

論文

[1016] 超高強度コンクリートの熱的性質に関する実験的研究

土井文好^{*1}・太田福男^{*2}・斉藤辰彦^{*2}

1. はじめに

高温下のコンクリート部材は熱が部材表面部分から内部に向けて順次伝達していくので、その劣化程度は表層部分が著しく、深部にいくに従って緩和される。このような状況下のコンクリートの劣化特性を把握するためには、まず高温加熱を受けたコンクリートの部材内部温度分布ならびにその熱移動速度などを予測する必要がある。このためにはコンクリートの熱的特性のうち、特に、熱伝導率ならびに熱拡散率が重要である。

筆者らは、これまでに火害を受けたコンクリートの劣化診断をマイクロ波を用いて行う実用的な非破壊試験方法の確立のための一連の研究を行っているが、その中で、高温加熱された普通強度コンクリートの熱拡散率についてはすでに二、三の実験を行っている[1]。また、熱伝導率については、普通強度コンクリートに関する原田[2]、徳田[3]らを初め古くからかなりの研究報告がある。一方、高強度あるいは超高強度コンクリートについては近年になって研究され始めたこともあり、熱的特性の測定そのものがきわめて難しいことも相まって、これまでのところ高温下の熱的特性に関する研究報告は数少ない。

また、火災時のコンクリートは消火放水による高含水状態になり、一時的に強度劣化を示しても、その後コンクリート中の水分が未水和セメント粒子と反応して水和生成物を作り出すことによる強度回復がみられる[4]ことが知られているが、高強度ならびに超高強度コンクリートの強度回復特性については明らかでない。

このため、本研究では高温下にさらされた、超高強度コンクリートの熱伝導率と熱拡散率について測定し、同一条件下にある普通強度コンクリートの熱的特性と比較することによって、高温下にさらされた超高強度コンクリートの熱的特性を明らかにすることを主目的とする。さらに、超高強度および高強度コンクリートの火害後の圧縮強度回復度特性と普通強度コンクリートの特性を対比し、その相違点についても検討する。

なお、ここで取り扱う火害相当加熱温度の範囲は100℃～800℃までの範囲であり、熱拡散率の測定は筆者らの提案した3次元非定常熱伝導方程式を用いて行った[1]。

2. 実験

2.1 実験の概要

表-1 実験の概要

要因	水準
コンクリートの強度種類	普通強度 ($F_c = 200 \sim 300 \text{ kgf/cm}^2$) 高強度 ($F_c = 400 \sim 600 \text{ kgf/cm}^2$) 超高強度 ($F_c = 800 \sim 1000 \text{ kgf/cm}^2$)
試験体寸法	15cm×15cm×15cmの立方体
加熱方法	電気炉内全方向加熱
加熱温度	常温から100℃毎に800℃まで加熱
加熱材令	材令28日より2日間100℃にて乾燥し、材令31日に加熱
養生方法	材令28日まで温空養生 (温度 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $95\% \pm 5\%$)
測定項目	熱伝導率、熱拡散率、マイクロ波特性

* 1 大同工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

* 2 大同工業大学 教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

高強度コンクリートの熱的特性を調べるために、普通強度コンクリートならびに超高強度コンクリートの熱的特性についても実験を行った。実験の概要は表-1に示すとおりである。

2.2 実験方法

(1) 試験体

熱伝導率用試験体は図-1に示すように、加熱線および熱電対を試験体中央部に位置するようにコンクリート打設時に埋め込んでセットした。なお、加熱線は特殊圧延ニクロム線を、熱電対は径0.3mmのクロメルアルメルをそれぞれ使用した。

熱拡散率用試験体は図-1の加熱線を除いて熱電対のみ中央部に埋め込んだものを使用した。

(2) 加熱方法

試験体の加熱には上下四方の6面加熱型窯業用電気炉（最大加熱可能温度1200℃、内容量120cm×120cm×120cm）を用いた。

加熱方法は図-2に示すように、炉内雰囲気温度が設定温度に到達後試験体を炉内中央部に設置した。加熱時間は試験体中心温度が設定温度に到達後2時間加熱した。

(3) 熱伝導率の測定方法

前述のように所定時間試験体を高温加熱し、常温になるまで冷却した後、熱伝導率を測定した。

(a) 測定原理と測定方法

図-1の加熱線に電流を流すと、ジュールの法則に従って加熱線の温度(θ)は(1)式のよう
に試験体の熱伝導率に関係しながら上昇する。

$$\theta = Aq/\lambda \cdot \ln(r^2/t + B) \quad (1)$$

ここに、 θ : 加熱線の温度(℃)、 q : 加熱線の発熱量(Watt/cm)、 r : 加熱線の半径(cm)

