

論文 境界モデルの違いがコンクリート躯体温度に与える影響

松井 邦人^{*1}・西田 徳行^{*2}・椎名 貴快^{*3}・Theodore F. Smith^{*4}

要旨: 通常, 野外に打設されたコンクリート構造物の温度解析は, 表面の境界条件として対流熱伝達のみをモデル化している. しかしこれまでの研究により, 特に表面付近の温度は輻射熱による影響を大きく受けていることが明らかになっている. そのため温度解析においては, 輻射熱による流入熱量を定量化した境界モデルを境界条件に組み込む必要があると思われる. 本研究では, これまでに提案されている代表的な境界モデルを示し, それらの違いによるコンクリート解析温度への影響について, 広い地域での気象観測データを用いて検討した.

キーワード: 輻射熱, 境界モデル, 温度解析, コントロール・ボリューム法

1. はじめに

気象環境条件の変化に伴うコンクリート躯体温度の変動は, 寒冷地での耐凍害性の検討や海岸地域での塩害劣化対策, 暑中環境下での温度ひび割れの発生危険度予測などの耐久性, 耐候性といった問題に関係するため, 精度良い予測解析手法が求められる.

通常, コンクリート躯体内部の温度は, 深さ方向に非線形な分布形状をしている. これは気象環境条件の変化(外的要因)による影響と, コンクリートの材料特性(内的要因)による影響が原因であると思われる. この内, 外的要因による影響については, これまでも幾つか報告されている.

田辺ら¹⁾は, 太陽熱によるコンクリートドーム壁への温度, 温度応力への影響について解析的に検討している. 清水ら²⁾は, コンクリート壁体構造物が日射を受けた時の温度応力について, 温度ひび割れ発生との関連を含めて解析的な考察を加えている. また津崎ら³⁾⁴⁾は, 日射によるコンクリート内部への流入熱量の定量化や, 風速と躯体温度との関係を示している. 著者ら⁵⁾も, コンクリート躯体温度への輻射熱による影響については, 実験計測および解析により確認

している.

このように外的要因によるコンクリート躯体温度への影響度の大きさやその重要性については, これまでも指摘されている. しかし温度解析における境界モデルは, 対流熱伝達係数の値に輻射熱等の影響を含め, 表面を単純な熱伝達境界とした解析が一般的である.

コンクリート表面と大気との間の熱収支は, さまざまな気象現象と, 深く結びついている. 気象現象は周期的に変化し, 短期的には大きなばらつきを持っているため, コンクリート表面付近の温度は経時変化が激しい. このことから, これまでの解析のように, 対流熱伝達のみに限られた伝熱現象で気象作用による影響を含めた結果を得ることは, 解析精度の面からも厳しいため, 境界モデルの再構築が必要であると思われる.

本報告では, これまでに提案されている輻射熱を考慮した境界モデルとして代表的なものを示す. そして, そのモデル中で, 天空温度や対流熱伝達係数の算定式が異なる時, 解析温度の傾向や最大・最小値にどの程度影響が現れるか, 広い地域において測定された気象庁の気象観測原簿データを使用して検討した.

*1 東京電機大学 理工学部 建設環境工学科教授 Ph.D. (正会員)

*2 西松建設(株)技術研究所 土木技術研究課 材料・施工グループ係長 博士(工学) (正会員)

*3 西松建設(株)技術研究所 土木技術研究課 材料・施工グループ 工修 (正会員)

*4 Department of Mechanical Engineering, The University of Iowa, Prof., Ph.D.

2. 温度解析

2.1 解析モデルと境界条件

従来、コンクリート及び岩盤内部における熱の移動は次のような伝熱方程式で表される。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度[kg/m³]、 C は比熱[J/kg°C]、 T はコンクリート温度[°C]、 t は時間[hr]、 z は層厚方向にとった軸[m]である。

コンクリート温度解析モデルは、厚さ D_r の半無限に広がる岩盤上に、厚さ D_c のスラブ状コンクリートが打設された2層構造モデルとした(図-1 参照)。岩盤表面から十分な深さでは温度勾配がゼロ(断熱温度境界)と仮定している。コンクリート表面での熱収支パラメータとして、正味全日射量 q_{sol} [W/m²]、正味赤外放射量 q_{sky} [W/m²]、対流熱伝達量 q_{com} [W/m²]、蒸発潜熱量 q_{evp} [W/m²]の以上4つが挙げられる。モデル化した各熱収支パラメータについて明記する。

