

論文 超軽量骨材を用いたコンクリートの耐凍害性

森 寛晃*1・岡本 享久*2・柴田 辰正*1・石川 雄康*3

要旨: 本研究では、低吸水性を有する超軽量骨材を用いたコンクリートの耐凍害性を検討するため、骨材単体の凍結融解試験を行い、凍結融解作用による骨材の劣化性状を調査するとともに、含水状態を調整した骨材を用いて作製したコンクリートの凍結融解試験を実施した。その結果、超軽量骨材の凍害による劣化は表層から内部に向かって進行し、また気孔径が大きい場合には骨材強度の低下も起こることが分かった。今回検討した低水結合材比のコンクリートでは、骨材自体の損傷はコンクリート表面に露出した部分にとどまり、超軽量骨材を用いたコンクリートは試験条件あるいは粗骨材の含水状態に関わらず良好な耐凍害性を示した。

キーワード: 超軽量骨材, 気孔組織, 骨材含水状態, 軽量コンクリート, 耐凍害性

1. はじめに

膨張頁岩や膨張粘土を焼成して得られる軽量骨材は、骨材内部が多孔質であり、各々の気孔が連結して存在する割合が高い¹⁾。このため、これらの人工軽量骨材の吸水率は、普通骨材よりも相当高く、また吸水は長時間にわたり継続する。これに対して、真珠岩を原料とする造粒型人工軽量骨材(超軽量骨材)は、骨材の内部組織が微細な独立気孔で形成されており、低吸水性を有している。

軽量骨材の吸水特性あるいはそれに伴う含水状態の変化は、軽量コンクリートの耐凍害性に影響を与える。一般的には軽量コンクリートの凍結融解試験における耐久性は低いとされ²⁾、耐凍害性の改善方法を検討する研究も見られる。例えば橘らは骨材の気孔組織に着目し、低吸水性を有する高品質人工軽量骨材の有用性を示している³⁾。

膨張頁岩を原料とした非造粒型の軽量骨材は、骨材自身も凍結融解の繰り返しにより膨張、収縮して劣化するとの報告があり⁴⁾、軽量コンクリートの凍害劣化メカニズムを知る上では骨材単体の劣化現象を把握しておくことも重要である。

そこで本研究では、超軽量骨材単体の凍結融解試験を実施して、凍害による骨材の劣化性状を把

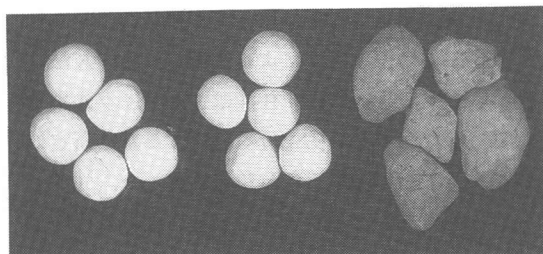


写真-1 人工軽量骨材の外観
(左から HAL1, HAL2 および AL)

握するとともに、この結果と併せて、この骨材を用いたコンクリートの耐凍害性を検討することとした。

2. 実験概要

使用した人工軽量骨材の外観および物理的性質を写真-1、表-1に示す。

2.1 軽量骨材単体の凍結融解試験(シリーズI)

骨材単体の凍結融解試験は、コンクリートの凍結融解試験方法 ASTM C 666 を準用し、粒径 10~15mm の骨材を水中あるいは気中にて凍結融解する方法(以下、骨材 A 法、骨材 B 法と記す)により行った。骨材 A 法では、かさ容積 10 程度の絶乾骨材をポリエチレン容器中に入れ、完全に浸水

*1 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 研究員, 工修 (正会員)

*2 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 主席研究員, 工博 (正会員)

*3 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 主任研究員, 工修 (正会員)

表一 使用した人工軽量骨材

人工軽量骨材	原料および製造方法	記号	最大寸法 (mm)	絶対比重	表乾比重 ¹⁾	吸水率 (wt.%)	
						24hr 吸水状態	煮沸吸水状態 ²⁾
超軽量骨材	真珠岩, 造粒型	HAL1	15	0.76	0.79	44	113
		HAL2	15	1.22	1.27	39	86
市販の軽量骨材	膨脹頁岩, 非造粒型	AL	15	1.29	1.58	225	279

