

# 論文 粗骨材の耐凍害性評価指標の検討

片平 博\*1・渡辺博志\*2・山田 宏\*3

**要旨:** コンクリートの耐凍害性は、粗骨材の耐凍害性に大きく依存する。粗骨材の耐凍害性は、粗骨材に作用する氷圧の大きさと、それに抵抗する粗骨材の素材の強度に関係すると考えられる。氷圧の大きさの指標として吸水率（粗骨材中の空隙量）の分布、素材の強度の指標として新たに検討を進めている簡易法損失率を採用し、これらの指標とコンクリートの耐久性指数との関連性について調査した。また、コンクリートの凍結融解試験後の供試体を切断し、断面内のひび割れ発生状況を観察した。これらの結果から、骨材品質がコンクリートの耐凍害性に与える影響を合理的に判定するための指標について検討した。

**キーワード:** 耐久性指数, 粗骨材, 凍結融解抵抗性, 吸水率

## 1. はじめに

コンクリートの耐凍害性を確保するためには、コンクリート中の空気量と水セメント比を適切に設定することでペーストの耐凍害性を高め、かつ、耐凍害性に優れた良質な骨材を使用する必要がある。このため、JIS A 5308では骨材の品質が定められている。

現在、骨材の耐凍害性は JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」によって得られる安定性損失質量百分率（以下、安定性という）によって評価するのが一般的となっている。しかしながら、この試験結果と JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」によって得られる耐久性指数とは、必ずしも良い対応を示すとは限らず、よりの確に骨材の耐凍害性を評価する手法の確立が望まれている。

なお筆者らは、これまでの研究によって、コンクリートの耐久性指数に与える影響は、一般の天然骨材の場合、細骨材よりも粗骨材で顕著であることを示しており<sup>1)</sup>、今回は粗骨材を対象とした検討を行った。

粗骨材の耐凍害性は、粗骨材中の水分が凍結する際の氷圧の大きさと、それに抵抗する粗骨材の素材の強度に関係すると考えられる。この観点から、過去の研究では、氷圧の大きさは骨材中の空隙の量に依存すると考え、その指標として粗骨材の平均吸水率を用い、素材の強度の指標には安定性を用い、その双方の組み合わせから、粗骨材の耐凍害性を大まかに評価することが可能であることを示している<sup>2)</sup>。

この考えかたを踏襲しつつ、今回はさらに、氷圧の大きさの指標として吸水率分布（バラツキの程度）、素材の強度の指標としては新たに検討を進めている骨材の簡易凍結融解試験法の結果（簡易法損失率）を採用し、これらの指標とコンクリートの耐久性指数との関連性につ

いて検討した。また、コンクリートの凍結融解試験後の供試体を切断し、断面内のひび割れ発生状況を観察し、骨材品質と劣化状態、さらには耐久性指数との関係を調べた。これらの結果から、骨材品質がコンクリートの耐凍害性に与える影響を合理的に判定するための指標について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 収集した骨材の種類と骨材試験

今回の実験では、コンクリートの耐凍害性に与える粗骨材の品質の影響をより広範囲に捉える必要があることから、JIS A 5308 に定められている骨材の品質規格を満足するものから規格を大きく外れる骨材まで、表-1に示す 25 種類の骨材を使用した。粒度範囲はいずれも 25-5mm である。表には JIS で定められている試験法によって得られる密度（絶乾）、吸水率、安定性の他に以下に示す粒子別吸水率の測定結果と、簡易法損失率も示す。

粒子別吸水率の測定は、粗骨材の種類ごとに、25-15mm の粗骨材粒子を無作為に 50 粒子以上（碎石は 50 個、砂利は 52~80 個）抽出し、1 粒子ごとの吸水率を測定した（ただし、R1 を除く）。

過去の研究報告<sup>3)4)</sup>によれば、砂利骨材に関して、粒子ごとの吸水率を測定した結果、8%を超える吸水率を示す粒子の割合と、その砂利粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験結果との間に良い対応があることが報告されている。そこで本研究でも、粒子毎の吸水率の測定結果から、平均値、変動係数、および8%を超える吸水率を示す粒子割合を求めた。