(1) 正味全日射量

正味全日射量は、太陽から直接コンクリート水平面に入射する直達日射量と、大気中の気体分子、雲粒や塵埃によって散乱・反射された太陽面以外から入射した散乱日射量の和である全日射量に、躯体表面での吸収率 $(1-\alpha)$ を乗じて推定することができる。

$$q_{sol} = (1-\alpha)S \quad (2)$$

ここで、 α はアルベドと呼ばれる物理量、 S は全日射量[W/m²]である。アルベドは全日射量に対する反射率であり、表面の物性や性状、その彩色や太陽高度によっても異なる。

(2) 正味赤外放射量

大気と躯体表面間における赤外放射の正味量は、相互の温度差によりその向きが決まる。⁹⁾

$$q_{sky} = \varepsilon \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (3)$$

ここで、 ε は射出率、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 (=5.67×10⁻⁸ [W/m²K])、 T_{sky} は天空温度(大気の代表温度)[K]、 T_s は躯体表面温度[K]である。射出率の値は、 $0 \leq \varepsilon \leq 1$ の範囲値であり、黒体面に対する灰色面の熱放射の相対的な大きさを

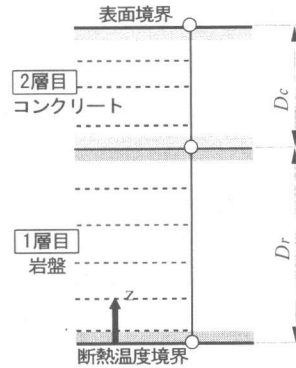


図-1 解析モデル

示す量である。この値は、物質的な違いはもちろぬ、表面の温度や状態(酸化の有無や粗滑状態)などによっても異なる。

(3) 対流熱伝達量

対流熱伝達量は、大気と躯体表面との間の熱量授受が両者の温度差に比例するとした「Newtonの冷却則」によって推定できる。

$$q_{com} = h(T_{air} - T_s) \quad (4)$$

ここで、 h は対流熱伝達係数[W/m²K]、 T_{air} は気温[K]、 T_s は躯体表面温度[K]である。対流熱伝達係数は、空気の熱容量といった流体の物性との関係からも決まってくるが、その他に表面部の粗滑状態、乾湿状態、位置や流れの性質にも影響される。

(4) 蒸発潜熱量

コンクリート表面における降雨等の蒸発潜熱量を推定する式として、ASHRAE Handbook¹⁰⁾ で採用されている下式がある。

$$q_{evp} = -(42.6 + 37.6v)(P_{cx} - \phi P_{ws}) \quad (5)$$

ここで、 v は風速[m/sec]、 P_{cx} はコンクリート表面の飽和蒸気圧[mmHg]、 ϕ は相対湿度[%]、 P_{ws} は大気の飽和蒸気圧[mmHg]である。しかし、実際のコンクリート表面における蒸発水量がどの程度であるかデータがないため、これ以降の解析では境界条件に考慮していない。

2.2 躯体表面の境界モデル

前節に述べたモデルを用いて温度解析を行う。天空温度と熱伝達係数には、いくつかの式が提

表-1 天空温度と対流熱伝達係数の提案式

パラメータ	著者	年代	提案式
天空温度 T_{sky} [K]	Bliss ⁷⁾	1961	$T_{sky} = T_{air} \left[0.8 + \frac{T_{dp} - 273}{250} \right]^{-0.25}$
	Swinbank ⁸⁾	1963	$T_{sky} = 0.0552 T_{air}^{1.5}$
	Martin and Berdahl ⁹⁾	1984	$T_{sky} = T_{air} \{ 0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos(\frac{\pi t}{12}) \}^{0.25}$
対流熱伝達係数 h [W/m ² K]	ASHRAE Handbook ¹⁰⁾	1987	$h = 5.7 + 3.8 v$
	Australian Standard ¹¹⁾	1989	$h = 3.1 + 4.1 v$
	Molineaux ¹²⁾	1994	$h = 3.1 + 2.1 v$
	山川ら ¹³⁾	1982	$h = 0.872 + 4.7 v$

