有限要素法によるボイドスラブの非定常伝熱解析

(1)ボイド内部が自然対流の場合について

小原　聡司・赤坂　　裕・黒木荘一郎

(受理　平成元年5月31日)

AN ANALYSIS OF TRANSIENT HEAT CONDUCTION OF VOID SLABS USING FINITE ELEMENT METHOD

(1) ON THE VOID SLABS WITH NATURAL CONVECTIVE VOID AIR

Satoshi OBARA, Hiroshi AKASAKA, and Souichirou KUROKI

ABSTRACT

Void slab is defined as slab which has many parallel air spaces (voids) in it. Usually, the void has a circular or a rectangular cross section in the slab which is, approximately, 40 cm thick. The floor heights of the void slab buildings are less than those of conventional buildings, because they require no beams. Sometimes, the voids are used as duct spaces. Furthermore, the noise insulation effect of the void slab is large. Recently, the advantages of void slabs have been widely recognized. However, their thermal behaviors, as yet, have not been clarified.

In this paper, transient heat flow, surface temperature and void air temperature are calculated using a finite element method combined with a finite difference method. The void surface coefficients are treated as strictly as possible in the calculations : not only the surface convective coefficient α c is treated as a TVP (time variable parameter), which changes with heat flow direction and temperature difference between void air and void surface, but also the surface radiative coefficient α r is dealt with as a TVP and is derived using Gebhart's absorption factor.

The calculated transient heat flux and temperature of void slabs are compared with those of conventional slabs.

1．序

内部に円柱状の中空部を有するボイドスラブ（中空スラブ）は，構造的な利点[1),2)]や高い遮音性能[3)]により，既に集合住宅等のスラブとして広く使用され，最近ではその中空部を空調用ダクトとする利用法も考えられている。しかし，その伝熱性状に関しては，未だ系統的な解析的研究が行われていない。本スラブは多次元熱流・金属部分の熱橋効果・中空部空気層における相互放射及び対流現象等，複雑な伝熱問題を含んでいるが，断面形状が単純なため，いずれもモデル化しやすく，理論解析及び数値解析的な研究に適しているといえる。一方，有限要素法は，建築環境工学分野における地中伝熱・室内空気流動・熱負荷計算等のシミュレーション手法として，近年多くの研究者に利用されている。本方法は他の伝熱解析手法と比べ，①要素分割を三角形で行うため，解析対象をほぼ自由に分割できる，②解析対象内部に性質の異なる材質が混在していても容易に取り扱える，等の利点がある。そこで，本研究ではボイドスラブに対して，有限要素法を基本とする解析手法を適用し，その非定常伝熱解析を行った[4),5)]。解析にあたっては，ボイドスラブにおける中空部空気層の自然対流・相互放射等を厳密に取り扱い，その熱的性状を定量的に表した。また相互放射を考慮しない場合や一般的なコンクリートスラブと伝熱性状の比較も行った。

2．二次元熱伝導方程式に対する有限要素式とその差分化

式(1)は二次元熱伝導方程式を示す[6]。

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\dot{Q} \qquad \cdots\cdots(1)$$

ここで,

ρ：密度 [kg/m^3]　　c：比熱 [kcal/kg・℃]

T：温度 [℃]　　λ：熱伝導率 [kcal/m・h・℃]

$\dot{Q}$：単位面積あたりの発熱率 [kcal/m^2・h]

式(1)に対して，Galerkin 法を適用し，空間的に離散化を行った有限要素式は次式となる。

$$[k]\{\phi\}+[C]\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\}=\{f\} \qquad \cdots\cdots(2)$$

ここで,

[k]：熱伝導マトリックス　{ϕ}：熱流束ベクトル

[C]：熱容量マトリックス　{f}：節点温度ベクトル

式(2)に対し，Crank-Nicolson 形の差分化を行い，時間的な離散化を行った場合の一般式は次式となる。

$$\left(\frac{1}{2}[k]+\frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\phi(t+\Delta t)\}$$

$$=\left(-\frac{1}{2}[k]+\frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\phi(t)\}+\{f\} \qquad \cdots\cdots(3)$$

有限要素法では，解析対象物を図3に示すような三角形要素に分割する。三角形要素はその条件により，表1に示す（Ⅰ）～（Ⅳ）の4種類に分類できる。よって有限要素式である式(2)及びそれを差分化した式(3)は条件（Ⅰ）～（Ⅳ）により，式(4)～(11)となる。

3．中空部空気温度の導出

表1内の条件（Ⅲ）及び（Ⅳ）のように，三角形要素が中空部空気層に面する場合においては，境界面からの伝達熱流により変化する空気温 T_a を求める必要がある。図4に示すような閉じ込められた空間の空気温度を T_a とすると，T_a に関して次式が成り立つ。

$$v\rho c\frac{\partial T_a}{\partial t}=\sum_{j=1}^{n}\alpha_j\frac{l_{j-1}+l_j}{2}(\phi_{sj}-T_a) \qquad \cdots\cdots(12)$$

ここで,

v：閉空間の容積 [m^3]　ϕ_{sj}：節点 j の温度 [℃]

α_j：節点 j の総合熱伝達率 [kcal/m^2・h・℃]

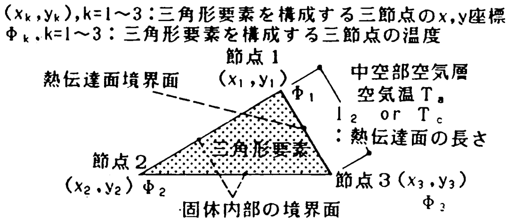


図1　熱伝達面を有する三角形要素

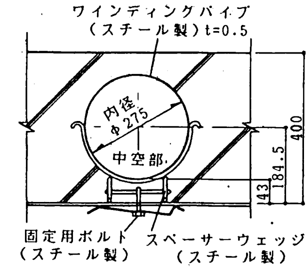


図2　ボイドスラブの断面図
単位 [mm]

