

壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果

第4報——中空層付き壁体の中空層内気流
および熱流計算を含めた非定常熱流計算角 舎 輝 典*
本 間 宏*キーワード：シミュレーション・熱移動・中空層付き外壁・気流速度・自然換気・
日射熱入射・モデル実験・冷房負荷

中空層の上下に開口を設けて自然換気を行う外壁の非定常熱流計算のために、層内気流計算法⁴⁾を壁の非定常熱伝導計算に組み込んだシミュレーションプログラムを作成した。コンクリート壁厚さ150 mm、中空層厚さ70 mmで上下開口幅を10 mm, 40 mmとした場合の計算結果を、ばく露実験結果³⁾と比較した。外表面仕上げ材およびコンクリート壁本体の温度変動、および壁体に流入する熱流はほぼ近似できることがわかった。中空層内平均気流速度は実験時の気流速の推測値と計算値の比較を行ったが、10%から20%の違いであった。全般に計算結果と実験結果は一致しており、本計算法によって中空層の換気による建物内へ流入する熱量の低減効果の検討が可能であることがわかった。

1. はじめに

中・低緯度地方において、室内温熱環境を夏の暑さから守るための一手段として壁内中空層の自然換気による日射熱排除が経験的に行われてきた。しかし、この効果や自然換気を行うために必要な各部の寸法に関して技術的な資料が乏しいため、近代的建物の外壁構造ではこの方法の利用が徐々に忘れられようとしている。筆者らはこれまでに、両側面から中空層内へ伝達される熱流と中空層内に生ずる気流との関係を模型実験により求め¹⁾、またこの気流を数値計算する方法を試みた。これにより比較的短い計算時間で中空層内に生じる気流とこの気流による熱輸送効果を計算できることがわかった²⁾。一方、外壁は常に変化している気象にさらされるため、壁の外表面へ入射する日射熱量、外気温、中空層の外気側および室内側表面温度の関係が複雑に影響しあい、中空層を持つ外壁の伝熱特性の把握を困難にしている。

本研究第3報³⁾では、中空層を持つ外壁の模型を作成し、この中空層の上下の開口幅を変化させた場合の実気象下における中空層内空気温度変動および壁本体内部の温度変動の測定より、中空層の自然換気による日射熱の排除効果を検討した。

本報告は、種々の気象条件下にある建物の外壁に中空層の自然換気を利用した場合の効果を検討するためのシミュレーションプログラムを作成し、上記気象ばく露模型の実験状態をこれにより数値計算した結果と実験結果との比較について述べる。

記号

中空層を自然換気する壁体では中空層内空気温度の上下差が大きく、壁内の水平方向の熱流も上下で差が生ずる。このため、単に外壁単位面積あたり熱流という表現よりも、ある高さにおいて単位面積あたり生ずる熱流および壁の水平方向の単位長さで壁の高さ全体に生ずる熱流として表すほうが妥当と思われる場合がある。したがって、本報告では次のような記号を定義している(各

* 豊橋技術科学大学建設工学系 正会員

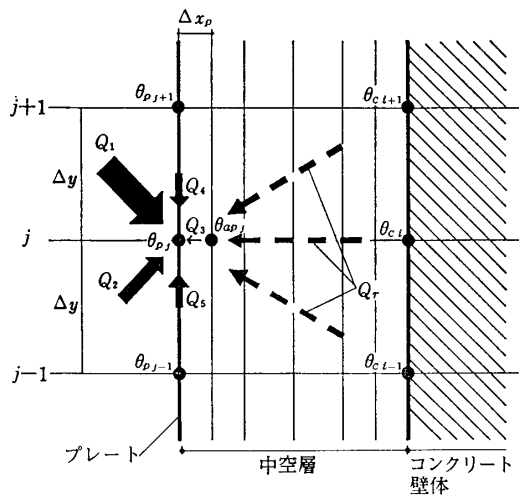


図-1 プレート上のある点の熱収支モデル

- Q_4 : プレート内での上部区間からの伝導による熱流 [W]
- Q_5 : プレート内での下部区間からの伝導による熱流 [W]
- Q_r : コンクリート表面・プレート間の放射熱交換量 [W]
- S_r : 日射量 [W/m²]
- C : ステファン-ボルツマン定数 [W/(m²·K⁴)]
- ϵ_o : プレートの外気側表面の放射率
- ϵ_p : プレートの中空層側表面の放射率
- ϵ_c : コンクリート表面の放射率
- Δy : 差分計算のための上下方向の区間間隔 [m]
- Δx_p : プレートに近接する層内空気温度計算点とプレートの距離 [m]

α_o : プレートと外気との熱伝達率 [W/(m²·K)]

λ_{ap} : 層内空気の見かけの熱伝導率 [W/(m·K)]

λ_p : プレートの熱伝導率 [W/(m·K)]

ϕ_{ij} : コンクリート表面の i 番目の区間からプレートの j 番目の区間への面形態係数

θ_o : 外気温 [°C]

θ_{pj} : プレートの j 番目の区間の温度 [°C]

θ_{apj} : プレートに接する層内空気温度 [°C]

θ_{ci} : コンクリート表面の i 番目 (j と幾何的に同一)の区間の温度 [°C]

T_p : プレート厚さ [m]

B : 単位幅 [m]

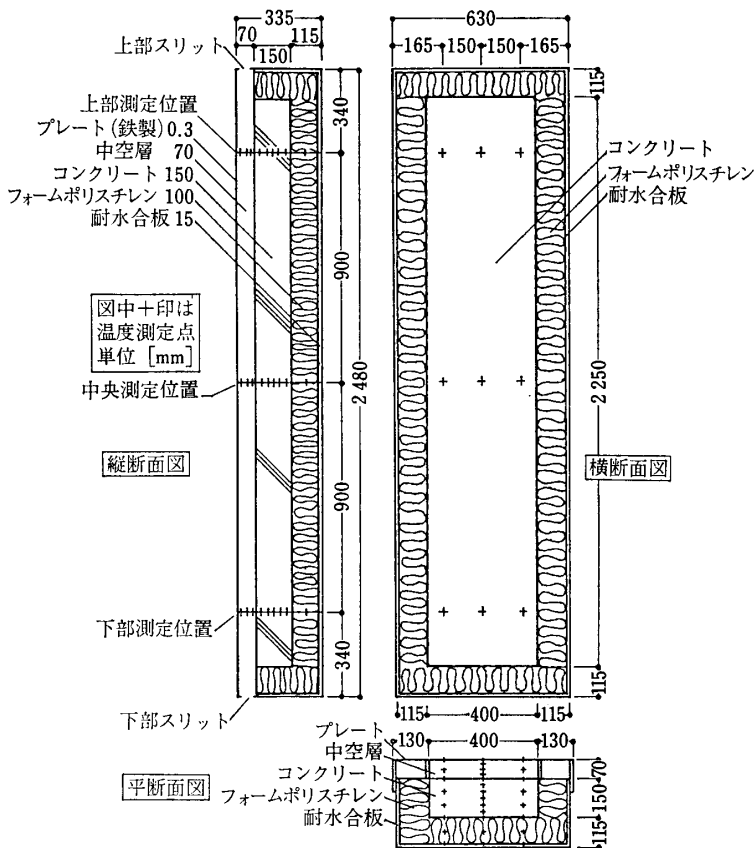


図-2 気象ばく露実験用中空層付き壁体モデル[参考文献3)より抜粋]

熱流, 寸法などについては, 図-1 参照のこと).