t : 通電加熱時間(Sec)、 A, B : 定数

通電加熱中の時間 t_1 、および t_2 の時の温度をそれぞれ θ_1 、 θ_2 とすると

$$\theta_2 - \theta_1 = \Delta\theta = q/(4\pi\lambda) \cdot \ln(t_2/t_1) \quad (2)$$

$$\lambda = q/(4\pi\Delta\theta) \cdot \ln(t_2/t_1) \quad (3)$$

となり(3)式より熱伝導率 λ を求める。すなわち、 θ と $\ln t$ とをプロットして得られる曲線の勾配が λ となる。しかし、(3)式は半無限板について求めた式であるため、今回のような15

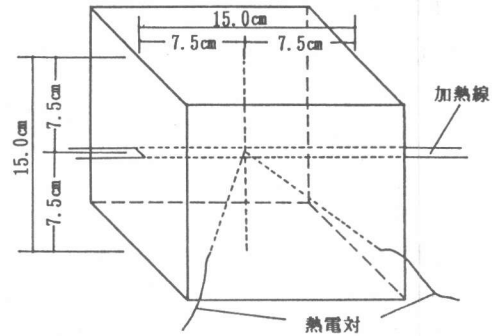


図-1 熱伝導率測定用試験体

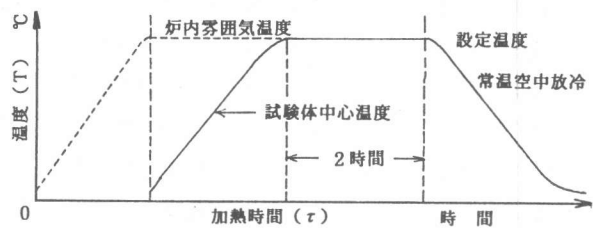


図-2 試験体の加熱方法

cm角の立方体の測定値には、試験体の放熱による測定誤差 t_0 が生じる。このため(3)式中の t_1 および t_2 から測定誤差 t_0 を差し引いて、単位を工学単位に変換した(4)式から熱伝導率 λ を求めた[5]。

$$\lambda = 0.1576 R_0 (1 + \beta \theta) I^2 \cdot dE/d\theta \cdot I^2 \cdot d\log(t - t_0) / dE \quad (4)$$

ここに、 R_0 : 0℃の時の熱電対の抵抗 (Ω/m)、 β : 熱電対の温度係数、
 θ : 加熱線の測定時平均温度 (℃)、 $dE/d\theta$: 熱電対の発電能力 (mV/℃)
 I : 加熱電流、 E : 熱起電力
 $d\log(t - t_0) / dE : \log(t - t_0) \sim E$ 関係をプロットした直線の勾配

(b) 測定装置の概要

図-3に示すような熱伝導率計を用いて実験を行った。その概要を以下に示す。
 測定方式：熱線法、
 測定温度範囲：0～1000℃
 測定範囲：0.05～5.0 (kcal/m・h・℃)
 所要時間：112秒、
 再現性：±5%

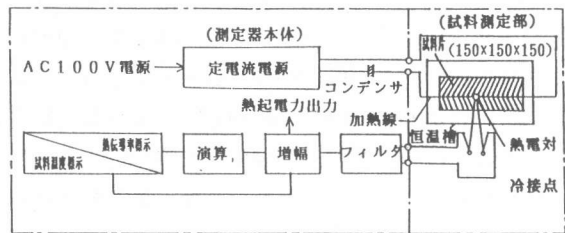


図-3 熱伝導率計系統図

(4) 熱拡散率の測定方法

熱拡散率の測定は本実験用試験体と境界条件を同じくする(5)式[1]と、試験体中心部の温度-時間曲線とを用いて求めた。

$$\{T(L, \tau) - T_1\} / (T_i - T_1) = P(\theta_x) \cdot P(\theta_y) \cdot P(\theta_z) \quad (5)$$