*1: 静水中で24時間吸水させた後の骨材比重 *2: 煮沸水中で約2時間吸水させた後の状態

表二 シリーズ I の試験条件および試験項目

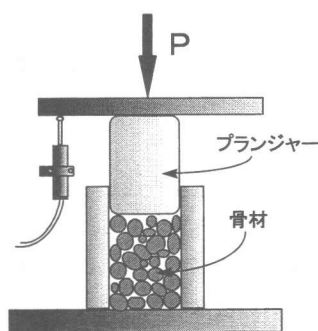
試験方法	使用した粗骨材		評価試験項目		
	種類	含水状態	(a)含水量および損失質量測定	(b)骨材破碎試験	(c)細孔径分布測定
骨材 A 法	HAL1, HAL2, AL	絶乾 w0	50 サイクルごと	100 サイクルごと	100 サイクルごと
骨材 B 法	HAL1, HAL2	24hr 吸水 w2	なし	100 サイクルごと	100 サイクルごと
		煮沸吸水 w3			
	AL	24hr 吸水 w2			

した状態で-20℃の凍結および5℃の融解サイクルを約3~4時間で繰り返した。また骨材 B 法では、所定の含水状態の骨材をビニール袋に密封し、水分移動のない状態で凍結融解を繰り返した。凍結融解温度は軽量骨材を使用して作製したコンクリート供試体の中心温度により制御し、骨材 A 法は200 サイクルまで、骨材 B 法は300 サイクルまで繰り返した。骨材の劣化度を評価するため所定のサイクルにおいて以下の試験を実施した。

(a)含水量ならびに損失質量の測定: 骨材 A 法では、50 サイクルごとに骨材の表面水を乾布にて拭拭し、見かけ上表乾状態とした骨材の含水量を測定した。また絶乾状態とした試料のうち5mmふるい通過分を損失とみなし、その損失質量を測定した。

(b)骨材破碎試験: 骨材の強度に関する試験方法としては、BS812 骨材の破碎値試験を準用した。骨材 A 法および骨材 B 法では、所定のサイクルが終了した骨材を絶乾状態とした後、10mmふるいに残留する骨材をφ75×125mmのシリンダー中に詰め、ほぼ一定の荷重速度(毎分0.4~0.5N/mm²)で荷重30kNまで荷重した。荷重荷重は事前に行った健全な骨材の試験に基づき、以下に述べる破碎損失率が10~20%程度となる荷重値を設定した。測定項目は荷重およびプランジャー下方変位とし、破碎した骨材のうち5mmふるいを通過する細粒分の質量を測定し、これを全試料質量で除して破碎損失率とした。骨材破碎試験の荷重状況を図一に示す。

(c)細孔径分布測定: 凍結融解作用を受けた骨材の内部空隙構造の変化を調べるため、(b)で破碎した



図一 骨材破碎試験荷重状況

骨材のうち2.5mmふるいに残留する細粒分を用いて水銀圧入式ポロシメータにより測定を行った。

以上に述べたシリーズ I の試験条件および評価試験項目を一覧表にして表二に示す。

2.2 軽量コンクリートの凍結融解試験 (シリーズ II)

ASTM C 666 A 法および B 法に準拠し、表一に示す人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートの凍結融解試験を実施した。使用した粗骨材以外の材料、軽量コンクリートの配合条件および諸性状をそれぞれ表三、表四に示す。配合要因は粗骨材3種類、骨材の含水状態を4水準、水結合材比を2水準とし、空気量は混和剤添加量を変えることにより5.0±1.0%に調整した。供試体は各要因につき2ないし3体作製した。なお、絶乾状態の骨材を使用する場合は練混ぜ中の吸水を考慮し、あらかじめモルタルを混練した後に粗骨材を投入した。供試体は10×10×40cmとし、材齢14日まで温度20℃の水中で養生した後、直ちに試験に供した。測定項目はたわみ振動方法により測定され

表—3 粗骨材以外の使用材料

使用材料	種類	記号	物性または成分
結合材	早強ポルトランドセメント	C	比重: 3.15, 比表面積: 4490cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	BS	比重: 2.90, 比表面積: 8050cm ² /g
細骨材	青梅産砕砂	S	表乾比重: 2.62, 吸水率: 1.63%, 粗粒率: 3.07
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸エーテル系複合体
	AE 助剤	AE	主成分: 変性アルキルカルボン酸化合物

表—4 軽量コンクリートの配合条件および諸性状(シリーズII)

