

Multi-Cavity 型プレストレストコンクリート圧力容器の弾性応力解析

磯 畑 脩 川 股 重 也
(東大生研)
 田 中 伸 幸 塩 屋 繁 松
(日 大)
 秋 山 宏 半 谷 裕 彦
(計算センター) (東大生研)

§ 1. はじめに

高温ガス炉 (HTGR) に用いられるプレストレストコンクリート圧力容器 (PCR) は一般に Multi-Cavity 型と呼ばれるもので、蒸気発生器 (Steam Generator) を格納するための複数の円筒孔 (ボイラー孔) が PCR の厚肉壁内縦方向に設けられている点に特徴がある。

改良型ガス冷却炉 (AGR) の PCR の応力解析においては、多数の貫通孔を有するトップスラブ部をこれと等価な剛性を持つ積層異方性体 (Transversely Isotropic Body) とみなすことによって、全体を軸対称回転体とした有限要素法の解析結果が実験ともよく一致することが判っている。¹⁾²⁾

しかしながら、Multi-Cavity 型の場合はボイラー孔による応力攪乱が著しいため、全体を3次元立体として解析することが要求される。一定ひずみの4面体要素や Isoparametric 要素による有限要素法応力解析例をみると、方程式の元数あるいは数値積分の演算時間の点から、極めて概略的にいうならば、立体応力解析は同等の回転対称体の応力解析に比べて数十倍の計算コストを要するであろう。³⁾

内圧、プレストレス、温度等の軸対称荷重に関する Multi-Cavity 型 PCR の弾性解析は有限要素法によって可能であるが⁴⁾、設計上の現実的な観点からすれば試行的な設計形状が提案されるたびに完全な立体解析を行なうのは不経済である。また、地震荷重のような非軸対称荷重に対する弾性解析や、多くの時間ステップごとの弾性解析を必要とするクリープ解析および弾塑性解析を考えると、計算機の記憶容量、演算時間の点から現実的な意味では不可能に近いといわざるを得ない。

以上のような理由から、Multi-Cavity 型 PCR について設計段階での試計算、設計内容のチェック等を目的とした実用解法の開発が望まれる。本報告では、上述の主旨に沿って提案した“層サブストラクチャー法” (Method of Sliced Substructures)⁵⁾ と称する弾性応力解析に関

する近似解法の概要と、本法に関連して行なった有孔トップスラブの剛性評価、および弾性モデル実験との対応結果について述べる。

§ 2. 層サブストラクチャー法による弾性応力解析法

2.1 基本仮定

ここでは自重、プレストレス、内圧、温度等のようにボイラー孔の間隔を単位として、 θ 方向に周期的な分布をする荷重を対象としている。まず、PCR を水平方向に数層の板に切断し、軸方向の対称条件から2つの対称面ではさまれた楔状の部分を取り出して鉛直面を主断面、各層をリング要素の系と呼ぶ (図-1)。なおトップスラブの有孔部分については、積層異方性の連続体として等価剛性係数を求めておく (§3参照)。

z 軸方向の抵抗と面 rz のせん断抵抗については、回転対称体としての変位モード u, w を仮定して求める。一方、水平面内の抵抗は、各層について平面応力状態を

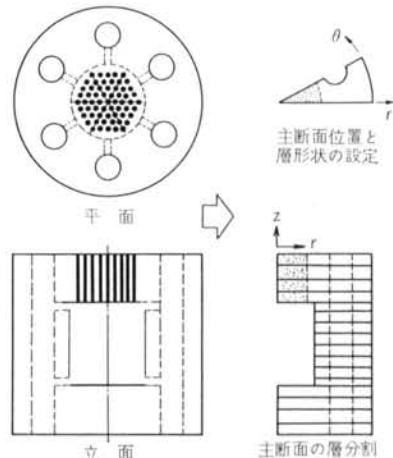


図-1 PCR の解析モデル

仮定すれば、各層について $r\theta$ 面の2次元有限要素を用いて個々に求めることができるから、主断面上の節点変位 u を未知量として表わせる。こうして求められる2つの剛性マトリクスは、主断面上の節点変位 u , w を未知量として合成することができるが、これは軸対称問題として考える場合と同一自由度の構成になっている。

