

論文 コンクリートの凍結融解促進試験による温度および履歴時間の合理化に関する研究

黒田一郎^{*1}・加藤清志^{*2}・加藤直樹^{*3}・河合紘茲^{*4}

要旨：コンクリートの気象作用に対する耐久性評価には凍結融解試験法が全世界的に採用されている。しかしながら、試験時の暴露条件に対しての合理性の見直し・検討は行なわれていない状況にある。本研究では試験所要時間の短縮が可能な促進試験法を提案することを目的とし、供試体の温度条件 $-5\sim 5^{\circ}\text{C}$ 、1サイクル所要時間48分(空中凍結水中融解法)の条件下での凍結融解試験結果を報告する。本試験では、氷点近傍の温度域($-5\sim 5^{\circ}\text{C}$)における相対動弾性係数の低減ならびに表面劣化(ポップアウト)の進行を定量的に評価できた。

キーワード：凍結融解, 促進試験法, ポップアウト, コンクリート

1. まえがき

本研究はコンクリートの表面劣化の進行を評価可能で、試験時間を大幅に短縮し得る実用的な凍結融解促進試験法を提案することを目的とする。

コンクリートの凍結融解試験法における暴露条件としては、コンクリート標準示方書¹⁾ではASTM C-666に準拠し、 $-18(\pm 2)\sim 5(\pm 2)^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で1サイクルの所要時間3~4時間と規定されている。しかし、凍結融解による表面劣化の現象論的視点に立てば下限温度は $-18(\pm 2)^{\circ}\text{C}$ の極低温まで冷却する必要はなく、コンクリートの凍結融解が生じる温度範囲の繰り返し作用が劣化を促進させると考えられる。試験における温度範囲を狭くすることによって凍結・融解の1サイクルの所要時間も短くすることが可能となり、促進試験法として実用的である。そこで本研究では温度範囲 $-5\sim 5^{\circ}\text{C}$ 、1サイクルの所要時間48分とした促進試験を行ない、マトリックスのポップ

アウトによる表面劣化の定量的評価を試みるとともに、その促進試験法の有用性を検討する。

2. 促進試験法

2. 1 供試体

従来、コンクリートの凍結融解試験用供試体としては $10\times 10\times 40\text{mm}$ の長角柱供試体を使用されている。これを $\phi 10\times 20\text{mm}$ の円柱供試体とすれば強度管理用供試体と併用することができるようになるだけでなく試験装置の寸法をコンパクトにできる点でもメリットがある。また、長角柱供試体では8辺の稜が劣化を促進させ過ぎる傾向にある²⁾ので、2稜を持つ円柱供試体とすればこの影響を軽減することが出来る。そこで、本研究では供試体形状として $\phi 10\times 20\text{mm}$ の円柱供試体を採用した。

配合は水セメント比 $W/C=45, 50, 55\%$ の3種のAEコンクリートとし、表-1に示す示方

*1 防衛大学校講師 土木工学教室 博(工学) (正会員)

*2 防衛大学校教授 土木工学教室 工博 (正会員)

*3 浅野工学専門学校教授 建築工学科 (正会員)

*4 日本大学生産工学部教授 土木工学科 工博 (正会員)

表-1 示方配合

番号	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
1	50	18	42.1	182	364	725	997	0.91
2	55	18	43.8	176	320	777	997	0.80
3	60	18	44.6	175	292	803	997	0.73

(共通条件)普通セメント, 粗骨材最大寸法25mm, 川砂, 川砂利

配合を用いた。各配合につき複数回打設したがいずれも空気量は $2.7 \pm 0.5\%$ の範囲内であった。また、使用した細骨材は川砂、粗骨材は川砂利であり、これらの物理特性を表-2に示す。

2. 2 試験条件・測定項目

暴露条件は、前述のとおり、温度範囲-5~5℃、1サイクル所要時間48分の気中凍結水中融解法とした。1サイクル中で凍結、融解の所要時間はそれぞれ32分および16分である。温度制御は供試体中心に埋め込まれた熱電対による。30サイクル終了ごとに動弾性係数、供試体質量を測定し、300サイクルまで繰り返した。なお、1サイクル所要時間が短く設

表-2 骨材の物理特性

	表乾比重	絶乾比重	吸水率(%)
細骨材	2.16	1.98	8.8
粗骨材	2.59	2.53	2.1

定されているため300サイクルに要する時間は240時間(10日)となり、広く採用されているASTM C-666と較べて大幅に短縮されている。

凍結融解作用によるポップアウトの発生により供試体表面には小孔が発生し、供試体表面が欠損する(写真-1および写真-2)。そこで、60サイクル終了毎に供試体表面に生じた小孔の長径 A 、短径 B および最大深さ h を計測した(図-1参照)。なお、発生した小孔の