ここに、 T_i : 試験体の初期温度、 T_1 : 炉内雰囲気温度、 $2L$: 試験体寸法、 τ : 時間
 $P(\theta) : 4/\pi \left[\sum_{n=1}^{\infty} (1/n) e^{-(n\pi/2L)^2 \alpha \tau} \right]$ ($n=1, 3, 5, \dots$)

3. 実験結果とその考察

コンクリートの熱的特性はコンクリート中の含水率によってかなり異なるので、コンクリートを絶乾状態にするために、また、急激な加熱によるコンクリートの爆裂防止のために、本実験では、試験体を2日間100℃で乾燥させ、含水率0.5%以下とした。

3.1 超高強度コンクリートの中心温度上昇曲線の特徴

高温下の超高強度コンクリートの内部温度上昇曲線の特徴を把握するために、炉内雰囲気温度を100℃～800℃ま

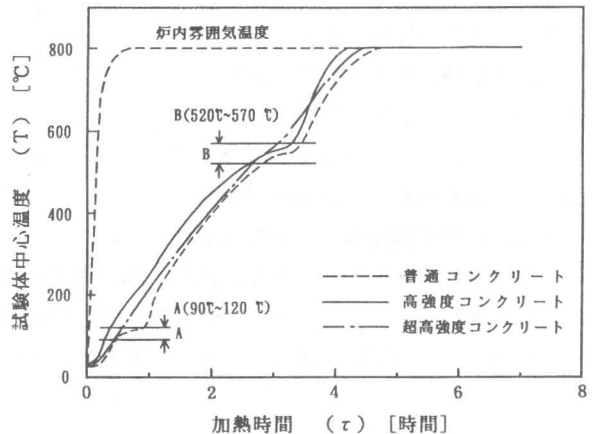


図-4 試験体中心温度上昇曲線

で100℃毎に設定して、炉内中央部に置いた試験体内部中心温度上昇曲線を調べた。その結果の一例を図-4に示す。図には比較のために、普通強度および高強度コンクリートについて調べた結果も示してある。図-4から、試験体の中心温度上昇曲線は、中心温度が90℃～120℃（図中のA領域）ではコンクリート中の水分蒸発によって上昇速度が停滞する傾向があることはすでに知られている[1]。普通強度コンクリートではこのA領域の停滞が明確にみられるが、高強度および超高強度コンクリートではこの停滞は明瞭でないことがわかる。

この現象は、普通強度コンクリートの水セメント比が50%以上あり、コンクリート中の含有水量が多いのに対して、高強度コンクリートでは水セメント比が40%以下、超高強度では同じく25%以下となっており含水量が少ないため、同一条件で2日間乾燥しても、普通強度コンクリート中の水分が十分に抜けきっていないことによるものと思われる。

中心温度が520℃～570℃（図中のB領域）になると再度上昇速度が停滞する。この停滞は高強度のコンクリートになる程小さくなる傾向がある。この停滞原因はコンクリート中の水和生成物のCa(OH)₂がCaOとH₂Oに分解し、脱水すること、さらに骨材中の石英質の結晶変態による吸熱反応による[6]ものと思われる。しかし、超高強度コンクリートについては停滞がほとんどみられない。普通強度、高強度、超高強度のいずれのコンクリートも同一骨材、同一セメントを使用しており、単に、水セメント比と使用混和剤のみ異なることを思えば、この停滞の主要原因は上記2つの理由の他に、コンクリート中の骨材と母材の熱膨張によるコンクリート中の目視できるようなひび割れ（後述する強度回復に寄与する微細なひびわれより大きい）の発生量が高強度のコンクリートになる程多くなるため、超高強度コンクリートでは熱移動速度が大きくなることによるものと思われる。

3.2 熱伝導率(λ)

試験体の中心温度が炉内雰囲気温度に到達後2時間加熱した後、空中放冷し常温(室温)になった時点の熱伝導率を測定した。これは、既報[1]において高温状態で測定した場合の熱伝導率より若干低めの値がでるもののほとんど差がみられないことによる。