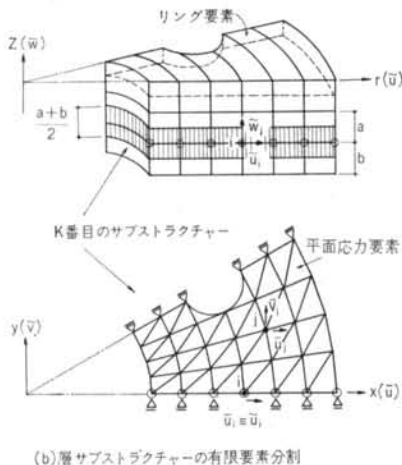
Multi-Cavity 型の PCRV が軸対称荷重を受けた場合の挙動は、全体として平均的に見れば軸対称的な性格が強く、 θ 方向に乱れるのは主として水平断面内の応力 σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$ であり、この乱れの主原因は、円筒壁のリング方向抵抗に円孔の応力集中が影響しているためと考えられる。

本法の基本的発想は、全体としては軸対称問題と同じ変位モードを仮定しながら、水平面内の応力の乱れを層構造ごとに捉えようとしていることにある。

各層の水平変位は上下境界面上で適合条件を満足しておらず、また収束条件も本法については不明であるから解法の妥当性と適用性は、実際の PCRV の数値計算によって検討する必要がある。

2.2 有限要素分割

鉛直面の要素分割は主断面上の節点に対して軸対称回転体の場合と同じ方法で行ない(ただし、各リング要素の弧長はボイラー孔があるため一様ではない)、各節点の変位を \bar{u}_i , \bar{w}_i とおく。水平面の要素分割に当っては、主断面上の上下節点間の中央面を境界面とするような層サブストラクチャーを考える(図-2(a))。各層サブストラクチャーは図-2(b)に示すように水平面内で別個に要素分割し、節点変位の x および y 方向成分をそれぞれ \bar{u}_j , \bar{v}_j で定義する。層サブストラクチャーの主断面上の



(b) 層サブストラクチャーの有限要素分割

図-2 座標系

節点変位成分は、対称条件から $\bar{v}_i=0$, $\bar{u}_i=\bar{u}_i$ でなければならない。

2.3 リング要素系の剛性マトリクス

z 軸方向の垂直抵抗と rz 面のせん断抵抗を有するリング要素系の変位を、リング方向に沿って一様と仮定して、

$$u = u(r, z) \\ w = w(r, z) \dots\dots(1)$$

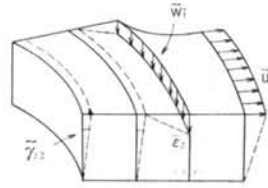


図-3 軸対称変位、ひずみの分布

とおく(図-3)。 r および θ 方向のひずみ成分 ϵ_r , ϵ_θ によって生ずる同方向の応力成分 σ_r , σ_θ は層サブストラクチャー系で考慮するため、要素剛性マトリクス $[\bar{K}_e]$ は次式によって計算できる。

$$[\bar{K}_e] = \int_{vol} [B]^T [\bar{D}_1] [B] dV \dots\dots(2)$$

ここに $[B]$, $[\bar{D}_1]$ はいずれも軸対称問題で使用される要素のひずみマトリクスと有効弾性マトリクスを表わす。

本式は次の2点を除けば、軸対称問題における要素の剛性マトリクスと同じ考えに基づいている。

- i) $r\theta$ 面内抵抗の影響を除くために弾性マトリクスを次のように置く。

$$[\bar{\sigma}] = [\bar{D}_1] [\bar{\epsilon}] \dots\dots(3)$$

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_r \\ \bar{\sigma}_\theta \\ \bar{\sigma}_z \\ \bar{\tau}_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\epsilon}_r \\ \bar{\epsilon}_\theta \\ \bar{\epsilon}_z \\ \bar{\gamma}_{rz} \end{Bmatrix} \dots\dots(4)$$

式(4)は軸対称問題における通常の弾性マトリクス $[D]$ から8個の係数を削除したものである。

- ii) 式(2)の体積積分の範囲は、ボイラー孔にかかるリング要素に対しては開口部分を除いた実体積とする。すなわち開口にかかる要素では、平面における実面積率に比例した剛性低下を見込むことになる。

