

高温を受けるコンクリート部材の諸物性に関する研究 (その3)

—常温～600°Cの温度域におけるコンクリートの熱伝導率—

長尾 覚 博 中 根 淳

Experimental Studies on Characteristics of Concrete Members Subjected to High Temperature (Part 3)

—Thermal Conductivity of Concrete heated up to 600 °C—

Kakuhiro Nagao Sunao Nakane

Abstract

It is necessary to take into account the temperature dependency of the physical properties of concrete when estimating the qualities of concrete structures expected to be subjected to high temperatures. However, there are only a few examples of research in relation to characteristics of concrete subjected to high temperatures, especially thermal properties.

Experiments were carried out with such a background and the results with regard to thermal conductivity of concrete using several kinds of aggregates heating up to 600 °C are summarized in this report, thereby explaining the changes in thermal conductivity of concrete subjected to high temperatures.

As a result, it is confirmed that the thermal conductivity of concrete is dependent on the kind of aggregate and moisture content.

概 要

高温を受けることが予想されるコンクリート構造物の品質評価においては、コンクリート物性の温度依存性を知る必要がある。一方、高温を受けるコンクリートの物性変化に関するデータのうち、熱特性に関するものは非常に少ない。

本報告は、このような背景から高温下における熱伝導率の変化を明らかにするため、骨材の種類を異にするコンクリートの熱伝導率を、常温から600°Cまでの温度範囲について調査した結果をまとめたものである。

その結果、熱伝導率は骨材種類および加熱温度の上昇に伴う水分蒸発の影響を大きく受けることが判明した。

1. はじめに

高温を受けるコンクリート構造物の品質評価においてはまず、コンクリート部材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の熱特性を把握しなければならない。

この報告は、高温下におけるコンクリートの熱伝導率に関する既往の研究が非常に少ないという背景に基づき、骨材の種類を異にするコンクリートの熱伝導率を、常温からコンクリートの結晶水が失われると思われる600°Cまでの温度範囲について実験的に調査した結果をまとめたものである。その結果、高温時のコンクリートの熱特性を評価する上で有益な情報を得ることができた。

2. 文献調査結果

コンクリートの熱伝導率に関する既往の文献は非常に少なく、特に高温下におけるデータはほとんど見当たらない。

図-1は、国内外の熱伝導率の測定結果を包括的に示したものであるが、200°Cを超える温度域ではごく限られたデータしかないことがわかる。

また、既存のデータは普通コンクリートがほとんどで、

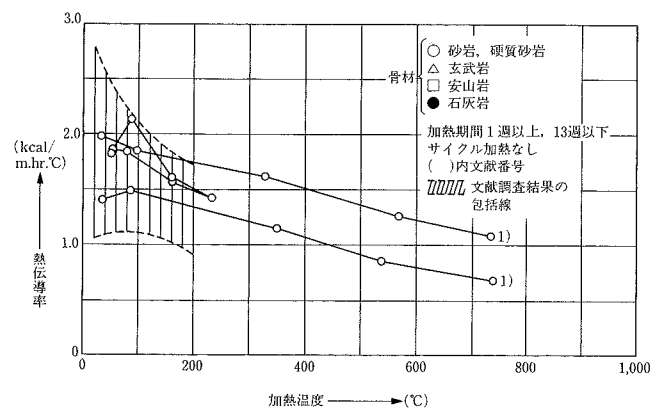


図-1 熱伝導率の測定結果 (文献調査)

骨材の種類も砂岩系が多く、各種コンクリートについての広範囲なデータは見当たらない。しかし限られたデータであるが、図一1より加熱温度の上昇に伴い熱伝導率は低下していることがうかがわれる。

3. 実験概要

実験計画は、骨材の種類、加熱温度を要因として立案した。

3.1 実験条件

実験条件は以下のとおりとした。

- ・対象温度範囲 : 常温~600°C
- ・加熱前の養生条件: 20±3°C, 60±5%RH で連続封かん養生
- ・加熱中の暴露条件: アンシール
- ・試験材令 : 91日以降
- ・加熱速度 : 100°C/hr
- ・一試験条件あたりの試験体数: 2体
- ・供試体の寸法 :
 - 熱伝導率 : 外径Φ 150 mm, 内径Φ 15 mm
 - 高さ 600 mm 中空シリンダー 供試体
 - 圧縮強度(弾性係数); Φ 100×200 mm シリンダー 供試体
 - 重量変化 : 圧縮強度試験用供試体と併用

