

# 軽量コンクリートの凍害劣化機構 に関する研究

藤木英一<sup>1</sup>・國府勝郎<sup>2</sup>・遠藤裕悦<sup>3</sup>・保坂鐵矢<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本対外工業株式会社技術部 部長 (〒 273-0017 船橋市西浦 3-9-2)

<sup>2</sup>フェロー 工博 東京都立大学大学院工学研究科 教授 (〒 192-0397 八王子市南大沢 1-1)

<sup>3</sup>正会員 八洋コンクリート株式会社 課長 (〒 106-0032 港区六本木 3-16-26)

<sup>4</sup>正会員 日本鉄道建設公団設計室 主任技師 (〒 100-0014 千代田区永田町 2-14-2 山王グランドビル)

本研究は、軽量コンクリートの凍結融解作用の繰返しにともなう劣化の支配要因を明らかにすることを目的として行ったものである。実験に用いた軽量コンクリートは、目標空気量を5%としたAEコンクリートであり、粗骨材には人工軽量粗骨材および細骨材には普通細骨材を用いたものである。この研究においては、人工軽量粗骨材の空隙構造、使用時の粗骨材の含水率、および硬化コンクリート中の軽量粗骨材の含水率と軽量コンクリートの耐凍害性との関係が明らかにされている。

*Key Words* : artificial light-weight aggregate , light-weight concrete, freeze-thaw durability, moisture content

## 1. 緒論

軽量コンクリートを使用すれば、普通コンクリートに比べて約20%の死荷重を低減することができ、橋梁の上部構造ばかりでなく下部構造も経済的に設計することができる。このような軽量コンクリートの特性を生かし、最近では、北陸新幹線第三千曲川橋梁<sup>1)</sup>(長野市, 1997年)や磁気浮上鉄道実験線架道橋(山梨県大月市, 1997年)のコンクリート床版に軽量コンクリートが採用されている。寒冷地に施工された軽量コンクリート構造物、例えば中央高速道路阿智川橋梁(長野県下伊奈郡, 1974年)や札幌内橋(北海道帯広市, 1967年)などは、25年以上経過した今日でも健全に供用されている。

軽量コンクリートを用いた他の構造物でも、凍害による劣化の報告はほとんどないが、軽量コンクリートの耐凍害性を、JSGE G501(コンクリートの凍結融解試験方法)またはASTM C666 A法によって試験すれば、同等の配合条件の普通コンクリートに比べて著しく劣る結果となるのが通常である。このようなことから、軽量コンクリートの耐凍害性をどの様に評価すればよいのか、これまでも多くの検討がなさ

れている。中村ら<sup>2)</sup>は、気中凍結融解や一面凍結融解などの自然条件に近い方法によって軽量コンクリートの耐凍害性を検討し、このような方法や供試体を一時的に乾燥すれば、凍害劣化が軽減されると報告している。また、橋ら<sup>3), 4)</sup>は、低含水状態の軽量骨材を使用すること、軽量コンクリートを乾燥させることなどにより、軽量粗骨材の含水率を5%以下にして使用することが、軽量コンクリートの耐凍害性確保の実用的方法であるとし、北海の石油掘削リグに適用した。

これらの報告や軽量コンクリート構造物の実績によって得られた知見は、軽量コンクリートの耐凍害性が、骨材もしくはコンクリートの含水条件に支配されていることを示唆しているが、凍害劣化を生じる条件などについては不明のことが多い。

本文は、軽量粗骨材の空隙構造、軽量粗骨材粒の飽水度と凍結融解抵抗性との関連、軽量コンクリートの耐凍害性に関する室内試験結果をとりまとめたものである。特に、水中凍結・水中融解方法による凍結融解試験における軽量コンクリートの劣化の支配要因の究明と劣化機構に着目して検討したものである。なお、対象としたコンクリートは、細骨材に

堅硬な川砂を用い、粗骨材に軽量粗骨材を用いた空気量約5%のAEコンクリートである。

## 2. 軽量粗骨材の空隙特性

### (1) 実験概要

わが国で製造されている軽量骨材には、原石である頁岩を破砕し、粒度を調整しただけで焼成して製造するいわゆる破砕型(以下、非造粒型という)と、破砕時に発生する粒径5mm以下の細粒分を造粒して焼成する造粒型の2種類がある。市販の軽量骨材としては、造粒型と非造粒型との混合品(M骨材)と非造粒型だけによる(A骨材)とがある。いずれも頁岩の焼成にともなう膨張により軽量化しているため、骨材の内部に多くの空隙を包含している。

軽量粗骨材の空隙は、製造時のブレスローキング、出荷時や練混ぜ前のプレウエッチング、あるいはコンクリートのポンプ圧送時における加圧吸水などにより吸水し、これが凍結融解作用の繰返しによる劣化の要因と推定される。したがって、軽量粗骨材粒の空隙構造の詳細と吸水特性を明確にするため、骨材粒の空隙量、細孔径分布、空隙の連続性、出荷時の含水状態を検討した。

### (2) 試験方法

#### a) 密度および吸水率

軽量粗骨材の密度および吸水率は、JIS A 1135によって、24時間吸水状態を基本として試験した。なお、軽量粗骨材マトリックスの密度は、絶乾状態の軽量粗骨材を乳鉢によって微粉砕し、JIS R 5201に規定されているセメントの密度試験方法としての置換方法に準じて測定した。

#### b) 細孔径分布

軽量粗骨材の空隙の分布を明らかにするため、水銀圧入式ポロシメータによって細孔径分布を測定した。試料は粗骨材粒を5mm程度に破砕し、水銀の圧力約6.5kPa～200MPaの範囲で、細孔直径約0.2mm～7.5nmを対象として測定した。

#### c) 圧力吸水試験

軽量粗骨材粒中の空隙の吸水性状を把握するため、圧力吸水試験を行った。圧力吸水試験は、直径95mm、高さ220mm、容積1.56lの鋼製容器に絶乾状態の試料約200gを入れ、水で満たして密閉したものを秤量器の上に置き、手動ポンプにより水圧を加え、所定の圧力で安定した秤量の増分から、その圧力における含水率を求めた。各圧力で質量変化が安定するまでに加圧操作を含め約5分を要した。なお、質量変化