Q_1 : 単位水平長さで, 高さ方向の寸法 Δy [m] あたりの日射による外表面仕上げ材(以下, プレートと呼ぶ)への放射流入熱流 [W]

Q_2 : 上記と同一面と外気との対流熱交換に伴う熱流 [W]

Q_3 : 上記と同一面と層内空気との対流熱交換に伴う熱流 [W]

温度変動を抑制するため, 厚さ 150 mm のコンクリート板としている. この実験装置の鉛直方向の断面を 図-2 に示す. 同図外側プレートの材質は薄板鋼板厚さ 0.3 mm である. 中空層の厚さは 70 mm で, 壁本体であるコンクリートは, 高さ 2250 mm × 幅 400 mm × 厚さ 150 mm である. このコンクリート板は中空層側の 1 面を残し, その外面を 100 mm の断熱材で囲み, さらにその周囲を 15 mm の耐水合板で囲ってある. 中空層の上下の

2. 実験装置

解析の対象となる実験装置は, 本研究第3報³⁾で使用したものである. この装置は自然気象下で実験を行うために装置の単純化を図っている. 室内側に相当する面は温度制御を省き断熱面とし, また壁本体の

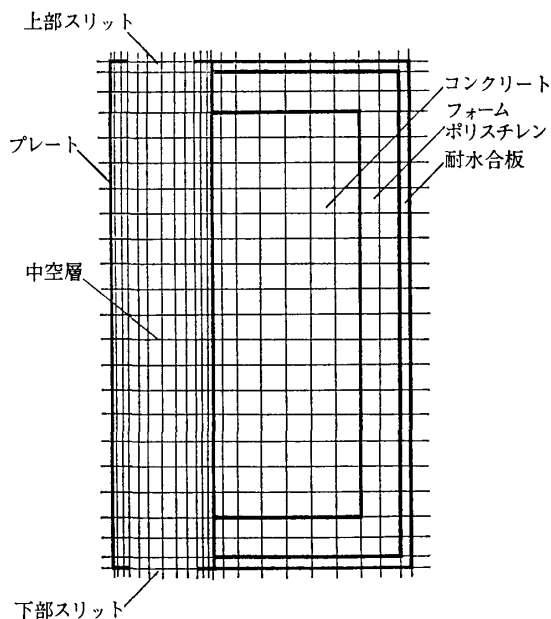


図-3 数値解析用直交格子分割モデル

スリットは開口幅を変化できる構造となっている。温度測定は高さ方向の2等分線と、これより上および下に900mmずつの線上の位置(図中+印)に、銅-コンスタンタン熱電対を設置して6分間隔で24時間測定を行った。以後、これらの測定位置を下から順に下部測定位置、中央測定位置、上部測定位置と呼ぶ。

この装置を豊橋技術科学大学構内の低層実験棟屋上に南面させ、鉛直に設置した。評価を行うデータとして1982年3月中に行った中空層上下開口幅10mmと40mmの測定データのうち、快晴日のものを選択した。

3. 数値解析方法

解析モデルは、上記の実験装置を図-3で示すような直交格子により分割した二次元モデルである。

モデル内の熱挙動計算の基本的な流れを、図-4に示す。固体部分(外側プレートおよびコンクリート、断熱材、耐水合板)の温度変動については、プレートとコンクリート表面間の放射熱交換を考慮しながら、差分法による二次元非定常熱伝導計算を行う。空気温度が1分間は変化しないと仮定し、固体表面と中空層空気との対流熱交換量を算出し、固体内部は5秒間隔の非定常計算を行う。中空層空気部分の気流・熱流計算は接する固体表面温度と外気温を入力として、1分間隔で定常計算を行った。

固体部分の計算のうち、外側プレートについては材厚が0.3mmと小さく、また鉄製で熱伝導率が大きいことから材厚を考慮せず、外気側、中空層側とも単一温度と

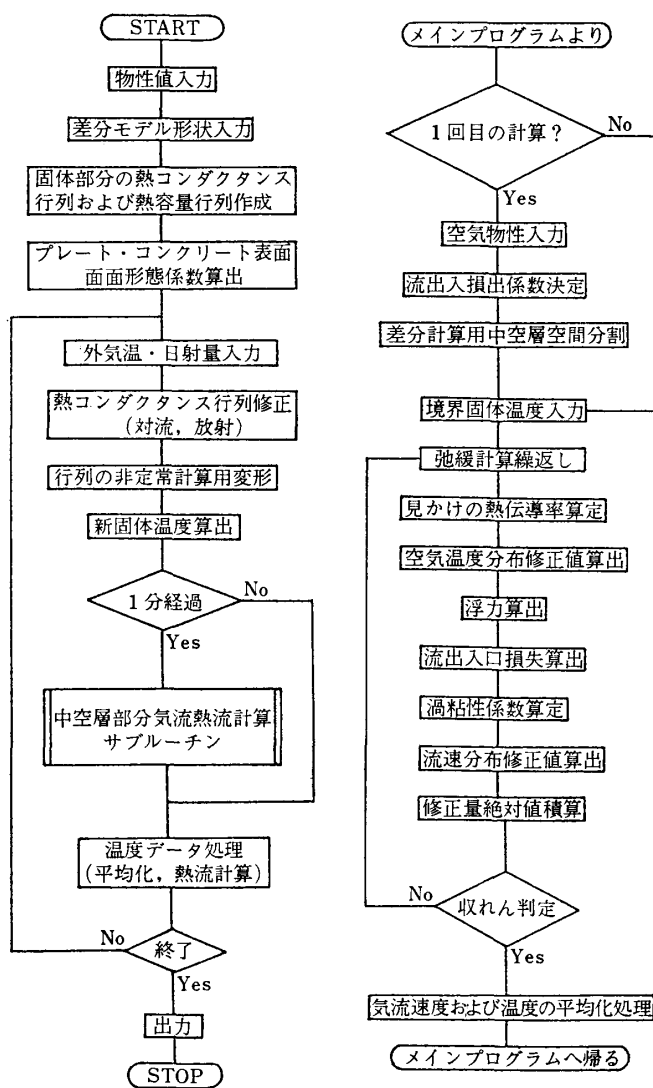


図-4 中空層付き壁体モデル動的熱解析プログラムのフローチャート

し、上下方向のみの伝熱を考慮した計算を行った。中空層を挟んで対向しているプレートとコンクリート表面間の放射熱交換にかかわる形態係数は、高さ方向に分割された各区分ごとに平行平面間の面・面形態係数*を使用している。なお、形態係数算出時の面の水平方向の幅は実験モデルに合わせて400mmとした。プレート上の格子点の熱収支を図-1のように仮定した。同図中の各項は次の式で表す。

