

023

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3245号

土 木 研 究 所 資 料

コンクリートの熱伝導特性に関する調査

—コンクリートの熱伝導特性の簡易試験法の検討—

平成6年3月

建 設 省 土 木 研 究 所
材料施工部コンクリート研究室

Copyright © (1994) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

コンクリートの熱伝導特性に関する調査

—コンクリートの熱伝導特性の簡易試験法の検討—

コンクリート研究室 室 長 河 野 広 隆
主任研究員 渡 辺 博 志
前部外研究員 杉 山 嘉 則*

*現 麻生セメント株式会社

要 旨

コンクリートの熱伝導特性は、マスコン構造物の熱応力解析に欠かせないパラメータであるが、その試験法は必ずしも簡単に行えるものではなかった。ここでは、熱拡散係数および熱容量を簡易な機器構成で計測する手法について検討を行った。熱伝導率はこの試験法で求められた熱拡散係数と熱容量をかけ合わせることで求めた。一方、ここで検討した試験法が適切な試験結果を与えるものであるか確認するため、別途直接円筒法による熱伝導率の計測を行い、両者の比較を行った。比較検討を行ったところ、両者の方法による熱伝導率の差はほぼ±10%以内の誤差で一致しており、ここで検討した試験法が十分実用的であることを明らかにした。

キーワード：マスコンクリート，熱伝導率，熱拡散係数，熱容量，比熱

はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化に伴いマスコンクリート構造物の施工される機会が増大している。さらに、低発熱セメントなど新材料の開発により、これまではコンクリートの温度応力により困難とされてきた構造物も、施工可能になりつつある。このような技術開発に伴い、学会などでもマスコンクリート構造物の設計法・施工法に関する研究、高度な温度応力解析法の開発などが盛んに行なわれ、これらの研究成果を盛り込んだ指針類が発表されるなど、着実に技術が進歩している状況にある。

しかし、コンクリートの発熱特性、熱特性、クリープ特性、高温度下におけるコンクリートの強度発現特性など、コンクリートの物性に関する研究は、必ずしも十分達成されているというわけではなく、未だ明かにされていない項目も残されている。とりわけ、マスコンクリート構造物の温度応力解析のもとになるコンクリートの熱特性値に関しては、その標準的な試験法も定まっていない状況であり、マスコンクリート構造物の温度ひびわれ防止対策を講ずるうえで、その試験法の確立は重要であると考えられる。

これまで、コンクリートの熱拡散係数、熱伝導率などの熱特性値は、その試験が困難であり、特殊な試験装置を必要としているおり、かつ試験を実施するにあたりかなりの熟練を要するため、余り実施されてこなかった。熱特性値の標準的な試験法が定められない理由は、この点にあると考えられる。

本報告書は、簡単な機器構成で特別な試験装置を必要とせず、かつ精度の良いコンクリートの熱伝導特性試験に関する調査を行ない、熱拡散係数試験の精度向上法および新たに導入した熱容量の測定試験法の実施試験を行なった結果をとりまとめたものである。

目 次

第1章	まえがき	1
第2章	既存の熱伝導特性試験方法	2
2.1	熱拡散係数の測定	2
2.2	Glover 法の測定原理	2
2.3	熱伝導率の測定方法	2
2.4	比熱・熱容量の測定方法	3
第3章	Glover 法によるコンクリートの熱拡散係数の測定	5
3.1	概要	5
3.2	Glover 法での誤差要因について	5
3.3	供試体に設置された熱伝対の位置の補正について	8
3.4	まとめ	9
第4章	熱伝導率・熱容量の測定	11
4.1	概要	11
4.2	熱容量試験法の概要	11
4.3	試験手順	13
第5章	コンクリートの熱伝導特性の試験計測	15
5.1	概要	15
5.2	実験概要	15
5.3	熱拡散係数の測定	16
5.4	まとめ	22
第6章	熱容量・熱伝導率の測定	23
6.1	概要	23
6.2	熱容量の測定	23
6.3	直接円筒法による熱伝導率の計測	25
6.4	熱容量測定結果の妥当性の確認	26
6.5	熱容量測定試験の誤差に関する検討	27
6.6	まとめ	29
第7章	まとめ	31

第1章 まえがき

マスコンクリートの熱応力解析を行なうためには、コンクリートの発熱特性、熱伝導特性、熱膨張係数などの熱特性値を知る必要がある。このうち、コンクリートの熱伝導特性は、熱伝導率、熱容量、熱拡散係数によって表される。これらの熱伝導特性の試験方法は、これまでいくつかの方法が提案されてきたが、熱拡散係数を求めるGlover法を除いては、必ずしも簡単に行なえるものではなく、試験を省略し過去の測定結果を参考に数値が定められる場合が多い。ところが、熱伝導特性はコンクリートの配合条件、あるいは使用材料などによって変化し、熱応力の解析結果に大きな影響を与えることが予想されるので、試験によりその値を定めることが望ましい。

ここでは、熱伝導率、熱容量、熱拡散係数を簡易な機器構成で計測する手法について検討を行なったので報告する。

第2章 既存の熱伝導特性試験方法

2. 1 熱拡散係数の測定

熱拡散係数の測定法はGlover法とTomson法がある¹⁾。降温行程による測定では、前者は一様に暖められた供試体を水中において冷却し、供試体の温度低下を測定するものであり、後者は一様に暖められた供試体を空冷し供試体の温度低下を測定するものであって、その測定原理は同一である。ただし、空冷の場合その風速により温度低下度に変動が出るため一般にはGlover法を用いる場合が多い。Glover法は古くから存在する方法であるが、試験実施の頻度が低いため、その測定方法が広く知られていないと考えられるので、ここでは、その原理から説明することとする。

2. 2 Glover法の測定原理

Glover法は、円柱供試体の温度変化を測定し、この測定値と理論解を比較することにより熱拡散係数を決定するものである。試験操作は次のとおりである。

- 1) 温度測定用の熱電対を埋め込んだコンクリート円柱供試体を用意する。
- 2) この円柱供試体を温水に浸せきする（昇温行程）。もしくは、円柱供試体をあらかじめ一様な温度に暖め、これを冷水中に浸せきする（降温行程）。ここで、円柱供試体の初期温度と周囲の温水もしくは水との相対温度差を θ_0 とする。ここで、温水もしくは冷水の温度が時間と共に変動することがあってはならない。
- 3) 供試体に埋め込んだ熱電対により、コンクリート温度(θ_i)を測定する。供試体の温度が周囲の水の温度とほぼ同じになるまで計測を継続する。
- 4) 計測終了後各時刻 t における供試体温度変化の相対値 $(\theta_0 - \theta_i) / \theta_0$ を計算する。
- 5) 各 $(\theta_0 - \theta_i) / \theta_0$ に対する無次元時間 t' の理論解を求める。
- 6) 無次元時間は $h^2 \cdot t / R^2$ であたえられるので、理論解より決定される t' から熱拡散係数 h^2 を次式から求める。

$$h^2 = R^2 \cdot t' / t$$

ここで、供試体温度の理論解の導きを付録1に示す。このようにGlover法は、理論解の準備に多少の労力が必要となるが、その試験操作そのものは非常に簡便であり特殊な装置は必要としない特長を有する。

2. 3 熱伝導率の測定方法

熱伝導率の試験法はこれまで主に2つの方法が提案されている。一つは直接円筒法²⁾によるもの、もう一つは平板比較法³⁾によるものである。本報告書では熱伝導率の測定に直接円筒法を用いたので次に直接円筒法について概略を説明する。

直接円筒法による試験装置の概要を図-2. 1に示す。円筒供試体の内側に設置したヒーターと供試体外

部の水に設置したヒーターおよび冷却器を制御し、供試体の内径位置での温度と周囲の水の温度が一定になり、また内外の温度差が適当になるような定常状態を作り上げる。一般にこの操作は供試体寸法にもよるが、長時間を要するものである。このようにして定常状態を作り上げると、供試体内部から外部に流れる熱流は一定となり、供試体上面および下面に設置された断熱材により、円周方向のみに生じることとなる。ここで、この定常状態を保つために供試体内側に加えなければならない熱量（ Q ）を測定することができれば定常状態での熱流 Q は

$$Q = \lambda \cdot 2\pi r \left(\frac{d\theta}{dr} \right)$$

で与えられ、 $r \left(d\theta / dr \right)$ は円筒供試体内径での温度を θ_a 、外径での温度を θ_b とすると次式

$$r \left(\frac{d\theta}{dr} \right) = \frac{(\theta_a - \theta_b)}{\ln a - \ln b}$$

で求められるため熱伝導率 λ を求めることが可能になる。

この方法は、定常状態を再現することが非常に難しいこと、供試体上面および下面での断熱が不十分な場合、熱がここから逃げるためコンクリート供試体の熱流が仮定と異なり測定誤差の要因となるため断熱状態をしっかりとさせなければならないこと、供試体内径中あるいは外径中の水を攪拌するが、これによる熱が誤差要因となるため攪拌熱の補正を正確に行なうこと、供試体内径にセットしたヒーターから発生する熱量を正確に把握しなければならないなど、試験に伴ういくつかの困難な問題が存在する。

2. 4 比熱・熱容量の測定方法

比熱はもっとも理解しやすいパラメータであり、一般に断熱カロリーメータを用いた方法あるいは混合法により実施されるのが一般的である。⁴⁾ 混合法による場合は、あらかじめ所定温度に熱したコンクリート供試体を水中に投じて、水温の上昇を計るものであるが、コンクリートから水への熱の移行が短時間に行なわれないと、外部に逸散する熱量が大きくなるため正確な計測ができない。このため、コンクリートの試料を粉碎しておく必要がある。しかし、粗骨材とモルタルの熱容量は異なるため、粉碎に際し、得られる試料中のモルタル分と粗骨材の分量の比率が実際のコンクリートと同一であり、かつ試料毎のばらつきがなくな

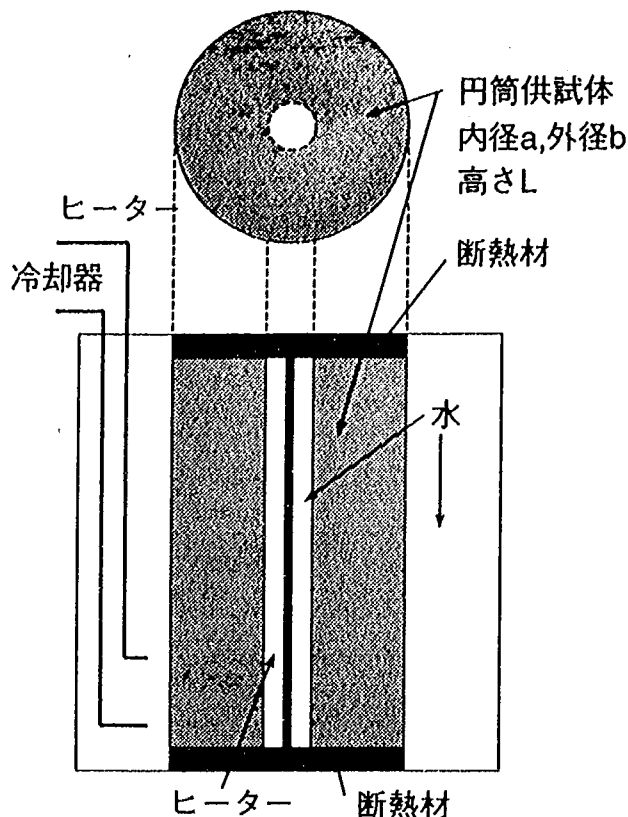


図-2. 1 直接円筒法による熱伝導率測定方法

るように調整する必要がある。このためにはその粉碎量をかなり多くする必要があること、また粉碎により、空隙組織の変化、試料の水中投入時の未水和セメントの水和、水の吸着による熱量の変化などにより必ずしも適切な値が得られるとは限らない。

