

プレストレストコンクリート原子炉压力容器(PCR)構造物に関する研究

—II-6 コンクリート多孔板の有効弾性定数 (その2)—

PCR 研究グループ

Study on Prestressed Concrete Reactor Vessel (PCR) Structures

—II-6 Effective Elastic Constants for Perforated Concrete Plates (Part 2)—

PCR Research Group

Abstract

Effective elastic constants for perforated concrete plates with triangular penetration patterns such as top head slabs of prestressed concrete reactor vessels are obtained by an evaluation procedure based on treating the perforated material as an equivalent solid material with anisotropic elastic constants. And a formulation of relationship between the effective elastic constants and the arbitrary elastic constants of the material with as well as without stiffness effects of steel liners in circular holes are derived from theoretical analyses of the perforated plates.

The applicabilities of the proposed values to the plates under several load conditions are examined by examples. Consequently, it is ascertained that the calculated results may be reliable for design analysis of the perforated plates.

概 要

前回提案の等方性としての有効弾性定数についての考え方を更に発展させ、プレストレストコンクリート原子炉压力容器のトップヘッドスラブのような三角形パターンのコンクリート多孔板と等価な剛性を持つ無孔板が直交異方性材から成るものとして、その等価無孔板の弾性定数(有効弾性定数)を求めた。そして、多孔板単位要素についての理論解析から、円孔部に内張りされた鋼材の剛性効果を考えない場合だけでなく考えた場合に対しても適用できる有効弾性定数と材料の弾性定数との間の関係を誘導した。

今回提案する有効弾性定数を幾つかの荷重条件の多孔板の解析に用い、その適用性を検討した。その結果、提案する有効弾性定数は特定の荷重条件の多孔板だけでなく、種々の荷重条件の多孔板の解析にも適用できることが認められ、多孔板の設計解析面では十分な近似精度を持った解が得られることが認められた。

1. 序

ここで述べる有効弾性定数は、PCRトップヘッドスラブのように数多くの円形のペネトレーションが三角形パターンで規則的に設けられたコンクリート多孔板と等価な剛性を持つ無孔板の弾性定数を表わすものである。

そして前回の報告¹⁾で、図1に示す三角形パターンの多孔板を対象とした場合、その有効弾性定数は単位境界荷重を受ける多孔板の正六角形単位要素の境界上の変位と材料定数とから決定されることを示した。それでは、多孔板の有効弾性定数を近似的に x , y , z 3方向共等方性であると仮定し、有効ヤング係数 E^* , 有効ポアソ

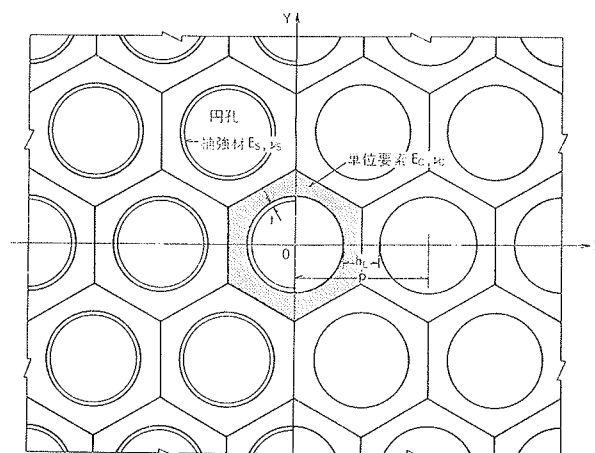


図-1 三角形パターンの多孔板

比 ν^* を求めた。その結果、得られた定数は、圧力のような一様な等分布荷重を受ける薄肉多孔板の問題とか、軸対称面内荷重を受ける多孔板の平面問題には十分な適用性を持つことが認められたが、一方向に一様な面内荷重を受ける多孔板の問題に適用した場合には、計算結果の近似精度が低下することも認められた。

有効弾性定数を等方性と仮定すれば等価無孔板としての解析が簡略化される利点があるが、その反面、適用範囲が制約される欠点もある。

この報告は、各種荷重に対する多孔板単位要素の応力・変形状を詳細に検討し、上記の欠点を修正すると共に、より一般性を持った有効弾性定数について述べたものである。加えて、円孔部ライニング材の補剛効果を考慮した有効弾性定数及び円孔部に作用する圧力の影響についても述べている。