3.2 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, AE 減水剤
- コンクリートの調合条件は以下のとおりで、表一1に示す6種類の調合を用いた。
- ・スランプ: 12±1.5 cm
 - ・W/C: 55%
 - ・空気量: 4±1%

ただし、耐火レンガを骨材として用いたものを所定のスランプ値とするためには、単位水量がかなり増大するためスランプ、空気量の条件を無視して各材料の使用量を他の調合とほぼ同様とした。

表一1 コンクリートの調合

調合 NO	セメントの種類	骨材の種類	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	総骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)			容積 (ℓ/m³)			重量 (kg/m³)			混和剤	
						セメント	砂	砂利	セメント	砂	砂利	セメント	砂	砂利	減水剤	AE剤 (cc)
A	フライアッシュセメント B種	硬質砂岩(1)	55	12	43	164	93	302	401	298	806	1059	0.745	32.78		
B		玄武岩	"	"	41.8	161	98	287	403	293	822	1101	0.733	32.21		
C		石灰岩	"	"	43	160	93	304	403	291	793	1084	0.728	32.01		
D		高炉スラグ	"	"	43	160	93	304	403	291	811	1052	0.728	32.01		
E		耐火レンガ	"	"	42.6	161	98	294	396	293	706	886	0.733	32.21		
F		硬質砂岩(2)	"	"	43.2	161	98	304	399	293	790	1037	0.791	32.23		

表一2 供試体の種類と数量

記号	骨材の種類	供試体数 (体)	総計 (体)
A	硬質砂岩(1)	2	12
B	玄武岩	2	
C	石灰岩	2	
D	高炉スラグ	2	
E	耐火レンガ	2	
F	硬質砂岩(2)	2	

3.3 供試体の種類と数量

供試体の種類と数量は表一2に示すとおりである。

3.4 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、図一2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、供試体内外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。

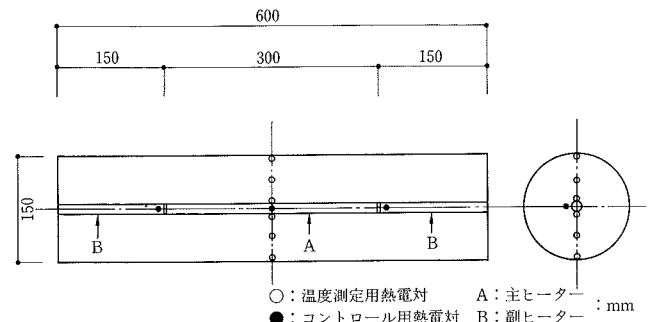
なお、JIS A 1413 (平板直接法) に準じ、供試体の温度差の変動が1%未満の時をもって定常状態と見なした。

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

- λ : 熱伝導率 (kcal/m.h.°C)
- a : 供試体の内径 (m)
- b : // 外径 (m)
- l : 供試体の主ヒーター部の長さ (m)
- θa : 供試体内部の温度 (°C)
- θb : // 外部の温度 (°C)
- Q : (= A · V · 0.860 cos Φ) (Kcal/hr)

ここに A: 電流, V: 電圧, cos Φ: 力率

なお、雰囲気温度の設定にはマッフル炉を用い、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。なお、副ヒーターは供試体端部からの熱の損失を補うためのもので、従来は断熱材を用いる場合がほとんどであったが、耐熱性がありかつ十分な断熱性を確保できるものがないという理由でこの方法を採用した。具体的には主ヒーター表面と副ヒーター表面の温度が同一になるように副ヒーターの電気容量を随時調整し、主ヒーターからの熱流が材軸に直



図一2 熱伝導率測定用供試体

角方向にのみ生ずるようにした。

また、同一供試体で2ヶ所熱伝導率が求められるよう、図-2に示す位置に熱電対(タイプK)を埋設した。

3.5 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-3に示すとおりで、600°Cまでの測定温度は表-3に示すように8ステップとした。ただし、各測定ステップの加熱持続時間については、供試体内部の温度分布が定常状態となるようにあらかじめ事前検討の上決定した。

4. 実験結果

4.1 加熱前後の圧縮強度・弾性係数

熱伝導率測定前および600°C加熱後の圧縮強度を確認した。その結果は表-4に示すとおりである。

これより、加熱後の残存強度は耐火レンガが最も大きく、高炉スラグの残存比が小という結果となった。

これらの残存強度と熱伝導率との関係については、今回の実験条件の範囲では明確でなかった。

表-3 測定温度ステップ

温度°C	ステップ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
雰囲気温度	30	80	180	280	380	480	580	30
内表面温度	50	100	200	300	400	500	600	50