2.4 層サブストラクチャー系の剛性マトリクス

水平方向に切断した各層は、水平面内抵抗という形で全体構造の局部抵抗を表わす一種の Substructure として考える。各層サブストラクチャー系には、層間の不連続性を認めた上で図-4に示すように2次元の変形の自由度を与えると、各層サブストラクチャーについて次の関係がある。

$$[\bar{K}] \{\bar{d}\} = \{f_s\} \dots\dots(5)$$

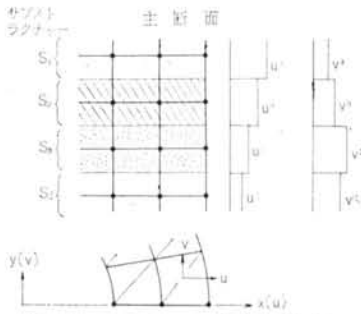


図-4 層サブストラクチャーの変位分布仮定

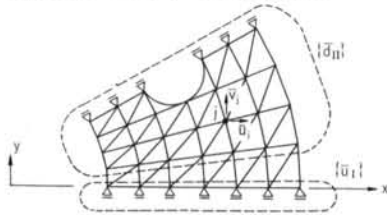


図-5 層サブストラクチャー節点自由度の区分

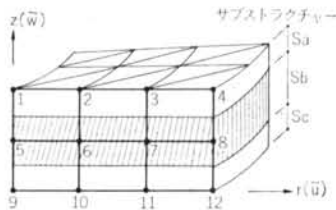


図-6 主断面とサブストラクチャーの分割例

ここに、

$\{\bar{d}\}$: 層サブストラクチャーの x, y 座標系の節点変位

$\{f_s\}$: 層サブストラクチャーに作用する x, y 方向荷重成分

$[\bar{K}]$: 平面応力状態における層サブストラクチャー系の剛性マトリクス

次に層サブストラクチャー系の節点自由度を図-5に示すような2つのグループ、すなわち主断面上的の節点変位 $\{\bar{u}_I\}$ とその他の節点変位 $\{\bar{d}_{II}\}$ に分離し、 $\{\bar{d}_{II}\}$ の自由度を消去するために式(5)を次のように表わす。

$$\begin{bmatrix} \bar{K}_{11} & \bar{K}_{12} \\ \bar{K}_{21} & \bar{K}_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_I \\ \bar{d}_{II} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{sI} \\ f_{sII} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(6)$$

ここに、

\bar{u}_I : 主断面上的の節点の半径方向変位

\bar{d}_{II} : 主断面上にない節点の変位

f_{sI} : 主断面上的の節点に作用する外力

f_{sII} : 主断面上にない節点に作用する外力

式(6)を縮約 (Static Condensation) して $\{\bar{d}_{II}\}$ を消去

すると次式が得られる。

$$[\bar{K}_I] \{\bar{u}_I\} = \{\bar{f}_I\} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、

$$[\bar{K}_I] = [\bar{K}_{11}] - [\bar{K}_{12}] [\bar{K}_{22}]^{-1} [\bar{K}_{21}] \quad \dots\dots(8)$$

$$\{\bar{f}_I\} = \{f_I\} - [\bar{K}_{12}] [\bar{K}_{22}]^{-1} \{f_{II}\} \quad \dots\dots(9)$$

主断面上の変位の自由度を $\bar{u}_i, i=1, 2, 3, \dots, m$ とすれば、 $[\bar{K}_I]$ は $(m \times m)$ のマトリクスとなる。

2.5 最終約合式

層サブストラクチャー系の変位 $\{\bar{u}_I\}$ は主断面の節点変位 $\{\bar{d}\}$ の半径方向成分を表わしているから、 $[\bar{K}_I]$ をリング要素系の剛性に重ね合わせると、主断面上的の節点に関する最終約合式が次のようにして求められる。

$$([\bar{K}] + [\bar{K}_I]) \{\bar{d}\} = \{\bar{f}\} + \{\bar{f}\} \quad \dots\dots(10)$$

ここに、

$\{\bar{d}\}$: 主断面の2次元節点変位

$\{\bar{f}\}$: リング要素の弧面に作用する荷重の z 方向成分

$\{\bar{f}\}$: 層サブストラクチャーの縮約過程に対して処理された $r\theta$ 面荷重成分による式(9)の荷重

$[\bar{K}]$: リング要素系の剛性マトリクス

$[\bar{K}_I]$: 層サブストラクチャー系の剛性マトリクス

式(2)の要素剛性マトリクスから構成される $[\bar{K}]$ は要素分割した主断面の通常の軸対称問題における剛性マトリクスと元数、Band 構成が同じになる。一方、 $[\bar{K}_I]$ は各層サブストラクチャーについて式(8)から得られる縮約した剛性マトリクス $[\bar{K}_I]$ を主対角上に置くことによって構成されている。

