

温度荷重の簡易予測法に関する研究

その8 2次元周期定常解析

正会員 ○ 中島 秀雄*¹ 正会員 永田 明寛*²
正会員 石川 孝重*³ 正会員 林 幸雄*⁴

温度荷重 周期定常 温度分布 2次元 有限体積法

1. はじめに

文献¹⁾では1次元的な熱流が想定できる壁体(以下, 平面壁)を対象に, 日周期定常計算による温度の簡易予測法を示した。しかし, 柱・梁などの主要な構造部材について平面壁として扱うことはできないため, 適用範囲は非常に限定されたものであった。そこで, 本報では種々の断面形状に対応できるように2次元の有限体積法²⁾(以下, CVM: Control Volume Method)による日周期定常計算プログラムをMicrosoft EXCELで開発したので報告する。

2. 計算法の概要

気象データ(気温・日射)の扱いは, 文献¹⁾と同様であり, 例えば, 日平均気温の最高値 \bar{T}_H および最低値 \bar{T}_L と, それぞれに対応する日振幅 \tilde{T}_H , \tilde{T}_L から, 年最高気温 T_H と年最低気温 T_L が

$$T_H = \bar{T}_H + \tilde{T}_H, \quad T_L = \bar{T}_L + \tilde{T}_L \quad (1)$$

となると考える。この際, 日変動を日平均値まわりの日周期正弦波 1 項のみで表現し, 日周期定常計算により部材内温度分布を評価する。熱伝導方程式を空間領域に関して離散化すると(今回は 2 次元直交メッシュによる CVM を用いている), 一般に,

$$C_\Omega \dot{T}_\Omega(t) = K_\Omega T_\Omega(t) + K_{\Omega\Gamma} T_\Gamma(t) \quad (2)$$

となる(T_Ω : 内部温度ベクトル, T_Γ : 境界温度ベクトル, C_Ω : 熱容量行列, K_Ω , $K_{\Omega\Gamma}$: 熱伝導行列, t : 時刻[s])。周期定常解は, 通常,

$$T = \tilde{T} e^{i\omega t} \quad (3)$$

とにおいて,

$$(i\omega C_\Omega - K_\Omega) \tilde{T}_\Omega = K_{\Omega\Gamma} \tilde{T}_\Gamma \quad (4)$$

を解くのだが(ω : 角振動数[Hz]($= 2\pi/P$), P : 周期[s], i : 虚数単位 $= \sqrt{-1}$), 複素数計算は EXCEL では極めて遅いため,

$$\tilde{T}_\Gamma = \tilde{T}_{\Gamma c} \cos \omega t + \tilde{T}_{\Gamma s} \sin \omega t \quad (5)$$

$$\tilde{T}_\Omega = \tilde{T}_{\Omega c} \cos \omega t + \tilde{T}_{\Omega s} \sin \omega t \quad (6)$$

とにおいて,

$$-\omega C_\Omega \tilde{T}_{\Omega s} = K_\Omega \tilde{T}_{\Omega c} + K_{\Omega\Gamma} \tilde{T}_{\Gamma c} \quad (7)$$

$$\omega C_\Omega \tilde{T}_{\Omega c} = K_\Omega \tilde{T}_{\Omega s} + K_{\Omega\Gamma} \tilde{T}_{\Gamma s} \quad (8)$$

を反復法で解いている。

3. 部材平均温度・温度勾配の最大・最小値

部材平均温度は軸力に, 温度勾配(部材ごとに線形近似)は曲げ応力に関係するため, これらを出力項目とする。温度勾配は2次元計算のため2方向ある。平均温度・x 方向温度勾配・y 方向温度勾配の3項目について, 夏期(年最高)・冬期(年最低)それぞれの結果が必要なため,

部材ごとに $2 \times 3 = 6$ つの出力がある。部材間の拘束は今回は考えていない。温度勾配を線形近似した値は, 曲げモーメントが等価になるよう決定している。具体的には, ある部材の ij 要素の面積を A_{ij} [m²], 要素中心座標を (x_i, y_j) , 温度を T_{ij} として,

$$\text{部材断面積: } A = \sum A_{ij}$$

$$\text{部材重心: } x_o = (\sum A_{ij} x_i) / A, \quad y_o = (\sum A_{ij} y_j) / A$$

部材断面2次モーメント(重心原点の x 軸・y 軸周り):

$$I_x = \sum A_{ij} (y_j - y_o)^2, \quad I_y = \sum A_{ij} (x_i - x_o)^2$$

$$\text{部材平均温度: } T_{ave} = (\sum A_{ij} T_{ij}) / A$$

部材平均温度勾配(x 方向, y 方向):

$$\theta_x = [\sum A_{ij} T_{ij} (x_i - x_o)] / I_y, \quad \theta_y = [\sum A_{ij} T_{ij} (y_j - y_o)] / I_x$$