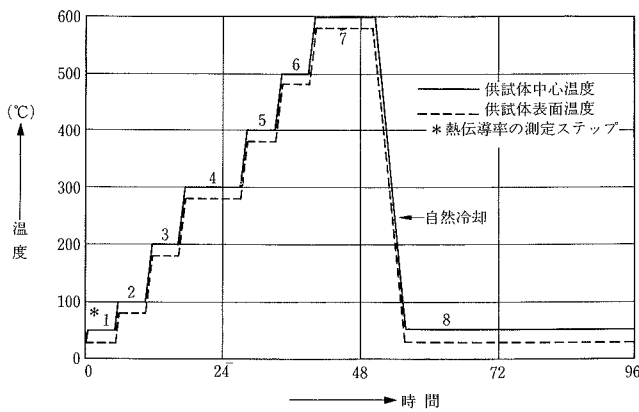
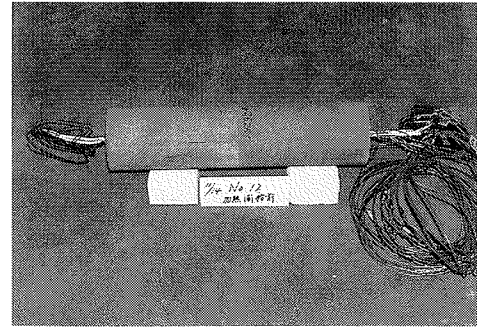


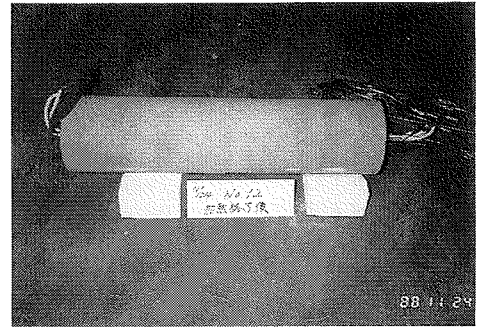
図-3 加熱パターン

表-4 強度試験結果

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	3.40	0.265
B	2.358	2.358	2.166	507	230	3.89	0.294
C	2.292	2.292	2.099	535	184	3.98	0.550
D	2.227	2.227	1.987	359	120	3.00	0.465
E	2.052	2.052	1.810	491	330	2.18	0.528
F	2.283	2.282	2.127	467	166	4.06	0.212



加熱前



加熱後

写真-1 加熱前後の供試体の様子(供試体A)

4.2 熱伝導率測定試験結果

4.2.1 加熱前後の供試体の様子 600°C加熱前後の供試体の様子は、写真-1に示すとおりである。

これより、いずれの供試体も加熱によって供試体表面の変色とひびわれが認められた。

供試体表面のひびわれは、高温によってコンクリート水和物(Ca(OH)₂)の結晶水が逸散してCaOとなり、これが冷却後空気中の水分を再吸収して、再度Ca(OH)₂に戻るときの膨張圧さらに加熱時の熱応力が主要原因と考えられる。

4.2.2 熱伝導率の測定結果 測定結果を図-4に示す。供試体間で熱伝導率測定時の温度が必ずしも一致しないので、測定結果を各調査毎に3次曲線で回帰した。

回帰式により代表的な温度における熱伝導率を求めると表-5となる。これらの結果から、加熱温度の上昇に伴い熱伝導率の値は小となり、200°Cまでは温度の上昇に伴いその値の低下は顕著で、200°Cを超える温度ではほぼ横ばい状態となる。これは、加熱温度の上昇に伴いコンクリート中の水分が徐々に蒸発し組織がポーラスになること、また高温下では絶乾状態となり含水率の影響がなくなるためと考えられる。

600°C時の熱伝導率と、加熱後常温に戻した時の熱伝導率の値がほぼ同一値であることから、加熱によって含水分が失われてしまうと温度の影響はほとんどなくなってしまい、この点からも熱伝導率に及ぼす含水率の影響が大きいことが容易に推察される。

さらに、硬質砂岩を骨材としたコンクリートで筆者らが別途実施した実験⁹⁾において、加熱時にシールしたものは熱伝導率の変化は小さく、アンシールでは大という結果がこのことを裏付けている。ちなみに、別途実施した実験における175°Cまでの供試体の含水率と熱伝導率の関係を図