$[\bar{K}]$ の構成を図-6に示す要素分割例について示すと次のようになる。まず変位ベクトル $\{\bar{d}\}$ を、

$$\{\bar{d}\} = \{\bar{u}_1 \ \bar{w}_1 \ \bar{u}_2 \ \bar{w}_2 \ \bar{u}_3 \ \dots\dots\} \quad \dots\dots(11)$$

と置けば、マトリクス $[\bar{K}]$ と荷重ベクトルは次式で表わされる。

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} \bar{d}_{1-4} & \bar{d}_{5-8} & \bar{d}_{9-12} \\ \bar{K}^a & & \\ & \bar{K}^b & \\ & & \bar{K}^c \end{bmatrix} \quad \dots\dots(12)$$

ここに,

$$\begin{pmatrix} \bar{u}_1 & \bar{w}_1 & \bar{u}_2 & \bar{w}_2 & \bar{u}_3 & \bar{w}_3 & \bar{u}_4 & \bar{w}_4 \\ * & 0 & * & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & * & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & * & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & * & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(13)$$

* : 非零要素

$$\{f\} = \{0 \ f_{z1} \ | \ 0 \ f_{z2} \ | \ \dots\dots \ | \ 0 \ f_{z12}\} \quad \dots\dots(14)$$

$$\{\bar{f}\} = \{\bar{f}_1^a \ 0 \ | \ \bar{f}_2^a \ 0 \ | \ \bar{f}_3^a \ 0 \ | \ \bar{f}_4^a \ 0 \ | \\ \bar{f}_5^b \ 0 \ | \ \dots\dots \ | \ \bar{f}_8^b \ 0 \ | \ \bar{f}_9^c \ 0 \ | \\ \dots\dots \ | \ \dots\dots \ | \ \bar{f}_{12}^c \ 0 \} \quad \dots\dots(15)$$

主断面の変位 $\{\bar{a}\}$ は式(10)から得られ, $\{a_1\}$ を式(6)に代入すると層サブストラクチャー系の残りの変位 $\{\bar{d}_{11}\}$ が求められる。

要素の応力は, 垂直断面成分 σ_z と τ_{rz} は式(4)から, 水平断面成分 $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ は層サブストラクチャーからそれぞれ求めることができる。

§ 3. トップスラブの有効剛性

3.1 積層異方性

厚さ方向に一定間隔で多数の円孔を有するトップスラブを構造材としてみる場合, その密度と弾性係数は一様ではないため等質弾性体ではない。また, 方向性についても厳密な意味では直交異方性, 積層異方性とはいえない。

しかしながら, 局所的に非等質または不等方性な物質でも全体に対するディメンションが小さいときは, 全体として等質または等方性体として挙動する。

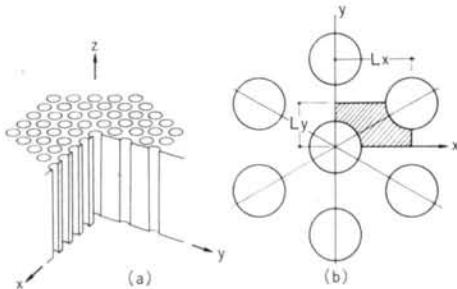


図-7 スタンドパイプゾーンのユニットパターン

図-7に示すような3角形パターンの開口をもつスラブの場合, 構造体の対称性から積層異方性体として次式の応力-ひずみ関係にあるような5個のパラメータを含む弾性マトリクスを誘導することができる。各パラメータはユニットパターン(同図(b)のハッチ部分)の平面ひずみモデルを解析することにより得られる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 & & & & & \\ d_2 \ d_1 & & & & & \\ & d_3 \ d_3 \ d_4 & & & & \\ 0 \ 0 \ 0 \ d_5 & & & & & \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ d_5 & & & & & \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (d_1-d_2)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(16)$$

一方, 等質等方性の場合は2個のパラメータ:

$$d_1^0 = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad d_2^0 = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \dots\dots(17)$$

を用いて次式のように表わせる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1^0 & & & & & \\ d_2^0 \ d_1^0 & & & & & \\ & d_2^0 \ d_2^0 \ d_1^0 & & & & \\ 0 \ 0 \ 0 \ (d_1^0-d_2^0)/2 & & & & & \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (d_1^0-d_2^0)/2 & & & & & \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (d_1^0-d_2^0)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(18)$$