（2）試料の温度

（3）試料の形状

（4）試料の重量

（5）試料の密度

（6）試料の比熱

（7）試料の熱伝導率

（8）試料の熱膨張率

（9）試料の熱収縮率

（10）試料の熱変形率

（11）試料の熱分解率

（12）試料の熱安定性

（13）試料の熱反応性

（14）試料の熱伝導率

（15）試料の熱膨張率

（16）試料の熱収縮率

（17）試料の熱変形率

（18）試料の熱分解率

（19）試料の熱安定性

（20）試料の熱反応性

（21）試料の熱伝導率

（22）試料の熱膨張率

（23）試料の熱収縮率

（24）試料の熱変形率

（25）試料の熱分解率

（26）試料の熱安定性

（27）試料の熱反応性

（28）試料の熱伝導率

（29）試料の熱膨張率

（30）試料の熱収縮率

（31）試料の熱変形率

（32）試料の熱分解率

（33）試料の熱安定性

（34）試料の熱反応性

（35）試料の熱伝導率

（36）試料の熱膨張率

（37）試料の熱収縮率

（38）試料の熱変形率

（39）試料の熱分解率

（40）試料の熱安定性

（41）試料の熱反応性

（42）試料の熱伝導率

（43）試料の熱膨張率

（44）試料の熱収縮率

（45）試料の熱変形率

（46）試料の熱分解率

（47）試料の熱安定性

（48）試料の熱反応性

（49）試料の熱伝導率

（50）試料の熱膨張率

（51）試料の熱収縮率

（52）試料の熱変形率

（53）試料の熱分解率

（54）試料の熱安定性

（55）試料の熱反応性

（56）試料の熱伝導率

（57）試料の熱膨張率

（58）試料の熱収縮率

（59）試料の熱変形率

（60）試料の熱分解率

（61）試料の熱安定性

（62）試料の熱反応性

（63）試料の熱伝導率

（64）試料の熱膨張率

（65）試料の熱収縮率

（66）試料の熱変形率

（67）試料の熱分解率

（68）試料の熱安定性

（69）試料の熱反応性

（70）試料の熱伝導率

（71）試料の熱膨張率

（72）試料の熱収縮率

（73）試料の熱変形率

（74）試料の熱分解率

（75）試料の熱安定性

（76）試料の熱反応性

（77）試料の熱伝導率

（78）試料の熱膨張率

（79）試料の熱収縮率

（80）試料の熱変形率

（81）試料の熱分解率

（82）試料の熱安定性

（83）試料の熱反応性

（84）試料の熱伝導率

（85）試料の熱膨張率

（86）試料の熱収縮率

（87）試料の熱変形率

（88）試料の熱分解率

（89）試料の熱安定性

（90）試料の熱反応性

（91）試料の熱伝導率

（92）試料の熱膨張率

（93）試料の熱収縮率

（94）試料の熱変形率

（95）試料の熱分解率

（96）試料の熱安定性

（97）試料の熱反応性

（98）試料の熱伝導率

（99）試料の熱膨張率

（100）試料の熱収縮率

（101）試料の熱変形率

（102）試料の熱分解率

（103）試料の熱安定性

（104）試料の熱反応性

（105）試料の熱伝導率

（106）試料の熱膨張率

（107）試料の熱収縮率

（108）試料の熱変形率

（109）試料の熱分解率

（110）試料の熱安定性

（111）試料の熱反応性

（112）試料の熱伝導率

（113）試料の熱膨張率

（114）試料の熱収縮率

（115）試料の熱変形率

（116）試料の熱分解率

（117）試料の熱安定性

（118）試料の熱反応性

（119）試料の熱伝導率

（120）試料の熱膨張率

（121）試料の熱収縮率

（122）試料の熱変形率

（123）試料の熱分解率

（124）試料の熱安定性

（125）試料の熱反応性

（126）試料の熱伝導率

（127）試料の熱膨張率

（128）試料の熱収縮率

（129）試料の熱変形率

（130）試料の熱分解率

（131）試料の熱安定性

（132）試料の熱反応性

（133）試料の熱伝導率

（134）試料の熱膨張率

（135）試料の熱収縮率

（136）試料の熱変形率

（137）試料の熱分解率

（138）試料の熱安定性

（139）試料の熱反応性

（140）試料の熱伝導率

（141）試料の熱膨張率

（142）試料の熱収縮率

（143）試料の熱変形率

（144）試料の熱分解率

（145）試料の熱安定性

（146）試料の熱反応性

（147）試料の熱伝導率

（148）試料の熱膨張率

（149）試料の熱収縮率

（150）試料の熱変形率

（151）試料の熱分解率

（152）試料の熱安定性

（153）試料の熱反応性

（154）試料の熱伝導率

（155）試料の熱膨張率

（156）試料の熱収縮率

（157）試料の熱変形率

（158）試料の熱分解率

（159）試料の熱安定性

（160）試料の熱反応性

（161）試料の熱伝導率

（162）試料の熱膨張率

（163）試料の熱収縮率

（164）試料の熱変形率

（165）試料の熱分解率

（166）試料の熱安定性

（167）試料の熱反応性

（168）試料の熱伝導率

（169）試料の熱膨張率

（170）試料の熱収縮率

（171）試料の熱変形率

（172）試料の熱分解率

（173）試料の熱安定性

（174）試料の熱反応性

（175）試料の熱伝導率

（176）試料の熱膨張率

（177）試料の熱収縮率

（178）試料の熱変形率

（179）試料の熱分解率

（180）試料の熱安定性

（181）試料の熱反応性

（182）試料の熱伝導率

（183）試料の熱膨張率

（184）試料の熱収縮率

（185）試料の熱変形率

（186）試料の熱分解率

（187）試料の熱安定性

（188）試料の熱反応性

（189）試料の熱伝導率

（190）試料の熱膨張率

（191）試料の熱収縮率

（192）試料の熱変形率

（193）試料の熱分解率

（194）試料の熱安定性

（195）試料の熱反応性

（196）試料の熱伝導率

（197）試料の熱膨張率

（198）試料の熱収縮率

（199）試料の熱変形率

（200）試料の熱分解率

（201）試料の熱安定性

（202）試料の熱反応性

（203）試料の熱伝導率

（204）試料の熱膨張率

（205）試料の熱収縮率

（206）試料の熱変形率

（207）試料の熱分解率

（208）試料の熱安定性

（209）試料の熱反応性

（210）試料の熱伝導率

（211）試料の熱膨張率

（212）試料の熱収縮率

（213）試料の熱変形率

（214）試料の熱分解率

（215）試料の熱安定性

（216）試料の熱反応性

（217）試料の熱伝導率

（218）試料の熱膨張率

（219）試料の熱収縮率

（220）試料の熱変形率

（221）試料の熱分解率

（222）試料の熱安定性

（223）試料の熱反応性

（224）試料の熱伝導率

（225）試料の熱膨張率

（226）試料の熱収縮率

（227）試料の熱変形率

（228）試料の熱分解率

（229）試料の熱安定性

（230）試料の熱反応性

（231）試料の熱伝導率

（232）試料の熱膨張率

（233）試料の熱収縮率

（234）試料の熱変形率

（235）試料の熱分解率

（236）試料の熱安定性

（237）試料の熱反応性

（238）試料の熱伝導率

（239）試料の熱膨張率

（240）試料の熱収縮率

（241）試料の熱変形率

（242）試料の熱分解率

（243）試料の熱安定性

（244）試料の熱反応性

（245）試料の熱伝導率

（246）試料の熱膨張率

（247）試料の熱収縮率

（248）試料の熱変形率

第3章 Glover法によるコンクリートの熱拡散係数の測定

3.1 概要

Glover法は先にも述べたように比較的簡単に実施できるという特長を有する試験法であるが、計測に際しては熱電対の埋め込み位置、周囲の水の温度管理状況、熱電対による温度計測誤差などが、熱拡散係数の算定結果にどのような影響を及ぼすか明確ではないため、これらの点を明らかにしなければ、必ずしも適切な試験法であるとは言えない。すなわち、Glover法を信頼のおける試験法として確立させるためには、試験に付随する誤差要因を明らかにし、その誤差要因が熱拡散係数の計測結果に影響を及ぼさないような改良を行なう必要があると考えられる。ここでは、Glover法による熱拡散係数測定の誤差要因およびその改善法について検討を行なうこととする。

3.2 Glover法での誤差要因について

ここでは、熱拡散係数の測定の誤差要因として、

- 1) 周囲の水の水温の管理誤差：Glover法では水温は一定でなければならないが、この温度管理に誤差が生じ温度が一定ではなかったことが測定結果に及ぼす影響
- 2) 温度計測そのものの計測誤差：温度は熱電対をデジタルデータロガーをもちいて計測するが、この時の温度読み取り値の誤差が及ぼす影響
- 3) 熱電対の半径方向の設置位置の誤差：熱電対は当初決められた位置（通常円柱供試体の中央）に設置すべきであるが、供試体のコンクリートの詰め込み、締め固めにより供試体半径方向に熱電対の感温部が移動することによる影響
- 4) 熱電対の高さ方向の設置位置の誤差：熱電対は当初決められた位置（通常円柱供試体の中央）に設置すべきであるが、供試体のコンクリートの詰め込み、締め固めにより供試体高さ方向に熱電対の感温部が移動することによる影響

の4つを取り上げて検討を行なうこととする。初期状態におけるコンクリート供試体温度と水温の差を θ_0 とし時刻 t における供試体の温度測定値と水温の差を θ_1 とする。 $\theta_3 = \theta_0 - \theta_1$ とすると、

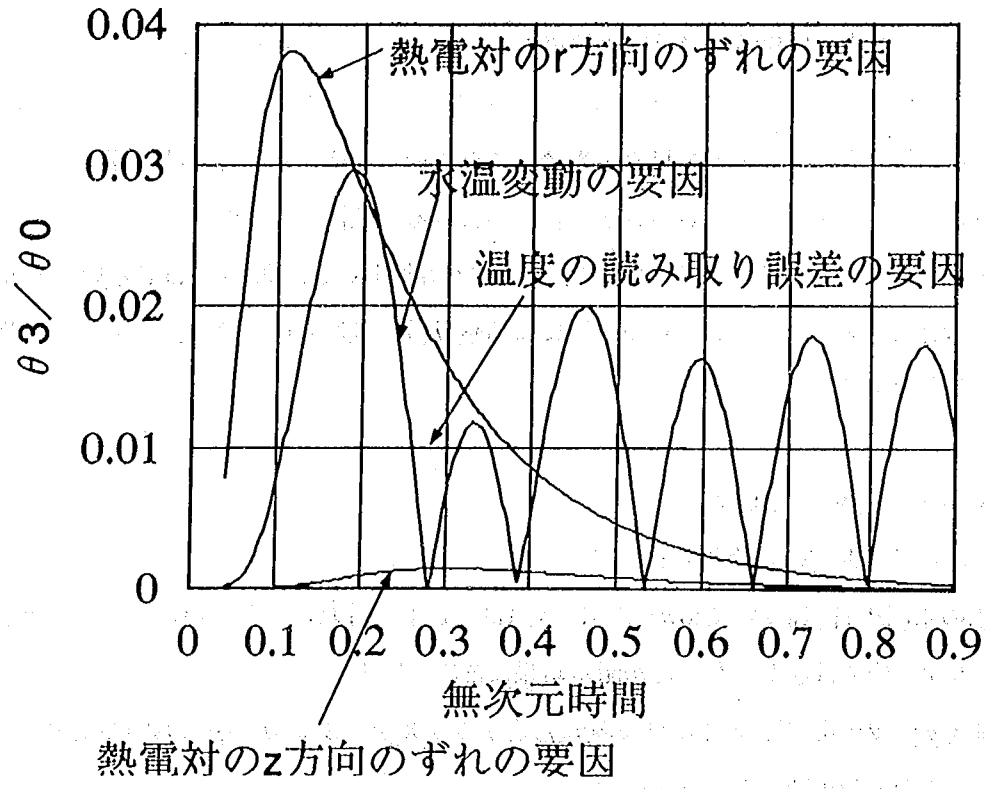
$$\delta\left(\frac{\theta_3}{\theta_0}\right)_{error} = \delta\left(\frac{\theta_3}{\theta_0}\right)_{water} + \delta\left(\frac{\theta_3}{\theta_0}\right)_{measure} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\theta_3}{\theta_0}\right)dr + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\theta_3}{\theta_0}\right)dz$$

となる。右辺第1項は上記誤差要因の1)に対応し、以下4項まで上記要因に対応している。ここで、左辺の誤差による熱拡散係数の誤差は次のように計算できる。

$$\delta\left(\frac{\theta_3}{\theta_0}\right)_{error} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\theta_3}{\theta_0}\right)_t \frac{\delta t^2}{h^2}$$

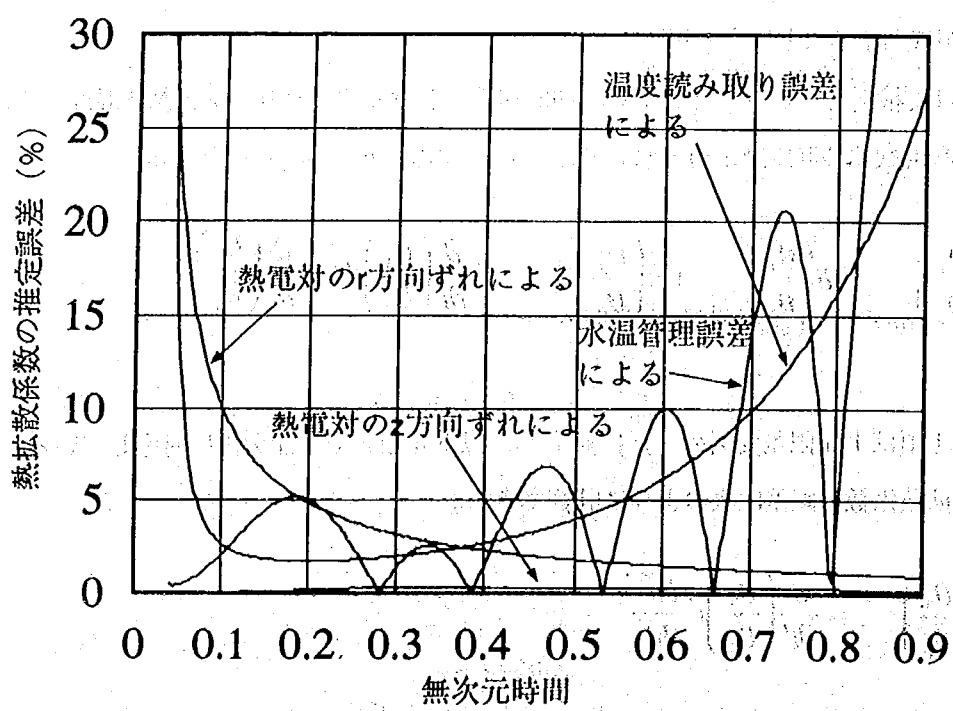
ここでは $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ 、周囲の水の温度管理がサーモスタットなどにより、10分周期で θ_0 の10% (3

℃) 生じ、温度の読み取り誤差が θ_0 の 1% (0.3℃)、半径方向の熱電対のずれが $R = 5\text{ cm}$ の供試体において 1 cm、高さ方向の熱電対の設置位置のずれを $L = 20\text{ cm}$ の供試体において 1 cm 生じたとする。各要



図－3. 1 θ_3/θ_0 の計算結果

因ごとの θ_3/θ_0 を計算した結果を図－3. 1 に示す。なお θ_3/θ_0 はいずれもその絶対値を取ることにした。この図より、熱電対設置位置の高さ方向(z方向)のずれによる θ_3/θ_0 の変動は非常に小さいことがわかる。これに比べ、熱電対位置の半径方向のずれの影響はかなり大きく、特に無次元時間が小さいところで



図－3. 2 熱拡散係数の各要因後との推定誤差

誤差が大きくなっている。これに対し、水温の影響は、無次元時間が大きいところから小さいところまで、影響が出ている。これより熱拡散係数の誤差を推定した結果を各要因別に示したものが、図-3. 2である。

図-3. 1からも予想されるとおり、高さ方向の熱電対位置のずれの熱拡散係数の測定結果に及ぼす影響は非常に小さく、無視しうるものであることがわかる。一方、半径方向の熱電対の位置のずれに関しては、無次元時間が小さいところでは、大きな影響を及ぼすものの、無次元時間が0.2以降ではその影響は小さくなる。温度の読み取り誤差の影響は無次元時間の大きいところと、小さいところで影響が大きく出ることがわかる。このことは、Glover法の理論解の様子から容易に予想できる。理論解は、試験開始後および長時間経過したところで温度変化速度が非常に小さくなる。従って、この領域では熱拡散係数に変動があっても θ_3/θ_0 の値はあまり変化しない。言い換えると、 θ_3/θ_0 の値のわずかな変動が熱拡散係数の値を大きく

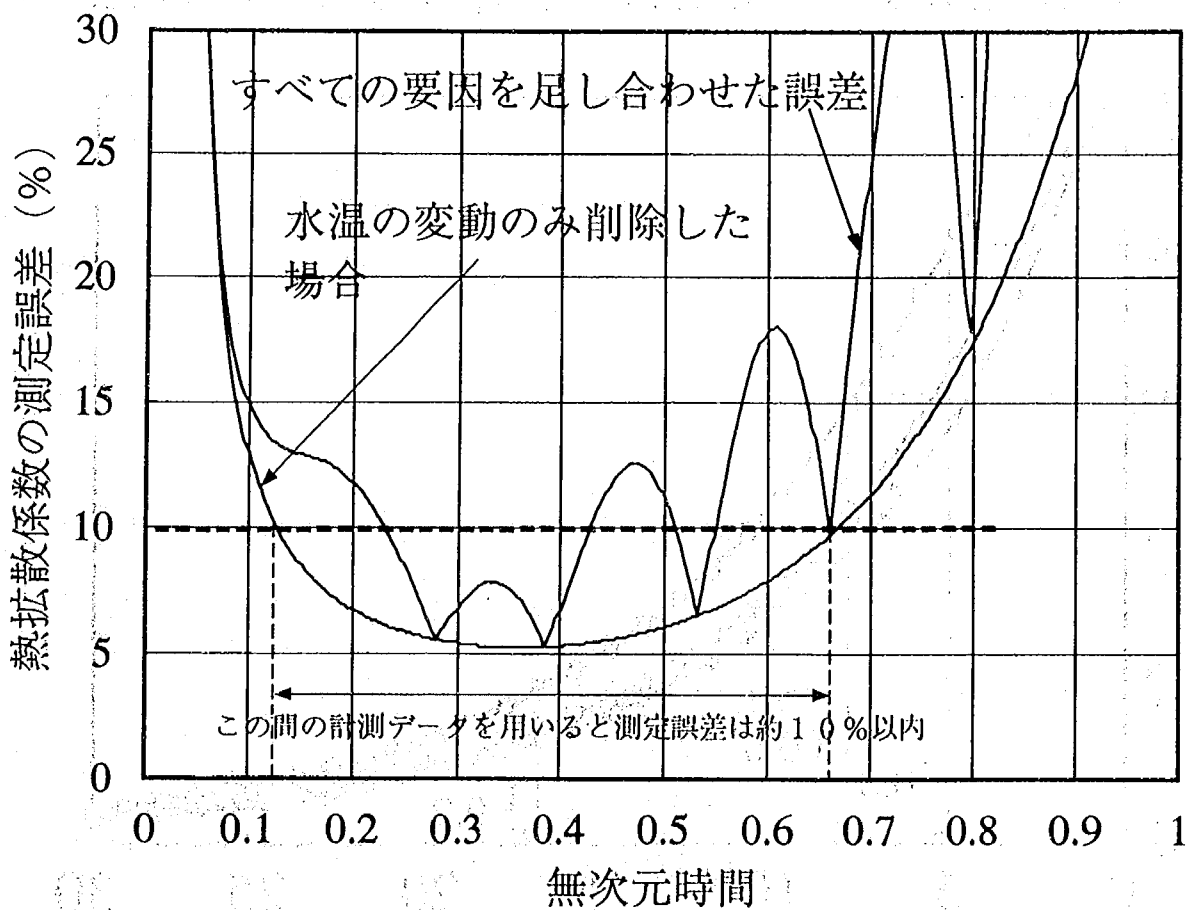


図-3. 3 熱拡散係数の推定誤差

変動させることになる。温度の読み取り誤差を簡単に小さくすることは難しいことを考えると、試験開始直後および試験開始後長時間が経過した領域で計測した値を用いることは好ましくないと言える。ここで考慮したすべての要因を足し合わせたときの、熱拡散係数の測定誤差を求めた結果を図-3. 3に示す。供試体周囲の水温の変化は、水の体積を大きくすることにより減少できると考えられるので、この要因のみ削除した結果も図中に合わせて示す。水温の変動が小さい場合は、無次元時間が0.12から0.66あたりまでの計測データを用いると、約10%程度の計測誤差に収められることがわかる。また、この範囲では熱拡散

