

## 論文 低品質粗骨材を用いたコンクリートの耐凍害性

阿波 稔<sup>\*1</sup>・庄谷征美<sup>\*2</sup>・月永洋一<sup>\*3</sup>・杉田修一<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は、密度および吸水率が JIS 規格値を外れる低品質粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性や塩分環境下におけるスケーリング抵抗性について材料の面から基礎的な検討を行ったものである。研究の結果、極めて低品質な粗骨材を用いたコンクリートの ASTM C 666 A 法による凍結融解抵抗性は、配合要因を変化させても顕著な改善効果が見られなかった。しかし、ASTM C 672 によるスケーリング抵抗性は水セメント比や空気量を変化させることによって大きく改善されることを明らかにした。これは、それらの劣化メカニズムの違いによるものと考えられる。

**キーワード：**粗骨材、凍結融解抵抗性、スケーリング抵抗性

## 1. まえがき

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物は、その気候的な条件により、ひび割れの発生、スケーリングやポップアウトに代表されるような特有の凍害劣化を受けやすい環境にある。コンクリートの凍害を考える場合、コンクリートを構成するセメント、骨材、混和材料などの個々の材料品質と、セメントマトリックス中に骨材が分散した状態、すなわち複合材料として捉えることが重要である。特に、その中でコンクリート中に 7 割を占める骨材の品質が耐凍害性に及ぼす影響は大きいものと考えられている。

しかしながら、近年、良質骨材の枯渇化や採取規制などの制約が年々厳しさを増しており、地域によっては良質骨材の入手が非常に困難な状況になりつつある。また、セメント協会が実施した粗骨材および細骨材の品質調査によれば、現在使用されている骨材の品質水準は、かなりの広範囲に及ぶことが判明しており、学会やその他の規定に適合しない骨材も含まれていると

指摘している<sup>1)</sup>。そして、このような現状を考慮すると、今後は各種規格値を満足しないような低品質な骨材についてもコンクリート用材料として有効に利用していかなければならない状況にあると言え、その利用技術も含め骨材の品質とコンクリートの耐凍害性との関わりについて総合的に検討することは極めて重要な課題であると考えられる。

以上のような背景のもと本研究は、密度  $2.5\text{g/cm}^3$  未満および吸水率が 3% を超える、JIS 規格値を満足しない低品質粗骨材を用いたコンクリートの耐凍害性について、材料の面から基礎的な検討を行うことを目的としたものである。本研究では、コンクリートの凍害劣化の形態として、組織の膨張緩みあるいはそれに伴うひび割れの発生として特徴づけられるコンクリートの凍結融解劣化と、凍結防止剤と凍結融解との複合作用により顕在化されるコンクリートのスケーリング劣化、これら 2 つの劣化形態について検討を行っている。

\*1 八戸工業大学講師 工学部土木工学科 博士(工学)(正会員)

\*2 八戸工業大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

\*3 八戸工業大学教授 工学部建築工学科 博士(工学)(正会員)

\*4 八戸工業大学教授 工学部土木工学科 博士(工学)(正会員)

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	良品質粗骨材 の混合割合 (%)	単位容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
20	35	40.4	5	0	0.168	0.152	0.255	0.375
	45	42.4			0.168	0.118	0.282	0.382
	55	44.4			0.168	0.097	0.304	0.381
		45.9	3		0.178	0.103	0.316	0.373
		42.9	7		0.158	0.091	0.292	0.389
		41.4	9		0.148	0.085	0.280	0.397
	44.4	5	33		0.168	0.097	0.304	0.381
			67					
			100					

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合

本実験に用いたセメントは普通ポルトランドセメントである。細骨材は、密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.18% の川砂(良品質)を使用した。

詳しくは後述するが、粗骨材は JIS 規格値を満足しない密度 2.5 g/cm<sup>3</sup> 未満、吸水率 3% を超える低品質な粗骨材を 4 種類用いた。なお、一部の試験について混合用および比較用として JIS 規格値を満足する良質な粗骨材も 2 種類用いている。そして、これらの粗骨材について安定性、BS40tf 破砕値、水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布(4g の試料を用い、細孔直径 0.006 μm ~ 500 μm の範囲を測定した。)などの物理的特性を調べた。

コンクリートの配合は、水セメント比、空気量および低品質粗骨材と良品質粗骨材の容積混合割合を変化させた 9 ケースとした。その配合を表-1 に示す。それぞれの配合ケースにおいて粗骨材の単位容積を一定として、粗骨材の種類を変化させて実験を行った。なお、フレッシュコンクリートの空気量は天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤により調整した。