配合名	使用した粗骨材		水結合材比 ¹ W/(C+BS)(%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 ² Air (%)	単位容積質量 (kg/l)	圧縮強度 (N/mm ²)	凍結融解試験 ASTM C666
	種類	含水状態						
HAL1-w0-30	HAL1	絶乾 w0	30	43.3	4.1	1.67	46.2	A 法, B 法
HAL1-w1-30		気乾 w1	(20.0)		4.6	1.67	45.9	
HAL1-w2-30		24hr 吸水 w2			5.1	1.67	44.5	
HAL1-w0-40	HAL1	絶乾 w0	40	45.2	5.0	1.62	43.5	B 法
HAL1-w1-40		気乾 w1	(20.0)		5.9	1.61	39.2	
HAL1-w2-40		24hr 吸水 w2			5.5	1.62	33.9	
HAL2-w2-30	HAL2	24hr 吸水 w2	30	43.3	5.4	1.80	69.0	A 法, B 法
HAL2-w3-30		煮沸吸水 w3			5.3	1.82	66.9	
HAL2-w2-40		24hr 吸水 w2	40		45.2	4.6	1.78	
HAL2-w3-40		煮沸吸水 w3			4.1	1.81	57.9	
AL-w0-30	AL	絶乾 w0	30	43.3	4.0	1.89	65.1	B 法
AL-w2-30		24hr 吸水 w2			4.3	1.96	59.9	
AL-w0-40		絶乾 w0	40		45.2	4.1	1.83	
AL-w2-40		24hr 吸水 w2			5.7	1.90	50.0	

*1:括弧内の数値は、粉体に占める高炉スラグ微粉末の割合(vol.%)

*2:重量法による

るたわみ振動数および供試体の質量とし、36 サイクル以内に 1 回の間隔で、300 サイクルもしくは算出される相対動弾性係数が 60% 以下となるまで測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 超軽量骨材の内部空隙構造

シリーズ I に先立ち、健全な骨材の内部空隙構造を調査した。写真—2 は骨材断面を走査型電子顕微鏡(SEM)により約 500 倍で観察したものである。これによると HAL1 と HAL2 では大小様々な球状の気孔が独立して存在しており、また気孔の径は HAL1 の方が大きい。一方、AL では 1 μ m 程度の気孔のほかに比較的大きな空隙が見られる。

図—2 は各骨材の細孔直径と水銀圧入量の関係を示したものである。HAL1 と HAL2 を比べると HAL2 の各細孔直径における圧入量は HAL1 よりも少なく、骨材中の総細孔量は少ないことが分かる。なお、超軽量骨材では HAL1 と HAL2 では水銀圧が 130~140MPa(細孔直径 0.01 μ m 相当)となる高圧領域において圧入量が多くなる傾向が見ら

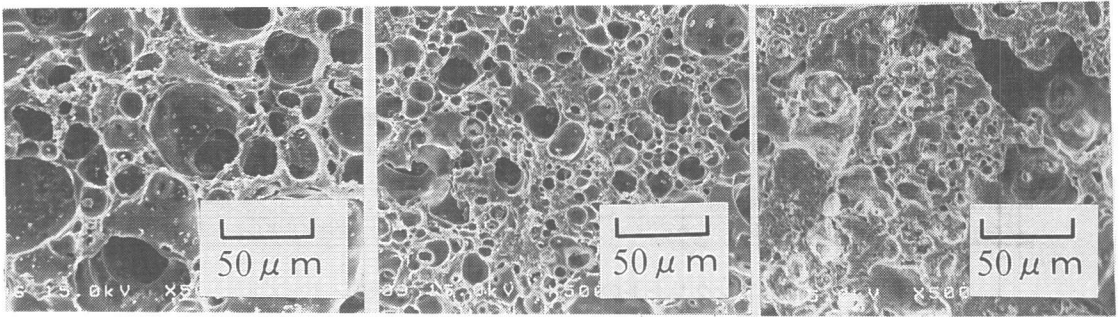
れたが、これは骨材の気孔組織が水銀圧により破壊されるためであり、既往の研究³⁾で述べられているように超軽量骨材の内部空隙が主としてクロードポアとして存在することを別の面から証明するものと考えられる。

AL は細孔直径 0.1~数 μ m の領域で圧入量が多いものの、10 μ m 以上の圧入量は HAL1 よりも少なく、HAL2 とほぼ同じとなった。写真—2 で確認された大きな空隙は細孔径分布には反映されなかったことが分かる。また超軽量骨材で見られた高圧領域における圧入量の増加は見られなかった。

3.2 軽量骨材の凍結融解による劣化(シリーズ I)