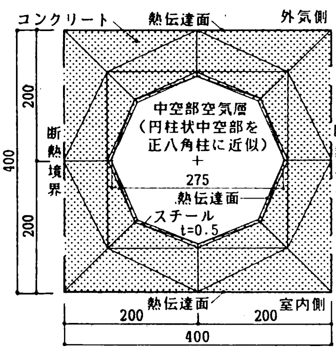


図3　ボイドスラブの形状のモデル化及び有限要素による分割，単位 [mm]

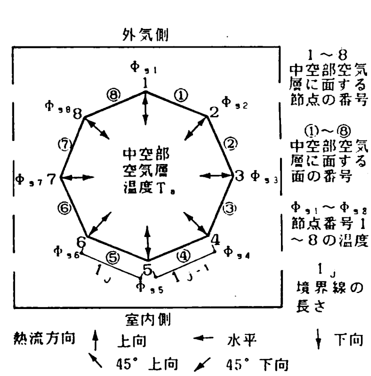


図4　中空部表面における節点・面に対する番号づけ及び各節点の温度・熱流方向の設定

表１　三角形要素の条件による有限要素式とその差分化

三角形要素の条件	有限要素式	Crank-Nicolson形の差分式
(Ⅰ)三角形要素が固体内部にある場合（断熱面を含んでいてもよい）	$[k_1]\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_2\\ \Phi_3\end{pmatrix}+[C]\begin{pmatrix}\delta\Phi_1/\delta t\\ \delta\Phi_2/\delta t\\ \delta\Phi_3/\delta t\end{pmatrix}=0$ ……(4)	$\left(\frac{1}{2}[k_1]+\frac{1}{\tau}[C]\right)\begin{pmatrix}\Phi_1{}^n\\ \Phi_2{}^n\\ \Phi_3{}^n\end{pmatrix}=\left(-\frac{1}{2}[k_1]+\frac{1}{\tau}[C]\right)\begin{pmatrix}\Phi_1{}^{n-1}\\ \Phi_2{}^{n-1}\\ \Phi_3{}^{n-1}\end{pmatrix}$ ……(5)
(Ⅱ)三角形要素の一辺が熱伝達のある境界面である場合	$[k_1]\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_2\\ \Phi_3\end{pmatrix}+[C]\begin{pmatrix}\delta\Phi_1/\delta t\\ \delta\Phi_2/\delta t\\ \delta\Phi_3/\delta t\end{pmatrix}+[k_2]\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_3\end{pmatrix}=\{f_2\}$ ……(6)	$\left\{\frac{1}{2}([k_1]+[k_2]')+\frac{1}{\tau}[C]\right\}\begin{pmatrix}\Phi_1{}^n\\ \Phi_2{}^n\\ \Phi_3{}^n\end{pmatrix}=\left\{-\frac{1}{2}([k_1]+[k_2]')+\frac{1}{\tau}[C]\right\}\begin{pmatrix}\Phi_1{}^{n-1}\\ \Phi_2{}^{n-1}\\ \Phi_3{}^{n-1}\end{pmatrix}+\{f_2\}'$ ……(7)
(Ⅲ)三角形要素の一辺が熱伝達のある境界面で、かつ空気温が境界面から空気への伝達熱量によって変化する場合	$[k_1]\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_2\\ \Phi_3\end{pmatrix}+[C]\begin{pmatrix}\delta\Phi_1/\delta t\\ \delta\Phi_2/\delta t\\ \delta\Phi_3/\delta t\end{pmatrix}+[k_2]\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_3\end{pmatrix}=\{f_3\}$ ……(8)	$\left\{\frac{1}{2}([k_1]+[k_2]')+\frac{1}{\tau}[C]\right\}\begin{pmatrix}\Phi_1{}^n\\ \Phi_2{}^n\\ \Phi_3{}^n\end{pmatrix}=\left\{-\frac{1}{2}([k_1]+[k_2]')+\frac{1}{\tau}[C]\right\}\begin{pmatrix}\Phi_1{}^{n-1}\\ \Phi_2{}^{n-1}\\ \Phi_3{}^{n-1}\end{pmatrix}+\{f_3\}'$ ……(9)
(Ⅳ)三角形要素の一辺が熱伝達のある境界面で，空気温は境界面から空気への伝達熱量によって変化し、境界面上の節点は相互放射の影響を受ける場合	$[k_1]\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_2\\ \Phi_3\end{pmatrix}+[C]\begin{pmatrix}\delta\Phi_1/\delta t\\ \delta\Phi_2/\delta t\\ \delta\Phi_3/\delta t\end{pmatrix}+[k_2]\begin{pmatrix}\Phi_1\\ \Phi_3\end{pmatrix}=\{f_4\}$ ……(10)	$\left\{\frac{1}{2}([k_1]+[k_2]')+\frac{1}{\tau}[C]\right\}\begin{pmatrix}\Phi_1{}^{n-1}\\ \Phi_2{}^{n-1}\\ \Phi_3{}^{n-1}\end{pmatrix}=\left\{-\frac{1}{2}([k_1]+[k_2]')+\frac{1}{\tau}[C]\right\}\begin{pmatrix}\Phi_1{}^n\\ \Phi_2{}^n\\ \Phi_3{}^n\end{pmatrix}+\{f_4\}'$ ……(11)