係数の測定誤差を少なくするための、制御しうる要因としては、熱電対の埋め込み位置の半径方向のずれであり、このずれを小さくすることによりさらに高精度の測定が可能となる。ただし、これにも限界があると考えられるので、次に熱電対の埋め込み位置の半径方向のずれの補正方法について検討することとする。

3. 3 供試体に設置された熱電対の位置の補正について

供試体に設置された熱電対が所定の位置からずれた場合、高さ方向については計測誤差には結びつかないものの、半径方向のずれは無視しえないものとなる。正確な熱拡散係数を測定するためには、測定後供試体を切断し、熱電対感温部の位置を確認することが望ましいが、この操作は必ずしも容易ではない。熱電対の位置が異なれば、供試体の温度変化の理論解が異なるので、これを利用して熱電対位置の推定が可能であると考えられる。ここでは、 θ_3 / θ_0 の値がある値に低下したときの時刻と基準とし、それ以外の θ_3 / θ_0 が計測された時刻の比率を考える。例えば図-3. 4において $\theta_3 / \theta_0 = 0.8$ となった所を基準とし、この

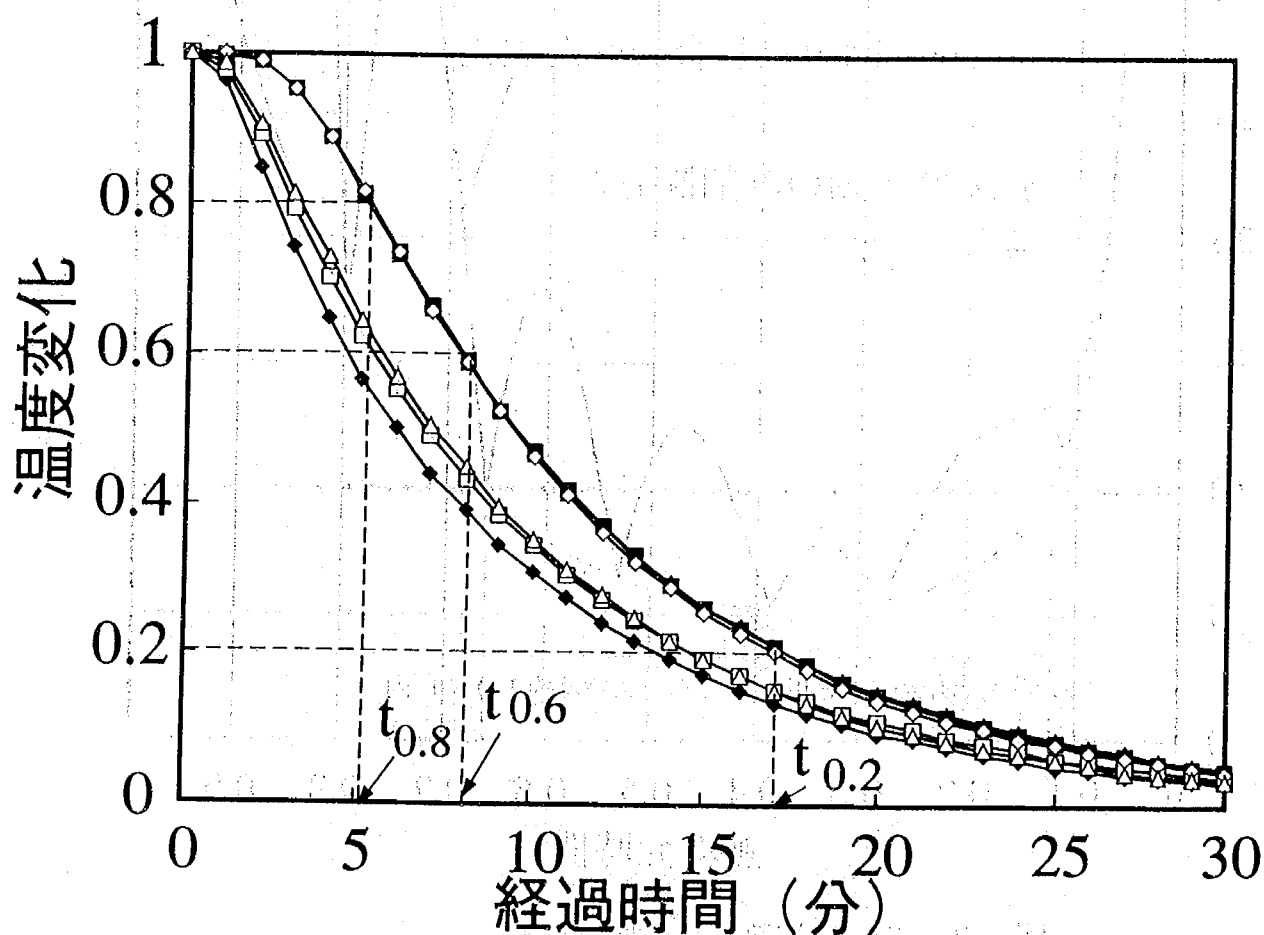


図-3. 4 Glover法における供試体温度計測例

時点の経過時間を $t_{0.8}$ とする。温度変化 θ_3 / θ_0 がそれ以外の値(θ')になった時点の経過時刻を、 $t(\theta')$ とし $t(\theta') / t_{0.8}$ を計算する。ここで、ある θ' に対する経過時間 $t(\theta')$ は供試体の熱拡散係数に依存するが、他の $t(\theta')$ との比をとると、この比は分子分母両方に熱拡散係数が入りキャンセルするため、結果的にはコンクリートの熱拡散係数によらず、熱電対位置と計測開始後の経過時間のみに依存した関数となる。

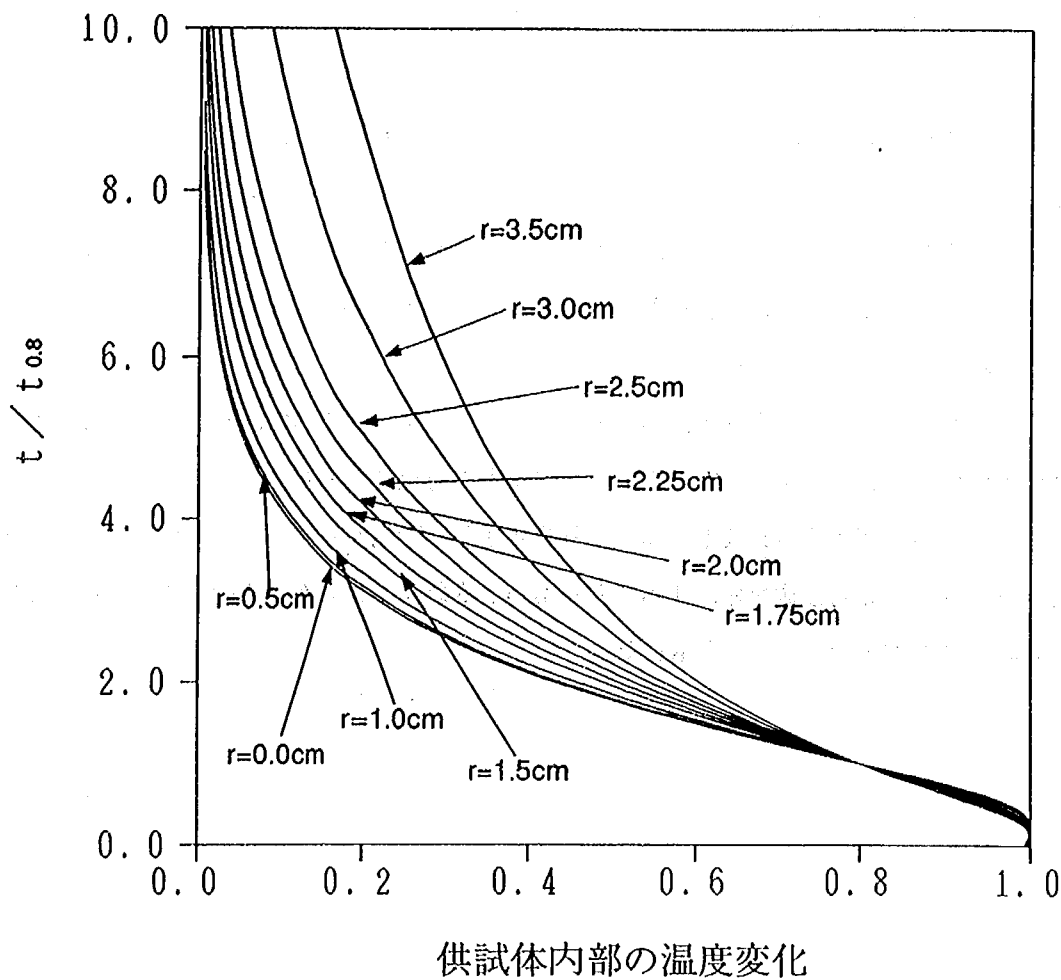


図-3.5 θ' と $t (\theta') / t_{0.8}$ の関係の理論曲線

図-3.5は横軸に θ' 、縦軸に $t (\theta') / t_{0.8}$ をとり、熱電対の位置（半径方向の座標）を様々に変えたときの理論曲線を示したものである。理論曲線を見ると半径方向のずれが1cm未満ではかなり近くなっている、 θ' と $t (\theta') / t_{0.8}$ の関係の実測値から熱電対位置の半径方向のずれを正確に求めることはやや困難であるが、それ以上の熱電対のずれは推定可能であると考えられる。ここで、基準となる経過時刻として、たとえば $t_{0.9}$ に設定すれば θ' と $t (\theta') / t_{0.9}$ のほうが熱電対位置の違いによる理論曲線の差は大きくなり、1cm未満の熱電対位置のずれを検出できる可能性はあるが、 $t_{0.9}$ をもちいると、分母となる $t_{0.9}$ が温度計測誤差などの影響を受けやすくなるので必ずしも正確な推定をできるとは限らないこと、また1cm未満の熱電対位置のずれが熱拡散係数の計測結果に及ぼす影響は少ないと考えられることから、次章以降で示す実測結果の検討では基準時刻として $t_{0.8}$ を用いることとした。

3.4 まとめ

以上の検討結果をまとめると以下の様になる。

- 1) Glover法による熱拡散係数の測定誤差について、周囲の水温管理誤差・温度計測時の読み取り誤差・熱電対の半径方向の設置位置のずれ・熱電対の高さ方向の設置位置のずれと要因を分割して、それぞれの影響度の検討を行なった。

- 2) 上記要因のうち熱電対の高さ方向の設置位置のずれは計測誤差にほとんどつながらないことが明らかになった。
- 3) 温度計測時の読み取り誤差は、その性格上避けえないものであり、Glover法開始後の短時間の間、あるいは計測開始後長時間を経過した時点では、この温度計測時の読み取り誤差が熱拡散係数の測定結果に大きな影響を及ぼす。従って、Glover法による熱拡散係数の測定では、計測開始から終了までのすべてのデータを用いることは好ましくなく、ある範囲の無次元時間の領域のみを用いることが重要であることがわかった。
- 4) 供試体作成の際に熱電対の半径方向の設置位置のずれは必ず生じるものであるが、半径方向のずれは熱拡散係数の測定結果に及ぼす影響が大きく、理論解との対比により熱拡散係数を求める際、そのずれを考慮した理論解を用意する必要がある。ずれを考慮した理論解を用意するためには、測定後、供試体の切断を行ない熱電対位置を確認することがもっとも確実であるが、この方法によらなくても熱電対の位置のずれを推定できる方法を示した。

第4章 熱伝導率・熱容量の測定

4.1 概要

コンクリートの熱伝導特性のうち、熱拡散係数は比較的容易に計測が可能であるが、熱伝導率・比熱（熱容量）の計測は必ずしも容易ではない。しかし、コンクリートの熱伝導率 λ 、熱容量 ρc 、熱拡散係数 h^2 の間には、その定義から

$$\lambda = \rho c \cdot h^2 \quad (4.1)$$

という関係が成立するので、熱伝導率、熱容量、熱拡散係数をすべて試験によって求める必要はなく、この中から簡単な試験によって得られる2つの特性値を求め、残りの一つは上式によって算出すればよい。実際には、熱拡散係数の測定は容易であるので、熱伝導率もしくは熱容量を測定できればよい。ここでは、2者のうち熱容量の測定方法について簡易に行なえる方法を検討した。その試験手順は熱拡散係数を求める際に行なわれるGlover法を若干変更し、非定常的に熱容量を求めるものであり、熱伝導率は式(4.1)から求めることとした。

4.2 熱容量

試験法の概要

試験供試体は、Glover法で行なう円柱供試体と同じものを用い、この供試体を所定の温度に一樣に暖めた後に、所定量の水が入った発泡スチロール容器に供試体をいれ、時間経過と共に低下する供試体温度を計測

