

論文 凍結融解作用を受けたコンクリートの熱伝導特性

近藤 吾郎*1

要旨：本研究は、凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化と熱伝導特性の関係を実験的に調査し、劣化評価方法としての有効性を検討したものである。そこで、非定常の熱伝導状態における温度計測と熱伝導解析結果から熱伝導率を簡便に推定する方法を検討した。この方法を、凍結融解サイクルを与えたコンクリート及びモルタルに適用した結果、目視で劣化が確認できない劣化の潜伏期から熱伝導率は低下し、早期の劣化検出方法としての可能性が確認された。

キーワード：凍結融解作用，熱伝導率，非定常熱伝導解析，非破壊試験

1. はじめに

コンクリートの内部特性を表す物性の1つに熱伝導率や熱拡散率など熱特性があり、コンクリートの内部との関係について様々な報告¹⁾がされている。しかし、コンクリートの熱伝導特性はその材料、特に骨材の種類や量によって大きく異なるため、これを用いてコンクリートの劣化評価を行うには限界がある。しかし、健全な状態と比較して相対的な変化を用いることにより評価方法としての可能性がある。

そこで、本研究は、凍結融解作用による劣化評価に熱伝導率測定による方法の有効性について検討することを目的とした。

従来の定常法によるコンクリートの熱伝導率の測定では、厳密な温度制御や測定条件設定が必要であるため、実構造物へ直接適用することが困難である。また、構造物からサンプルを採取し実験室での理想条件下で測定を行う必要があり、構造物に損傷を与えるほか多大な労力・コストを要する。そこで、JIS R 2616に規定されている非定常熱線法を参考に実構造物に非破壊的に直接適用できる簡易な熱伝導率推定方法を検討した。また、この方法は、サーモグラフィ法における内部評価の精度向上に利用できると思われる。

この方法を用いて、モルタルおよびコンクリート供試体の凍結融解サイクル前後の熱伝導率の変化と劣化状況との関係を調査した。また同時に、動弾性係数と圧縮強度を測定し、これらのデータを比較することによって熱伝導率の変化を用いることの有効性を検討した。

2. 熱伝導率の推定方法

2.1 非定常温度計測方法

ここで行った非定常温度計測方法の概要を図-1に示す。コンクリート表面に加熱用ヒーター埋め込み、コンクリート表面からの熱の逸散を防ぐため厚さ100mmの発泡スチロールでコンクリート表面温度が上昇する領域を覆った後、ヒーターを通電すると同時にヒーター表面

温度の計測を行うものである。加熱用ヒーターには、図-2に示す直径6mm長さ20mmのカートリッジヒーターを用いた。

ヒーターはステンレスパイプ内に抵抗線(電気抵抗4.27Ω)が封入されたもので、このヒーターを厚さ0.5mmの銅パイプで覆い、銅パイプに設けた幅1.0mmのスリット部に熱電対を耐熱シリコン樹脂(4.22W/mK)で固定してヒーター表面中央における温度を計測するものとした。

ヒーターの挿入は、コンクリート表面にコンクリートドリルを用い直径7mm深さ20mmの穿孔を行い、ヒーターと孔壁との間の熱抵抗を最小限にするための熱伝導グリス(熱伝導率3.8W/mK)を孔内に注入して、空隙が残らないように行った。

コンクリート表面に発泡スチロールを密着させた後10分間加熱とともに温度計測を行った。

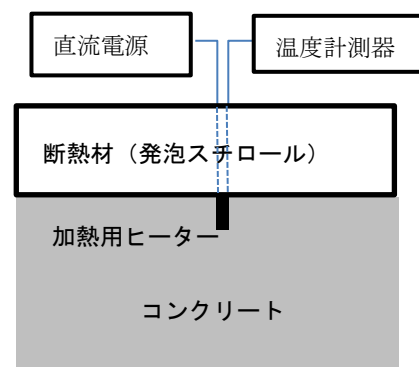


図-1 温度計測方法

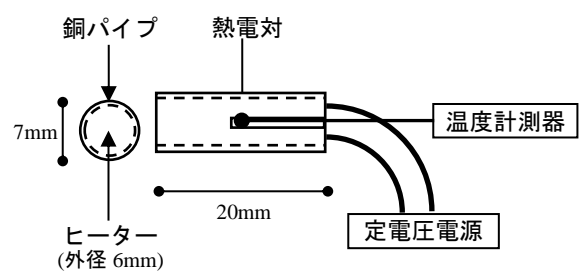


図-2 ヒーター詳細図

*1 千葉大学工学部都市環境システム学科准教授 工博 (正会員)