3.2 係数の評価法

(1) d_4 : z軸垂直応力に関する有効係数

σ_z に対する有効係数 d_4 は, 図-7(a)に示すトップスラブのz方向実断面積率 α を用いて近似的に次式で表わせる。

$$d_4 = \alpha d_1^0 \quad \dots\dots(19)$$

ここに, $\alpha = A/A_0$ (A はユニットパターンの表面積, A_0 は A に開口面積を加えた値)

(2) d_1, d_2, d_3 : スラブ面内の有効係数

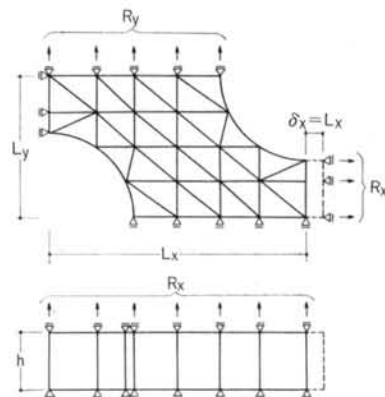


図-8 d_1, d_2, d_3 の係数評価

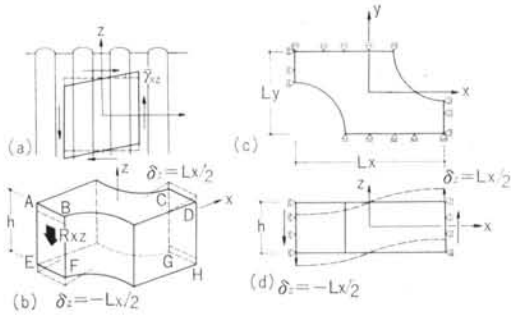


図-9 セン断係数 d_3 の評価

スラブ面内のひずみから求めることができる。式(18)で $\epsilon_x=1$ とおけば、

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(20)$$

次に、図-8に示すように $\delta_x=L_x$ の変位を考えると、有効係数は 3 方向の反力の平均値から、

$$\begin{Bmatrix} d_1 = \bar{\sigma}_x = R_x/L_y h \\ d_2 = \bar{\sigma}_y = R_y/L_x h \\ d_3 = \bar{\sigma}_z = R_z/L_x L_y \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(21)$$

同様に $\epsilon_y=1$ とおけば、

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_2 \\ d_1 \\ d_3 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(22)$$

相反定理から式(22)を用いても式(21)と同じ結果になる。

(3) d_3 : 垂直せん断係数

図-9(a)に示すような半無限有効体における一様せん断ひずみ $\bar{\epsilon}_{xz}$ は、(b),(c)のユニットの両端に $\delta_x = \pm L_x/2$ の変位を与えることによって得られる。平均せん断応力 $\bar{\tau}_{xz}$ とその存在する両端面の鉛直方向合力 R_{xz} の関係から、

$$\bar{\tau}_{xz} = \frac{R_{xz}}{L_y h} = d_3 \quad \dots\dots(23)$$

この係数を求めるには、3次元立体解析を次の条件下で行う必要がある。すなわち z 軸方向に一様ひずみ状態を仮定したから、立体要素の節点変位は、

$$u = u(x, y), v = v(x, y), w = w(x, y) \quad \dots\dots(24)$$

とおけるため、剛性マトリクスを 2次元問題として扱うことができる。

3.3 評価例

スタンドパイプが、 $L_x=83\text{cm}$, $L_y=48\text{cm}$, D (パイプ直径) $=60\text{cm}$ の 3 角形パターンで配置されている場合を考える。

コンクリートの弾性係数を、

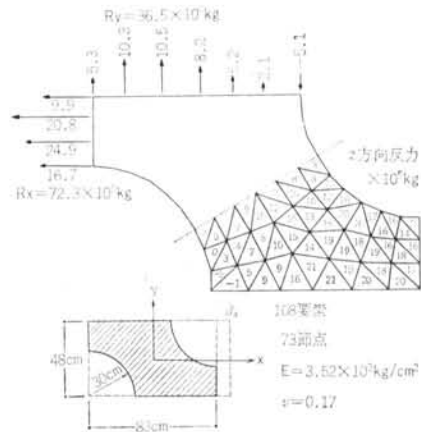


図-10 d_1, d_2, d_3 の計算例 (平面ひずみ)

20節点Isoparametric要素分割と τ_{xz} と τ_{yz} 合力の分布 (単位: 平均応力 $\bar{\tau}_{xz}$)