簡易凍結融解試験は、再生骨材の耐凍害性を評価する試験方法として開発したもの<sup>5)</sup>であり、現在、JIS A 5022 において再生骨材Mの耐凍害性を評価する試験方法に採

\*1 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員（正会員）

\*2 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 上席研究員（正会員）

\*3 住友大阪セメント株式会社 建材事業部 技術開発グループ 補修材チーム兼アンカーチーム（正会員）

表-1 粗骨材の物性とコンクリートの凍結融解試験結果

種別	記号	骨材試験					コンクリートの凍結融解試験			
		JISによる試験			粒子別吸水率の測定		簡易法損失率 (%)	耐久性指数	断面観察	追加試験
		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)	平均値 (%)	8%以上の粒子割合				
碎石	C1	2.59	1.54	32.3	1.57	0.0	20.0	95		
	C2	2.48	4.38	45.3	4.07	10.0	8.2	91	○	○
	C3	2.63	1.66	4.1	1.50	0.0	3.1	90	○	○
	C4	2.65	2.46	29.0	1.99	0.0	8.9	90	○	○
	C5	2.28	7.17	71.6	7.58	50.0	21.1	88	○	○
	C6	2.45	3.33	56.4	2.16	0.0	39.5	85		
	C7	2.40	4.30	55.2	3.97	0.0	9.4	80	○	○
	C8	2.47	2.74	72.9	2.33	2.0	54.8	75		
	C9	2.44	3.89	54.1	3.70	2.0	5.8	74	○	○
	C10	2.37	4.96	89.8	4.94	0.0	53.2	65	○	○
	C11	2.53	1.47	23.1	0.92	0.0	8.8	62		
	C12	2.25	6.43	28.5	5.61	14.0	21.4	12	○	
	C13	2.29	6.53	56.5	6.24	26.0	44.4	9	○	
	C14	2.29	5.58	53.4	5.64	18.0	34.0	8	○	
砂利	R1	2.59	1.05	2.3			1.1	94		
	R2	2.45	4.21	19.1	2.68	0.0	5.9	70		
	R3	2.48	4.39	19.4	3.93	6.3	5.1	64		
	R4	2.53	1.90	10.6	2.25	1.4	4.4	56		
	R5	2.41	3.78	13.6	3.23	6.3	9.6	49	○	
	R6	2.47	2.86	12.9	2.04	1.6	6.1	44	○	
	R7	2.50	2.63	9.0	1.85	0.0	5.7	36		
	R8	2.53	2.66	14.2	2.99	3.3	10.1	32	○	
	R9	2.39	3.72	29.3	3.90	9.5	12.4	16	○	
	R10	2.40	3.98	25.0	4.47	13.8	17.0	15	○	
	R11	2.47	3.22	16.5	3.52	3.3	13.6	7	○	

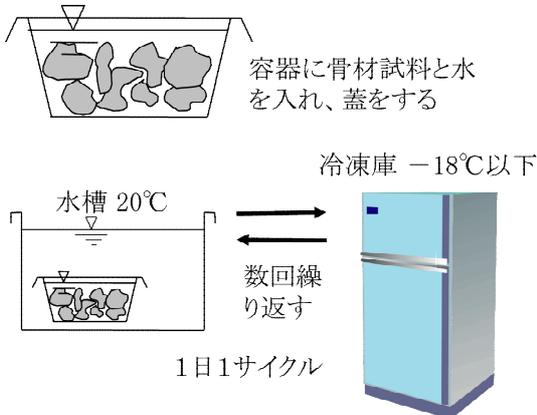


図-1 骨材の簡易凍結融解試験法

用されている。この方法の、天然骨材への適用性について検討を行っている<sup>67)</sup>。

試験概要は図-1に示すように、プラスチック製の容器に粗骨材と水を入れ、これを1日1サイクルで冷凍庫と水槽に交互に入れることで、粗骨材に凍結融解作用を与えるものである。今回の実験では30サイクルまで試験を行った。粗骨材試料は、安定性試験と同様に、25-20,20-15,15-10,10-5mmの粒子を対象に、30サイクル後に各粒子範囲の下限のフルイ目から落ちる質量百分率を求め、25-5mmの粒度分布をもとに粗骨材全体の平均