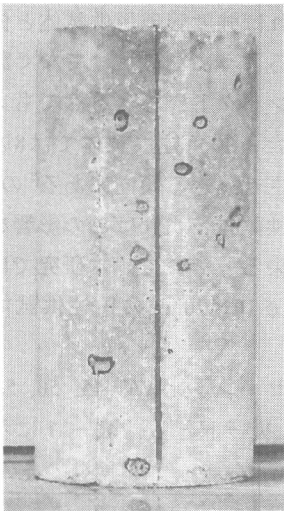


写真-1 表面の欠損
W/C=60%, 180サイクル
欠損部(小孔)は着色

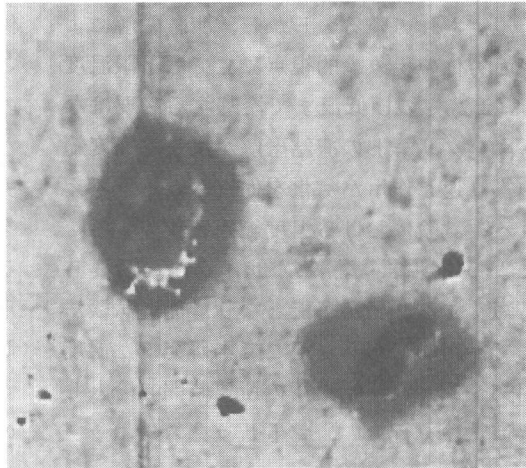


写真-2 表面の欠損(拡大)

W/C=60%, 180サイクル
左側の小孔は長径6mm, 短径4mm, 深さ4mm
右側の小孔は長径4mm, 短径2mm, 深さ3mm

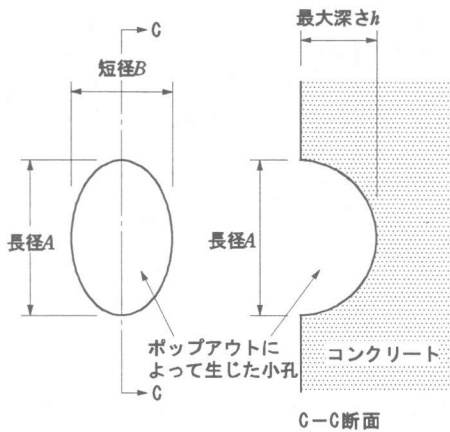


図-1 小孔の寸法

内部を詳細に観察したところ、一部の小孔では小孔の底部に粗骨材の断面が露出していたが、大多数の小孔では粗骨材の断面は認められなかった。このことより、ほとんどの小孔はマトリックスのポップアウトによって生じたものと考えられる。

3. 試験結果

ポップアウトの発生に伴う供試体表面の欠損を定量的に評価するために次の式(1)で示す表面欠損率 α (%) を提案する。

$$\alpha = \frac{\sum A \cdot B}{S} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 A および B は供試体表面に生じた小孔の長径および短径、 S は試験開始前の供試体全表面積である。式中、 A と B の積によって小孔の面積の概略値を表わしている(実際には、ほとんどの小孔の形状は楕円形に近い)。サンメンション Σ は試験開始後に発生した小孔全てについて合計することを表わしている(試験開始以前から供試体表面にあっ

