

# 論文 実環境を考慮した試験方法による軽量骨材コンクリートの耐凍害性の評価

森 寛晃\*1・石川 雄康\*1・児玉 明彦\*2・鮎田 耕一\*3

**要旨:** 本研究では、実環境下における気象作用のうち、夏期の乾燥ならびに凍結融解過程の温度変化速度に着目し、より現実に近い環境条件で軽量骨材コンクリートの凍結融解試験を実施した。その結果、試験途中の乾燥行程は軽量骨材コンクリートの表層部の劣化程度に大きな影響を与え、劣化損傷は大幅に抑制されること、また部材寸法が大きくなり冷却速度が緩速となると、常時水中で凍結融解作用を受ける場合でも軽量骨材コンクリートの劣化損傷はごく表層部に限定され、内部はほとんど損傷を受けないことが分かった。

**キーワード:** 人工軽量骨材, 軽量骨材コンクリート, 凍結融解試験, 耐凍害性, 表層劣化

## 1. はじめに

近年、従来の軽量骨材と比べて低吸水性を有する軽量骨材が開発され、ポンプによる施工性と凍結融解に対する耐久性の両面に優れる軽量骨材コンクリートの実用化が期待されている。

軽量コンクリートの耐凍害性は、一般的に行われる JSCE-G 501(コンクリートの凍結融解試験方法)により評価する場合、普通コンクリートよりも著しく劣るのが通常である。そこで従来の軽量コンクリートでは、骨材の使用時の含水率を下げたり、試験前の乾燥によりコンクリートの含水条件を制御することで所定の耐凍害性が確保できることを示し<sup>1)</sup>、さらに実環境を考慮して試験条件を緩和した気中水中法や一面凍結法、あるいは現地気象条件と対応させた試験法を採用することで寒冷地へと適用されてきた<sup>2)</sup>。

低吸水性を有する軽量骨材を用いたコンクリートは、現行の規格試験でも従来の軽量コンクリートと比べて抵抗性は格段に増すものの、最終的にはコンクリート表層部が損傷を受けるとの報告もある<sup>3)</sup>。したがって過去の実績が少なく、暴露試験実施期間も十分でない現状においては、現行の規格試験と気象作用を考慮した試験方法を併用することにより軽量骨材コンクリートの耐久性性能

評価することが望ましい。

本研究では、実環境下における気象作用のうち、夏期の乾燥ならびに凍結融解過程の温度変化速度に着目し、より現実に近い環境条件で軽量骨材コンクリートの耐凍害性を評価することとした。

## 2. 実験概要

使用した軽量粗骨材は、真珠岩を主原料とし、絶乾密度が $1.2\text{t/m}^3$ 程度の低吸水性を有する造粒型人工軽量骨材である。

軽量骨材コンクリートの配合は、水セメント比40%、単位水量 $165\text{kg/m}^3$ および単位粗骨材量 $350\text{L/m}^3$ (粗骨材は絶乾状態で使用)を標準とし、さらにシリーズ2では水セメント比50%の配合も検討した。使用材料を表-1に、配合条件を表-2に示す。

### 2.1 乾燥行程を加味した急速水中凍結融解試験(シリーズ1)

試験体は $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体であり、材齢28日まで水中養生を行った後、凍結融解行程と乾燥行程を交互に繰り返し与えた。凍結融解行程は、JSCE-G 501に準拠して、供試体中心温度による制御で $-18^\circ\text{C}$ から $+5^\circ\text{C}$ の急速水中凍結融解サイクルを与えることとし、この時の連続サイクル数

\*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第二研究部 研究員, 工修(正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第二研究部 研究員(正会員)

\*3 北見工業大学 土木開発工学科 教授, 工博(正会員)

表—1 使用材料

使用材料	種類	物性
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3350cm <sup>2</sup> /g
細骨材(S)	小笠産陸砂	表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.86% 最大寸法: 5.0mm, 粗粒率: 2.75
粗骨材(G)	造粒型人工軽量骨材	絶乾密度: 1.19g/cm <sup>3</sup> , 24時間吸水率: 1.90% 最大寸法: 15mm, 粗粒率: 6.48
混和剤(Ad)	高性能 AE 減水剤	主成分: ポリカルボン酸エーテル系複合体
	AE 助剤	主成分: 変性アルキルカルボン酸化合物

