

## 第4章 凍結融解繰返し作用に対する低品質骨材自体の耐凍害性

### 4.1 緒言

実際に製造されている生コンクリートを対象とした凍結融解試験では、吸水率で示した粗骨材の品質がコンクリートの耐凍害性に強く関連し、粗骨材の品質が劣る場合には、コンクリートの耐凍害性を確保できない恐れが高まるとの結果を得た。

実際にも、良質骨材の枯渇により、場所によっては、密度や吸水率などの JIS を満足する骨材の確保が難しい状況になりつつある。これまで、規格を満たさない低品質骨材は、使用不可とされてきた。しかし、仕様規定から性能規定への移行に伴い、骨材が低品質であっても、コンクリートの性能さえ満たせばいいとの考えから、低品質骨材使用の道が開けたといえる。資源の有効利用の観点からも、低品質骨材の活用は、きわめて大きな意義をもつ。

いうまでもなく、骨材はコンクリートの骨格となるものであり、コンクリートの品質を大きく左右する。骨材が低品質であれば、コンクリートに要求される性能を確保することは難しくなり、格別の技術的配慮を必要とする。

耐凍害性の確保についても同様であり、この性能を満たす技術を確立するためには、まず骨材自体が、凍結融解作用により、どのような挙動を示すかを明らかにしておかなければならない。

ここでは、広範囲な品質の骨材を対象として、それら自体の凍結融解作用に対する抵抗性を調べ、低品質骨材利用を目指す際の基礎資料を得ようとした。

### 4.2 実験概要

#### 4.2.1 対象とした骨材とその物性

対象とした骨材は、総計 29 種類であり、そのうち 8 種類は、岩手県、秋田県および青森県でコンクリート用、アスファルト混合物用あるいは路盤材用として市販されている砕石であり、その母岩も採取した。他の 21 種類は、主に岩手県内から採取した岩石であり、砕いて砕石状とした。試料採取にあたっては、良質からきわめて低品質まで、広範囲にわたる品質の骨材が、多数得られるように努めた。これは、骨材の凍結融解作用に対する対抗性を、広い範囲の品質の骨材を対象として求め、抵抗性と品質との関連を大局的かつ詳細に捉えようとの意図による。

表 4-1 は、対象とした骨材を示しており、吸水率が小さいものから順に並べられている。JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」に規定されている絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  以上および吸水率 3.0% 以下を満たす骨材は 7 種類で、いずれかを満た

表 4-1 使用骨材の品質

No.	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	ヤング係数 (10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	総細孔量 (ml/g)
1	2.89	0.70	7.50	0.25	269.7	19.1	0.0067
2	2.58	1.35	5.70	0.21	145.2	10.7	0.0142
3	2.62	1.94	3.60	0.21	124.7	8.3	0.0272
4	2.61	2.38	4.20	0.22	79.8	7.0	0.0258
5	2.57	2.68	3.50	0.16	60.7	5.6	0.0256
6	2.62	2.80	5.40	0.35	63.2	4.4	0.0236
7	2.51	2.89	4.20	0.27	78.4	6.5	0.0323
8	2.48	2.94	2.20	0.17	54.3	3.5	0.0214
9	2.51	3.08	5.80	0.19	224.4	15.9	0.0324
10	2.63	3.17	4.00	0.20	139.0	17.2	0.0274
11	2.43	3.40	3.80	0.23	80.5	5.8	0.0351
12	2.44	3.47	2.80	0.07	44.8	3.5	0.0257
13	2.35	3.57	3.20	0.22	72.5	4.5	0.0323
14	2.51	3.73	6.30	0.21	183.6	14.2	0.0302
15	2.42	3.78	2.60	0.23	61.3	5.1	0.0260
16	2.34	3.79	3.10	0.18	136.5	12.2	0.0338
17	2.54	3.84	4.30	0.32	63.9	4.8	0.0327
18	2.50	3.85	4.30	0.20	108.4	15.2	0.0341
19	2.42	4.14	2.20	0.23	48.7	4.6	0.0628
20	2.30	4.76	1.90	0.14	48.3	4.3	0.0444
21	2.41	4.86	2.00	0.13	41.9	5.8	0.0464
22	2.35	4.90	1.20	0.19	54.6	2.1	0.0540
23	2.25	4.92	3.70	0.19	99.8	12.5	0.0486
24	2.01	5.45	1.60	0.28	37.3	3.2	0.0197
25	2.33	5.88	1.60	0.18	52.3	4.2	0.0686
26	2.33	6.49	1.30	0.17	24.3	1.6	0.0515
27	2.24	6.58	2.70	0.18	57.8	6.8	0.0693
28	2.26	6.82	3.10	0.21	80.4	6.4	0.0702
29	2.23	7.66	1.10	0.11	34.0	3.0	0.0781
平均値	2.44	3.99	3.41	0.20	88.6	7.5	0.0379
最大値	2.89	7.66	7.50	0.35	269.7	19.1	0.0781
最小値	2.01	0.70	1.10	0.07	24.3	1.6	0.0067
標準偏差	0.17	1.64	1.62	0.06	58.29	4.89	0.0182

※ 網掛け：JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の規格外

さない骨材が6種類、他の16種類はどちらも満たさない骨材となっている。ここでは、吸水率に着目し、規格を満たさない骨材を低品質骨材とみなすことにする。

表には絶乾密度および吸水率のほかに、母岩から採取したコア一供試体による圧縮および引張強度も掲げている。圧縮強度はφ30×60mm、割裂引張強度用はφ30×30mmの円柱供試体とした。圧縮試験用と同寸法の供試体を用いて、ヤング係数も測定している。

### 4.2.2 水銀圧入法(MIP 法)

骨材自体の凍結融解抵抗性には、内部の空隙構造が関わりと予想されるため、水銀圧入法 (Mercury Intrusion Porosimetry) によって、細孔径分布を求めた。水銀圧入法は、水銀ポロシメーターを用い、水銀の表面張力が大きいことを利用しており、固体の細孔に水銀を浸入させるために圧力を加え、圧力と圧入された水銀量から比表面積や細孔径分布を求めることができる。

液体が固体を濡らす現象は、液体の固体に対する接触角が  $90^\circ$  より小さいことを意味する。水銀の場合、表面張力が大きく、ほとんどの固体に対して  $90^\circ$  以上の接触角を示す。このため、細孔に水銀が接触しても、細孔は水銀を押し出そうとする。図 4-1 のような固体表面にある円筒形細孔とその周囲に存在する水銀を考えると、細孔が水銀を押し出そうとする力は、 $-\pi D\gamma \cos \theta$  で示される<sup>1)</sup>。液体にかかる圧力を  $P$  とすると、細孔断面全体にかかる力は、 $(\pi D^2/4)P$  となる。両者がつりあっている状態では、式 (4-1) が成立する。

$$-\pi D\gamma \cos \theta = (\pi D^2/4)P \quad (4-1)$$

これを展開すると、加えられた圧力と、その圧力で水銀が侵入可能な細孔径の関係は、毛管法則に基づく Washburn の式 (4-2) として求められる。

$$D = -\frac{4\gamma \cos \theta}{P} \quad (4-2)$$

ここに、 $D$  : 試料の細孔直径 (m)

$P$  : 水銀にかかる圧力 (MPa)

$\gamma$  : 水銀の表面張力 (=485mN/m)

$\theta$  : 水銀と細孔壁面の接触角 (=140°)

加圧によって、細孔中に侵入した水銀の量 (圧入量) は、図 4-2 に示すように、測定セルの水銀柱の変位から求められる。式 (4-2) より、水銀にかかる圧力と試料中の細孔直径は、反比例関係にあり、この圧力とその圧力のときに圧入された水銀の量が測定できれば、試料中の細孔直径に対する細孔径分布を測定できることになる<sup>2)</sup>。

水銀圧入法に用いる試料は、粗骨材を 2.5~5mm にふるい分けし、低温乾燥を施して、通常の高温の乾燥によって細孔径が変化しないように配慮した。

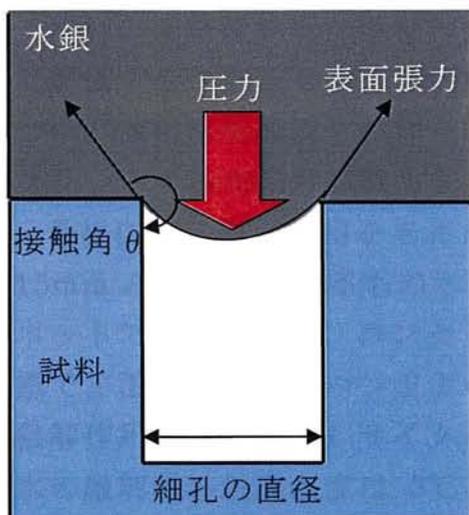


図 4-1 水銀の細孔への浸入

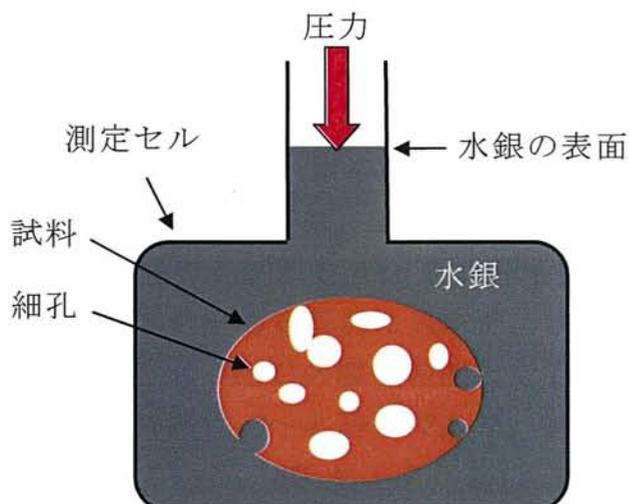


図 4-2 測定セルの水銀柱の変位

### 4.2.3 凍結融解試験

従来、骨材の凍結融解抵抗性は、JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」に従い、硫酸ナトリウム飽和溶液への浸漬と乾燥の繰返しによって生じる質量損失で判断されてきた。しかし、硫酸ナトリウムの結晶圧による破壊作用と、水分の凍結に伴う破壊作用とは、メカニズムが大きく異なり、安定性損失では、凍結融解抵抗性を正しく評価できないと考えられる<sup>3)</sup>。

既存の文献<sup>4)</sup>でも、骨材自体の凍結融解試験方法として、アメリカ道路協会による試験結果が紹介されており、硫酸ナトリウムによる試験結果と異なることを明らかにしている。具体的には、川砂利を試験した場合、硫酸ナトリウムによる方法では最大寸法による損失量に違いが見られないのに対して、アメリカ道路協会による試験方法では、最大寸法が大きくなるにしたがって、損失量が大きくなる傾向を示している違いである。

硫酸ナトリウム溶液は、転移温度である 32.38℃で骨材内部の水和水が、一気に結晶水になって膨張圧を生じるので、骨材の最大寸法の影響を受けにくいと考えられる。これに対して、水の凍結は、T.C.Powersの水圧説<sup>5)</sup>により、「静水圧によるもの」と「浸透圧によるもの」の2つの主要なメカニズムにより説明されている。静水圧によるものは、凍結温度に先に到達する表面の水から凍結をはじめ、未凍結水の移動を生じさせる現象であり、浸透圧によるものは、毛細管空隙中の氷晶がより小さい細孔から未凍結水を吸収する際に生じる現象である。いずれも、これによって膨張圧が徐々に生じていくことを説明しており、骨材の凍結融解抵抗性は最大寸法の影響を受けやすいことを裏付けるメカニズムといえる。

そこで、安定性損失では、凍結融解抵抗性を正しく評価できないと判断し、ここでは、骨材の凍結融解抵抗性を、骨材自体に直接、凍結融解作用を与える方法によって評価することとした。評価指標としては、2つを選んだ。

ひとつは、凍結融解繰返しに伴う質量減少である。この試験では、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に順じ、水中凍結・水中融解試験方法（A法）で、骨材に凍結融解作用を与えた。測定に用いた骨材は、20mmふるいを通り、15mmふるいに留まるものとし、表乾状態の各試料を1kg程度用意した。これをネットで包み、通常、コンクリート供試体を納める容器に入れて、水を盛った状態で、温度管理用のコンクリートが+5℃～-18℃の温度範囲となるように凍結融解作用を与えた。1サイクルに要した時間は3～4時間であり、試料の入った水の融解時の最高温度は3℃程度となっている。30サイクル毎に10mmふるいを用いて、残留した骨材の表乾状態での質量を測定し、質量減少を算出した。測定は300サイクルまで行った。

コンクリートを対象とする凍結融解試験でも、質量減少を耐凍害性の指標のひとつとする。この場合、質量減少は、コンクリート片の剥離による。ここでは、10mmふるいを通り、15mmふるいに留まる粒子が、コンクリートの場合の剥離片に相当すると考えていることになる。

ふたつ目の指標は、残留膨張である。この試験では、気中凍結・気中融解方式の凍結融解試験装置を用いた。槽内の温度範囲は、+20℃～-20℃とし、1サイクルに要した時間は、6～7時間であり、150サイクルまで凍結融解を繰り返した。供試体は、母岩からコア採取したφ30×60mmの円柱であり、中央部分の円周方向に長さ60mmのひずみゲージを貼付し、凍結融解に伴うひずみの変化を測定して、サイクルの進行に伴う残留膨張を求めた。なお、ひずみゲージについては、ヤング係数およびポアソン比を求めるために、凍結融解用とは別の供試体の鉛直方向および円周方向に、長さ30mmのものを2枚ずつ合計4枚貼付し、実験に用いた。

供試体は、常に表乾状態を保つことにした。この際、供試体内部からの湿気が、ゲージの抵抗値に影響を及ぼす恐れがあるため、ゲージを貼付する部分をポリエステル系の接着剤でプリコーティングして防水ベースをつくり、その上にひずみゲージを貼付した。さらに、雰囲気中の湿気からも保護するため、貼付したひずみゲージをゴム系感圧型のコーティングテープで覆い、防水処理した。この後、供試体を水に浸して、飽水状態にし、表面水を拭いて表乾状態としてから、ホットメルト型のコーティング剤で供試体全体をコーティングし、さらに粘着テープを巻いて封緘状態とした。

この試験では、温度の変化に伴うひずみの変化を測定する。温度については、

ゲージ貼付供試体と同一寸法で、同じように封緘状態とした供試体を用い、その中心部に埋設した熱電対と表面部に貼り付けた熱電対とによって測定した。供試体温度としては、その平均値を採用した。