備考　図１のように三角形要素の一辺$\overline{13}$が熱伝達面であるとき、上記各式内の各項は以下のようになる。

$$[k_1]=\frac{\lambda}{4\triangle}\begin{bmatrix}b_1{}^2+c_1{}^2 & b_1b_2+c_1c_2 & b_1b_3+c_1c_3\\ b_1b_2+c_1c_2 & b_2{}^2+c_2{}^2 & b_2b_3+c_2c_3\\ b_1b_3+c_1c_3 & b_2b_3+c_2c_3 & b_3{}^2+c_3{}^2\end{bmatrix}\quad [k_2]=\frac{\alpha l_2}{6}\begin{bmatrix}2 & 1\\ 1 & 2\end{bmatrix}\quad [k_2]'=\frac{\alpha l_2}{6}\begin{bmatrix}2 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 2\end{bmatrix}\quad [C]=\frac{\triangle\rho c}{12}\begin{bmatrix}2 & 1 & 1\\ 1 & 2 & 1\\ 1 & 1 & 2\end{bmatrix}$$

$$\{f_2\}=\frac{\alpha T_c l_2}{2}\begin{Bmatrix}1\\ 1\end{Bmatrix}\quad \{f_2\}'=\frac{\alpha T_c l_2}{2}\begin{Bmatrix}1\\ 0\\ 1\end{Bmatrix}\qquad \{f_3\}=\frac{\alpha l_2}{2}\cdot\frac{T_a{}^n+T_a{}^{n-1}}{2}\begin{Bmatrix}1\\ 1\end{Bmatrix}\quad \{f_3\}'=\frac{\alpha l_2}{2}\cdot\frac{T_a{}^n+T_a{}^{n-1}}{2}\begin{Bmatrix}1\\ 0\\ 1\end{Bmatrix}$$

$$\{f_4\}=\left\{\frac{\alpha_{ci}l_2}{2}T_a+\frac{\alpha_{ri}l_2}{4}\sum_{j=1}^{n}g_{sij}(\Phi_{si}+\Phi_{si-1})\right\}\begin{Bmatrix}1\\ 1\end{Bmatrix}\quad \{f_4\}'=\left\{\frac{\alpha_{ci}l_2}{2}\cdot\frac{T_a{}^n+T_a{}^{n-1}}{2}+\frac{\alpha_{ri}l_2}{4}\sum_{j=1}^{n}g_{sij}(\Phi_{si}+\Phi_{si-1})\right\}\begin{Bmatrix}1\\ 0\\ 1\end{Bmatrix}.$$

b_k，c_k，$k=1\sim3$は各節点の座標(x_k，y_k)を用いて計算する。

$b_1=y_2-y_3$　$c_1=x_3-x_2$　$b_2=y_3-y_1$　$c_2=x_1-x_3$　$b_3=y_1-y_2$　$c_3=x_2-x_1$

λ：三角形要素の熱伝導率　$\triangle$：三角形要素の面積　α：総合熱伝達率，$\alpha=\alpha_{ci}+\alpha_{ri}$　α_{ci}：対流熱伝達率　α_{ri}：放射熱伝達率

c：三角形要素の比熱　ρ：三角形要素の密度　l_2：三角形要素における熱伝達面の長さ　T_a：中空部空気層の温度

g_{sij}：Gebhartの放射吸収係数　Φ_{si}：中空部空気層に面する第i節点の温度　τ：時間微分項$\varDelta t$

i，j：空気層に面する節点(熱伝達面)の番号，$i=1\sim n$，$j=1\sim n$，n：空気層に面する総節点(熱伝達面)数　T_c：外気側または室内側温度

表2　計算に用いた各材及び空気の熱物性値

材　名	コンクリート	スチール	空　気
比熱 c [kcal/kg・℃]	0.210	0.100	0.240
密度 ρ [kg／m³]	2200	7800	1.200
熱伝導率 λ [kcal/m・h・℃]	0.950	38.00	0.019

表3　計算を行ったスラブの種類とその特徴

スラブの種類	特　徴
A-type	40cm厚ボイドスラブ。相互放射を考慮しない。中空部空気層に面する各節点に対して，総合熱伝達率α（一定値）を設定する。
B-type	40cm厚ボイドスラブ。相互放射を考慮するため，中空部表面各節点に対して，節点温度と中空部空気層の温度差より，放射熱伝達率及び対流熱伝達率を設定する。但し，中空部表面の放射率 ε =0.03。
C-type	40cm厚ボイドスラブ。相互放射を考慮するため，中空部表面各節点に対して，節点温度と中空部空気層の温度差より，放射熱伝達率及び対流熱伝達率を設定する。但し，中空部表面の放射率 ε =0.90。
D-type	40cm厚一般スラブ。中空部分がなく，コンクリートのみからなる。
E-type	20cm厚一般スラブ。D-typeスラブの半分の厚さを有する。

表4　中空部表面の各節点に対する対流熱伝達率（"ASHRAE HANDBOOK 1985 FUNDAMENTALS"における層厚8.89cm，ε =0.03，空気層平均温度10℃の熱伝達抵抗値より換算，単位［kcal/m²・h・℃］）

熱流方向		上向	45° 上向	水平	45° 下向	下向
温度差	5.6	1.76	1.56	1.34	1.04	0.44
[℃]	16.7	2.32	2.15	1.83	1.39	0.51

