

論文 凍結期の熱的性状を考慮したコンクリートの温度解析

緒方 英彦*1

要旨: コンクリートの凍害発生予測を行うためには、環境温度によるコンクリート内部の温度変化を構造物の形状等も踏まえて正確に把握することが重要になる。本研究では、熱拡散率が凍結期において非凍結期よりも大きくなるとする既往の研究結果を踏まえ、コンクリートの状態が凍結および非凍結で熱拡散率を変えた温度解析を三次元有限要素法により行うことで、凍結期におけるコンクリート内部の温度変化を解析的に検討した。

キーワード: 凍結期, 熱的性状, 熱拡散率, 温度解析, 三次元有限要素法

1. はじめに

コンクリートの凍害は、コンクリートが凍結温度に達し、内部の水が氷へと変化する際の体積膨張とその融解の繰り返し作用により起こる。凍害を引き起こす外的要因としての環境条件の影響は、コンクリートの表面から徐々に内部に及ぶものであり、コンクリートの凍害深さも環境温度が表面から内部に伝わることによる凍結深さに関係する。環境温度がコンクリートの内部温度に及ぼす影響の程度は、実際のコンクリート構造物が三次元体であることから明らかなように、部位により異なり、中心部よりも表面部、表面部においても隅角部で卓越することから、凍害の発生も隅角部が著しくなる。このように実際のコンクリート構造物の凍害発生予測を行うためには、環境温度によるコンクリート内部の温度変化を構造物の形状等も踏まえて正確に把握することが重要になる。

コンクリート内部の温度変化を解析的に把握するためには、入力パラメータとしてのコンクリートの熱的性状を明らかにしておかなければならない。ここで、コンクリートの熱的性状の一つである熱拡散率は、凍結期において非凍結期よりも大きくなるとする既往の研究結果¹⁾がある。本研究では、この既往の研究結果を踏まえ、コンクリートの状態が凍結および非凍結で熱拡散率を変えた温度解析を三次元有限要素法により行うことで、凍結期におけるコンクリート内部の温度変化を解析的に検討した。

2. 凍結期の熱拡散率

桜井ら¹⁾は、海岸擁壁(AEコンクリート、目標スランプ: 5.0cm, 目標空気量: 4.5%, 水セメント比: 53.6%, 細骨材率: 33%)での温度計測結果を用いて、寒冷地コンクリート構造物での熱拡散率を解析的に評価しており、日最低気温が0°C以上である非凍結期では0.0030~0.0034m²/hの値になるが、日最高気温および日最低気温

がともに氷点下(最大約-15°C)になる凍結期ではこれより85%程度高い値になるという結果を示している。そして、凍結期の熱拡散率が非凍結期よりも大きくなる理由としては、表層の温度が氷点以下になるとコンクリート内部の水分が凍結しコンクリート内部の熱拡散率が上昇するためだと考察している。

理科年表には、熱拡散率と関係のある熱的性状である熱伝導率が掲載されている。それによると、水の熱伝導率は0.56 W/m・Kであるのに対して、氷の熱伝導率は2.2 W/m・Kである²⁾。熱拡散率と熱伝導率の間には、次のような関係がある。

$$\lambda = \frac{\kappa}{\rho c} \quad (1)$$

λ : 熱拡散率 (m²/s) (1m²/h=3600m²/s), κ : 熱伝導率 (W/m・K), ρ : 密度 (kg/m³), c : 比熱 (J/kg・K)

このように氷の熱伝導率は水の約4倍であることから、コンクリート中の水分が水の状態であるのか氷の状態であるのかでコンクリートの熱伝導率は異なることになる。一方、Loudon と Stacey は、コンクリートの単位質量および含水量が増加するとともに熱伝導率が大きくなることを示している³⁾⁴⁾。熱伝導率と熱拡散率の間には式(1)の関係があり、熱伝導率はコンクリート内部の含水量が多く、氷であるほど大きくなることから、降雪等によりコンクリート内部の含水量が多く、それが氷化している凍結期の熱拡散率が非凍結期よりも大きくなることを、これらの文献レビューより考察することができる。

3. 温度解析の概要

3.1 解析モデルおよび境界条件

温度解析は、式(2)の支配方程式に基づく三次元非定常熱伝導有限要素解析⁵⁾で行う。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

*1 鳥取大学 農学部生物資源環境学科准教授 博士(農学) (正会員)