凍結融解試験のように、温度が変化する場合、ひずみゲージには、外力によるひずみがなくても熱出力が発生する。温度変化とともに外力を受けるような場合には、温度と熱出力（ひずみ）との関係式により、測定値の指示値からこの熱出力を補正する必要がある。温度と熱出力の関係式は、温度を変数とした4次式で示されており、実験では測定器の指示値からこの関係式を用いて温度変化に対応した熱出力を補正し、補正後のひずみを実際のひずみとして扱った。

### 4.3 実験結果および考察

#### 4.3.1 骨材耐久性指数に及ぼす骨材の物性の影響

水中凍結・水中融解方式の試験では、骨材の質量減少を求めたが、解析の便宜上、これを相対質量に置き換えることにした。コンクリートの耐凍害性を示す指標のひとつとして、相対動弾性係数がある。これは、凍結融解前の動弾性係数を基準とし、所定のサイクルでの動弾性係数を、基準に対する百分率で示したものである。これに倣い、各サイクルで、10mmふるいに残留した骨材の質量を、試験前の質量に対する百分率で示したものを、相対質量とした。サイクルの進行に

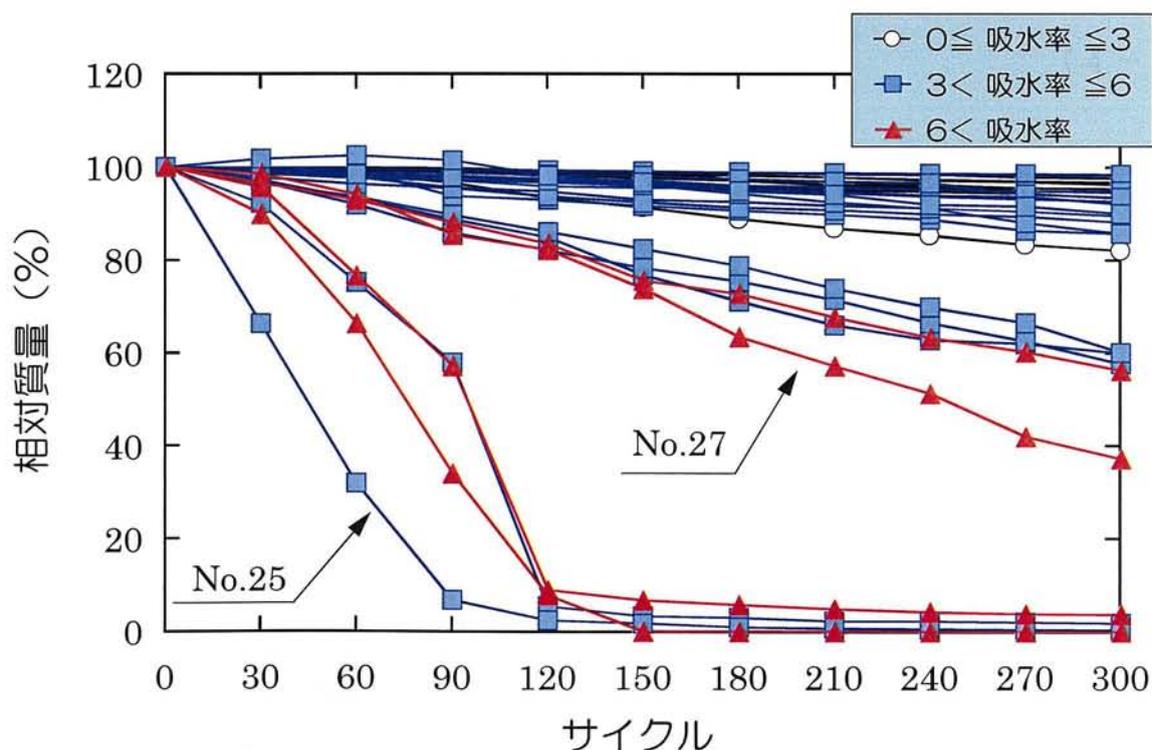


図 4-3 凍結融解作用に伴う相対質量の変化

伴う相対質量の変化を図 4-3 に示す。

図では、吸水率が JIS A 5005 に収まる 3%以下のもの、3%を超えて 6%以下のもの、6%を超えるものの 3 段階に記号を分類して表している。吸水率が 3%以下であれば、相対質量の低下はほとんど見られず、3%を上回る低品質では、サイクルの進行に伴い、相対質量が極端に小さくなる骨材も存在するなど、大略的な傾向を把握できる。

しかし、相対質量を骨材の物性との関連で定量的に検討しようとした場合、相対質量のままでは、不都合が生じる。それは、サイクルの進行に伴う相対質量の変化が、それぞれに異なる軌跡を辿る点であり、注目するサイクルによって、各骨材間の比較が変動してしまう不都合である。より具体的に例示すれば、300 サイクルでの相対質量に注目した場合、No.27 は、凍結融解抵抗性に劣ると判断され、No.25 は、極端に劣ると判断される。これが、100 サイクル程度では、No.27 は、比較的良好な抵抗性を有するのに対し、No.25 の場合は、この段階でも、極端に劣る抵抗性と判定される。

コンクリートの相対動弾性係数でも、同様の難点があるため、耐久性指数で、コンクリートの耐凍害性を判定するケースが多い。ここでも、これに倣い、骨材耐久性指数なるものを導入し、骨材の凍結融解抵抗性の指標としてみた。

骨材耐久性指数は、次式のように算出される。

$$DFa = \frac{P \times N}{M} \quad (4-3)$$

ここに、 $DFa$ ：骨材耐久性指数

$P$ ： $N$  サイクルのときの相対質量 (%)

$N$ ：相対質量が 60%になるサイクル数、または 300 サイクルのいずれか小さいもの

$M$ ：300 サイクル

図 4-4 は、骨材の吸水率と耐久性指数の関係を示している。総体的には、一定の関係が見られ、吸水率が小さいほど、高い骨材耐久性指数を示す傾向にある。吸水率が JIS を満足する 3%以下の骨材の場合、骨材耐久性指数は、すべて 80 以上の値を示した。これに対し、吸水率が 6%を上回るようになると、いずれの骨材も骨材耐久性指数は 50 を下回った。いかに低品質骨材の有効利用を図ろうとしても、それには限度があり、骨材の吸水率が 6%程度を上回るようでは、耐凍害性の観点から、使用を差し控えざるを得ないことを、この結果は示唆している。

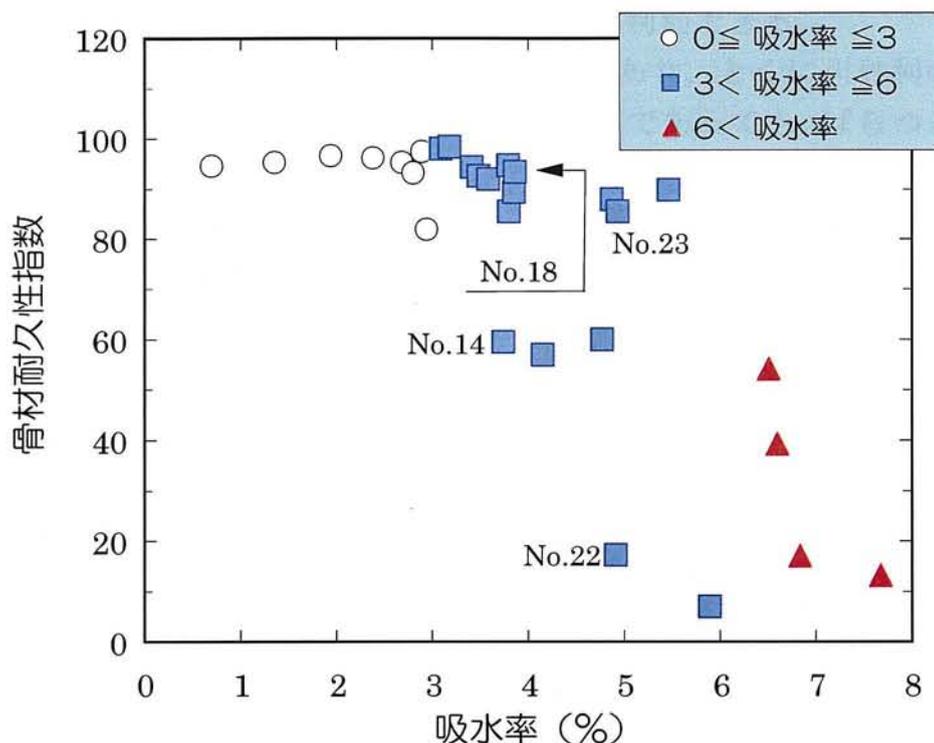


図 4-4 骨材の吸水率と骨材耐久性指数の関係

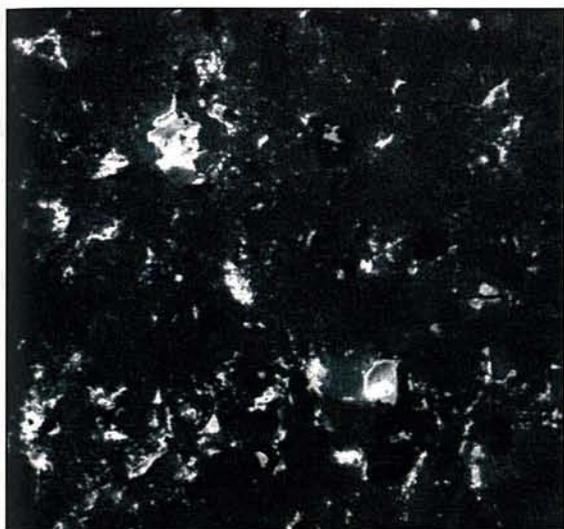
注目すべきは、吸水率が3～6%の範疇にある骨材であり、この範囲では、骨材耐久性指数が、必ずしも吸水率に対応していない。たとえば、吸水率が4%程度の骨材に着目すると、No.18の骨材耐久性指数は80を上回っているのに対し、No.14のそれは60を下回っており、骨材自体の凍結融解抵抗性には、大きな違いが見られる。このほか、吸水率が5%程度のNo.23とNo.22のように、同程度の吸水率でも、骨材耐久性指数に大きな違いがある例は、ほかにも見受けられ、この範囲では、吸水率で骨材耐久性指数を統一的に解釈するには無理がある。

骨材自体の凍結融解に対する抵抗性は、吸水率で判断するケースが多く、その境目は、碎石で3%とされる。図によれば、吸水率が3%を超えても、6%程度までの範囲であれば、良質骨材と同程度の骨材耐久性指数となっている例がいくつか見受けられる。この結果からすれば、吸水率のみで評価した場合には、使用不可能と判定される骨材の中に、十分な凍結融解抵抗性を有するものが含まれる可能性があり、吸水率での判別には、再考の余地があると指摘できる。もし、吸水率の規定を満たさなくても、使用できる骨材があるとすれば、骨材資源の有効活用の観点から、その意義は大きい。

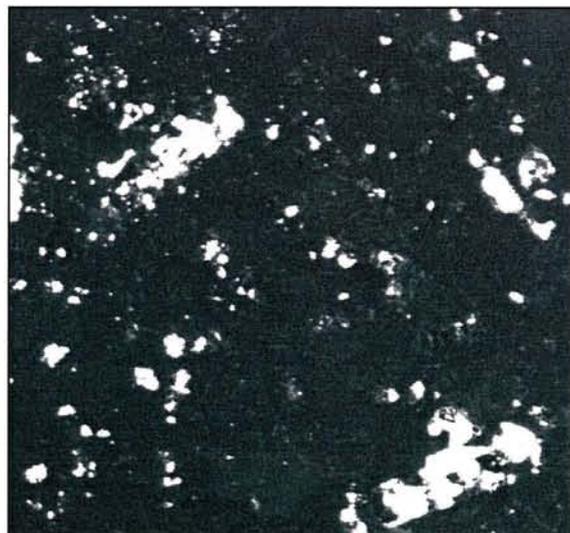
吸水率の大きい骨材は、骨材の表面の空隙も多いと考えられるので、**写真 4-1**に、No.14、No.18、No.22およびNo.23の骨材の表面を拡大した写真を示す<sup>6)</sup>。白く見えるのが、空隙である。No.14とNo.18の空隙は比較的少なく、No.22お

よび No.23 のそれは、空隙の多いことが写真でも判別できる。

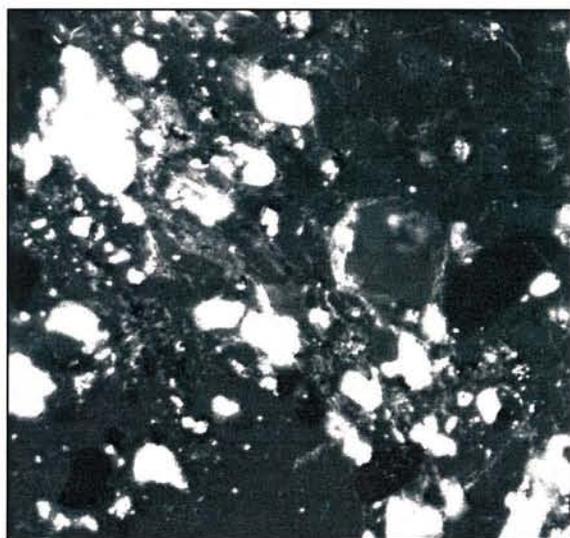
骨材は、さまざまな品質をもつ粒子の集合体であり、とくに川砂利のような天然骨材で、粒子間の品質のばらつきが大きい。砕石であっても、ばらつきを有し、



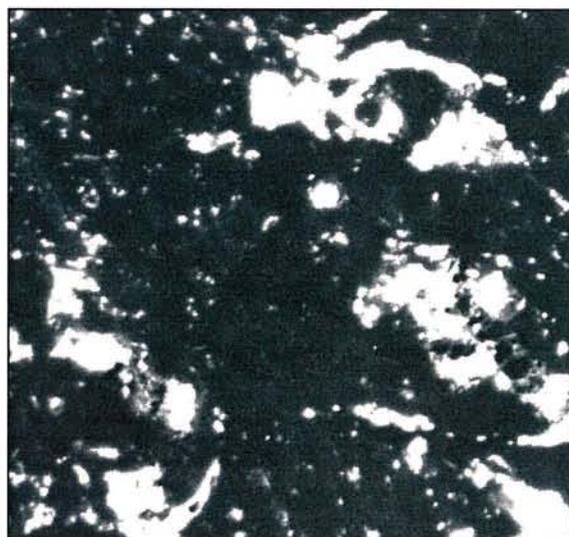
No.14



No.18



No.22



No.23



写真 4-1 No.14, No.18, No.22 および No.23 の骨材表面を拡大した写真

それが凍結融解抵抗性に関連する可能性がある。そこで、8種類の骨材を対象として、各骨材から15mm以上の粒子を四分法によって100個ずつ抽出し、1個1個の吸水率を測定して、そのばらつきを調べてみた。図4-5は、吸水率の度数分布の例であり、同程度の吸水率でも異なる骨材耐久性指数を示したNo.14とNo.18およびNo.22とNo.23を掲げた。図には、最大値および最小値とともに、平均値も示しているが、15mm以上の骨材を対象とし、個数も100個と限定しているため、表4-1に示してあるJISの試験方法に基づく吸水率とは違いが見られる。