表5　相互放射を考慮しないボイドスラブ(A-type)の中空部表面各節点に対する総合熱伝達率，単位［kcal/m²・h・℃］

節点の番号		1	2	3	4	5	6	7	8
熱流方向	上向熱流時	5.26	5.13	5.00	5.13	5.26	5.13	5.00	5.13
	下向熱流時	3.57	4.29	5.00	4.29	3.57	4.29	5.00	4.29

l_j：円に近似させた正n角形の一辺の長さ［m］

j：閉空間との境界面上にある節点の番号（j = 1～8）

式(12)に対し，Crank-Nicolson 形の差分化を行うと，式(13)となる。

$$-\sum_{j=1}^{n}\frac{\alpha_j(l_{j-1}+l_j)}{4}\phi_{sj}^{\,n}+\left\{\sum_{j=1}^{n}\frac{\alpha_j(l_{j-1}+l_j)}{4}+\frac{v\rho c}{\Delta t}\right\}T_a^{\,n}$$
$$=\sum_{j=1}^{n}\frac{\alpha_j(l_{j-1}+l_j)}{4}\phi_{sj}^{\,n-1}+\left\{-\sum_{j=1}^{n}\frac{\alpha_j(l_{j-1}+l_j)}{4}+\frac{v\rho c}{\Delta t}\right\}T_a^{\,n-1} \quad \cdots\cdots(13)$$

表6　各面間の形態係数及び異なる放射率 ε における放射吸収係数
（図4における面①からみた場合）

面の番号		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
形態係数		0.0000	0.0686	0.1427	0.1873	0.2028	0.1873	0.1427	0.0686
放射吸収係数	$\varepsilon=0.90$	0.0157	0.0763	0.1408	0.1789	0.1922	0.1789	0.1408	0.0763
	$\varepsilon=0.03$	0.1220	0.1238	0.1255	0.1263	0.1266	0.1263	0.1255	0.1238

表7　各熱流方向における室内外の表面熱伝達率
及び空気の励振温度

熱　流　方　向		上　向	下　向
表面熱伝達率 [kcal/m²·h·℃]	外気側	20.0	20.0
	室内側	10.0	6.0
空気温度 [℃]	外気側	0.0	20.0
	室内側	20.0	0.0

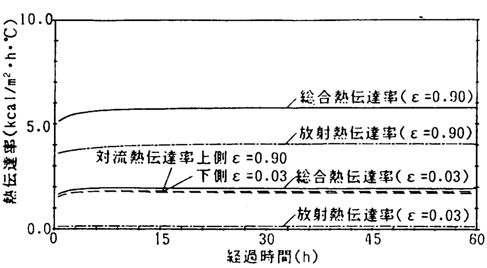


図5　対流，放射及び総合熱伝達率の経時変化

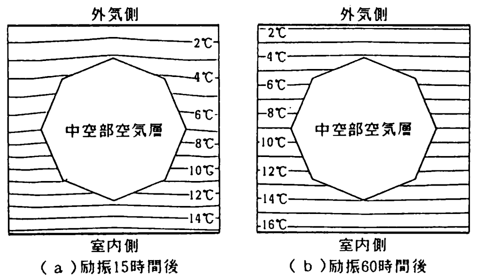


図6　非定常時及び定常時のボイドスラブ内部における温度分布の一例（$\varepsilon=0.90$，上向熱流時）

式(13)より，第 n － 1 ステップ時の閉空間の温度 T_a^{n-1}から，第 n ステップ時における温度 T_a^n を求めることが可能となる。

4．ボイドスラブの形状のモデル化

図2は本研究で解析を行ったボイドスラブの断面を示す。また図3は有限要素に分割した様子を示す。解析対象部材は最上階の天井スラブとし，中空部熱伝達面間の相互放射を考慮するため，円柱状の中空部分は正八角柱（形）に近似させた。スラブ本体は厚さ40cmのコンクリートで構成されており，中空部空気層に面する部分のみ厚さ0.5mmのスチール製である。スラブを構成する各材の熱物性値を表2に示す。なお節点数は28，三角形要素数は40である。

5．計算条件

5．1　計算を行ったスラブの種類とその特徴

本研究では，図3に示したボイドスラブに対して，相互放射による熱的性状の比較用として三種類の条件（A～C-type）を，また中空部の有無による熱的性状の比較用として同厚の一般スラブ（D-type）を設定した。さらにボイドスラブを天井スラブとして用いた場合の断熱性能を比較するため，通常の建物に用いられるスラブとして，20cm厚一般スラブ（E-type）も設定した。各スラブの特徴を表3に示す。

5．2　中空部表面の節点に対する熱伝達率の取扱い

A～C-type のボイドスラブについては，中空部表面各節点における熱伝達率を与えるために，図4に示すような通し番号（節点1～8）をつけた。また，中空部における相互放射を考慮する B-type 及び C-type のボイドスラブについては，中空部表面各節点の熱伝達率を放射熱伝達率 α_r及び対流熱伝達率 α_cに分けて値を求め，時間ステップごとにその値を更新した。以下にその求め方を示す。

(1)放射熱伝達率の求め方

中空部表面の節点 i に対する放射熱伝達率 α_{ri} の値は次式により求めた[7]。

$$\alpha_{ri}=\epsilon\sigma_b(T_1^3+T_1^2T_2+T_1T_2^2+T_2^3)/10^8 \quad \cdots\cdots(14)$$

α_{ri}：中空部表面の節点 i における放射熱伝達率（kcal/m²・h・℃）　ϵ：中空部表面の放射率

σ_b：Stefan-Boltzmann 常数（=4.876）

T_1：節点 i の絶対温度（K）

T_2：中空部空気層の絶対温度（K）

(2)対流熱伝達率の求め方

節点 i に対する対流熱伝達率 α_{ci} については平行二平面間における実験値を用いた。表4は ASHRAE による温度差5.6℃及び16.7℃における対流熱伝達率を示す[8]。本研究では，中空部空気層と中空部表面節点 i 間における任意の温度差に対して，表4に示した各熱流方向時の熱伝達率より直線補間を行い，対流熱伝達率 α_{ci} の値を求めた。