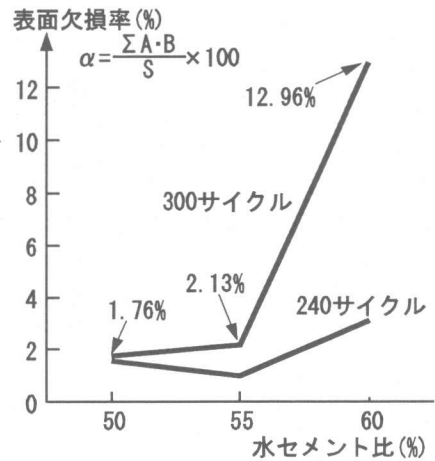


図-3 表面欠損率と水セメント比の関係

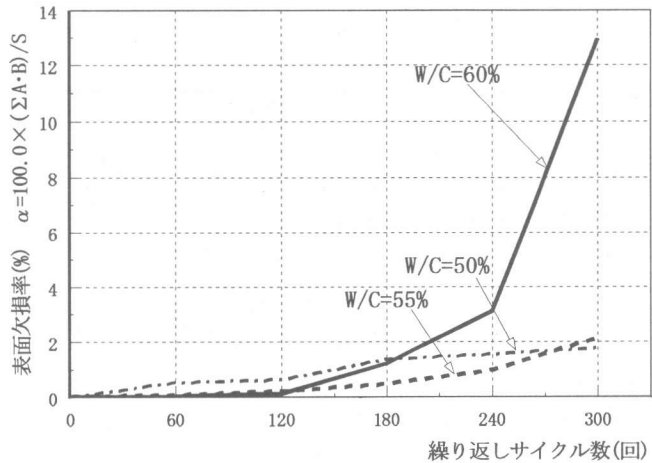


図-2 表面欠損率とサイクル数の関係

た小孔については除外する)。この表面欠損率 α は、欠損した表面積の、供試体全表面積に占める割合であり、表面劣化進行の度合いを定量的に評価するものである。

図-2に表面欠損率 α と凍結融解サイクル数との関係を示す。凍結融解作用の繰り返しによって表面欠損率が徐々に増加しており表面劣化が進行している。この傾向は水セメント比 W/C が大きな供試体ほど顕著であり、表面欠損率 α と水セメント比 W/C の関係を示した図-3を見れば、300サイクル終了時点で

水セメント比W/C=55%と60%では表面欠損率は約6倍の差を示している。

一方、動弾性係数(相対動弾性係数), 供試体質量と凍結融解サイクル数との関係を図-4および図-5にそれぞれ示す。いずれの供試体においても供試体質量はほとんど低下していないが, 相対動弾性係数は徐々に低下しており, W/C=60%の供試体では240サイクル終了時点で約80%, 300サイクルで約60%まで低減している。この相対動弾性係数の低減はコンクリート内部に発生した微細クラックによるものと考えられる。

上述の表面欠損率 α の傾向と併せて考察すれば, 暴露温度条件を-5~5℃, 1サイクル所要時間48分とした本試験法は, 供試体内部の劣化, 供試体の表面劣化ともに惹起し進行させる試験法であることが確認される。

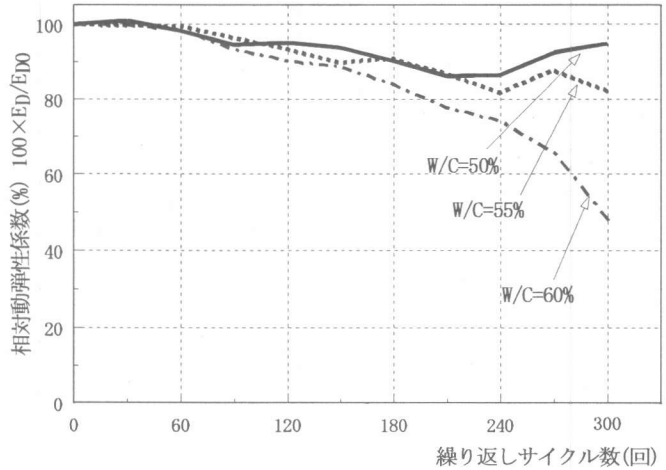


図-4 相対弾性係数とサイクル数の関係

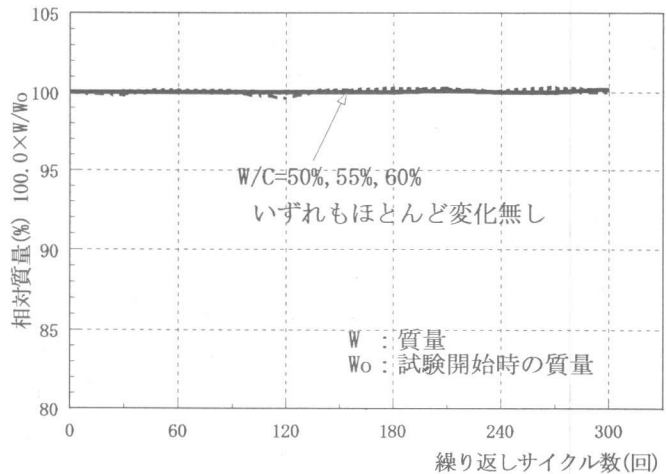


図-5 供試体質量とサイクル数の関係

4. ポップアウト発生のみカニズム

本研究で提案する凍結融解促進試験では, 氷点近傍の温度条件でマトリックスのポップアウトを発生させ供試体の表面劣化が進行することが明らかとなった。以下にそのメカニズムを説明する。