損失率（以下、簡易法損失率という）を求めた。

この試験法は、粗骨材中の耐凍害性の低い粒子を破壊する点においては安定性試験と同類である。しかしながら、実構造物が受ける凍結融解と同じ、水の凍結融解作用を与える点において安定性試験よりも実態に即した試験法と考えられ、今回の検討では、安定性に替わる評価指標として用いることとした。

## 2.2 コンクリートの凍結融解試験

表-1に示す粗骨材をそれぞれ単独で使用し、細骨材には良質な川砂（密度 2.56g/cm<sup>3</sup>,吸水率 1.60%）を使用し、W/C=55%, s/a=46%, Air=4.5%, W=165kg/m<sup>3</sup>の条件でコンクリートを製造し、JIS A 1148 (A法)の方法（水中凍結、水中融解）に従ってコンクリートの凍結融解試験を行った。ただし、供試体本数は2本ずつとし、試験は300サイクルまで実施し、耐久性指数を求めた。

300サイクルまでの試験を終了した後に、1配合あたり供試体1本を切断し、切断面において、ひび割れが認められる粗骨材の数とモルタル部分のひび割れの発生状況を観察した。また、C2~C10の碎石を用いたコンクリート供試体に関しては、切断面においてひび割れが確認出来なかったことから、残る各1本について凍結融解試験を更に継続し、相対動弾性係数が40%以下となるまで、または900サイクルに達するまで試験を実施した。その供試体も切断して、断面の観察を行った。なお、これらの試験は、一連の実験が終了した後に、追加試験として実施した関係で、その時点で現存する供試体に対してのみの実施となった。対象とした供試体は表-1に示すとおりである。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 骨材の吸水率分布と耐久性指数との関係

JIS A 1110で定められた試験方法によって求めた骨材の吸水率と、それらの粗骨材を用いたコンクリートの耐久性指数との関係を図-2に示す。なお、この図では骨

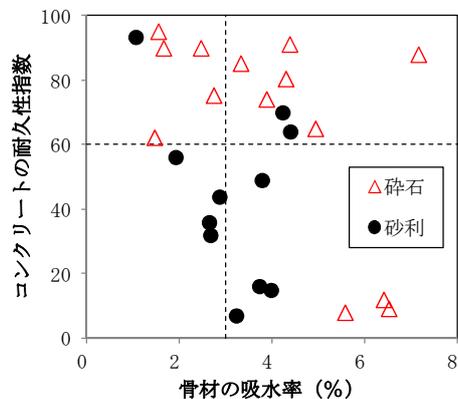


図-2 吸水率と耐久性指数の関係

材の種類を砂利と碎石に分けて示した。

砂利、碎石ともに、吸水率の値が大きくなるほど、それをういたコンクリートの耐久性指数が低くなる傾向が見られたが、必ずしも良い対応とは言い難い。また、砂利と碎石を比較すると、吸水率が同程度であっても、砂利を使用したコンクリートのほうが、碎石を使用したコンクリートよりも、耐久性指数が低くなる傾向が認められた。

この砂利と碎石の違いについて考察する。図-3は粒子毎の吸水率の測定結果から求めた平均吸水率と変動係数の関係である。碎石については、一部で大きな値を示すものもあるが、大半は変動係数が60%以下となった。砂利については、いずれも変動係数が60%以上となり、碎石に比較して変動係数が大きい傾向が確認された。なお、平均吸水率の大きさと変動係数の大きさとの間に、明確な傾向は見られなかった。

