

コンクリートの熱伝導率に及ぼす水分移動の影響

東京大学 学生会員 芳村 圭
 東京大学 正会員 岸 利治

1. はじめに

従来、温度ひび割れなどのマスコンクリートの劣化予測には熱伝導解析が行われており、熱伝導率は重要な物性値である。また、熱伝導率は物質によって固有な値を取ることから、コンクリートという複合材料では配合によって異なることは自明であるし、水和の進行に応じて変化することも考えられる。しかし、現在の熱伝導解析ではコンクリートの熱伝導率を配合・材齢によらず一定として扱っており、このような取扱いが妥当であるのかを検討するために、若材齢コンクリートの熱伝導率測定実験を行った。

2. 実験方法及び結果

図1に示すような円柱状の実験装置を用意した。円柱の中心には鉛直にニクロム線が張られており、直流電源によって一定電圧をかけることで熱が供給できる。高さの中点を通る平面において熱電対を図2に示すように設置し、中心からの距離に応じた温度を計測した。表1に示す配合の低水セメント比・自己充填系コンクリートを打設し、水和反応による温度変化がほぼ収束した材齢4・8時間から熱を与え続けた。温度変化が定常状態に達した後、与えた熱量とそれぞれの地点の温度を(1)式に代入し、それぞれの熱電対間のコンクリートの熱伝導率を求めた。定常状態での中心からの距離に応じた温度分布および中心からの距離 - 熱伝導率の関係を図3に示す。その結果、熱伝導率は部位によって異なり、中心からの距離に応じて大きくなっていることがわかった。

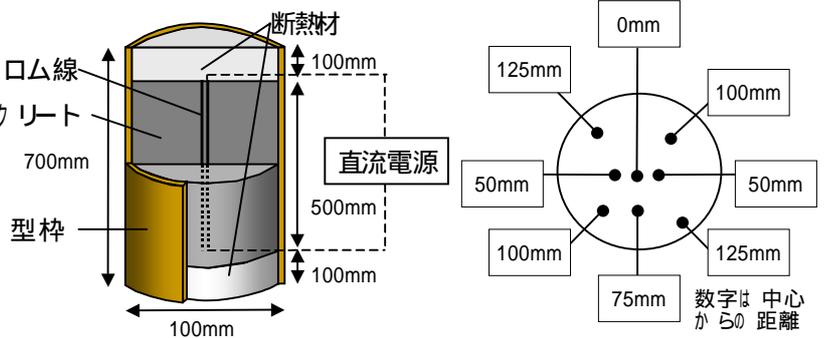


図1. 実験装置概要

図2. 熱電対設置平面

表1. コンクリートの配合

W/C(%)	水(kg)	セメント(kg)	細骨材(kg)	粗骨材(kg)	SP(%ofC)
31.6	174	550	857	827	1.5

温度変化が定常状態に達した後、与えた熱量とそれぞれの地点の温度を(1)式に代入し、それぞれの熱電対間のコンクリートの熱伝導率を求めた。定常状態での中心からの距離に応じた温度分布および中心からの距離 - 熱伝導率の関係を図3に示す。その結果、熱伝導率は部位によって異なり、中心からの距離に応じて大きくなっていることがわかった。

$$Q = 2\pi \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

Q: 単位時間・単位長さあたりの熱量 (W/m)
 λ : 熱伝導率 (W/m/K), T_1, T_2 : 中心からの距離 r_1, r_2 での温度 ()

次に、先ほどのコンクリートの配合から水だけを取り除いた混合物(ドライミックスと呼ぶ)を実験装置に充填して同様に熱伝導率を調べ

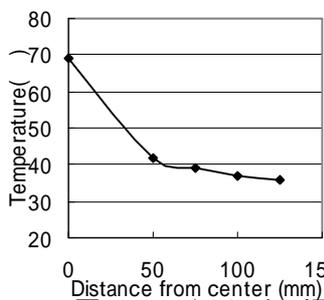


図3. コンクリートの温度分布と距離 - 熱伝導率の関係

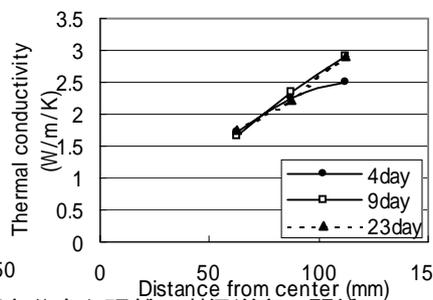


図4. ドライミックスの熱伝導率

てみると、図4に示すように距離によらず一定の値が得られた。この結果、試験装置の信頼性が確認され、コンクリートの熱伝導率が中心からの距離に応じて大きくなったのは、水分の移動が影響していたためと考えられた。

キーワード 熱伝導率、水分移動、水和、液状水

連絡先 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1 電話 03-5841-6146 FAX 03-5841-6010)