表—2 コンクリートの配合条件

配合名	粗骨材の最大寸法	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			G	
						W	C	S	単位量(L/m <sup>3</sup> )	含水状態
1	15	8.0±2.5	5.5±1.5	40	46.8	160	400	801	350	絶対乾燥
2				50	48.8					

を 35 回, 70 回および 105 回の 3 水準とした。また乾燥行程は, 乾燥条件を 20℃・RH60%および 35℃・RH40%の 2 水準とし, 乾燥日数を 7 日間一定とした。連続サイクル数と乾燥条件を組み合わせることにより表—3 に示す 4 水準の試験条件で実験を行った。測定項目は共鳴一次振動数および供試体質量であり, 脱型直後, 35 サイクルごとに加えて乾燥行程終了時にも計測した。

## 2.2 大型試験体の緩速水中凍結融解試験(シリーズ 2)

表—2 に示す各配合につき 40×40×20cm の大型試験体を 2 体づつ作製し, いずれも材齢 28 日まで水中養生した後, 完全に浸水させた状態で 1 日 1 回の凍結融解サイクルを与えた。この時の試験槽内の温度設定は, 事前に計測した大型試験体内の温度履歴に基づき, -20℃一定で 12 時間, 続いて 20℃一定で 12 時間とした。

2 体のうち 1 体はコンクリートの劣化損傷検出用とし, 超音波パルス伝播速度の標準測定方法試験に準拠し, デジタル式音速測定器(パンジット,

周波数 30~100kHz)により超音波パルス(縦波弾性波)伝播速度を測定した。計測は図—1(a), (b)に示す透過法(直接法)ならびに表面法を採用し, 所定のサイクルが終了した時点で試験体を水中から引上げ, 表面が乾燥しないよう数時間恒温室内に静置してから行った。透過法による測定は 25 箇所, 表面法による測定は A 面の 20 箇所を実施した。

もう 1 体では打込み面からの深さ 50mm, 100mm および 200mm の位置に熱電対内蔵埋込型ひずみ計(東京測器, KM-100BT, 標点距離 100mm)を水平に埋設し, 試験中における試験体内部の温度履歴およびひずみ変化を測定した。

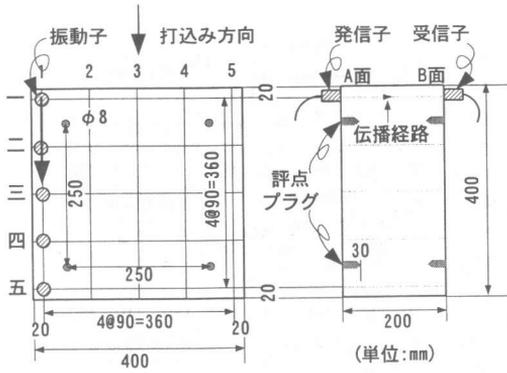
## 3. 実験結果および考察

### 3.1 試験途中の乾燥行程が軽量骨材コンクリートの耐凍害性に与える影響

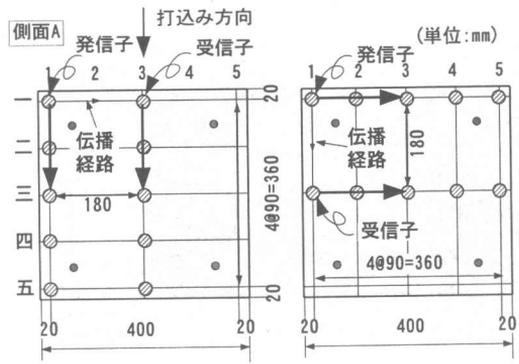
連続サイクル数を 35 回, 乾燥条件を 20℃・RH60%として, 凍結融解行程と乾燥行程を繰り返した場合の相対動弾性係数の経時変化ならびに脱型時を基準とした質量変化率の経時変化を図—2 および