図-6に示すように, 独立気泡内に浸透した水の結氷圧によってマトリックスのポップアウトが生じると仮定する。図中の仮想厚肉球殻が気泡内の氷圧によって弾性破壊するものと仮定し, 図中の最大接線方向引張応力 $\sigma_{\theta \max}$ が設計引張強度 f_{td} に達したときに弾

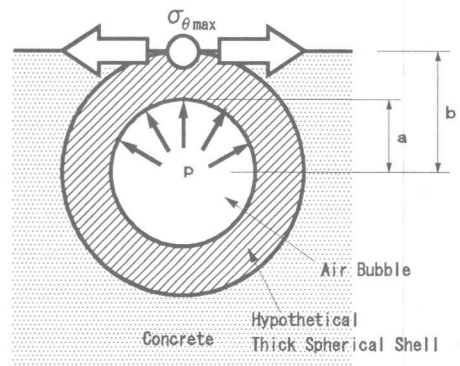


図-6 仮想厚肉球殻の破壊

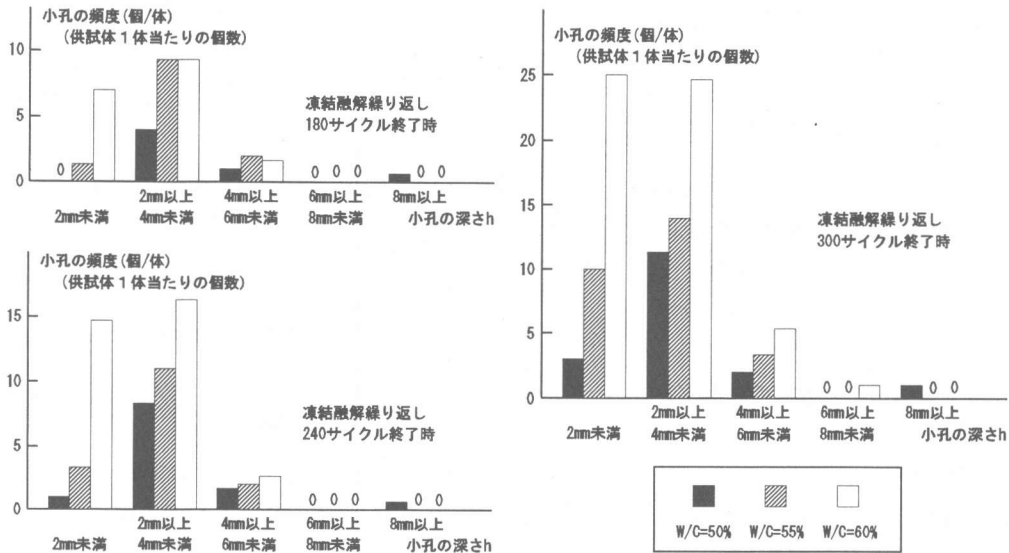


図-7 小孔深さの頻度分布

性破壊するならば半径比 $\lambda (=b/a)$ と気泡内の結氷圧 p および設計引張強度 f_{td} との関係は次の式で表わされる。

$$\lambda = b/a = \left(\frac{1+p/f_{td}}{1-0.5p/f_{td}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 a ：球殻の内径、 b ：球殻の外径(ともに図-6参照)

一方、結氷の温度 T と圧力 p との関係は次の式で表わされる。

$$p = p_0 (1 - T/0.0099) \quad (3)$$

ここに、 p_0 ：標準気圧(0.098N/mm²)

式(2)および(3)より、半径比 λ は

$$\lambda = \left\{ \frac{1+0.098 \left(1 - \frac{T}{0.0099} \right) / f_{td}}{1-0.049 \left(1 - \frac{T}{0.0099} \right) / f_{td}} \right\}^{1/3} \quad (4)$$

と表わされる。

一般に、AEコンクリートにおいては気泡の平均径は250 μ m程度とされている。図-7に示す今回の試験で観測されたポップアウトによる小孔深さ h の頻度分布を見れば、小孔深さ h は2~4mm程度のものが多く、6mmよ

りも深いものは稀である。即ち、ポップアウトを生じた球殻の半径比 λ は大きく見積もっても12程度であったと考えられる。そこで、上述の式(4)において、 $\lambda=12$ とし、標準的な設計引張強度 f_{td} を仮定するならば、結氷温度 $T=-1^{\circ}\text{C}$ 程度の冷却によって充分ポップアウトが生じ得ることが確認できる。その具体的な計算例として、設計引張強度 f_{td} が2.0N/mm²、3.0N/mm²、4.0N/mm²および5.0N/mm²の場合の半径比 λ - 結氷温度 T 関係を式(4)を用いて求め、図-8に示す。