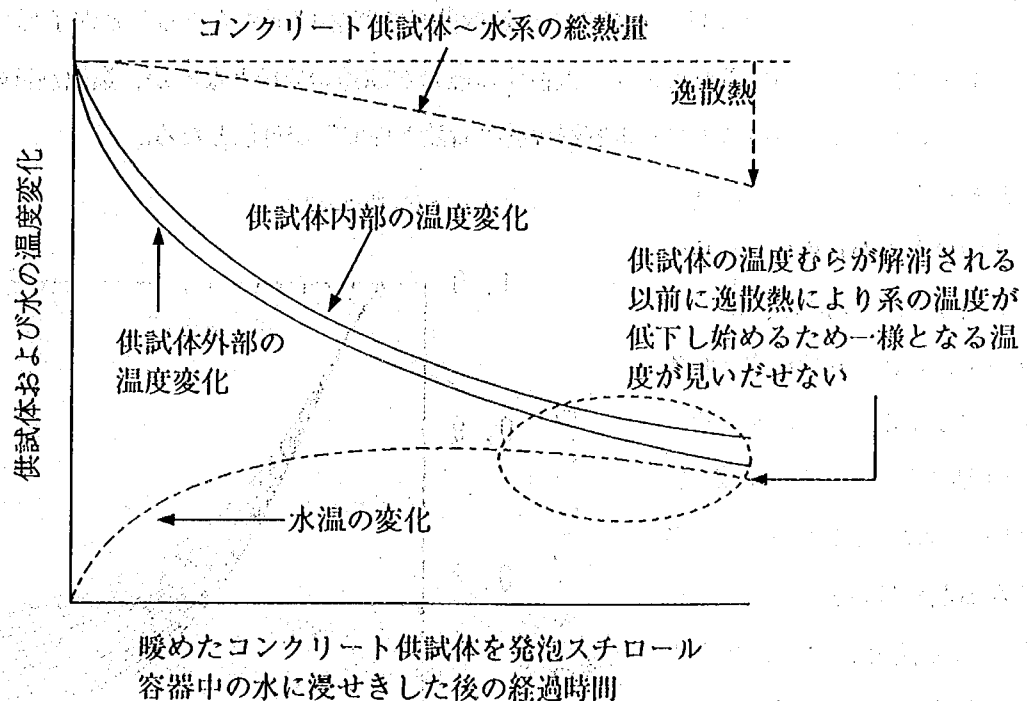


図-4.1 コンクリート供試体～水系の温度変化

することにより、熱容量を決定するものであり試験の手順はGlover法とほぼ同様である。異なっている点は次に述べる項目だけである。

Glover法では供試体の周囲の水の容積は非常に大きく、供試体から発生するあるいは供試体に吸収される

熱によっても水温は変化しないのに対し、ここで行なう熱容量試験法では水の容積を少なくし、暖められたコンクリート供試体から発生する熱量により水の温度を上昇させる点である。供試体周りの水の温度が上昇するため、Glover法に比べて供試体温度の変化速度、変化量とも小さくなる。ここで、供試体の温度が発泡スチロール容器内にあらかじめ入れてある水に対して θ_0 だけ高かったとしたとき、コンクリートの熱容量が大きいほど供試体に蓄えられている熱量が大きいので、周囲の水の温度上昇は大きくなり、供試体の温度低下は緩やかになる。したがって、コンクリート供試体の温度変化を測定することにより熱容量の測定が可能となる。

ここで、コンクリート供試体～水で構成される系から逸散する熱量が0であれば、すなわち、コンクリート供試体～水で構成される系が断熱容器内にあれば、コンクリート供試体の温度と水の温度が等しくなるまで静置し、この時の水温あるいは供試体温度を計測することにより、容易に熱容量が算定できる。しかし、このような断熱条件を再現するのは非常に困難であり、実際には熱の逸散が生じる。このような場合、供試体～水系の温度変化は図-4. 1に示すようになり、供試体の温度が一様になる以前に温度低下が生じ、水と供試体の温度が等しくなるところを見いだすことはできなくなるため、実際にはこのような方法は用いることはできない。

ここでは、コンクリート供試体と水の温度が等しくなる以前に、すなわち時間の経過に伴うコンクリート供試体の温度変化が進行しつつある非定常状態での計測結果から、熱容量を算出することを試みている。このため、計測に必要な時間は短くて済み、逸散熱量の影響は小さくなることが予想される。当然、コンクリート供試体～水で構成される系から逸散する熱量が誤差の要因となるが、逸散熱量の影響が小さいため、ここで用いたような発泡スチロール容器程度の断熱条件で計測可能となる。

熱容量を決定するためには、

ここではあらかじめコンクリートの熱容量を仮定し、コンクリート供試体～水で構成される系の温度変化の理論解を求め、この理論解と実測値の比較を行ない、両者の差がもっとも小さくなる熱容量の値を探し、これをもって熱容量の計測値とした。理論解を導きだすに当たって、コンクリート供試体内部では2次元円筒座標系での熱伝導方程式に支配され、境界条件はコンクリート供試体の表面での温度と水温が等しいという条件を用いている。さらに、コンク

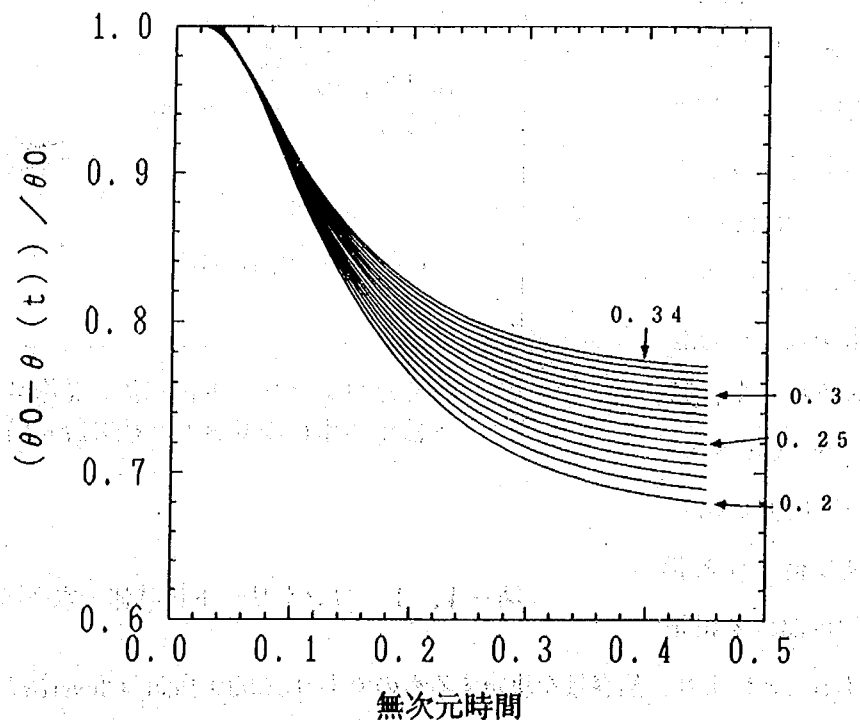
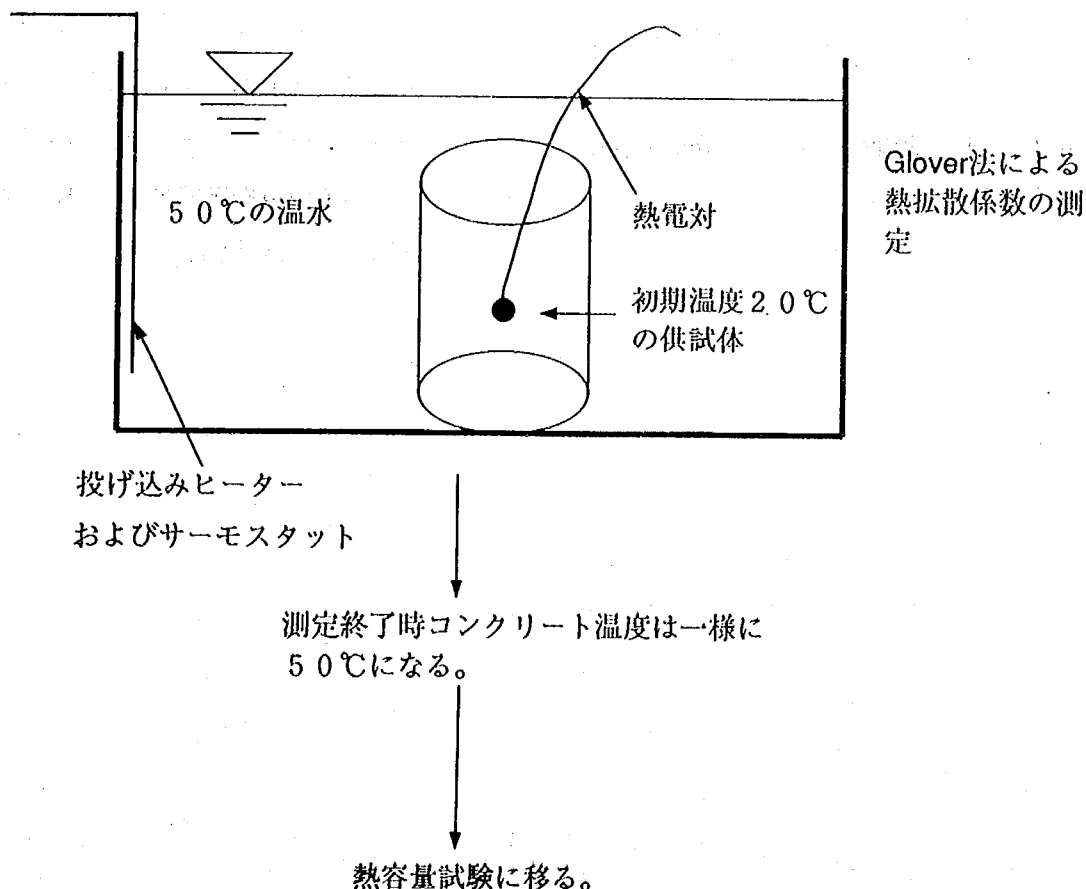


図-4. 2 コンクリート供試体の温度変化理論値

リート供試体～水で構成される系の熱量が保存されていると仮定を用いている。解の導きだしは、付録－２に収録している。解法はGlover法の場合と同様、三角関数とベッセル関数による直交関数展開により偏微分方程式を常微分方程式の初期値問題に変換して解を求めるものである。付録－２の（９）は、直交関数列の大きさの時間変動を現す係数 $A_{ij}(t)$ に関する微分方程式であるが、 $A_{ij}(t)$ の項に $h^2(\beta_i^2 + \kappa_j^2)$ の係数がついている。このことは、時間軸に対して、Glover法と同様の無次元化が可能であることを示している。すなわち、円柱供試体の直径と高さの比が同一であれば、供試体の大きさや熱拡散係数の値が異なっても、時間軸として無次元時間 $\tau = h^2 \cdot \alpha / R^2$ を採用することにより、供試体の温度変化は同一の値となる。熱容量の決定は、供試体温度の理論解と計測値がもっとも近くなる熱容量を捜し出すことにより行なうものである。供試体寸法および容器中の水量を定めた後、コンクリートの熱拡散係数と、熱容量を様々に設定しあらかじめ理論解を求めて、実測値と比較することになるが、むあらかじめGlover法により熱拡散係数を求めておけば、無次元時間を用いることができ、無次元時間を用いることにより用意する理論解は熱容量のみを変化させたものを用意すればよいことになる。図－４．２はコンクリート供試体を $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ の円柱供試体で、その密度を 2.3 g/cm^3 、供試体周りの水の容量を 340 cc と仮定し、比熱を $0.2\text{ kcal/kg/}^\circ\text{C} \sim 0.34\text{ kcal/kg/}^\circ\text{C}$ まで $0.1\text{ kcal/kg/}^\circ\text{C}$ きざみに計算した結果を示すものである。この図上に実測結果をプロットすることにより熱容量を知ることができる。

4. 3 試験手順



図－４．３ 熱拡散係数測定試験概要図

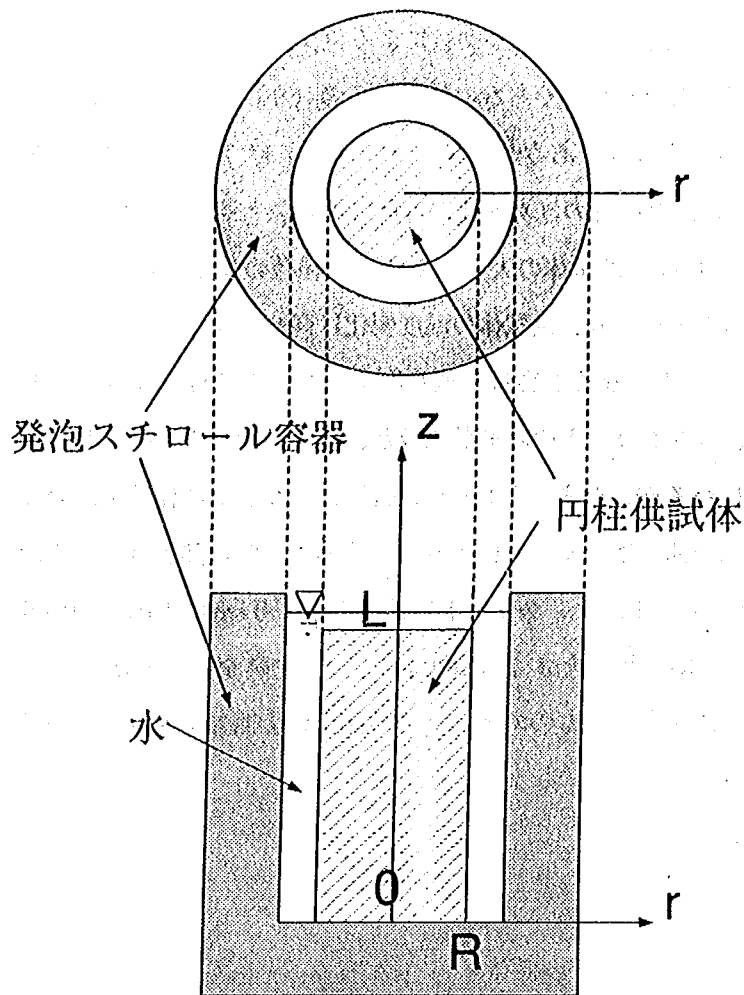


図-4.4 熱容量測定試験概要図

熱拡散係数、熱容量の測定手順を図-4.3および4.4に示す。最初に昇温行程でのGlover法により熱拡散係数ならびに、供試体中の熱電対位置の推定を行なっておく。ここで供試体周囲の温水は、投げ込み式ヒーターおよびサーモスタットにより水温が 50°C で一定になるよう制御を行なった。したがって、この試験を終えた時点でコンクリート供試体の温度は 50°C になっている。引き続きこの供試体を発泡スチロール容器中の水に入れ、供試体温度を測定し、この温度測定結果を元に熱容量を求める。供試体の水は室温と同じ温度に設定するのが好ましい。ここでは、 20°C に設定している。

次章において、コンクリート供試体を作成し、ここで示した手順に従い熱拡散係数、熱容量を測定し、熱伝導率は式(1)を用いて計算した結果を述べる。また、直接円筒法による熱伝導率試験も平行して行ない、熱伝導率の算定結果が直接円筒法による計測結果と一致しているか確認を行ない、試験法の有効性について検討した。

第5章 コンクリートの熱伝導特性の試験計測

5. 1 概要

ここでは5種類の配合条件を設定しそれぞれの配合条件について、コンクリートの熱拡散係数、熱容量を測定した。また、直接円筒法によるコンクリートの熱伝導率の測定も行なった。以下にその結果を報告する。

5. 2 実験概要

コンクリートの配合条件を、表-5. 1に示す。細骨材は大井川産川砂、粗骨材は青梅産碎石である。セ

表-5. 1 コンクリートの示方配合表

配合番号	W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				骨材重量比
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
配合1	60	3.6	168	280	815	1025	0.8
配合2	60	3.5	314	524	558	699	0.6
配合3	60	3.8	435	725	344	431	0.4
配合4	60	8.6	164	274	777	975	0.8
配合5	60	0.4	178	298	847	1061	0.8

注) 空気量は実測値を表す。

メントは普通ポルトランドセメントを用いた。

配合1～3は同一の水セメント比でコンクリート中に含まれる骨材量を変化させている。一般にセメントペーストと骨材の熱伝導特性は異なっているため、配合1～3のコンクリートは骨材量に応じて熱特性値が変化するはずである。なお、配合1～3は骨材量を変化させたため、単位水量も大きく異なっている。単位水量が大きくなり過ぎると、骨材の分離が激しく供試体の作成が困難となるため、ここでは分離低減材を用い、骨材の分離を食い止め一様な供試体を得られるようにした。

配合4～5は配合1とほぼ同じであり、コンクリート中に連行される空気量のみ変化させている。配合4はAE助剤を増加させ、連行空気量を約8%になるように調節した。配合5はこれとは逆に消泡剤を混入し連行される空気量が少なくなるようにした。

