

凍結融解作用を受けるセメントペーストのひずみ挙動

Strain behavior of cement paste subjected to freezing and thawing

北海道大学大学院工学院 ○学生員 渡邊洋文 (Hirofumi Watanabe)
 北海道大学大学院工学研究院 正 員 志村和紀 (Kazunori Shimura)
 北海道大学大学院工学研究院 正 員 杉山隆文 (Takafumi Sugiyama)

1. はじめに

寒冷地におけるコンクリート構造物の凍害は、古くから大きな問題となっており、多くの研究がなされてきた。また、耐凍害性の評価方法として、我が国では急速凍結融解試験方法が JIS A1148 で規定されている。この試験の測定項目は、相対動弾性係数および質量減少率である。また、附属書 A には長さ増加比試験方法が規定されている。これらの測定はいずれも融解過程後に行うことになっており、凍結時は供試体が水で覆われているため、連続的な測定は難しい。

コンクリートの凍結融解全過程における性状の変化を連続的に把握することができれば、耐凍害性および凍害のメカニズムに関するより詳細な検討が可能となると考えられる。また、コンクリートによる検討を行う以前に、セメントペーストを対象とした基本的な検討を行うことが必要と考えられる。凍害のメカニズムには種々の説があるが、主に水の移動とその膨張挙動に起因していることは共通しており、その影響を捉えるにはひずみを測定することが有効と考えられる。

本研究は、セメントペースト供試体にモールドゲージを埋め込み、凍結融解作用時の内部ひずみを連続的に測定し、水セメント比、連行空気および含水状態がひずみ挙動に及ぼす影響について検討することを目的とし、さらに含水量の異なるセメントペーストの線膨張係数に関する検討を加えた。

2. 実験方法

供試体はセメントペーストとし、普通ポルトランドセメントおよび井水を用いて作製した。

凍結融解における性状の変化が現れやすいように、水セメント比は 0.6 とし、空気量についてはプレーンおよび AE ペーストの 2 水準とした。

供試体の種類を表-1 に示す。

表-1 供試体記号および配合

供試体	W/C	空気量(%)
06PL	0.6	1.4
06AE	0.6	4.2

供試体は図-1 に示すように 40mm×40mm×160mm の角柱供試体とし、モールドゲージを埋め込んだものと質量および相対動弾性係数測定用の埋め込まないものの 2 種を作製した。

含水状態がひずみ挙動に及ぼす影響を把握するため、

水分の供給が許される水中凍結融解および含水量を変化させた封緘供試体（飽水:含水率 24%、気乾:含水率 8%、絶乾）の凍結融解試験を行うこととし、水中供試体は鋼製容器内で水に浸漬し（図-2）、封緘供試体は厚さ 0.03mm のポリエチレンフィルムで密封した。

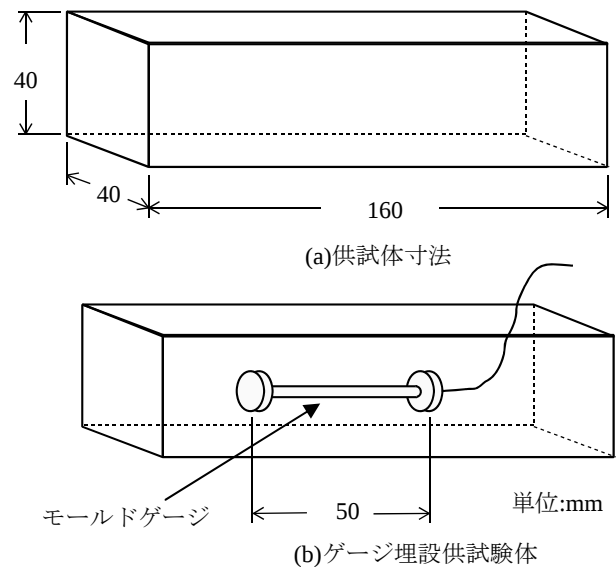


図-1 供試体

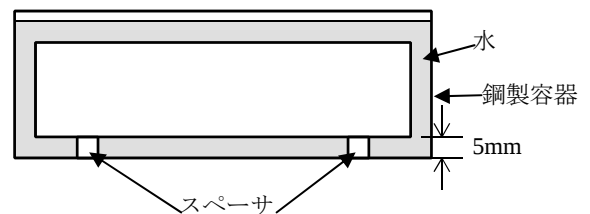


図-2 水中供試体

供試体は材齢 28 日まで 20℃水中養生を行い、水中凍結融解供試体および封緘飽水供試体は、ただちに凍結融解試験を開始した。封緘気乾および封緘絶乾供試体は所定の含水率になるまで 80℃で乾燥を行った後、ポリエチレンフィルムで密封し、凍結融解試験を開始した。試験は室温が変化する低温室で行った。1 サイクルを 12 時間とし、最高温度を 25℃、最低温度を-25℃とした。なお、追加実験として封緘気乾供試体の凍結融解試験終了後（110 サイクル）、密封したフィルムを取り去り、改めて水中凍結融解試験を行った。

