

V-102

熱特性値推定に与える輻射熱の影響

東京電機大学 学生会員 椎名 貴快
西松建設技術研究所 正会員 西田 徳行

東京電機大学 フェロー会員 松井 邦人
アイオワ大学 T. F. Smith

1. 研究目的

コンクリートの熱伝達境界における熱収支として既往の研究では対流熱伝達を考えていた。ここではこの他に輻射熱を考慮し、これがコンクリートの熱特性パラメータ推定に与える影響を数値解析的に評価することが目的である。

2. 温度解析

半無限に広がる岩盤上に打設されたコンクリートの一次元モデルを図-1に示す。ここで、一次元熱伝導解析に必要な支配方程式は

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{Q}(t) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

であり、 K 、 ρ そして C はそれぞれ熱伝導率、密度、比熱である。また T は温度、 x は深さ方向にとった軸である。コンクリート躯体内における水和発熱モデルは示方書に記載された下式を使用する。

$$\dot{Q} = \rho_c C_c Q_\infty \gamma e^{-\gamma t} \quad (2)$$

初期条件としてコンクリートと岩盤の初期温度を与える。また境界条件としては岩盤の十分深い所では固定温度とし、コンクリートと大気との境界では次式を使用する。

$$K_c \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0 \quad (3)$$

ここで q は躯体表面における熱流入量であり、対流熱伝達 q_{con} 、全天日射 q_{sol} 、天空放射 q_{sky} そして気化熱 q_{evap} の和である。

$$q = q_{con} + q_{sol} + q_{sky} + q_{evap} \quad (4)$$

3. 輻射熱の定義

対流熱伝達 q_{con} は、Newtonの冷却則により

$$q_{con} = h(T_{air} - T_s) \quad (5)$$

但し、 h は対流熱伝達率、 T_{air} 、 T_s はそれぞれ外気温度とコンクリート表面温度を示している。

コンクリート表面の単位面積に単位時間当たりに入射する全天日射量を I 、コンクリートのアルベドを α とすると、躯体内に伝達されるエネルギーは

$$q_{sol} = (1 - \alpha) I \quad (6)$$

天空放射による躯体内への熱流量 q_{sky} は

$$q_{sky} = \varepsilon \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (7)$$

ここで、 ε はコンクリートの放射率、 σ はStefan-Boltzmann定数、 T_{sky} [K]は天空温度であり、

$$T_{sky} = T_{air} \left\{ 0.711 + 0.0056 T_{dp} + 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos \left(\pi \frac{t}{12} \right) \right\}^{0.25} \quad (8)$$

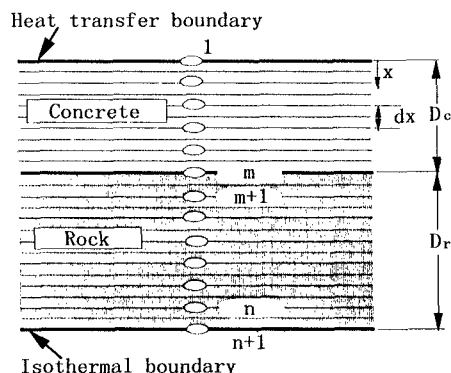


図-1 マスコンクリートモデル

露点温度は T_{dp} [°C]、 T_{air} [K]であり、時間 t の関数。

水分の蒸発による熱損失量 q_{evap} は

$$q_{evap} = -(42.6 + 37.6 v) (P_{cs} - \mu P_w) \quad (9)$$

但し、 v [m/s]は風速、 μ は相対湿度、 P_{cs} [Pa]はコンクリート表面の飽和蒸気圧、 P_w [Pa]は外気の飽和蒸気圧である。

4. 熱特性値の推定手法

熱特性値として、コンクリートの熱伝導率、比熱、熱伝達率、そして断熱温度上昇実験定数 Q_∞ 、 γ の5つのを考え、これらを $X=(X_1, X_2, \dots, X_5)^T$ と表す。現場計測におけるセンサー数を N 個として、着目点 i における測定温度を $u_i(t)$ 、解析温度を $T_i(X, t)$ とすると、評価関数 f は以下のように表される。

$$f(X) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^N W_i \left(u_i(t) - T_i(X, t) \right)^2 dt \quad (10)$$

ここで W は測定点の重み関数であり、また t_1, t_0 は測定データの時間領域上下限値である。温度 $T_i(X, t)$ を1次項までTaylor展開すると、

$$T_i(X + dX) \approx T_i(X) + \sum_{j=1}^M \frac{\partial T_i}{\partial X_j} dX_j \quad (11)$$

(11)式を(10)式に代入して、

$$f = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^N W_i \left(u_i(t) - T_i(X, t) - \sum_{j=1}^M \frac{\partial T_i}{\partial X_j} dX_j \right)^2 dt \quad (12)$$

(12)式において、 f を最小とする必要条件是

$$\frac{\partial f}{\partial X_i} = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^N W_i \left(u_i(t) - T_i(X, t) + \sum_{j=1}^M \frac{\partial T_i}{\partial X_j} dX_j \right) \left(-\frac{\partial T_i}{\partial X_i} \right) dt = 0 \quad (13)$$

(13)式を書き換えると

Keywords: 輻射熱、全天日射、天空放射、気化熱、熱特性値

連絡先 : 〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂 925 TEL 0492(96)5731 内線 2734