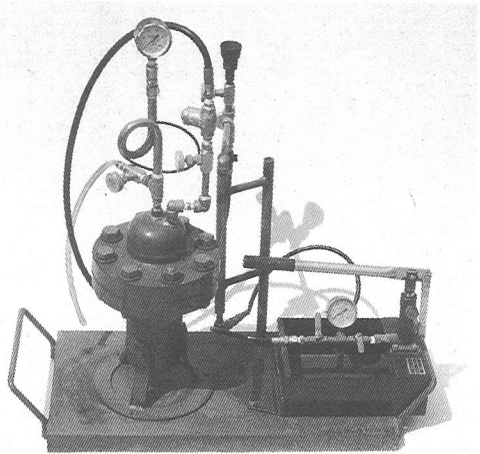


図-1 圧力吸水試験装置

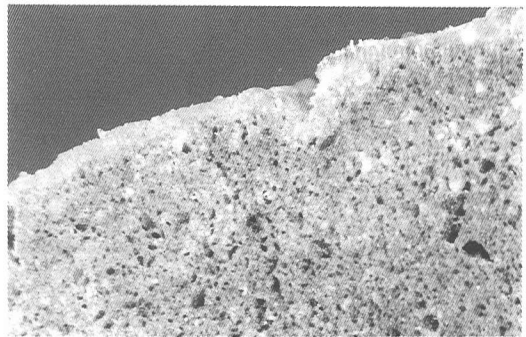


図-2 軽量粗骨材の断面

の実測値は、容器に水だけを満たした時の各圧力における質量増分を、容器の膨張量として補正した。

図-1に使用した装置を示す。

#### d) 出荷時の含水状態

この研究に用いた市販の軽量粗骨材Mは、非造粒型と造粒型とが1対1の割合で混合されたものである。この骨材の製造10ロットから採取した試料の密度および含水状態を測定した。また、同じ骨材から粒径10～15mmの非造粒型および造粒型それぞれ10粒ずつの計100粒について、一粒ごとに密度および含水率を測定した。

### (3) 結果および考察

#### a) 軽量粗骨材粒の空隙量

軽量粗骨材の断面の拡大写真(図-2)から、空隙は大小の気孔やそれらを結ぶ毛細管が集合していることが観察される。

軽量粗骨材の空隙率を粗骨材粒の見かけの容積に対する空隙容積の割合と定義すると、空隙率は式(1)によって計算される。また、絶乾状態の軽量粗骨材

表-1 軽量粗骨材の細孔径分布試験結果

項目		細孔容積 (ml/g)	容積基準	
			容積50%径 ( $\mu\text{m}$ )	最頻径 ( $\mu\text{m}$ )
造粒型	PM1	0.2977	0.4467	0.1837
	PM2	0.2720	0.3921	0.3836
	PM3	0.3064	0.6066	0.2298
	平均	0.2920	0.4818	0.2657
非造粒型	NM1	0.2499	1.0485	1.5964
	NM2	0.3453	1.3091	1.6534
	NM3	0.3077	1.5800	1.7484
	平均	0.3010	1.3125	1.6661

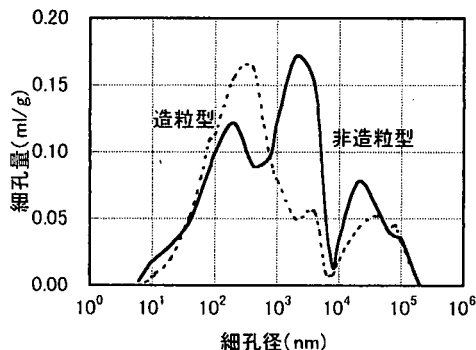


図-3 軽量粗骨材のタイプによる細孔径分布の比較

の単位質量当たりの空隙容積，すなわち単位空隙容積は式(2)により計算される。

$$v = [(\rho - \rho_0) / \rho] \times 100 \quad (1)$$

$$V_v = 1 / \rho_0 - 1 / \rho \quad (2)$$

ここに， $v$ ：骨材粒の空隙率(%),  $\rho_0$ ：骨材粒の絶対乾密度(g/ml),  $\rho$ ：骨材マトリックスの密度(g/ml),

$V_v$ ：単位空隙容積(ml/g)

粗骨材マトリックスの密度は，置換法により 2.42 g/ml を得た。軽量粗骨材の絶対乾密度は 1.25 ~ 1.30 g/ml 程度であるから，軽量粗骨材粒の空隙率は 46 ~ 48% 程度，単位空隙容積は約 0.35 ~ 0.39ml/g 程度である。

#### b) 製造方式による空隙構造の相違

細孔径分布の試験結果の一覧を表-1に，造粒型および非造粒型軽量粗骨材の代表的な細孔径分布を図-3に比較して示す。造粒型および非造粒型軽量粗骨材の全細孔容積は，それぞれ平均 0.29 および 0.30ml/g であり，大きな相違は認められない。なお，絶対乾密度 1.29g/mlの軽量粗骨材の単位空隙容積は，式(2)から 0.362ml/g となり，全細孔容積の実測値約 0.30ml/g より大きな値となっている。これは水銀圧入式ポロシメータによる細孔径の測定の上限が0.2mmであり，実際にはこれを超える径の空隙が存在するためであ

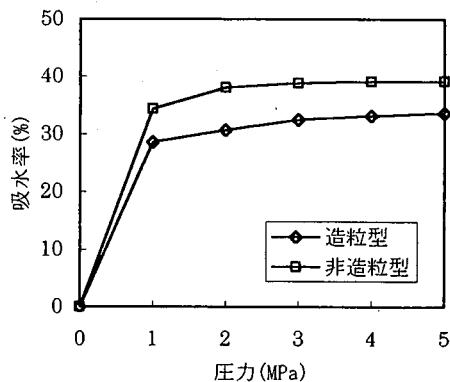


図-4 圧力吸水性状

表-2 圧力吸水試験に用いた軽量粗骨材の空隙特性 (粒径 10 ~ 15mm)

	絶対乾密度 g/ml	空隙容積 ml/g	最大吸水率 %	連続空隙の割合
非造粒型	1.242	0.396	39.2	0.99
造粒型	1.236	0.392	33.7	0.86

る。

骨材粒中に存在する空隙の大きさは，図-3に示す代表的な試料の細孔径分布からわかるように，非造粒型の方が造粒型より大きい傾向を示している。細孔径の特徴を容積 50% 径 および最頻径で示すと，造粒型がそれぞれ 0.48 および 0.27  $\mu\text{m}$  であるのに対し，非造粒型はそれぞれ 1.31 および 1.67  $\mu\text{m}$  となっている。

M 骨材の粒径 10mm ~ 15mm の造粒型および非造粒型軽量粗骨材の圧力吸水性状を図-4に示す。いずれの骨材でも，圧力が 3MPa 程度以上では質量増加がほとんどないことから，絶対乾状態の軽量粗骨材の質量に対する 5MPa における吸水の割合を最大吸水率とした。非造粒型軽量粗骨材の最大吸水率は 39.2%，造粒型は 33.7% であった。

試験に用いた軽量粗骨材の単位空隙容積は表-2に示すとおりであり，水の密度を 1g/ml とし，空隙の全てが圧力吸水によって飽水すると仮定すれば，最大吸水率は単位空隙量から推定されるものと同等の値とならなければならない。表-2から明らかなように，非造粒型軽量粗骨材では同等の値を示している。これに対し，造粒型骨材の最大吸水率は，単位空隙容積から推定される吸水率よりも小さな値となっている。

これは，造粒型軽量粗骨材粒中の空隙には，圧力吸水によって飽和されないものが存在していることを

表-3 造粒型粗骨材Mの連続空隙の割合

粒径範囲 mm	絶乾密度 g/ml	単位空隙容積 ml/g	最大吸水率 %	連続空隙の割合
10~20	1.29	0.362	29.9	0.826
5~10	1.32	0.348	32.7	0.941
平均	1.30	0.355	31.3	0.884