注) T_{air} : 気温[K], T_{dp} : 露点温度[K] (但し, Martin らの式中では[°C]), t : 時間[hr], v : 風速[m/sec]
山川らの式は, 文献の試験結果3点から式を作成した。

表-2 解析条件

項目	記号	数値	単位
コンクリート厚	D_c	1.0	m
コンクリート熱伝導率	K_2	2.67	W/m°C
コンクリート密度	ρ_2	2300	kg/m ³
コンクリート比熱	C_2	1.17	J/kg°C
コンクリート初期温度	$T_{2,0}$	繰返し計算でデータ作成	°C
岩盤厚	D_r	5.0	m
岩盤の熱伝導率	K_1	2.33	W/m°C
岩盤の密度	ρ_1	2600	kg/m ³
岩盤の比熱	C_1	0.80	J/kg°C
岩盤の初期温度	$T_{1,0}$	深さ方向に線形近似	°C
対流熱伝達係数	h	表-1の式を使用	W/m ² °C

案されているが, その違いが温度解析に及ぼす影響は不明確である。そこで, 天空温度と対流熱伝達係数について代表的なものを各3種類選択し, 表-1に示した。Martin and Berdahlの式は晴天時用のものであるが, 他の式について天候に関する適用性の記載はない。温度解析に必要な物性値と解析条件を表-2に示す。他に, 気温, 相対湿度, 全天日射, 風速が必要であるため, 気象庁の1998年度気象観測原簿に記載されたデータ(1時間毎)を用いる。コンクリート表面のアルベドは0.34, 射出率は0.80としている。

表-3 提案式の組み合わせ

	天空温度	熱伝達係数
Case 1	Bliss	ASHRAE Handbook
Case 2		Australian Standard
Case 3		Molineux
Case 10		山川ら
Case 4	Swinbank	ASHRAE Handbook
Case 5		Australian Standard
Case 6		Molineux
Case 11		山川ら
Case 7	Martin and Berdahl	ASHRAE Handbook
Case 8		Australian Standard
Case 9		Molineux
Case 12		山川ら

3.1 天空温度と対流熱伝達係数

季節変動の影響も見ると1年間の気象データを用いて解析を行っている。まず, 天空温度や熱伝達係数の提案式の違いを定量的に調べることにした。

東京における気象データをもとに, 14時の天

3. 温度解析

札幌, 東京, 那覇の3地点の気象データを用いて, 表-3に示した12ケースの組み合わせで, 解析を行った。ここではその中から特徴的なものを選択して, それらの結果を示すことにする。

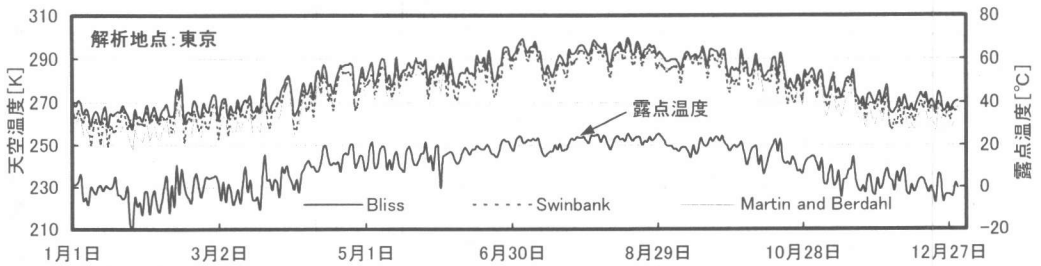


図-2 天空温度の比較 (東京)