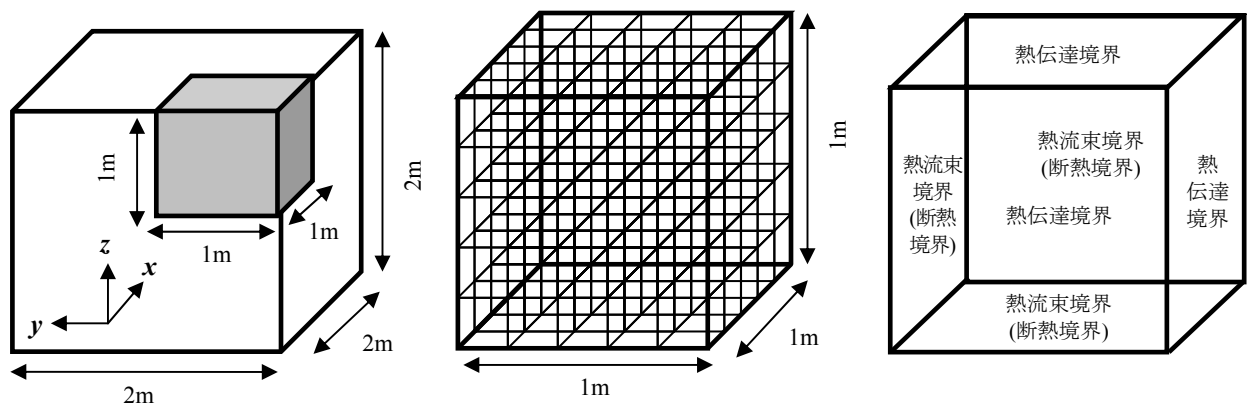


図-1 解析モデルおよび境界条件

表-1 解析パラメータ

項目	単位	値
熱拡散率	m ² /h	0.003 (初期値)
熱伝導率	W/m・K	1.88 (初期値)
熱伝達率	W/m ² ・K	11.63
密度	kg/m ³	2350
比熱	kJ/kg・K	0.963
初期温度	°C	5.0

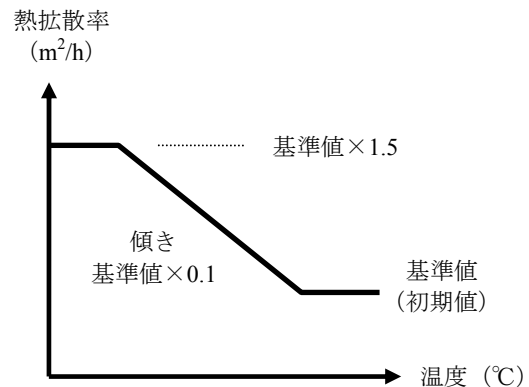


図-2 温度と熱拡散率の関係

T : 温度 ($T(x, y, z, t)$), ρ : 密度, c : 比熱, κ : 熱伝導率

解析モデルおよび境界条件は、図-1のとおりである。本研究では、凍結期における熱拡散率がコンクリート内部の温度変化に及ぼす影響を検討することが目的であることから、実構造物を解析対象とするのではなく、隅角部を有し、表面部と中心部を明確に区分することができる縦、横、高さがそれぞれ2mのマッシュなコンクリートを解析モデルとする。ただし、解析領域は、解析モデルの対称性を考慮して縦、横、高さがそれぞれ1mの1/8領域とする。要素分割は20節点アイソパラメトリック要素で行い、縦、横、高さともに0.2mごとに分割する。節点数は756、要素数は125である。境界条件は、大気と接する面を熱伝達境界、非解析領域のコンクリートと接する面を熱流束境界（熱の流入・出がない断熱境界）とする。

3.2 熱拡散率の考慮方法

解析パラメータは、表-1のとおりである。ここで、本解析では、セメントの水和発熱が概ね終了している供用年数が長期に及ぶコンクリートを対象に温度解析を行うことから内部発熱量は考慮していない。