(3)総合熱伝達率の与え方

表3における三種類のボイドスラブのうち，相互放射を考慮しない A-type については，中空部表面節点1～8に対して，表5に示す総合熱伝達率 α_i を与えた。なお，この場合の総合熱伝達率は中空部表面の放射率 $\epsilon=0.90$ に相当する値である[7]。また相互放射の影響を考慮する B 及び C-type については(1)(2)において求めた α_{ri} 及び α_{ci} の値から次式により α_i の値を設定した。

$$\alpha_i=\alpha_{ri}+\alpha_{ci} \quad \cdots\cdots(15)$$

5．3　形態係数並びに放射吸収係数

表3における B 及び C-type については，中空部表面間の相互放射の影響を考慮する。そこで中空部に面する熱伝達面について図4に示すような①～⑧の番号づけを行い，各面間の形態係数並びに放射吸収係数を算出した。表6に各面間の形態係数[9]並びに中空部表面の放射率が0.03（B-type）及び0.90（C-type）の場合における Gebhart の放射吸収係数[10]を示す。

5．4　初期温度並びに熱流方向

表2に示した各スラブの初期温度及び室内外の空気温度は0℃であり，熱流方向による伝熱性状の違いを検討するため，いずれか一方の空気温のみを20℃に励振させた。各熱流方向における室内外の熱伝達面に対する表面熱伝達率及び空気の励振温度を表7に示す。

6．計算結果

(1)中空部表面節点における放射熱伝達率 α_r，対流熱伝達率 α_c 及び総合熱伝達率 α の経時変化

図5は中空部表面節点における α_r，α_c 及び α の経時変化について，中空部表面の放射率 ϵ を0.90及び0.03とした場合の比較の一例を示す。α_c についてみると両 ϵ における値は約1.7kcal/m²・h・℃であり，ほぼ一致している。しかし α_r については放射率の影響が大きく表れており，$\epsilon=0.90$ の α_r は0.03の値の約30倍となっている。その結果，$\epsilon=0.90$ の総合熱伝達率 α は $\epsilon=0.03$ による値の約3倍となっていることがわかる。また，α_c，α_r 及び α は励振3～10時間以降ほぼ一定であることもわかる。

(2)ボイドスラブ内部の温度分布

図6は励振15時間後（図6 (a)）および十分定常に達したと考えられる60時間後（図6 (b)）のボイドスラブC-type内部における等温線を示す。(a) (b) 両図を比較すると，励振15時間後における等温線は，励振60時間後のものに比べ，スラブ上側の等温線間隔がやや広くなっている。また励振15時間後におけるスラブ内の等温線から，中空部空気層付近及び外気側表面付近で温度が上昇する傾向がわかる。さらにスラブ表面についてみると，室内外とも中空部により厚さの薄くなる部分の温度が断熱境界面付近に較べ高いこともわかる。これらはボイドスラブ中央付近の熱容量が小さく，比較的早く定常に達するためである。なお，励振60時間後では各等温線はほぼ平行であり，表面における中央部と端部の温度差はほとんど無くなっている。

(3)相互放射に対する考慮の有無による伝熱性状の比較

図7 (a) (b) (c) は A-type 及び C-type のボイドスラブにおける伝熱性状の比較を示す。A-type のスラブは中空部における相互放射を考慮しないボイドスラブである。また C-type は相互放射を考慮するため，放射率 $\epsilon=0.90$ が与えてある。(a) (c) は上向熱流時における表面節点の平均熱流値または平均温度を，(b) は上向及び下向熱流時における中空部空気層温度の経時変化を示す。表面節点の平均熱流値についてみると（図7 (a) 参照），励振後約45時間で両スラブとも定常に達していることがわかる。両者の経時変化の形状はよく似ており，定常時における熱流値も約1.70kcal/m²・h・℃とほぼ同じ値となっている。図7 (b) 及び (c) についても両者の形状及び定常時の値は非常に接近して