供試体の作成は、熱拡散測定および

表-5. 2 測定項目

熱容量測定用として $\phi 10\text{ cm} \times$

20 cmの円柱供試体を各配合につ

き3本、直接円筒法による熱伝導率

測定用として $\phi 20\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 内

径4 cmの円筒供試体1本とした。

測定項目を表-5. 2に示す。

測定項目	供試体	本数
熱拡散係数	$\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$	3本
熱容量	$\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$	3本
熱伝導率	$\phi 20\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ (内径4 cmの円筒)	1本

5. 3 熱拡散係数の測定

5. 3. 1 円柱供試体の温度変化測定結果

図-5. 1に供試体の温度変化を測定した結果を示す。熱拡散係数の測定は昇温行程のGlover法で行ない初期供試体温度は約20℃、温水の温度は約50℃と設定した。供試体の温度測定は供試体の中心付近および約25mm中心から半径方向に離れた位置で行なった。温水の温度の変動は熱拡散係数の計測結果に誤差

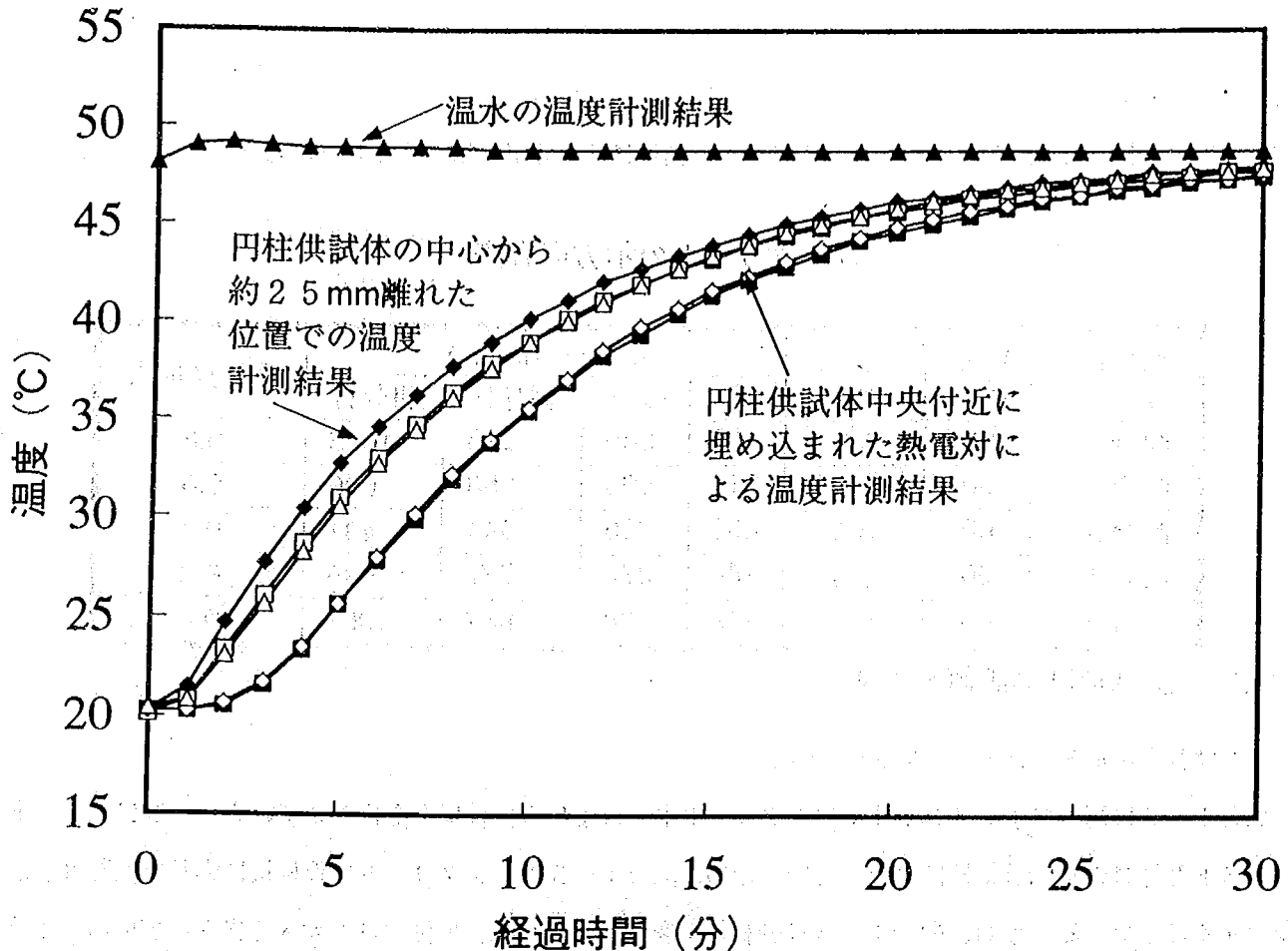


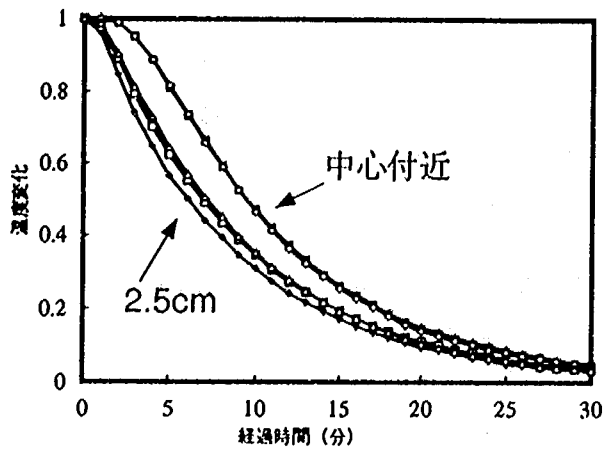
図-5. 1 温度計測実施例 (配合番号1)

を及ぼす一つの要因となるので、極力一定に管理することがのぞましい。上記の計測例では経過時間が0～1分の間で若干変動しているが、その後はほぼ一定に保たれている。ここで、供試体周囲の温水の温度は30分までの計測値の平均値で与えることとした。このようにして定められた温水の温度と、供試体初期温度の差を θ_0 、時刻における供試体の温度を $\theta(t)$ とし、温度変化 θ' を次式にて計算した。

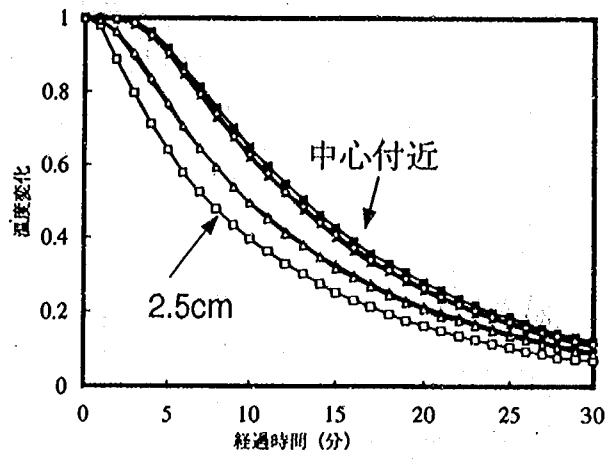
$$\theta' = \frac{\theta_0 - \theta_t}{\theta_0}$$

このようにしてえられた、実験開始後の経過時間 t と θ' の関係を図-5. 2に示す。

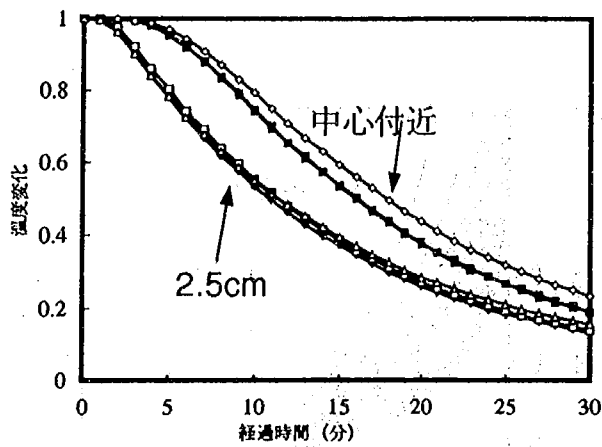
5. 3. 2 熱電対位置の補正



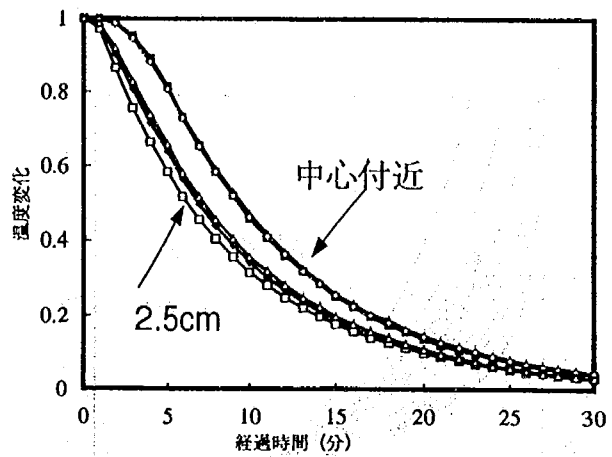
配合番号 1



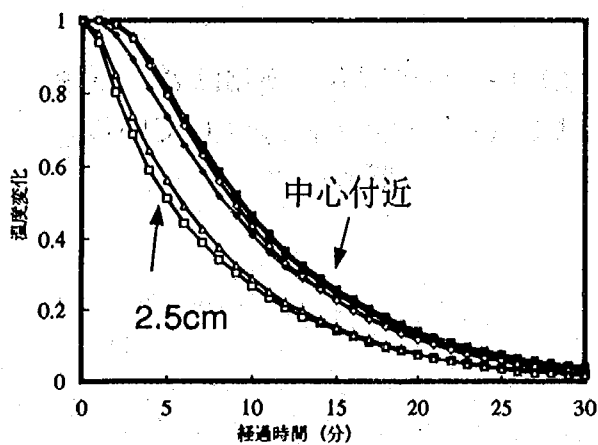
配合番号 2



配合番号 3



配合番号 4

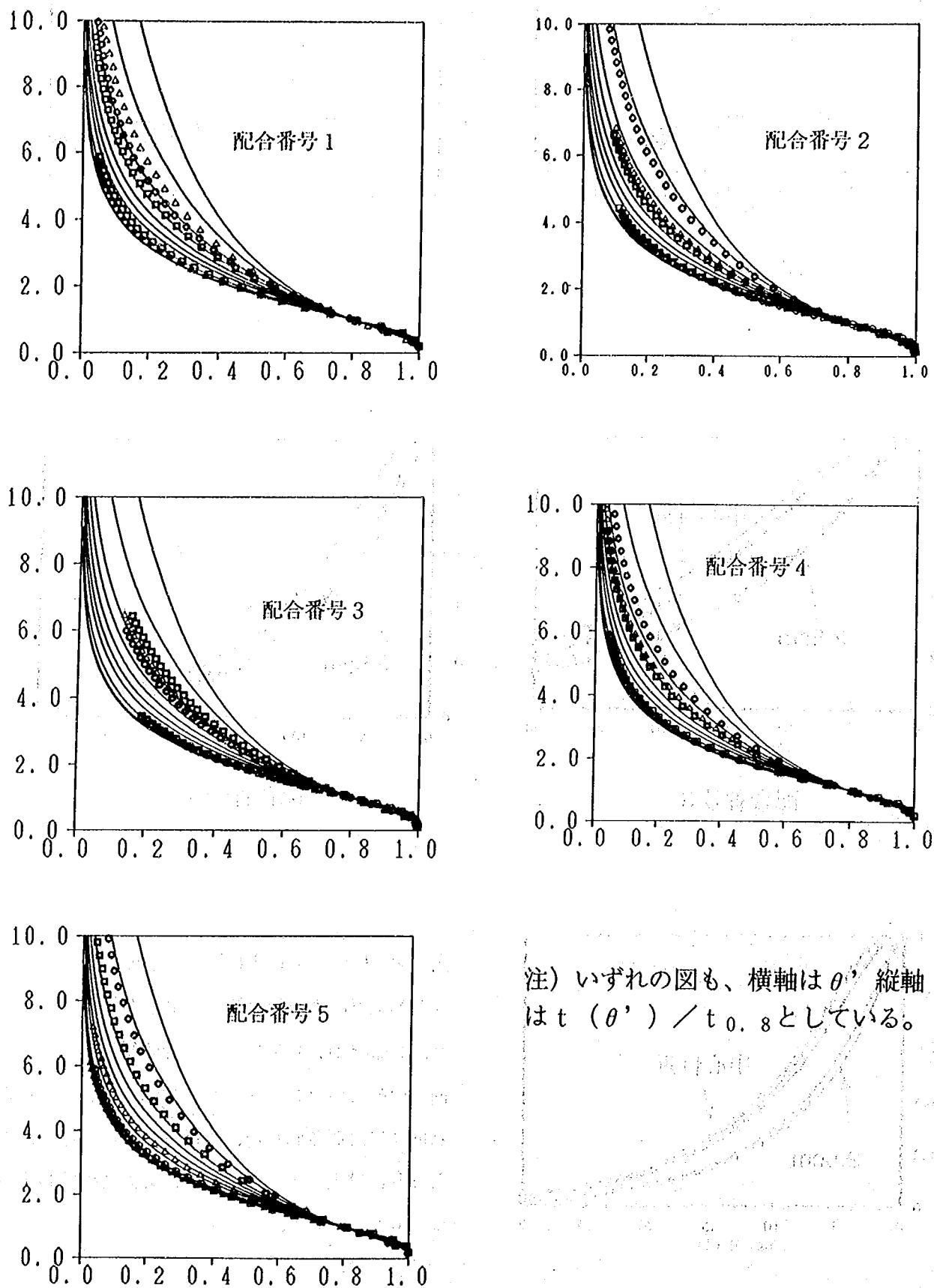


配合番号 5

注) 図中には、それぞれ供試体中央部に埋め込まれた熱電対による計測結果と中心から半径方向に 2.5 cm 離れた位置における計測結果を示した。同一の配合のコンクリート供試体 3 本は、それぞれ同時に計測されたが、熱電対位置が所定の位置どうりには入っていないので、計測結果はわずかに異なっている。

図-5. 2 各配合における供試体温度変化の計測結果

各配合条件の供試体について横軸に θ' 縦軸に $t(\theta')/t_{0.8}$ を計測結果から求めたものを図-5. 3に示す。この図から、各供試体ごとの熱電対の位置を推定することが可能である。ただし、熱電対位置の10mm以内のずれは、図-2. 7で示したように $t(\theta')/t_{0.8}$ の理論値そのものの差が非常に小さい



注) いずれの図も、横軸は θ' 縦軸は $t(\theta')/t_{0.8}$ としている。

図-5. 3 $\theta' \sim t(\theta')/t_{0.8}$ の計測結果

ので、熱電対位置の正確な判定は困難であると考えられる。なお、図中の実線は図-3. 5と同様のものである。この計測結果をもとに、 $\theta' \sim t(\theta')/t_{0.8}$ の実測値と熱電対位置を仮定したときの理論解と