さらにセメントと砂(表乾状態)についても同様な実験を行ったところ、図5の結果を得た。セメントでは距離によらず熱伝導率が一定という予想通りの結果となったが、砂では材料が均一に分布しているにも関わらず距離に応じて熱伝導率が増加するという結果が得られた。実験装置の内部を見てみると、砂の場合は図6のように水分量のばらつきが生じており、砂の内部

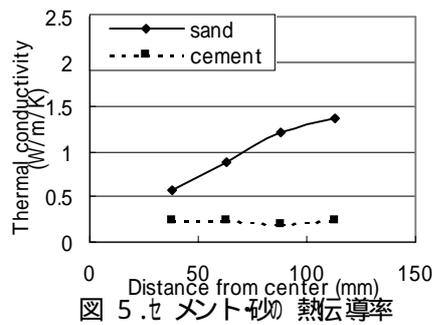


図5.セメントと砂の熱伝導率

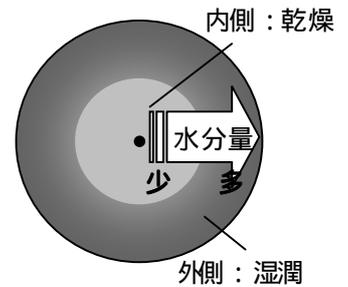


図6.砂中の水分の移動

の含有水分が温度勾配によって移動したものと考えられる。このことから、若材齢のコンクリートに与えた温度勾配によってコンクリート中の水分が移動し、図3のような距離 - 熱伝導率の関係が得られたものと推察される。

コンクリート中の水分の影響をさらに詳しく調べるために、十分に材齢が経過した後にコンクリート供試体の円柱型枠を取り除き、コンクリートに含まれる水分を逸散させて同様に熱伝導率を調べた。結果を図7に示す。全体的に熱伝導率が低下しているが、その低下具合は供試体の外側で大きく、長期間乾燥させた後も熱伝導率は一定とはならず、右肩上がりのままであった。このことから、水分移動が生じた結果としてコンクリートの水和程度自体が部位によって異なっており、乾燥開始時点において外部に逸散しうる水分も外側ほど多く存在していたと考えられる。

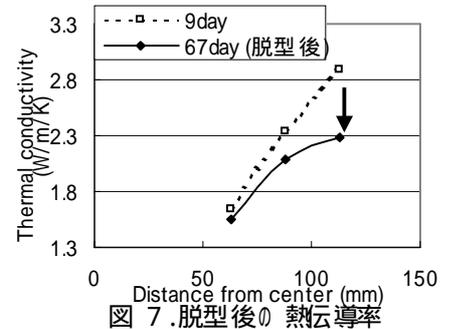


図7.脱型後の熱伝導率

3. 水の挙動の観点から見た考察

コンクリート中の水分は、キャピラリー中の凝縮水や空隙組織の壁面に付着している拘束水などの形態をとる。凝縮水は水和に関与できる自由水のこと、拘束水は壁面に吸着した水分である。今回の実験ではこれら両方の水分が加熱によって移動し、熱伝導率の変化をもたらしたものと考えられる。水和は加熱によって内部ほど促進されるので、液状水の移動のみを考えれば、水分は中心に向かって移動したとしても不思議ではない。しかし実際には、温度が上昇して水分子が励起されると液状水は蒸発によって気相となり、圧力の上昇によって外部へと移動したものと考えられる。温度の低い外周部では、液化した水分が自由水として細孔内に凝縮するはずである。そして、コンクリート中で内部から外周部への水分移動が生じた結果、外周部では水和の進行が順調に進み、空隙組織が緻密化して低湿度下での保水能力が向上する一方、内部では水分不足による著しい水和阻害が生じたものと考えられる。このような状況を数値解析で再現するとすれば、コンクリート中における水の移動形態として、液相と気相の両者を、平衡を含めて厳密に取り扱う必要がある。図8に、打設後60日間封緘養生した後に通電を開始した同配合の低水セメント比コンクリートの熱伝導率を示す。このように長期間養生させた場合には、水分不足によって水和の進行がほぼ定常状態に達し、温度勾配をかけてももはや水分移動はほとんど起こらないものと考えられる。

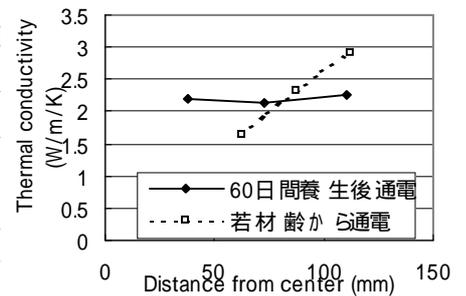


図8.長期間養生後の熱伝導率

4. まとめ

低水セメント比コンクリートの熱伝導率測定試験を若材齢において行ったところ、コンクリート中における水分移動の影響により、部位によって熱伝導率が変化することが確認された。この結果、中心部の温度が極端に上昇する場合には、温度と水分移動の連成解析が必要となる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 伝熱工学、東京大学出版会、1995