2.2 粗骨材自身の凍結融解試験

本研究では粗骨材自身の凍結融解抵抗性を検討するために粗骨材単味での凍結融解試験を実施した<sup>2)</sup>。その試験方法の概要について以下に述べる。

まず始めに、絶乾状態の粗骨材を、20~15mm、15~10mm、10~5mm の 3 種類のサイズにふるい分けて、各 1,000g 計測し W<sub>0</sub> とする。そして、それらを 24 時間吸水後、ビニール袋に封入し ASTM C666 の方法に準じた温度サイクル(-17~+3℃、1 サイクル約 5.5 時間)で凍結融解試験を行い、凍結融解 100 サイクル時における質量損失率を求めた。この際、20~15mm 試料は 10mm ふるい通過分の質量(W<sub>1</sub>)、15~10mm 試料は 5mm ふるい通過分の質量(W<sub>2</sub>)、10~5mm 試料は 2.5mm ふるい通過分の質量(W<sub>3</sub>)をそれぞれ測定し、この平均値 W を試験前の質量 W<sub>0</sub> で除した値を式(1)により平均質量損失率と定義した。

$$\text{平均質量損失率} = (W/W_0) \times 100 (\%) \dots\dots (1)$$

ここで、W : (W<sub>1</sub>+W<sub>2</sub>+W<sub>3</sub>)/3 により算出

W<sub>0</sub> : 試験前の質量 (1,000g)

2.3 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、ASTM C 666 A 法(水中凍結水中融解、1 サイクル約 4 時間)に従って行った。供試体は、寸法 100×100×400mm の角柱を用い、材齢 14 日まで標準水中養生後(20℃)、凍結融解試験を開始した。また、凍結融解 30 サイクル毎に 300 サイクルまで相対動弾性係数を測定し、耐久性指数 DF 値を算出した。なお、これらの試験は何れのケースも供試体 3 体の値の平均とした。

表-2 粗骨材の物理的特性

試料	岩質	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)	BS40tf 破砕値 (%)	全細孔 容積 (cc/g)	中央細 孔直径 (μm)	100サイクル 平均質量 損失率* (%)
B	安山岩	2.39	4.52	15.4	16.1	0.0585	1.360	15.9
F	安山岩	2.33	3.87	6.3	16.3	0.0368	0.049	36.1
H	安山岩	2.38	5.09	8.0	11.9	0.0512	0.023	52.0
I	流紋岩	2.09	6.98	9.7	43.1	0.0662	2.570	7.9
C	石灰岩	2.70	0.24	3.0	23.1	0.0033	78.39	0.6
D	石灰岩	2.71	0.26	2.0	24.0	0.0028	68.88	1.4

\*粗骨材自身の凍結融解抵抗性

### 2.4 コンクリートのスケーリング試験

コンクリートのスケーリング試験は、ASTM C 672 に準拠して実施したが、温度条件は自動制御方式<sup>3)</sup>で行い、試験水には NaCl 3%溶液を用いた。供試体は、縦打ち方式(210×210×80mm)で試験面は側面とし、材齢 14 日まで水中養生後(20℃)、恒温室(20℃、60%RH)で材齢 28 日まで気中養生を行い試験を開始した。スケーリング量の測定は、凍結融解 5 サイクル毎に 50 サイクルまで行い、試験面から剥離したコンクリート片を採取し、105℃で 24 時間乾燥させた質量を測定した。なお、これらの試験は何れのケースも供試体 3 体の値の平均とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 粗骨材の物理的品質特性

表-2 は、粗骨材の物理的品質試験の結果を示したものである。この表に見られるように、粗骨材 B, F, I, H は何れも密度は 2.5kg/cm<sup>3</sup>未滿、吸水率は 3%を超えており JIS 規格値外の骨材である。また、これら粗骨材の細孔構造特性に着目すると、粗骨材 B や H のように全細孔容積がほぼ同じレベルの骨材であってもその中央細孔直径は大きく異なるケースが存在していることが分かる。また、全細孔容積が大きく中央細孔直径が極めて小さな骨材 H は、凍結融解 100 サイクルにおける粗骨材自身の平均質量損失率が最も大きく骨材自身の凍結融解抵抗性が非常に劣る骨材であった。なお、JIS 規格値内の良