No.14とNo.18に着目すると、No.14の方で吸水率のばらつきが大きく、きわめて大きな吸水率の粒子も含まれている。No.22とNo.23との比較では、No.22のばらつきが大きく、大きな吸水率の粒子も多く混在している。骨材耐久性指数

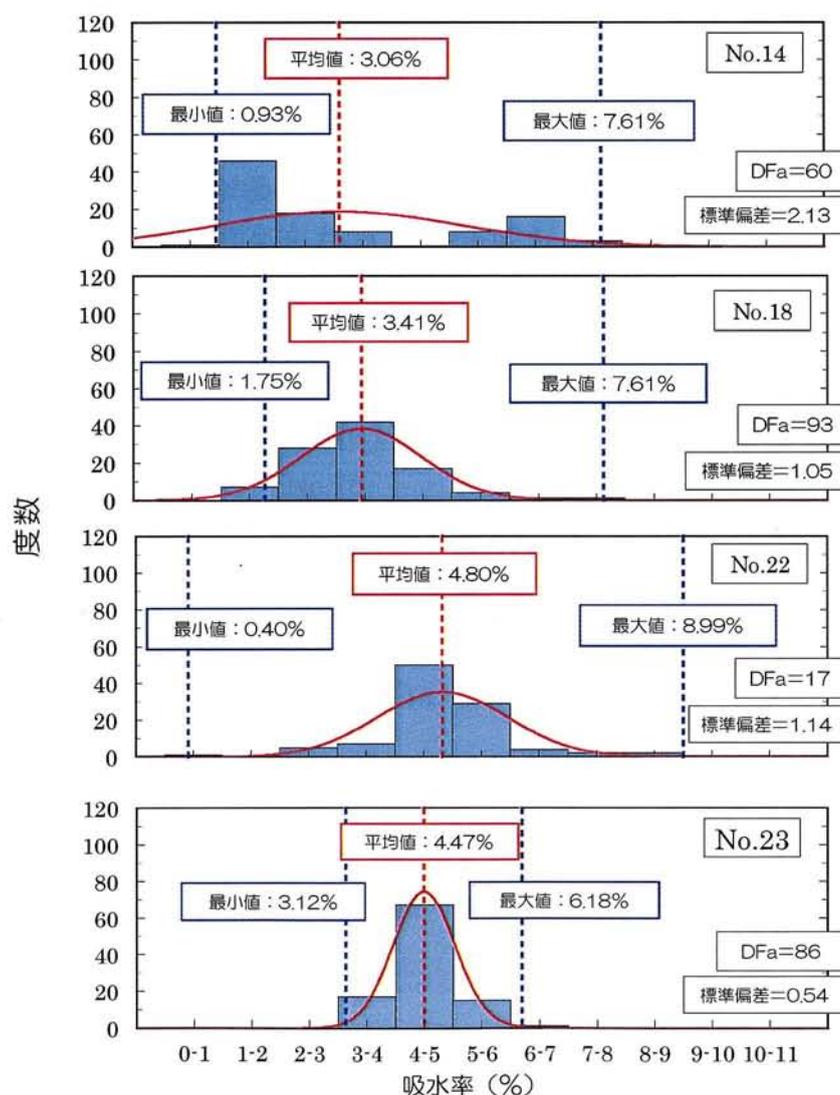


図 4-5 骨材粒子の吸水率の度数分布

と対照すれば、平均的には同程度の吸水率であっても、粒子単位でみた吸水率のばらつきが大きく、吸水率の大きい粒子の混在の多い骨材の方が、低い骨材耐久性指数を示すといえる。

図 4-6 は、骨材粒子 100 個のうち、吸水率が 5%以上の骨材粒子の割合と骨材耐久性指数の関係を示している。吸水率が 5%以上の粒子の割合が多くなるほど、骨材耐久性指数は小さくなる傾向は明らかである。骨材自体の凍結融解抵抗性を吸水率で判断するとしても、集合体としての平均的な吸水率だけでなく、粒子単位でみた吸水率のばらつきの程度や吸水率の大きい粒子の混在割合にも着目しなければ、妥当な評価は難しいといえる。

骨材耐久性指数は、凍結融解作用による質量減少から導いており、質量減少は、主として凍結時の水の膨張力による破壊の程度を示す。吸水率は、内部に存在する水の量であり、破壊をもたらす作用の大きさに関わる。破壊作用が、破壊に対する抵抗能力を上回ったときに、破壊が生じる。したがって、骨材耐久性指数には、破壊に対する抵抗能力も関わっていることになる。

図 4-7 は、骨材自体の圧縮強度と骨材耐久性指数の関係を示している。総体的には、圧縮強度が大きくなるほど、骨材耐久性指数が大きくなっており、破壊に対する抵抗能力を示すと考えられる圧縮強度も、凍結融解抵抗性に関わっているといえる。

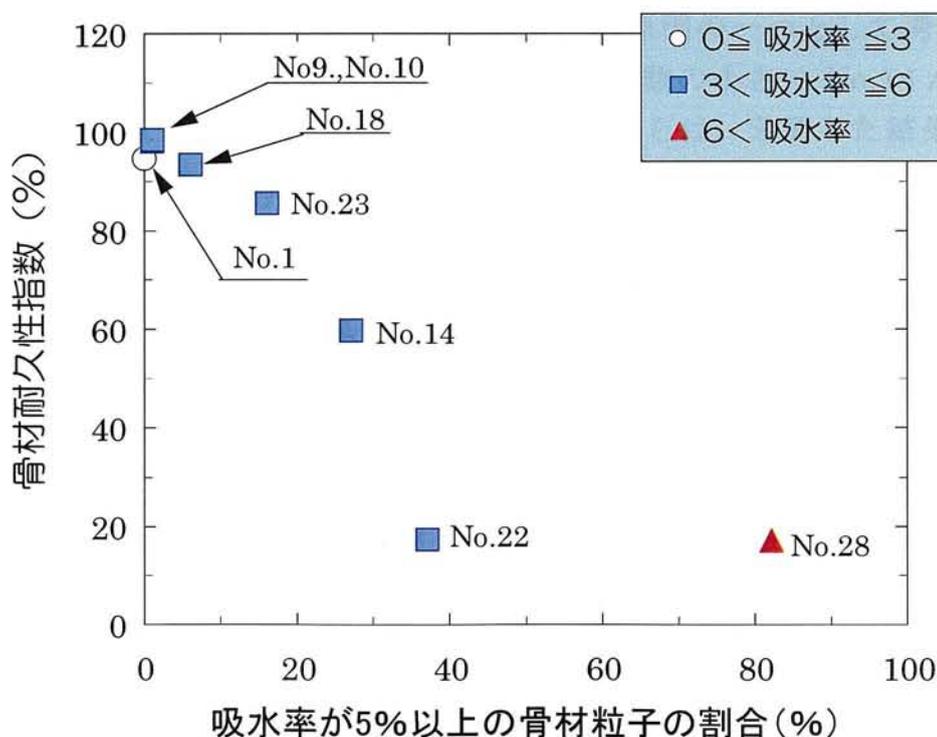


図 4-6 吸水率が 5%以上の骨材粒子の割合と骨材耐久性指数の関係

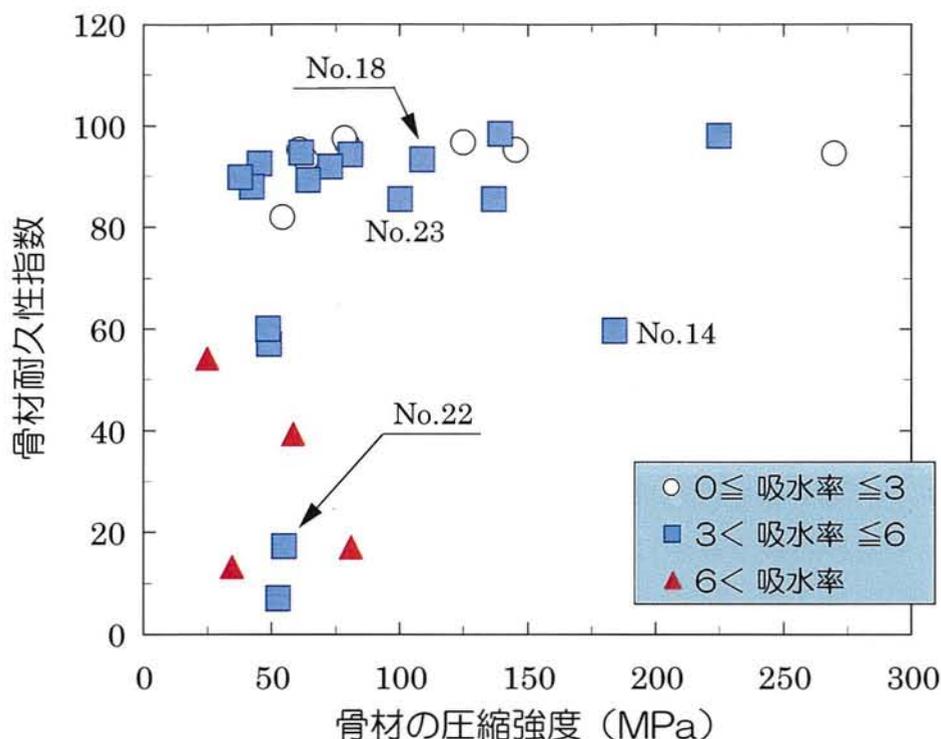


図 4-7 骨材自体の圧縮強度と骨材耐久性指数の関係

上述のように、No.22 は、No.23 に比べ、平均的吸水率が同等であるにもかかわらず、低い骨材耐久性指数を示したのは、低品質粒子が多数存在するためと考えられたが、圧縮強度が小さ目であることも、その原因の一つとして考えられる。

一方、No.14 と No.18 の関係では、骨材耐久性指数の小さい No.14 が、きわめて大きな圧縮強度となっており、抵抗能力の観点からは、矛盾した結果となっている。あくまで、両者のみの関係で言えば、No.18 は、No.14 に比し、圧縮強度の割りに、骨材耐久性指数が高いとも表現できる。

引張強度と骨材耐久性指数との関係を示したのが、図 4-8 である。No.18 の引張強度は、No.14 より、若干大きく、これが骨材耐久性指数を相対的に大きくした一因であると考えられる。抵抗能力の観点からすれば、水の凍結は、骨材組織に引張力をもたらすため、圧縮強度よりは、引張強度が重要であるといえる。このことは、No.22 と No.23 の比較において、より明瞭であり、骨材耐久性指数は、引張強度によく対応している。骨材耐久性指数の高い No.18 および No.23 は、圧縮強度の割りに引張強度が大きい。そのため、破壊作用に対する対抗能力が高い一因になっていると考えられる。

#### 4.3.2 残留膨張に及ぼす骨材の物性の影響

凍結融解作用は、温度変化および水分凍結を伴い、骨材に収縮・膨張の長さ変

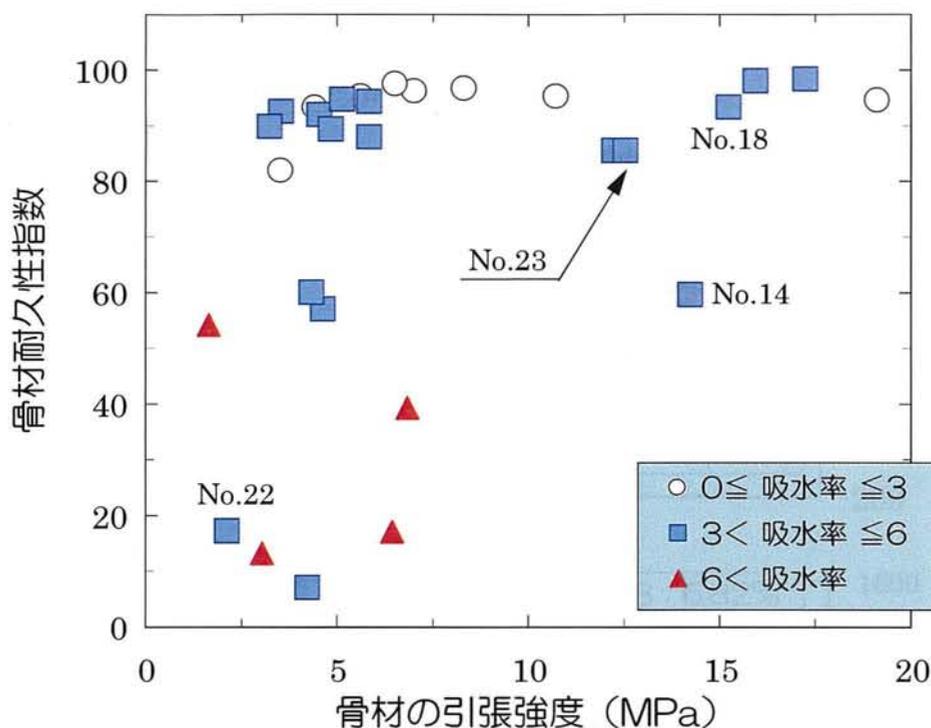


図 4-8 骨材の引張強度と骨材耐久性指数の関係

化を生じさせる。伸び能力を上回る膨張が発生すれば、骨材は破壊に至り、コンクリート中での骨材を想定すれば、骨材の膨張は、周りのモルタルあるいはペーストに、悪影響を及ぼす。そのため、凍結融解に伴う骨材の長さ変化挙動を捉え、それを骨材の物性と関連付けることは、きわめて重要な意味をもつ。

