

論 文

[1067] 高温加熱されるコンクリートの熱伝導率

正会員○長尾覚博（㈱大林組技術研究所）

正会員 中根 淳（㈱大林組技術研究所）

1. はじめに

高温を受けるコンクリート部材の諸物性を評価する際には、まず部材内部温度の予測が必要であり、そのためにはコンクリートの高温下における熱定性を把握しなければならない。

一方、高温下におけるコンクリートの熱特性のうち熱伝導率に関する既往の報告は少なく、特に200℃を超える温度域では限られたデータしかない。さらに、既存のデータは、普通ポルトランドセメントおよび砂岩系の骨材を用いたものが多く、各種コンクリートについての広範なデータが整備されているとは言い難い。これは、高温下における熱伝導率の測定が技術的に容易でないことにもよると考えられる。

本報はこのような背景に基づき、フライアッシュセメントを用いた各種骨材コンクリートの熱伝導率を常温から600℃までの温度範囲について測定し、加熱温度、含水率、および骨材の種類が熱伝導率に及ぼす影響について検討したものである。

2. 実験の概要

実験計画は、骨材の種類、加熱温度を要因として立案した。

2. 1 使用材料および調合

使用材料は以下のとおりである。

- セメント：フライアッシュセメントB種
- 骨 材：硬質砂岩（2産地），玄武岩，石灰岩，高炉スラグ（徐冷），耐火レンガ
- 混和剤：AE剤，減水剤

コンクリートの調合条件は以下のとおりで、表-1に示す6種類の調合を用いた。

- スランプ：12±1.5cm
- W/C：55%
- 空気量：4±1%

表-1 コンクリートの調合

(Kg/m³)

調合No	骨材の種類	細骨材率 (%)	単位水量	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
							減水剤	AE剤(cc)
A	硬質砂岩(1)	43	164	298	806	1059	0.745	32.78
B	玄武岩	41.8	161	293	822	1101	0.733	32.21
C	石灰岩	43	160	291	793	1084	0.728	32.01
D	高炉スラグ	43	160	291	811	1052	0.728	32.01
E	耐火レンガ	42.6	161	293	706	886	0.733	32.21
F	硬質砂岩(1)	43.2	161	293	790	1037	0.791	32.33

(注) 表乾状態

2. 2 実験条件

加熱前の養生、供試体数などの実験条件は表-2に示す通りである。

2. 3 熱伝導率の測定方法

熱伝導率は、ASTM STANDARD C335-69 に準拠し、空気を冷却材とする定常法により測定した。すなわち、図-1に示す中空円筒供試体の中央部に、正・副の加熱ヒーターを設置し、供試体周囲の雰囲気温度および供試体中央部の温度を所定の温度にコントロールし、供試体内部の温度勾配が定常になったとき、供試体内外の温度差と加熱ヒーターが単位時間に発生する熱量から (1) 式によって熱伝導率を算出した。

なお、定常状態の確認は、旧 JIS A 1413 [保温材の熱伝導率測定法 (平板直接法)] に準じた。

表-2 実験条件

- 対象温度範囲 - 加熱前の養生条件 - 加熱中の暴露条件 - 試験材令 - 加熱速度 - 供試体数 - 供試体の寸法	常温～600℃ 20±3℃, 60±5%RH 連続封緘養生 アンシール 91日以降 100℃/hr 2体/一試験条件
熱伝導率 圧縮強度 (弾性係数) 重量変化	外径Φ150mm, 内径Φ15mm, 高さ600mm 中空 シリンダー供試体 Φ100×200mm シリンダー供試体 圧縮強度試験用供試体と併用

$$\lambda = [Q \cdot \log(b/a)] / [2\pi \ell (\theta a - \theta b)] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 λ : 熱伝導率 (Kcal/m.h.℃)

θa : 供試体内部の温度 (℃)

a : 供試体の内径 (m)

θb : 外部の温度 (℃)

b : 外径 (m)

Q : $(= A \cdot V \cdot \cos \Phi \cdot 0.860)$ (Kcal/hr)