2.2 加熱方法

ヒーターの加熱には直流定電圧電源を用い、初期の計測温度上昇速度が 5°C/分程度、かつ 10 分間の加熱による温度上昇量が 50°C程度となる発熱量 5.43W に対応する電圧(4.815V)をヒーター電圧とした。電源設定電圧は電源内部抵抗を考慮して設定した。50°Cのヒーター温度上昇に対する電気抵抗変化による発熱量低下は 0.3%であり、無視できるとした。

2.3 熱特性の推定

加熱状態におけるコンクリート内部の温度分布は複雑であり、計測したヒーター表面温度履歴の理論解を求めることができない。このため、熱伝導数値計算を行い測定値との比較により熱特性の推定を行うものとした。

数値計算は、**図-3**に示す軸対象有限要素解析モデルを作成し、非定常温度解析を行った。

コンクリートは半径 100mm で高さ 200mm の円柱状として、加熱表面とコンクリート円柱側面を厚さ 100mm の断熱材で被覆した軸対称モデルとした。

解析で必要となる熱伝導率と容積比熱は、各材料とも温度によらず一定と仮定し、その物性値を**表-1**に示す。ヒーターは、銅パイプを含めた容積について、熱特性および容積当たりの発熱が一定であるとして与えた。

コンクリートは均質であるとして、**表-1**に示す範囲で熱伝導率 26 条件と容積比熱 21 条件の組み合わせの 526 ケースを熱特性として与えた。

断熱材表面およびコンクリート底面は、熱伝達境界として、熱伝達係数 18.15W/m²K とし、初期状態ではヒーター、コンクリート、断熱材とも 25°Cとした。

加熱開始後 10 分におけるコンクリート内部の温度分布の計算結果の例を**図-4**、**図-5**に示す。

図-4は、計算条件として一般的なコンクリートの熱物性値(熱伝導率 2.0W/mK, 容積比熱 2200kJ/m³K)を与えた場合である。この場合コンクリート温度が 0.1°C以上上昇する範囲はおおよそ半径 80mm 程度の半球状となっている。これに対し熱伝導率が大きい条件(熱伝導率 3.0W/mK, 容積比熱 2200kJ/m³K)を与えた**図-5**では、この温度上昇する範囲が広くなり、またヒーター近傍のコンクリート温度は低くなっていることから、コンクリート内部の温度勾配が小さくなっていることがわかる。このように、コンクリートの熱特性がヒーターの温度履歴に関係することから、温度履歴の実測結果と最も一致する計算結果を与えるコンクリートの熱特性の計算条件を熱特性の推定値とした。

なお、両ケースともコンクリート円柱側面の温度は初期温度(25°C)から変化していないことから、計測を行うコンクリート体積には計算モデルの半径 100mm 以上の寸法が必要であることがわかる。