表—3 乾燥行程を加味した試験条件

記号	試験行程
35c 乾燥 20℃	材齢 28day まで水中養生→凍結融解 35cycle→乾燥 7day→凍結融解 35cycle→乾燥 7day→… (乾燥条件 20℃・RH60%)
70c 乾燥 20℃	材齢 28day まで水中養生→凍結融解 70cycle→乾燥 7day→凍結融解 70cycle→乾燥 7day→… (乾燥条件 20℃・RH60%)
105c 乾燥 20℃	材齢 28day まで水中養生→凍結融解 105cycle→乾燥 7day→凍結融解 105cycle→乾燥 7day→… (乾燥条件 20℃・RH60%)
70c 乾燥 35℃	材齢 28day まで水中養生→凍結融解 70cycle→乾燥 7day→凍結融解 70cycle→乾燥 7day→… (乾燥条件 35℃・RH40%)



図一(a)透過法(直接法)による測定



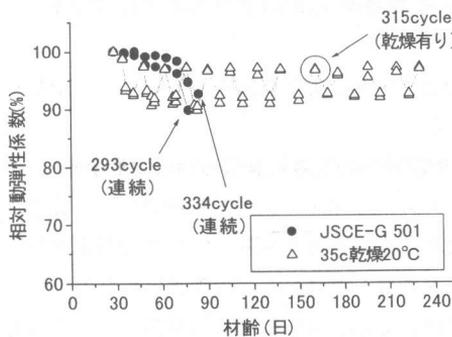
図一(b)表面法による測定

図一3に示す。なおJSCE-G 501に準拠し、315回まで連続サイクルを与えた結果を併せて掲載した。

乾燥行程が入ると試験体はコンクリート表層から乾燥するため、相対動弾性係数は一時的に小さくなる。試験体の劣化程度を知るには図一2に示す折れ線グラフの山となる各点の推移を見れば良い。これによると乾燥行程が入る場合には、凍結融解サイクル400回以降も相対動弾性係数95%以上を保持しており、連続サイクルを与える場合と比べて抵抗性は向上するようである。

図一3の質量変化率は、試験体の吸水ならびに乾燥による含水変化と試験体表層部の劣化による質量減少を足しあわせたものと解釈できる。連続サイクルを与えた場合には、試験開始から徐々に減少し、210サイクル以降その減少割合が大きくなった。これはスケーリングやポップアウトなどの表層劣化によるものであり、試験終了時には表層部の損傷が大きくなっていることが伺える。

これに対して乾燥行程を入れた場合には、図一2



図一2 相対動弾性係数の経時変化

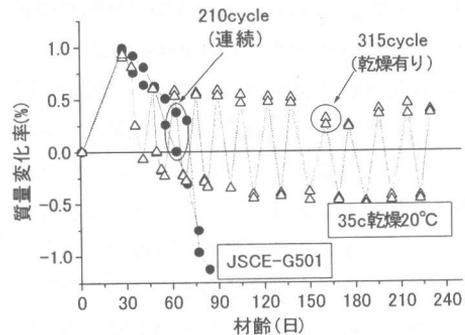
とほぼ同様な折れ線で横に推移し、凍結融解行程の終了時点(折れ線グラフの山)での質量変化率は試験期間を通じてほとんど減少していない。

低吸水性を有する軽量骨材を用いたコンクリートは表層近傍に分布する粗骨材が損傷を受ける可能性がある<sup>3)</sup>。これは従来の軽量骨材を用いたコンクリートと同様、ポンピング作用により表層付近の骨材内へと水分が押し込まれ、それに伴い浸透圧が発生するためと考えられるが、乾燥行程を入れることで、この浸透圧がある程度低減されたと推察している。

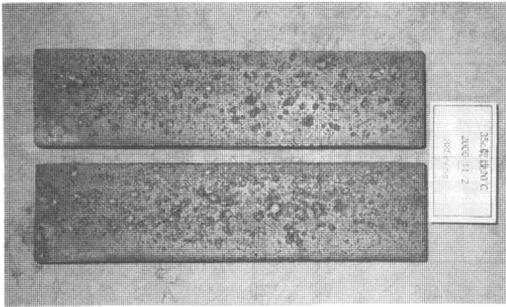
図一4は途中で乾燥行程を入れて385回の凍結融解サイクルを与えた試験体の外観写真であるが、表層部の損傷は極めて軽微なものであり、特に軽量骨材に起因するポップアウトはほとんど認められなかった。