ℓ : 供試体の主ヒーター部の長さ (m) ここに A ; 電流, V ; 電圧, $\cos \Phi$; 力率

測定時の雰囲気温度の設定にはマuffle炉を用い、供試体中央部の加熱にはカートリッジヒーターを用いた。また、主ヒーターからの熱流が材軸に直角方向にのみ生ずるようには、従来の測定例では供試体端部に

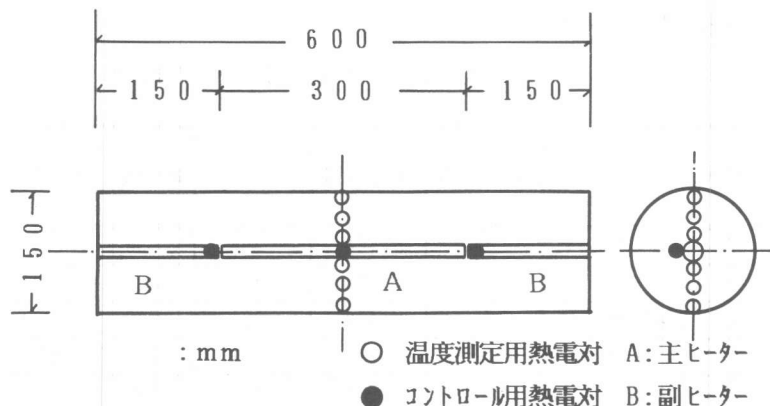


図-1 熱伝導率測定用供試体

断熱材を配置するのが殆どであるが、600℃という高温下で使用するのに適当な断熱材が見当たらず、断熱材自身の熱伝導率が温度により変化するなどの問題点があるため、断熱材のかわりに副ヒーターを設置し、これにより端部からの熱量の損失を補っている点が本測定法の特徴である。また、同一供試体で2ヶ所熱伝導率が求められるよう前述の図-1に示す位置に熱電対(タイプK)を設置した。

2. 4 加熱パターンおよび測定温度

測定試験時の加熱パターンは図-2に示すとおりで、600℃までの測定温度は常温から100℃毎に8ステップとした。

また、雰囲気と供試体内部との温度差は測定精度、温度ひびわれの防止を考慮して20℃に設定した。なお、実際の測定時における各ステップの加熱時間は供試体の種類および加熱温度によって定常性に若干の差はあるが、1ステップ約6～8時間となっている。

3. 実験結果及び考察

3. 1 加熱前後の圧縮

強度・弾性係数

熱伝導率測定前後のコンクリートの変質を確認するため、600℃加熱前後の圧縮強度・弾性係数を調査した。

その結果は表-3に示すとおりである。

これより、加熱後の残存強度は加熱前の30～70%で耐火レンガを用いたものが最も大きく、高炉スラグ、石灰岩が小という結果となった。

一方、残存弾性係数は

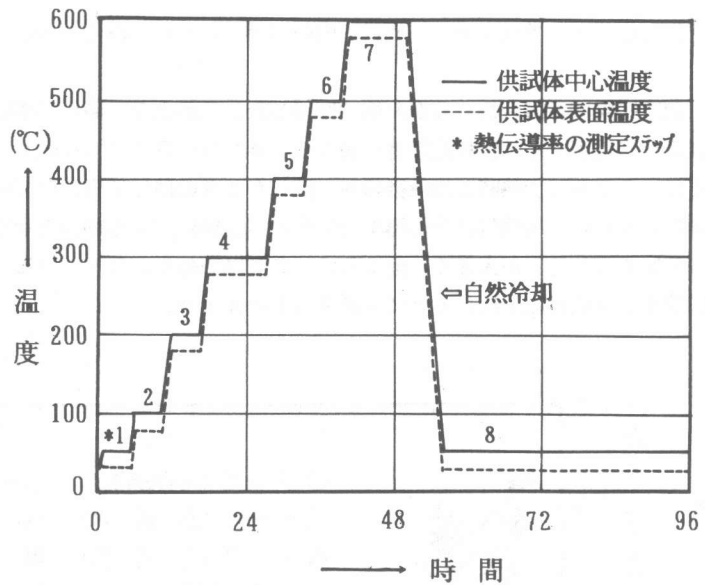


図-2 加熱パターン

表-3 強度試験結果 * () 内加熱前に対する残存比 (%)