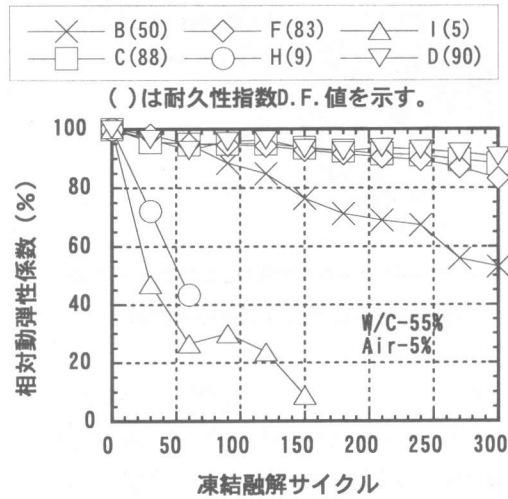


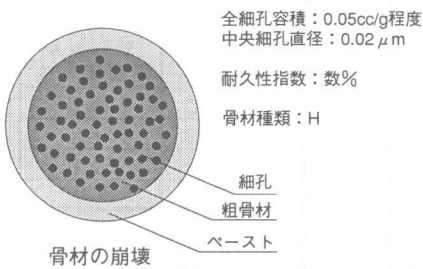
図-1 コンクリートの凍結融解試験結果

品質骨材 C (比較用) と D (混合用) は何れも粗骨材自身の凍結融解抵抗性に優れた骨材である。

### 3.2 コンクリートの凍結融解抵抗性

図-1 は、コンクリートの凍結融解試験結果の一例を示したものである。この結果より、粗骨材 I と H を用いたコンクリートの耐久性指数 DF 値は 5 および 9 と著しく低く、極めて凍害危険度が高い低品質粗骨材であると判断される。また、粗骨材 B の DF 値も 60 を下回っており、比較的凍害危険度が高い骨材の一つであると考えられる。一方で、粗骨材 F は密度、吸水率ともに JIS 規格値を外れているにもかかわらず DF 値が 83 と高く耐久的な傾向を示した。これは、粗骨材 F の全細孔容積があまり大きくなく粗骨材中の凍結水量がそれほど多くなかったためでは

ケース 1 (細孔容積:大、細孔径:小、  
D.F.:小)



ケース 2 (細孔容積:大、細孔径:中、  
D.F.:小)

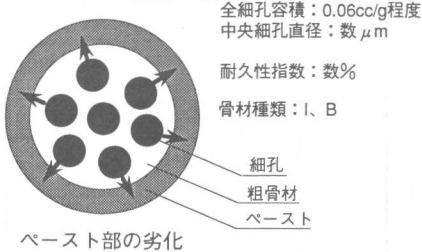


図-2 低品質粗骨材を用いたコンクリートの  
凍結融解劣化メカニズムの模式図

ないかと考えられる。以上の結果は、従来から用いられている粗骨材品質の指標値である密度や吸水率のみでは、コンクリートの凍害危険度を十分に予測できないケースがあることを示唆している。

図-2 は、低品質粗骨材の細孔構造特性に着目したコンクリートの凍結融解劣化のメカニズムを模式的に示したものである。まず、全細孔容積が約 0.05cc/g と大きく、中央細孔直径が 0.02  $\mu$ m 程度と極めて小さい粗骨材 H (ケース 1) のような場合である。これは凍結水量が多く、また、細孔径が小さいために粗骨材内部で水分が移動し難く水圧が大きくなり、粗骨材自身を崩壊させたものと考えられる<sup>4)</sup>。次は、全細孔容積が 0.06cc/g 程度と非常に大きく、中央細孔直径が数  $\mu$ m と中程度の粗骨材 I や B (ケース 2) のような場合である。これは水を含む細孔が多く、また、細孔径が比較的大きく骨材内部での水分の移動性に優れているために、凍結時に周辺のペースト部へ未凍結水を多く供給し、ペースト部の飽和度が高まることによってペースト

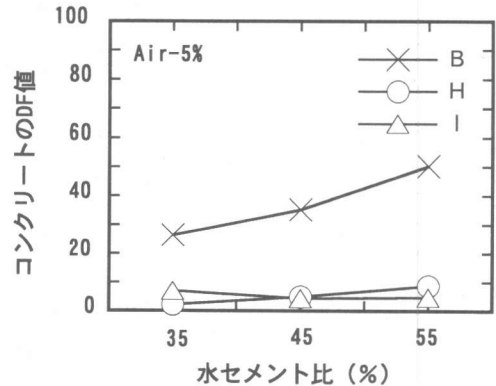


図-3 コンクリートの W/C と DF 値との関係

部の劣化を生じた、あるいは、周辺のペースト部へ未凍結水を排出しきれない場合は、骨材内部で水圧が増大し骨材自身を部分的に崩壊させる場合も考えられる。

なお、粗骨材 I と B を用いた場合の DF 値の差は、表-2 に示されるように BS401f 破砕値に顕著な差があることから、主として粗骨材自身の強度に依存したものと思われる。

