相対動弾性係数は、試験機によって程度に差はあるものの、凍結融解の繰り返しの伴って次第に低下し、一槽式試験機の結果では、200サイクルで既に60%にまで減少している。これに対して、スラグコンクリートの相対動弾性係数は、何れの場合も全く低下していないことが認められる。また、図-2によれば、スラグコンクリート供試体の重量減少率は、何れも無混入のものよりも小さく、特に比表面積

表-3 コンクリートの配合*

配合番号	スラグ微粉末		目標空気量 (%)	W (kg/m ³)	W / C+Sg (%)	s / a (%)
	記号	置換率 (%)				
1	---	0	3.5	163	50.9	45.5
2	B 3	55	3.5	160	50.0	45.5
3			3.0			
4			---	182	56.9	47.0
5	B 4	55	3.0	160	50.0	45.5
6			3.5			
7			3.0	159	49.7	44.5
8	B 5	55	---	181	56.6	46.0
9			3.0	157	49.1	44.5
10			---	180	56.3	46.0
11	B 8	55	3.5	162	50.6	43.5
12			3.0			
13			---	180	56.3	45.0

* 目標スランプ: 8 ± 1 cm、C+Sg: 320 kg/m³

A E 減水剤: (C+Sg) × 0.25% (A E コンクリートのみ)

表-4 フレッシュおよび硬化コンクリートの試験結果

配合番号	スラグ微粉末		フレッシュ時		圧縮強度*2 (kgf/cm ²)			耐久性*3 指数 (%)	
	記号	置換率*1 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	14日	28日	91日		
1	---	0	8.0	3.2	389	455	541	20	91
2	B 3	55	8.4	3.2	304	419	572	103	105
3			8.0	2.8	300	421	574	99	105
4			7.1	1.2	230	326	---	3	3
5	B 4	55	7.6	3.0	381	494	578	100	103
6			8.8	3.4	356	473	605	106	106
7			8.2	2.9	359	480	624	104	104
8	B 5	55	6.9	1.2	267	365	---	12	7
9			8.1	2.9	384	508	571	104	106
10			7.8	1.2	295	382	---	20	25
11	B 8	55	8.9	3.6	448	559	594	103	109
12			9.2	3.1	454	580	641	104	109
13			7.0	1.3	387	450	---	52	37

*1 単位結合材量(C+Sg): 320 kg/m³ *2 3本の平均値

*3 左側の値は一槽式試験機、右側の値は二槽式試験機による結果を示す。

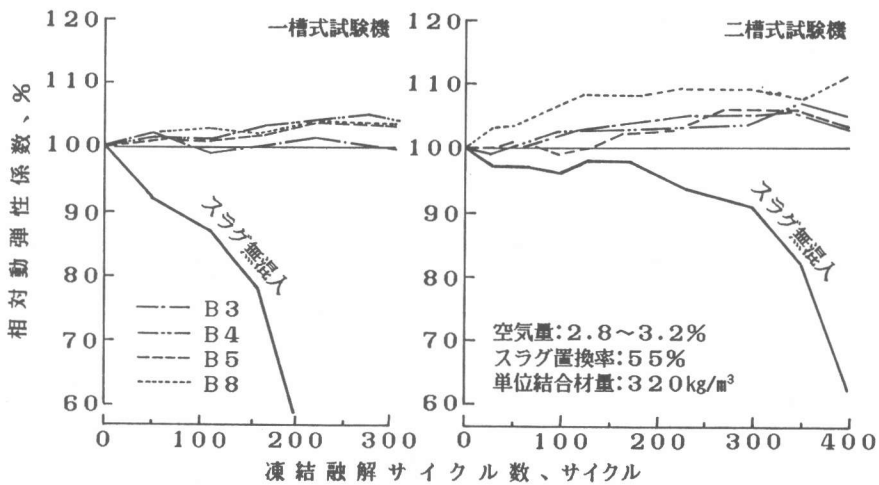


図-1 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化

の大きいスラグ微粉末を用いた場合には、ほとんど表面劣化が生じていないことが認められる。これらの結果は、空気量を4%以上にして試験した既報²⁾の結果と全く同様であり、空気量を3%程度に減じた場合でもスラグコンクリートの耐凍害性が極めて優れていることを示すものといえる。