調査No.	供試体密度 (Kg/ℓ)			圧縮強度 (Kg/cm ²)		弾性係数 (×10 ⁵ Kg/cm ²)	
	脱型時	加熱前	加熱後	加熱前	加熱後	加熱前	加熱後
A	2.287	2.287	2.092	420	194 (46.2)	3.40	0.265 (7.8)
B	2.358	2.358	2.166	507	230 (45.4)	3.89	0.294 (7.6)
C	2.292	2.292	2.099	535	184 (34.4)	3.98	0.550 (13.8)
D	2.227	2.227	1.987	359	120 (33.4)	3.00	0.465 (15.5)
E	2.052	2.052	1.810	491	330 (67.2)	2.18	0.528 (24.2)
F	2.283	2.282	2.127	467	166 (35.5)	4.06	0.212 (5.2)

加熱前の5～24%で、圧縮強度よりも低下が著しい。また、圧縮強度と同様骨材に耐火レンガを用いたものが最も残存比が大きく、次いで高炉スラグ、石灰岩の順となり、硬質砂岩、玄武岩は残存比が10%以下であった。弾性係数の低下は供試体内部に生じたマイクロクラックの影響と推定され、熱伝導率にもその影響が及んでいると考えられる。なお、残存強度および弾性係数と熱伝導率との間には、今回の実験条件の範囲では明瞭な関係は認められなかった。

3-2 熱伝導率の測定結果

1) 加熱温度の影響

熱伝導率の測定結果を(2)式で求めた供試体の平均温度(θ_m)との関係を図-3に示す。

$$\theta_m = \frac{\int_{r_i}^{r_o} 2\pi r \theta dr}{\int_{r_i}^{r_o} 2\pi r dr} \dots\dots\dots (2)$$

ただし r : 半径 (cm) , r_i : 内径 (cm) , r_o : 外径 (cm) , θ : 温度 (°C)

測定結果は各調合毎に3次曲線で回帰した。これより、熱伝導率は加熱温度の上昇に伴って、200°C程度までは比較的顕著に減少し、400～500°Cを超えるとほぼ横ばい状態となる。また、600°C加熱時と加熱後常温に戻したときの熱伝導率はほぼ同一値となっている。また、600°C加熱時の熱伝導率の変化を常温値に対する割合で示すと表-4となり、石灰岩が37%で最も低下が大きく、他は50～60%の結果となっている。総じて600°C加熱時の熱伝導率は常温値に比較してほぼ半減するといえよう。