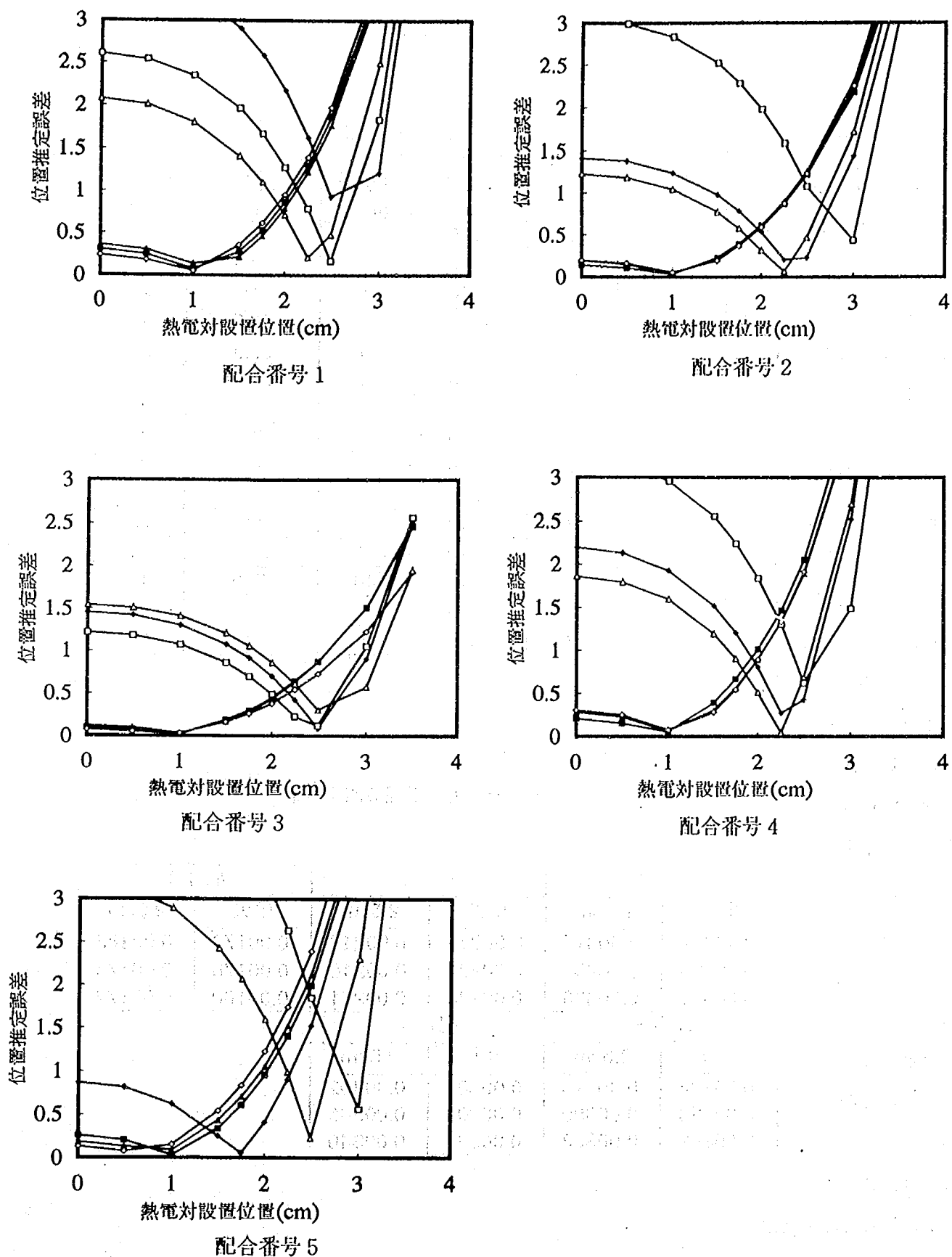


図-5. 4 熱電対の半径方向の設置位置の推定値に対する推定誤差

の誤差を求めた結果
を図-5. 4に示す。

ここで、熱電対の半径方向のずれは、図中の誤差がもっとも小さくなる位置で与えられる。たとえば、配合番号1の供試体では、中心付近に埋め込まれた熱電対は、約10mm以内のずれが生じていると考えられ、半径方向に25mmの位置に設置した熱電対は、実際には25mm~22.5mmの位置に設置されていたと考えられる。

ここで、実際に供試体をカッターで切断し熱電対位置

の確認を行った結果を表-5. 3に示す。この結果から、熱電対の位置のずれは推定できることが分かる。

5. 3. 3

熱拡散係数の測定結果

熱拡散係数の計測結果を表-5. 4に示す。各配合についてそれぞれ3本の供試体ごとに計測結果を示す。この結果を見ても分かるとおり、それぞれの供試体の測定結果の間のばらつきは小さく、適切な計測がなされていたと考えられる。ただし、熱電対位置が中心付近にあるほうが全般的に計測結果のばらつきは小

表-5. 3 熱電対位置の推定値と測定結果の比較

配合番号	供試体番号	中心付近に埋め込まれた熱電対の位置		中心から25mmずらせた熱電対位置	
		予測値(mm)	実測値(mm)	予測値(mm)	実測値(mm)
1	1	≤ 10	1	25	27
	2	≤ 10	5	22.5	22
	3	≤ 10	1	25	25
2	1	≤ 10	1	22.5	24
	2	≤ 10	5	30.0	27
	3	≤ 10	6	22.5	21
3	1	≤ 10	3	25	26
	2	≤ 10	2	25	27
	3	≤ 10	3	25	28
4	1	≤ 10	2	22.5	23
	2	≤ 10	4	25	25
	3	≤ 10	7	22.5	21
5	1	≤ 10	10	17.5	14
	2	≤ 10	2	30	28
	3	≤ 5	1	25	25

表-5. 4 各供試体の熱拡散係数測定結果

配合 1		配合 2		配合 3	
中央	2.5cm	中央	2.5cm	中央	2.5cm
0.00297	0.00317	0.00216	0.00219	0.00177	0.00182
0.00296	0.00291	0.00226	0.00210	0.00178	0.00175
0.00301	0.00306	0.00223	0.00221	0.00160	0.00172
配合 4		配合 5			
中央	2.5cm	中央	2.5cm		
0.00304	0.00313	0.00302	0.00302		
0.00298	0.00309	0.00306	0.00306		
0.00302	0.00302	0.00333	0.00340		

さいため、ここでは、中心付近の熱電対から推定される拡散係数を取り上げこの値を熱拡散係数とした。このようにしてえられた熱拡散係数について各配合条件ごとに示したものが、図-5.5および図-5.6である。これらの結果から、 A/ρ はコンクリートの熱拡散係数に影響を及ぼし A/ρ が大きいほどすなわち骨材量が多いほど熱拡散係数はほぼ線形的に上昇していることが分かる。従って、ここで用いた骨材はセメントペーストに比べて熱拡散係数が大きかったと言える。一方、コンクリートの空気量が増加しても熱拡散係数の変動は非常にわずかであると考えられる。このことから、コンクリート中の空気量はコンクリートの熱拡散係数とはあまり関係がないと言える。

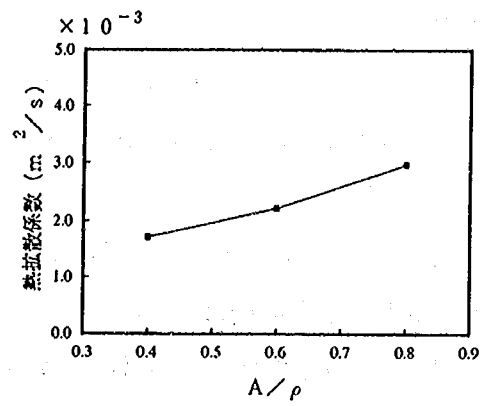


図-5.5 A/ρ と熱拡散係数の関係

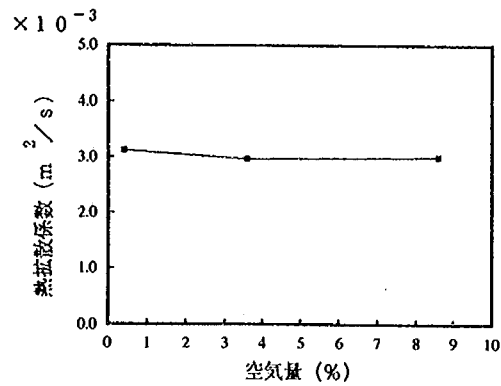


図-5.6 空気量と熱拡散係数の関係

5. 4 まとめ

- 1) コンクリートの熱拡散係数をGlover法で計測を行なった。
- 2) コンクリートの熱伝対位置の補正を適切に行なうことにより、ばらつきの少ない適切な熱拡散係数を測定することができた。
- 3) 熱拡散係数の値は、コンクリートの空気量にはほとんど関係しないことが明かとなった。
- 4) コンクリート中の骨材量が増加すると、それに応じてほぼ線形的に熱拡散係数は変動した。このことから、もし材料の熱拡散係数がそれぞれ個別に分かっていると、分量ごとに加え合わせその平均をとることにより熱拡散係数の推定は可能であると予想される。

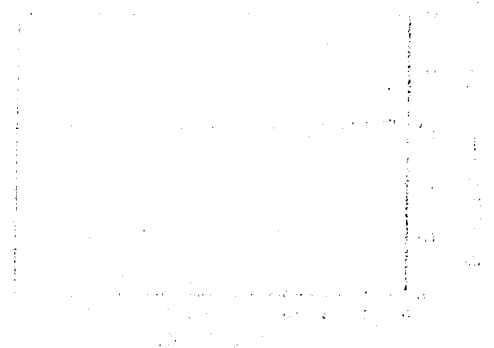


図 5.4.1 骨材量と熱拡散係数の関係

第6章 熱容量・熱伝導率の測定

6.1 概要

ここで提案した手法を用いて各配合条件のコンクリートについて熱容量を計測した。また、直接円筒法による熱伝導率の測定を行なった。

6.2 熱容量の測定

φ 10 cm × 20 cm の円柱供試体での温度計測結果の一例を図-6.1に示す。温度の計測はインターバルタイマーにより1分ごとに計測を行なった。供試体周りの水の容積は340 ccを基本とし、配合番号1については、680 cc、1980 cc

と3通りに変化させて計測を行なった。

供試体の温度変化はGlover法で行なったのと同様に次式により無次元化して表す。無次元化した温度変化 θ' は

$$\theta' = \frac{\theta_0 - \theta_t}{\theta_0}$$

とする。ここで θ_0 は計測開始時点における供試体温度と供試体周りの水温の差、 θ_t は時刻 t における供試体温度と供試体周りの水温の差である。

前章で得られた熱拡散係数の計測結果を用いて、無次元時間と θ' の関係を求めた結果を図-6.2に示す。なお図中には、解析によってえられる無次元時間と θ' の関係も合わせて示す。熱容量の値は、上記の実測値と解析値の差をもっとも小さくする熱容量の値を求めることにより決定した。

ただし、熱容量の決定には計測されたすべてのデータを用いたわけではなく、無次元時間が0.2～0.4までの計測データを用いた。この方法によりえられる理論解は、Glover法のものと似ており、計測開始直後および計測開始後長時間経過したところは誤差を生みやすいと予想されるためである。

得られた熱容量の値を表-6.1に示す。この測定結果より同一配合内の異なる供試体の間の計測結果の

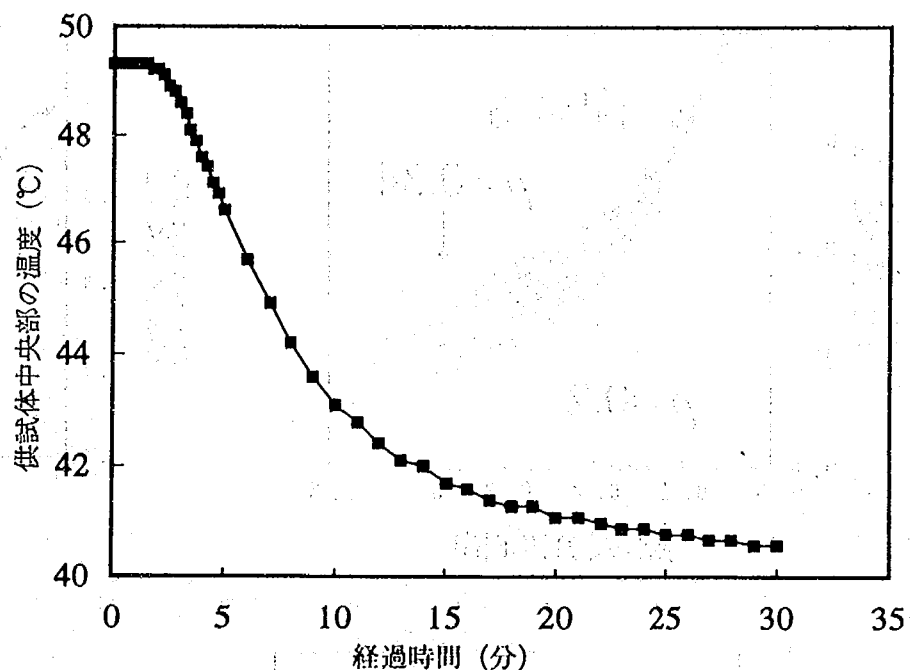


図-6.1 円柱供試体での温度計測結果の一例

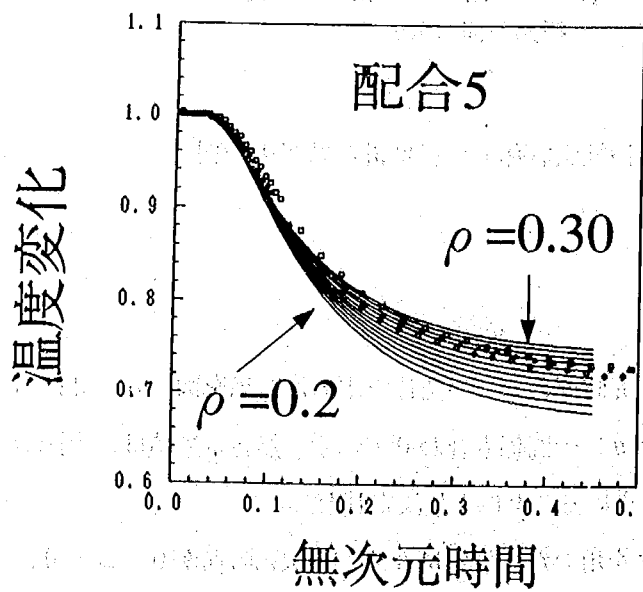
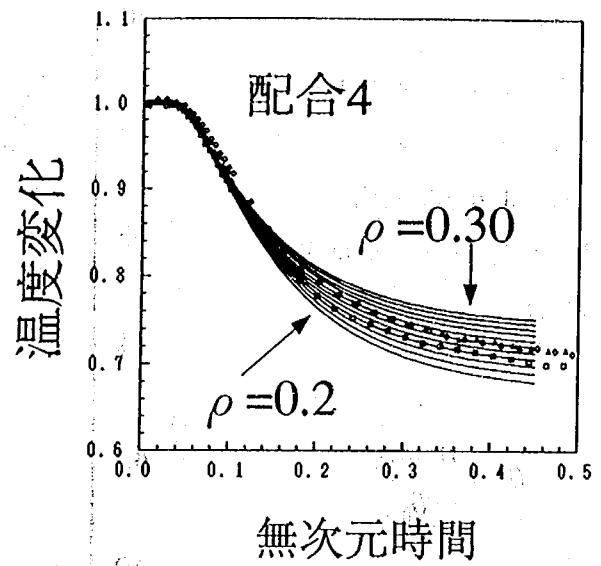
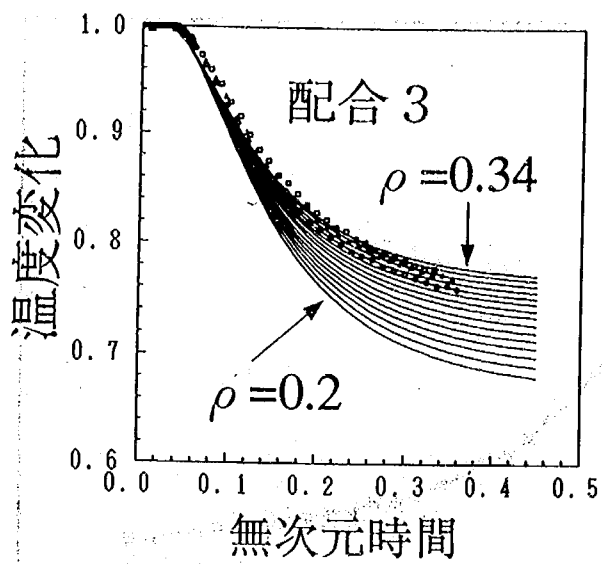
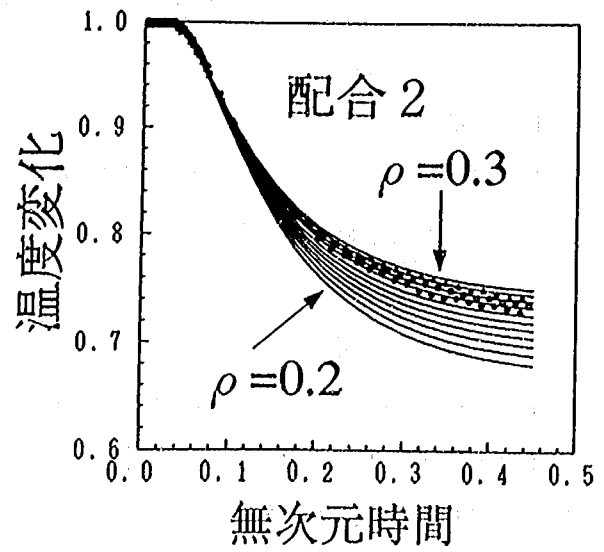
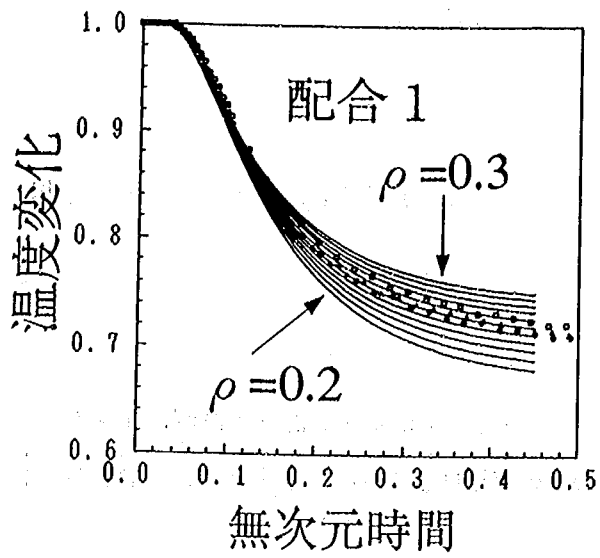