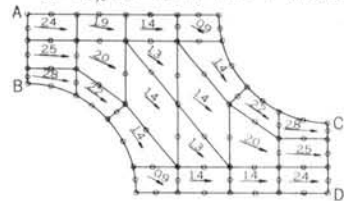


図-11 セン断係数 d_5 の計算例

$E=3.52 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, $\nu=0.17$

とおく。 z 方向実断積率 α は、

$$\alpha = A/A_0 = A/L_x L_y = 0.645$$

であるから、これを式(9)に代入すると、

$$d_4 = \alpha d_1^0 = 0.645 \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = 0.645 d_1^0$$

d_1, d_2, d_3 は図-10の(a)に示すような有限要素モデルを平面ひずみで解析する。 $\delta_x=L_x$ の強制変位による反力は図-10の(b)のようになる。垂直反力 R_z は各要素について、

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \dots\dots(25)$$

から算出した σ_z から得られる。計算結果を示すと、

$$d_1 = \frac{7.23 \times 10^6 \text{kg}}{48\text{cm} \times 1\text{cm}} = 1.50 \times 10^5 \text{kg/cm}^2 = 0.396 d_1^0$$

$$d_2 = \frac{3.65 \times 10^6 \text{kg}}{48 \text{cm} \times 1 \text{cm}} = 0.440 \times 10^6 \text{kg/cm}^2 = 0.568 d_2^0$$

$$d_3 = \frac{131.2 \times 10^6 \text{kg}}{48 \text{cm} \times 83 \text{cm}} = 0.329 \times 10^6 \text{kg/cm}^2 = 0.425 d_2^0$$

したがって、 xy 面の等価なヤング率 E_1 とポアソン比 ν_1 は式(17)を用いて、

$$E_1 = 0.37E, \quad \nu_1 = 1.34\nu$$

と考えることができる。

せん断係数 d_5 の解析には20節点の Isoparametric 要素を使用した。解析モデルの両面に $\delta_x = \pm 1/2 \text{cm}$ の強制変位を与えたときの計算結果を図-11に示す。節点反力の合力 \bar{R}_{xx} の数値を式(23)に代入すると、

$$d_5 = \frac{\bar{R}_{xx} L_x}{L_y h} = \frac{22.63 \times 10^6 \text{kg/cm} \times 83.0 \text{cm}}{48 \text{cm} \times 564 \text{cm}} = 0.0694 \times 10^6 \text{kg/cm}^2 = 0.461 G$$

ここに、 G は無孔体のせん断弾性係数で、

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = (d_1^0 - d_2^0)/2 \quad \dots\dots(24)$$

トップスラブを積層異方性体とみなした場合の諸弾性係数は、このような方法で決定することができるが、さらにこれらの計算結果によって孔廻りの応力分布や応力集中を評価できる。また、本計算ではライナや開口補強筋の効果も計算に考慮することができる。

§ 4. 層サブストラクチャー法の適用例

4.1 壁体に開口のない厚肉円筒

図-12(a)に示すような軸対称厚肉円筒に局部内圧が作用する場合について、軸対称回転体に関する通常の有限要素法計算と、層サブストラクチャー法による計算を行なった。主断面の有限要素分割は両ケースに対して同一とし、後者の計算では水平断面上 30° の扇形サブストラクチャーを考えた。図-12(b)に主断面の変形と応力分布を比較したが、ほぼ一致した結果が得られた。計算時間の比較を表-1に示す。

4.2 壁体に縦開口を有する厚肉円筒

4.1の解析モデルで、ボイラー孔がある場合を計算した。本例は円筒壁体内に円周上6個の円孔があるため回転体としての解析はできない。層サブストラクチャー法解析との比較のために、20節点の Isoparametric 要素による立体解析を行なった。両ケースの解析モデルおよび計算結果を図-13に示した。