$$Q_1 = S r \epsilon_0 \Delta y B$$

$$Q_2 = \alpha_0 (\theta_0 - \theta_{p,j}) \Delta y B$$

$$Q_3 = \frac{\lambda_{ap} (\theta_{ap} - \theta_{p,j}) \Delta y B}{\Delta x_p}$$

$$Q_4 = \frac{\lambda_p (\theta_{p,j+1} - \theta_{p,j}) T_p B}{\Delta y}$$

* 渡辺要：建築計画原論(II)，丸善，pp.25~27

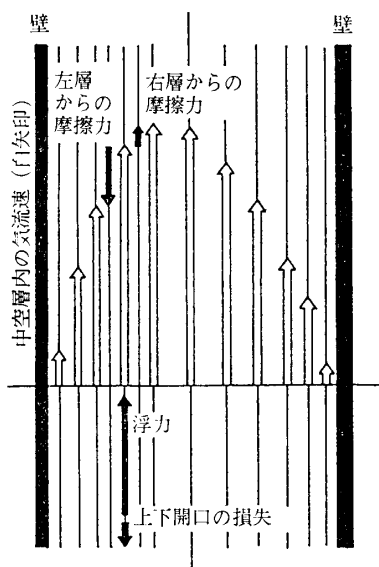


図-5 気流速計算用分割[参考文献2]より抜粋]

$$Q_s = \frac{\lambda_p(\theta_{p,j-1} - \theta_{p,j})T_p B}{\Delta y}$$

$$Q_r = \sum_{i=1}^n C \varepsilon_p \varepsilon_c \left\{ \left(\frac{\theta_{c,i} + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{p,j} + 273.15}{100} \right)^4 \right\} \times \phi_{ij} \Delta y B$$

この外側プレート、コンクリート表面および内部の温度計算点について熱容量の考慮を加え、固体部分の非定常熱伝導計算を差分法により行った。

中空層内気流速は、中空層を気流に沿った(垂直)薄層に分割し、各層ごとに空気の内外部温度差による浮力が、両側面との摩擦損失および流出入口における動圧の損失に一致する条件を弛緩計算により求めた(図-5)。空気温度については気流による熱輸送を含めた定常二次元熱伝導の式により中空層内の温度分布を求めた。気流速の計算アルゴリズムは本研究第2報⁴⁾の方法によったが、変更点として、これまで乱流に伴う空気熱伝導率についての割増しとして渦熱伝導率を使用していたが、計算結果にほとんど影響がなく、より取扱いが簡便である見かけの熱伝導率⁵⁾を使用している。

境界条件としてモデルの左側(プレート)にのみ日射熱入射を考慮し、その一部は外気との対流熱交換により放散する。他の3面(上下面、右面)は放射熱なしで外気との対流熱交換のみを考慮している。二次元に分割した温度の計算点は、固体部分については276点、気流部分は253点であり、一次元流速計算の中空層内分割は13層である。

本数値解析モデルは、実験装置を直接モデル化したものであるが、このモデルの右側面を室内側とし、境界条件に室内側熱伝達率と室内空気温度を入力し、かつ、固体壁部分を解析対象壁構造とすれば、中空層を自然換気

する壁の非定常熱伝導特性の検討に用いることができる。

数値解析に使用したモデル外部の熱伝達率、コンクリートの温度伝導率などは模型実験の長期間の測定値より実験的に定めた値を使用した。垂直平面の強制対流熱伝達率は Jürges の式によると風速 5 m/s のとき 25 W/(m²·K)、風速 15 m/s のとき 50 W/(m²·K) となる⁶⁾。実験値より、外部対流熱伝達率は中空層上下開口幅 10 mm に対しては 35 W/(m²·K)、上下開口幅 40 mm に対しては 45 W/(m²·K) の値を採用した。

比較の対象とする実験結果は本研究第3報のものであり、以下の計算結果はコンクリート内部の温度の初期条件に外気温を入力して計算を始め、13時間後から37時間後までの24時間分の計算結果である。

4. 実験結果と解析結果の比較

ここでは、下部・中央・上部測定位置において、実験と解析の温度・熱流の経時変化の比較を行った。比較を行うデータとして、1982年3月29日(上下開口幅 10 mm)および同年3月10日(上下開口幅 40 mm)の実験結果および同日の気象データ(外気温、日射量)を入力とした解析結果を以下に示す。気象データのうち現場での風速測定は行っておらず、約 1 km 離れた位置において、上下開口幅 10 mm の実験日には昼間 2~5 m/s、夜間 0.5~4 m/s の風速であり、上下開口幅 40 mm の実験日には昼間 5~12 m/s、夜間 4~6 m/s の風速であった。

4.1 固体部分の温度挙動

図-6および7は、それぞれ上下開口幅を 10 mm、40 mm とした場合について、下部、中央、上部位置のプレート、コンクリート表面およびコンクリート表面より 75 mm の点の温度の実験結果と解析結果および入力条件である外気温、日射量を示す。

上下開口幅 10 mm の場合には、プレート温度は日射のない夜間に下部、中央、上部とも解析値は実験値よりやや低くなるが、この差は最大で 2°C であった。日射のある昼間には、上部測定位置では解析値は実験値とよく一致するが、下部および中央測定位置では解析値のほうが実験値より低くなり、この差は最大 4°C であった。上部測定位置でも実験値は午前中急速に上昇して午後には急速に降下するのに対し、解析値はやや遅れを示した。

コンクリート表面温度について、日射のない夜間には下部で 3°C、中央で 2~3°C 程度実験値より解析値が低くなり、上部では実験値と解析値はほぼ一致した。日射のある昼間には、下部で 1~2°C 程度解析値のほうが低くなり、中央ではほぼ一致した。上部において、実験値は正午より温度が降下し始めるのに対して、解析値では 14 時まで温度上昇するため、最大 3°C 解析値が高く

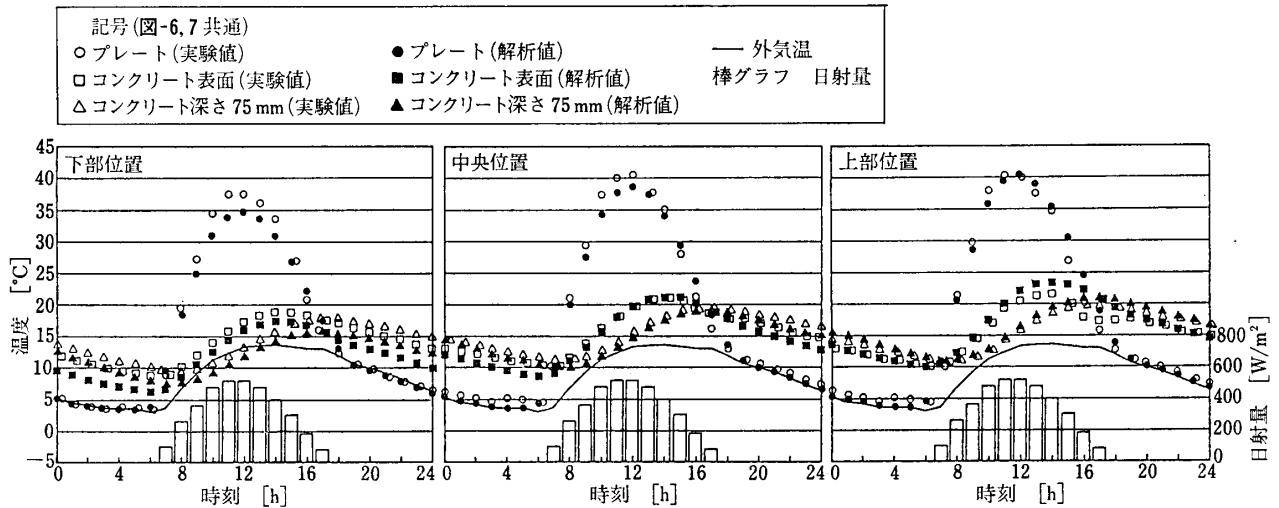


図-6 中空層上下開口幅 10 mm の場合の固体部分の温度変化の比較(1982年3月29日, 24時間平均気温 8.6°C, 日射量合計 3724 W·h/m²)