図-6.2 無次元時間と θ' の関係

表－6． 1 熱容量測定結果

水の容量	3 4 0 cc				
配合条件	配合 1	配合 2	配合 3	配合 4	配合 5
供試体 1	571.4	620.1	701.9	590.6	603.1
供試体 2	578.7	668.3	742.6	587.9	632.0
供試体 3	610.9	646.4	757.8	525.8	656.3
1 ～ 3 の平均	587.0	644.9	734.1	568.1	630.5

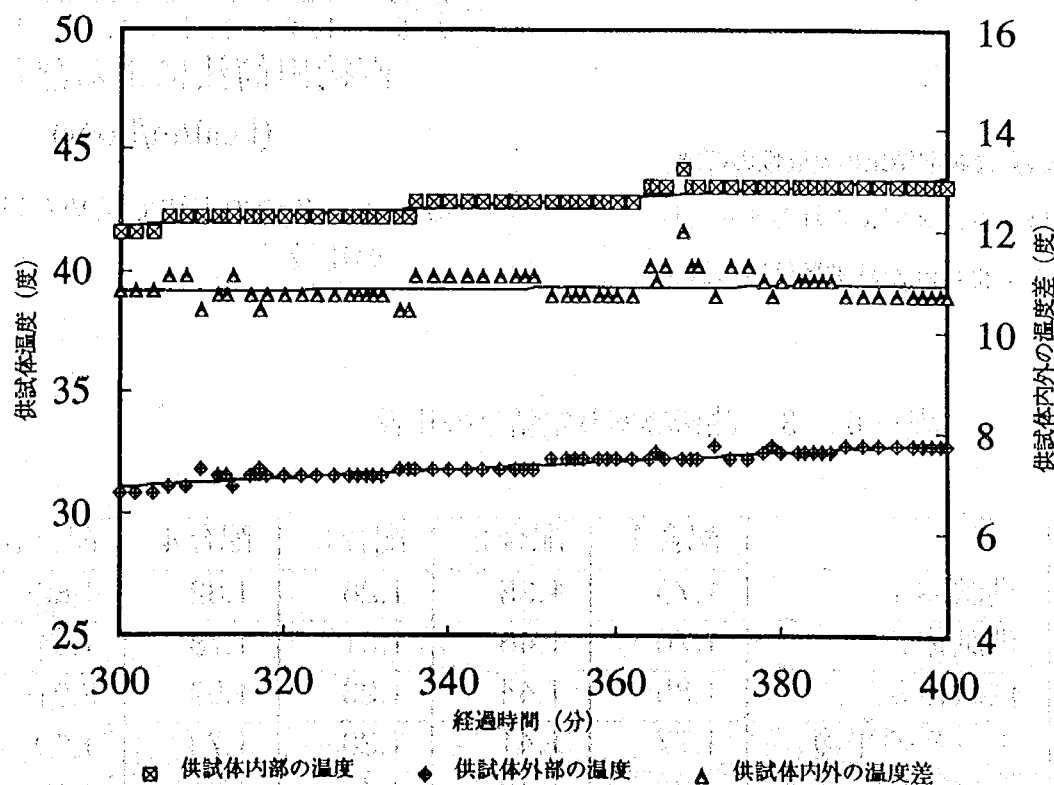
水の容量	680cc	1680cc
配合条件	配合 1	配合 1
供試体 1	641.4	582.3
供試体 2	542.9	496.3*
供試体 3	532.2	569.2
1 ～ 3 の平均	572.1	549.2

変動は比較的少なく、安定した測定結果が得られていることが分かる。

配合 1 ～ 3 を比較するとこの順に熱容量が大きくなっていることが分かる。すなわち、 A/ρ が大きくなるほど熱容量は小さくなる。一方、コンクリート中の空気量の違いによる影響はわずかに現われており、空気量が少なくなるにつれ熱容量は少し大きくなっている。

6. 3 直接円筒法による熱伝導率の計測

直接円筒法によってコンクリートの熱伝導率を測定するには、円筒内外の温度差を一定に保つ必要がある。図－6． 3 は配合番号 1 の供試体の温度制御状態を示したものである。温度制御開始後、ほぼ定常状態になったと見做せる所からの温度計測結果を示している。温度計測値は図に示したとおり時刻ごとに不連続



図－6． 3 直接円筒法を実施したときの供試体内径と外径での温度制御状況

なばらつきが生じていたため、直線回帰し実際の熱伝導率の算定には回帰直線による結果を用いている。なお、本来であれば、供試体内面および外面の温度計測値とも一定にならなければならないが、冷凍機的能力にやや問題があったため、わずかではあるが温度が上昇している。このため、ここでは供試体温度のわずかな上昇に寄る影響を補正するため、先に求めた熱容量の試験結果を用い、供試体内面のヒーターから加えられた熱量から供試体に蓄えられた熱量を差し引き、実際に供試体を伝わった熱量を算定した。一方、供試体外面および内面の温度にむらが出ないように、水を循環させているが、この攪拌熱による補正も行なっている。

このようにして求められた熱伝導率の計測値を表-6.2に示す。

コンクリート中の骨材量を変化させた配合1~3の供試体は熱伝導率の値に差が生じていたが、空気量を変化させた1、4、5はほぼ同一の熱伝導率が得られていた。

6.4 熱容量測定結果の妥当性の確認

ここでは、6.2でえられた熱容量および5.3で得られた熱拡散係数の値を

表-6.2 直接円筒法による熱伝導率の測定結果

配合番号	熱伝導率(kcal/m/h)
1	1.79
2	1.49
3	1.44
4	1.78
5	1.80

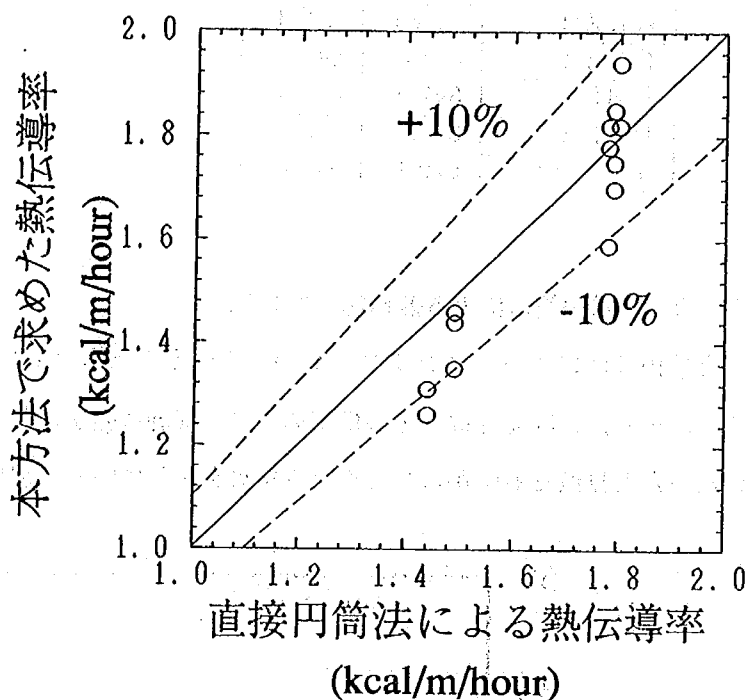


図-6.4 2つの方法で求めた熱伝導率の比較

表-6.3 熱伝導率算定結果の比較

	配合1	配合2	配合3	配合4	配合5
供試体1	1.75	1.35	1.26	1.82	1.82
供試体2	1.70	1.46	1.31	1.78	1.94
供試体3	1.85	1.44	1.26	1.59	2.21
1~3の平均	1.77	1.41	1.28	1.73	1.99
直接円筒法による測定結果	1.79	1.49	1.44	1.78	1.8

用いて熱伝導率を求め、これと直接円筒法により求められる熱伝導率の値を比較し、それぞれの計測結果が妥当であったか確認を行なった。

表-6. 3 および図-6. 4 に両者の方法による熱伝導率の算定結果を比較した結果を表す。この結果を見ると、2つの方法で求められた熱伝導率の値は、その差が約10%程度に入っており妥当な計測結果を与えているものと考えられる。

以上の検討結果より、ここで検討した簡易的な熱容量試験法は適切に熱容量を与えているものと考えられる。

6. 5 熱容量測定試験の誤差に関する検討

6. 5. 1 容器からの熱の逸散について

熱容量測定試験における誤差要因としては、Glover法の場合と同様熱電対のずれあるいは温度の読み取り誤差が考えられるが、それ以外の要因として、発泡スチロール容器からの熱の逸散が挙げられる。これは、円柱供試体の温度変化の理論解を求める際、供試体とそれを取り巻く水を一つの閉じた系と考え、系の内部では熱のやり取りがあるものの、系から外部への熱の逸散は考慮していない。よって、系から外部への熱の逸散は大きな誤差要因になりうる。ここでは、計測に用いた容器に温水を入れ、時間経過に伴う温水の温度低下を計測することにより熱の逸散速度を計測した。

供試体周囲の水の容量を340ccとして測定を行なった容器について、時間経過に伴う温水の温度低下の計測結果を図-6. 5 に示す。ここで、温水の温度低下の計測を行なったときの雰囲気温度を θ_a とし温水の初期温度を θ_0 、時刻 t における温水の温度を $\theta(t)$ 、熱の逸散量を $q(t)$ として、熱の逸散速度が温水の温度

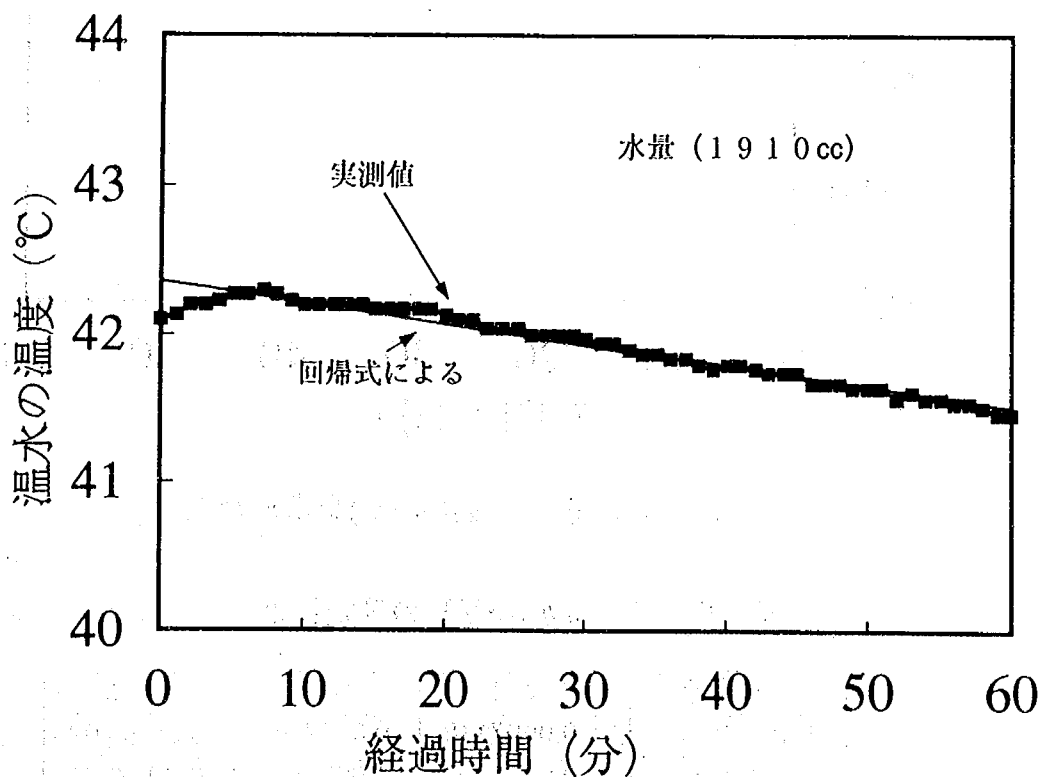


図-6. 5 温水の温度低下の計測例

と雰囲気温度の差に比例する（比例定数は α ）と考える。この仮定に基づくと、次式が成り立つ。

$$\frac{dq}{dt} = -\alpha(\theta(t) - \theta_{atm})$$

ここで水の体積を V 、水の比熱を c 水の密度を ρ とすると

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\alpha}{\rho c V}(\theta(t) - \theta_{atm})$$

となる。ここで、この方程式を与えられた初期条件のもとで解くと $\alpha/(\rho c V)$ は次のようになる。

$$\frac{\alpha}{\rho c V} = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{\theta(t) - \theta_{atm}}{\theta(0) - \theta_{atm}} \right)$$

図-6. 5のデータについて $\alpha/(\rho c V)$ を求めた結果を図-6. 6に示す。時間と共にわずかに増加傾向にあるが概ね一定の値が得られている。このようにした求めた $\alpha/(\rho c V)$ の結果を表-6. 4に示す。