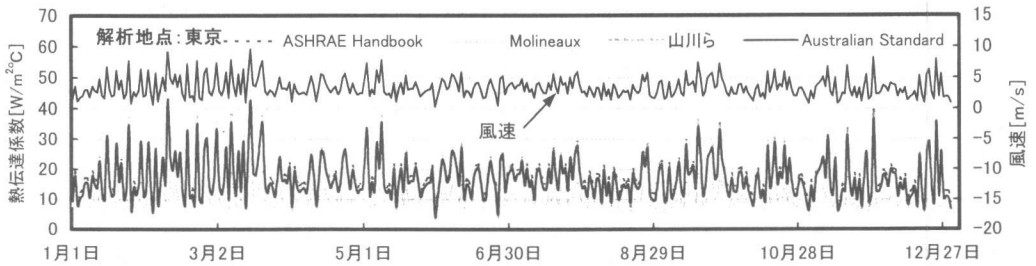


図-3 熱伝達係数の比較 (東京)

空温度の計算値を図-2 に示した。夏場では Swinbank の式で算出した天空温度の値が低く、Bliss と Martin and Berdahl の式の結果が比較的良い一致が見られる。それに対し、冬場では Martin and Berdahl の式が低く現れ、Bliss と Swinbank の式が良く一致している。

熱伝達係数の式は、いずれも風速の線形関数で定義されている。図-3 は、東京における 14 時の風速を用いて、算出している。この図から ASHRAE Handbook と Australian Standard は同程度の値であるが、示方書で参考とされた山川らの値は、振幅が若干大きい。Molineaux の熱伝達係数は 1 年を通じてかなり小さい。

3.2 コンクリートの推定温度

那覇、東京、札幌の 3 カ所でコンクリート躯体温度を推定した。図-4~6 に Case 3 のモデルでの表面温度と底面温度、および外気温を表す。いずれも時刻は 14 時のものである。東京における表面の最高温度は、7 月 5 日の 41.2°C であり、この日に最高気温 35°C が記録されている。また、底面の最高温度は 9 月 2 日に 23.7°C となっている。表面の最低温度は 1 月 15 日に 2.7°C を示した。この日の天候は雪であり、外気温が日中に

もかわかわらず 0.2°C と極めて低い。底面では 1 月 4 日に 6.5°C となっている。那覇での表面の最高温度は 45°C、札幌では 33°C となっている。また、本解析では考慮していないが、札幌では冬場に氷点下となり、解析精度を向上させるには凍結・融解を考慮する必要があると考えられる。

天空温度のモデルの違いが、表面温度に及ぼす影響を調べるため、Case 3 と Case 6 の差、Case 3 と Case 9 の差、Case 6 と Case 9 の差を求め、図-7 に記した。この図からも、Case 3 が他のケースと較べ、高い温度を算出している。しかし、天空温度モデルの違いによる表面温度の違いは、1.5°C 程度であり、底面温度の差もほぼ同じ値を示している。

熱伝達係数のモデルの違いが、表面温度に及ぼす影響を調べるため、Case 1 と Case 2 の差、Case 1 と Case 3 の差、Case 2 と Case 3 の差を求め、図-8 に記した。この図より、Case 3 が表面温度を、一番高く推定し、他のケースとは最大で 2.4°C の差が生ずる。

大雑把ではあるが表面温度と底面温度の差は温度応力の目安になる。図-9 に 6 時と 14 時における表面温度と底面温度の差を示す。図から

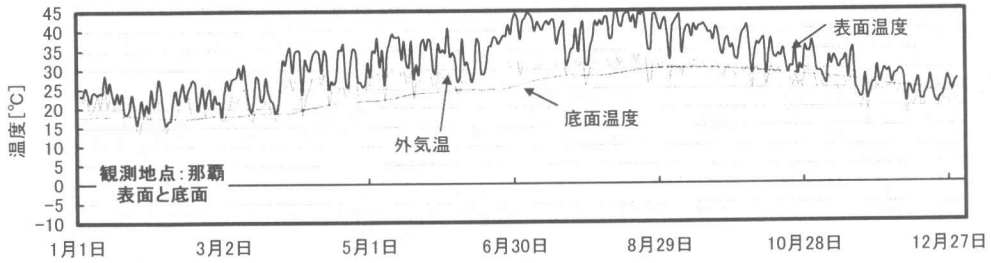


図-4 那覇における表面と底面の温度 (Case 3, 時刻 14:00)