図-3 は、コンクリートの水セメント比と DF 値との関係を示したものである。この図に見られるように、骨材の吸水率が極めて大きい H や I を用いたコンクリートの DF 値は W/C が変化しても常に低い値を示した。また、吸水率が中程度の粗骨材 B を用いた場合についても W/C の低下による改善効果は見られなかった。これは、低品質粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解劣化メカニズムのケース 2 に起因したものであり、水セメント比を減少し骨材周辺のセメントペースト部が緻密化されると、結果として凍結過程において骨材内部からペースト部へ水分の移動が難しくなり、粗骨材内部の水圧が高まり易くなったためではないかと考えられる。

図-4 は、コンクリートの空気量と DF 値との関係を示したものである。この図に見られるように、粗骨材 B を用いた場合には、空気量を 3% から 5% に増加させると DF 値が 18 から 50 と凍結融解抵抗性は高くなるが、極めて低品質な H および I を用いた場合には空気量の増加による改善効果

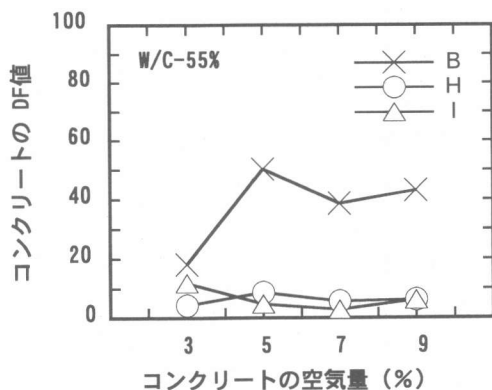


図-4 コンクリートの空気量とDF値との関係

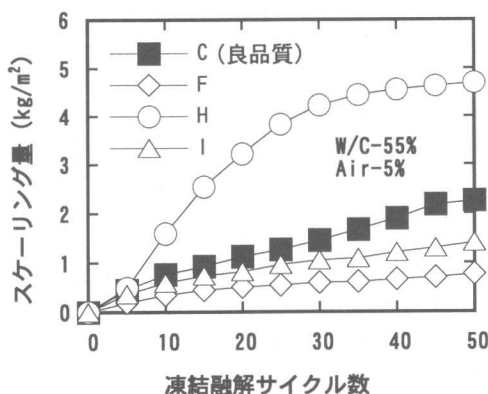


図-6 コンクリートのスケール試験結果

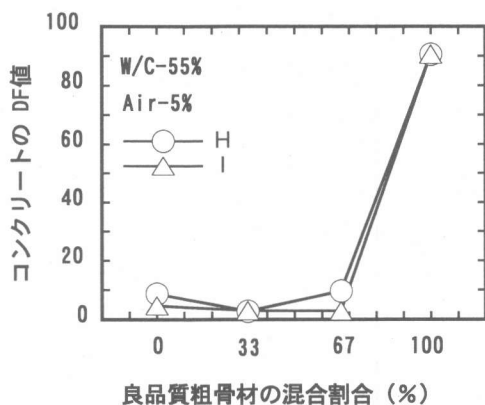


図-5 良質粗骨材の混合割合とDF値との関係

がほとんど見られないことが分かる。これは、空気を行しても、セメントペースト部分の耐凍害性が向上するだけで、マトリクス全体としての抵抗性は、改善されないためであると考えられる。

図-5 は、低品質粗骨材と良品質粗骨材(D)との混合割合とコンクリートのDF値との関係を示したものである。これより、粗骨材H、Iともに良品質粗骨材を67%まで置換してもDF値に変化は見られなかった。これは、良質粗骨材を混合しても、耐凍害性に劣る骨材がコンクリート内部に存在すればその部分の劣化が進行し、ひび割れやポップアウトなどを生じさせ、全体的に耐久性の低下を引き起こしているものと考えられる。

以上の結果より、極めて低品質な粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、配合要

因を変化させても顕著な改善効果が見られないことが分かる。

### 3.3 コンクリートのスケール抵抗性

図-6 は、コンクリートのスケール試験結果の一例を示したものである。この図より、低品質粗骨材Hを用いたコンクリートの凍結融解50サイクル時におけるスケール量は約4.7kg/m<sup>2</sup>と極めて多くなる傾向が見られた。しかし、密度や吸水率がJIS規格値を外れる粗骨材IやFを用いても必ずしもスケール量が大きくならない場合があることが分かる。このことは、従来から用いられている粗骨材品質の指標値である密度や吸水率のみでは、コンクリートのスケール劣化の危険度を十分に評価できないケースがあることを示唆している。