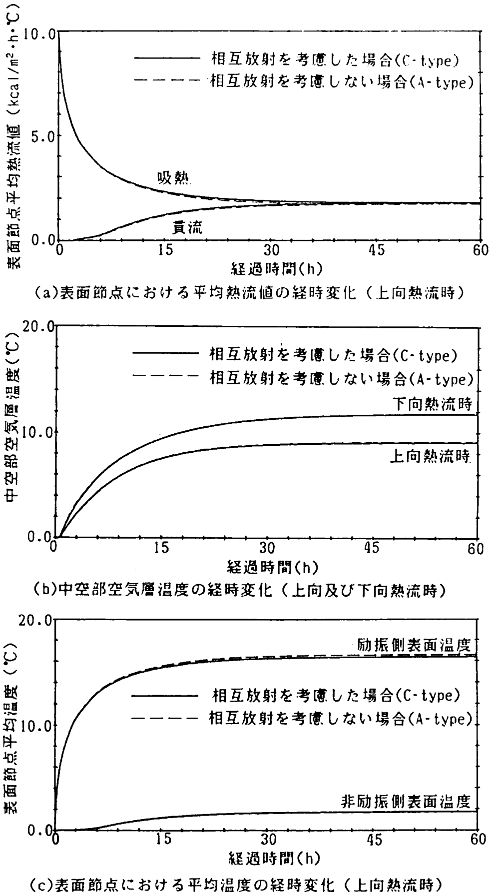


図7　相互放射に対する考慮の有無による伝熱性状の比較

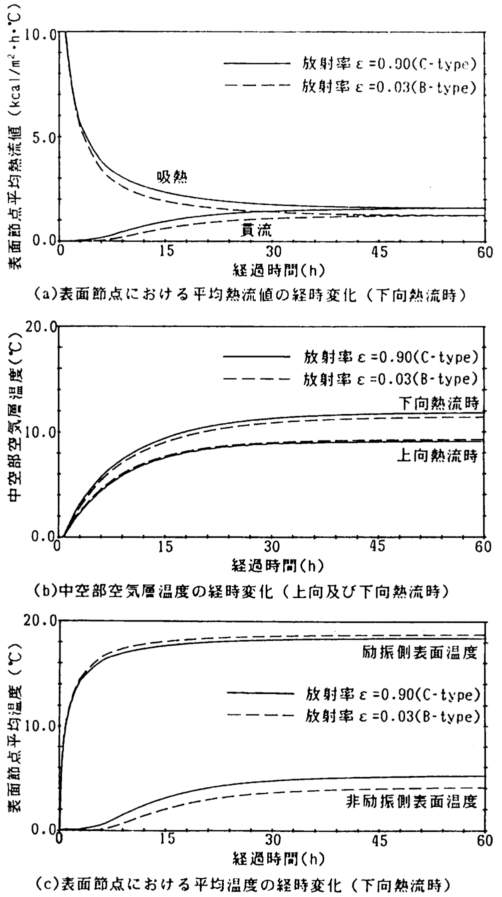
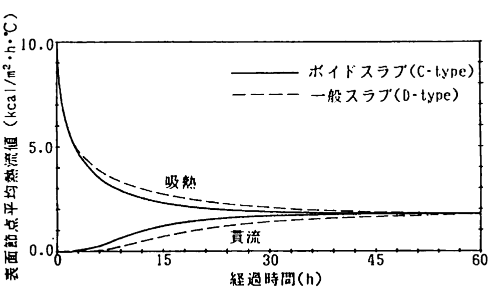


図8　中空部表面における放射率の違いによる伝熱性状の比較

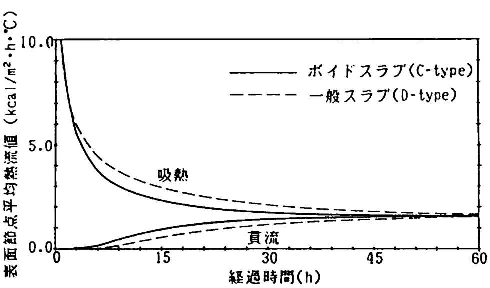
おり，相互放射の考慮の有無に拘らず，両スラブの伝熱性状は非常に類似しているといえる。これは，相互放射を考慮しない A-type のスラブの中空部表面節点に対しても $\varepsilon=0.90$相当の総合熱伝達率を与えたためである。なお，両者の定常時における熱貫流抵抗の比較を表8に示す。

(4)中空部表面における放射率εの違いによる伝熱性状の比較

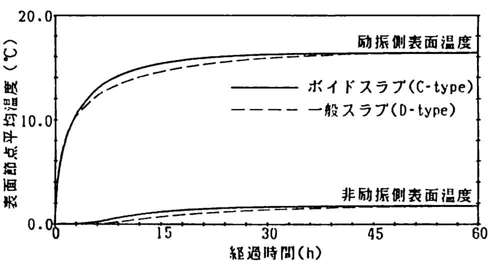
図8 (a) (b) (c) は B-type 及び C-type のボイドスラブにおける伝熱性状の比較を示す。中空部表面の放射率εは，B-type が0.03，C-type は0.90であり，εの違いがボイドスラブの伝熱性状に与える影響を比較することができる。(a) (c) は下向熱流時における表面節点の平均熱流値または平均温度を，(b) は上向及び下向熱流時における中空部空気層温度の経時変化を示す。表面節点の平均熱流値についてみると（図8 (a)参照），$\varepsilon=0.03$である B-type は $\varepsilon=0.90$である C-type に比べ，定常に達する時間がやや遅くなっている（B-type は励振後約60時間，C-type は励振後約50時間）。また B-type では非励振側表面における貫流熱流の立ち上がりが約3時間遅く，その値も全体的に小さくなっている。励振60時間後における両者の熱流値は B-type で約1.24kcal/m²・h・℃，E-type で約1.57kcal/m²・h・℃と，前者は後者に較べ，約21％も低い。これは中空部表面の放射率を小さくしたことにより熱貫流抵抗が増加したためである（表8参照）。表面節点の平均温度についてみると（図8 (c) 参照），励振側表面における両スラブの温度は約18.3℃であり，その差は0.3℃程度であるのに対し，非励振側表面においては B-type が約4.1℃，C-type が約5.2℃と，そ



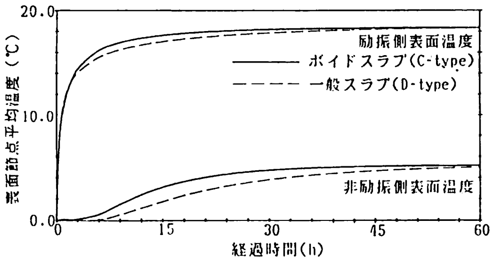
(a)表面節点における平均熱流値の経時変化（上向熱流時）



(b)表面節点における平均熱流値の経時変化（下向熱流時）



(c)表面節点における平均温度の経時変化（上向熱流時）



(d)表面節点における平均温度の経時変化（下向熱流時）

図9　中空部の有無による伝熱性状の比較

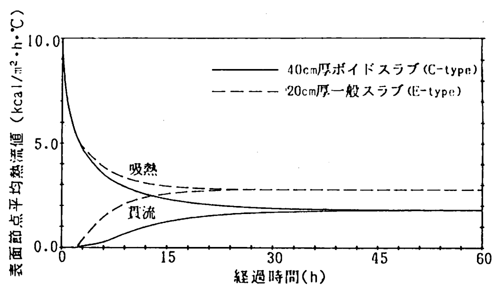
の差が約1.1℃に開いている。これは熱貫流抵抗の増加によって，熱伝達抵抗の大なる表面（室内側表面）の温度上昇が抑えられるためである。中空部空気層の温度についてみると（図8(b)参照）下向熱流時は上向熱流時に対してその温度差が大となっている。これは下向熱流時には，上向熱流時に較べ，中空部表面における対流熱伝達率が小さくなり，放射熱伝達率の影響が表れ易いためである。