図 4-9 は、凍結融解に伴うひずみの変化の例であり、1 サイクル目、50 サイクル目および 100 サイクル目を示した。No.1 の場合、凍結過程では、温度低下に伴い、ただ単に収縮するのみであり、融解時には、凍結時の軌跡を辿って膨張し、もとの長さに戻る。ただし、サイクルの進行に伴って、凍結開始時のひずみは異なり、膨張が次第に蓄積されることを示している。これが、残留膨張である。

No.28 では、1 サイクル目を除き、凍結工程で、 $-5^{\circ}\text{C}$ あたりから、水分凍結による膨張が、顕著に現れている。この膨張により、サイクルの進行に伴う残留膨張の増大も大きい。ただし、融解開始時の温度勾配は、凍結工程に比べて急なので、温度変化に対してひずみの変化が追従できず、 $-5^{\circ}\text{C}$ から  $5^{\circ}\text{C}$ 程度までのひずみの履歴は、必ずしも凍結工程のそれとは一致していない。

図 4-10 は、吸水率と 100 サイクル終了時の残留膨張の関係を示している。総体的に、吸水率が大きくなるほど、残留膨張も大きくなる傾向にあるが、骨材耐久性指数と同様に、吸水率のみで、残留膨張を統一的に解釈するには無理がある。

骨材耐久性指数の場合、ほぼ同じ吸水率の No.14 と No.18 および No.22 と

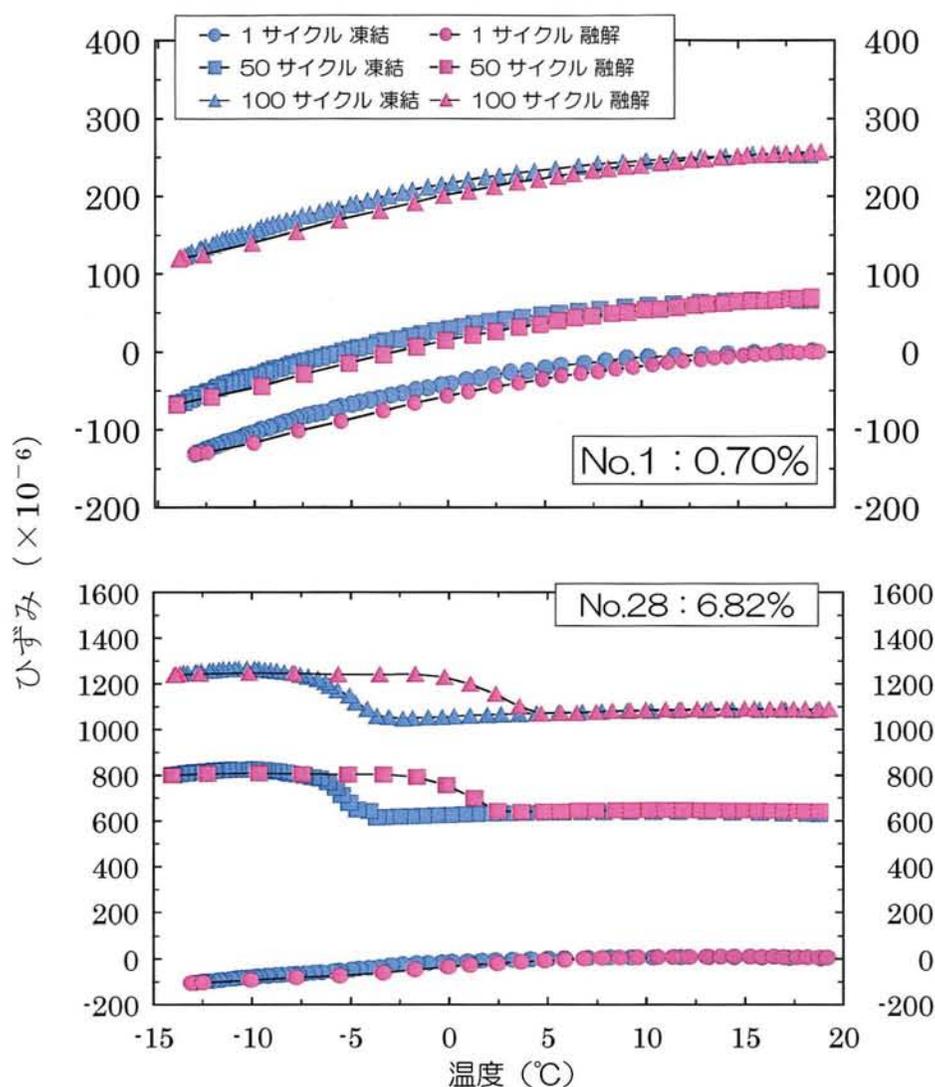


図 4-9 凍結融解作用に伴うひずみの変化

No.23 は、それぞれの組合わせ内で、異なる指数を示した。これに対し、残留膨張の場合では、同等の吸水率同士で、ほぼ等しい膨張となっている。すなわち、骨材耐久性指数と残留膨張とは、ともに骨材の凍結融解抵抗性を示す指標ではあっても、抵抗性の異なる面を捉えている可能性がある。

図 4-11 は、骨材耐久性指数と残留膨張の関係を示している。骨材耐久性指数が大きいほど、残留膨張は小さい傾向にあるが、骨材耐久性指数が大きくても、著しい残留膨張を示す例や、その逆となっている例も少なくない。骨材耐久性指数には、吸水率の大きさや粒子のばらつき、および強度などが関連していると考えられた。残留膨張についても、骨材の物性との関係を究明する必要がある。

図 4-12 に、骨材の細孔径分布の測定例として、No.1, No.22 および No.28 の場合を示した。試料は、骨材耐久性指数を測定する際に用いた碎石状のものから

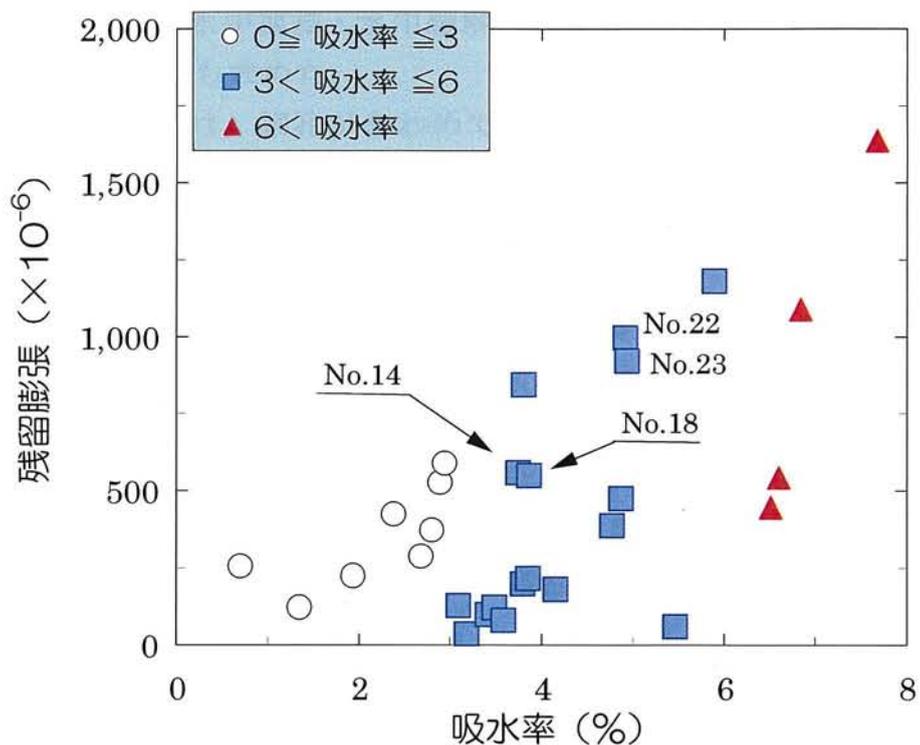


図 4-10 骨材の吸水率と 100 サイクル終了時の残留膨張の関係

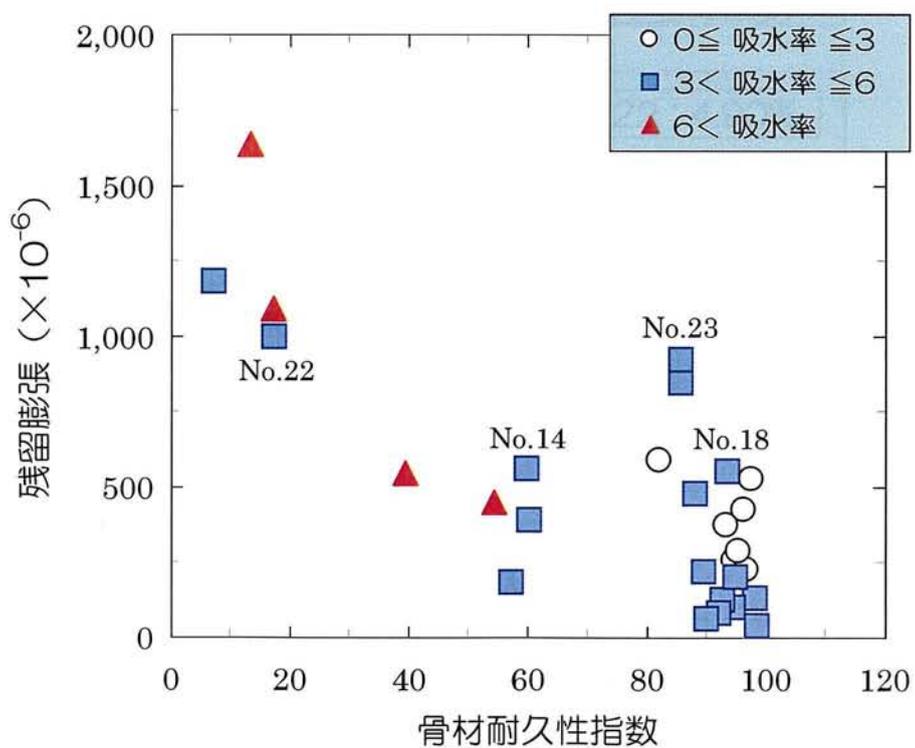


図 4-11 骨材耐久性指数と 100 サイクル終了時の残留膨張の関係

採取しており、これを水中凍結・水中融解方式で150サイクルの凍結融解作用を与えた後の細孔径分布も求めた。

良質骨材のNo.1には、細孔がきわめて少なく、凍結融解前後の細孔径分布にも変化は見られない。これに対し、低品質骨材のNo.22およびNo.28の場合は、細孔量がきわめて多く、さらに凍結融解前と比較し、凍結融解後の細孔径分布が、粗大方向に移動する変化が見られる。特筆すべきは、 $1\mu\text{m}$ 以上の細孔量がほとんど変化していないのに対し、 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 程度の細孔が、減少していることであり、この範囲の細孔が凍結融解作用により膨張し、それを繰り返すことで細孔が緩み、より粗大な細孔になったと解釈できる。このような傾向は、これら2種類の骨材以外にも、いくつかの骨材で見受けられた。この細孔径分布の測定と残留膨張を求めた試験とでは、試料も凍結融解作用の与え方も異なるが、残留膨張の過程で、細孔の粗大化が生じていた可能性は十分にある。

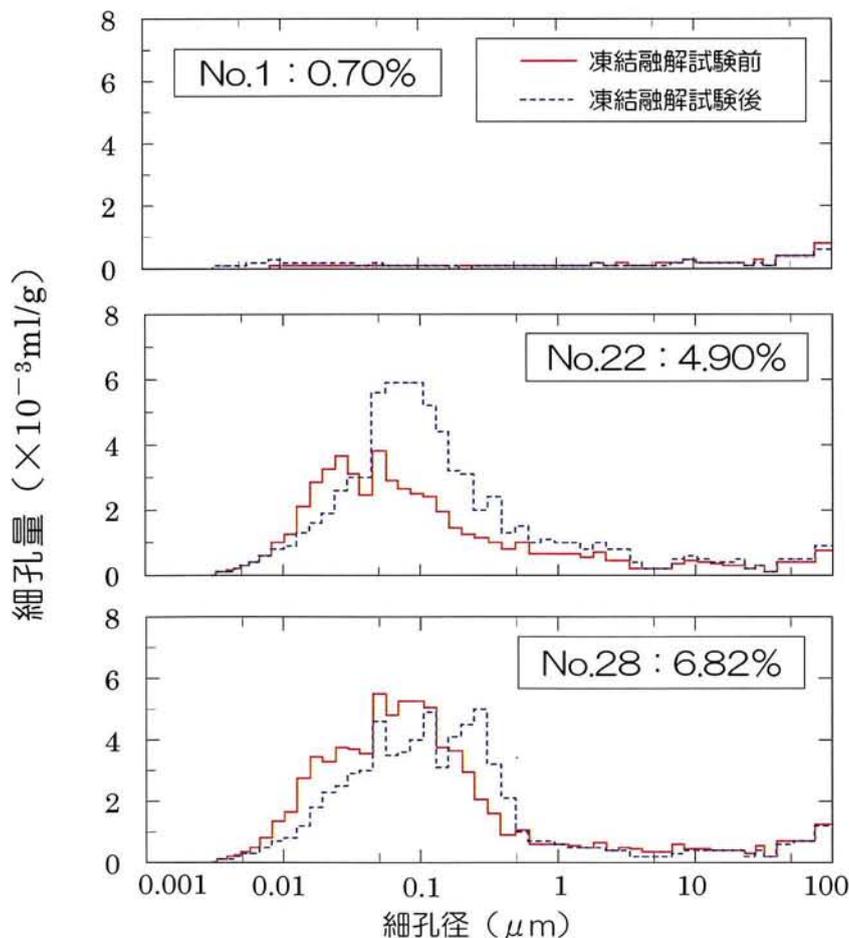


図 4-12 骨材の細孔径分布

写真 4-2 に、No.1 および No.28 の骨材の表面を拡大した写真を示す<sup>6)</sup>。No.1 には、空隙がほとんど見られないのに対して、No.28 では、図 4-12 の細孔径分布で明らかになった 1mm 以上の空隙が見られる。