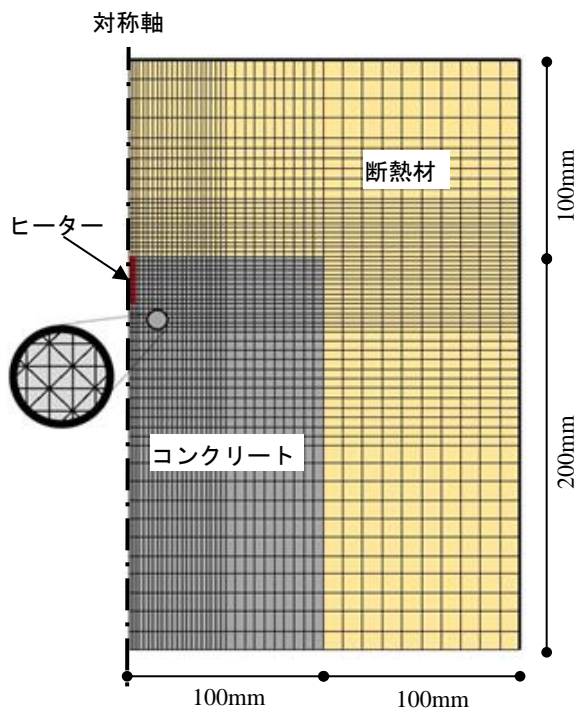


図-3 解析モデル

表-1 材料特性一覧

	熱伝導率 (W/mK)	容積比熱 (kJ/m ³ K)	発熱量 (kW/m ³)
コンクリート	1.5~4.0	1500~3500	0
発泡スチロール	0.047	37.8	0
ヒーター	50.0	4724	7058

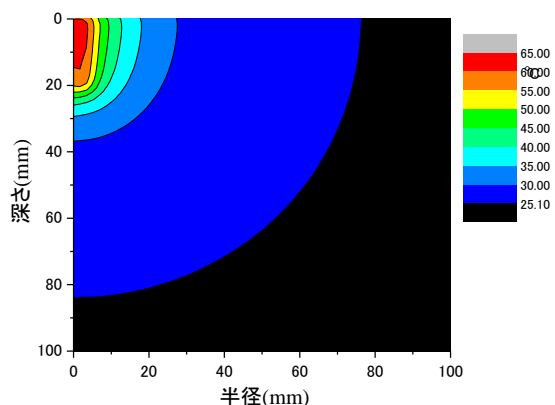


図-4 コンクリート温度分布($\lambda=2.0\text{W/mK}$)

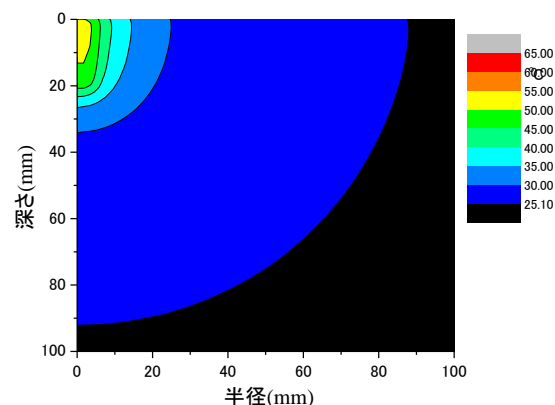


図-5 コンクリート温度分布($\lambda=3.0\text{W/mK}$)

コンクリートの熱特性の推定のために温度履歴の実測結果と計算結果を比較する際、加熱開始直後の温度上昇速度はヒーター内での抵抗線の位置が不明で発熱分布が計算と異なることや熱電対に接するコンクリート孔壁の局所的な熱特性に影響されることが予想されるため、加熱開始後 30 秒の温度を基準として加熱開始後 10 分までの 10 秒毎の温度上昇量を実測値と計算値で比較するものとした。

このようにしてモルタルとコンクリートについて温度履歴の実測結果とこれと最大誤差が最も小さくなる計算結果を比較した例を図-6と図-7にそれぞれ示す。前述の理由により加熱直後の温度上昇速度は特に図-7では差が見られるが、加熱後 30 秒以降は温度上昇量の実測値と計算値との最大差は 0.2°Cで計算値と実測値が十分一致していることがわかる。この結果からモルタルとコンクリートの熱伝導率は、それぞれ 1.7W/mK と 2.0W/mK で容積比熱は 1900kJ/m³K と 2000kJ/m³K と推定される。

この方法では、熱伝導率と容積比熱が同時に推定可能であるが、コンクリートの品質変化と関係すると考えられる熱伝導率を簡単に推定することを試みた。その結果を図-8に示す。この図では、熱伝導率 26 条件と容積比