図-3 に室温、水中供試体中心温度および封緘供試体（飽水）中心温度の挙動を示す。これによれば、封緘供

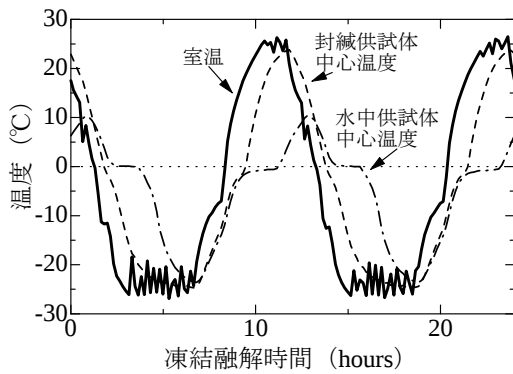


図-3 室温および供試体中心温度の挙動

試体中心温度は室温に比べ幾分変化の遅延が認められるが、最高最低温度共に室温とほぼ一致した。水中供試体では、融解時の最高温度が室温に比べ低くなるが、 $+10^{\circ}\text{C}$ 程度には達しており、融解時に氷は中心部まで融けていることが示された。

供試体中心部の軸方向ひずみ並びに温度をモールドゲージで測定し、データロガーにより記録するとともに、劣化判断基準の参考として融解時に質量および超音波伝播速度の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 セメントペースト供試体のひずみ挙動

セメントペースト供試体を水中、飽水、気乾および絶乾の4つの状態でそれぞれ凍結融解試験を行った。

06PL 水中供試体のひずみ挙動を図-4 および図-5 に示す。

図-4 によれば、凍結融解開始から凍結過程と融解過程は一致せず、各サイクル毎に膨張を示し、残留ひずみが增大している。10 サイクルでは、融解時の残留ひずみが 1000×10^{-6} 程度となった。

図-5 によれば、10 サイクル以降では、供試体は凍結融解サイクルの増大に伴って収縮を示している。しかし、供試体の外観観察によれば、供試体は膨張を続けていると思われる。これは、供試体の剛性がモールドゲージの剛性を下回り、ゲージを拘束できなくなったためと考えられる。すなわち、この供試体の場合、10 サイクル以降は内部ひずみを測定できなくなったと考えられる。また、超音波伝播速度は 10 サイクル程度で測定不能となっており、劣化が相当に進行していたと判断できる。

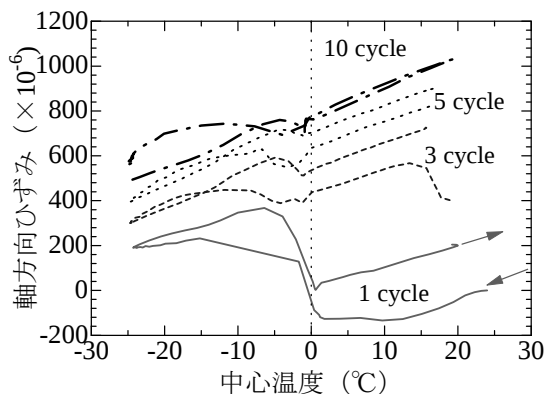


図-4 水中供試体(06PL)のひずみ挙動(1-10cycle)

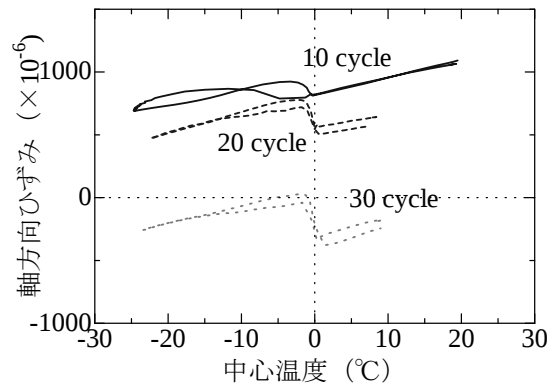


図-5 水中供試体(06PL)のひずみ挙動(10-30cycle)