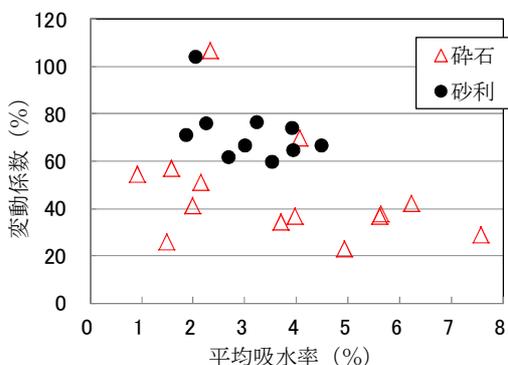


図-3 粗骨材粒子の吸水率の変動係数

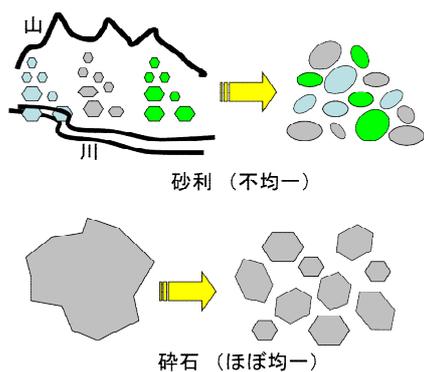


図-4 砂利と碎石の違い

このように、砂利と碎石とで品質のバラツキ(変動係数)に差がある理由としては、砂利と碎石との成因の違いに由来するものと考えられる。図-4に示すように、碎石はある程度均質な岩石を砕いて製造するために、骨材粒子間の品質のバラツキが比較的小さいが、砂利の場合は様々な山岳から砕けた岩石が、長い年月の間に河川を流下して堆積したものであるから、様々な品質の粒子の集合体となっている。すなわち、JIS A 1110によって

同じ吸水率の値を示す碎石と砂利があった場合に、試料を構成する粗骨材粒子1つ1つを捉えると、砂利のほうが品質のバラツキが大きいため、極端に品質の悪い粒子が含まれている可能性が高く、これがコンクリートの耐凍害性に悪影響を与えていることが考えられる。

そこで、粒子毎の吸水率の測定結果から、8%を超える粒子の割合と、コンクリートの耐久性指数との関連を調べた。この結果を図-5に示す。これによると、碎石のC2、C5を除くと、ある程度のバラツキがあるものの、吸水率が8%を超える粒子の割合が多くなるほどコンクリートの耐久性指数が低くなる傾向が認められ、砂利と碎石とが概ね同じ領域にプロットされる結果となった。このことから、吸水率が8%を超えるような低品質粒子の混入が耐凍害性の低下に繋がる有力な一因子であることが推察される。なお、C2、C5が他と傾向が異なった理由の考察については後述する。