以上より、今回の凍結融解促進試験で観察されたポップアウトによる表面劣化のメカニズムは、上述の氷圧による球殻の弾性破壊モデルを用いて説明可能であることが確かめられる。また、本章の仮定に基づけばポップアウトを生じるためには結氷の温度は -1°C 程度(本試験法においては下限温度 -5°C)まで冷却すれば充分であると考えられる。

以上の説明においては空隙(球殻)内の水の氷点が 0°C であると仮定されている。しかし、現実問題では、空隙内の水は空隙内部の表面力の影響を受けその氷点が降下することが知

られている。Stockhausen³⁾らによって提案された空隙の氷半径と氷点降下との関係は次の式で表わされる。

$$\ln(T_o/T_f)=0.33/(R_h-1.0) \quad (5)$$

ここに、 T_o ：表面力の影響を受けない水の氷点(k)、 T_f ：表面力を受ける水の氷点(k)、 R_h ：空隙の氷半径(nm)

氷半径 R_h は、空隙の体積 V と表面積 S を用いて、

$$R_h=V/S \quad (6)$$

と表わされる。ここで、AEコンクリートの平均的な気泡径 $250 \mu m$ を仮定するならば、式(5)より空隙内部の表面力の影響による氷点の低下は無視できるほど小さいことが分かる。

表面力の影響以外にも空隙中の氷点を降下させる要因としては、溶解物質の影響や過冷却現象の影響を挙げることができる。

この内、溶解物質による影響に関しては本実験では融氷塩を投入しておらず溶解した物質の濃度が非常に低いので氷点降下は極めて小さい。

一方、過冷却現象の影響に関しては氷点を降下させる要因として十分に考慮すべきファクターではあるが、冷却速度や空隙の大きさ等多くの要素に影響される現象であるので、本試験法の試験条件に合致させて今後検討を進める必要がある。また、本節で示すメカニズムは独立気泡を想定して説明されているが、コンクリートの気泡システムとの関連性についても検討の必要がある。

5. まとめ

本研究では、コンクリートの実用的な凍結融解促進試験法を提案し、その有用性を検討した。

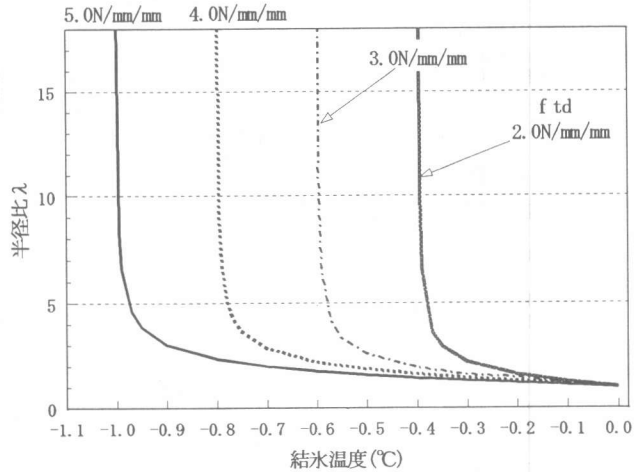


図-8 結氷温度と半径比の関係

$$f_{td}=2.0, 3.0, 4.0, 5.0 \text{ N/mm}^2$$

その結果、提案した試験法について、以下の点を確認した。

- ①ASTM C-666試験に較べて短い所要時間、および氷点に近い下限温度(-5°C)で相対動弾性係数の低減が観察可能である。
- ②表面劣化(ポップアウト)を惹起し、コンクリート表面からの劣化を進行させる。

また、観察されたマトリックスのポップアウト発生のメカニズムを説明し得る簡便な弾性破壊モデルを提案した。そのモデルを用いた計算によれば、氷点(0°C)に近い温度においてマトリックスのポップアウトが発生する可能性があることがわかった。

参考文献

- 1)土木学会コンクリート委員会編：コンクリート標準示方書，丸善，1996。
- 2)加藤直樹他：促進形凍結融解試験法の実験的検証に関する研究，第27回土木学会関東支部技術研究講演概要集，2000.3。
- 3)N.Stockhausen, H.Dormer, M.Zech und M.J. Setzer：Untersuchung von Gefriervorgängen in Zementstein mit Hilfe der DTA, Cement and Concrete Research, Vol.9, pp.783-794, 1979。