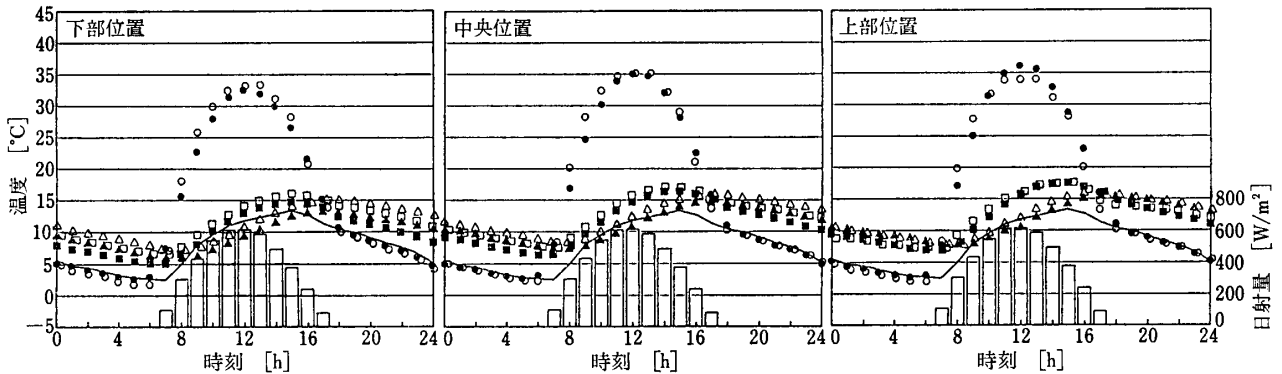


図-7 中空層上下開口幅 40 mm の場合の固体部分の温度変化の比較(1982年3月10日, 24時間平均気温 7.8°C, 日射量合計 4430 W·h/m², 南面)

なった。

コンクリート深さ 75 mm では日射のない夜間、解析値は下部で 2~3°C, 中央で 1~2°C 程度低くなり、上部では良い一致を見せた。日射のある昼間は下部で解析値が 1.5°C 低くなり、中央および上部とも良い一致を見せた。上部における 15 時より 17 時の時間帯で実験値においてコンクリート表面温度の場合と同様に実験値の温度上昇が止まる傾向が現れ、最大 2°C 解析値が高く算出された。

上下開口幅 40 mm の場合には、プレート温度は下部、中央、上部とも夜間には解析値のほうが実験よりやや高くなったが、その差は 1°C 以内であった。正午にはプレート温度の実験値は最も上昇したが、このとき中央測定位置では解析値は実験値と良く一致した。しかし、下部測定位置では解析値のほうが 0.5°C 低く、また上部測定位置では解析値のほうが 3°C 高くなった。

コンクリート表面温度は夜間、下部・中央で解析値のほうが 2°C 低く算出され、上部ではほぼ一致した。昼間

には下部・中央で 1°C 解析値は低くなり、上部においては午前中やや解析値は低くなるが、上下開口幅 10 mm の場合と同様に正午より実験値の温度上昇が弱まるため解析値との差が縮まり、16 時には逆に解析値が高くなったが、全般に良い一致を示した。

コンクリート深さ 75 mm については夜間解析値は下部・中央部で 1~2°C 程度低くなった。上部では良い一致を見せた。昼間は下部、中央、上部とも解析値が 1°C 低くなった。

全般に解析値の固体部分の温度変化は実験値と比較して良い一致を示した。しかし上下開口幅 10 mm, 40 mm とも解析値の場合、昼間には下部、中央、上部となるにつれプレート温度、コンクリート表面温度は明らかに高くなったが、実験値の場合この位置の差による温度差は解析値と比較して小さく、特に中央位置と上部位置では温度差はわずかであった。この原因としては、実験時のプレートと外気との熱伝達率が上下位置により差があり、上部のそれが大であったものと考えられる。また、

表-1 コンクリート深さ 75 mm における 6 時間ごとの温度変動幅の比較 [°C]

開口幅	10 mm						40 mm					
	下部		中央		上部		下部		中央		上部	
位置	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験
時間 [h]												
0~6	-4.5	-3.6	-4.2	-3.1	-4.1	-3.0	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.4
6~12	3.9	3.2	4.4	3.8	4.9	4.2	3.1	2.9	3.2	3.5	2.5	4.0
12~18	3.7	4.5	4.1	3.8	4.3	3.7	3.7	4.3	3.8	3.5	4.7	3.5
18~24	-3.4	-3.0	-3.9	-2.8	-4.2	-2.9	-2.6	-2.5	-2.7	-2.3	-2.5	-2.4

注 気象条件 上下開口幅 10 mm : 1982 年 3 月 29 日, 上下開口幅 40 mm : 1982 年 3 月 10 日, 南面

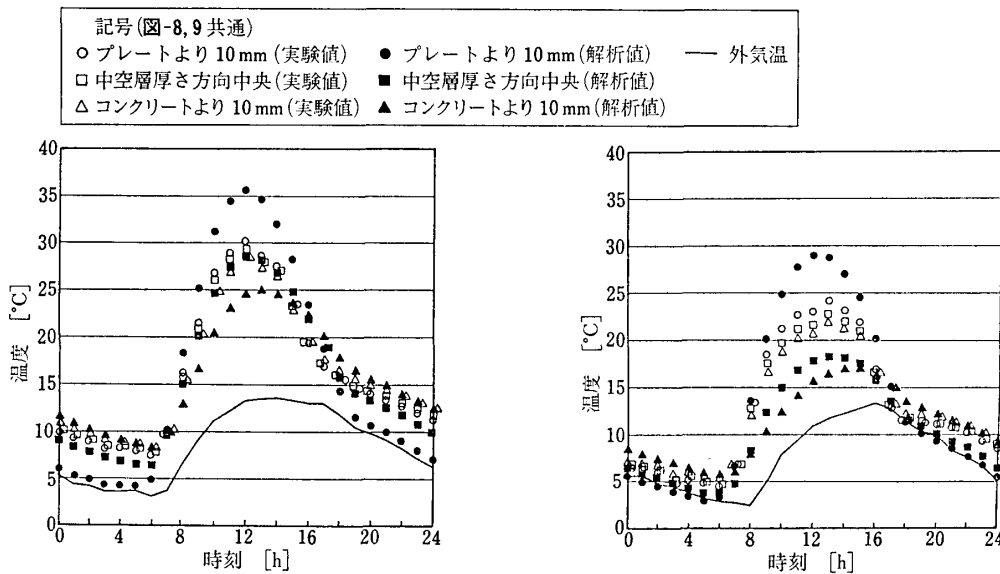


図-8 中空層上下開口幅 10 mm の場合の上部位置 3 点の空気温度変化の比較(1982 年 3 月 29 日, 24 時間平均気温 8.6°C, 日射量合計 3 724 W·h/m², 南面)