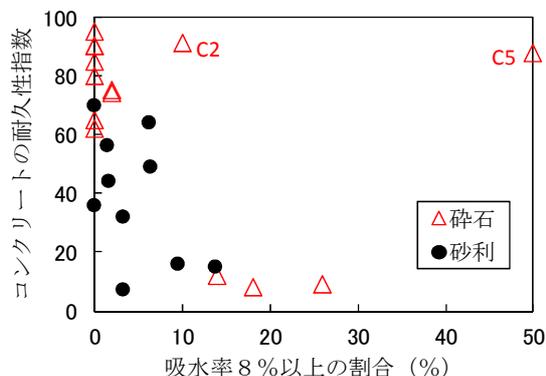


図-5 8%を超える吸水率を示す粗骨材粒子の割合と耐久性指数の関係

### 3.2 簡易法損失率と耐久性指数の関係

粗骨材に対する簡易凍結融解試験法から得られる簡易法損失率と、それらの粗骨材を用いたコンクリートの耐久性指数との関係を図-6に示す。

砂利については、簡易法損失率が大きくなるほど、耐久性指数が小さくなる傾向が認められ、簡易法損失率に

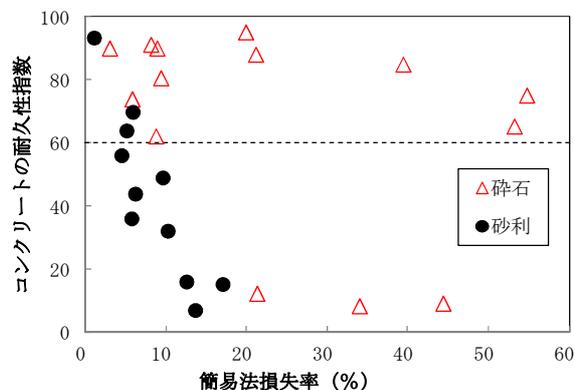


図-6 簡易法損失率と耐久性指数の関係

よる評価が有効であることが伺える。

一方、砕石については、簡易法損失率が20%を超える領域において、砂利と同様に低い耐久性指数を示すものがある一方で、60以上の高い耐久性指数を示すものも認められた。従って、砕石の場合は、簡易法損失率のみの評価では、十分な評価が困難な骨材が存在する結果となった。

### 3.3 吸水率分布と簡易法損失率の双方を組合せた検討

1.で述べたように、粗骨材の耐凍害性は、氷圧の大きさと粗骨材の素材の強度の双方の兼ね合いで求められると考えられる。そこで、氷圧の指標として吸水率が8%を超える粗骨材粒子の割合、強度の指標として簡易法損失率を取り上げ、これらとコンクリートの耐久性指数との関連を調べた。図-7にその結果を示す。横軸に吸水率が8%を超える粗骨材粒子の割合、縦軸に簡易法損失率をとり、耐久性指数（DF）が60以上と60未満の砕石と砂利を異なるマーキングで示した。

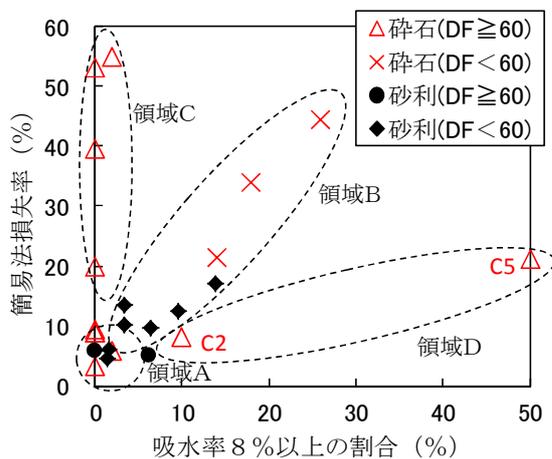


図-7 吸水率が8%を超える粗骨材粒子の割合と簡易法損失率との関係

図-7によると、プロットされたデータはA～Dの4つの領域に分類できた。以下、領域ごとに考察する。

#### (1) 領域A

吸水率8%以上の割合も、簡易法損失率の値も小さく、コンクリートの耐久性指数も高い。良質な粗骨材の領域である。

#### (2) 領域B

吸水率8%以上の割合も、簡易法損失率の値も高く、コンクリートの耐久性指数も低い。耐凍害性の低い骨材の領域である。領域AとBは、骨材の耐凍害性とコンクリートの耐久性指数とがよく対応する領域であり、砂利の全てのデータと砕石の多くのデータがこの領域に属する結果となった。

#### (3) 領域C

簡易法損失率の値が大きいかにも拘わらず、吸水率8%

以上の粗骨材粒子の割合はほとんど0%であり、コンクリートとしての耐久性指数も60以上の比較的高い値を示している領域である。4つの砕石のデータがこの領域に含まれている。この領域の骨材には、節理面等の微細な分離面を有する骨材や、固結度がやや低い骨材が含まれていた。このような骨材では、骨材単体では節理面からの剝離や骨材表面からのスケーリングが生じるが、周辺をペーストで保護されたコンクリート内部の状態では、粗骨材の破壊が抑制されるものと考えられる。

#### (4) 領域D

吸水率8%以上の割合が高いにも拘わらず、簡易法損失率の値が相対的に小さく、コンクリートの耐久性指数も高い領域であり、砕石のC2とC5が属している。これらの骨材については、吸水率が大きい粒子が多く含まれているにも拘わらず、骨材の素材の強度が高く、耐凍害性としては比較的高い範疇の骨材であると考えられる。