06AE 水中供試体のひずみ挙動を図-6 に示す。これによれば、ひずみの値はサイクル数の増加とともに膨張を示しているが、60 サイクルにおける融解時の残留ひずみは 500×10^{-6} 程度であり、06PL 供試体に比べれば膨張量は小さい。また、他の 06AE 供試体では 60 サイクルにおける残留ひずみが 200×10^{-6} であり、AE ペーストとすることによって凍結融解に伴う膨張を抑制することが示された。

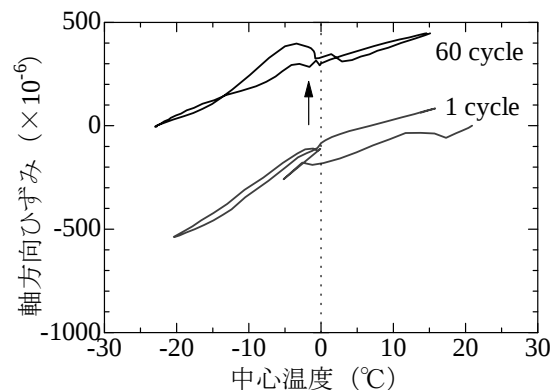


図-6 水中供試体(06AE)のひずみ挙動(1-60cycle)

06PL 飽水供試体のひずみ挙動を図-7 に示す。これによれば、凍結融解初期から膨張を示し、残留ひずみが 1000×10^{-6} 程度に達する。しかし、06PL 水中供試体が生じたような収縮現象は見られず、大きな劣化は見られなかった。また、他の 06PL 飽水供試体が生じた残留ひずみは 300×10^{-6} であり、水分供給の無い条件では、セメントペーストが飽水状態であっても、凍結融解に伴う劣化は抑えられると考えられる。

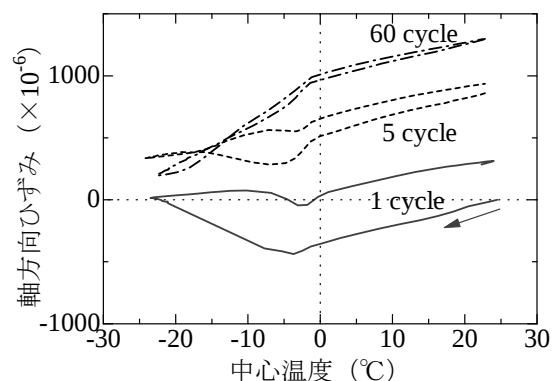


図-7 飽水供試体(06PL)のひずみ挙動(1-60cycle)

06AE 飽水供試体のひずみ挙動を図-8 に示す。これによれば、06PL 水中および飽水供試体で見られた凍結過程における膨張現象は生じず、連行空気が水分の凍結時の膨張を緩和する効果があることがわかった。また、サイクルの経過に伴う残留ひずみもほとんど生じない。

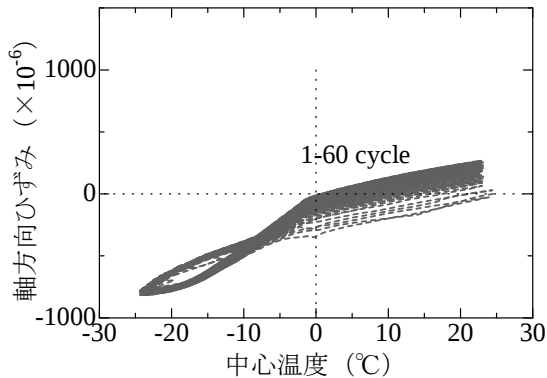


図-8 飽水供試体(06AE)のひずみ挙動(1-60cycle)

06PL 気乾供試体のひずみ挙動を図-9 に示す。これによれば、凍結融解サイクルの経過に伴い収縮の残留ひずみを示し、60 サイクルで -500×10^{-6} 程度となった。これは凍結融解の過程で供試体外縁部と中心部の間に水分の移動が生じ、局所的な乾湿繰返しが生じ、それに伴う収縮が生じたものと推測される。

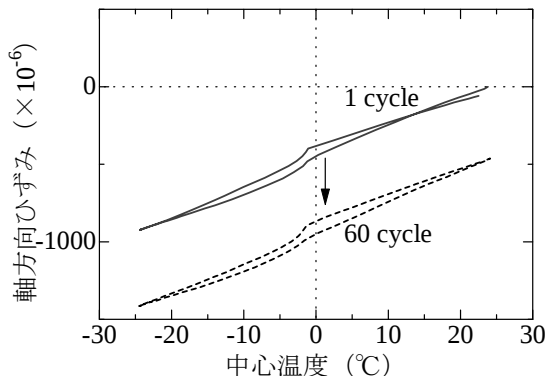


図-9 気乾供試体(06PL)のひずみ挙動(1-60cycle)