と算出している(総和は部材に属するセルが対象)。ところで, 実際は周期定常計算のため, 温度は,

$$T_{ij} = \bar{T}_{ij} + \tilde{T}_{ij,c} \cos \omega t + \tilde{T}_{ij,s} \sin \omega t \quad (9)$$

と変動する。したがって, 部材平均温度, 部材平均温度勾配も変動するため, 最大値(最小値)を求めるには,

$$T_{ave} = (\sum A_{ij} \bar{T}_{ij}) / A \pm \sqrt{(\sum A_{ij} \tilde{T}_{ij,c})^2 + (\sum A_{ij} \tilde{T}_{ij,s})^2} / A \quad (10)$$

$$\theta_x = [\sum A_{ij} \bar{T}_{ij} (x_i - x_o)] / I_y$$

$$\pm \sqrt{[\sum A_{ij} \tilde{T}_{ij,c} (x_i - x_o)]^2 + [\sum A_{ij} \tilde{T}_{ij,s} (x_i - x_o)]^2} / I_y \quad (11)$$

$$\theta_y = [\sum A_{ij} \bar{T}_{ij} (y_j - y_o)] / I_x$$

$$\pm \sqrt{[\sum A_{ij} \tilde{T}_{ij,c} (y_j - y_o)]^2 + [\sum A_{ij} \tilde{T}_{ij,s} (y_j - y_o)]^2} / I_x \quad (12)$$

とする必要がある(±は絶対値が大きくなる方をとる)。

4. EXCEL プログラムの仕様

計算領域(部材)は10領域まで定義でき, 領域の材料名(材料物性値は内蔵されている)を選択するようになっている(シート **CALC**)。現状では, 境界条件は断熱・室内・室外(相当外気温)の3種類である(複数の方位に面するケースがありうるため相当外気温は3種類に増やす予定)。都市(12都市)・方位(16方位+水平+日影)・日射吸収率の指定もシート **CALC** で行う(温度・日射量の基本値が内蔵されている)。セル数は41×41に固定されているがセル寸法は任意に指定できる。セル寸法と, 各セルの境界条件もしくは計算領域指定を行うシートは **CALC** とは別シート(**MESH**)である。領域指定が終了したら, シート **CALC** に戻り, 計算実行ボタンを押すと, 平均部材温度・部材平均温度勾配(x 方向・y 方向)の最大値(もしくは最小値)が夏期・冬期それぞれについて計算され, 結果が表示される。

5. 実荷重を用いた時刻歴解析との比較

本研究の2次元周期定常解析と実荷重を用いた時刻歴解析³⁾との比較を行う。対象モデルは文献³⁾に示したモデル(屋根スラブ、外壁、屋根部分の梁)である。モデルを図1に示す。材料定数、熱伝達率等の解析条件は文献³⁾と同じ値を用いた。屋根(水平面)、外壁(西面)における夏季の一日の相当外気温の履歴を図2に示す。外壁(西面)では外気温と日射の温度のピークがずれることからISO/TR9492に倣い相当外気温の振幅を0.9倍に低減している。

図3は外的条件、熱定数の入力及び解析結果の出力画面を、図4はモデル入力画面(梁の解析例)を示す。モデルは40x40のメッシュとなっている。各行、各列において幅を自由に設定することができる。各メッシュに材料または境界条件を設定することでモデルを作成する。

解析結果のうち、対象となる部材平均温度の最大値(夏季)を時刻歴解析、1次元周期定常解析と比較し表1に示した。時刻歴解析との差は最大1.7℃であるがいずれのケースにおいても安全側(温度が高い側)に評価できており、構造設計に用いるには十分な精度で部材平均温度が計算できている。

都市名	東京	気温日平均[℃]	34.2	夏期	冬期
緯度[°N]	35.690	気温日振幅[K]	5.9	4.1	-1.9
方位	水平	日射量日平均[W/m ²]	344	0	0
日振幅係数	1.00	日射量日振幅[W/m ²]	655	0	0
日射吸収率	0.80	相当外気温日平均[℃]	46.0	-1.9	-1.9
		相当外気温日振幅[K]	28.4	4.1	4.1
		室温[℃]	26.0	22.0	22.0

id	色	材料名	熱伝導率 [W/(m·K)]	容積比熱 [kJ/(m ³ ·K)]	断面積 [m ²]	温度[℃]	
						夏期	冬期
0		断熱境界		0.000			
1		室内		2.407		26.0	22.0
2		相当外気温		23.260		74.5	-6.0
3		相当外気温 ²⁾		25.000			
4		相当外気温 ³⁾		25.000			
A		普通コンクリート	1.628	2022	6.96E-02	62.7	-2.1
B		防水層	0.111	921	1.16E-02	53.5	1.4
C		普通コンクリート	1.628	2022	1.22E-01	44.6	5.6
D		普通コンクリート	1.628	2022	2.62E-01	33.6	14.1
E		(無し)			0.00E+00		