表-4 軽量粗骨材市販品の物性

項目		絶乾密度 g/ml	空隙率 %	含水率 %	飽和度 %
区分	平均	1.30	46.3	24.7	73.9
	標準偏差	0.05	2.0	1.8	1.3
ロット別	平均	1.21	43.1	27.1	72.3
	標準偏差	0.14	5.1	9.5	18.5
10~15mm 粒別	平均	1.32	45.4	25.3	69.1
	標準偏差	0.22	8.9	10.8	12.7

示している。すなわち、非造粒型軽量粗骨材の空隙は、ほぼ全てが飽和することのできる連続空隙であるのに対し、造粒型粗骨材では約 14% の独立空隙が存在することがわかる。

c) 空隙の飽和度

凍害劣化の原因と考えられる軽量粗骨材の含水状態を定量的に扱うため、外部から水が浸入できる連続空隙の量に対する含水量の割合を、式(3)によって飽和度と定義する。

$$f = [q / (\alpha v)] \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $f$  : 連続空隙の飽和度(%),  $q$  : 骨材の含水率(%),  $\alpha$  : 空隙中の連続空隙の割合

軽量粗骨材 M の 吸水性状を明確にするため、この中から造粒型骨材を選別し、粒径 5 ~ 10mm および 10 ~ 20mm に分け、それぞれについて圧力吸水試験を行った。表-3に示す試験結果から、コンクリート用粗骨材として粒度を整えた造粒型粗骨材の空隙に占める連続空隙の割合は 88% であることがわかる。

後述の凍結融解試験に関する検討においては、使用する軽量粗骨材の飽和度の算出は、非造粒型粗骨材はその空隙の全てが連続空隙とし、造粒型粗骨材はその空隙の 88% が連続空隙であるとし、それぞれの混合割合に基づいて加重平均することによって軽量粗骨材の飽和度とした。

d) 軽量粗骨材の出荷時の含水性状

市販の M 骨材の出荷時の10ロットから採取した試料、同じ骨材から粒径10~15mm の非造粒型および造粒型それぞれ 10 粒ずつの計 100 粒の一粒ごとの空隙特性と含水状態の測定結果を表-4に示す。これらの結果から、市販品としての軽量粗骨材のロ

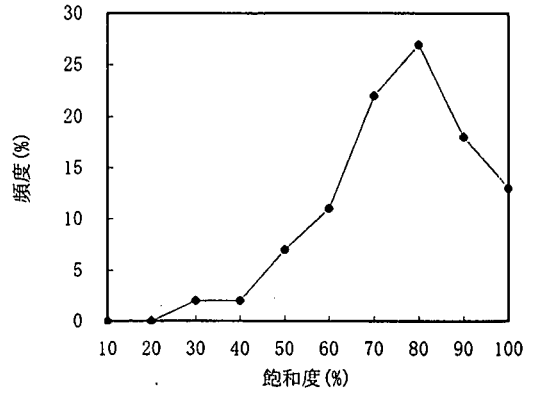


図-5 出荷時の軽量粗骨材の飽和度の分布

ットごとの平均的な特性値のバラツキは比較的小さいが、当然のことながら、骨材一粒ごとの密度(空隙率)や含水率(飽和度)は、大きく変動していることが明らかにされた。

出荷時の軽量粗骨材の粒径 10 ~ 15mm のものについて、一粒ごとの飽和度の分布を図-5に示す。軽量粗骨材全体としての飽和度は約 70% であるが、粗骨材一粒ごとに着目すると飽和度が 90% を超えるものから 20% 程度のものまで存在し、一様な含水状態にはないことが明らかとなった。

3. 軽量粗骨材の耐凍害性

(1) 実験概要

軽量コンクリートの耐凍害性を検討する上で、軽量粗骨材自体の耐凍害性を把握しておく必要がある。前節で明らかにしたように、軽量粗骨材の空隙特性は、一粒ごとには大きな変動がある。したがって、ここでは空隙特性を限定した軽量粗骨材について、使用時の含水率の水準を変え、十分な耐凍害性が確認されたモルタルに所定量を練り混ぜたモデルコンクリート供試体によって、凍害劣化の性状を試験した。試験は試料の飽水度の変化に着目し、打込みから試験終了まで、所定の間隔で質量の変化を測定した。また、凍結融解試験中の試料の吸水による影響を検討するため、試料の打込み面を除く5面を非透水性の塗料でシールした供試体の試験も行うこととした。

(2) 供試体の作製方法

粒径 10 ~ 15mm の造粒型および非造粒型軽量粗骨材を絶乾状態にし、密度 1.22 および 1.33g/ml の二種類の液体を用い、この範囲の密度を有する骨材を浮

表-5 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	密度	3.16g/ml
細骨材	大井川水系陸砂	表乾密度	2.58g/ml
	絶乾密度	2.53g/ml	吸水率 2.02%
粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石	表乾密度	2.64g/ml
	絶乾密度	2.62g/ml	吸水率 0.80%
混和剤	AC減水剤 (リグニンスルホン酸系)		
	流動化剤 (マリスルホン酸系)		
	空気調整剤		

表-6 コンクリートの配合

目標スランプ cm	目標空気量 %	水セメント比 %	単位量 1/m <sup>3</sup>			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
12 → 18	5.0	48	172	113	307	353

粒選別して試験用材料とした。選別時に付着した液体は大量の水で洗い流し、ほぼ同一の空隙特性を有する軽量粗骨材について、含水率が約 10, 20 および 30% の 3 水準となるよう調整した。

まず、青梅産硬質砂岩砕石を使用したコンクリートを容量 100 l のパン型ミキサで練り混ぜ、これから呼び寸法 5mm のふるいによるウエットスクリーニングモルタルを採取し、モルタルの空気量を確認した。供試体(100 × 100 × 100mm) 一体ごとに所定の含水率に調整済みの軽量粗骨材およびモルタルの所定量を秤り取り、手練りで混合して型枠に詰めて成形した。供試体は打込みの翌日に脱型し、材齢 2 週まで水中養生を行った。

試験に使用した材料を表-5に、想定したコンクリートの配合を表-6に示す。

(3) 凍結融解試験方法

供試体は、5 面シール供試体とシールなしの供試体の 2 種類を用意した。シールした供試体は、凍結融解試験中の供試体の吸水を抑制するためであり、試験開始直前に供試体の 5 面をエポキシ樹脂で厚さ 1mm 塗布した。供試体は打込み時、脱型時、凍結融解試験開始直前および凍結融解試験中の 30 サイクルごとに質量を測定した。

凍結融解試験は JSCE G501に準じ、供試体が立方体であるため縦振動による動弾性係数を測定した。温度管理用の供試体は、試験体を代表する配合のコンクリート供試体を 2 週水中養生して使用した。