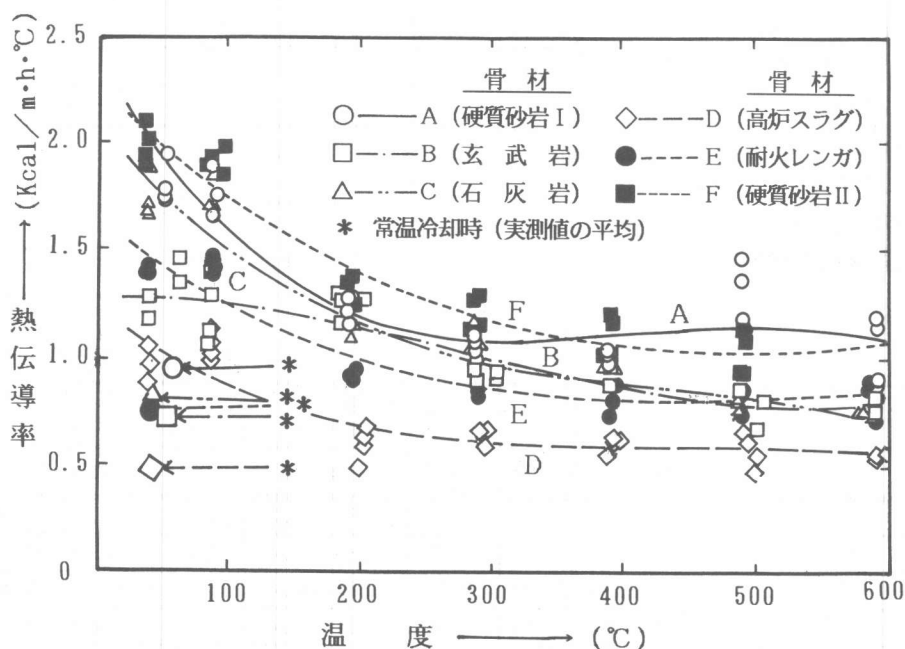


図-3 熱伝導率の測定結果

2) 含水率の影響

前述のように、600℃時の熱伝導率と、加熱後常温に戻った時の熱伝導率がほぼ同一値であることから、高温加熱によって自由水および結晶水などの含水分が失われてしまうと温度はほとんど影響せず、熱伝導率の大小には加熱に伴う水分移動の影響が大きいことが推察される。

含水量の熱伝導率に及ぼす影響を検討するため、A調合と同様のコンクリートを用い、常温から175℃の温度範囲で別途実施した実験から、含水率と熱伝導率の関係を示すと図-4となり、両者の間には測定温度にかかわらず、含水率が低下すると熱伝導率が小さくなるという明らかな比例関係が認められ、絶乾状態と含水状態とでは熱伝導率が大きく異なる。

この結果からも含水率が熱伝導率に大きな影響を与えていることがわかる。

今、コンクリートの構成要素を、骨材、セメントペースト、空隙、自由水とし、それぞれのコンクリート単位体積中の絶対容積 (m^3/m^3) を V_a , V_{cp} , V_i , V_w , 熱伝導率を λ_a , λ_{cp} , λ_i , λ_w ($\text{Kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$) とすれば、熱流に対して並列型と仮定することによりコンクリートの熱伝導率 λ_m は (3) 式で表現出来る。

$$\lambda_m = V_a \cdot \lambda_a + V_{cp} \cdot \lambda_{cp} + V_i \cdot \lambda_i + V_w \cdot \lambda_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2) 式により十分水和したA調合のコンクリートの、常温時における絶乾状態と封緘養生状態の熱伝導率を概ね $\lambda_a = 2.0$, $\lambda_{cp} = 0.8$, $\lambda_i = 0.03$, $\lambda_w = 0.50$ ($\text{Kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$) とし^{4) 5)} 試算するとそれぞれ約1.51 (絶乾状態) および 1.56 (封緘状態) となり、いずれも図-4に示す絶乾状態の値にほぼ等しく、単に空隙部の空気がそれよりも熱伝導率の大きい水に置換しただけでは含水状態の熱伝導率が絶乾状態のそれを大きく上回ることを説明できない。

すなわち、温度勾配のある

表-4 加熱前後の熱伝導率の変化

供試体No.	骨 材	$\lambda_{600} / \lambda_{常} \times 100 (\%)$
A	硬質砂岩 (1)	48
B	玄 武 岩	61
C	石 灰 岩	37
D	高炉スラグ	64
E	耐火レンガ	54
F	硬質砂岩 (2)	50