粗骨材の最大寸法を20mmとした通常のコンクリートに十分な耐凍害性を付与するための空気量の値は、JIS A 5308では4.5%、RC示方書では6%が標準となっており、上記のコンクリートの値(約3%)よりかなり大きい。また、既往の研究を参照しても、一般的な混和剤を用い、粗骨材の最大寸法を20mm程度とした通常のコンクリートにおいて、空気量を約3%に減じてでも耐凍害性が全く損なわれないという報告は見当たらない。一方、耐凍害性には強度も影響すると思われるが、上記の試験開始材令(14日)における各スラグコンクリートの圧縮強度は、B8を除いては、何れも無混入のものより小さな値であった。これらを考慮すると、スラグコンクリートの耐凍害性には、エントレインドエアや強度以外の要因がかなり大きな影響を及ぼしていることが予想される。この点を確認するために、次に、AE剤を混入しないスラグコンクリートについて、前記と同様な試験を行った。

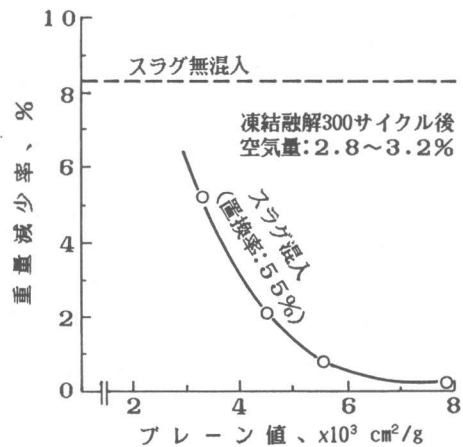


図-2 ブレーン値と供試体の重量減少率の関係

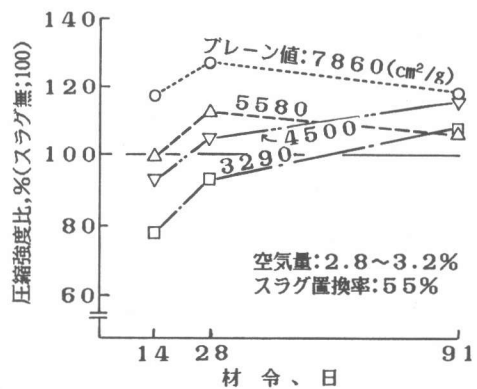


図-3 コンクリートの圧縮強度試験結果

図-4は、この試験結果を示したものである。この図にも認められるように、エントレインドエアを混入しない場合には、スラグコンクリートであっても、全般的にコンクリートの耐凍害性は低下した。しかしながら、その低下の程度は、用いたスラグ微粉末の比表面積の違いにより著しく異なっており、比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を用いた場合ほど、相対動弾性係数の低下の割合が小さくなっている。例えば、相対動弾性係数が60%に低下する凍結融解サイクル数を比較すると、B3を用いた場合はわずか25サイクルであるのに対し、B4およびB5を用いた場合はそれぞれ55および150サイクルに増大し、さらにB8を用いた場合は260サイクルにもなっているのである。

以上に示した試験結果から判断すると、スラグコンクリートとは異なる優れた耐凍害性を有し、その程度は、比表面積の大きいスラグ微粉末を用いた場合ほど大きくなるといえると思われる。しかしながら、スラグコンクリートの場合でも、満足すべき耐凍害性を確保するためには、ある程度のエントレインドエアの混入が必要であることは言及するまでもない。この場合の所要エントレインドエアの量に関しては、図-1、図-4および空気量を4%以上とした既報²⁾の試験結果をもとに、凍結融解300サイクルにおける耐久性指数と空気量との関係を求めた図-5を参照すると、置換率50%程度とした場合には、通常のAEコンクリートの場合より平均して約2%少なくてもよいと考えられる。

凍結融解作用によるコンクリートの劣化機構に関しては、凍結時におけるコンクリート中の水の膨張圧によって内部組織が破壊されるために劣化が生じると一般には考えられている。また、エントレインドエアの混入によって耐凍害性が改善されるのは、凍結時に水の一部がエントレインドエア中に押し出され、水の膨張圧が緩和されるためと考えられている。このような効果は気泡同志の間隔が小さい場合ほど大きくなると考えられるのであって、気泡間隔係数が、200あるいは300 μ m程度以下となるように空気を混入すれば十分な耐凍害性が得られるといわれている。したがって、上記(図-5)のように、所要の耐凍害性を得るのに必要なスラグコンクリートの空気量の値が通常のコンクリートの場合より著しく小さくなった理由としては、スラグの使用によりエントレインドエアの径が相当に小さくなり、空気量が少なくても所要の気泡間隔係数の値が確保されているためであるとも推測された。この点を調べるために、次に、硬化コンクリート中の気泡組織を測定してみた。