上記のように、コンクリートの耐凍害性に悪影響を与える粗骨材は領域Bの骨材のみであった。

砂利は様々の種類の骨材粒子の集合体であることから、領域Cや領域Dに分類されるような粒子のみで構成される確率は低いと考えられる。このため、多くの場合、領域AまたはBに属すると考えられる。すなわち、砂利の評価の場合、領域Bに属する骨材を如何に精度良く把握できるかが重要となる。そのための指標としては、吸水率が8%を超える割合と、簡易法損失率の双方が該当するが、図-5と図-6を比較すると、図-6のほうが耐久性指数との対応関係が良好であり、図-6に示した簡易法損失率のような指標が適していると考えられる。吸水率が8%を超える割合よりも簡易法損失率のほうが耐久性指数との対応が良かった理由としては、簡易法損失率は骨材内の空隙の影響も内包した抵抗性を示しているためと考えられる。

一方、砕石に関しては、産出される場所によっては領域CまたはDの骨材も存在する。領域A、B、Cの砕石の場合、図-5や図-7に示すように、吸水率が8%を超える粒子が含まれていなければ、耐久性指数が良いようであり、このような吸水率の分布に着目した評価方法が適していると考えられる。なお、領域Dの骨材の評価は困難となるが、吸水率の分布で評価した場合、領域Dの骨材は安全側の評価となる。

### 3.4 コンクリート断面観察結果

観察結果を表-2に示す。また、図-7に示す各領域に分けて断面観察結果の特徴を以下に述べる。

#### (1) 領域Aの骨材を用いたコンクリート供試体

300 サイクルでは劣化が確認できず、凍結融解試験

表-2 断面観察結果

骨材の種類	図7の領域	300サイクル			追加試験終了後				
		耐久性指数	ひび割れた粗骨材の数	モルタル中のひび割れ	サイクル数	相対動弾性係数(%)	ひび割れた粗骨材の数	モルタル中のひび割れ	
砕石	A	C3	90	0	無し	900	77	0	無し
		C4	90	0	無し	700	10	0	無し
		C7	80	0	無し	850	34	0	無し
		C9	74	0	無し	650	9	0	無し
	B	C12	12	30	あり				
		C13	9	14	あり				
		C14	8	11	あり				
	C	C10	65	0	無し	500	15	0	無し
		C2	91	0	無し	600	6	0	無し
	D	C5	88	0	無し	700	27	0	無し
砂利		R5	49	6	無し				
	R6	44	2	僅かにあり					
	R8	32	3	僅かにあり					
	R9	16	7	あり					
	R10	15	4	無し					
	R11	7	16	あり					



図-8 砂利R11, 300cycl, 耐久性指数7

を 650～900 サイクルまで継続した。それでも断面内の粗骨材にひび割れは観測出来ず、良質な骨材であることが確認できた。

(2) 領域Bの骨材を用いたコンクリート供試体

砂利、砕石ともに、粗骨材にひび割れが確認され、その周辺のもルタル部分にもひび割れが認められるものが多かった。代表的な断面写真を図-8 (砂利) および図-9 (砕石) に示す。

(3) 領域CおよびDの骨材を用いたコンクリート供試体

吸水率8%を超える粒子が比較的多く含まれていたり、簡易法損失率の値が大きくても、耐久性指数が60以上を示した供試体であり、300 サイクルでは断面においての劣化は確認できなかった。このため、相対動弾性係数が十分に低下するまで凍結融解試験を継続したが、それでも断面内の粗骨材にひび割れは確認できなかった。図-10に領域Cに属する供試体の断面写真を示す。500 サイクルで動弾性係数が15%まで低下した。スケールリングは著しいものであったが、内部の粗骨材やモルタル部分に、ひび割れの発生は確認できなかった。

このように、領域CおよびDに属する骨材の場合には、コンクリート内では粗骨材の劣化が進行しないことを目視によって確認した。

(4) ひび割れた粗骨材数と耐久性指数の関係

図-11は、表-2に示す300サイクル時点での断面観察結果をもとに、ひび割れた粗骨材数と耐久性指数との関係を示したものである。ひび割れた粗骨材数は切断面の限られた情報ではあるものの、ひび割れた粗骨材の数と耐久性指数とは概ね対応しており、粗骨材に発生するひび割れが、コンクリートの劣化に繋がって、コンクリートの動弾性係数が低下するものと考えられる。