(a) 軽量骨材の水中における凍結融解(骨材 A 法)

図—3 は含水率および質量損失率の変化を示したものである。HAL1 の含水率および質量損失率は凍結融解サイクル数とともに増加し、サイクル終了時にはそれぞれ 57.4%, 14.9% となった。また HAL2 の含水率変化は HAL1 ほど顕著ではないが、質量損失率は 9.2% に達した。超軽量骨材では骨材表面が粉碎して生じた微粒分が多く認められ、骨材表面から劣化が進行したと考えられる。これ



写真—2 骨材断面のSEM像写真(左からHAL1, HAL2およびAL)

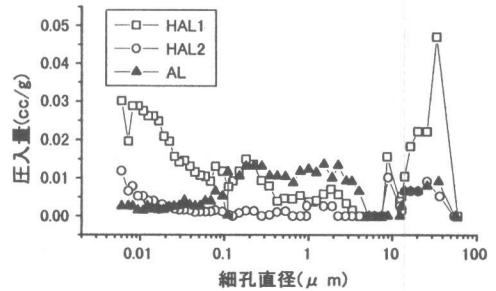
に対して, ALは骨材に割れが生じ, 数mmの破片が認められたものの, 今回損失と見なした5mm以下の細粒分はサイクル終了時で3.6%となり, 含水率は24hr吸水率程度となった。

図—4は骨材A法の所定サイクルにおける細孔径分布を骨材ごとに示したものである。HAL1は健全なものと凍結融解を受けたものとで分布形状が異なり, 骨材内部の空隙構造が変化したと考えられる。表—5はシリーズIの骨材破碎試験の結果をまとめたものである。骨材A法で200サイクルの凍結融解を受けたHAL1は, 健全な骨材と比べてP-δ曲線勾配が小さく, 破碎損失率が大きくなり, 骨材強度の低下を裏付ける結果が得られた。なおHAL2とALでは細孔径分布や破碎試験結果からは骨材組織の損傷は検出されなかった。

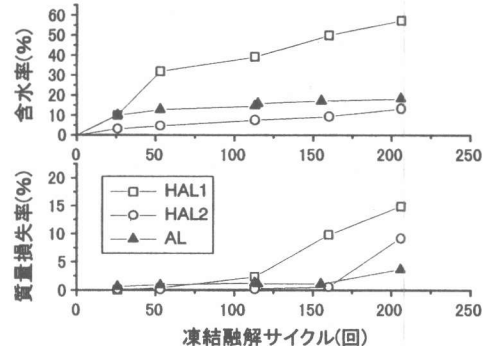
HAL1では表面の骨材組織が劣化すると, この箇所から内部に浸入する水の影響で, より内部の気孔組織に亀裂やひび割れが生じ, 最終的に骨材強度が低下したと考えられる。HAL2もHAL1と同様に骨材表面から劣化が進行するものの, 気孔径が小さく, 気孔組織が緻密であるため, 劣化は表層近傍にとどまり, 内部の気孔組織は損傷を受けなかったと考えられる。これに対して, ALは割れを生じるものの, 割れた骨材組織自体の損傷は小さい結果となった。ALの場合, いずれの評価試験でも骨材が割れて劣化する現象を数値的に捉えることができなかったが, これはALの劣化形態が超軽量骨材と異なるためであり, 粒形や内部空隙構造の異なる骨材どうしを比較する上では, 別の評価方法が必要になると考えられる。

(b) 軽量骨材の気中における凍結融解(骨材B法)