(5)中空部空気層の有無による伝熱性状の比較

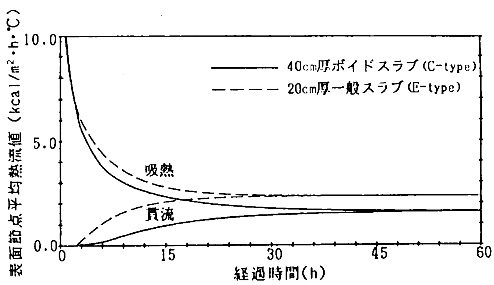
図9(a)(b)(c)(d)はC-typeのボイドスラブ及びD-typeの一般スラブにおける伝熱性状の比較を示す。両スラブは同厚（厚さ40cm）であり，中空部空気層の有無による熱的性状の違いを比較することができる。(a)(b)は上向または下向熱流時における表面節点の平均熱流値を，(c)(d)は上向または下向熱流時における表面節点の平均温度の経時変化を示す。図9(a)(b)についてみると，40cm厚一般スラブであるD-typeに比べ，40cm厚ボイドスラブであるC-typeは，非定常時（励振後約50時間まで）においては吸熱熱流が小，貫流熱流が大となっている。またD-typeに比べ，C-typeは貫流熱流の立ち上がりが約3時間早く，定常状態に達する時間も早い。これらの傾向に熱流方向は関係していない。このような性状を示すのは，中空部を有するボイドスラブの熱容量が，一般スラブに比べて小さいためである。次に定常時における熱貫流率についてみると，C-type，D-typeとも上向熱流時には約1.75kcal/m²・h・℃，下向熱流時には約1.54kcal/m²・h・℃と，上向熱流時のほうが下向熱流時よりも熱流値が大である。表面節点の平均温度についてみると（図9(c)(d)参照），非定常時には熱流方向に関係なくC-typeの両表面温度がD-typeに比べ高くなっている。また非励振側表面の温度上昇の立ち上がりも早い。これは吸熱・貫流熱流の場合と同様，ボイドスラブの熱容量が小であるためである。熱流方向の違いによる表面の温度変化を比較すると，下向熱流時は上向熱流時に比べ，非励振側表面温度の上昇が著しい。たとえば，定常時における両スラブの表面節点の平均温度は，下向熱流時の非励振側表面温度が両スラブ共に約5.10℃であり，上向熱流時の約1.75℃に比べ約3倍も高くなっている。これらは，下向熱流時における室内側表面の表面熱伝達率が，上向熱流時に比べて小さく設定されるため（表7参照），スラブの熱貫流抵抗が大となるからである（表8参照）。以上に述べた各性状の比較より，ボイドスラブは同厚の一般スラブに比べ，非定常時にはその断熱性能がやや劣るものの，時間の経過とともにその差は縮まり，定常時にはほぼ等しい熱貫流抵抗値を有することがわかる。