桜井ら¹⁾は、環境温度に基づく凍結期および非凍結期の区分で熱拡散率の違いを示しているが、本解析では、熱拡散率がコンクリートの熱的性状であることを踏まえて、コンクリートの状態が凍結および非凍結で区分し変えることにする。また、凍結期の熱拡散率は非凍結期よりも85%程度高い値となるがこれは平均値であり、コンクリートが凍結および非凍結の状態における比熱の影響が不明であることから、本解析ではコンクリートが凍結の状態の熱拡散率を非凍結の状態よりも最大で50%高くなると設定する。一方、コンクリートの熱拡散率は高温になるほど減少し、常温ではあまり変化しないことが知られている⁶⁾。そこで、非凍結の状態では、熱拡散率が基準値を上回らないと設定する。

本解析における熱拡散率は、初期値を基準値として、コンクリート内部温度に応じて次のように変える。コンクリートの凍結温度は、 $-0.5^{\circ}\text{C} \sim -2.0^{\circ}\text{C}$ であることから、凍結温度を -1.0°C と設定する。

- a) 各要素中央の温度が -1°C 以下になる時：該当要素の熱拡散率を10%増加して、次の時間ステップの解

表-2 想定する環境温度のケース

ケース	環境温度の想定モデルにおけるパラメータ	環境状態
Case 1	$H_a = -10, H_s = 10, h_0 = 18$	凍結 (日振幅: 大)
Case 2	$H_a = -10, H_s = 2, h_0 = 18$	凍結 (日振幅: 小)

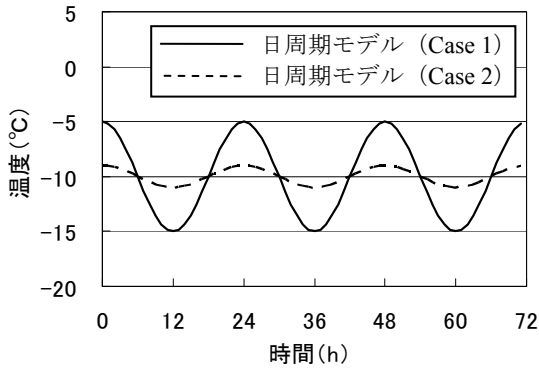


図-3 解析に考慮する環境温度

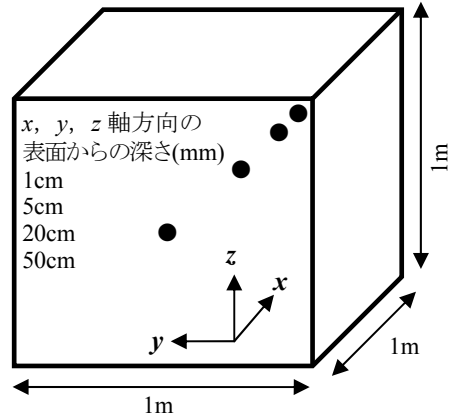


図-4 解析温度の検討位置

析を行う。ただし、熱拡散率の最大値は、基準値の1.5倍とする。

- b) 各要素中央の温度が -1°C 超になる時：該当要素の熱拡散率を10%減少して、次の時間ステップの解析を行う。ただし、熱拡散率の最小値は、基準値とする。

このことを図化するると図-2のようになる。

各要素の熱拡散率を変える条件となる各要素中央の温度は、次式で求める。

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \phi_i(t) \quad (3)$$

$T(x, y, z, t)$: 座標 (x, y, z) の時間 t における温度, $N_i(x, y, z)$: 節点温度と要素内部温度を結びつける内挿関数(形状関数), $\phi_i(t)$: 時間 t における節点 i の温度, n : 1要素あたりの節点数

3.3 環境温度の設定

本解析で考慮する環境温度は、式(4)で示される年周期モデル⁷⁾を基とする式(5)の日周期モデルで想定する。

$$T(t) = T_a + \frac{T_s}{2} \times \sin \left\{ (t - t_0) \times \frac{2\pi}{365} \right\} \quad (4)$$

$$T(h) = H_a + \frac{H_s}{2} \times \sin \left\{ (h - h_0) \times \frac{2\pi}{24} \right\} \quad (5)$$

$T(t)$: t 日における気温 ($^{\circ}\text{C}$), t : 1月1日からの経過日数 (day), T_a : 年平均気温 ($^{\circ}\text{C}$), T_s : 年間の振幅 ($^{\circ}\text{C}$), t_0 : 1月1日から年平均気温までの日数 (day), $T(h)$: h 時における気温 ($^{\circ}\text{C}$), h : 0時からの経過時間 (h), H_a : 日平均気温 ($^{\circ}\text{C}$), H_s : 日間の振幅 ($^{\circ}\text{C}$), h_0 : 0時から日平均気温までの時間 (h)