図-9 中空層上下開口幅 40 mm の場合の上部位置 3 点の空気温度変化の比較(1982 年 3 月 10 日, 24 時間平均気温 7.8°C, 日射量合計 4 430 W·h/m², 南面)

両開口幅に見られた実験値の上部位置における午後のコンクリート表面温度の低下もこれに関連し, 上部位置におけるプレート温度の低下によるコンクリート表面への放射熱伝達量の減少が主な原因と考えられる。

コンクリート内部の温度の変動よりコンクリート表面から内部への熱の流出入について検討を行った。表-1 はコンクリート深さ 75 mm における 6 時間ごとの温度変動幅の実験結果と解析結果の比較である。

昼間(6~18 時)は熱は流入側となった。6 時から 18 時の温度上昇は上下開口幅 10 mm で 3 測定点の平均では実験値は 7.7°C であったのに対し解析値では 8.4°C となり, 上下開口幅 40 mm では実験値 7.2°C, 解析値は 7.0°C となった。夜間(0~6 時, 18~24 時)は逆に熱は流出側となった。上下開口幅 10 mm の場合の 0 時より 6 時と 18 時より 24 時の温度降下量の和は, 実験値では 6.1°C であったのに対し, 解析値では 8.1°C となった。上下開口幅 40 mm では実験値は 5.0°C, 解析値では 5.3

°C となった。このように上下開口幅 10 mm の場合にやや実験値と解析値では差があった。しかし上下開口幅 10 mm の実験日が上下開口幅 40 mm の実験日より 20 % 程度終日日射量が小さいにもかかわらず, 実験, 解析結果を通じて上下開口幅 10 mm の場合の温度変動幅は大であり, 中空層の上下開口幅が大きい場合にコンクリート内部の温度変動が抑制される傾向はよく現れた。

4.2 上部層内空気温度の変動

中空層中の空気は下部から流入し, 外側プレートおよびコンクリート表面と熱交換を行いながら上昇する。このため, 下部の温度は外気温に近くなり, ここから上部の出口付近までの温度上昇が換気による熱排除効果をよく表す。図-8 および 9 はそれぞれ上下開口幅 10 mm, 40 mm について上部位置における中空層内の 3 点(プレートから 10 mm, 中空層厚さ方向中央, コンクリート表面から 10 mm)の空気温度の解析結果と実験結果の比較である。

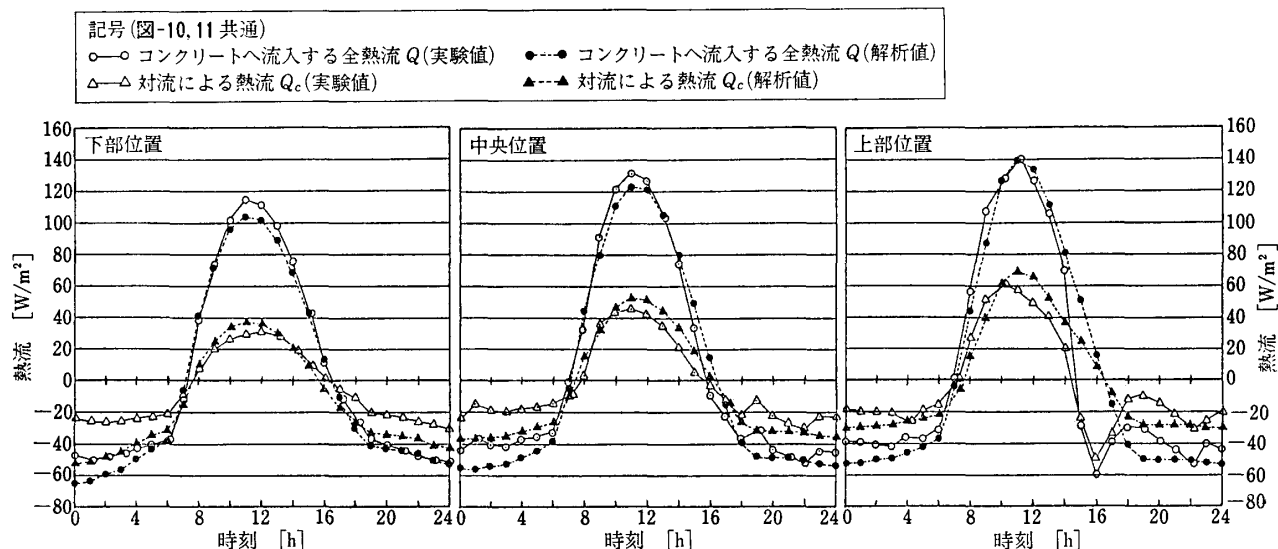


図-10 中空層上下開口幅 10 mm の場合の各部熱流の比較(1982年3月29日, 24時間平均気温 8.6°C, 日射量合計 3724 W·h/m², 南面)

上下開口幅 10 mm の場合, 夜間には実験値は外気温と比較して3点とも 5°C 程度高くなったのに対し, 解析値はコンクリート近傍で 4~5°C, 中空層中央で 2~3°C, プレート近傍では 1°C 高く算出された。また昼間大体正午に空気温度は最高に達した。そのとき, 実験値では外気温と比較してプレート近傍で 17°C, 中央で 16°C, コンクリート近傍で 15°C 高くなったが, 解析値では同じ順に 23°C, 15°C, 11°C 高く算出された。

上下開口幅 40 mm の場合には, 夜間, 実験値は外気温と比較して3点とも 2~4°C 高くなった。解析値もコンクリート近傍で 2~3°C, 中央で 1°C 高く, プレート近傍ではほぼ外気温と一致する結果となった。正午には実験値はプレート近傍で外気温より 11°C, 中央で 10°C, コンクリート近傍で 9.5°C 高くなったのに対し, 解析値ではプレート近傍で 18°C, 中央で 7.5°C, コンクリート近傍で 4°C 高く算出された。

中空層内 3 測定点の平均温度と外気温との差は, 上下開口幅 10 mm の場合 12 時で実験値は外気温に比べ 16°C 高く, 解析値は 16.3°C 高くなった。同じく 24 時では, 実験値は 5.3°C, 解析値は 1.9°C 高くなった。上下開口幅 40 mm の場合には 12 時には実験値は外気温に比べて 10.2°C, 解析値では 9.8°C 高く, 24 時で実験値は 3.7°C, 解析値は 1.9°C 高かった。このように平均としてとらえれば, 空気温度は実験, 解析ともさほど差はない。しかし, 中空層厚さ方向の温度分布を考慮した場合, 明らかに実験値では中空層厚さ方向の位置による空気温度の差が小さく, 解析値は大であった。本研究第 1 報の中空層モデルの片側発熱の場合についての実験結果⁷⁾からは, 今回の実験値よりも中空層厚さ方向におけ