### 3.2 連続サイクル数および乾燥条件の影響

次に、連続サイクル数を70回および105回としたもの、さらに連続サイクル数を70回、乾燥条件



図一3 質量変化率(脱型時基準)の経時変化



図—4 試験体の外観写真  
(35c 乾燥 20°C, 385 サイクル終了時)

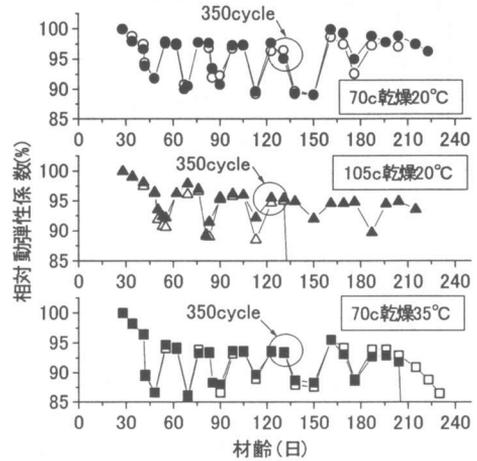
を 35°C・RH40%としたものの相対動弾性係数の経時変化ならびに脱型時を基準とした質量変化率の経時変化をまとめて図—5 および図—6 に示す。なお各試験条件につき2体のデータを掲載している。

図—5 の折れ線グラフの山を見ると、連続サイクル数を 70 回や 105 回とした場合でも、相対動弾性係数は試験期間を通じて 95%付近を推移しており、凍結融解サイクルが 500 回を越えても抵抗性を保持している。また図—6 からは、連続サイクル数の多いものほど右下がりに推移しており、コンクリート表層部の損傷は大きくなるのが分かった。

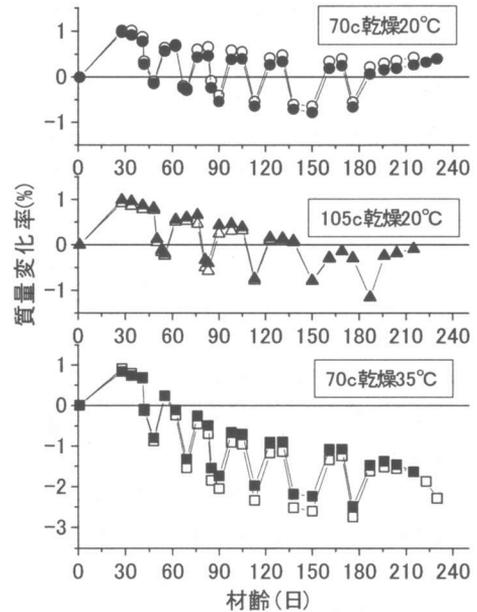
連続サイクル数が多いほど 1 度の凍結融解行程で骨材内へと押し込まれる水分が多く、発生する浸透圧も大きくなる。しかし連続サイクルが 105 回程度までであればポップアウトを誘発するだけの浸透圧には至らず、続く乾燥行程で浸透圧が低減され、コンクリート表層部の劣化損傷が抑制されたものと考えられる。

次に乾燥条件の異なるものを比べると、乾燥条件を 35°C・RH40%としたものの方が相対動弾性係数や質量変化率は低下する傾向が見られた。

従来の軽量骨材コンクリートでは、一般的には試験前に乾燥させると耐凍害性は向上するとされている<sup>1)</sup>。一方、普通コンクリートでは、試験前に過度に乾燥させるとスケーリングなど表層劣化が大きくなり、耐凍害性の低下する場合があることが知られている<sup>4)</sup>。低吸水性を有する軽量骨材を用いたコンクリートでは、35°Cの乾燥条件では乾燥による質量変化率の変動は 1.5%程度となり、



図—5 相対動弾性係数の経時変化



図—6 質量変化率(脱型時基準)の経時変化

最終的な表層部の劣化損傷も大きくなることが確認できた。

### 3.3 大型試験体の温度履歴ならびに変形挙動

水セメント比 40%の大型試験体のひずみ計埋設位置における温度履歴を図—7 に、また測定されるひずみからコンクリートの線膨張係数を仮定して、温度変化による膨張収縮ひずみを除去し、これを温度に対してプロットしたもの(以下では  $t-\epsilon$  関