表-7 軽量粗骨材の凍結融解試験結果

粗骨材の区分 (絶乾密度)	使用時含水率 (飽和度) %	凍結開始前の飽和度 %		耐久性指数 %	
		全面曝露	5面シール	全面曝露	5面シール
基準モルタル	—	—	—	105	106
造粒 (1.26)	8.7 (27)	36	30	75	75
		37	38	74	102
	20.5 (63)	51	75	59	100
		66	70	70	97
	27.1 (83)	98	93	17	41
		94	92	12	50
非造粒 (1.25)	8.7 + α (27)	40	30	75	102
		37	34	70	101
	11.1 (29)	32	38	75	97
		37	35	70	100
	24.0 (62)	75	68	52	96
		73	70	69	98
(1.25)	31.2 (81)	94	93	13	36
		91	94	12	31
	11.1 + α (29)	42	39	15	100
	40	36	67	101	

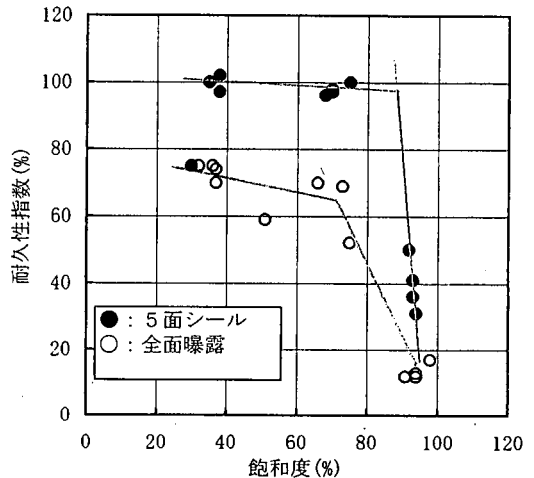


図-6 軽量粗骨材の飽和度と耐久性指数との関係

(4) 結果および考察

a) 骨材の飽和度および吸水の有無の影響

モデルコンクリート供試体の凍結融解試験結果を表-7および図-6に示す。これらの結果は、養生中の吸水も軽量骨材が吸水したものととして、凍結融解試験開始直前の軽量骨材の飽和度を式(3)に基づいて計算し、この値によって整理されている。

川砂を使用した基準モルタルは、劣化をほとんど示していないが、これに軽量粗骨材を混入したモデルコンクリートは、軽量粗骨材の飽和度に応じて耐

久性指数が低下していることがわかる。また、5面シールにより試験中の供試体の吸水を制限した場合には、粗骨材の飽和度が同じシールなしの供試体よりも高い耐久性指数を示すとともに、飽和度90%程度まではほとんど耐久性指数の低下が認められず、飽和度が90%を境にして顕著な低下を示した。一方、シールなしの供試体では、粗骨材の飽和度が70%程度を超えると、急激に劣化の傾向を示した。

これらの結果は、凍結融解試験開始時の軽量粗骨材の連続空隙に関する飽和度および試験中の供試体の吸水にともなう飽和度の増大が、軽量コンクリートの耐凍害性を支配する重要な因子であることを示唆している。横山<sup>9)</sup>は、凍結融解作用による劣化性状を、コンクリートの連行空気量と軽量骨材の空隙量との和に対する自由水量の比を空隙飽和率として整理している。また、橘<sup>9)</sup>も自由水量から求めた飽水度と耐久性指数との間に高い相関が得られたと報告している。このように、それぞれの研究における飽和度の定義は異なるが、軽量粗骨材の連続空隙中の水分として、凍結融解試験中の供試体の吸水量の影響も大きいことが示された。

また、シールした供試体が、軽量粗骨材中の連続空隙の飽和度が90%を超えると急激な劣化を示したことは、水の液相から固相への体積変化を考慮すると合理的な結果と思われる。Fagerlund<sup>7)</sup>は普通コンクリートの凍結融解抵抗性に関する検討において、温度105℃で蒸発するコンクリート中のキャピラリー水を測定し、このキャピラリーの飽和度と凍結融解抵抗性とを関連付け、凍害劣化が顕著となる限界飽和度は90%であるとしていることと整合性がある。なお、シールの有無による試料の顕著な劣化が始まる飽和度の差は約20%であり、これを粗骨材の吸水率に換算すると7.2%に相当する。

軽量コンクリートは凍結融解試験までの2週間の水中養生によって、モルタルマトリックスは十分に飽水し、マトリックス中の空隙は飽和状態であると仮定すると、マトリックス中の水の凍結による容積の増分（以下これを凍結余剰水という）は、軽量粗骨材中の未飽和の空隙以外には存在する空間がない。また、Hammer<sup>8)</sup>らは軽量コンクリートの凍害劣化について、凍結融解のサイクルによるポンピング作用によって、軽量骨材の空隙に水分が送り込まれ、軽量粗骨材の飽和度が90%程度になると破壊すると説明している。これらの影響を考慮すると、供試体の試験中の吸水も含めて、軽量粗骨材中の連続空隙の飽和度を考慮する必要があると考えられる。

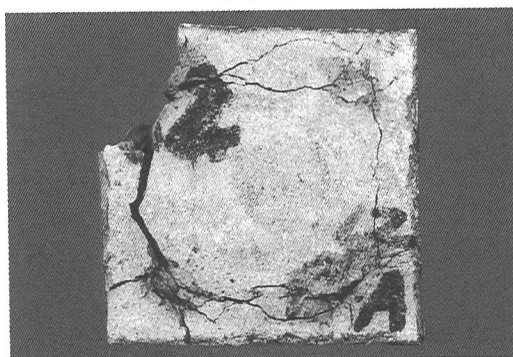


図-7 モデルコンクリート供試体の劣化

## b) 高飽和度の粗骨材の一部混入の影響

2. (3) d)において、軽量粗骨材の中には含水率の著しく大きなものも含まれていることを示した。このような骨材が一部に含まれている場合の凍害劣化に及ぼす影響を検討した。表-7において $+ \alpha$ と表示したものは、使用時の飽和度が27%の耐凍害性の高い軽量粗骨材の質量の5%を、使用時の飽和度が80%以上の耐凍害性が低いと考えられる軽量粗骨材で置換したことを示している。試験結果は、4ケース中の1ケースで極端に低い耐久性指数のものが現れた。この劣化した供試体の外観を図-7に示す。

この結果は、たとえ少量でも粗骨材の飽和度が高いものが混入すると、凍結融解抵抗性が著しく損なわれることがあることを示している。また、このことは軽量粗骨材中の水分の凍結余剰水が拡散する際の抵抗が、同一配合のセメントマトリックスでも、試料によって異なる可能性も示しているものと思われる。