図3 外的条件、熱定数入力及び解析結果の出力画面

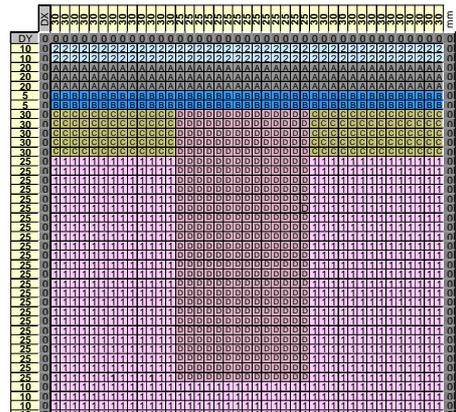


図4 モデル入力画面

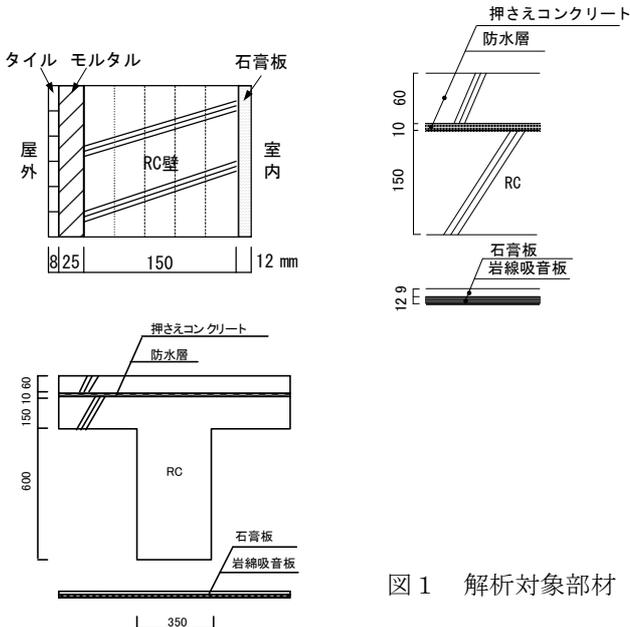


図1 解析対象部材

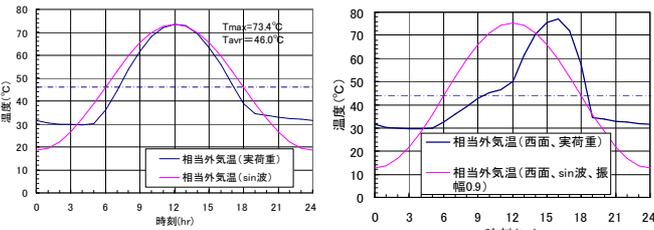


図2 一日の相当外気温履歴(実荷重、周期定常(sin波))

*1 清水建設(株)
*2 首都大学東京
*3 日本女子大学
*4 鹿島建設(株)

表1 部材平均温度の最大値(夏季)の比較

部位	実荷重時刻歴	sin波時刻歴	1次元周期定常解析	2次元周期定常解析	実荷重と2次元との差
屋根スラブ	44.2	45.0	45.3	45.3	1.1
西面外壁	46.1	47.5	47.9	47.8	1.7
R階中通り梁	33.5	-	-	33.6	0.1

6. まとめ

外気温、日射、室内温度の影響をうける構造部材(2次元断面)の簡易温度解析(周期定常解析)プログラムをMicrosoft EXCELを用いて作成し、時刻歴解析結果と比較して構造設計に用いる精度として十分であることを示した。

謝辞

本報告は建築学会温度荷重小委員会における活動の一部をまとめたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 中島秀雄他：温度荷重の簡易予測法に関する研究(その2)簡易予測法と気象データ、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1、43-44、2005。
- 2) S. V. パタンカー：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、森北出版、1985。等。
- 3) 伊藤博夫：FEMモデルによる簡易予測法の検証と躯体温度の解析、2006年度日本建築学会大会 PD 資料 温度変化を考慮した建築構造の設計13-22

Shimizu Corporation
Tokyo Metropolitan University
Japan Women's University
Kajima Corporation