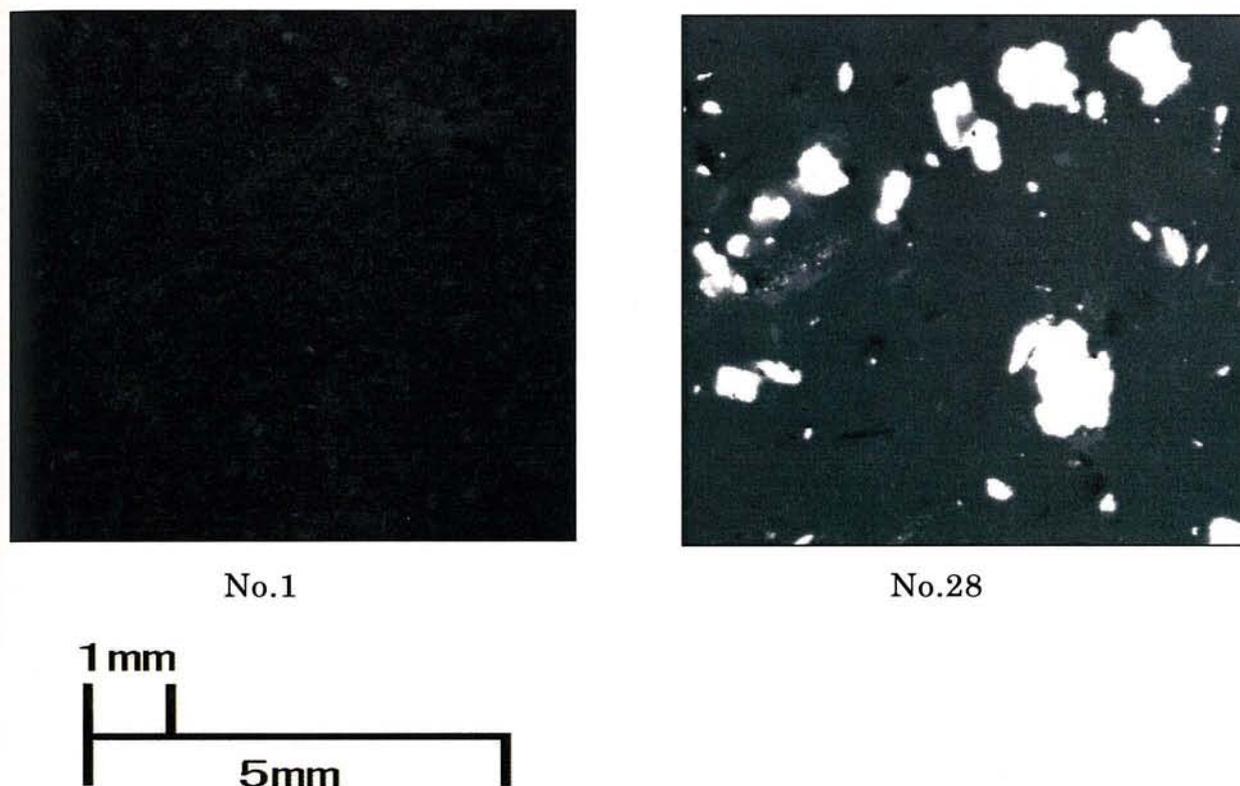


写真 4-2 No.1 および No.28 の骨材表面を拡大した写真

図 4-13 は、凍結融解作用を与えない場合の細孔径分布から、 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  の細孔量を抽出し、残留膨張との関係を求めたものである。吸水率との関連で残留膨張を検討した前掲の図 4-10 に比べれば、より明確な関係が見られる。この領域の細孔が多ければ、凍結融解にともなって、より粗大な細孔へ移行する量も多く、結果的に残留膨張も大きくなるといえる。ただし、No.27 は、全体の傾向から外れ、この範囲の細孔が多いにもかかわらず、それに見合った残留膨張を示していない。

ひずみの大きさには、弾性的性質が大きく関わる。図 4-14 は、 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  の細孔量をヤング係数で除した値と残留膨張との関係を求めたものである。細孔量は残留膨張をもたらす能動的要因に関わり、ヤング係数は変形に対する抵抗性を示すと考え、このような変数を導入してみた。

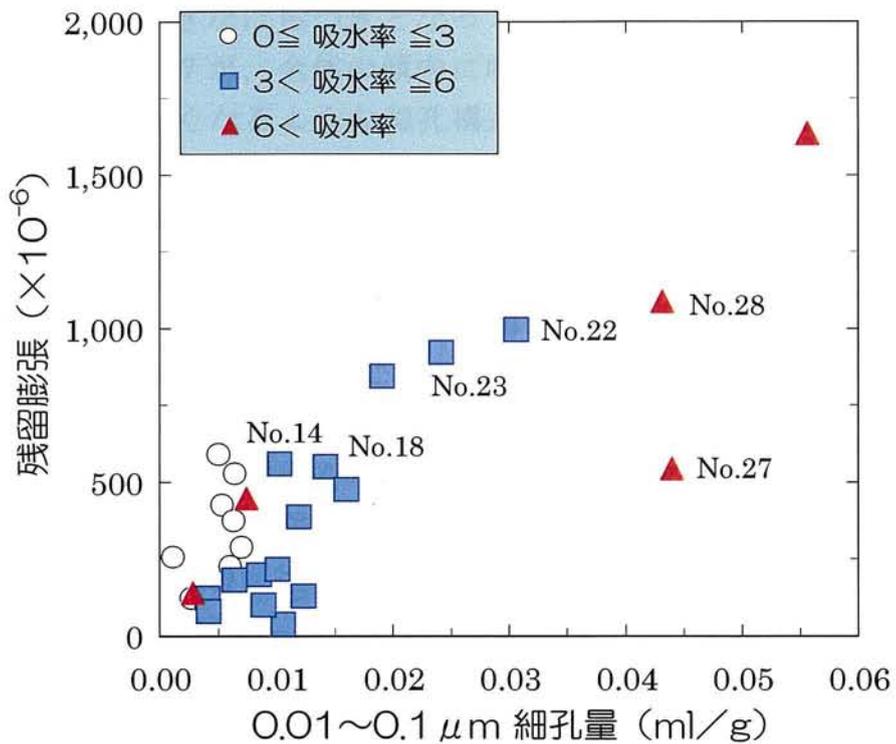


図 4-13  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  細孔量と 100 サイクル終了時の残留膨張の関係

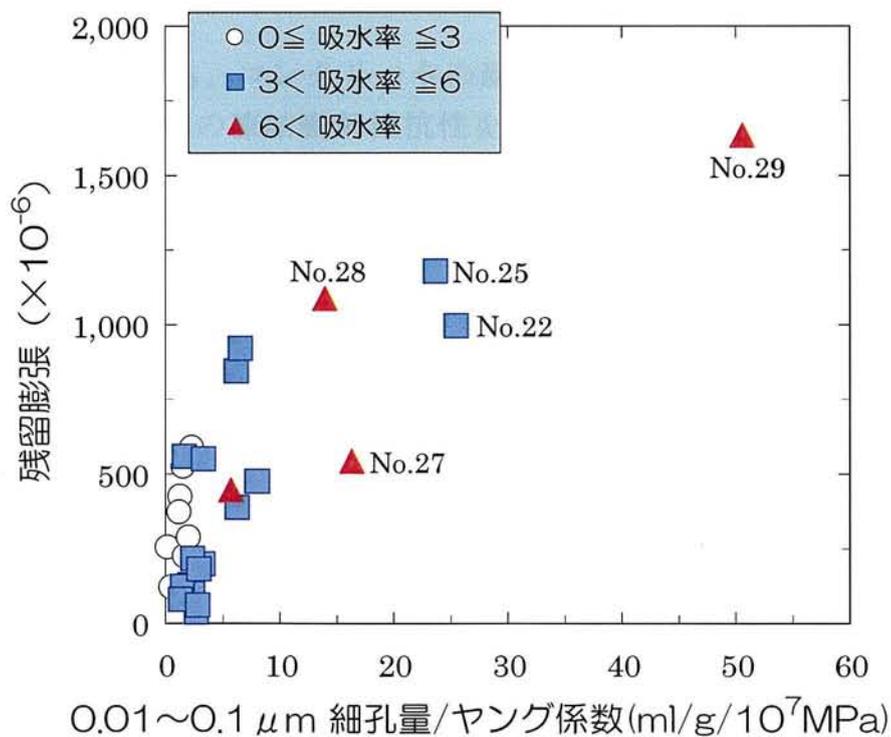


図 4-14  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  細孔量をヤング係数で除した値と 100 サイクル終了時の残留膨張の関係

図 4-13 より、大きなばらつきとなっているが、一定の傾向があるのは確かであり、とくに、No.27 が、全体の傾向に収まっている点が注目される。この骨材は、残留膨張が大きくなるような細孔構造を有しているにもかかわらず、ヤング係数が比較的大きいため、それほど残留膨張を生じなかったと解釈できる。

残留膨張の試験結果で、もっとも重要であるのは、吸水率が規格を外れていても、ごく僅かしか膨張を示さない骨材の存在であろう。ここにも、吸水率のみでは、骨材の凍結融解抵抗性を判断できない面が示されている。再び図 4-11 に着目すれば、吸水率が 3~6% の範囲にある 17 種類の骨材のうち、半数近くの 8 種類は、骨材耐久性指数が 90 程度以上で、残留膨張が  $200 \times 10^{-6}$  程度以下となっており、優れた凍結融解抵抗性を示している。これらの骨材は、少なくともコンクリートの耐凍害性に関する限り、吸水率の JIS を満たす骨材と同様の取扱いができる可能性を秘めており、コンクリートの凍結融解試験を行って、その可能性を吟味する必要がある。

たとえば、骨材耐久性指数が 60 程度であったり、残留膨張が  $500 \times 10^{-6}$  程度であったりする骨材の場合は、コンクリートの配合を工夫するなどの配慮により、骨材自体のやや劣る凍結融解抵抗性を補うことができる可能性があり、これも重要な検討課題である。

#### 4.4 結言

低品質骨材を用いても、コンクリートの耐凍害性を確保できる技術を確立するためには、まず骨材自体の凍結融解抵抗性を知る必要があると考え、骨材に直接、凍結融解作用を与える実験を行ってみた。抵抗性の指標としたのは、凍結融解作用によって生じる質量減少率から求めた骨材耐久性指数であり、求め方はコンクリートの耐久性指数に類似する。

もうひとつの指標は、凍結融解の繰返しによって蓄積される残留膨張である。これらの指標と骨材の物性との関係を検討してみた。得られた主な結論を、以下に示す。

- (1) 骨材耐久性指数には、骨材の平均的な吸水率に加え、骨材粒子のばらつきや吸水率の大きな粒子の混在割合および引張強度などが関連する。
- (2) 残留膨張の場合、骨材内部の細孔構造およびヤング係数などが関連要因となる。
- (3) 吸水率の JIS に外れる骨材であっても、高い骨材耐久性指数と小さな残留膨張を示すものもあり、少なくともコンクリートの耐凍害性の観点からは、これらを規格内骨材と同等に使用できる可能性がある。骨材耐久性指数や残留膨張にやや問題を残す骨材の場合、コンクリートの配合等を工夫する

などすれば、使用の可能性があると思われる。その際、凍結融解作用による骨材の破壊や膨張の特性をよく見極めた配慮が必要となる。

**参考文献**

- 1) 安宅勇二ほか：水銀圧入法による各種建築材料・吸着剤の有効拡散係数の算出，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.461-464 (2003.9)
- 2) 増田健：低品質骨材を用いたコンクリートの凍害に関する研究，岩手大学大学院 工学研究科 博士前期課程 建設環境工学専攻 修士論文，pp.20 (2003)
- 3) 増田健ほか：低品質骨材自体の凍結融解に対する耐久性に関する基礎実験，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，V-427，pp.853-854 (2002)
- 4) 長谷川寿夫・藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ・凍害，技報堂出版，pp.47-48 (1988)
- 5) Powers, T.C. : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Proc. of ACI, Vol.41 (1945)
- 6) 村井松雄：低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性，岩手大学大学院 工学研究科 博士前期課程 建設環境工学専攻 修士論文，pp.18-21 (2005)

## 第5章 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす配合の影響

### 5.1 緒言

これまで、コンクリートに用いられる骨材は、JISに規定された品質を満足することが不可欠であった。たとえば、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」では、附属書1において、絶乾密度や吸水率などの品質を規定している。ところが、場所によっては、骨材の低品質化に伴い、規定の品質を満足する骨材の入手が困難になりつつある。

JISでは、購入者の承認が得られれば、絶乾密度や吸水率の条件を緩和できるようになっている。ただし、積雪寒冷地においてその承認を得るためには、該当する骨材を用いたコンクリートを対象にして凍結融解試験を実際に行い、耐凍害性が確保されることを確認しなければならない場合もある。

幸い、仕様規定から性能規定の移行に伴い、骨材が低品質であってもコンクリートの性能さえ満たせばいいとの考えが浸透しつつあり、この承認が得やすい状況になってきているといえる。資源の有効利用の観点からも、低品質骨材の活用は、きわめて大きな意義を持つ。

骨材は文字通りコンクリートの骨格材料であり、この品質が劣れば、コンクリートの耐凍害性を確保するために、格別の工夫を要すると思われる。そのためには、まず低品質骨材自体が、凍結融解作用により、どのような挙動を示すかを明らかにする必要があるが、前章ではこれを検討した。

ここでは、前章の実験で対象とした骨材の一部を用い、コンクリートの耐凍害性を調べることにした。コンクリートの耐凍害性には、水セメント比や空気量などの配合条件が密接に関連するため、これらの条件を様々に設定した。低品質骨材を用いた場合、コンクリートの耐凍害性確保は難しくなると思われるが、配合の調節により、その確保が可能であるかを検討するのが、ここでの目的である。

### 5.2 実験概要

#### 5.2.1 対象とした骨材とその物性

骨材寸法が6mm程度以下であれば、凍っても損傷を受けないとされており<sup>1)</sup>、骨材が低品質であることの影響は、細骨材よりも粗骨材で強いと考えられるため、粗骨材に着目した。対象とした粗骨材は、総計17種類であり、そのうち6種類は、岩手県、秋田県および青森県でコンクリート用として使用されている砕石であり、他の11種類は路盤材用として市販されている砕石である。選定にあたっては、良質から低品質まで、広範囲にわたる品質になるようにした。これは、コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を、広い範囲の品質の骨材を対象とし

て求め、抵抗性と品質との関連を大局的かつ詳細に捉えようとの意図による。

図 5-1 は、選定した粗骨材の品質を示しており、吸水率が小さいものから順に並べている。石質は、No.1 および No.2 が輝緑岩、No.3 および No.6 が玄武岩、これ以外はすべて安山岩である。JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」に規定されている絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$  以上および吸水率 3.0%以下を満たす骨材は 3 種類で、他の 14 種類はどちらも満たさない骨材となっている。ここでは、絶乾密度および吸水率ともに規格を満たさない骨材を低品質骨材とみなすことにする。細骨材は、JIS を満足する絶乾密度  $2.81\text{g/cm}^3$ 、吸水率 1.82%の砕砂を使用した。