田村<sup>9)</sup>らは軽量粗骨材の含水率を5水準に変え、それを密閉容器に入れ、あるいは不透水性の樹脂で固めて凍結時の体積膨張の測定を行った結果、含水率17%以上で、含水率に比例して劣化が激しくなると報告している。図-3に示した軽量粗骨材の細孔径分布試験結果から、凍結融解試験の最低温度-18℃においては、ほとんど全ての空隙中の水分は凍結すると考えられる<sup>10), 11)</sup>。一般に凍結融解試験における試料の温度低下は表面から開始されるため、凍結は表層から起こると考えられる。このような凍結現象においては、密閉空隙中の水分の飽和度が約90%以上となると、凍結余剰水が骨材粒子の外に押し出されるように移動すると考えられる。骨材表層部が凍結したり、周囲のセメントペーストが密実で水の移動ができず大きな圧力が生ずれば、骨材は破壊する

表-8 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	密度	3.16g/ml
細骨材	大井川水系陸砂	表乾密度	2.58g/ml
		絶乾密度	2.53g/ml
		吸水率	2.0%
粗骨材	人工軽量骨材	表乾密度	1.66g/ml
		絶乾密度	1.30g/ml
		吸水率	28.0%
混和剤	AE減水剤(リグニンスルホン系) 流動化剤(マリスルホン系) 空気調整剤		

表-9 コンクリートの配合

目標 スランブ cm	目標 空気量 %	水セメント 比 %	単位量 kg/m <sup>3</sup>			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
12 → 18	5.0	35	170	486	690	452
		48	172	358	777	459
		55	170	309	823	458

※骨材は全て絶乾質量を示す。

と考えられる。田村の研究における軽量粗骨材の含水率 17%の飽和度は約 50%に相当する。このような低い飽和度では、上述のような現象は起こりにくいと考えられるが、2. (3) d)で述べた一粒毎の軽量粗骨材の飽和度のバラツキを考慮すれば、一部の高い飽和度の骨材の混入は、凍害劣化を生じやすくするものと考えられる。

#### 4. 軽量コンクリートの耐凍害性

##### (1) 実験の概要

軽量コンクリートの凍結融解試験は、粗骨材として軽量粗骨材を、細骨材として川砂を用いたコンクリートで、空気量を 5.0%とし、スランブ 18cm の流動化コンクリートを基本とした。

軽量コンクリートの凍害劣化機構を検討する目的から、練混ぜ時の軽量粗骨材の含水率、水中養生およびその後の気中養生による凍結融解試験直前のコンクリートの含水率、水セメント比などの影響を検討した。

##### (2) 使用材料およびコンクリートの配合

実験に使用した材料を表-8に示す。軽量粗骨材の使用時の含水率は、全般にわたって目標値28%(実測値 27.7%)としたが、一部に目標値 8%(8.5%) および 15%(15.4%)として試験したものがあつた。含水率 28%の軽量粗骨材は、市販骨材の製造工程で製造されたものであるが、異なる含水率の試料は、軽量粗骨材を乾燥させて絶乾状態とした後、改めて吸水させることによって調整した。

コンクリートの配合は、表-9に示すとおりであつた。

表-10 実験に使用したコンクリートの性質

スランブ cm	空気量 %	水セメント 比 %	温度 ℃	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	気泡間隔係 数 μm
18.0	5.8	48	13.0	41.8	276 ~ 285

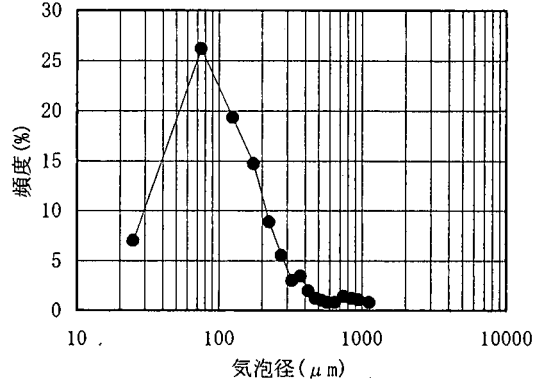


図-8 硬化コンクリートの気泡分布

て、コンクリートポンプによる運搬を考慮し、スランブ 12cm のベースコンクリートをスランブ 18cm に流動化した。

練混ぜは容量 100 l のパン型ミキサーを用いて行い、細骨材とセメントを加えて 10s、水と混和剤を加えて 30s、粗骨材を加えて 90s 間練混ぜ、スランブを確認してから流動化剤を加えて 30s 間練混ぜた。

表-10にフレッシュコンクリートの物性と硬化コンクリートの圧縮強度を示す。また、図-8に ASTM C 457 による硬化したコンクリートの気泡分布測定の結果を示す。標準養生を行った円柱供試体の材齢 28 日の強度は、水セメント比 35, 48 および 55%でそれぞれ 51, 42 および 37N/mm<sup>2</sup>であった。空気量は 5.5 ~ 7.5%(目標値 5.0%)が得られ、気泡間隔係数は約 280 μm であつた。これらのコンクリートのモルタル部分は普通細骨材であり、このような条件が得られていれば、一般的に良好な耐凍害性を備えているものと考えられる。

##### (3) 供試体の作製および試験方法

コンクリートは、JIS A 1132 に従って練り混ぜ、JIS A 1138 に従って寸法 100 × 100 × 400 mm の角柱供試体を作製した。供試体は成形後翌日に脱型し、その後の養生は標準水中養生と、温度 20 °C 湿度 60% の恒温恒湿室に保管する気中養生の 2 方法を、表-11 に示すように目的に従って組み合わせた。なお、水



表-11 凍結融解試験条件の組合せ

実験 シリーズ	W/C %	養生期間※	
		標準養生	気中養生
I	48	2週	—
		4週	—
		8週	—
II	48	2週	1週
		2週	2週
		2週	4週
		2週	8週
		1週	2週
		1週	3週
	35	1週	5週
		1週	9週
		2週	2週
	55	2週	2週
		2週	4週
		2週	6週

※標準養生：温度20℃、水中  
気中養生：温度20℃、湿度60%

セメント比 48%の試料では、気中乾燥後 3 日間の水中養生によって再吸水させた供試体も作製した。供試体は脱型時および気中養生中の 1 週ごとに凍結融解試験直前まで、供試体の質量を測定した。そして、養生期間中の質量変化は、3. (4) a) に述べたことから、全て粗骨材の含水率の変化に集約されるものと仮定し、凍結融解試験中の吸水も考慮してコンクリート中の軽量粗骨材の飽和度を求めた。

凍結融解試験は、供試体の養生条件と試験材齢以外は JSCE G501 によって行い、30 サイクルごとに供試体のたわみ振動による共鳴振動数および質量を測定した。

#### (4) 結果および考察

##### a) 試験材齢の影響

使用時含水率 28%の軽量粗骨材を用いた水セメント比 48%のコンクリートを、水中で 2, 4 および 8 週間養生した後の凍結融解試験結果を表-12に示す。これらの軽量コンクリートの耐久性指数は、いずれも約 10%程度であった。この結果から、試験開始材齢を長くしてコンクリート強度を高めても、軽量コンクリートの耐久性指数を高めることはできないことがわかった。