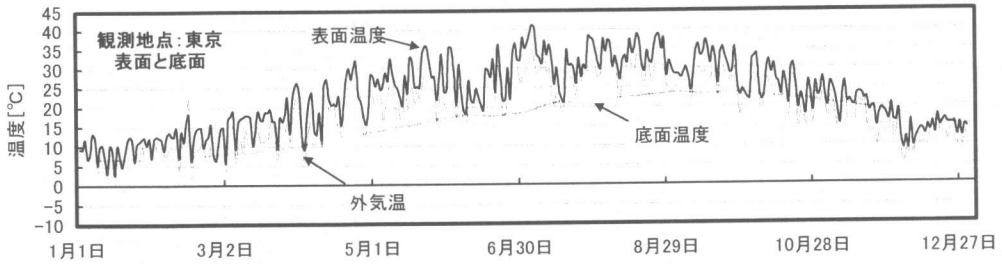


図-5 東京における表面と底面の温度 (Case 3, 時刻 14:00)

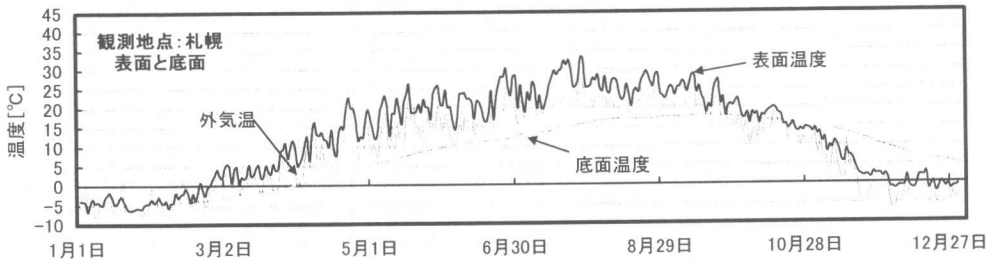


図-6 札幌における表面と底面の温度 (Case 3, 時刻 14:00)

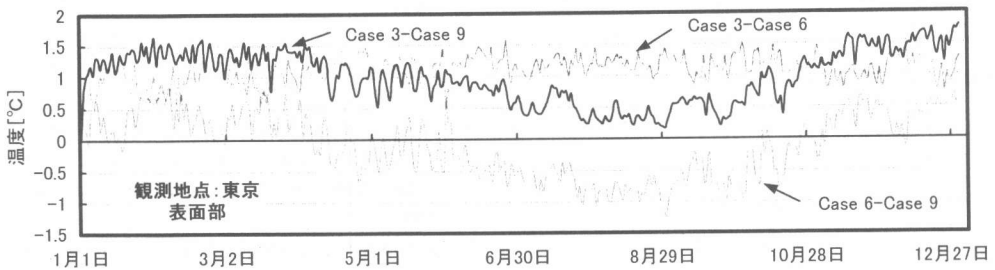


図-7 天空温度モデルの違いにおける表面温度の差 (観測地点 東京, 時刻 14:00)

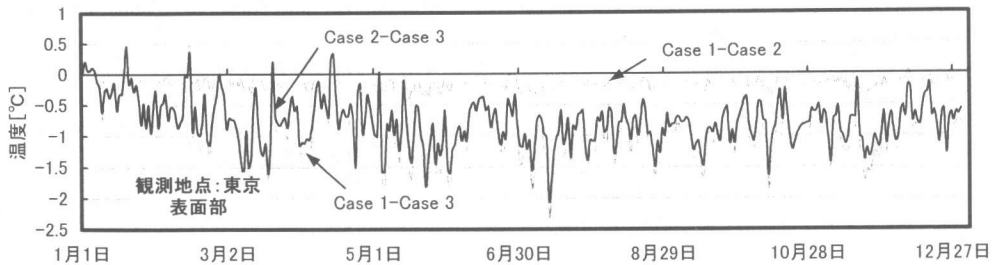


図-8 熱伝達係数モデルの違いにおける表面温度の差 (観測地点 東京, 時刻 14:00)