図-7 は、コンクリートの水セメント比とスケール量との関係を示したものである。この図に見られるように、極めて低品質な粗骨材Hを用いた場合であっても、W/Cを低下させることによりスケール量が著しく減少する傾向を示した。これは、コンクリートのスケール抵抗性を支配する要因の一つとして、骨材とセメントペースト間の付着状態の良否に影響する両者界面の性状が大きな役割を果たしているものと考えられる。そのようなことから、粗骨材自身の凍結融解抵抗性に極めて劣る骨材を用いた場合でも、ペースト部の品質を向上させ骨材界面の性質を改善することにより、スケール

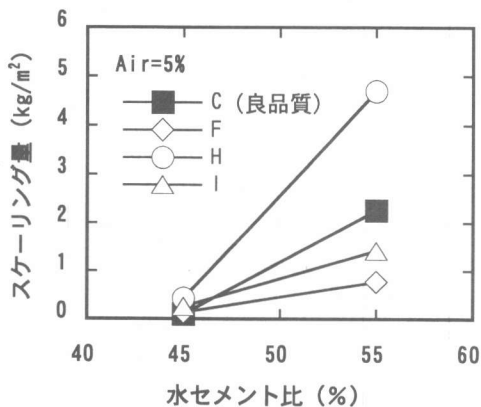


図-7 コンクリートのW/Cとスケーリング量との関係

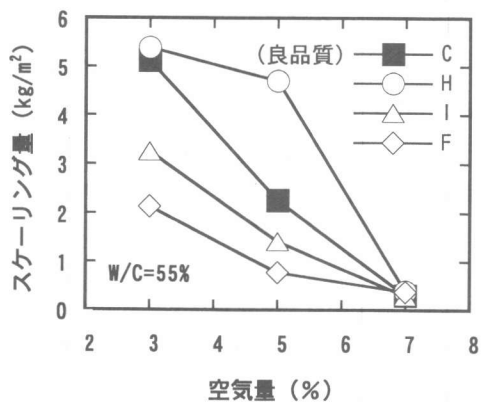


図-8 コンクリートの空気量とスケーリング量との関係

ング抵抗性を改善することが可能であると思われる。

図-8はコンクリートの空気量とスケーリング量との関係を示したものである。この図に見られるように、粗骨材の種類により多少の程度の差はあるものの空気量の増大に伴ってスケーリング量は大幅に減少する傾向を示した。

以上の結果より、低品質粗骨材を用いた場合であっても、コンクリート中へ適切に空気を連行することはスケーリング抵抗性を増加させる上でも有効であると考えられる。

#### 4. まとめ

密度  $2.5\text{g/cm}^3$  未満および吸水率が 3.0% を超

える JIS 規格値を満足しない低品質粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性や塩分環境下におけるスケーリング抵抗性について材料の面から基礎的な検討を行った。本実験の範囲内で以下のようなことが言える。

1. 極めて低品質な粗骨材を用いたコンクリートの ASTM C 666 A 法による凍結融解抵抗性は、配合要因を変化させても顕著な改善効果は見られなかった。しかしながら、ASTM C 672 によるスケーリング抵抗性は、水セメント比や空気量を変化させることによって大きく改善されることが分かった。これは、それらの劣化メカニズムの違いによるものと考えられる。
2. コンクリートの凍結融解抵抗性は、粗骨材の細孔構造が大きな役割を果たしていることが分かった。
3. 従来から用いられている粗骨材品質の指標値である密度や吸水率のみでは、コンクリートの凍結融解劣化やスケーリング劣化の危険度を十分に予測できないケースが存在することが分かった。従って、コンクリートの凍害劣化機構に立脚した粗骨材の品質指標値や品質の評価方法を検討する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) セメント協会コンクリート専門委員会: 粗骨材の品質がコンクリートの緒性質に及ぼす影響, セメント・コンクリート, No. 395, 1980
- 2) 庄谷征美・杉田修一・月永洋一・阿波 稔: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす粗骨材品質の影響に関する研究, 第 25 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp. 155-160, 1998
- 3) 月永洋一・庄谷征美・笠井芳夫: 凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的性状, コンクリート工学論文集, 第 8 巻, 第 1 号, pp. 121-133, 1997
- 4) Pigeon, M. and Pleau, R.: Durability of concrete in cold climates, E&FN SPON