##### b) 粗骨材の使用時含水率の影響

軽量粗骨材の使用時含水率を 8 ~ 28%までの範囲で 3 水準変化させた水セメント比 48%の軽量コンクリートの凍結融解試験結果を表-13 に示す。材齢 2 週で試験を開始した供試体の耐久性指数は、骨材の

表-12 試験材齢の異なるコンクリートの試験結果

水セメント比 %	養生条件	飽和度 %	終了した サイクル 数	耐久性 指数 %
48	水中 2 週	98	60	12
	水中 4 週	100	60	11
	水中 8 週	101	60	7

表-13 含水率の異なる軽量粗骨材を用いた  
コンクリートの試験結果

粗骨材 含水率 %	養生条件		飽和度 %	耐久性 指数 %
	水中 週	気中 週		
8	2	0	31	93
15	2	0	54	78
28	2	0	97	9
8	2	2	4	104
15	2	2	19	106
28	2	2	40	49

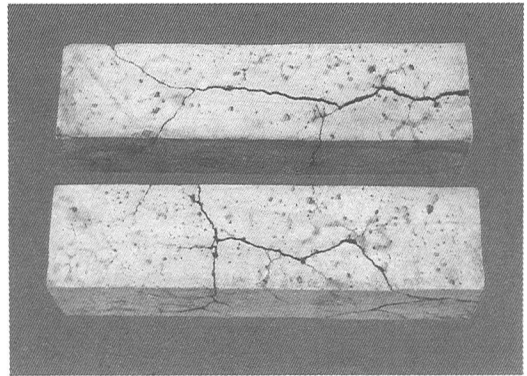


図-9 凍結融解試験後の供試体のひび割れ

含水率 8, 15 および 28%でそれぞれ 93, 78 および 9%であった。使用時の軽量粗骨材の含水率を小さくすれば、既往の研究<sup>9)</sup>と同様に耐久性指数の低下を抑制できることが示されている。また、材齢 2 週まで水中養生の後、2 週間気中養生した供試体の耐久性指数は、含水率の順にそれぞれ 104, 106 および 49%となっており、気乾養生中の水分の逸散が耐久性指数の改善に顕著な効果を及ぼすことが示されている。そして、含水率 8 および 15%の軽量粗骨材を用いたコンクリートでは、凍結融解による劣化はほとんど認められていない。このことは、a) に示した水中養生期間を延ばした供試体の耐久性指数がほとんど向上しなかったことに比較し、顕著な変化である。

##### c) 凍害劣化の性状

凍結融解試験による供試体の劣化状況は、いずれの供試体もスケーリングやポップアウトは全くみられないが、図-9に示すような幅の大きなひび割れが縦横に生じ、突然に試験を終了するものが多く見ら



表-14 凍結融解試験後の供試体のコア強度

試験前の養生	耐久性指数 %	凍結融解試験後の供試体 圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>					
		試験値					平均
水中2w +	43	21.6	31.1				22.5
	43	19.7					
	気中2w	31	19.9	20.4			
水中2w +	101	17.5	21.7	24.4			22.0
	93	19.3	27.1	22.5	26.6	26.5	
	気中4w	102	16.1	21.8	19.0		
水中2w +	104	23.0	27.0	26.4			26.3
	104	19.3	27.9	27.3			
	気中8w	102	30.1	28.5	27.1		

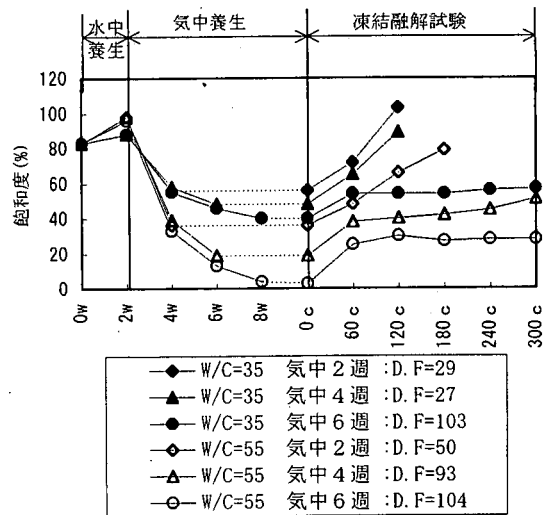


図-10 養生中および凍結融解試験中の飽和度の変化

れた。

ひび割れを生じた供試体断面には、軽量粗骨材粒の一部に崩壊の著しいものが認められることが多く、一部の軽量粗骨材粒がひび割れ発生の発端となっていることが推察された。すなわち、一部の飽和度の高い軽量粗骨材の空隙中の水分が凍結する際に、3. (4) b) で考察したような理由により、軽量粗骨材粒が破壊され、モルタル部分に初期のひび割れを生じさせ、その後の凍結融解の繰り返しによって試験環境水が浸入することによって、局所的にひび割れ幅を拡大して破壊に至ったものと推察される。

軽量コンクリートの凍結融解の繰り返しにともなう劣化性状を詳細に検討するため、縦横に幅の大きなひび割れが発生した供試体の健全な部分および劣化が認められない供試体とからφ50×100mmのコアを採取し、水中養生を2日間行った後、圧縮強度を測定した。これらの試験結果を表-14に示す。供試体は使用時含水率28%、水セメント比55%の配合で、材齢2週まで水中養生の後、気中養生2、4および8週の供試体を用いた。

耐久性指数が約40%の気乾養生2週の供試体からのコアの強度は22.5 N/mm<sup>2</sup>であるのに対し、ほとんど劣化を示していない気乾養生4および8週の供試体の値は約22および26 N/mm<sup>2</sup>であった。このように凍結融解の繰り返しによって顕著なひび割れを生じた供試体であっても、マトリックス部分の微細ひび割れは発達しておらず、軽量粗骨材粒の局所的な破壊が凍結融解抵抗性を低下させているものと考えられる。3. (4) に示した試験結果と合わせて考えると、軽量コンクリートの室内試験による凍結融解抵抗性は、一部の飽和度の高い軽量粗骨材粒の破損に支配されており、空気連行性状の良好なAEコンクリート

とただけでは向上させることができないことを意味している。

#### d) 水セメント比の影響

水セメント比55および35%で、水中養生2週後、気中養生を2、4および6週とした軽量コンクリート供試体について、凍結融解試験中の吸水は軽量粗骨材の含水量の増大に帰すると仮定して求めた飽和度の変化を図-10に示す。水セメント比が小さいほどマトリックスが緻密となっているため、気乾養生中の水分の逸散が少なく、気乾養生による軽量粗骨材の飽和度の低下が小さくなっている。

耐久性指数が低下した試料について比較すると、水セメント比が55%の供試体に比べ、35%の場合は凍結融解試験中の飽和度の上昇が著しい。これはひび割れが供試体全体に数多く発生したため、そこから骨材が吸水したことによる質量増加が現れたものと考えられる。水セメント比が低いマトリックス中では、水分の移動に対する抵抗が大きいため、骨材中の水分の凍結にともなう膨張圧力の上昇が大きくなり、軽量粗骨材やモルタル部分の破壊が激しくなるものと考えられる。