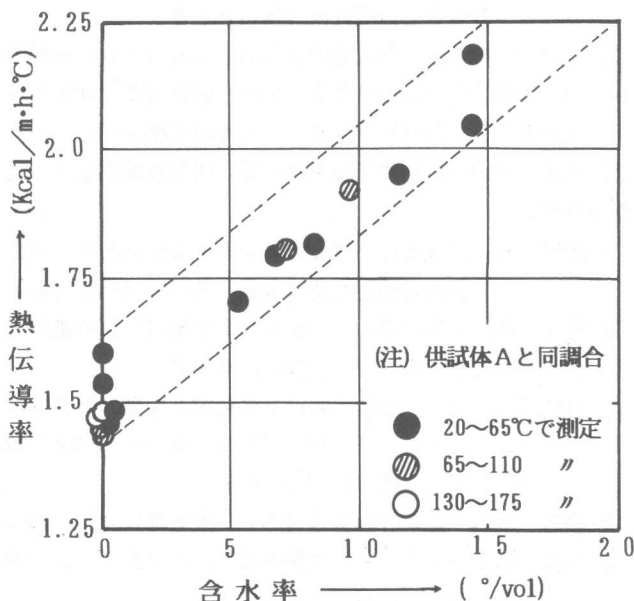


図-4 含水率と熱伝導率との関係

コンクリート中では加熱側で熱エネルギーを与えられた水分（あるいは蒸気）の移動に伴う熱の移動が前述の (1) 式に示す熱量 Q を増大させ、結果として熱伝導率が大きくなると考えられる。

なお、A 調合で前述図-1 に示す 600°C 加熱後の熱伝導率が、図-4 の絶乾状態の約 30% 程度小となっている。これは、結晶水の散逸およびマイクロクラックの発生により、供試体内部に相当量の空隙が生じて熱抵抗が増大したことによるものと推察され、高温加熱時には自由水のほか結晶水の移動も熱伝導率に大きな影響を与えるといえよう。

3) 骨材の影響

熱伝導率に及ぼす骨材の影響を、常温値と比較すると硬質砂岩が最も大きく、約 $2.1 \text{ Kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、次いで石灰岩約 1.9、耐火レンガ約 1.6、玄武岩約 1.3、高炉スラグ 1.0 の順となり、高炉スラグおよび玄武岩を骨材としたコンクリートの熱伝導率の小さいことが指摘される。

また、一般にコンクリート密度と熱伝導率とはほぼ比例的な関係にあるといわれているが、A（硬質砂岩）、B（玄武岩）、C（石灰岩）で比較すると、3 者とも加熱前、 600°C 加熱後の密度は玄武岩がやや大であるがほぼ同一値となっている。一方、熱伝導率は常温では密度の大きい玄武岩が硬質砂岩、石灰岩に比較して小さく、また 600°C 加熱時には玄武岩、石灰岩が硬質砂岩に比較して 70% 程度の値となっている。これより、単に密度だけでなく、骨材の岩質が熱伝導率等の熱定性に大きく影響していると推察される²⁾。詳細は今後のデータの積み重ねが必要と思われる。

4. まとめ

今回の測定結果によりきわめて資料の少ない高温を受けるコンクリートの熱伝導率について有益な情報を得ることができた。主な結果をまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 加熱に伴うコンクリート中の水分移動が熱伝導率に大きな影響を与える。
- (2) 含水状態のコンクリートの熱伝導率は 200°C 程度までは比較的顕著な減少傾向を示し、 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 以降はほぼ横這となる。
- (3) 600°C における熱伝導率は常温値の 40~60% 程度となる。
- (4) 熱伝導率は骨材の岩質により大きな影響を受け硬質砂岩を用いたものが大きく、玄武岩、高炉スラグ、耐火レンガを用いたものは小さい。
- (5) 強度、弾性係数と熱伝導率との間に明瞭な関係は見当たらない。

(参考文献)

- 1) 原田 有：高温度におけるセメントモルタル及びコンクリートの熱伝導率の変化，日本建築学会研究報告，NO. 24，1952，pp. 1~8
- 2) 徳田 弘，庄谷征美：コンクリートの熱特性値の測定と二、三の考察，土木学会論文報告集，第 212，1973，pp. 89~98
- 3) 長尾覚博，松井 宏他：高温と外荷重とを受けるコンクリート構造物に関する実験的研究 その 4. $20\sim 175^{\circ}\text{C}$ のコンクリート材料の熱定数，日本建築学会学術講演梗概集，1985，pp. 875~876
- 4) 渡辺 要編：建築計画言論（II），丸善株式会社，1964，pp. 108~121
- 5) 徳田 弘：コンクリートの熱的性質，コンクリート工学，Vol. 22，No. 3，March 1984，pp. 29~37
- 6) 省エネルギーセンター編：省エネルギーのための保温入門，財団法人 省エネルギーセンター，1982，pp. 74~81，他