コンクリートの凍害に関する環境温度は、次の3つの

種類に大別することができる。 T_f は凍結温度である。

- a) 日最低気温 $< T_f$, 日最高気温 $< T_f$: 凍結
- b) 日最低気温 $< T_f$, 日最高気温 $> T_f$: 凍結融解
- c) 日最低気温 $> T_f$, 日最高気温 $> T_f$: 非凍結

本解析では、融解時の潜熱(融解熱)を解析プログラムの中で考慮していないことから、特に凍結持続時間、凍結速度を検討するものとして、a)の凍結の環境温度を式(5)から想定して解析を行う。環境温度は表-2に示す2ケースを想定することにする。各ケースの環境温度は図-3に示すとおりである。

4. 解析結果

解析は、コンクリート内部温度にかかわらず基準値の熱拡散率を一定とした解析(以下、解析I)とコンクリート内部温度に応じて各要素の熱拡散率を変えた解析(以下、解析II)の2種類を行う。解析時間は、解析ステップ時間を1時間として720時間(30日)である。

解析Iと解析IIの結果の比較は、図-4に示す位置における両者の解析温度により行う。検討位置は、いずれも x, y, z 軸方向の表面からの深さが等距離であり、隅角部と中央部を結ぶ線上になる。

解析結果を図-5, 図-6に示す。解析時間は720時間であるが、解析に考慮した環境温度はCase 1とCase 2の両者とも同周期であることから、解析結果をより明らかにするために図では250~325時間の結果を示している。