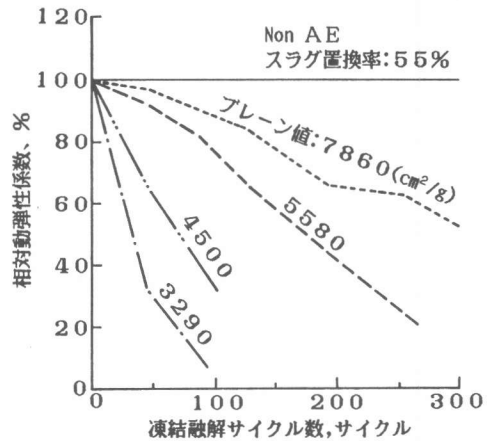


図-4 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化

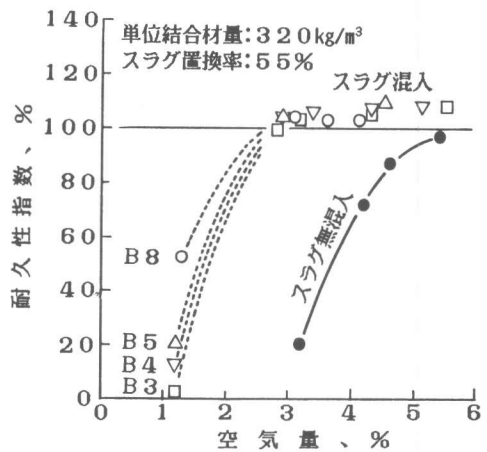


図-5 空気量と耐久性指数の関係

図-6は、耐凍害性を試験したコンクリートのうち代表的なものについて測定した気泡間隔係数の結果を耐久性指数との関係で示したものである。この図によれば、スラグ微粉末を用いないコンクリート(N)の場合には、気泡間隔係数の値が約350~400 μm の範囲において耐久性指数の値が急激に低下しており、山本

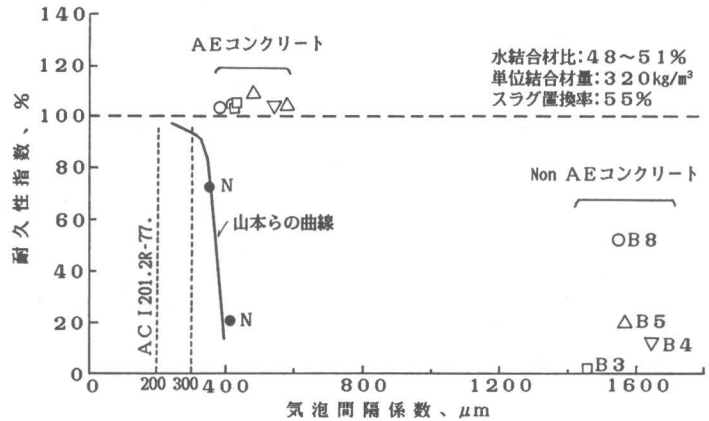


図-6 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

ら³⁾が流動化コンクリートを対象として求めた曲線とはほぼ一致した結果となっている。これに対し、スラグコンクリートの場合には、通常のコンクリートの場合と比べて、著しく異なる結果が得られた。すなわち、スラグ微粉末を用いたAEコンクリートの場合には、耐久性指数の値がいずれも100%以上となったにもかかわらず、気泡間隔係数の値は予想に反して大きくなり、約400~600 μm の範囲にあった。また、気泡間隔係数と耐久性指数の間の全般的な関係をみると、スラグ微粉末を用いた場合に耐久性指数の低下が生じる気泡間隔係数の値は、AE剤を用いない場合の気泡間隔係数の範囲(1450~1650 μm)と極端に相違しない範囲にあり、通常の場合の4倍以上の値となると考えられる。一方、図-7は、空気量を3%とした場合の気泡分布を示したものであるが、スラグを用いた場合には、これを用いない場合よりも全般的に気泡径が大きくなることが認められる。これらの試験結果は、前述したコンクリートの耐凍害性改善のメカニズムに関する一般論から判断すると、コンクリートの耐凍害性には、マイナスの要因となるものである。このような気泡組織を有していたにもかかわらず、スラグコンクリートの耐凍害性が優れていたことは、スラグコンクリートの耐凍害性の改善が、単にエントレインドエアの存在だけでなく、別の支配的な要因によってもたらされていることを示すものと考えられる。

既往の研究によれば、高炉スラグ微粉末を混和すると、コンクリート中の水和物の組織が緻密化し、水密性が高くなるといわれている⁴⁾。これらの特性は、凍結時における自由水の移動距離を短くし、その結果、水の膨張圧