る位置による温度差は大きく, 解析値に近い温度分布形状となっている。本解析の中空層内気流計算法は本研究第 2 報のものを適用した。その計算は中空層モデルの室内実験結果に適合するように定数を定めた。この室内実験時と比較して, ばく露実験時には下部から流入した空気が強い乱れを持っていたこと, 気流温度測定用熱電対により層内気流が室内実験のそれよりも強く乱れていた可能性が考えられる。

4.3 熱流の変化

図-10 および 11 は上下開口幅 10 mm および 40 mm の下部, 中央, 上部での実験, 解析により求められたコンクリート内へ流れ込む全熱流 Q と, そのうち対流により流れ込む熱量 Q_c を比較したものである。全熱流 Q はコンクリート表面から内部へ向かう熱流であり, 実測値の Q の場合コンクリート表面および内部の温度履歴の実測値を用いて計算を行った⁹⁾。また, プレートとコンクリート表面間の放射熱流 Q_r は両面の温度より計算した。 Q と Q_r の差を対流による熱流 Q_c とし, Q と Q_c を同図中に示す。

上下開口幅 10 mm の場合, 日射のない夜間には全熱流 Q は流出熱流となった。実験値では下部, 中央, 上部とも -40 W/m² 前後であったのに対し, 解析値は -40 ~ -60 W/m² 前後とやや大となった。また Q_c も同じく流出側となったが, 実験値が下部, 中央, 上部とも -20 W/m² 前後であったのに対し, 解析値では下部で -30 ~ -50 W/m², 中央で -30 ~ -40 W/m², 上部で -20 ~ -30 W/m² となった。流入熱流が最大となる午前 11 時で実験値と解析値の比較を行うと, 下部での実験値は 116 W/m² に対し解析値は 104 W/m², 中央では同様に

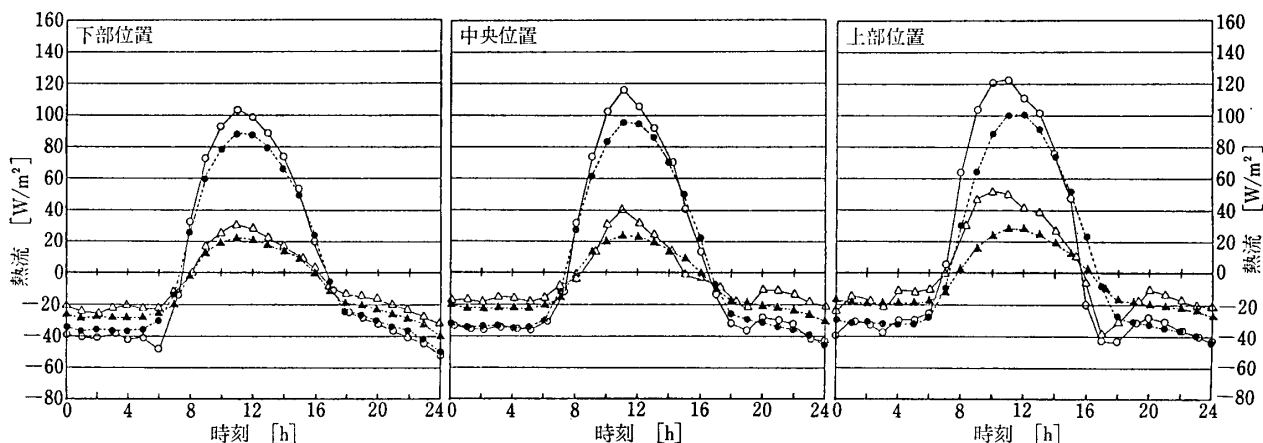


図-11 中空層上下開口幅 40 mm の場合の各部熱流の比較(1982年3月10日, 24時間平均気温 7.8°C, 日射量合計 4 430 W·h/m², 南面)

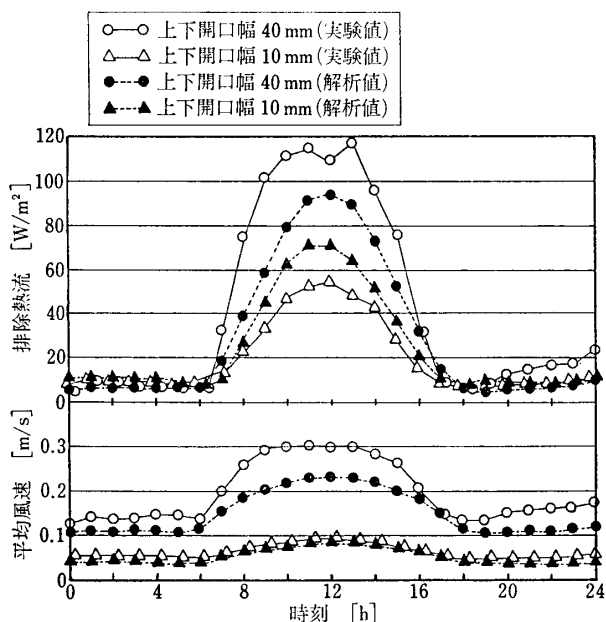


図-12 中空層内平均気流速度および気流による排除熱流の比較(図中, 実験値とは実測値より流速を概算する方法による. 気象条件: 1982年3月29日, 1982年3月10日, 南面)

132 W/m² に対し 123 W/m², 上部では 140 W/m² に対し 139 W/m² と実験値を基準にすれば解析値はやや小さくなったが, その差は最大 11% であった. 対流熱流 Q_c について同様に午前 11 時の値で比較すると, 下部での実験値は 30 W/m² に対し解析値は 38 W/m², 中央では同様に 46 W/m² に対し 52 W/m², 上部では 57 W/m² に対し 69 W/m² と, 13~27% の誤差で解析値がやや大となった.

上下開口幅 40 mm の場合は日射のない夜間には全熱流 Q は下部, 中央, 上部を通じて実験値は $-30 \sim -40$ W/m² であり, 解析値もほぼ同程度となった. 夜間について対流による流入熱流 Q_c は実験値では上部, 中央,

下部を通じておおむね $-20 \sim -30$ W/m² の範囲にあり, 解析値もほぼ一致した. また日射のある昼間で最大熱流となる午前 11 時において実験値と解析値の比較では, 下部において実験値 103 W/m² に対し解析値は 88 W/m², 中央では同様に 117 に対し 95, 上部では 123 に対し 101 とやや解析値は小さな値となり, 最大 18% の誤差であった. 同じく午前 11 時には対流熱流 Q_c は, 下部では実験値は 31 W/m² に対し解析値は 22 W/m², 中央では 41 W/m² に対し 24 W/m², 上部では 50 W/m² に対し 29 W/m² と実験値を基準にすれば 20~40% 程度解析値が小さくなった.