係と表記を図-8に示す。

図-7によると、打込み面からの深さが浅い地点ほど試験槽内の温度変化によく追従し、深さ5cmと20cmの地点では最大5°C前後の温度差が生じている。また大型試験体の中心部(深さ20cmの地点)でも凍結融解作用を受けていることが分かる。

次に図-8によると、各地点とも $t-\varepsilon$ 関係は直線的であり、凍結過程と融解過程の経路もほぼ一致している。これに対して、既報<sup>5)</sup>では同配合のコンクリートでJSCE-G 501に準拠した凍結融解サイクルを与える場合の変形挙動を検討し、凍結過程と融解過程の経路が明確に異なる履歴曲線となることを示している。これらの履歴の違いは主として両試験における冷却速度の相違によるものと思われるが、試験体の寸法が異なり冷却方向も一次元的ではないため結論付けることはできない。

大型試験体の各地点は300回以上の凍結融解サイクルを与えた後も直線的な変形挙動を示し、凍害劣化の指標である残留膨張ひずみはいずれの個所でも生じていない。冷却速度が緩速の場合には、大型試験体の内部が損傷を受け、コンクリート組織のゆるみなどが生じる可能性は小さいものと考えられる。

### 3.4 超音波伝播速度による表層部の劣化損傷程度の評価

透過法ならびに表面法における超音波の伝播経路は図-1(a), (b)に示す通りであり、透過法ではコンクリート内部、また表面法ではコンクリート表層部の劣化損傷を検出できるものと考えた。

透過法の測定結果として3列の三行と五行の2個所、また表面法の測定結果として1列と3列の三行および五行の2箇所での超音波伝播速度の変化をそれぞれ図-9および図-10に示す。

図-9によると、配合条件に関わらず凍結融解サイクルの進行に伴う超音波伝播速度の変化は小さく、300回以上の凍結融解作用を受けた後でも4000m/sec程度を保持している。このことは3.3での考察結果と良く対応しており、コンクリート内部の劣化損傷は生じていないと言える。

これに対して、表面法の測定結果を示した図-

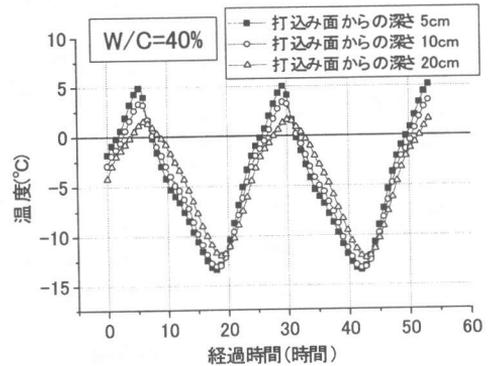


図-7 大型試験体の深さ方向各地点における温度履歴

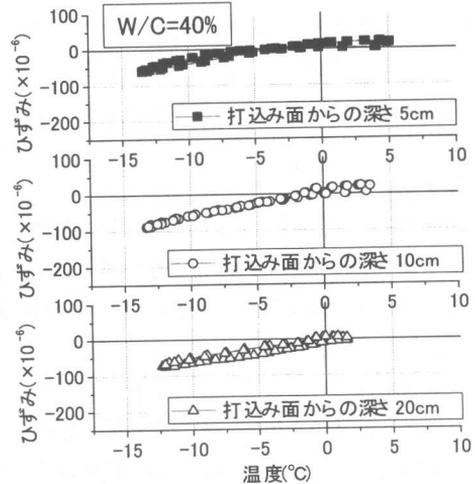
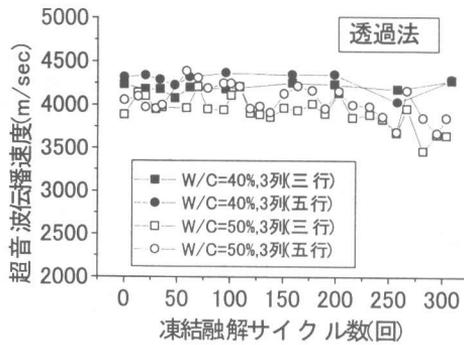
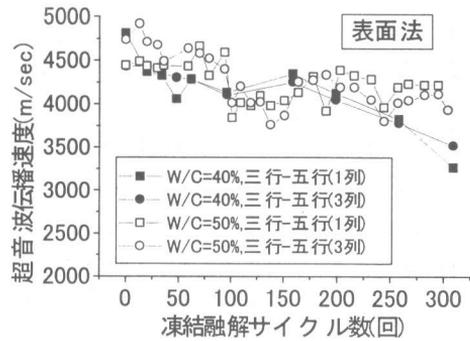