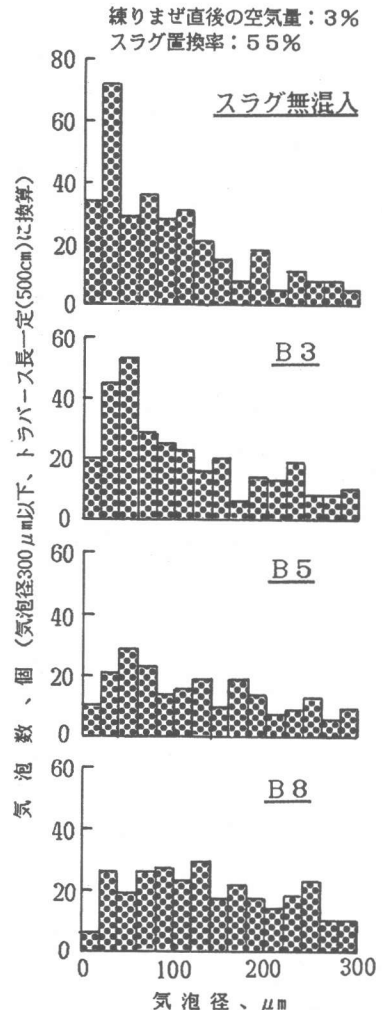


図-7 硬化コンクリートの気泡分布

による組織の損傷が分散されるとともに、1つの損傷の程度が小さくなる効果をもたらすと考えられる。また、水の膨張圧によって損傷が生じて、この損傷部分に新たな自由水が外部から浸入してくるのを防止する効果ももたらされると考えられる。これらの効果が、実際に生じていると仮定すれば、凍結融解による損傷の大部分は、当初の数回の凍結時に生じると考えられるのであって、これとセメントおよびスラグの水和が進行する影響を加味すると、凍結融解試験中においてもスラグコンクリートの動弾性係数が増加傾向にあった本研究の試験結果(図-1)を説明することが可能となる。また、スラグコンクリートの表面劣化が著しく小さいこと(図-2参照)も説明できる。さらに、上述したスラグコンクリートの組織の緻密化が空隙率の減少と細孔径の減少によるものであることが明らかにされているのであって⁵⁾、凍結可能な自由水の絶対量が少なくなっている可能性もある。これらの組織の緻密化の効果は、比表面積の大きいスラグを用いた場合ほど大きくなると考えられるので、スラグの比表面積を大きくした場合ほど耐凍害性が改善された全般的な傾向も説明できるのである。したがって、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の耐凍害性が著しく向上した主因が、スラグの使用による組織の緻密化によるものである可能性は極めて高いと思われる。しかしながら、この問題については今後さらに検討していく必要がある。

5. 結論

本研究の範囲内で次のことが言えると思われる。

- (1)スラグ微粉末を用いたコンクリートは、初期の湿潤養生を十分に行えば、優れた耐凍害性を有し、また、その程度は、比表面積の大きいスラグ微粉末を用いた場合ほど大きい。
- (2)単位セメント量の50%程度をスラグ微粉末で置換すれば、所要の耐凍害性を付与するのに必要なエントレインドエアの量を通常の場合より2%程度減少させることができる。
- (3)スラグ微粉末の使用は、コンクリートの気泡組織をむしろ悪化させる傾向にある。
- (4)スラグコンクリートの耐凍害性の改善は、単にエントレインドエアの存在によるだけでなく、水和物の組織の緻密化に大きく依存している可能性が高い。

【謝辞】本研究の試験に当たっては、藤沢薬品工業(株)のコンクリート研究所の皆様にご多大な御援助を頂いた。また、気泡組織の測定には、文部省科学研究費(No.62460152)で開発した装置を用いた。ここに付記し、厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 櫛原昇、三浦尚、辻孝広：高炉スラグ混和材を用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集、1985年3月
- 2) 山本泰彦、竹内徹：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合と耐凍害性、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、土木学会、1987年3月
- 3) 山本泰彦、小林茂敏：流動化剤の流動化性能および流動化コンクリートの凍結融解抵抗性、土木学会論文集、Vol.348, No.5-1, 1984, pp.71-75
- 4) 町田篤彦：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの水密性に関する研究、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、土木学会、1987年3月
- 5) D. M. Roy, A. Kumar, and J. P. Rhodes : Diffusion of Chloride and Cesium Ions in Portland Cement Pastes and Mortars Containing Blast Furnace Slag and Fly Ash, Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 1986.