熱 21 条件の組み合わせである 546 ケースについて、加熱開始後 1 分から 10 分までの温度上昇量を ΔT と計算条件の熱伝導率との関係を表したものである。熱伝導率が 4.0(W/mK)の場合には計算条件として与えた容積比熱の条件により ΔT は最大 0.9°Cの差が見られるが、熱伝導率が 1.7(W/mK)の場合にはこの差は 0.03°Cと極めて小さくなっており、一般的なコンクリートの熱伝導率の範囲では容積比熱の値はこの図の関係にほとんど関係しないことがわかる。図中に示した曲線はすべての計算結果について累乗式で近似したもので ΔT と熱伝導率との関係を良好に表現できている。計算条件として広範囲な容積比熱を設定したが、一般的なコンクリートの熱伝導率の条件ではこの近似式により精度良い熱伝導率の推定が可能と思われる。

その結果から、熱伝導率(W/mK)は ΔT (K)から次の累乗式で推定できるとし、凍結融解実験ではこの式を用いて熱伝導率を推定した。

$$\lambda = 19.04 \times \Delta T^{-0.8268} \quad (1)$$

2.4 含水状態の影響

コンクリートの熱伝導率は含水状態により影響を受けるため、含水状態を制御した状態での熱伝導率の推定が必要である。そこで、様々な含水状態を同一のモルタルブロックに与え、温度計測を行った結果を図-9に示す。ここでは、モルタルブロックを 24 時間水中に浸漬した状態から、所定の時間乾燥させた後に行った温度計測結果を比較したものである。

乾燥方法は、実験室内でコンクリート表面を露出状態で温度調節器を用いて埋め込んだヒーター温度を所定時間 110°Cに保持させた。また、参考のため電気炉により 72 時間 120°Cの乾燥処理後の温度計測結果も加えた。