(6)20cm厚一般スラブと40cm厚ボイドスラブにおける伝熱性状の比較

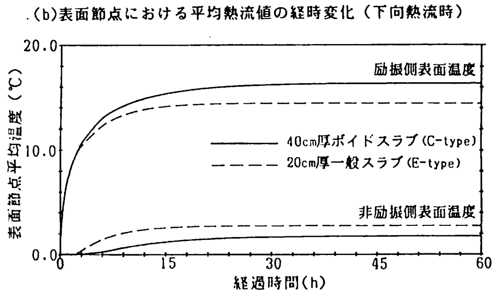
図10(a)(b)(c)(d)はC-typeのボイドスラブ及び



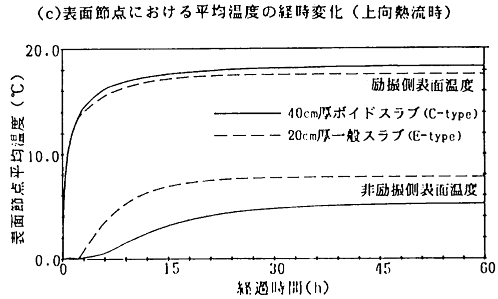
(a)表面節点における平均熱流値の経時変化（上向熱流時）



(b)表面節点における平均熱流値の経時変化（下向熱流時）



(c)表面節点における平均温度の経時変化（上向熱流時）



(d)表面節点における平均温度の経時変化（下向熱流時）

図10　20cm厚一般スラブと40cm厚ボイドスラブにおける伝熱性状の比較

E-typeの一般スラブにおける伝熱性状の比較を示す。E-type の一般スラブは厚さ20cmであり，建物の天井スラブとして C-type のボイドスラブを用いた場合の伝熱性状と比較することができる。(a) (b) は上向または下向熱流時における表面節点の平均熱流値を，(c) (d) は上向または下向熱流時における表面節点の平均温度の経時変化を示す。図10 (a) についてみると，C-type のボイドスラブは，E-type の20cm厚一般スラブに比べ，貫流熱流の立ち上がる時間はほぼ同じ（励振後約２時間）であるものの，その増加する割合が比較的緩やかであることがわかる。また E-type に比べ，C-type は，非定常・定常時を問わず吸熱熱流，貫流熱流共に小であり，定常に達する時間も約20時間遅い（C-type は励振後約50時間，E-type は励振後約30時間）。定常時における熱貫流率は，C-type が約1.79kcal/m²・h・℃，E-type が約2.77kcal/m²・h・℃であり，C-type は E-type に比べ，約35％も低い。このような傾向は下向熱流時においても同様である（図10 (b) 参照）。次に表面節点における平均温度の経時変化についてみると（図10 (c) (d) 参照），両熱流時共に，C-type の20cm厚一般スラブに比べ，励振側表面の平均温度が高いものの，非励振側表面では逆に低くなっていることがわかる。特に下向熱流時においてはこの傾向が顕著であり（図10 (d) 参照），非励振側表面の平均温度は，C-type では5.20℃，E-type では7.80℃と，その差が約2.60℃に開いている。以上の比較から，ボイドスラブは20cm厚一般スラブに比べ，室内外の温度変動に対する熱流応答が小さく，定常に達しにくいといえる。さらに定常時における熱貫流抵抗値について比較すると（表８参照），C-type のボイドスラブは，E-type の一般スラブに比べ，両熱流時共に約50％も熱貫流抵抗値が増加している。これもボイドスラブの熱容量の大きさに起因している。

(5)および(6)の比較により，ボイドスラブは同厚の一般スラブと比較した場合，内部の中空部分によって熱容量が小となり，非定常時においては断熱的にやや劣る反面，通常の建物に使用される20cm厚前後の一般ス

表８　スラブのタイプによる熱貫流抵抗値の比較

スラブのタイプ		A-type	B-type	C-type	D-type	E-type
熱貫流抵抗	上向熱流時	0.59	0.70	0.56	0.57	0.36
[m²・h・℃／kcal]	下向熱流時	0.65	0.81	0.64	0.64	0.43
C-typeとの比較	上向熱流時	1.05	1.25	1	1.02	0.64
	下向熱流時	1.03	1.27	1	1.00	0.67

ラブと比べると，その厚さによる熱容量の大きさが，非定常・定常時を問わず断熱性能の向上に寄与していることがわかる。また(4)において，中空部表面の放射率 ε が0.90である C-type と，0.03である B-type のボイドスラブを比較した結果から，放射率を低くすることによって，さらに熱貫流抵抗を増加させることが可能であることがわかる（表８において，上向熱流時には，E-type の熱貫流抵抗値が約0.36m²・h・℃/kcal であるのに対し，B-type ではほぼ二倍の約0.70m²・h・℃/kcal となっている)。

7．まとめ

本研究ではボイドスラブ内部の中空部表面における放射率 ε を0.90と0.03に設定し，中空部における相互放射の影響を検討した。また相互放射を考慮しないボイドスラブや中空部を持たない同厚の一般スラブ等との伝熱性状の比較も行った。その結果を以下に示す。①放射率 ε が0.90の場合，中空部表面における各面間の相互放射を考慮しない場合とほぼ同じ断熱性能を示す。② ε を0.03に設定すると，$\varepsilon=0.90$ の場合に比べ，ボイドスラブ全体の熱貫流抵抗値が増加し，スラブの断熱性能が向上する。③中空部分のない同厚の一般スラブと比較すると，ボイドスラブは非定常時の断熱性能が劣るものの，定常時にはほぼ同一の熱貫流抵抗値を有する。④通常の建物に使用される20cm厚程度の一般スラブと比較すると，ボイドスラブは室内外の温度変動に対して，非定常時・定常時共に，断熱的に有利である。⑤建物の床スラブとしてボイドスラブを使用し，さらにコーティング処理等により，スラブ内部の中空部表面における放射率をより低くした場合，一般スラブの二倍近くまで熱貫流抵抗値を増加させることが可能である。

本報ではスラブ内部の中空部空気層が自然対流時の場合について解析を行った。今後は，強制対流時，すなわちスラブ内部の中空部分を空調用ダクトとして利用する場合等について検討を行う予定である。

参考文献

1) 入江善久：中空スラブのせん断性状に関する研究（その１）－せん断応力集中についての考察－，日本建築学会論文報告集，No213,昭和48年11月，pp. 21～28
2) 入江善久：中空スラブのせん断性状に関する研究（その２）－抵抗特性についての実験的考察－，日本建築学会論文報告集，No214,昭和48年12月，pp. 35～42
3) 正木正広・白石裕史・相馬正美：21世紀を住みこなす高性能を狙った公団住宅－ボイドスラブの遮音性能－，建築技術，No418，昭和61年６月
4) 小原・赤坂：有限要素法による中空スラブの非定常伝熱解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和61年８月，pp.717～718
5) 小原・赤坂ほか：有限要素法によるボイドスラブの非定常伝熱解析，日本建築学会研究報告九州支部，昭和63年３月，pp.125～128
6) 矢川元基著：流れと熱伝導の有限要素法入門，昭和60年９月，培風館
7) 斉藤平蔵著：建築気候，共立出版，昭和60年５月，pp. 15～18
8) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: ASHRAE HANDBOOK 1985 FUNDAMENTALS, Second Printing 1985, Chapter 23.4～5
9) 山崎均：多角形の形態係数計算プログラム，日本建築学会九州支部研究報告，No26，昭和57年３月，pp. 41～44
10) B. Gebhart:A New Method for Calculating Radiant Exchanges, ASHRAE Trans., Vol. 65, 1959