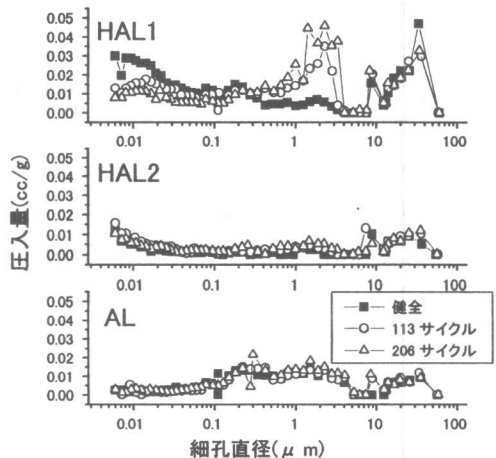
表—5によると骨材B法で300サイクルの凍結



図—2 細孔径と水銀圧入量の関係



図—3 含水率および質量損失率の変化



図—4 凍結融解を受けた骨材の細孔径分布

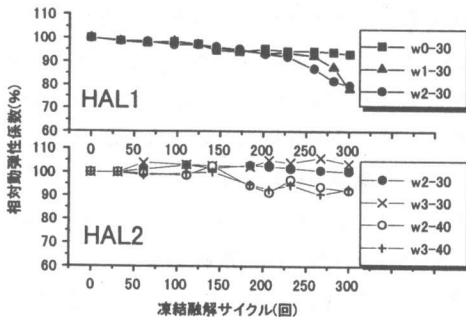
融解を受けた HAL1 と HAL2 は試験開始時の含水状態によらず P- δ 曲線勾配や破碎損失率に顕著な変化は見られなかった。サイクルを通じての外観観察では骨材の割れやひび割れ等は認められなかったが、HAL1 の細孔径分布は骨材 A 法の場合と同様に細孔径直径 0.1~数 μ m の領域で圧入量が増加した。24hr 吸水状態の AL では数 mm の破片が見られるものの、破碎試験結果や細孔径分布に健全なものとの有意な差は認められなかった。

気孔径の大きい HAL1 では、骨材自体が含有する水の凍結融解作用により、骨材内部が若干損傷を受けるものの、骨材強度の低下には至らなかった。骨材 B 法では骨材種類や含水状態の違いが骨材強度に与える影響は小さかったが、これは融解サイクル時に外部から水の供給がないこと、凍結時には外部への未凍結水の移動が可能であること、また外部拘束がないため骨材が自由に膨張、収縮できることなどが原因であると考えられる。

3.3 軽量コンクリートの耐凍害性

(a) ASTM C 666 A 法による凍結融解試験

図一5 および図一6 は供試体の相対動弾性係数および質量変化率の変化を示したものである。図一5 によると HAL1 と HAL2 を用いたコンクリートは、骨材の含水状態あるいは水結合材比の影響を若干受けるようであるが、いずれの供試体も耐久性指数 60 以上を保持しており、従来の軽量骨材を高い含水率で使用したコンクリートと比べると優れた耐凍害性を示したと言える。既往の研究⁵⁾では骨材の含水率が 4~5% より大きな場合には耐凍害性に問題が残ると指摘されているが、HAL2 を煮沸吸水状態(含水率 8.6wt.%)で使用したコン



図一5 相対動弾性係数の変化(凍結融解 A 法)

表一5 骨材破碎試験結果(サイクル終了時)

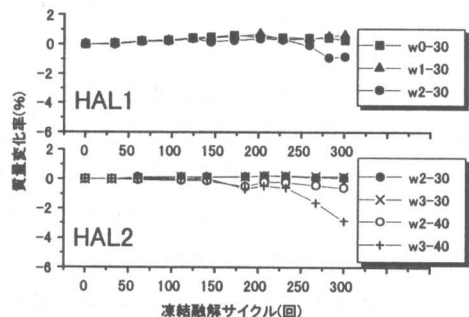
試験方法	骨材種類	P- δ 曲線勾配 ^{*1} (kN/mm)/健全 に対する比	破碎損失率 (%) / 健全 に対する比
骨材 A 法 200 サイクル	HAL1	1.04/0.58	16.4/1.52
	HAL2	2.82/1.32	9.72/0.79
	AL	1.77/1.03	10.4/0.64
骨材 B 法 300 サイクル	HAL1-w2	1.85/1.03	12.3/1.14
	HAL1-w3	2.03/1.13	11.1/1.03
	HAL2-w2	2.25/1.05	11.3/0.92
	HAL2-w3	1.61/0.75	17.8/1.45
	AL-w2	1.65/0.96	22.2/1.36

*1: 荷重-プランジヤー下方変位曲線(P- δ 曲線)の $\delta=10$ mm までを直線で回帰するときの勾配

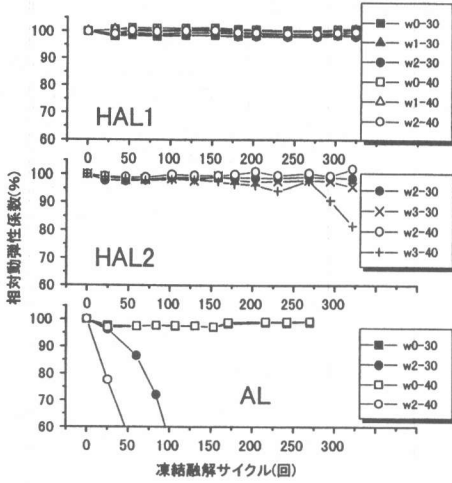
クリートは耐久性指数 90 以上を示した。ただし、これらの供試体では打設面を中心としてコンクリート表面のスケーリングあるいは骨材のポップアウト現象が認められ、図一6 から分かるように質量が 3% 程度減少した。

