

# 論文 寒冷環境下に暴露した軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす各種要因の影響

毛 継沢\*<sup>1</sup>・鮎田耕一\*<sup>2</sup>・羽根井誉久\*<sup>3</sup>・松井敏二\*<sup>4</sup>

**要旨:** 寒冷環境下で軽量コンクリートの暴露試験を5年間行い、コンクリートの単位容積質量、練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率及び養生方法などの要因が軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響について検討した。その結果、用いたすべての軽量コンクリートの耐凍害性は良好であり、特に単位容積質量が大きく、骨材の含水率が低いほど耐凍害性が高く、また蒸気養生の効果が大きいことなどが明らかになった。

**キーワード:** 暴露試験, 軽量コンクリート, 耐凍害性, 単位容積質量, 含水率, 養生方法

## 1. はじめに

軽量コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす要因については、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」などの急速凍結融解試験によって多くの検討がなされてきている。例えば、練混ぜ前の軽量骨材の含水率を低くすることや凍結融解試験を行う前に気中で乾燥させることなどにより、軽量コンクリートの耐凍害性が向上する<sup>1)~3)</sup>ことなどが明らかにされている。

しかし、これらの促進試験によって得られた結果は、実際の軽量コンクリート構造物の耐凍害性を必ずしも再現しているとは言い難く<sup>4)</sup>、コンクリートの真の耐凍害性を求めるために、実環境下での暴露試験が必要となる<sup>5)</sup>。既往の研究<sup>6),7)</sup>によれば、軽量コンクリートの実環境での耐凍害性は普通コンクリートと同等であるが、コンクリートの単位容積質量や軽量骨材の含水率が耐凍害性に及ぼす影響については、暴露試験で十分に実証されていない。また、軽量コンクリートは製品にも使われる<sup>8)</sup>が、その際工場で行われている蒸気養生が実環境の下での軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響についても明らかにされていない。

そこで本研究では、軽量コンクリートの暴露試験を寒冷地で5年間行い、コンクリートの単位容積質量、練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率及び養生方法などの要因が寒冷環境下での軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び配合

使用材料を表-1に示す。低吸水性の造粒型軽量骨材 (HAL)<sup>9)</sup>及び超軽量の無機質硬質パーライト (KP) を使用した。

実験は2シリーズに分けて行った。

シリーズ1は軽量コンクリートの単位容積質量が耐凍害性に及ぼす影響を検討するためであり、粗骨材及び細骨材を変えて表-2配合に示す4水準の単位容積質量とした。造粒型軽量骨材 (HAL) と硬質パーライト (KP) は絶乾状態で、砕砂と砕石は表乾状態で使用した。フレッシュコンクリートの目標性状値は空気量を $5.5 \pm 1.5\%$ 、スランプを $10.0 \pm 2.5\text{cm}$ とした。

シリーズ2は練混ぜ前の軽量粗骨材 (HAL-A2) の含水率の影響を検討するため

\*1 北見工業大学大学院 工学研究科物質工学専攻 (正会員)

\*2 北見工業大学 工学部土木開発工学科教授 工博 (正会員)

\*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第一研究部コンクリート技術グループ

\*4 ドーピー建設(株) 北海道本店設計部設計課課長代理 (正会員)

表-1 使用材料

使用材料	種類	記号	物性または成分
セメント	普通セメント	C	密度 3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	造粒型軽量細骨材	HAL	絶乾密度 1.08g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 4.4%
	硬質パーライト	KP-A	絶乾密度 1.02g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 13.2%
		KP-B	絶乾密度 1.15g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 6.8%
	青梅産砕砂	砕砂	表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.63%
粗骨材	造粒型 軽量粗骨材	HAL-A1	最大寸法 15mm(絶乾密度 1.10g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 1.7%)と最大寸法 10mm(絶乾密度 0.99g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 2.0%)を容積比率 7:3 で混合
		HAL-A2	最大寸法 15mm(絶乾密度 1.14g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 3.1%)と最大寸法 10mm(絶乾密度 1.03g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 3.3%)を容積比率 7:3 で混合
		HAL-B	最大寸法 15mm(絶乾密度 0.79g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 3.2%)と最大寸法 10mm(絶乾密度 0.82g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 2.4%)を容積比率 7:3 で混合
	青梅産砕石	砕石	表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.69%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	AE 助剤	AE	変性アルキルカルボン酸化合物