一5に示したが、含水率と熱伝導率には明らかな関係のあることがわかる。

熱伝導率に及ぼす骨材の影響も大きく、常温下の値と比較すると粗骨材、細骨材とも硬質砂岩のものが最も大きく、約2.1 Kcal/m・h・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用いたものの熱伝導率の小さいことが指摘される。

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、今回の実験結果から必ずしもこの関係がなりたない場合もあることが推察された。すなわち、A (硬質砂岩)、B (玄武岩)、C (石灰岩) で比

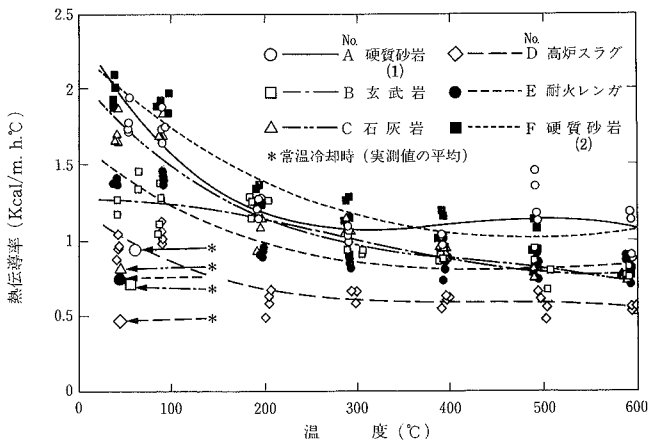


図-4 熱伝導率の測定結果

表-5 各温度別熱伝導率 (3次の回帰式による)

調査 NO.	供試体の平均温度 (°C)						
	20	100	200	300	400	500	600
A	2.19	1.58	1.18	1.07	1.11	1.15	1.06
B	1.28	1.25	1.15	1.01	0.88	0.79	0.78
C	1.93	1.50	1.16	0.98	0.89	0.82	0.71
D	0.87	0.82	0.73	0.65	0.58	0.54	0.56
E	1.57	1.24	0.99	0.86	0.81	0.82	0.84
F	2.13	1.74	1.39	1.17	1.05	1.03	1.06

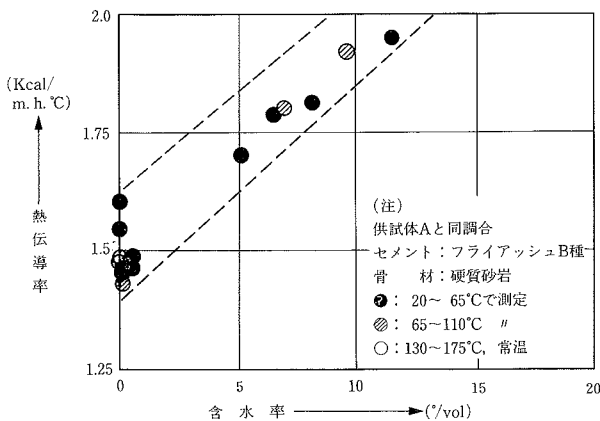


図-5 含水率と熱伝導率との関係³⁾

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%程度の値となっており、単に密度の大小だけでなく、骨材の化学成分あるいは高温加熱に伴う化学変化なども原因していると推察され²⁾、詳細は今後の検討課題と思われる。

表-6 加熱前後の熱伝導率の変化

供試体	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

さらに、表-5の結果から、600°C加熱時の熱伝導率を常温時の熱伝導率で除して、その変化率を求めると表-6のとおりとなる。

これより、加熱による熱伝導率の低下の最も顕著なものは石灰岩の37%で、他はあまり差のない結果となっている。600°C加熱のコンクリートの熱伝導率は、常温時の40~60%程度になることがわかった。

5. まとめ

今回の実験により、以下のことが明らかとなった。

(1) 自由水を含んだコンクリートの熱伝導率は、高温加熱によって著しく低下する。

(2) 自由水の蒸発が生ずる200°Cまでに熱伝導率の低下が大きい。しかし、200°C以上では温度による変化はそれほどない。

(3) 200°C~600°Cでの熱伝導率は常温値の40~60%程度の値となる。

(4) 骨材岩質によって熱伝導率は異なる。

硬質砂岩を用いたものが大きく、玄武岩、高炉スラグを用いたものは小さい。

骨材岩質の影響については今後のデータの積み重ねが必要と思われる。

参考文献

- 1) 原田 有：高温度に於けるセメントモルタル及びコンクリートの温度伝達率の変化，日本建築学会研究報告，No. 24，p. 69~70，(1953)
- 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，No. 212，p. 89~98，(1973)
- 3) 長尾寛博，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. 20~175°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，p. 875~876，(1985)