表－1 解析条件一覧

パラメータ	順解析（測定温度作成）		逆解析	
	コンクリート	岩盤	コンクリート	岩盤
熱伝導率[kcal/m-hr-℃]	2.3	2.0	同定	2.0
比熱 [kcal/kg-℃]	0.28	0.19	同定	0.19
密度 [kg/m³]	2300	2600	2300	2600
熱伝達率[kcal/m²-hr-℃]	11.0	—	同定	—
初期温度[℃]	20.0	線形近似	20.0	線形近似
固定温度[℃]	15.0		15.0	
外気温度[℃]	測定データ		測定データ	
断熱温度	Q_{∞}	46.0	同定	—
上昇実験定数	γ	1.10	同定	—
アルベド	0.40	—	1.00	—
射出率	0.88	—	0.00	—
気化熱 有 / 無	無	—	無	—

表－2 収束過程

Itr	熱伝導率 [kcal/m-hr-°C]	比熱 [kcal/kg-°C]	熱伝達率 [kcal/m²-hr-°C]	断熱度上昇 実験定数	
				Q_{∞}	γ
1	3.45	0.420	16.50	69.00	1.65
2	1.42	0.154	16.75	68.81	0.32
3	1.56	0.231	16.76	68.81	0.44
.	.	.	.	.	.
17	3.39	0.237	16.75	68.81	0.54
18	3.39	0.237	16.75	68.81	0.54
19	3.39	0.237	16.75	68.81	0.54
20	3.39	0.237	16.75	68.81	0.54
真値	2.30	0.28	11.00	46.00	1.10

$$\int_{t=0}^{t=N} \sum_{i=1}^M W_i \frac{\partial T_i}{\partial X_i} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} dt dX_i$$

$$= \int_{t=0}^{t=N} \sum_{i=1}^M \frac{\partial T_i}{\partial X_i} W_i (u_i(t) - T_i(X, t)) dt \quad (14)$$

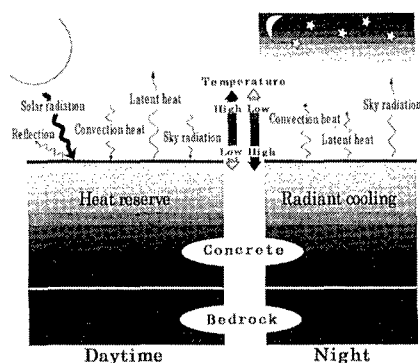
となり、このような逆解析のアプローチを一般に *Gauss-Newton* 法という。

5. 数値解析

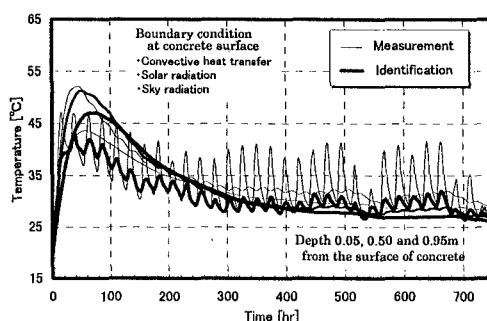
現行ではコンクリート構造物内部での非線形温度分布に少なからず影響していると思われる環境パラメータについては、対流熱伝達のみを考慮している。そのため逆解析によって得た熱伝達率の同定値にそれらの影響を含ませて評価することになる。しかし対象とする構造物の躯体厚が薄くなると、輻射熱等の影響によって解析的に不安定性が生じることが度々ある。このことから、これらの因子を考慮した条件設定が必要とされる。

ここでは岩盤厚 2.0m 上に 1.0m のコンクリート床版が打設されたモデルを考える。解析に使用する 1ヶ月間の測定データを表－1 の条件で順解析により作成する。またここで必要な気象データとして、気温、全天日射量、相対湿度、露点温度そして風速については、気象庁の東京管区気象台において 1995 年 8 月に測定された 1ヶ月のデータを使用した。逆解析における条件についても同表に記載する。

本解析では、無養生時における、全天日射と天空放射を境界条件に加えた測定データを作成し、逆解析においては既往の研究と同様に対流熱伝達のみ条件により解析を行っている。これは輻射熱がど



図－2 放射モデル



図－3 温度の同定結果（無養生時）

の程度解析結果に影響を与えるかを簡便に見ることが目的である。

コンクリート表面より深さ方向に 0.05m, 0.25m, 0.50m, 0.75m, 0.95m の 5 点での位置における温度の一致度を考える。5 個の熱特性値の解析初期値と収束過程の結果を表－2 に示し、既知の測定点における温度履歴の一致度を図－3 に示す。

6. 解析結果に対する検討

通常、構造物は日中に太陽から多くのエネルギーを受け取り、夜間に放射冷却によって大気へ放出している。このような放射エネルギー収支がコンクリートの内部温度推定や劣化問題等に関係し、必ずしも無視できる問題ではないものと推測される。図－3 において、測定温度と同定温度の一致度を示したが、対流のみの条件設定で同定することは難しく、表面付近でその傾向が顕著に表れている。各熱特性値の収束値は解析真値より 5 割程度増減しており、これは温度同定の差異と条件設定の違いによるものであろう。養生時の解析では気化熱を境界条件に加えるため、内部温度の日変動は若干小さくなるものの、温度の同定は同様に難しいと思われる。

7. おわりに

本研究では、数値解析的に輻射熱のコンクリート躯体に対する影響と必要性を示したが、今後は計測実験等を通して、輻射熱モデルのより確かな定式化と実用化に向けて取り組んでいくつもりである。