あり、含水率を絶対乾燥、24 時間吸水、煮沸吸水によって 0%、3.1%、9.2%の 3 水準とした。表-3 に配合を示す。砕砂は表乾状態で使用した。フレッシュコンクリートの目標性状値は空気量を 5.5±1.5%、スランプを 8.0±2.5cm とした。

## 2.2 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、強制パン型ミキサを用いて行った。セメント、細骨材及び粗骨材を投入し 15 秒間空練りし、ミキサを一時停止、水ならびに高性能 AE 減水剤と AE 助剤を投入して 45 秒間練り混ぜ、再びミキサを停止し、か

き落としを行った後、60 秒間（計 120 秒間）練り混ぜた。

## 2.3 養生

シリーズ 1 では恒温恒湿室（室温 20℃、相対湿度 80%）で 5 時間の前養生後、蒸気養生を行った。蒸気養生は、昇温速度 20℃/h、最高温度 55℃、最高温度保持時間 4 時間で行った。蒸気養生終了後、恒温恒湿室（室温 20℃、相対湿度 80%）に静置し、材齢 18~19 日に暴露を開始した。

シリーズ 2 ではシリーズ 1 と同じ条件の養生

表-2 配合(シリーズ 1)

記号	目標単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		単位細骨材量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位粗骨材量 (L/m <sup>3</sup> )			混和剤 (C×%)	
				W	C	HAL	KP-A	KP-B	砕砂	HAL-A1	HAL-B	砕石	SP	AE
1	1900	35	46.5	155	443	—	—	—	795	245	—	277	0.60	0.40
2	1800	37	46.4	163	441	—	—	—	783	347	—	—	0.60	0.40
3	1400	35	48.0	152	434	—	108	122	276	—	343	—	0.70	0.40
4	1200	35	46.5	155	443	—	155	175	—	—	350	—	0.55	0.40
5		35	46.5	155	443	98	—	245	—	—	350	—	0.60	0.40

SP: 高性能 AE 減水剤 AE: AE 助剤

表-3 配合(シリーズ2)

記号	目標単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )		単位細骨材量(kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材量(L/m <sup>3</sup> )	粗骨材の含水率	混和剤 (C×%)	
				W	C	砕砂	HAL-A2		SP	AE
6	1800	35	46.6	155	443	789	347	絶対乾燥, 0%	0.55	0.40
7								24h 吸水, 3.1%		
8								煮沸吸水, 9.2%		

SP: 高性能 AE 減水剤 AE: AE 助剤

表-4 北見市の月別最高気温, 月別最低気温及び推定凍結融解回数

月	1月	2月	3月	4月	5月	10月	11月	12月
月最高気温の平均(°C)	4.8	5.1	12.1	23.1	28.4	22.4	14.9	4.7
月最低気温の平均(°C)	-22.4	-21.3	-17.5	-7.3	-1.2	-2.1	-11.7	-19.1
月平均推定凍結融解回数(回)	5	6	21	16	2	6	23	6
5年間の推定凍結融解回数(回)	シリーズ1: 419				シリーズ2: 403			

のほか、蒸気養生を行わず、恒温恒湿室（室温 20℃, 相対湿度 80%）で気中養生だけを行った。いずれの養生の場合も材齢 28 日に暴露を開始した。

## 2.4 暴露試験

### (1) 暴露環境

冬季の気象条件が厳しい北海道北見市で実施した。軽量コンクリート角柱供試体（10×10×40cm）を北見工業大学実験棟屋上に敷いたプラスチック製のこ（厚さ 4cm）の上に直接静置し、シリーズ1は1998年11月中旬から、シリーズ2は1999年1月下旬から暴露を開始した。