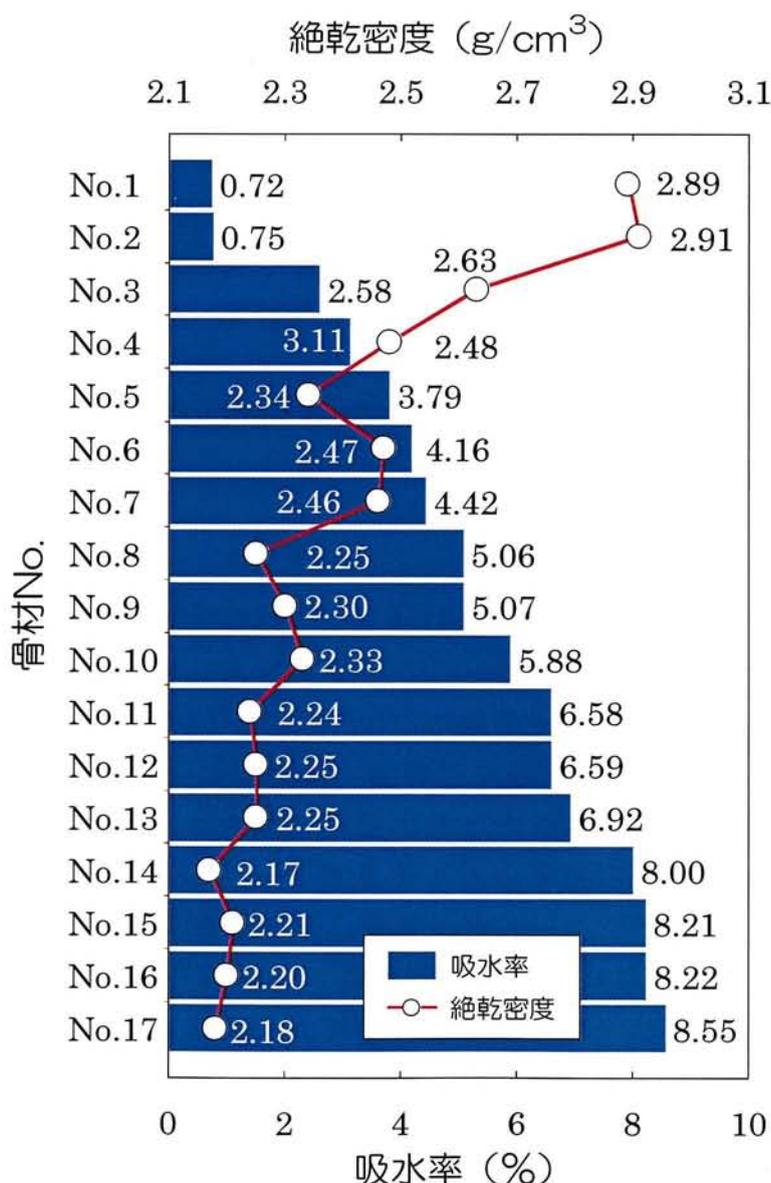


図 5-1 選定した粗骨材の品質

### 5.2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を、表 5-1 に示す。水セメント比は、50%を基本とし、使用骨材によっては、30%および 40%の場合も検討した。これは、水セメント比 50%で耐凍害性を確保できなかった場合、これを小さくすることで、耐凍害性の向上を図れるかを検討しようという意図による。フレッシュコンクリートの空気量については、プレーンコンクリート、3.0~3.5%、5.5~6.0%および 8.0~10.0%の4水準の中から、使用骨材によって、適宜設定した。

空気量は、耐凍害性に強く影響を及ぼすと考えられることから、許容範囲を通常よりも狭くしている。なお、この範囲は、空気量試験時に適用しており、結果の表示では骨材修正係数を考慮しているため、範囲から外れる場合もある。また、5.5~6.0%は、空気量 6%と表記する。

スランプは、 $8\pm 2.5\text{cm}$  に設定し、単位水量および減水剤の量を調節して、この範囲に納めた。用いた混和剤は、AE 減水剤標準型 I 種が 2 種類（主成分：リグニンスルホン酸化合物およびリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体）、高性能 AE 減水剤標準型 I 種が 1 種類（主成分：ポリカルボン酸エーテル系の化合物）および AE 剤（変性ロジン酸化合物を主成分とする陰イオン系の界面活性剤）で、水セメント比や空気量の設定により、適宜使い分けた。

平均的な単位水量は、 $170\text{kg/m}^3$  程度であり、試験を行った配合は総計で 81 種類である。

### 5.2.3 凍結融解試験

コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」の気中凍結・水中融解方法（B 法）で行った。供試体は、寸法  $100\times 100\times 400\text{mm}$  の角柱とし、材齢 14 日まで  $20^\circ\text{C}$  の標準水中養生を行った後、凍結融解試験を開始し、30 サイクル毎に質量、動弾性係数および長さ変化を測定した。

質量変化率の測定に当たっては、所定のサイクルが終了した場合、供試体は気中に静置されており、乾燥によって質量が小さく測定される誤差が生じないように、 $20^\circ\text{C}$  の水中に数時間浸漬してから測定した。

動弾性係数の測定は、JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に準じ、たわみ振動によって行った。コンクリートの長さ測定は、JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法（ダイヤルゲージ法）」に基づき、室温  $20^\circ\text{C}$  に設定した恒温室で横型コンパレータを用いて測定し、長さ変化が温度の影響を受けないように配慮した。

表 5-1 コンクリートの配合

No.	骨材 No.	W/C (%)	s/a (%)	目標空気量	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
1	16	50.0	46.0	プレーン	165	330	937	902
2	5		43.0		170	340	918	921
3	2		48.6		170	340	849	1162
4	10		48.6		170	340	866	863
5							930	946
6							849	953
7								1017
8								922
9								930
10								946
11								913
12								936
13								998
14								1002
15								1053
16								901
17								924
18								743
19								852
20								962
21								942
22								1160
23								897
24	16							818
25	5							916
26	10							931
27								882
28								890
29								911
30								911
31								930
32								946
33								953
34								1017
35	2							1162
36								858
37								864
38								913
39								936
40								998
41								1002
42								1053
43								861
44								861
45	5							740
46	16							767
47								982
48	10							783
49	5						962	
50							772	
51	16						863	
52	10						866	
53							904	
54	2						862	
55							784	
56	16						800	
57	5						893	
58	10						972	
59							893	
60							911	
61							926	
62							863	
63	5						784	
64	10						1058	
65	16						789	
66	5						866	
67							719	
68	16						704	
69	10						979	
70							703	
71							866	
72							698	
73	16						863	
74							889	
75	5						755	
76	10						771	
77	2						871	
78	5						863	
79							775	
80	16						866	
81	10						701	
							938	
							919	
							716	
							919	
							863	
							656	
							859	
							866	
							877	
							892	
							1058	
							953	
							933	
							627	
							640	
							933	
							570	
							863	
							574	
							866	
平均値		44.4	42.3	—	168	391	801	929
最大値		50.0	48.6	—	210	567	979	1162
最小値		30.0	35.7	—	145	290	570	743
標準偏差		7.858	2.436	—	10.976	81.350	79.957	74.773

硬化コンクリートの気泡間隔係数は、 $100 \times 100\text{mm}$  の供試体を用い、ASTM C 457 に示されるリニアトラバース法により、硬化コンクリートの空気量を測定して求めた。この際、弦長が  $1\text{mm}$  以上の気泡については、エントラップトエアの恐れが強いため、測定の対象外とした。

圧縮強度については、JIS A 1148「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。キャッピングは水セメント比 50% および 40% については、附属書 1 の「アンボンドキャッピング」を採用し、水セメント比 30% については、アンボンドキャッピングを採用できないため、研磨によって、試験の省力化を図った。

### 5.3 実験結果および考察

図 5-2 は、水セメント比 50% の場合の粗骨材の吸水率とコンクリートの耐久性指数の関係を示したものである。

総体的には、粗骨材の吸水率が小さいほど、高い耐久性指数を示す傾向にある。吸水率が JIS を満足する 3% 以下の骨材の場合、耐久性指数はすべて 100 程度の値を示しており、規格内であれば、耐凍害性を確保できるといえる。注目すべきは、吸水率が JIS を外れる骨材を用いても、4.5% 程度までであれば、60 に近い一例を除き、いずれの耐久性指数も 100 程度を示している点であり、規格外であっても、有効活用できる骨材は少なくないことを示唆している。

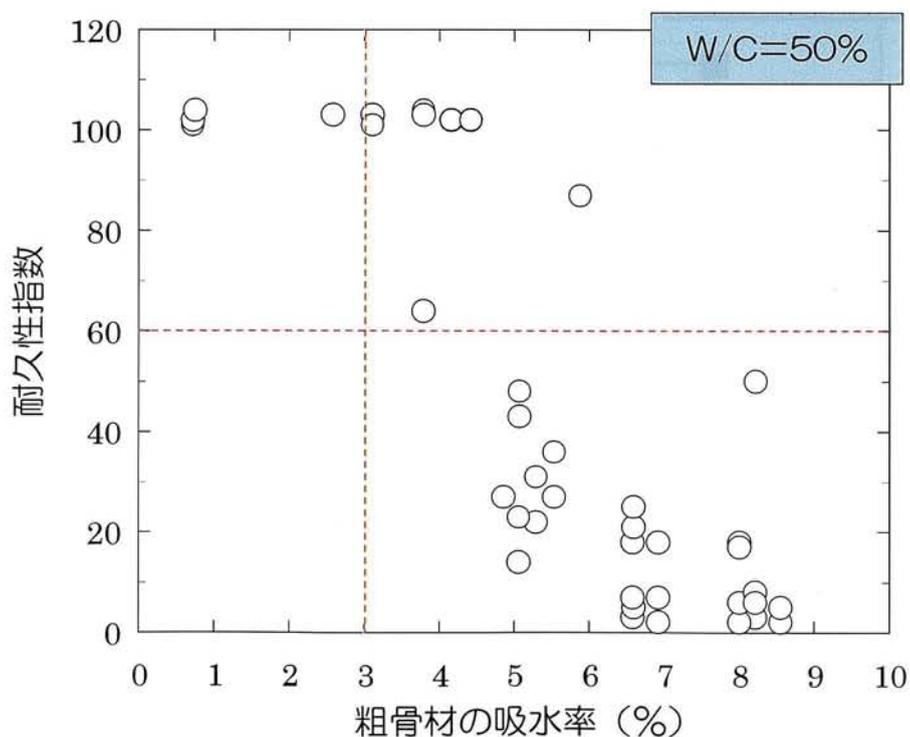


図 5-2 粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係

ただし、これらはAEコンクリートであり、適切な空気量の設定が、耐凍害性確保の前提となる。これに対し、吸水率が5%程度以上になると、80を超える一例を除き、すべてが耐久性指数60を下回った。極めて低品質の骨材の場合、耐凍害性の確保は、難しいといわざるを得ない。

図には、空気量の異なるコンクリートの結果が混在しており、この違いによる耐凍害性の差ははっきりしない。図5-1のNo.2, No.5, No.10およびNo.16の骨材を用いたコンクリートについては、表5-1に示したように、空気量を3段階（プレーン、5.0~5.5%, 8.0~10.0%）に設定しており、これらの空気量と耐久性指数との関係を求めたのが、図5-3である。

良質骨材であるNo.2を用いたコンクリートは、比較的小さな空気量でも、耐凍害性を確保できている。No.5は、吸水率3.79%の低品質骨材であるが、プレーンコンクリートでも耐久性指数60以上となっており、空気を連行すれば、さらに耐凍害性が高まって、耐久性指数100程度となる。吸水率がきわめて大きいNo.10（吸水率：5.88%）およびNo.16（吸水率：8.22%）の場合には、空気量による耐久性指数の極値が見られ、設定した範囲内では、空気量6%で、相対的に高い耐久性指数を示す。とくにNo.10の骨材を用い、空気量6%とした場合には、耐久性指数が80を上回っており、低品質骨材を使用しても、空気量の適切

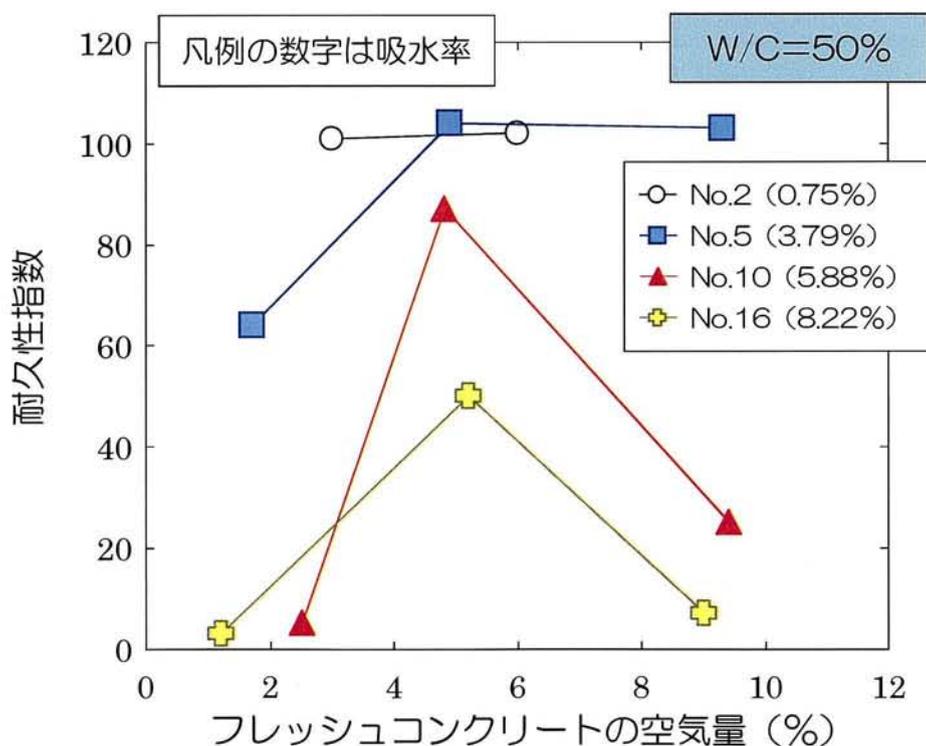


図5-3 フレッシュコンクリートの空気量と耐久性指数の関係 (W/C=50%)