凍結の環境温度で日振幅が大きい場合で解析したCase 1では、解析Iと解析IIの両者とも表面から内部に

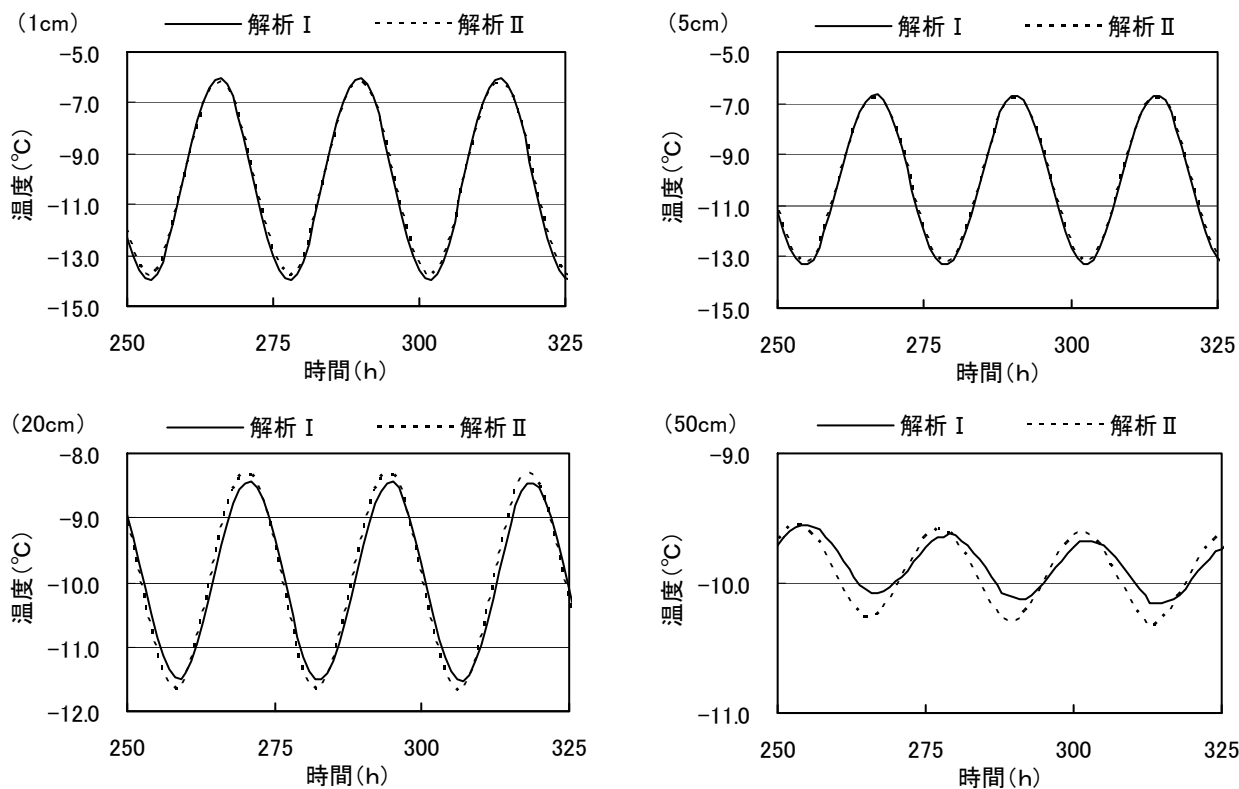


図-5 Case 1の温度解析結果

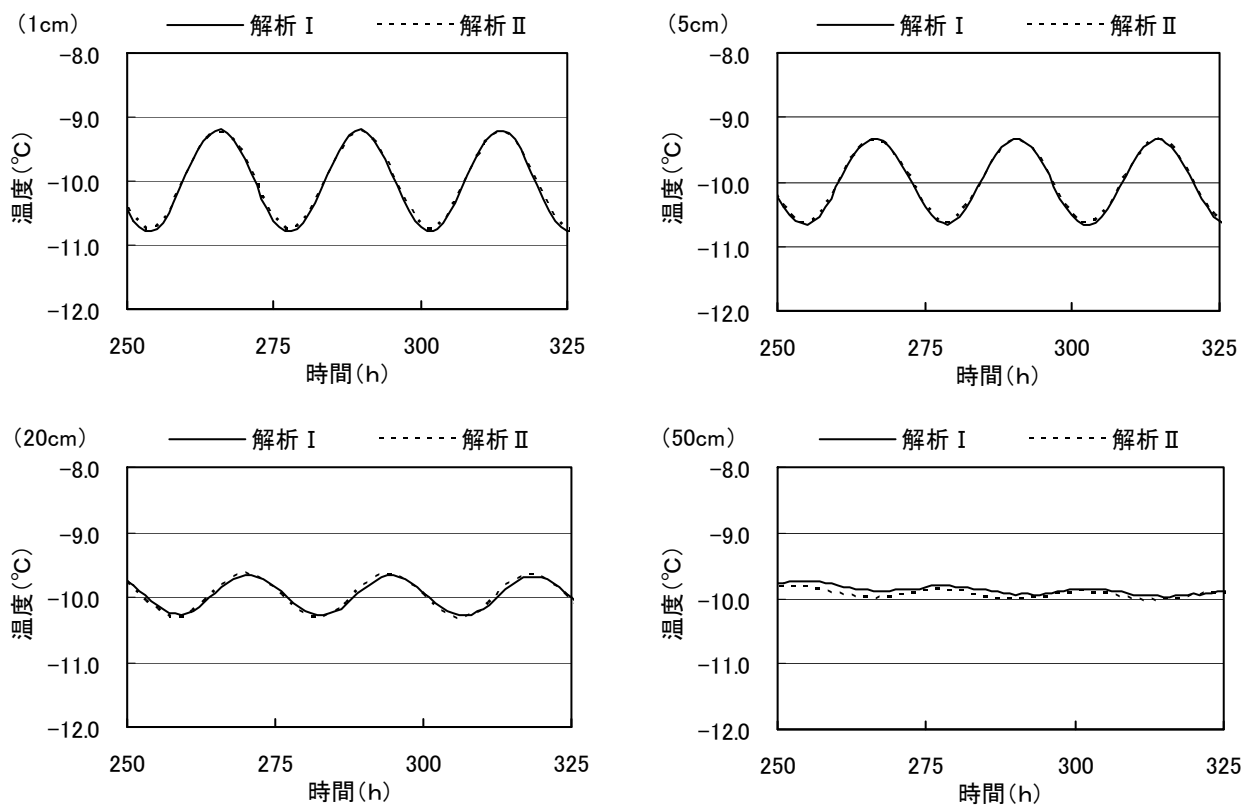


図-6 Case 2の温度解析結果

向かうにしたがい環境温度の変化に伴う内部温度の起伏は小さくなるが、内部ほど解析IIの起伏は解析Iより

も大きくなる。解析Iと解析IIの内部温度の起伏の位相は、内部に向かうにしたがい異なりだし、解析IIの方が

速くなる。一方、凍結の環境温度で日振幅が小さい場合で解析した Case 2 では、解析 I と解析 II における違いはほとんどない。

このような解析結果が得られたのは、解析 II ではコンクリートの状態が凍結になると熱拡散率を増加する解析条件であり、環境温度に伴い表面から内部に向かって徐々に凍結することで熱拡散率も大きくなり、環境温度が内部に伝わりやすくなるためである。そのために、環境温度の影響を速く、内部まで受けやすくなる。しかし、Case 2 のように日振幅が小さい場合は、コンクリート内部の熱移動が熱拡散率と温度差によるものであることから、温度差がコンクリート中であまり生じないために熱拡散率が変わったとしても温度の違いとして表れにくい。

本解析からは、コンクリートの状態が凍結になり熱拡散率が増加することで、環境温度が速く、内部まで伝わることを解析的に示したが、位相差が数時間で温度差も 1°C 以下であることから、凍結持続時間、凍結速度のより正確な検討には有用な知見であると言えるものの、凍結融解回数の検討においては凍結・非凍結による熱拡散率の違いを無考慮でも評価には影響しないことが示唆される。また、コンクリートの状態が凍結になり熱拡散率が増加することで、環境温度がコンクリート内部に伝わりやすくなったとしても、コンクリート内部に温度差が生じやすくなる日振幅（日最大気温と日最低気温の差）がなければ、凍結・非凍結による熱拡散率の違いは内部温度の変化に大きく影響しないことがわかる。

5. まとめ

本研究により得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 水の熱伝導率は 0.56 W/m・K であるのに対して、氷の熱伝導率は 2.2 W/m・K であることから、コンクリートが凍結している場合の熱伝導率および熱拡散率は非凍結の場合よりも大きくなる。常温におけるコンクリートの熱拡散率はあまり変化しないことが知られているが、コンクリートの状態が凍結・非凍結により熱拡散率が異なることが文献レビューから示唆される。
- (2) コンクリートの状態が凍結・非凍結により熱拡散率を変えた温度解析では、熱拡散率を変えなかった場合よりも、環境温度がコンクリート内部に速く、より内部まで伝わる。ただし、両者の環境温度による