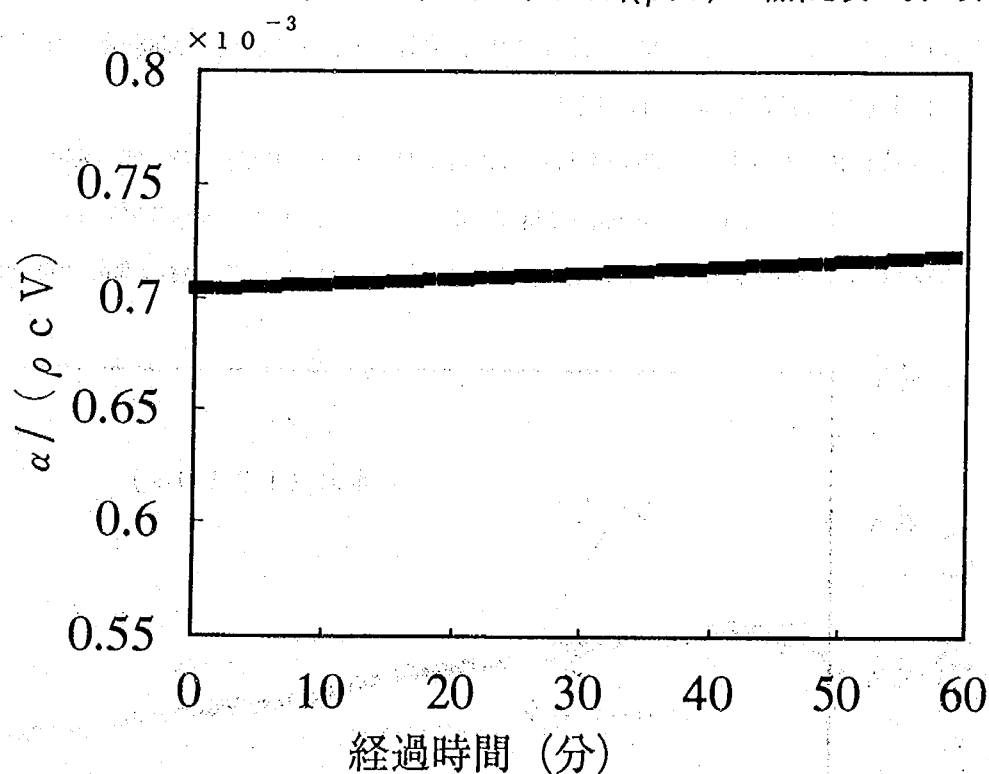


図-6. 6 $\alpha/(\rho c V)$ を求めた結果

表-6. 4 $\alpha/(\rho c V)$ の算定結果

容器容量	容器 1	容器 2	容器 3
1 9 1 0 cc	0.0007118	0.0007669	0.0007702
2 2 5 0 cc	0.0007293	0.0006577	0.0007821
3 3 5 0 cc	0.0004847	0.0005143	0.0004839

ここで、上記の1910ccの熱の逸散がある容器を用い単純な定常法（供試体温度と水の温度が一致するまで放置する方法）で熱容量を測定した場合を考える。ただし、図-4. 1に示したように実際には、供試体の温度が一様になる以前に水の温度が低下し始めるため、供試体温度と水の温度が完全に一致する状況はありえないが、あえてそのような状況が得られたと仮定する。コンクリートの真の熱容量を575kcal/m³であったと仮定する。 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ （容積1570cc）の円柱供試体を一様に50℃に熱し340ccで20℃の水の中に入れたと仮定する。容器が完全に断熱条件を満たしているならば供試体～水系の最終到達温度は

$$0.575 \times 1570 \times (50 - 20) / (0.575 \times 1570 + 340) + 20 = 41.8^\circ\text{C}$$

となる。ここで、容器の熱の逸散速度 $\alpha / (\rho c V)$ が0.0007であったとする。供試体～水系の温度が一様になるまで45分かかり、簡単のために最初の5分間の熱の逸散はなく、残りの40分間に熱の逸散が生じたとするとこの間の熱の大まかな逸散量は、

$$40 \times 1910 \times 0.0007 \times (41.8 - 20) = 1165\text{cal}$$

となる。この熱の逸散により、系の到達温度は40.9℃に低下する。この値からコンクリートの熱容量を算定すると

$$340 \times (40.9 - 20) / (1570 \times (30 - 20.9)) = 0.497\text{cal/cc}/^\circ\text{C} = 497\text{kcal/m}^3/^\circ\text{C}$$

となり、真値575kcal/m³に比べてかなり小さく評価（約14%減）することになる。一方、この実験によって得られた配合番号1の計測データについて、逸散速度 $\alpha / (\rho c V)$ を0.0007と仮定して逸散熱の補正を行ない、再度熱容量を計算した。この結果を表-6. 5に示す。この結果を見ても分かるとお

表-6. 5 逸散熱の補正による熱容量計測値の変化（単位はkcal/m³/℃）

	補正後	補正前	変動
供試体1	598.0	571.4	4.7%
供試体2	606.6	578.7	4.8%
供試体3	640.5	610.9	4.8%

り、熱容量計測値の変動はわずかである。すなわち、本方法は非定常状態での計測であるので、計測所要時間が短く逸散熱の影響が小さいことが分かる。ただし、ここで用いた容器の断熱性能でも、熱容量の計測誤差として5%程度見込まれるので、容器の材質として非常に熱を逃がしやすい、金属製あるいはガラス容器などは用いることができないと考えられる。

6. 6 まとめ

以上の検討結果をまとめると次のとおりである。

- 1) ここで行なった熱容量試験法により、コンクリートの熱容量が比較的精度良く計測ができる。
- 2) 直接円筒法による熱伝導率の値と比較したところ、ここで行なった方法により求められる熱伝導率の差は約10%程度に収まっていた。
- 3) 得られた熱容量の計測値にたいする逸散熱の影響について検討を行なった。この結果、逸散熱により約5%程度の誤差が見込まれることが分かった。
- 4) 非定常法は定常法に比べて逸散熱による誤差は少ないが、発泡スチロール容器でも誤差を生んでい

る。このため、本方法で用いることができる容器は限定され、熱を通しやすい金属製あるいはガラス製の容器は用いることができないと考えられる。

アセトン	抽出液	抽出液
メタノール	抽出液	抽出液
エタノール	抽出液	抽出液
酢酸エチル	抽出液	抽出液

第7章 まとめ

ここではコンクリートの熱伝導特性の簡易試験法について検討を行なった。その主な内容は、

- 1) 熱拡散係数をGlover法で計測する際の留意点
- 2) 熱容量の非定常状態での計測試験法の原理
- 3) 上記の計測誤差

についてである。ここで示した手法は、試験手順が簡単であるので特別な計測機器を必要とせず、ある程度の精度も得られることから十分実用的であると考えられる。今後は、粗骨材寸法が大きく、円柱供試体を大きくせざるを得ないような場合の試験方法、供試体の乾燥条件が試験結果に及ぼす影響などを検討し、さらに汎用性を拡大して行く予定である。

[参考文献]

- 1) 川口 徹、梶田 佳寛；コンクリートの熱伝導率、熱拡散率、比熱の測定方法とその応用、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム、J C I - C 2、pp.11-pp.14、昭和57年9月、日本コンクリート工学協会。
- 2) マスコンクリートのひびわれ制御指針、pp.102~103、1986年、日本コンクリート工学協会。
- 3) 秋田 宏、尾坂芳夫；コンクリートの熱物性および熱物性試験に関する一考察、土木学会論文報告集、第384号、V-7、pp.119~pp.127、1987. 8.
- 4) 國分正胤編；土木材料実験（改訂4版）、pp.307-pp.310、技報堂。

G l o v e r 法の理論解の導き

円筒座標系での熱拡散方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h^2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right\} \quad (1)$$

ここで境界条件は

$$\theta(R, z; t) = 0 \quad \theta(r, 0; t) = 0 \quad \theta(r, L; t) = 0 \quad (2)$$

初期条件は

$$\theta(r, z; 0) = \theta_0 \quad (3)$$

ここで、円柱供試体内の温度分布の解を次のように仮定する。

$$\theta(r, z; t) = \sum_m \sum_n A_{mn}(t) \cdot J_0\left(\frac{x_m}{R} r\right) \cdot \sin\left(\frac{2n-1}{L} \pi z\right) \quad (4)$$

式 (4) を式 (1) に代入し両辺に

$$r J_0(\beta_i r) \sin \kappa_j z$$

ただし、

$$\beta_m = \frac{x_m}{R}, \kappa_n = \frac{2n-1}{L} \pi$$

とする。

をかけ r 方向について $0 \sim R$ (R は円柱供試体の半径)、 z 方向について $0 \sim L$ (L は円柱供試体の高さ) まで積分すると、直行関数の性質を用いて (4) 式の $A(t)$ について次の常微分方程式が得られる。

$$\dot{A}_{ij}(t) + h^2 (\beta_i^2 + \kappa_j^2) A_{ij}(t) = 0 \quad (5)$$

上式の解は

$$A_{ij}(t) = C_{ij} \exp(-h^2(\beta_i^2 + \kappa_j^2)t) \quad (6)$$

となり初期条件から解は次式で与えられる。

$$\theta(r, z; t) = \sum_i \sum_j \frac{8\theta_0}{x_i J_1(\beta_i R)(2j-1)\pi} J_0(\beta_i r) \sin \kappa_j z \exp(-h^2(\beta_i^2 + \kappa_j^2)t)$$

発泡スチロール容器中の供試体の温度変化の理論解について

円筒座標系での熱拡散方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h^2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right\} \quad (1)$$

ここで境界条件は

$$\theta(R, z; t) = f(t) \quad \theta(r, 0; t) = f(t) \quad \theta(r, L; t) = f(t) \quad (2)$$

初期条件は

$$\begin{aligned} \theta(r, z; 0) &= \theta_0 \\ f(0) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

供試体と供試体周りの水の間に成立する熱量保存則は次のように表される。

$$\int_0^L dz \int_0^R (\theta_0 - \theta) \rho c 2\pi r dr = \rho_w c_w V_w f(t) \quad (4)$$

ここで、供試体温度 θ を供試体周りの水温 $f(t)$ により次のように変換しておく。

$$\theta(r, z; t) = \bar{\theta}(r, z; t) + f(t) \quad (5)$$

新しい変数 $\bar{\theta}$ について熱拡散方程式、境界条件、初期条件、熱量保存則は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + f(t) = h^2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right\} \quad (1')$$

$$\bar{\theta}(R, z; t) = 0 \quad \bar{\theta}(r, 0; t) = 0 \quad \bar{\theta}(r, L; t) = 0 \quad (2')$$

$$\bar{\theta}(r, z; 0) = \theta_0, \quad f(0) = 0 \quad (3')$$

$$\int_0^L dz \int_0^R (\theta_0 - \bar{\theta} - f(t)) \rho c 2\pi r dr = \rho_w c_w V_w f(t) \quad (4')$$

ここで $\bar{\theta}$ を次のように仮定する

$$\bar{\theta}(r, z; t) = \sum_m \sum_n A_{mn}(t) \cdot J_0(\beta_m r) \cdot \sin(\kappa_n z) \quad (6)$$

ただし、 $\beta_m = \frac{x_m}{R}$, $\kappa_n = \frac{2n-1}{L} \pi$ である。

(6) 式を (1') 式に代入し、両辺に $r J_0(\beta_i r) \sin \kappa_j z$ をかけ r について $0 \sim R$ まで、 z について $0 \sim L$ まで積分することにより $A_{ij}(t)$ に関する次の連立常微分方程式が得られる。

$$\dot{A}_{ij}(t) \frac{R^2 L}{4} \cdot \{J_1(\beta_i R)\}^2 + \frac{2R J_1(\beta_i R)}{\beta_i \kappa_j} \dot{f}(t) = -h^2(\beta_i^2 + \kappa_j^2) A_{ij}(t) \frac{R^2 L}{4} \cdot \{J_1(\beta_i R)\}^2 \quad (7)$$

次に (6) 式を熱量保存則 (4') に代入すると次式が得られる。

$$\theta_0 - \frac{4}{RL} \sum_m \sum_n A_{mn}(t) \frac{1}{\beta_m \kappa_n} J_1(\beta_m R) = (1+k) f(t) \quad (8)$$

ただし

$$k = \frac{\rho_w c_w V_w}{\rho c \pi R^2 L}$$

(8) 式を時間 t で微分し (7) 式に代入することにより次式が得られる。

$$\frac{1}{4} \{J_1(\beta_i R)\}^2 \dot{A}_{ij}(t) + \frac{1}{4} h^2(\beta_i^2 + \kappa_j^2) A_{ij}(t) - \frac{8 J_1(\beta_i R)}{RL(1+k) \beta_i \kappa_j} \sum_m \sum_n A_{mn}(t) \frac{1}{x_m (2n-1) \pi} J_1(\beta_m R) = 0 \quad (9)$$

ここで、次のようなマトリックス表示を導入する。すなわち

$$\{A_{ij}(t)\}' = \{A_{11} \cdots A_{1N} A_{21} \cdots A_{2N} \cdots A_{M1} \cdots A_{MN}\} \quad (10)$$

$$[C_{ijmn}] = \frac{1}{4} \{J_1(\beta_i R)\}^2 \delta_{ij} - \frac{8J_1(\beta_i R)J_1(\beta_m R)}{RL(1+k)\beta_i \kappa_j} \frac{1}{x_m(2n-1)\pi} \quad (11)$$

$$[K_{ijmn}] = \delta_{im} \delta_{jn} \frac{1}{4} h^2 (\beta_i^2 + \kappa_j^2) \quad (12)$$

とすると、(9) 式は以下のように表現できる。

$$[C]\{\dot{A}\} + [K]\{A\} = \{0\} \quad (13)$$

ここで (13) 式から求められる固有値の逆数を ν_{mn} 、固有ベクトルを $\{e_{ij}\}_{mn}$ とすると、 $\{A\}$ は次式で表現される。

$$\{A_{ij}(t)\} = \sum_m \sum_n a_{mn} \{e_{ij}\}_{mn} e^{\frac{-t}{\nu_{mn}}} \quad (14)$$

よって、 $\bar{\theta}$ の解は次のように表現できる。

$$\bar{\theta}(r, z; t) = \sum_i \sum_j \left(\sum_m \sum_n a_{mn} e_{ijmn} e^{\frac{-t}{\nu_{mn}}} \right) J_0(\beta_i r) \sin \kappa_j z \quad (15)$$

ここで係数 a_{mn} は初期条件から決定される。初期条件は次のようになる。

$$\sum_m \sum_n a_{mn} e_{ijmn} = \frac{8\theta_0}{x_i J_1(\beta_i R) (2j-1)\pi} \quad (16)$$

コンクリートの熱伝導特性に
関する調査

ISSN 0386-5878
土研資料 第3245号
平成6年3月(1994)

河野 広隆, 渡辺 博志
杉山 嘉則

要旨 コンクリートの熱伝導特性は、マスコン建造物の熱応力解析に欠かせないパラメータであるが、その試験法は必ずしも簡単に行えるものではなかった。ここでは、熱拡散係数および熱容量を簡易な機器構成で計測する手法について検討を行った。熱伝導率はこの試験法で求められた熱拡散係数と熱容量をかけ合わせることで求めた。一方、ここで検討した試験法が適切な試験結果を与えるものであるか確認するため、別途直接円筒法による熱伝導率の計測を行い、両者の比較を行った。比較検討を行ったところ、両者の方法による熱伝導率の差はほぼ±10%以内の誤差で一致しており、ここで検討した試験法が十分実用的であることを明らかにした。

キーワード：マスコンクリート、熱伝導率、熱拡散係数、熱容量、比熱

郵便はがき

郵便切手
は
つ
て
下
さ
い

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
材料施工部
コンクリート研究室
行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 023

No. 023

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3245号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印