図-5に測定結果として、熱伝導率(λ)と加熱温度(T)との関係を示す。図-5から、熱伝導率は加熱温度が高くなるにつれて小さくなる傾向があることがわかる。普通強度コンクリートでは、加熱温度が100℃～200℃の間と500℃～600℃の間に、熱伝導率の低下率の小さい部分がみられる。高強度および超高強度コンクリートのλは加熱温度(T)の増加に伴ってほぼ直線的に低下する。これらの原因については前節と同様であると思われる。今この回帰式を求めると(6)式ようになる。

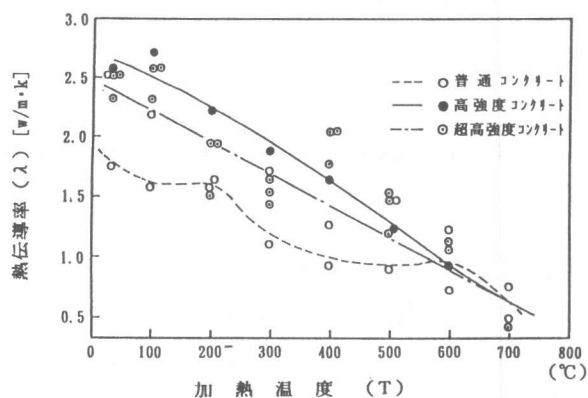


図-5 熱伝導率(λ)と加熱温度(T)との関係

$$\lambda = 2.47 - 0.0024T$$

(6)

3.3 熱拡散率 (α)

熱拡散率 (α) と熱伝導率 (λ) との間には (7) 式のような関係があることから、 α -T 関係は熱伝導率と類似の傾向を示すが、その結果を図-6 に示す。

$$\alpha = \lambda / (\rho C) \quad (\rho : \text{密度}, C : \text{比熱}) \quad (7)$$

図から、 α は λ ほど加熱温度 T に敏感ではないが、超高強度コンクリートの α -T 関係には次のような特徴がみられる。すなわち α は普通強度コンクリートの場合 500°C ~ 600°C の加熱時で最低値を示し、その後増大する傾向があるのに対して、高強度および超高強度コンクリートではこのような傾向が表れない。これは、図-4 に示す試験体の中心温度-時間曲線が、超高強度コンクリートでは図中の A 領域と B 領域のいずれにおいても凹状になることなく、中心温度が加熱時間と共に一様に上昇することによるものと思われる。超高強度コンクリートの α -T 関係の回帰式を (8) 式に示す。なお、 α_0 は火害を受けないコンクリートの熱拡散率を表わす。

$$\alpha / \alpha_0 = 5.71 T^{-0.345} \quad (8)$$

3.4 超高強度火害コンクリートの圧縮強度回復特性

加熱直後、加熱後 3 ヶ月間室内放置および加熱後 3 ヶ月間水中養生した場合の超高強度火害コンクリートの圧縮強度回復率と加熱温度との関係を図-7 に示す。なお、図-7 の縦軸の強度回復率は、各コンクリート種類ごとに、回復強度を回復前 (加熱直後) の強度で除して無次元化したものである。図の (a) と (b) を比較するとコンクリートの強度種類にかかわらず、加熱後に水中養生を行ったコンクリートの圧縮強

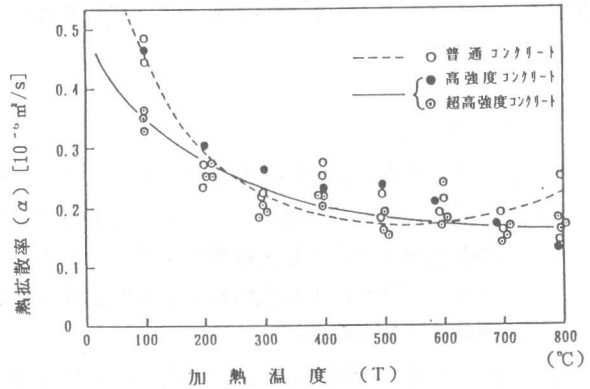
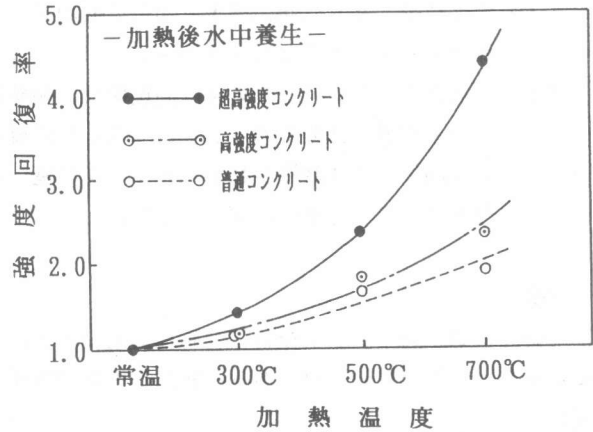
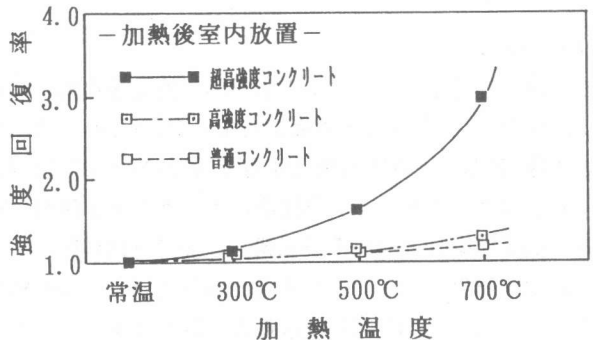