な設定により、コンクリートの耐凍害性を確保できる可能性を示す例であると受け止められる。

同様に4種類の骨材を用い、水セメント比を40%および30%にしたときの空気量と耐久性指数の関係を、それぞれ図5-4および図5-5に示す。傾向は、水セメント比50%とほぼ同様であり、No.10およびNo.16では、空気量6%で相対的に高い耐久性指数を示している。しかしながら、耐凍害性の向上は、水セメント比50%の場合ほど顕著ではない。また、図5-3～図5-5を見比べれば、水セメント比が小さいほど、耐久性指数が高いという傾向は認めがたい。

図5-6に、空気量6%の場合の硬化コンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。フレッシュコンクリートの空気量をほぼ同一としたにもかかわらず、各骨材の場合とも、水セメント比によって気泡間隔係数に違いが見られ、No.10の水セメント比40%と50%の相対関係を除けば、水セメント比が小さいほど、気泡間隔係数が小さい傾向にある。一般には、気泡間隔係数が小さければ、耐凍害性が良好になるとされている。しかしながら、たとえばNo.10の骨材を用い、水セメント比を30%としたコンクリートの場合、気泡間隔係数が小さいにもかかわらず、小さな耐久性指数となっている。また、水セメント比50%の気泡間隔係数が水セメント比30%より大きいにもかかわらず、耐久性指数は高い値を示

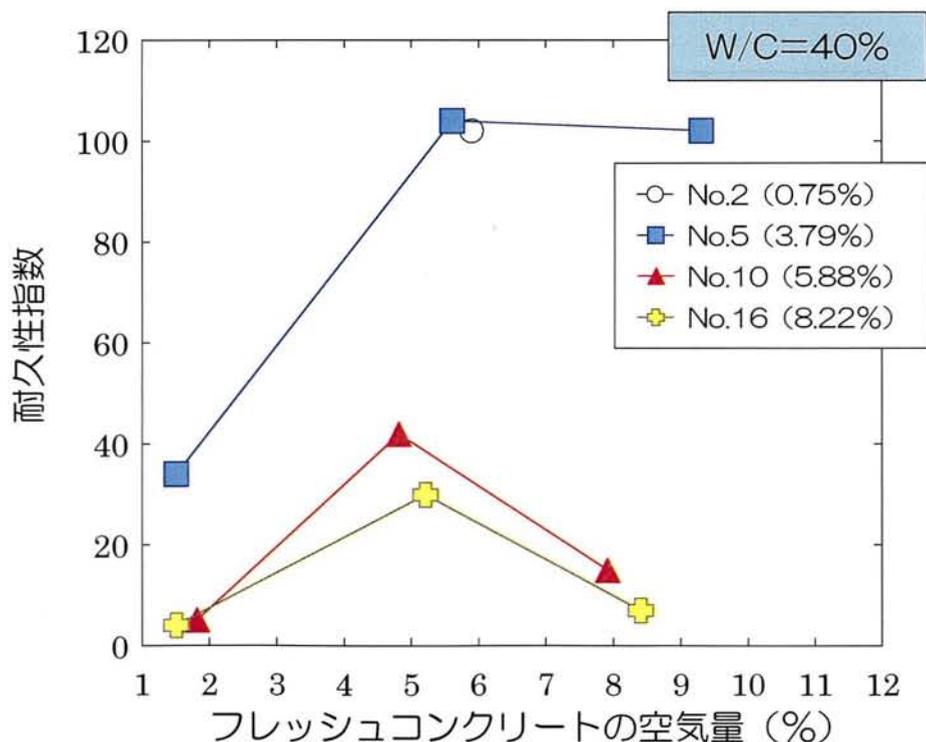


図5-4 フレッシュコンクリートの空気量と耐久性指数の関係 (W/C=40%)

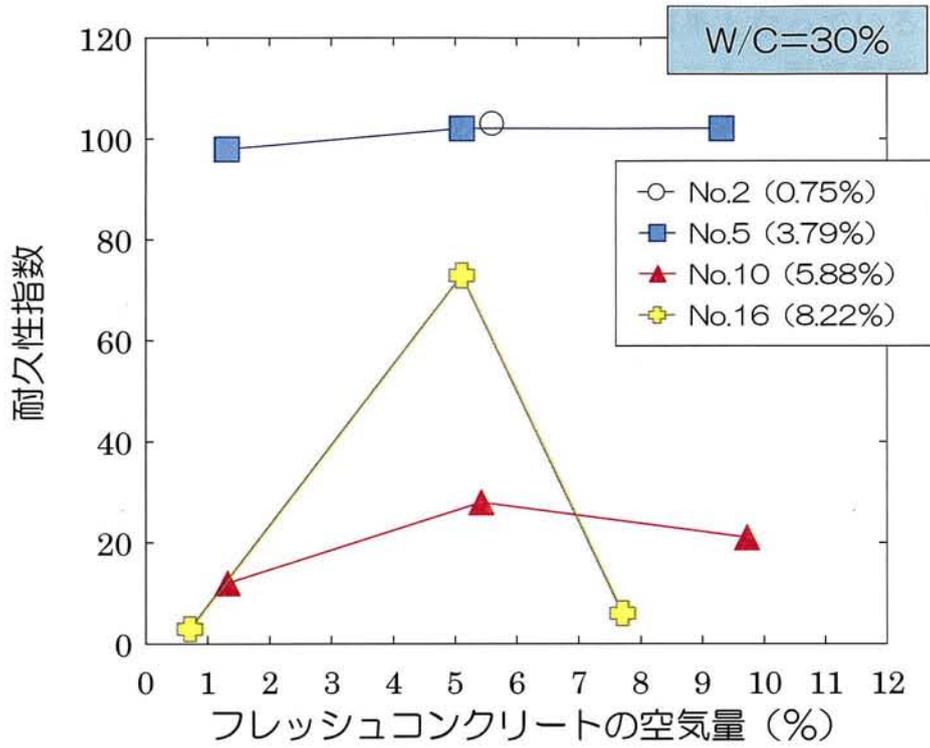


図 5-5 フレッシュコンクリートの空気量と耐久性指数の関係 (W/C=30%)

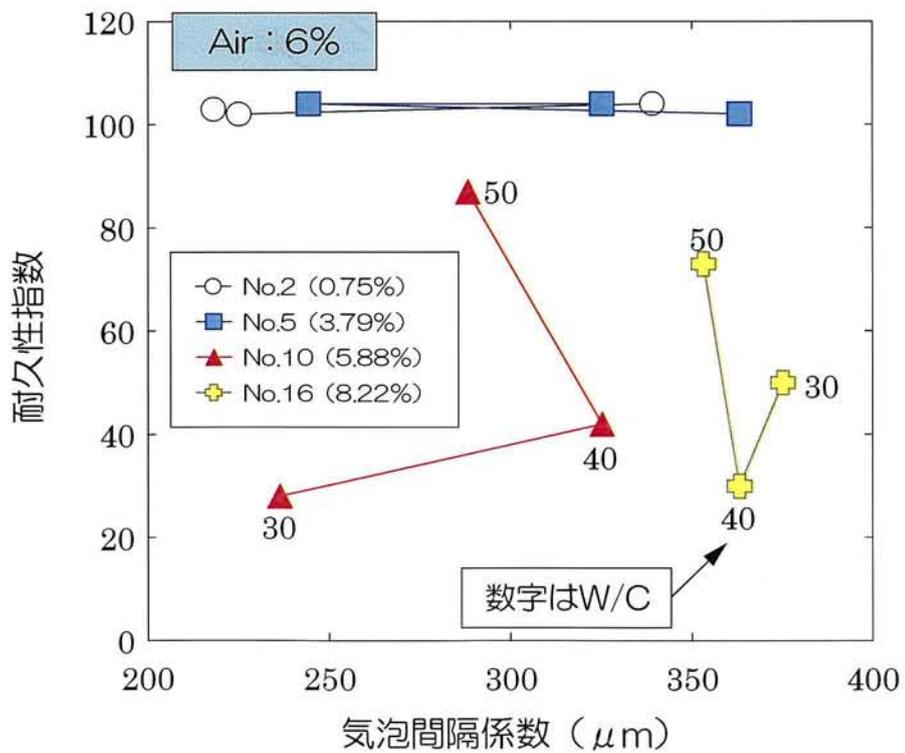


図 5-6 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

すなど、気泡間隔係数では統一的な解釈ができない結果となっている。上述のように、適切な空気量の設定により、低品質骨材を用いても、耐凍害性を確保できる可能性があると考えたが、これは見かけ上のものであり、空気量以外の要因が卓越して、**図 5-3**～**図 5-5**のような傾向をもたらした可能性もある。

**図 5-7** は、空気量 6% の場合の水セメント比と圧縮強度の関係である。低品質骨材を含めても、水セメント比が小さいほど、コンクリートの圧縮強度が大きくなるという一般の常識にかなう傾向となっている。

同じく空気量 6% の場合の水セメント比と耐久性指数の関係を **図 5-8** に示す。強度との関係で見られたように、水セメント比が小さいほど、コンクリートの品質は良好となるはずであるが、No.16 の耐凍害性の場合には、水セメント比 40% と 50% の相対関係のように、必ずしもそのような傾向にない。No.10 にいたっては、水セメント比が小さいほど、耐久性指数が小さいという極めて特異な例となっている。

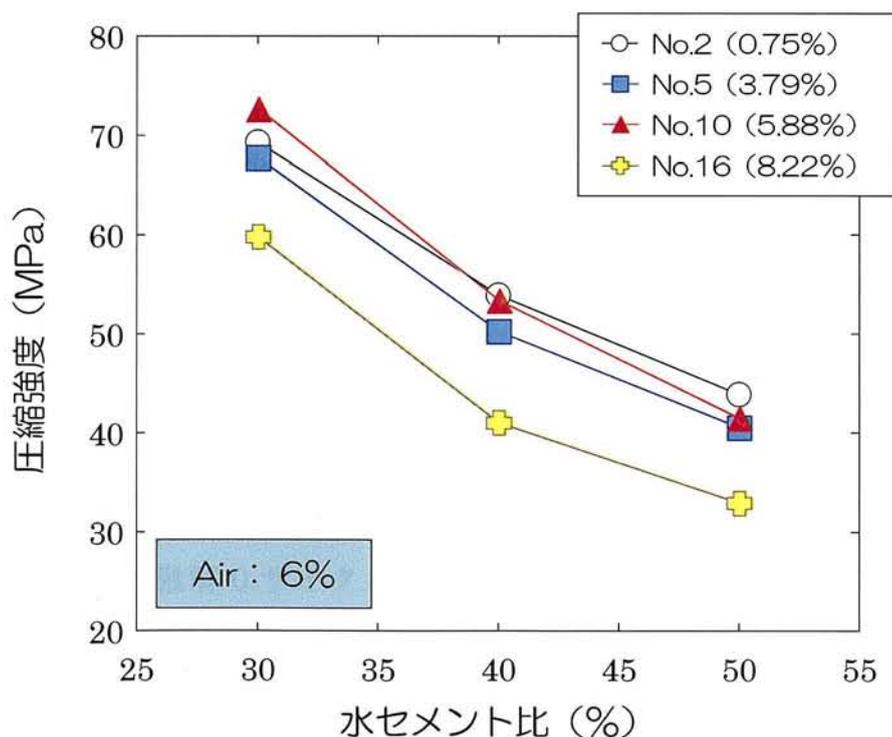


図 5-7 空気量 6% の場合の水セメント比と圧縮強度の関係

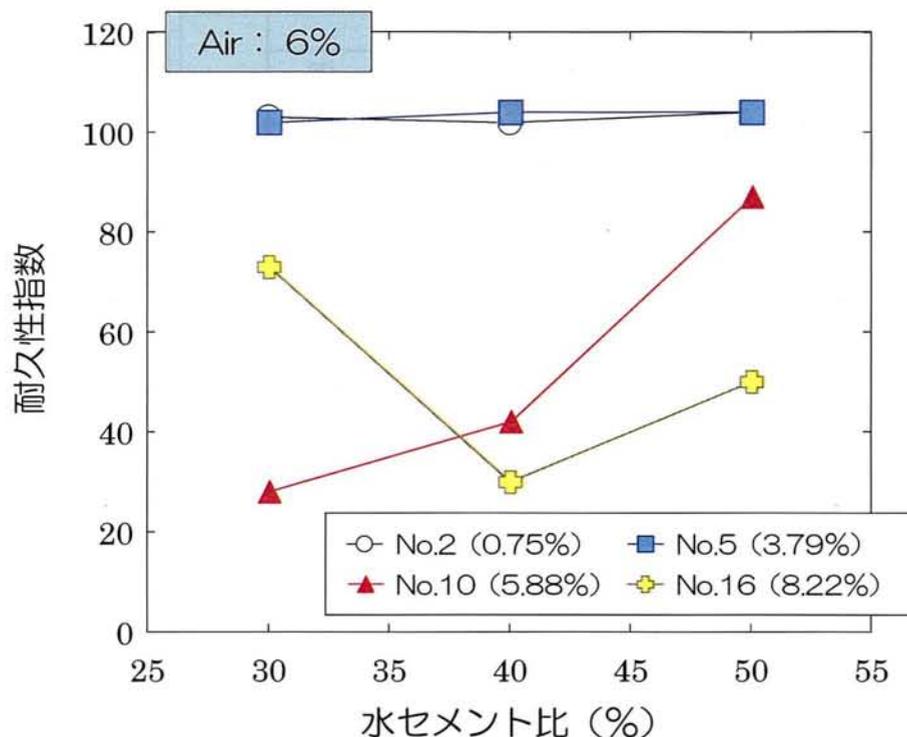


図 5-8 空気量 6% の場合の水セメント比と耐久性指数の関係

凍結融解に伴う質量変化率の推移を図 5-9 に示す。質量変化率は、式 (5-1) によって計算し、JIS Z 8401 (数値の丸め方) により小数点以下 1 桁に丸めた。

$$W_n = \frac{w_n - w_0}{w_0} \times 100 \quad (5-1)$$

ここに、 $W_n$  : 凍結融解  $n$  サイクル後の質量変化率 (%)

$w_n$  : 凍結融解  $n$  サイクル後の供試体の質量 (g)

$w_0$  : 凍結融解 0 サイクルにおける供試体の質量 (g)

場合により、質量が増加しているのは、ひび割れが発生して、吸水するためであると思われ、逆に質量減を示す例もあるものの、顕著ではない。目視観察によれば、すべての供試体において、スケーリングはほとんど見られなかった。