写真-1, 2に夏季と冬季の暴露状況を示す。冬季の暴露期間中に供試体の除雪は行っていない。

日本気象協会の気象データベースにより調べた1998年11月から2003年5月までの暴露期間中の北見市の気温から月別最高気温、月別最低気温の平均を求め表-4に示した。また、日最高気温と日最低気温から凍結融解温度を 0℃として推定した暴露供試体の月平均凍結融解回数及び5年間の凍結融解回数も表-4に示した。

### (2) 測定項目

春（5月）、秋（11月）の年2回、供試体の外観調査及び24時間吸水後表乾状態にして質量、



写真-1 暴露状況（夏季）

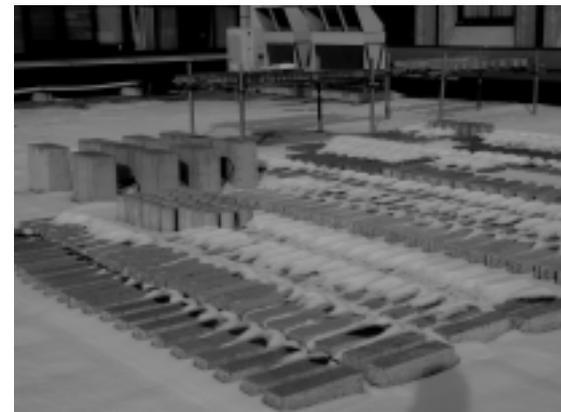


写真-2 暴露状況（冬季）

動弾性係数の測定を行った。動弾性係数は 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」に準拠し、たわみ振動により求めた。

表-5 暴露開始時の単位容積質量と動弾性係数

配合記号	1	2	3	4	5	6		7		8	
養生条件	蒸気					蒸気	気中	蒸気	気中	蒸気	気中
単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )	1960	1770	1460	1310	1270	1780	1760	1780	1770	1780	1770
動弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	28.2	24.7	17.2	15.2	13.5	24.4	24.9	24.4	25.5	24.4	24.4

### 3. 実験結果及び考察

表-5 に暴露開始時の供試体の単位容積質量と動弾性係数を示す。

#### 3.1 供試体の外観

5年間の暴露試験後においてすべての供試体にスケーリングは認められなかった。

#### 3.2 質量の経年変化

図-1 にシリーズ 1 及び図-2 にシリーズ 2 の蒸気養生を行った供試体の質量増加率の経年変化を示す。暴露年数の経過に伴い、すべての供試体の質量は徐々に増加し、5年間暴露後の質量増加率は 1%前後になっている。単位容積

質量が小さいほど、練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が低いほど、供試体の質量が増加する傾向にあり、これらの軽量コンクリートは暴露期間中に多く吸水したことを示している。

#### 3.3 相対動弾性係数の経年変化

図-3 にシリーズ 1 及び図-4 にシリーズ 2 の蒸気養生を行った供試体の相対動弾性係数の経年変化を示す。暴露年数の経過とともに単位容積質量が 1800 kg/m<sup>3</sup>以上の供試体（配合記号 1, 2, 6~8）の相対動弾性係数は増加し、暴露期間中に劣化せず強度が増進している。一方、単位容積質量が 1200~1400 kg/m<sup>3</sup>程度の軽量コ