この図では、初期温度の差を除外するために初期温度

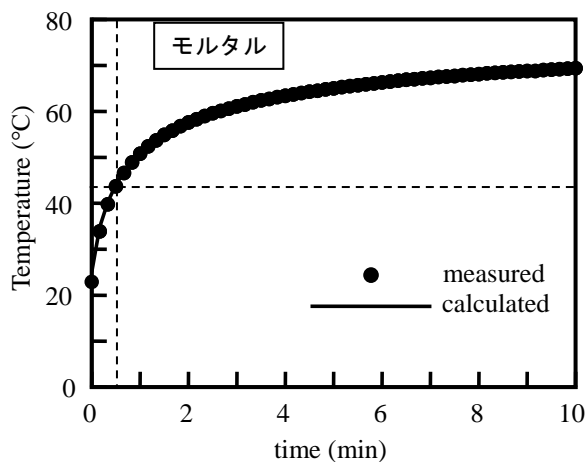


図-6 モルタルの温度履歴の比較

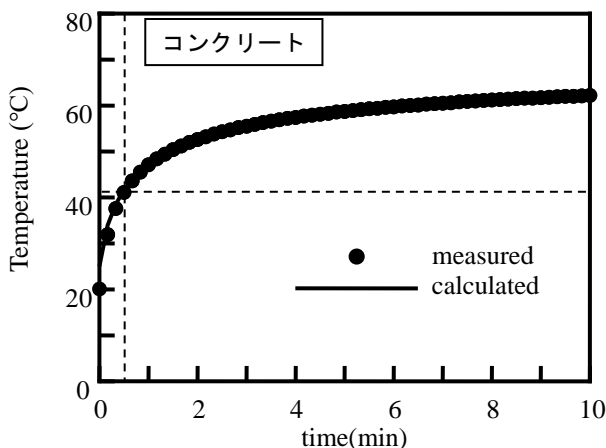


図-7 コンクリートの温度履歴の比

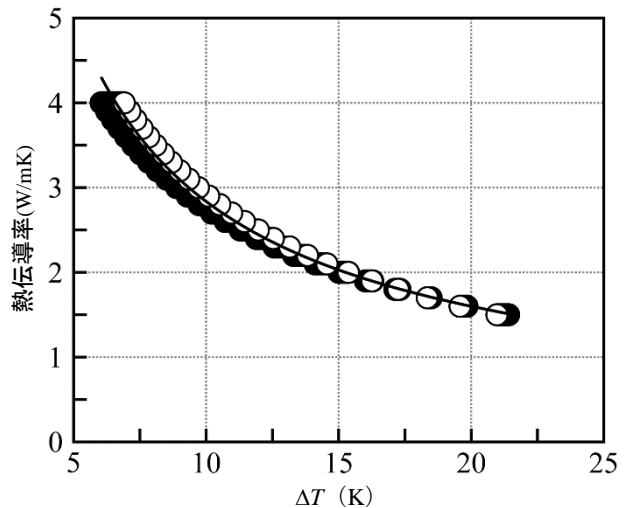


図-8 熱伝導率と ΔT の関係

からの温度上昇量で表している。同じ測定位置でも、ヒーター上の熱電対の方向が異なり初期の温度上昇速度が変化する結果、乾燥時間と 10 分後の温度上昇量とは明確な関係がみられない。

この測定結果について加熱後 1 分から 10 分までの温度上昇量 ΔT と乾燥時間の関係を図-10 に示す。図中の水平線は電気炉による乾燥処理後の温度計測から得られた ΔT を表したものである。ヒーターによる乾燥は電気炉による乾燥に比べて加熱による領域が限られるため 24 時間ヒーターで乾燥しても電気炉により乾燥した場合の ΔT よりも小さいものとなった。また、乾燥 9 時間までは乾燥時間の増加により ΔT は増加するが、9 時間

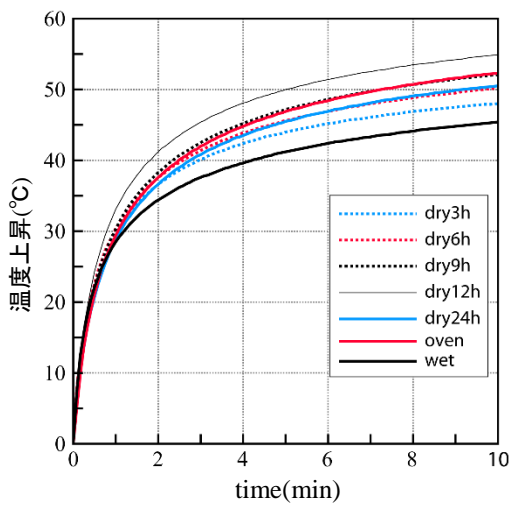


図-9 温度上昇曲線に及ぼす乾湿の影響

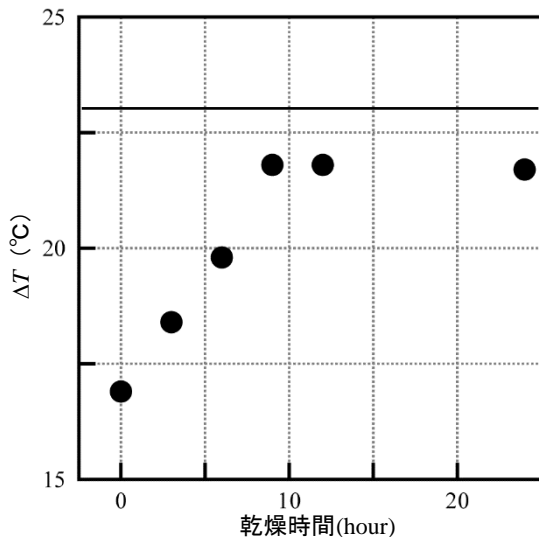


図-10 乾燥時間と ΔT の関係

以上乾燥させても ΔT は変化しなくなることがわかる。

3. 凍結融解実験

3.1 供試体

供試体表面での熱伝導率の推定のための温度計測を行うため、計算結果を参考にして図-11 に示す寸法 $200 \times 200 \times 200\text{mm}$ のモルタル及びコンクリートを用いた。

温度計測は、打設面以外の 5 面 (A,B,C,D,E) で行うものとし、凍結融解サイクルを与えたのち供試体中央からコアを採取して、動弾性係数、圧縮強度を計測するものとした。