06PL 気乾供試体の凍結融解試験終了後、封緘フィルムを取り去り、水中凍結融解に供したもののひずみ挙動を図-10 に示す。

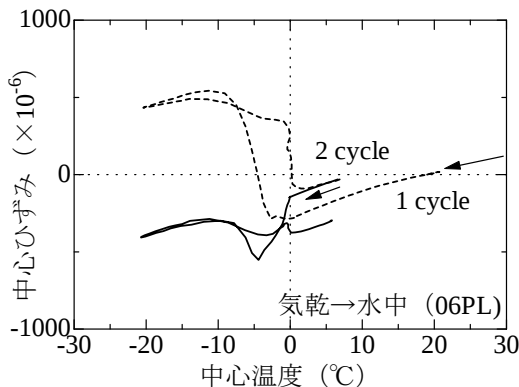


図-10 気乾→水中供試体(06PL)のひずみ挙動

これによれば、凍結融解開始 1 サイクルで急激な膨張を示し、2 サイクル目では収縮に転じている。これは図-5 で示したようにモールドゲージを拘束できないほど劣化が生じているためと考えられ、2 サイクルにおける超音波伝播速度も測定不能であった。気乾凍結融解の際に、前述したように乾湿繰返しに相当する作用があったとすれば、その後の凍結融解で耐凍害性が低下するという報告¹⁾とも合致し、気乾凍結融解の履歴のあるセメントペーストが水分供給環境凍結融解に供される場合の特徴と考えられる。

図-11 に 06AE 気乾供試体のひずみ挙動を示す。これによれば、06PL 気乾供試体と同様、凍結融解サイクルの経過に伴う収縮が認められた。

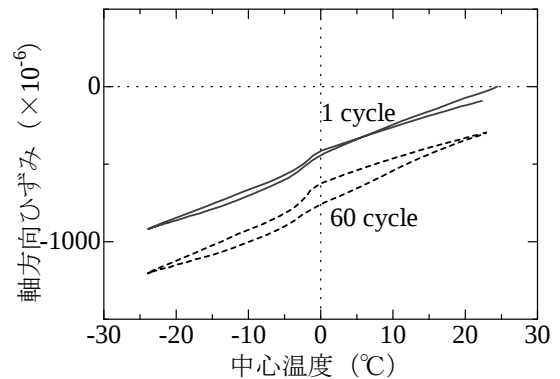


図-11 気乾供試体(06AE)のひずみ挙動(1-60cycle)

次に、06AE 気乾供試体の凍結融解試験終了後、封緘フィルムを取り去り、水中凍結融解試験を行った(図-12)。これによれば、ひずみ挙動は気乾状態の場合と類似しており、06PL 供試体のような急激な劣化は見られず、膨張あるいは収縮の残留ひずみは生じなかった。

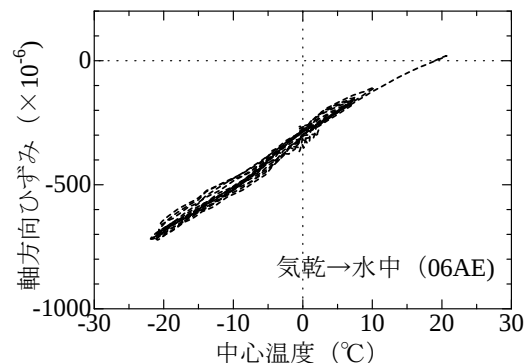


図-12 気乾→水中供試体(06AE)のひずみ挙動

06PL および 06AE 絶乾供試体のひずみ挙動を図-13 および図-14 に示す。これらによれば、いずれの場合も凍結融解サイクルの経過に伴う残留ひずみは生じず、降温過程と昇温過程が一致する直線を示した。また、その勾配もブレンペーストと AE ペーストではほぼ同一であった。

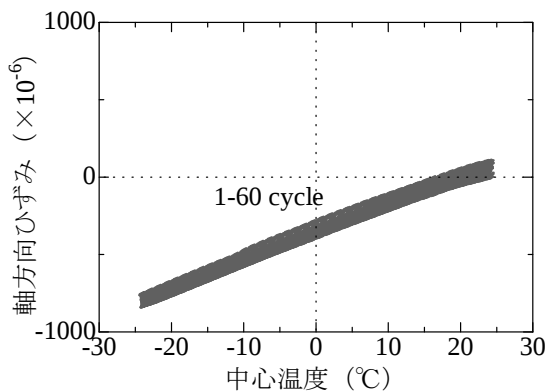


図-13 絶乾供試体(06PL)のひずみ挙動(1-60cycle)