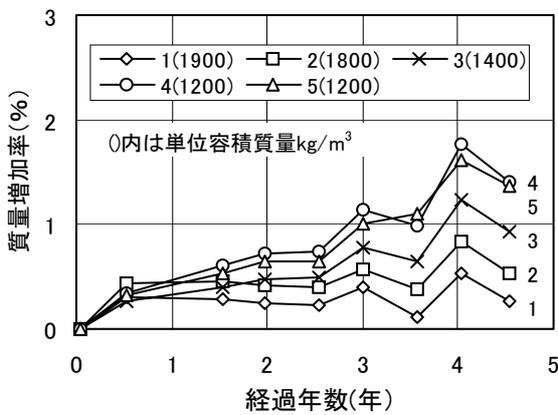


図-1 質量増加率の経年変化 (シリーズ 1)

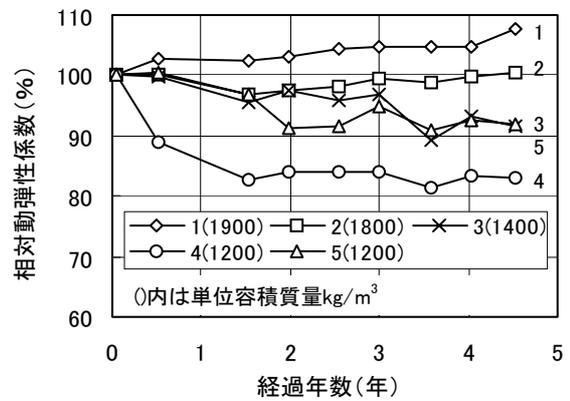


図-3 相対動弾性係数の経年変化(シリーズ 1)

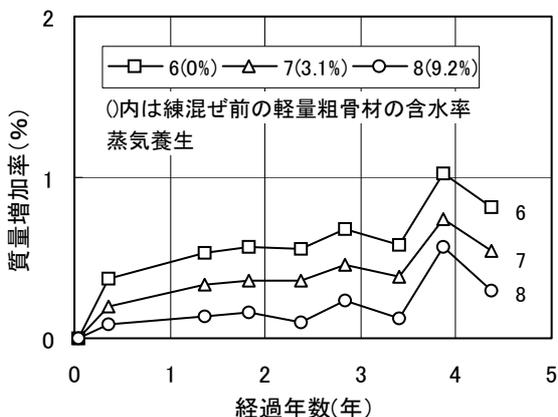


図-2 質量増加率の経年変化 (シリーズ 2)

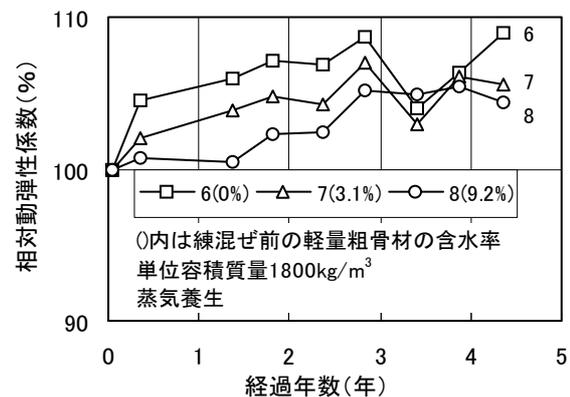


図-4 相対動弾性係数の経年変化(シリーズ 2)

ンクリートの場合、いずれの供試体（配合記号3～5）も暴露年数の経過に伴い、相対動弾性係数が減少した。これは単位容積質量1200～1400 kg/m<sup>3</sup>のコンクリートを得るため、軽量細骨材及び絶乾密度の小さい軽量粗骨材（HAL-B）を用いたのが原因であろう。

### 3.4 軽量コンクリートの耐凍害性と単位容積質量の関係

シリーズ1の軽量コンクリート供試体の暴露開始時の単位容積質量と5年間暴露後の質量増加率の関係を図-5に、相対動弾性係数との関係を図-6にそれぞれ示す。5年間暴露後の供試体の質量増加率と相対動弾性係数は単位容積質量と相関があり、単位容積質量が小さいほど質量増加率が大きく、また相対動弾性係数が低下することを示している。単位容積質量が1200～1400 kg/m<sup>3</sup>程度の供試体（配合記号3～5）は5年間の暴露期間中に多く吸水し、質量増加率