耐久性指数と水セメント比の関係は、水セメント比が低下することによるコンクリート強度の増大による耐凍害性の向上の効果よりも、セメントペーストの緻密化による乾燥の遅れから、同一の乾燥期間では相対的に耐久性指数が低下するという結果となった。

#### e) 軽量粗骨材の飽和度の影響

前項において、軽量コンクリートの凍結融解の繰

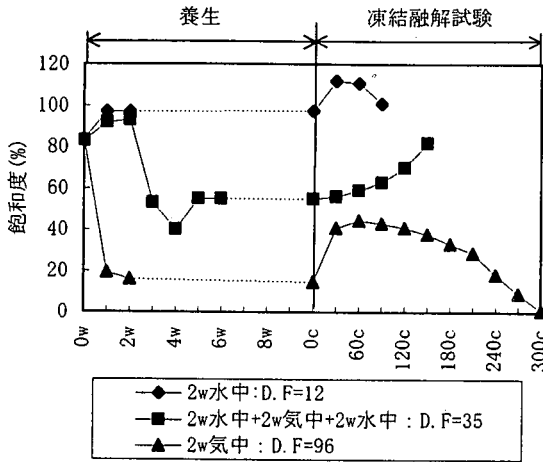


図-11 養生中および凍結融解試験中の飽和度の変化

返しによる劣化は、一部の含水率の高い軽量粗骨材粒に起因する可能性を示した。また、b)において軽量粗骨材の使用時含水率が小さければ、十分な抵抗性を示すことを述べた。

そこで、軽量コンクリートの耐久性指数に対する凍結融解試験前の飽和度の影響、すなわち軽量粗骨材の使用時含水率および試験前の供試体の乾燥にもなう骨材の飽和度の変化の影響を検討した。

本研究における凍結融解試験は、水中凍結・水中融解方法であるため、前述のポンピング作用などにより、供試体の質量が増加する傾向にある。凍結融解試験前の養生を水中2週としたもの、気中2週としたもの、および気中2週後水中2週として再吸水させたものについて、試験中の吸水を軽量粗骨材中の連続空隙の飽和度の変化として整理したものが図-11である。気中養生後試験を行ったものは、凍結融解の繰返し初期に吸水により飽和度が増加している。これは、試験前の養生時に再吸水させたものと状況が似ている。また、水中養生により飽和度が100%程度のものであっても、試験中にさらに増加する傾向が認められる。これは試料に発生したひび割れの吸水の他、軽量粗骨材中の独立空隙と考えられるものの一部が、水分の凍結によって破壊されている可能性を示している。そして、すでに考察したように、凍結融解試験中のポンピング作用による飽和度の増大は、凍結時の軽量粗骨材の負荷を大きくし、試験結果に大きな影響を及ぼしていることが考えられる。したがって、凍結融解試験30サイクル時の飽和度と耐久性指数との関係を整理し、図-12に示した。30サイクルにおける飽和度としたのは、凍結融解の初

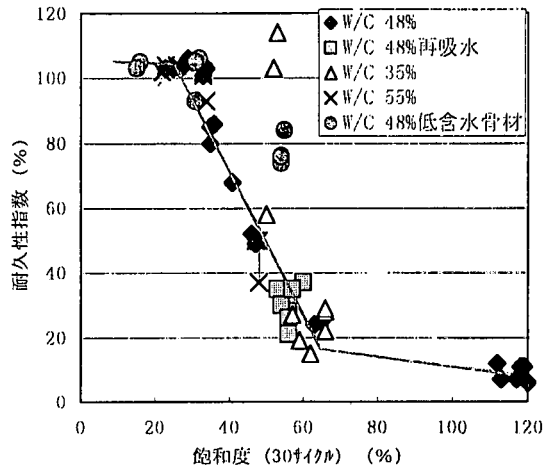


図-12 試験開始時の飽和度と耐久性指数との関係

期における吸水による供試体質量の増大が大きいため、サイクル数が大きくなると供試体の損傷による質量の低下が起きることもあることから、便宜的に定めたものである。

この図には、水セメント比が 35, 48 および 55% の配合で、養生条件および使用時含水率の異なる供試体の結果が含まれている。この結果によれば、水セメント比、軽量粗骨材の使用時含水率および養生条件に関わらず、耐久性指数は凍結融解30サイクル時の飽和度に支配される結果が得られた。すなわち、試験中の飽和度が約 30% 未満であれば、耐久性指数 100% が得られ、この値を超えると飽和度の増加に比例して耐久性指数が直線的に低下する結果となった。実用上の耐久性の目安とされる耐久性指数 60% 以上は、飽和度が約 50% 以下で確保できることが分かる。本実験に使用した水セメント比 48% の配合で、軽量粗骨材の飽和度が 50% に低下するに必要な水分の逸散量は、脱型時質量の約 2.0% であり、その時の粗骨材の含水率は 17% に相当する。これは 3. (4) b) に述べた乾燥骨材粒の耐凍害性および 4. (4) b) に述べた乾燥骨材を使用した場合の結果とほぼ一致する。また、使用時の軽量粗骨材の含水率 28% を飽和度に換算すると 84% であることから、耐久性指数 60% を確保するためには飽和度を 30% 以上低下させる必要がある。3. (4) a) で述べた限界飽和度 90% に比べて相対的に小さい値となった。供試体の乾燥は表面から急激に始まるが、乾燥が内部まで到達し、一部の高い飽和度の骨材が乾燥するには全体としてかなり大きな水分の逸散が必要であるためと考えられる。

## 5. 軽量コンクリートの凍害劣化機構

軽量粗骨材自体の凍害劣化は、その空隙に占める水分の飽和度が約 90% まで十分な抵抗性があると考えられる。しかし、市販の軽量粗骨材を一粒ごとの飽和度で見れば、飽和度が 90% を超すものの割合が 10% 程度存在する。したがって、この種の骨材を使用した軽量コンクリートの耐凍害性は、通常の最低温度を  $-18^{\circ}\text{C}$  とした水中凍結・水中融解試験方法では、耐凍害性が低いという結果となりやすい。

しかし、このように高い飽和度の粗骨材を含むコンクリートでも、凍結融解試験前に供試体を乾燥すれば、粗骨材の飽和度が低下することにより耐凍害性が確保される。また、凍結融解の繰返し中の吸水を抑制することによっても、耐凍害性の低下を抑制することができる。また、コンクリート中の軽量粗骨材の平均含水率を 17% 程度以下に低減すれば、実用上の耐凍害性の評価である耐久性指数 60% 以上を確保できることが明らかとなった。したがって、骨材一粒ごとの飽和度のバラツキで、90% 以上の飽和度のものがなくなる骨材平均含水率の限界は 17% 程度と考えられる。