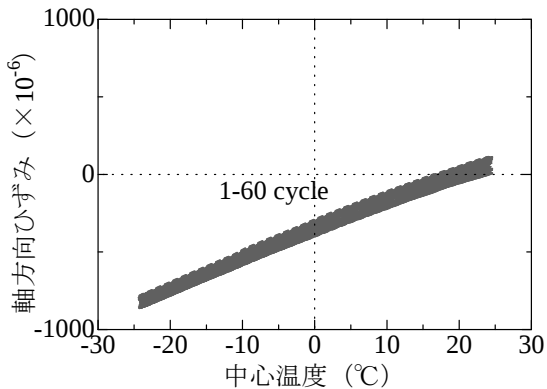


図-14 絶乾供試体(06AE)のひずみ挙動(1-60cycle)

3.2 線膨張係数の検討

測定されたひずみと温度の関係図の直線の勾配は線膨張係数に相当するものを表す。本実験では、中心温度と外縁部の温度は幾分異なるため、正確な値は得られないが、相対的な傾向を把握することはできると考えられ、見かけの線膨張係数として検討を行った。

氷の影響を除くため、降温過程における 0°C 以上の値を用い、最小 2 乗法により得られた直線の勾配の平均値を見かけの線膨張係数とした。なお、凍結融解の最初のサイクルは多少乱れが認められるため、対象とした凍結融解サイクルは第 3、第 4 および第 5 サイクルとした。

表-2 に $0^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ における見かけの線膨張係数を示す。これによれば、06PL 水中供試体では $11.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、一般的なコンクリートの線膨張係数とほぼ一致する。一方、飽水および絶乾供試体は水中に比べ高い値を示し、水分が線膨張係数に影響を及ぼすことが示された。また、気乾供試体では、 $19.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と特異的な高い値を示し、前述したように凍結融解に伴い水の移動が生じ、その影響が表れたと考えられる。また、06PL と 06AE はほぼ同様の傾向を示し、連行空気の有無が線膨張係数に及ぼす影響は見られなかった。

0°C 以下の領域については、水中および飽水供試体は図-4 から図-8 に示したように直線の形状とはならず、また、降温過程と昇温過程では異なり、大きく水の影響を受け、線膨張係数を算出するには至らなかった。気乾供試体については、降温過程と昇温過程とでは異なるが、 0°C 以上のものに近い値が得られた。絶乾供試体については、 0°C 以上とほぼ同一の線膨張係数を示した。

表-2 見かけの線膨張係数 ($0^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$)

供試体	凍結融解条件	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
06PL	水中	11.2
	飽水	14.9
	気乾	19.7
	絶乾	15.5
06AE	水中	12.2
	飽水	13.3
	気乾	19.5
	絶乾	15.7

一般の鉄筋コンクリート構造物は気乾状態にあるものが多いと考えられる。本実験で示したように、凍結融解作用を受ける気乾状態のセメントペーストの線膨張係数が高くなれば、鋼材の線膨張係数 ($\approx 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) との間に差異が生じ、温度変化に伴う 2 次的な応力が発生する可能性があると考えられる。

4. おわりに

水セメント比 0.6 のセメントペーストを対象とした凍結融解試験のひずみ挙動について、以下のことが言えると考えられる。

- (1) プレーン・セメントペーストは、初期から大きな膨張が生じ、10 サイクル程度で大きな劣化を示した。AE ペーストでは、その膨張量は小さく抑えられることが示された。
- (2) 飽水封緘供試体 (含水率 24%) では、プレーンペーストは膨張を示すものの破壊には至らず、AE ペーストではほとんど膨張を生じなかった。
- (3) 気乾封緘供試体 (含水率 8%) は凍結融解サイクルの経過に伴い収縮を起こした。これは凍結融解に伴い、内部の水が移動することによって生じたと考えられる。
- (4) 気乾封緘供試体の凍結融解試験終了後、水中凍結融解試験に供したところ、試験開始直後に大きな劣化を示した。これは、先に行った封緘凍結融解試験で局所的な乾湿繰返し作用を受けたことによると考えられる。
- (5) 絶乾封緘供試体では残留ひずみは生じず、降温過程と昇温過程が一致する直線を示した。また、その勾配もプレーンペーストと AE ペーストでほぼ同一であった。
- (6) 本実験のひずみデータを基に求めた見かけの線膨張係数は、水分の影響を受けることが示された。
- (7) 気乾供試体の見かけの線膨張係数は特に大きな値を示した。

参考文献

- (1) 千歩修、濱田英介、友澤史紀：乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、731-736、2003