3.2 コンクリートの調合と養生

調合は表-2 に示すように、モルタル、コンクリートともに水セメント比を 60% とし、モルタルとコンクリートの水：セメント：細骨材の比は等しいものとし、粗骨材単位容積を $4000/\text{m}^3$ とした。また、凍結融解作用による劣化を促進させるため、AE 剤は用いないものとした。

供試体の養生は、打設後 2 日で脱型し、材令 28 日まで湿布養生したのち、2 日間水中浸漬したのち、凍結融解サイクルを与えた。

3.3 凍結融解サイクル

凍結融解サイクル数 15, 30, 45 の 3 通りについて、コンクリート、モルタル供試体それぞれ 1 体ずつ用意した。なお、供試体名は、頭文字が M (モルタル) と C (コンクリート) を表し、次の数値が与えた凍結融解サイクル数を表す。

凍結融解サイクルは、JIS A 1148 に倣って供試体中心

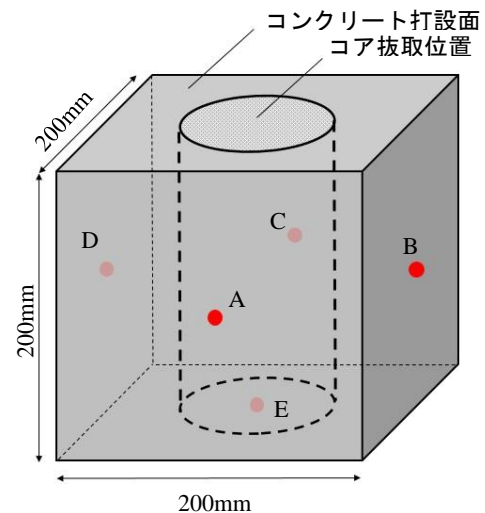


図-11 凍結融解実験供試体

表-2 調合表

	水セメント比 (%)	単位量(kg/m^3)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
コンクリート	60	290	174	835	1040
モルタル	60	483	290	1392	0

温度が、5℃～-18℃～5℃を1サイクルとし、水中凍結水中融解の方法でおこなった。

図-12に、1サイクルの供試体中心の温度履歴を示す。

JIS A 1148 では1サイクルに要する時間を3～4時間としているが、供試体最小寸法の違いから1サイクル24時間とした。このため、温度変化速度が小さいため、JISの規定に従った場合に比べ凍結融解作用による劣化は緩やかになると考えられる。

なお、所定の凍結融解サイクルを与えた供試体は、温度履歴の影響を除くため5℃の水中養生を行った。

4. 実験結果

供試体表面の状況は、コンクリート供試体では、30サイクルまで変化は見られなかったが、45サイクルではスケールが生じ、部分的に隅角部の粗骨材が露出した。一方、モルタル供試体では、45サイクルの供試体でも表面に変化は見られなかった。

凍結融解サイクル前とサイクル後に行った加熱温度計測によって得られた ΔT と推定熱伝導率を表-3にまとめて示す。なお、図-10の結果に基づき温度計測の前に9時間以上の乾燥処理を行うものとした。

材令4週で計測したサイクル前の供試体3体15箇所の計測結果から、モルタルおよびコンクリートの推定熱伝導率はそれぞれ1.77W/mK、2.05W/mKとなり、変動係数はそれぞれ4.6%、8.9%となった。この変動により、同じ供試体でも測定位置によって計測結果のばらつきが、凍結融解サイクル前後の熱伝導率の比較を困難にしている。そこで、同じ計測位置における凍結融解サイクル後の熱伝導率をサイクル前に対する比で表した結果を図-13に示す。凍結融解サイクル前後での熱伝導率の推定時期が低温状態にあったとはいえおよそ材齢1か月から3か月の2か月の差がありこの間の水和反応の進行に伴う空隙特性の変化により熱伝導率が上昇することを考