橋梁の床版や壁体のような実構造物においては、施工時の養生条件やその後の乾燥および実際の気象条件を考慮すれば、室内促進試験で得られる結果と実構造物の凍害劣化性状は大きく異なると考えられる。ASTM STP 169C<sup>(1)</sup> では、軽量コンクリートを ASTM C 666 によって試験する場合、凍結融解試験開始前に 14 日間の気中養生を推奨しており、これによって自然条件下のコンクリートの劣化性状との著しい相違をなくすることができるとしている。この記述は、上述の事柄を反映したものと考えられる。

## 6. 結論

この研究は、普通細骨材と軽量粗骨材を用いた軽量コンクリートの耐凍害性を明らかにすることを目的として、水中凍結・水中融解方法による室内試験結果を基礎的に検討したものである。このなかで、軽量粗骨材粒の空隙特性の実態、空隙特性に支配される軽量粗骨材粒の凍結融解抵抗性および軽量コンクリートの耐凍害性に対する軽量粗骨材の使用時含水率、凍結融解試験開始前の気乾養生の効果および水セメント比の影響などを検討した。この研究で明らかにされた事柄は、次のとおりである。

(1) 市販の M 骨材に占める造粒型と非造粒型骨材の空隙率は 46 ~ 49% 程度で大差ないが、造粒型骨材の細孔径は、非造粒型骨材のものよりも小さい傾向がある。非造粒型粗骨材中の空隙は、そのほとんどが連続空隙で外部から容易に水が浸入できるが、造粒型粗骨材中の空隙は、約 88% が連続空隙となっている。

(2) プレソーキングされた出荷時の軽量粗骨材中の空隙の飽和度は、一粒ごとに測定すると、ほとんど飽和しているものから 17% 程度のもので変動が大きく、平均的飽和度は約 70% である。

(3) 塗膜により凍結融解試験中の吸水を抑制したモデルコンクリートの凍結融解試験では、軽量粗骨材中の連続空隙の飽和度が約 90% を超えると、急激に耐久性指数が低下した。このことから、水分の液体から固体への相変化を考慮した凍結余剰水による凍害劣化作用の考え方が妥当なものと考えられる。また、凍結融解試験中の供試体の吸水も、凍結融解の繰返しによる劣化に大きな影響を及ぼしていると判断される。

(4) 使用時含水率 28% の軽量粗骨材を、水セメント比 48%、空気量 5% の配合で使用し、供試体を水中養生とした場合、試験材齢を 2 ~ 8 週の範囲で長くしても、耐久性指数の向上は認められなかった。しかし、同じ配合条件で軽量粗骨材の使用時含水率を 28 ~ 8% の範囲で低減させて 2 週水中養生後に凍結融解試験を行った場合、使用時含水率が小さくなるほど耐久性指数が向上した。

(5) 水中養生および気中乾燥期間を変化させた供試体の水分の逸散は、全て軽量粗骨材の含水率の変化に帰すものとして飽和度を計算した場合、飽和度約 30% では耐久性指数 100%、飽和度が約 30% を超えるとこれに比例して耐久性指数が低下し、飽和度 60% で耐久性指数が約 20% になる。耐久性指数 60% を確保するための飽和度は約 50% である。

(6) 飽和度 50% の軽量粗骨材の含水率は約 17% に相当し、プレソーキングを行った含水率 28% 程度の市販の軽量粗骨材を用いた水セメント比 48% のコンクリートでは、上記の含水率に到達するのに必要な乾燥による水分の逸散量は脱型時質量の 2.0% 程度である。

**謝辞**：本研究を行うに当たり、新潟大学 長瀧重義教授および八洋コンクリートコンサルタント(株) 御所窪邦男氏の適切なご助言とご指導をいただいた。また、実験の実施ととりまとめに当たっては A L A

協会技術部会（部会長 高羽 登氏）および日本メ  
サライト工業(株) 吉信良一氏にご協力いただいたこ  
とを記し、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 保坂鐵矢：北陸新幹線に用いた複合鉄道橋，土木技術，  
Vol.52, No.3, pp.50-57, 1997
- 2) 中村修吾，桧貝 勇：寒冷地における軽量コンクリー  
トの使用 について，日本道路公団試験所報告，Vol.  
1974，pp.61-69, 1974.
- 3) 橘 大介，大野義郎，黒木一実，岡田武二：高強度軽量  
コンクリートの耐凍害性に関する研究，第6回コンク  
リート工学講演会論文集，pp.237-240，1984.
- 4) 橘 大介，今井 実，岡田武二：乾燥が高強度軽量コン  
クリートの耐凍結融解性に与える影響，第7回コンク  
リート工学講演会論文集，pp.73-76，1985.
- 5) 横山昌寛，山下時夫，伊藤芳雄：人工軽量骨材コンクリ  
ートの急速凍結融解作用抵抗性に関する実験研究，日  
本建築学会大会学術梗概集，pp.517-520，1984.
- 6) 橘大介，今井 実：高強度軽量コンクリートの耐凍害性  
改善方法について，土木学会論文集，No.496/V-24，pp.  
51-60，1994.8
- 7) Fagerlund, G. :The critical degree of saturation method of  
assessing the freeze-thaw resistance of concrete, RILEM  
Committee 4 CDC. Materials and Structures, pp.217-229,  
1977.
- 8) Stefan Jacobsen Tor A. Hammer, Erik J. Sellevold :Frost  
testing High Strength Lightweight Aggregate Concrete,  
Internal cracking VS scaling, International Symposium  
on Structural Lightweight Aggregate Concrete , pp.541-  
554 , 1995.
- 9) 田 村一美，多賀谷宏三，米倉亜州夫，田澤栄一他：高  
強度軽量コンクリートの凍害機構に関する一考察，コ  
ンクリート工学論文集，Vol.6， No.2, pp.77-83, 1995 .
- 10) 鎌田英治：セメント硬化体の微細構造とコンクリート  
の凍害，コンクリート工学，Vol.19, No.11， pp.36-42,  
1981.
- 11) 洪 悦郎，鎌田英治：人工軽量骨材コンクリートの凍害  
機構に関する考察，セメント技術年報，No.25, pp.  
285 -289 , 1971.
- 12) Thomas A Holm : Lightweight Concrete and Aggregate,  
Significance of Tests and Properties of Concrete and  
Concrete-Making Mate rials, ASTM STP.169 C, pp.  
522-532 , 1994.

(1998. 12. 22 受付)

## STUDY ON THE MECHANISM OF FREEZE-THAW DETARIORATION OF LIGHT-WEIGHT CONCRETE

Eiichi FUJIKI, Katsuro KOKUBU, Yuuetsu ENDOH  
and Tetsuya HOSAKA

The purpose of this study is to find the governing factor of deterioration of lightweight concrete due to repeated freezing and thawing. The tested lightweight concrete was made with artificial lightweight coarse aggregate and normal sand, and nominal air content was 5.0%. This study is conducted rapid freezing and thawing in water. Void system of artificial lightweight aggregate is determined, and the effects of moisture content on freeze-thaw durability is discussed in this paper. It is resulted that the durability factor depends on the percentage of moisture content in lightweight coarse aggregate at mixing and/or in hardend concrete spesimen at freez-thaw test.