コンクリートの中空層側表面から内部への全熱流 Q の時間的変化の解析値は実験値へ比較的良い一致を示したのに対し, 対流による熱流 Q_c の誤差がやや大となった. これは対流熱流 Q_c は Q と Q_r の差引き計算によって決定されるが, このとき Q_r よりも Q_c が小さいため誤差の影響を大きく受けやすいことが挙げられることと, 屋内実験と屋外実験の際の層内気流の乱れの違いの可能性の二つが原因として考えられる.

5. 気流の速度および外部への排除熱流

図-12 は, 下段に中空層内の平均気流速度の経時変化を示し, 上段に気流による中空層外への排除熱流を示す.

同図中の流速の実験値とは実測時の流速の概算値である. この概算は実測時における層内空気温度と外気温の差による密度差を換気原動力とし, それが開口部における圧力損失および層内空気と中空層内壁との摩擦損失に消費されると仮定して, 中空層内の平均流速を求める方法*により行っている. 外気との密度差を決定すると

* 貝塚・小西: 外断熱通気壁体の熱特性(その2), 日本建築学会関東支部研究報告集(昭和54年度), pp.141~144

表-2 計算による層内流速の経時変化 [m/s]

層番号	プレート 近傍	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	コンクリ ート近傍
層厚 [mm]	1.17	3.50	4.67	5.83	7.00	8.17	9.30	8.17	7.00	5.83	4.67	3.50	1.17
0時	0.000	-0.100	-0.085	-0.056	-0.019	0.012	0.045	0.079	0.112	0.154	0.186	0.158	0.000
2時	0.000	-0.098	-0.083	-0.054	-0.018	0.013	0.045	0.078	0.110	0.151	0.183	0.155	0.000
4時	0.000	-0.093	-0.079	-0.052	-0.017	0.012	0.043	0.074	0.105	0.144	0.174	0.148	0.000
6時	0.000	-0.061	-0.050	-0.032	-0.007	0.015	0.040	0.066	0.092	0.126	0.153	0.131	0.000
8時	0.000	0.200	0.231	0.189	0.137	0.098	0.060	0.026	-0.003	-0.038	-0.064	-0.083	0.000
10時	0.000	0.271	0.311	0.254	0.182	0.128	0.076	0.027	-0.017	-0.069	-0.109	-0.136	0.000
12時	0.000	0.279	0.318	0.259	0.186	0.132	0.079	0.031	-0.012	-0.062	-0.100	-0.126	0.000
14時	0.000	0.241	0.275	0.225	0.163	0.117	0.073	0.035	0.002	-0.035	-0.063	-0.083	0.000
16時	0.000	0.148	0.167	0.140	0.096	0.074	0.044	0.031	0.016	0.024	0.035	0.043	0.000
18時	0.000	-0.049	-0.039	-0.023	-0.001	0.019	0.040	0.065	0.090	0.124	0.151	0.130	0.000
20時	0.000	-0.091	-0.077	-0.050	-0.016	0.012	0.042	0.072	0.102	0.140	0.169	0.144	0.000
22時	0.000	-0.093	-0.078	-0.052	-0.017	0.012	0.042	0.073	0.103	0.142	0.172	0.146	0.000
24時	0.000	-0.096	-0.082	-0.054	-0.018	0.012	0.044	0.076	0.107	0.148	0.179	0.152	0.000

注 上下開口幅 10 mm, 気象条件: 1982年3月29日, 南面

表-3 計算による層内流速の経時変化 [m/s]

層番号	プレート 近傍	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	コンクリ ート近傍
層厚 [mm]	1.17	3.50	4.67	5.83	7.00	8.17	9.30	8.17	7.00	5.83	4.67	3.50	1.17
0時	0.000	-0.013	0.019	0.042	0.070	0.092	0.116	0.140	0.163	0.192	0.207	0.157	0.000
2時	0.000	-0.012	0.020	0.043	0.072	0.094	0.118	0.143	0.167	0.196	0.212	0.161	0.000
4時	0.000	-0.012	0.021	0.045	0.073	0.096	0.121	0.146	0.170	0.200	0.216	0.164	0.000
6時	0.000	0.018	0.047	0.064	0.082	0.098	0.118	0.140	0.161	0.188	0.202	0.154	0.000
8時	0.000	0.265	0.343	0.311	0.262	0.223	0.186	0.153	0.128	0.101	0.082	0.054	0.000
10時	0.000	0.349	0.447	0.401	0.331	0.277	0.224	0.174	0.132	0.083	0.043	-0.005	0.000
12時	0.000	0.367	0.469	0.420	0.347	0.291	0.236	0.186	0.143	0.095	0.058	0.014	0.000
14時	0.000	0.333	0.427	0.385	0.321	0.271	0.222	0.179	0.143	0.104	0.076	0.041	0.000
16時	0.000	0.242	0.315	0.289	0.246	0.212	0.180	0.154	0.134	0.118	0.107	0.081	0.000
18時	0.000	0.039	0.065	0.077	0.091	0.104	0.121	0.140	0.160	0.185	0.197	0.149	0.000
20時	0.000	-0.006	0.024	0.047	0.074	0.095	0.118	0.141	0.164	0.191	0.205	0.156	0.000
22時	0.000	-0.011	0.020	0.044	0.072	0.095	0.119	0.144	0.169	0.198	0.215	0.163	0.000
24時	0.000	-0.013	0.021	0.047	0.078	0.103	0.130	0.158	0.185	0.218	0.238	0.181	0.000

注 上下開口幅 40 mm, 気象条件: 1982年3月10日, 南面

きには中空層内の9点の測定結果を平均した空気温度を使用し、開口部の流出入による動圧損失を決定する際には流入側では外気温、流出側では上部測定位置の3点の平均温度をもって計算を行った。計算の仮定で上下風圧差はないものとし、開口部損失については参考文献9)の式を使用し、層内空気と内壁との摩擦損失については長方形ダクトの低 Re 数の範囲に対する実験式¹⁰⁾を使用した。

気流による排除熱流とは気流および気流による熱移動の方向が鉛直方向であるため、壁の単位面積 1m^2 とは高さ $2.48\text{m} \times$ 幅 0.4m の面積についての熱収支を表す。

5.1 気流速度についての比較

表-2および3は、それぞれ上下開口幅 10 mm および 40 mm の場合についての本解析方法により算出され

た中空層内各層の気流速度の経時変化を示す。昼間はプレート側が高温側となるためプレートに近い部分の流速が大となり、夜間は昼間に蓄熱されたコンクリート側が高温側となるためにコンクリート側の流速が大となる。

表-2の上下開口幅 10 mm の場合、夜間(0~6時, 18~24時)にはプレートに近い部分では負(下向き)の気流と算出された。これは、プレートが外側から冷却され、プレート近傍の層内空気が冷やされるためである。また、昼間(8~14時)には逆にコンクリート表面の温度上昇が外気温の上昇より遅いため、この表面に近い部分に負の流速が生じた。

表-3の上下開口幅 40 mm の場合には、夜間(0~4時, 20~24時)にプレートに接する空気層の気流は下向きに算出された。また、午前10時には、コンクリート