図 5-10 は、凍結融解に伴う長さ変化率を示しており、供試体によっては、著しい膨張を示すものもある。図 5-11 に、長さ変化率と耐久性指数の関係を示す。300 サイクルで、長さ変化率が測定不能となった例もあったため、長さ変化率は 270 サイクル時点での値とした。両者には、一定の関係が見受けられ、凍結融解

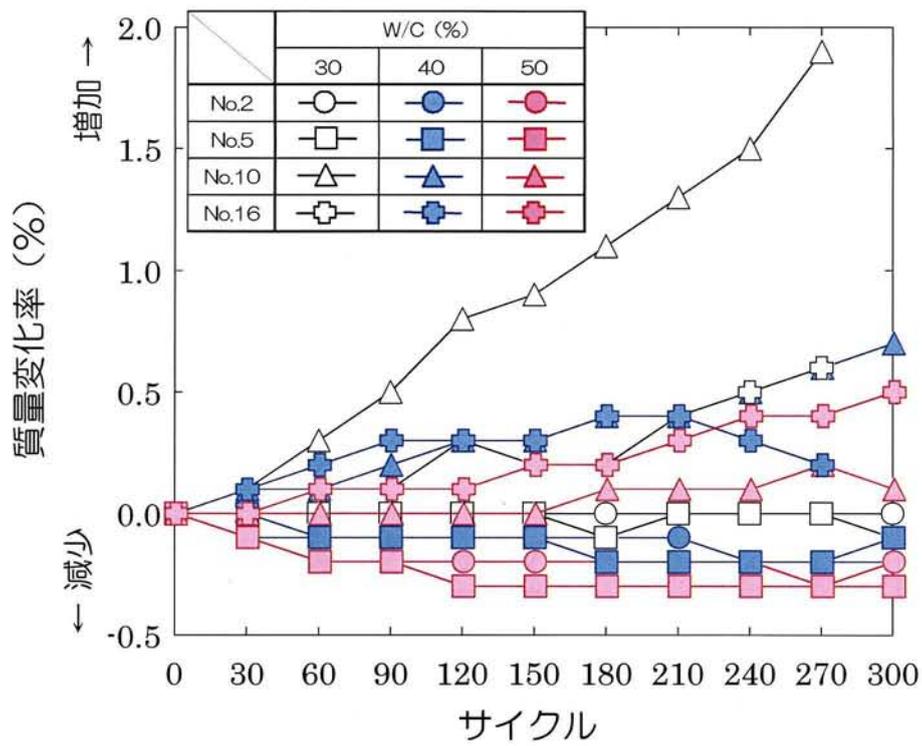


図 5-9 凍結融解に伴う質量変化率の推移

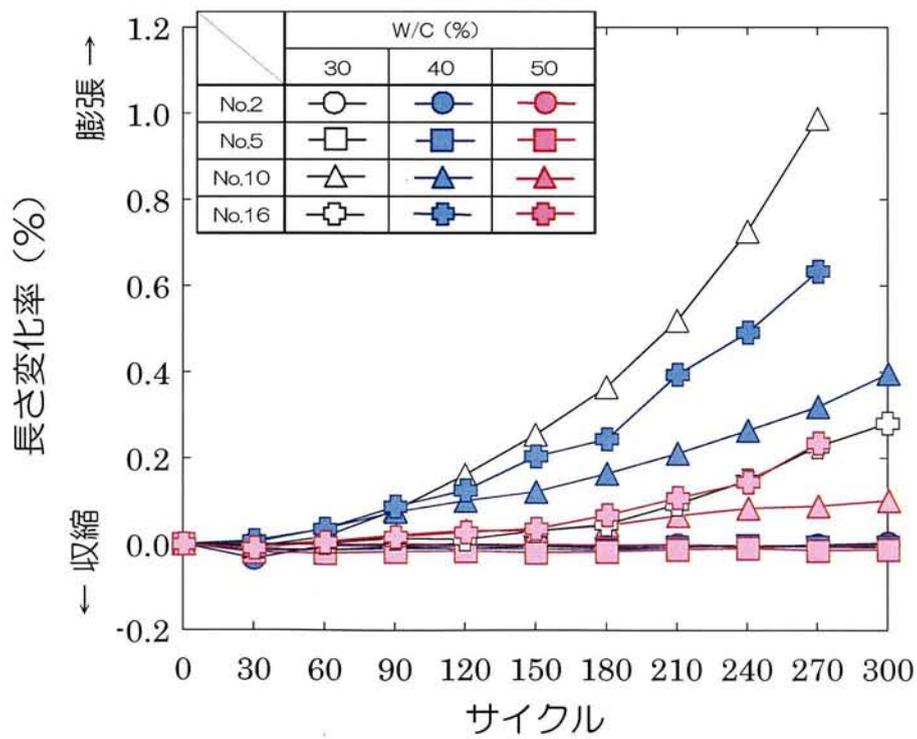


図 5-10 凍結融解に伴う長さ変化率の推移

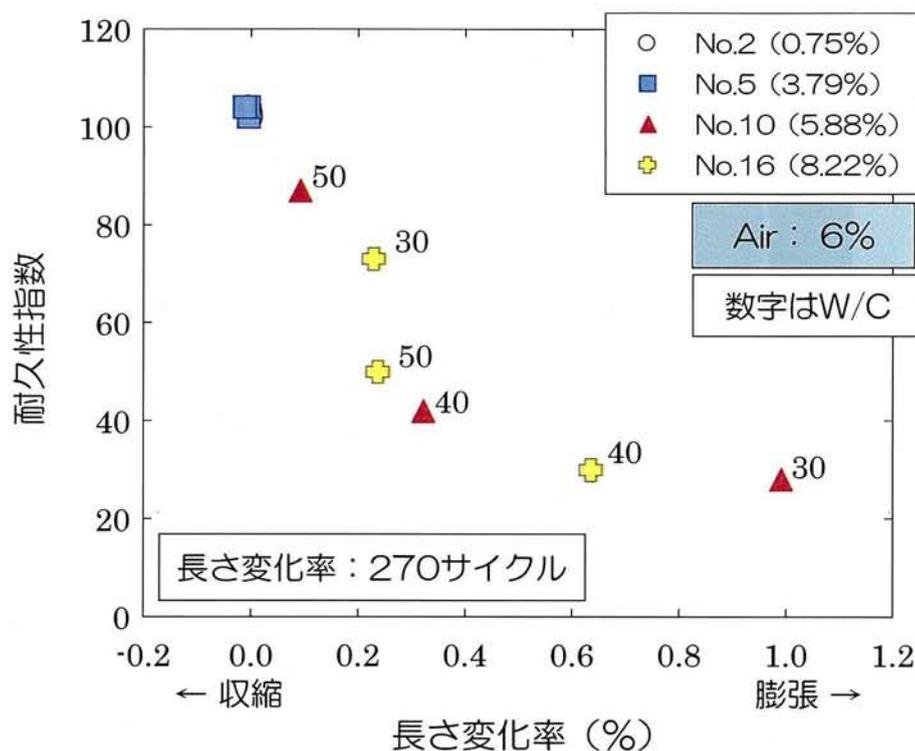


図 5-11 長さ変化率と耐久性指数の関係

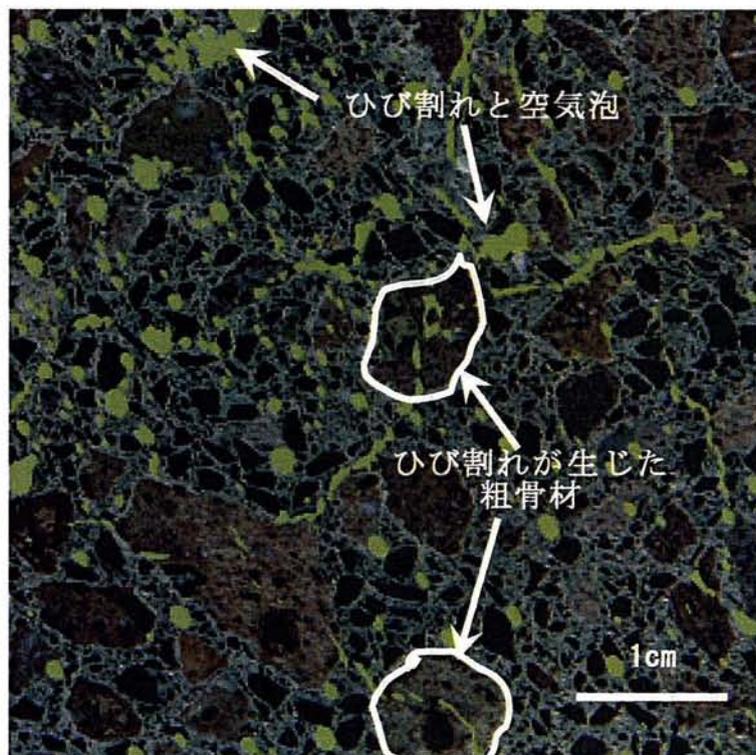
に伴う内部組織の弛緩さらには崩壊が膨張をもたらし、耐久性指数の低下につながったといえる。すなわち、本実験の範囲内では、きわめて低品質の骨材を用いたコンクリートの凍害は、スケーリングタイプではなく、内部組織の弛緩や崩壊であるといえる。ただし、用いた試験方法が気中凍結・水中融解試験方法であり、方法が異なれば、スケーリングが生じる可能性もある。

No.10 の骨材を用いたコンクリートは、水セメント比が小さいほど、この内部組織の変化が著しかったことになる。**写真 5-1** は、No.10 を用いたコンクリートの凍結融解後における断面を示している。水セメント比が 30% の場合、内部の粗骨材には夥しいひび割れが見られ、崩壊とも表現できる状況を呈している。しかも、モルタルにもひび割れの発生が認められる。粗骨材は吸水率が大きく、凍結によって、膨張しようとする。ところが、周囲は水セメント比の小さいモルタルであり、粗骨材の膨張を阻止しようとする働きが強い。そのため、粗骨材に応力が発生し、崩壊に至ったと推察される。粗骨材が崩壊すれば、なおさら含水状態が高まり、凍結に伴う膨張圧が大きくなる。その圧力により、ついにはモルタルにひび割れが発生するようになり、全体の膨張と動弾性係数の低下につながったと考えられる。

一方、水セメント比 50% の場合には、内部の粗骨材にそれほどの変化が見られない。モルタルの拘束力が弱く、しかも骨材内部の水分が凍結した際に、骨材か



【W/C=30%, Air=6%】



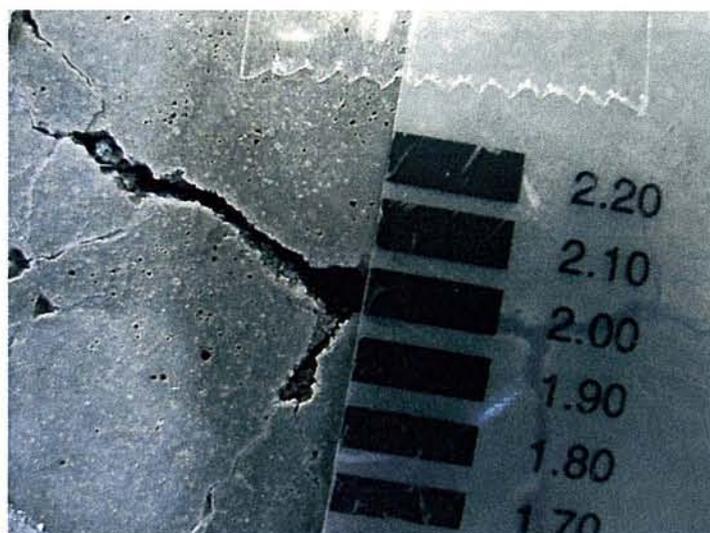
【W/C=50%, Air=6%】

写真 5-1 300 サイクルの凍結融解試験終了後の断面 (No.10)

らの未凍結水が移動できるようなモルタルの空隙構造になっているためと考えられ、結果的にコンクリートはほとんど膨張せず、80を上回る耐久性指数を確保できたことになる。

前掲の図 5-3 において、No.10 の骨材を用い、空気量 6%にしたコンクリートが耐凍害性を確保できたのは、一見して適切な空気量によると受け止められかねないが、それよりは、粗骨材とモルタルの品質の組み合わせが、凍結融解に伴う内部の応力発生を小さくしたためであると解釈するのが妥当であると思われる。この例は、骨材の品質に見合った配合条件を設定すれば、耐凍害性を確保できる可能性を示唆するものとして意義深い。

写真 5-2 および写真 5-3 は、No.10 を用いたコンクリート（水セメント比=30% および 40%）の 300 サイクル終了後の劣化状態を示している。いずれの水セメント比も、角柱の形状を維持しているものの、詳細に観察するとひび割れが複数生じており、その巾は 10~20mm と通常に比べ著しく大きいのが特徴である。とくに、水セメント比 40%の場合、砕石を用いたコンクリートでは珍しいポップアウトが見られたことから、粗骨材の吸水率が大きいために、凍結での膨張圧がきわめて大きいことが推察される。



【単位：mm】

写真 5-2 300 サイクルの凍結融解試験終了後の劣化状態  
(No.10, W/C=30%, Air=6%)



【単位：mm】

写真 5-3 300 サイクルの凍結融解試験終了後の劣化状態  
(No.10, W/C=40%, Air=6%, 単位：mm)

#### 5.4 結言

低品質の粗骨材を用いたコンクリートにおいて、水セメント比や空気量などの配合条件を変化させた場合の耐凍害性について検討した。得られた主な結論を、以下に示す。

- (1) 吸水率が3%以下の規格を外れても、4.5%以内であれば、耐凍害性を確保できる骨材もあり、有効活用できる骨材は少なくないことを示唆している結果が得られた。
- (2) 5%程度以上の吸水率を有する低品質骨材を用いた場合には、おしなべて低い耐凍害性を示し、水セメント比や空気量を調節しても、耐凍害性の確保は難しいといえる。
- (3) 低品質骨材の中には、水セメント比を大きくするほど耐凍害性が改善される注目すべき事例も見られた。内部の粗骨材にそれほどの変化が見られなかったことから、モルタルの拘束力が弱く、しかも骨材内部の水分が凍結した際に、骨材からの未凍結水が移動できるようなモルタルの空隙構造になっているためと考えられる。

**参考文献**

- 1) ACI Committee 201: Guide to Durable Concrete, Jour. ACI, Vol.74, No.12, pp.573-609 (1977.12)