図-8 大型試験体の深さ方向各地点における変形挙動

10によれば、試験開始時の超音波伝播速度は透過法の場合よりも若干大きく4500~5000m/secであり、その後サイクルの進行とともにやや変動して、最終的には4000m/sec程度となった。図-11に示す305サイクル終了時における大型試験体の外観写真では、表面にスケーリングが生じ、さらに粗骨材が部分的に露出する個所も見られたことから、図-10の超音波伝播速度の変化は主としてスケーリングなどによる表面の凹凸が原因と考えられた。冷却速度が緩やかな場合でも、常時浸水させた



図—9 透過法による測定結果



図—10 表面法による測定結果

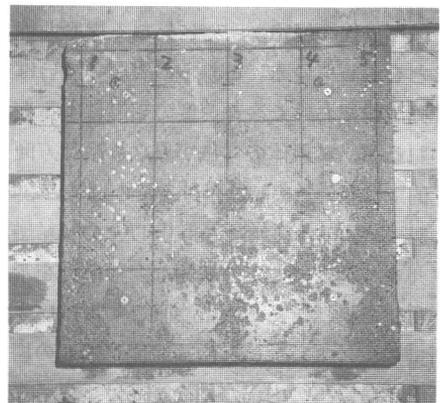
状態で凍結融解サイクルを与えるとコンクリート表面のスケリングを完全に抑制することは難しい。しかし JSCE-G 501 に準拠した急速水中凍結融解試験で見受けられる軽量骨材のポップアウトやスポーリングは生じず、コンクリート表層部の劣化損傷は非常に軽微なものであることが分かった。

#### 4. まとめ

本研究では、実環境下における気象作用を考慮した 2 種類の凍結融解試験を実施して、軽量骨材コンクリートの耐凍害性を評価した。得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 低吸水性を有するの軽量骨材を用いたコンクリートは常時水中で、かつ連続的に急速水中凍結融解作用を受けると、最終的には表層近傍に分布する骨材個所が損傷を受ける。
- (2) 連続的に凍結融解作用を受けた後、一時的にコンクリート表面が乾燥すると、軽量骨材コンクリート表層部の損傷は大幅に軽減され、凍結融解作用に対する抵抗性は向上する。
- (3) 部材寸法が大きくなり冷却速度が緩速となると、常時水中で凍結融解作用を受ける場合でも軽量骨材コンクリートの劣化損傷はごく表層部に限定され、内部は損傷を受けない。

本研究を実施するにあたりドーピー建設工業(株)松井敏二氏ならびに北見工業大学大学院生の佐藤裕也君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。



図—11 大型試験体の外観写真  
(W/C=50%, 305 サイクル終了時)

#### 【参考文献】

- 1)長谷川寿夫・洪悦郎：人工軽量骨材コンクリートの乾燥と耐凍害性の関係，セメント技術年報，36，pp.367-370，1982
- 2)中村修吾・檜貝勇：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，pp.61-69，1974
- 3)森寛晃ほか：凍結融解作用を受ける軽量骨材コンクリートの表層部の性状，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-377，pp.756-757，2000
- 4)田畑雅幸・鎌田英治・宮崎重宗：コンクリートの耐凍害性におよぼす乾燥の影響，セメント技術年報，32，pp.365-368，1978
- 5)森寛晃・石川雄康・柴田辰正・岡本享久：凍結融解作用を受ける軽量骨材コンクリートの劣化過程，材料，第 48 巻，第 8 号，pp.889-894，1999