図-6 熱拡散率 (α) と加熱温度 (T)



(a) 加熱後水中養生



(b) 加熱後室内放置

図-7 超高強度火害コンクリートの強度回復特性に及ぼす加熱後の養生方法の影響

度回復率は室内放置のそれに比べてかなり大きくなることわかる。なかでも、超高強度コンクリートでは、室内放置コンクリートの残存強度より10～20%程大きくなり、その傾向が著しい。これは超高強度コンクリート中の未水和セメントが吸湿によって水和生成物によって埋め尽くすことのできない比較的大きな径の空隙量が他の強度のコンクリートに比べて少ない(比重大)ために、コンクリートの強度回復に対するセメントの水和反応による寄与率が高く、低強度になる程空隙による強度低下の影響が大きくなっていくため、水和反応の寄与率が低くなることによるものと思われる。

4. 結 論

本研究によって得られた超高強度コンクリートの熱的性質の特徴ならびに加熱後のコンクリートの圧縮強度回復特性の特徴についてまとめるとおよそ次のようになる。

- (1) 高温加熱下にある超高強度コンクリートの内部温度上昇曲線は普通強度コンクリートのそれと異なり、内部温度が120℃前後ならびに520℃～570℃付近でも温度上昇の停滞は見られない。
- (2) 熱伝導率(λ)は加熱温度が高くなるにつれて、ほぼ直線的に小さくなる。また、高強度のコンクリートになるほど、 λ は大きい値を示す。
- (3) 熱拡散率(α)は熱伝導率と類似の傾向を示すが、加熱温度による α の低下率は普通強度コンクリートのそれより小さい。
- (4) 加熱後のコンクリートの強度回復率は、加熱後の養生方法にかかわらず超高強度コンクリートが最も顕著である。なかでも、加熱後水中養生した超高強度コンクリートの圧縮強度回復率は加熱温度にかかわらず常に室内放置コンクリートのそれより10～20%程大きくなり、その傾向が著しい。

[謝辞]

本研究は第5回セメント技術協会研究奨励金および平成4年度科学研究補助金(一般研究C)によって行った研究の一部である。また、竹本油脂(株)山本氏、花王(株)山中氏には多大な御協力を頂いた。

記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 太田福男; コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11, No. 1, pp. 187-192(1989)
- 2) 原田 有; 日本建築学会研究報告, No. 24, pp. 1-8, (1952)
- 3) 徳田 弘; 土木学会論文報告集, 第212, pp. 89-98, (1973)
- 4) 日本コンクリート工学協会、コンクリート便覧、昭和53年、pp. 116-117
- 5) 熱伝導率計、京都電子工業(株)、pp. 1-15(1990)
- 6) 太田福男; セメント技術大会講演集, No. 46, pp. 352-357(1992)
- 7) U. シュナイダー著 森永他2名訳; コンクリートの熱的特性、技報堂pp. 21-24(1983)
- 8) 南 和孝他1名; セメント技術大会講演集, No. 44, pp. 452-457(1990)
- 9) 長尾覚博他1名; セメント技術大会講演集, No. 46, pp. 458-463(1992)
- 10) 太田福男; セメントコンクリート論文集, No. 43, pp. 400-405(1989)