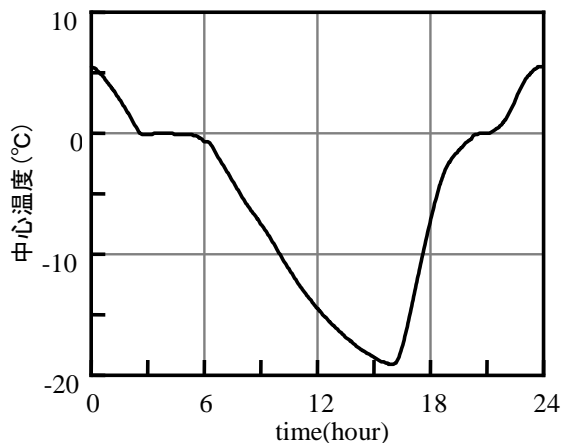


図-12 供試体中心温度履歴

表-3 凍結融解サイクル前後の ΔT と推定熱伝導率

		ΔT (K)				
		A	B	C	D	E
凍結融解サイクル前	M15	16.6	16.6	16.5	16.5	17.1
	M30	18.3	19.6	18.0	19.5	18.0
	M45	17.9	17.7	16.6	18.0	18.4
	C15	15.9	16.0	14.3	13.1	15.6
	C30	19.9	16.6	13.0	13.9	13.6
	C45	15.4	13.7	13.6	14.0	16.5
凍結融解サイクル後	M15	16.0	15.7	17.6	16.3	18.7
	M30	19.6	18.6	18.0	17.8	17.3
	M45	19.6	19.2	16.3	18.1	20.1
	C15	15.1	16.2	14.8	14.2	15.1
	C30	20.8	19.5	14.9	14.5	13.2
	C45	20.4	18.7	18.4	27.1	20.6

		推定熱伝導率(W/mK)				
		A	B	C	D	E
凍結融解サイクル前	M15	1.87	1.87	1.88	1.88	1.82
	M30	1.72	1.63	1.74	1.63	1.74
	M45	1.75	1.77	1.87	1.74	1.71
	C15	1.93	1.92	2.11	2.27	1.96
	C30	1.61	1.87	2.28	2.16	2.20
	C45	1.99	2.19	2.20	2.15	1.88
凍結融解サイクル後	M15	1.92	1.95	1.78	1.89	1.69
	M30	1.63	1.70	1.74	1.76	1.80
	M45	1.63	1.65	1.89	1.74	1.59
	C15	2.02	1.90	2.05	2.12	2.02
	C30	1.55	1.63	2.04	2.09	2.25
	C45	1.57	1.69	1.71	1.24	1.56

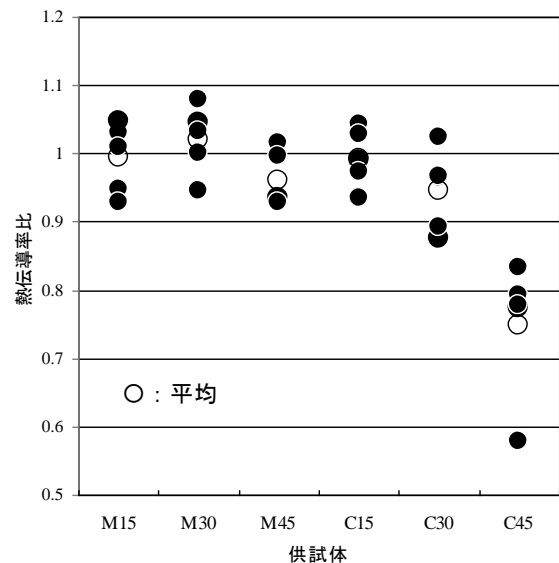


図-13 熱伝導率比の比較

慮すると、モルタルの 45 サイクルでは明確ではないが熱伝導率が低下していると判断される。

表面状況の変化が著しいコンクリートの場合には表面に変容が確認できなかった 30 サイクルでも熱伝導率の低下が見られ、45 サイクル後は著しく低下し凍結融解作用による表面劣化状況と対応して熱伝導率が変化していることがわかる。