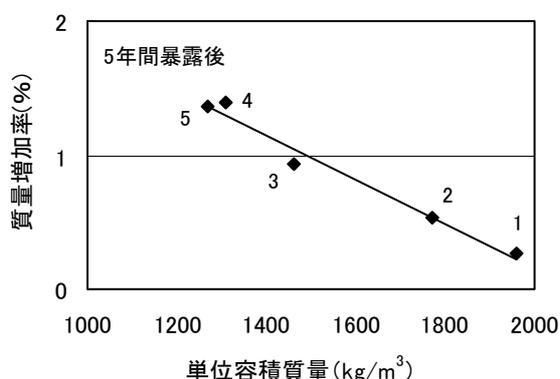


図-5 単位容積質量と質量増加率の関係 (シリーズ1)

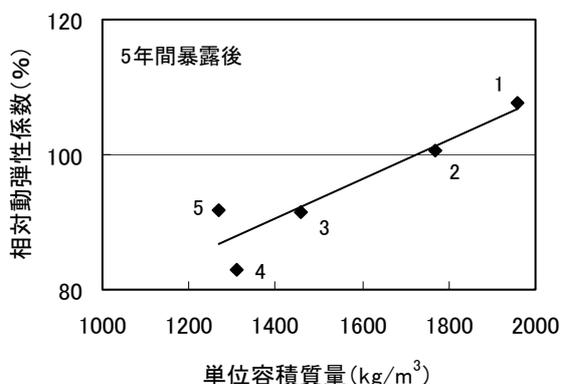


図-6 単位容積質量と相対動弾性係数の関係 (シリーズ1)

が1%以上になり、凍結融解の繰返し作用を受けた結果、相対動弾性係数が約90%に低下した。

### 3.5 軽量コンクリートの耐凍害性と軽量粗骨材の含水率及び養生方法の関係

シリーズ2の練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率と5年間暴露後の供試体の質量増加率の関係を図-7に示す。いずれの含水率の粗骨材を用いた場合も暴露開始時よりコンクリートの質量は増加し、軽量粗骨材の含水率が低いほど5年間暴露後の供試体の質量は多く増加している。表-5に示すように、暴露開始時の各供試体（配合記号6～8）の質量はほとんど同じであることから、暴露期間中に含水率の低い軽量粗骨材は多く吸水したことを示している。なお、蒸気養生と気中養生の違いが質量に及ぼす影響は見られなかった。

シリーズ2の練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率と5年間暴露後の供試体の相対動弾性係数の関

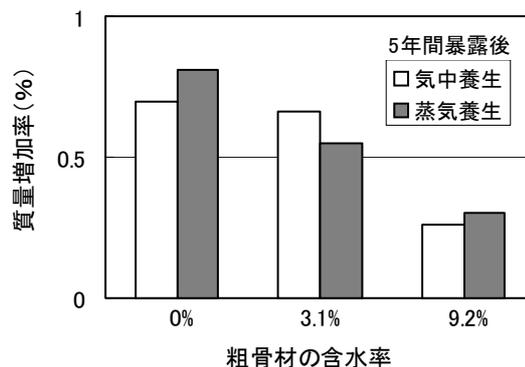


図-7 軽量粗骨材の含水率と質量増加率の関係 (シリーズ2)

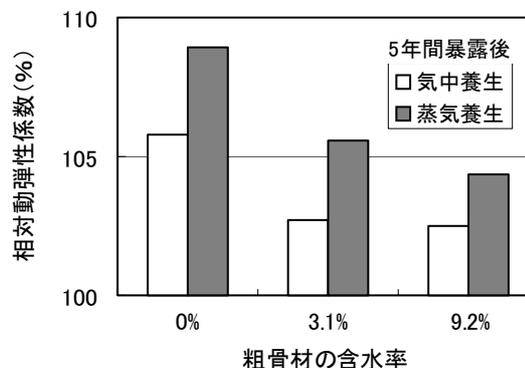


図-8 軽量粗骨材の含水率と相対動弾性係数の関係 (シリーズ2)