本例によっても、変形状と主要断面の応力性状につ

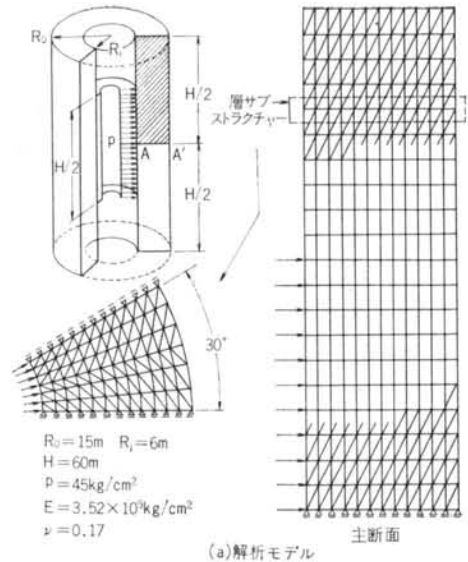


図-12(a) 厚肉円筒の解析例

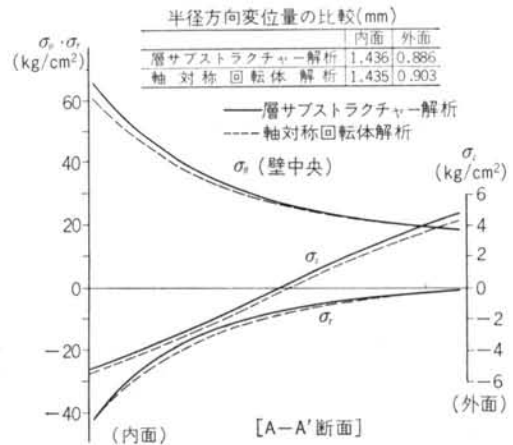


図-12(b) 断面応力分布

いて層サブストラクチャー法と Isoparametric 要素による3次元解析のよい一致が認められる。若干性状の異なる点としては、荷重の急激に変化する部分と縦方向の変形があげられるが、原因として層サブストラクチャー法では、上下各層間の適合条件が主断面位置を除いて厳密には満足されていないことにあると考えられる。

計算時間は表-2に示すように約1/4に短縮されており、同法の目的を達成することができた。なおその後の実用規模(1391節点数)の解析例の比較では、1/8に短縮されているところから、大規模な問題への実用性が期待できよう。

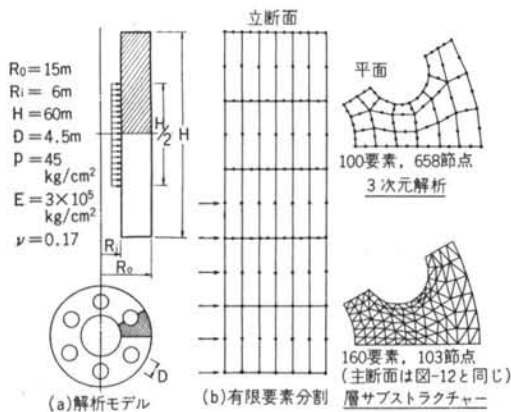


図-13(a), (b) 壁内開口のある厚肉円筒の解析例

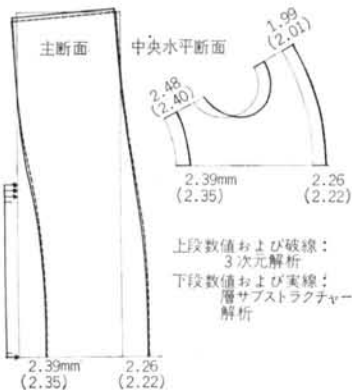


図-13(c) 変形モードと半径方向変位量の比較

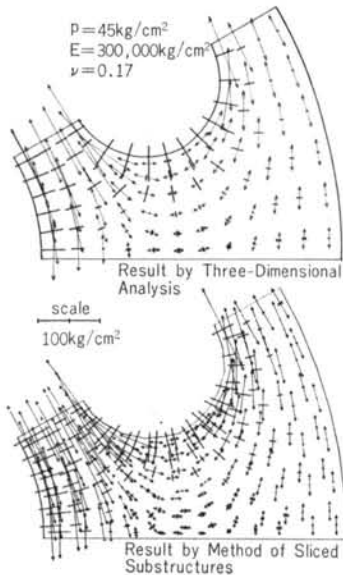


図-13(d) 中央水平断面の主応力分布

	軸対称計算	層サブストラクチャー計算
データ入力と剛性行列作成	3.3秒	38.4秒*
全体剛性の逆行列計算	2.3	4.0
逆進過程と結果の打出し	1.5	4.6
トータル	7.1秒	47.0秒

計算機: IBM 360/195

* サブストラクチャー剛性の逆行列計算24秒を含む

表-1 計算時間の比較 (開口のない厚肉円筒の場合)

	層サブストラクチャー計算	3次元計算
データ入力と剛性行列作成	57.4秒*	134.2秒
全体剛性の逆行列計算	4.0	111.3
逆進過程と結果の打出し	9.0	25.1
トータル	70.4秒	270.6秒