図-9 砕石C12, 300cycl, 耐久性指数12



図-10 砕石C10, 500cycl, 相対動弾性係数15%

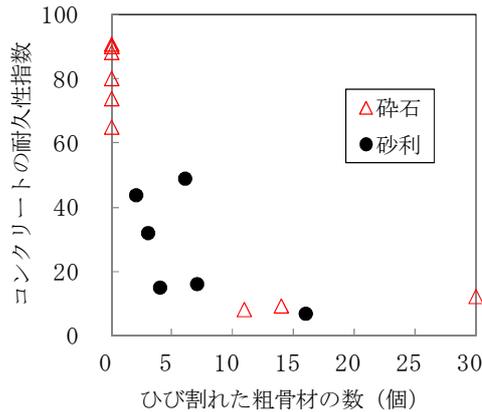


図-11 ひび割れた粗骨材数と耐久性指数の関係

#### 4. まとめ

- (1) 粗骨材の耐凍害性には、粗骨材に作用する氷圧の大きさと、それに抵抗する粗骨材の素材の強度が関連していると考え、氷圧の大きさの指標として粗骨材の吸水率の分布、素材の強度の指標として簡易凍結融解試験法から得られる簡易法損失率を取り上げ、これらの指標とコンクリートの耐久性指数との関連性について検討した。
- (2) 粗骨材の吸水率の分布とコンクリート耐久性指数との関係を調査した結果、吸水率が8%を超えるような低品質粒子の混入が、耐久性指数に影響を与えることが分かった。
- (3) 簡易法損失率とコンクリートの耐久性指数との関連を調査した結果、砂利の場合は良い対応を示した。碎石の場合は、良い対応を示すものもあるが、その一方で、簡易法損失率の値が大きくても耐久性指数が高いものが認められた。
- (4) 吸水率が8%を超える粗骨材の割合と簡易法損失率の2つの指標を併用して、コンクリートの耐久性指数との関連性を検討した。この結果、砂利の評価は簡易法損失率のような指標が適しており、碎石の場合は吸水率の分布に着目した評価指標が適していることを示した。
- (5) 凍結融解試験終了後の供試体の断面観察結果から、骨材単体では劣化しても、コンクリート中では劣化しない粗骨材があることを目視で確認した。また、相対同弾性係数が低下したコンクリートでは、内部の粗骨材にひび割れが発生していることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 片平博, 渡辺博志: 低品質細骨材の有効利用に関する研究, ダム工学, (社)ダム技術センター, No.238, pp.25-33, 200.6
- 2) 小林茂敏, 河田博之, 高橋正志, 高橋弘人, 石井良美: コンクリート用骨材に関する調査報告書(1) -物理的品質不良骨材に関する試験調査-, 土木研究所資料第1838号, 1982.6
- 3) 帷子國成, 藤原忠司: コンクリート用砂利の不均一性について, 第40回土木学会年次学術講演会, pp.7-8, 1985.9
- 4) 帷子國成, 藤原忠司, 関竜一郎: 低品質の川砂利を用いたコンクリートの諸性質, 昭和58年度土木学会東北支部技術研究発表会, pp.298-299, 1984.3
- 5) 片平博, 渡辺博志: 再生骨材の耐凍害性評価手法の研究, コンクリート工学論文集, (社)日本コンクリート工学協会, Vol.21, No.1, pp.25-33, 2010.1
- 6) 片平博, 青山尚, 渡辺博志: 冷凍庫を用いた骨材の簡易凍結融解試験方法に関する基礎的研究, 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報告書(論文集), (社)日本コンクリート工学協会, pp.299-304, 2008.8
- 7) Hiroshi Katahira, Hiroshi Watanabe: Study on Indexes of Aggregate Quality to Evaluate Freeze-thaw Resistance of Concrete Produce, International symposium on Dams for a changing world, International Commission on Large Dams, May.2012