係を図-8 に示す。いずれの含水率の粗骨材を用いた場合も暴露開始時よりコンクリートの相対動弾性係数は増加し、劣化の兆しは見られず、軽量粗骨材の含水率が低いほど5年間暴露後の供試体の相対動弾性係数は大きくなっている。

表-5 に示すように、暴露開始時の各供試体(配合記号6~8)の動弾性係数はほとんど同じであることから、田村ら<sup>10)</sup>も指摘しているように、軽量粗骨材の含水率が低いほど、凍結融解の繰返し作用を受けても劣化しにくいことを示している。また、気中養生と比べると、蒸気養生を行ったほうの相対動弾性係数が高く、蒸気養生は軽量コンクリートの強度増進に効果があることが明らかになった。

#### 4. 結論

冬季の月最低気温の平均値が $-20^{\circ}\text{C}$ 以下である北海道北見市で軽量コンクリートの暴露試験を5年間行い、コンクリートの単位容積質量(1200, 1400, 1800, 1900  $\text{kg}/\text{m}^3$ の4水準)、練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率(0%, 3.1%, 9.2%の3水準)及び養生方法(蒸気養生と気中養生)などの要因が軽量コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響について検討した結果から、次のことが明らかになった。

(1)凍結融解作用に伴うスケーリングは認められず、暴露年数の経過に伴い、質量は徐々に増加し、5年間暴露後の質量増加率は1%前後になった。軽量コンクリートの単位容積質量が小さいほど5年間暴露後の供試体の質量は増加した。

(2)単位容積質量が $1800\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の軽量コンクリートの相対動弾性係数は暴露年数の経過とともに増加し続け、良好な耐凍害性を示している。一方、単位容積質量が $1200\sim 1400\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の軽量コンクリートの相対動弾性係数は暴露年数の経過に伴い減少した。

(3)練混ぜ前の軽量粗骨材の含水率が低いほど5年間暴露後の軽量コンクリートの質量や相対動弾性係数が大きくなった。含水率の最も高い9.2%の場合でも5年間暴露後の軽量コンクリ-

ートの相対動弾性係数は暴露開始時より増加しており、耐凍害性は良好であった。

(4)蒸気養生と気中養生では5年間暴露後の質量に相違はなかったが、蒸気養生の場合には相対動弾性係数が大きくなり、強度増進に効果があった。

#### 参考文献

- 1) 藤木英一ほか：軽量コンクリートの凍害劣化機構に関する研究，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.239-250，1999.8
- 2) 三浦隆広，菊池雅史，小山昭男：超軽量コンクリートの諸性質に及ぼす骨材含水率の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.235-240，2000.6
- 3) 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
- 4) 国府勝郎ほか：高性能軽量コンクリート研究委員会報告，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.1-10，2000.6
- 5) 田畑雅幸ほか：コンクリートの凍害を対象とした寒冷地における暴露試験，自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集，pp.193-200，1993.5
- 6) 大久保孝昭ほか：長期間屋外暴露された人工軽量骨材コンクリートの諸性状，日本建築学会構造系論文集，No.561，pp.23-29，2002.11
- 7) 長谷川寿夫，洪悦郎：各種コンクリートによる凍害の地域差に関する長期暴露試験，セメント技術年報40，pp.364-367，1986.12
- 8) 笠井芳夫編：軽量コンクリート，技術書院，2002
- 9) 岡本享久，早野博幸，柴田辰正：超軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.36，No.1，pp.48-52，1998.1
- 10) 田村一美ほか：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.77-83，1995.7