コンクリート内部の温度変化の位相差は数時間であり、温度差も 1°C 以下でしかない。

- (3) コンクリートの状態が凍結・非凍結による熱拡散率の違いは、コンクリート内部に温度差が生じやすくなる日振幅（日最大気温と日最低気温の差）がなければ、内部温度の変化に大きく影響しない。
- (4) コンクリートの状態が凍結・非凍結による熱拡散率の違いは、凍結持続時間、凍結速度のより正確な検討では考慮する必要があるが、凍結融解回数の検討では無考慮でも評価に影響しないことが示唆される。

今回の解析は、あくまでも図-2のように設定した温度と熱拡散率の関係に基づいて行ったものであり、環境温度もモデルによる想定値である。実現象をよりの確に考察するためには、実際の環境温度を用いて解析を行うことも必要であるが、コンクリートの状態が凍結・非凍結における熱的性状の変化を実験および測定で詳細に明らかにすることが求められる。また、実際のコンクリート構造物の温度変化に影響を及ぼすコンクリート内部の飽水度や凍結水量等の水分状態、コンクリート内部の水分状態に影響を及ぼす凍結期をむかえる前に発生しているひび割れや凍害が生じる過程で発生するひび割れ等の因子を解析に盛り込むことも必要である。

参考文献

- 1) 桜井宏, 鮎田耕一, 佐渡公明: 寒冷地コンクリート構造物の温度分布シミュレーション, セメント・コンクリート論文集 43, pp.454-459, 1989
- 2) 国立天文台: 理科年表 平成 19 年 (机上版), pp.400-402, 2006
- 3) 三浦 尚 (訳): ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版株式会社, pp.466-476, 2004
- 4) A. G. LOUDON and E. F. STACEY: The thermal and acoustic properties of lightweight concretes, *Structural Concrete*, 3, No.2, pp.58-95, 1966
- 5) 矢川元基: 流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館, 1983
- 6) 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導率の変化, 日本建築学会論文報告集, Vol.58, pp.7-13, 1958
- 7) 農林水産省農村振興局: 土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」技術書 [コンクリートダム編], p.III57-III90, 2003