計算機: IBM 360/195

* サブストラクチャー剛性の逆行列計算39.0秒を含む

表-2 計算時間の比較 (開口のある厚肉円筒の場合)

4.3 ゴム弾性モデル試験との比較

§ 3. に述べたトップスラブの有効剛性評価法を検討する目的の1つとして、ゴム弾性モデルによる有孔厚肉円筒の内圧による曲げ試験を行なった。試験体はGA社設計のHTGR用PCRVRのトップスラブを対象とした1/25縮尺のモデルである。材料は試験体製作と加圧装置設計の難易さを考慮して、表-3に示すような性質を有するポリエステル系のポリウレタンエラストマーを使用した。

商品名	横浜ゴムハマコーランHK-2090
比重	1.11
引張強度	350kg/cm²
伸び	450%
100%モデュラス	90kg/cm²
*ポアソン比	約0.47

* 別途試験による

表-3 ゴムモデル材料の性質

図-14に表面変位の実験および計算結果の比較を示したが、積層異方性としての評価法が変形モードの対応結果から有効であることがわかった。

図-15は壁体に6個の開口を有する厚肉円筒が部分的に内圧を受ける場合について、実験値と層サブストラクチャー法による計算結果を比較したものである。本例に

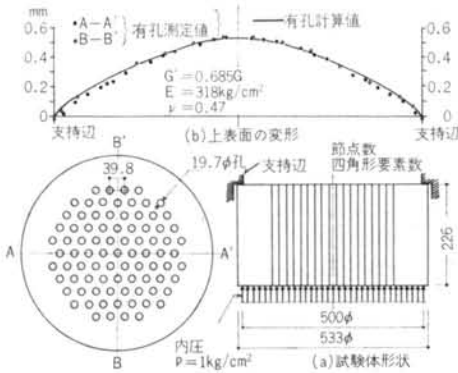


図-14 有孔厚肉円板ゴム弾性モデル

よっても、層サブストラクチャー解析の有効性が実証された。

§ 5. 結 論

本報告では Multi-Cavity 型 PCRV を対象とした弾性応力解析の近似解法について述べた。また、スタンドパイプを有するトップスラブゾーンを積層異方性体とみなした場合の弾性係数は、開口部のユニットモデルについて有限要素解析を行えば求められ、同時に開口部廻りの応力集中についても評価できることを示した。

ここに提案した“層サブストラクチャー法”を用いれば、軸対称問題と同程度の自由度で PCRV の 3次元問題の計算が可能であり、ボイラー孔等の開口による応力

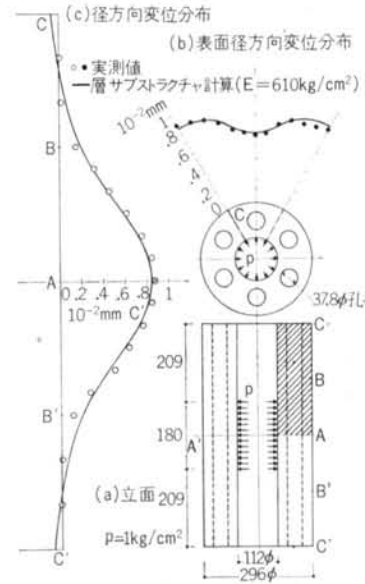


図-15 有孔厚肉円筒ゴム弾性モデル

の乱れを知ることができる。

本法による計算時間は、例題にも示したように 3次元の Isoparametric 要素による場合と比較して大幅に節約できることがわかった。なお、今回の層サブストラクチャー解析ではサブストラクチャーの剛性の縮約過程での逆行行列計算に時間を費したため、2次元 Isoparametric 要素を用いれば演算時間をさらに短縮することは可能である。

<参考文献>

- 1) 田中伸幸, 坪井善勝, 川股重也: “Finite Element Method による連続体の解析——(その6)開口行列をもつ回転体の有効剛性” 日本建築学会大会梗概集, 1967年10月
- 2) 電源開発 KK, 清水建設 KK: “プレストレストコンクリート原子炉圧力容器(PCPV)に関する研究報告——1/10縮尺模型による実験および解析研究——” 1973年3月
- 3) O. C. Zienkiewicz: “The Finite Element Method in Engineering Science” McGraw-Hill, 1971
- 4) 川股研究室: “PCPV の応用解析——アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法” 1971
- 5) S. Kawamata: “Analysis of Podded Boiler Type with Reference to the Analysis of Revolution” Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, Bergamo, Italy, May 1974