(b) ASTM C 666 B 法による凍結融解試験

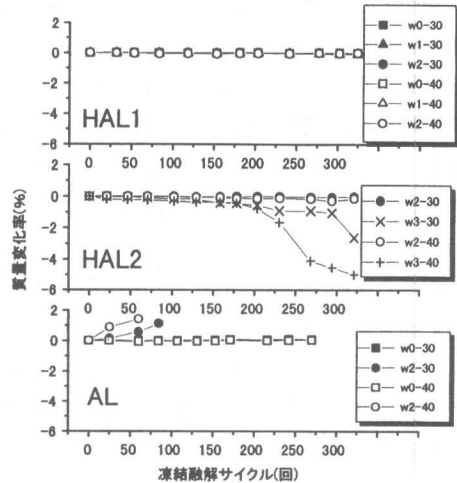
図一7 および図一8 は供試体の相対動弾性係数および質量変化率の変化を示したものである。HAL1 を使用したコンクリートは、水結合材比あるいは粗骨材の含水状態に関わらず優れた耐凍害性を示した。HAL2 を用いたコンクリートは HAL2 を含水率 8.6wt.% の煮沸吸水状態で使用した場合にコンクリートの表面剥離による質量減少が顕著となり、この点で ASTM C 666 A 法と同様の傾向が見られた。これに対して、AL を含水率 22.5wt.% で使用したコンクリートは試験開始直後から相対動弾性係数が低下した。これらの供試体では打設面や側面に存在する骨材付近を中心とする紋様状のひび割れが多数認められており、従来の軽量コンクリートと同様に軽量骨材中の水分が凍結する際に大きな内部応力を生じ、供試体を横断するひ



図一6 供試体質量の変化(凍結融解 A 法)



図—7 相対動弾性係数の変化(凍結融解 B 法)



図—8 供試体質量の変化(凍結融解 B 法)

び割れもしくは亀裂が発生したものと推察される。

シリーズ I で確認したように、超軽量骨材は表面から劣化する場合があり、スケーリング等によるコンクリート表面の剥離が激しい場合には、骨材が露出するコンクリート面から劣化が進行する可能性も考えられる。しかしながら今回検討を行った低水結合材比のコンクリートでは、モルタル部が非常に緻密であること、外部からの水の供給が制限されることなどから、超軽量骨材の劣化はコンクリート表面に露出した骨材部分でわずかに生じるだけにとどまったと考えられる。

骨材単体の凍結融解試験結果との対応を検討するためには、凍結時の未凍結水の移動あるいは骨材とモルタル界面(遷移帯)の状態を調査するとともに、骨材変形の拘束などを考慮した骨材の凍結融解試験方法や骨材の劣化形態の相違を考慮した劣化度の評価が必要になるものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 超軽量骨材単体の凍結融解作用による劣化は、表層から内部へと徐々に進行する。また気孔径が大きく骨材内部の総細孔量が多くなると骨材強度の低下を引き起こす場合がある。
- (2) 低水結合材比のコンクリートでは、超軽量骨材自体の劣化はコンクリート表面に露出した骨

材部分にとどまり、超軽量骨材を用いたコンクリートは試験条件あるいは粗骨材の含水状態に関わらず良好な耐凍害性を示した。

本研究を実施するにあたり東海大学工学部土木工学科卒業生の中村達夫君、日本大学理工学部交通土木工学科卒業生の出口鋭君ならびに日本イトン工業(株)研究所の村田茂樹氏に多大な御協力をいただいた。ここに謹んで感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) Zhang, M. H. and Gjorv, O.E. : Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete, ACI Materials Journal, Vol.88, No.2, pp.150-158, March-April 1991.
- 2) 人工軽量骨材協会：人工軽量骨材コンクリート技術資料 No.12, pp.61-64, pp.71-72, 1997.3
- 3) 橘大介・木村薫ほか：高品質人工軽量骨材が軽量コンクリートの物性改善に及ぼす効果，土木学会論文集，No.496/V-24, pp.89-98, 1994.8
- 4) 田村一美・多賀谷宏三ほか：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
- 5) 橘大介・今井實：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