供試体から採取したコアシリンダーの試験結果を表

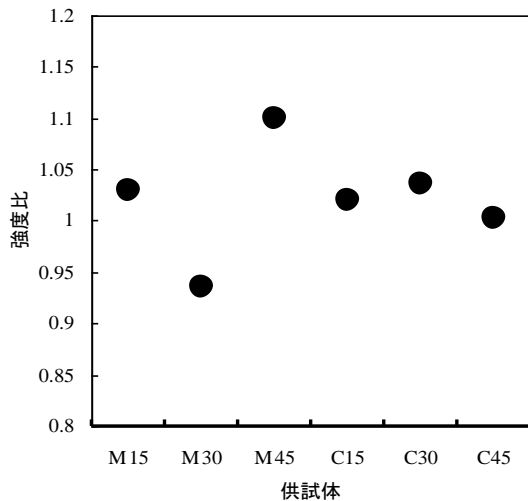


図-14 コア強度比の比較

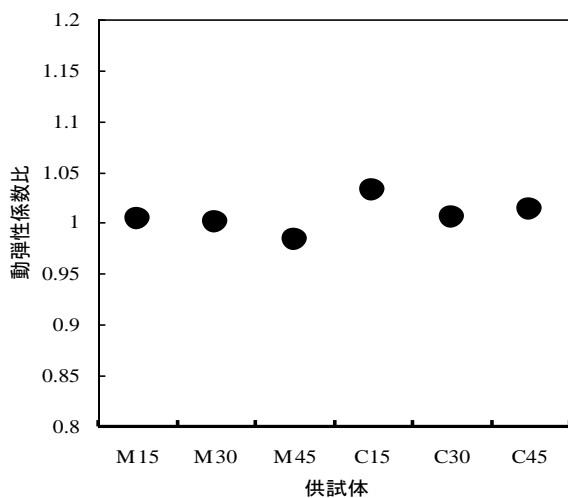


図-15 動弾性係数比の比較

表-4 コアシリンダー試験結果一覧

	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	共鳴振動数 (Hz)	動弾性係数 (N/mm ²)
M0	49.1	22250	2.135	9394	299991
M15	50.5	25038	2.185	9386	301281
M30	45.9	27714	2.187	9297	300192
M45	54.0	28793	2.175	9314	295120
C0	38.5	26088	2.349	9946	366249
C15	39.3	28451	2.349	10002	377746
C30	39.9	27274	2.355	9900	368416
C45	38.6	27955	2.323	9916	371022

図-4にまとめて示す。なお、コアシリンダー底面の穿孔痕はセメントペーストで補修した。ここで、静弾性係数は圧縮強度の 1/3 の応力度における割線弾性係数で、動弾性係数は共鳴法により求めたものである。

凍結融解作用を与えなかったシリンダー供試体 M0 および C0 に対する強度、動弾性係数の比をそれぞれ、図-14、図-15に示す。これらの図では、コア試験数が 1 本のため変動が大きいが、凍結融解サイクル数の影響は明確ではない。これは、本実験での劣化深さが小さいためと考えられる。図-13では、コンクリート凍結融解作用による表層の変容に対応して推定した熱伝導率は敏感な反応が示されており、熱伝導率の推定により低い凍結融解サイクル数で凍結融解作用の影響を検出できるといえる。

5. まとめ

本研究では、凍結融解作用を受けた劣化とコンクリートの熱伝導率の変化を調査した。

得られた結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) ここで行った非定常状態の温度計測では、加熱初期はヒーターの発熱分布や温度計測位置の局所的なコンクリートの状況により依存するが、加熱後 30 秒以降の温度上昇は計算結果と対応し、この温度上昇特性から熱伝導特性を推定できる。
- (2) モルタル及びコンクリートの熱伝導率は、測定時の含水状態の影響を受けるが、測定前に乾燥処理を行うことでこの影響を除くことができる。
- (3) 計測位置による推定熱伝導率の変動係数は、モルタルが 5% に対しコンクリートが 9% とコンクリートの方が大きい。この変動のため早期劣化の検出には同一個所における健全時の記録との比較が望ましい。
- (4) コンクリートの場合には凍結融解作用による表面変容に対応して熱伝導率が低下することが確認された。

参考文献

- 1) 小根澤淳志ほか: コンクリートの熱特性を活用した塩化物イオン拡散係数推定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1913-1918, 2006