に接する空気の流れが下向きとなった。しかし、負の流速の範囲は上下開口幅 10 mm と比較してかなり限られた範囲であった。上下開口幅 10 mm の場合には、上下開口部が狭いため空気の流出入に伴う圧力損失が大きく、空気の流動が制限されるためにより生じやすいものと思われる。また、上向き流速の最大値は上下開口幅 10 mm, 40 mm の夜間、昼間を通じ高温側の境界面より 10 mm 程度の位置に現れた。

図-12 に示すように、上下開口幅 10 mm の場合の夜間における層内平均流速の実測時の概算値は 0.05 m/s 程度、一方、解析値では 0.04 m/s 程度と算出された。日射のある昼間、ほぼ最大流速となる正午には実測時の概算値では 0.09 m/s、解析値は 0.085 m/s と算出された。

また上下開口幅 40 mm の場合、夜間に実測時の概算値では約 0.15 m/s となり、解析値では約 0.11 m/s となった。昼間には実測時の概算値は最大 0.3 m/s となり、解析値では 0.23 m/s と上下開口幅 10 mm, 40 mm を通じて解析値は実験値の約 80~90% 程度の流速であった。この場合、実験値も推定値であるため、正確な値を断定できないが、おおむねこの範囲の値を示すものと思われる。

5.2 気流の中空層外への排除熱流

上下開口幅 10 mm の場合、12 時の流速の概算値と上部測定位置における 3 点の平均温度と外気温との差の積により算出した排除熱流は 54 W/m² であり、解析は 71 W/m² と大きくなった。夜間は双方とも 10 W/m² と実験による推定値と解析値はほぼ一致した。同図の上下開口幅 40 mm では、昼間において実験より 12 時における排除熱流は 109 W/m² であり、解析は 93 W/m² で昼間では全般に 20~40 W/m² 解析による排除熱量が小さく算出された。この場合、排除熱量は空気流量と空気の流入および流出温度差より求められる空気の容積あたり顕熱の差との積であり、誤差の蓄積により実験値と解析値の差が大となったものと思われる。

6. ま と め

中空層の上下に開口を設けて自然換気を行う外壁の動的熱負荷計算法のために、層内気流計算法を壁の非定常熱伝導計算に組み込んだ解析プログラムを作成した。中空層厚さ 70 mm に対して上下開口幅を 10 mm, 40 mm の 2 種類に変化させ、壁の温度・熱流・気流計算を行い、実験結果と比較した。

固体部分の温度変動および壁体に流出入する熱流を本計算法ではほぼ近似できることがわかった。層内空気温度の計算では最大 7°C 程度の誤差が生じた。層内平均流速について、実測時の気流速の概算値と解析値の比較では 10~20% の差を生じた。この差は気流計算方法にある程度依存しているものと思われ、今後も実験を含めた検証を進めていく必要がある。全般に解析結果は実験結果とおおむね一致を示しており、本解析法を種々の構造の壁、また種々の気象条件下の中空層の自然換気による日射熱排除効果の検討に利用することは可能と思われる。

参 考 文 献

- 1) 本間・溝口：壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果(第1報)中空層中に生ずる気流および熱流についての実測結果, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 30(1986-2), pp. 91~102
- 2) 本間・溝口：壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果(第2報)中空層中に生ずる気流および熱流の計算方法, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 30(1986-2), pp. 103~114
- 3) 角舎・溝口・本間：壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果(第3報)中空層壁体モデルの気象ばく露実験結果, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 34(1987-10), pp. 91~99
- 4) 参考文献2)に同じ. pp. 104~107
- 5) グレーベル, エルク, グリグル(坪内・加藤訳): 熱伝達の基礎, (昭38), p. 307, 朝倉書店
- 6) 渡辺要: 建築計画原論(II), 丸善, pp. 63~66
- 7) 参考文献1)に同じ, pp. 98, 99
- 8) 参考文献3)に同じ, pp. 94, 95
- 9) 日本機械学会: 機械工学便覧(改訂第6版)(8)水力学および流体力学, (昭51), pp. 8~14
- 10) R. B. Dean: Reynolds Number Dependence of Skin Friction and Other Bulk Flow Variables in Two-Dimensional Rectangular Duct Flow, Transaction of ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 100(June 1978), pp. 217~219

(昭和 62. 4. 23 原稿受付)

Natural Ventilation of Wall Air Cavity for Solar Heat Gain Reduction

Part 4—Simulation of Transient Heat Transfer in Cavity Wall including Heat and Mass Transfer in Cavity

by Terunori KADOYA* and Hiroshi HOMMA*

Key Words : Simulation, Heat Transfer, Cavity Wall, Air Velocity, Natural Ventilation, Solar Irradiation, Model Experiment, Cooling Load

Synopsis : Natural ventilation of a wall cavity is expected to be an effective measure to reduce solar heat penetration through a building envelope into the indoor environment. In the present part, a numerical simulation model was composed to discuss the effect of the cavity ventilation on the heat penetration reduction. The performance of the simulation was examined by comparing its results with the experimental results of the weather exposed models of a cavity wall.

The simulation model consisted of the three parts as shown in Figure 3. The first part corresponds to the external cover plate, which receives the solar irradiation, dissipates some of the irradiation to the external air, and transfers the rest of the heat to the air in the cavity and also to the main wall surface. The second part simulates the heat and air mass transfer in the cavity. The third part simulates the transient heat conduction through the main part of the wall. The division pattern of the heat and air flow balance simulation in the cavity wall is shown in Figure 3.

The structure of one of the weather exposed models is shown in Figure 2. The main part of the model is a massive concrete plate. The plate was arranged to direct one of its wide surfaces to the South. This surface was erected vertically to simulate a southern facade of a building. In front of this surface, a thin steel plate coated with dark brown paint was set placing a cavity of a thickness of 70 mm between the surface and the cover plate.

The temperature changes of the cover plate and those in the concrete plate are compared in Figures

6 and 7. The calculated temperatures were slightly lower than the experimental result in the daytime. The maximum difference in them was 4°C. The temperature change in the center of the concrete plate is shown in Table 1. The simulated temperature rise in the daytime (from 6 a.m. to 6 p.m.) was 8.4°C, while the corresponding value of the experimental result was 7.7°C for the model of the slit width of 10 mm. The simulated and experimental temperature rises of the same duration were 7.0 and 7.2°C, respectively, for the model of the slit width of 40 mm. The temperature change in the cavity air is compared in Figures 8 and 9. The difference between the simulated and experimental temperatures of the cavity air was 7°C at the maximum. This difference seemed to be caused mainly by the difference in turbulence intensities of the experimental condition and the simulation condition of the air flow in the cavity. The heat flux absorbed at the concrete surface is compared in Figures 10 and 11. The simulated heat flux appeared to be smaller than the experimental result through out the day. The simulated heat flux was smaller by 11% than the experimental heat flux at 11 a.m., when the heat flux showed its highest value, for the slit width of 10 mm. This difference enlarged to 18% for the slit width of 40 mm.

This simulation method indicated good agreement of temperature change in the concrete plate with the experimental results. This simulation method seemed to be satisfactorily to examine the effect of cavity ventilation on the thermal performance of cavity walls under various climatic conditions.

(Received April 23, 1987)

* Department of Regional Planning, Toyohashi University of Technology, Member