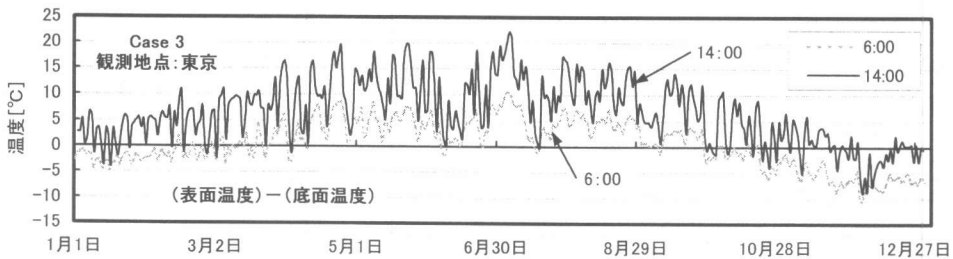


図-9 6:00 と 14:00 における表面・底面部の温度の差 (観測地点 東京)

明らかなように 14 時における温度差は最大で約 20°C になっている。また、6 時の表面と底面の温度差は晩秋から春先まで負となり、底面温度が高いことを示している。真冬では 14 時の表面温度もしばしば底面温度より低くなっている。

4. 結論

コンクリートの温度推定をする際、天空温度や熱伝達係数の違いが、以下のような影響を与えることが明らかになった。

- (1) 天空温度のモデルは、夏場と冬場で、天空温度が異なる。Swinbank の式は夏場、他に比べて低く推定され、冬場では Martin and Berdahl が低い。
 - (2) 熱伝達係数は、ASHRAE Handbook と Australian Standard での値は、ほぼ等しくなるが、山川らの値は振幅が若干大きい。Molineaux の式による値は小さい。
 - (3) 天空温度に Bliss, 熱伝達係数に Molineaux のモデルを用いたとき、コンクリートの表面温度が、一番高く推定される。
 - (4) 天空温度のモデルが異なる場合では、推定される表面温度に 1.5°C 程度の差が表れる。
- 今後は、コンクリート構造物の実測温度と輻射熱の影響を考慮した温度解析値を比較検討し、適切な算定式の提案・改良が必要と考える。
- 2) 清水昭男, 秦昌樹, 伊藤洋, 坂口雄彦: 温度ひび割れ発生における日射の影響について, 土木学会第 40 回年次学術講演会, V-278, pp.555-556, 1985.9.
 - 3) 津崎淳一, 近久博志, 武藤正人, 中原博隆: 日射がコンクリート構造物の熱伝導問題に与える影響, 土木学会第 45 回年次学術講演会, V-179, pp.384-385, 1990.9.
 - 4) 津崎淳一, 武藤正人, 荒井幸夫, 中原博隆: 養生中のコンクリートの内部温度に与える風速の影響, 土木学会第 45 回年次学術講演会, V-181, pp.388-389, 1990.9.
 - 5) 西田德行, 椎名貴快, 松井邦人, Smith, T.F.: 気象現象の計測とコンクリート躯体温度への影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1165-1170, 1999.6.
 - 6) Duffie, J.A. and Beckman, W.A.: Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition, John Wiley & Sons, 1991.
 - 7) Bliss, R.W.: Atmospheric Radiation near the Surface of the Ground, Solar Energy, 5, 103, 1961.
 - 8) Swinbank, W.C.: Long-Wave Radiation from Clear Skies, Quarterly J. Royal Meteorological Soc., 89, 339, 1963.
 - 9) Martin, M. and Berdahl, P.: Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States, Solar Radiation, Vol.32, No.5, pp.663-663, 1984.
 - 10) ASHRAE Handbook, HVAC Systems and Applications, 1987.
 - 11) Sheridan, N.R.: Solar Heating Systems for Swimming Pools, Australian Standard A53624, 1989.
 - 12) Molineaux, B., Lachal, B. and Guisan, O.: Thermal Analysis of Five Outdoor Swimming Pools Heated by Unglazed Solar Collectors, Solar Energy, Vol.53, No.1, pp.21-26, 1994.
 - 13) 山川秀次, 笠原 清, 小林精一: マスコンクリートの熱伝達率試験方法の検討, 土木学会第 37 回年次学術講演会概要集, 第 5 部門, 1982.

参考文献

- 1) 田辺忠顕, 原田晃, 山川秀次: 太陽熱を受けるコンクリートドーム壁の温度分布解析, 土木学会第 34 回年次学術講演会, V-118, pp.235-236, 1979.9.