2. 多孔板単位要素の応力・変形状

多孔板に一様な外荷重が作用する場合、一般部における各単位要素の応力・変形状は幾何学的対称条件から同一となるのが当然予測され、F. E. M. 解析結果からも確認された。そして、単位要素に作用する境界荷重(境界上の作用応力)の大きさは多孔板外縁部と一般部との剛性比に依存した外荷重に対する荷重分担率で決定され、その境界荷重分布は単位要素の形状寸法のみで決定される。これから、多孔板一般部に対する剛性は単位境界荷重を受ける単位要素の変位から評価できると言え、有効弾性定数に関する前回の基本的な考え方が導かれた。

ここでは、4種類の境界荷重を受ける単位要素の応力・変形状について述べる。

境界荷重として、多孔板の外周上に一様分布で作用する面内荷重又は全円孔部に作用する圧力に対応する次の4種の荷重を考える。

η	P_r		P_x				P_y			
	$(\delta x)_A$	$(\delta x)_B$	$(\delta x)_A$	$(\delta y)_B$	$(\delta y)_C$	$(\delta y)_D$	$(\delta x)_A$	$(\delta y)_B$	$(\delta y)_C$	$(\delta y)_D$
1.0	.2579	0.	.3095	-.0298	-.0596	-.0894	-.0616	.1787	.3574	.5361
.9	.2636	-.02	.3180	-.0279	-.0654	-.0943	-.0544	.1801	.3708	.5508
.8	.2812	-.01	.3444	-.0223	-.0873	-.1096	-.0632	.1846	.4120	.5967
.75	.2951	-.01	.3653	-.0182	-.1031	-.1216	-.0702	.1886	.4441	.6328
.7	.3130	-.01	.3921	-.0135	-.1235	-.1370	-.0791	.1942	.4849	.6791
.6	.3630	.1051	.4675	-.0024	.1766	-.1810	-.1045	.2120	.5978	.8097
.5	.4394	.1815	.5850	.0110	-.2632	-.2522	-.1456	.2427	.7706	1.013
.4	.5581	.3002	.7800	.0285	-.4129	-.3844	-.2219	.2937	1.057	1.351
.3	.7540	.4960	1.157	.0556	-.7539	-.6983	-.4032	.3797	1.625	2.004
.25	.9055	.6476	1.509	.0758	-1.120	-1.044	-.6030	.4470	2.166	2.613
.2	1.123	.8653	2.117	.1028	-1.824	-1.721	-.9936	.5456	3.121	3.666
.15	1.462	1.204	3.333	.1396	-3.380	-3.241	-1.871	.7045	5.069	5.773
1	2.070	1.812	6.424	.1915	-7.732	-7.541	-4.354	1.004	10.12	11.13
.05	3.535	3.278	19.41	.3242	-27.82	-27.49	-15.87	1.717	31.90	33.62

$\phi_E=6.5, \phi_V=1.8, \xi=0.1$ のとき

.25	.3389		.5529	.0057	-.3762	-.3705	-.2140	.1900	.7675	.9575
-----	-------	--	-------	-------	--------	--------	--------	-------	-------	-------

$E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2, \nu_s=0.3$

表一 各種荷重を受ける多孔板単位要素の変位
 $(\phi_E=E_s/E_c=6.5, \phi_V=\nu_s/\nu_c=1.8)$
 $(\xi=0, P=200\text{cm}, \sigma_0=100\text{kg/cm/cm})$

- CASE 1. 半径方向荷重 P_r
- CASE 2. 円孔部圧力 P_i
- CASE 3. X方向荷重 P_x
- CASE 4. Y方向荷重 P_y

そして、それ等荷重に対する均一材から成る単位要素外側境界上の変形状と応力分布を図-2に示す。図に示されるように幾何学的対称条件から、AD, DE境界上の変形状は線形である。しかし、その境界上の応力分布は非線形となる。尚、この作用応力の合力は外荷重で

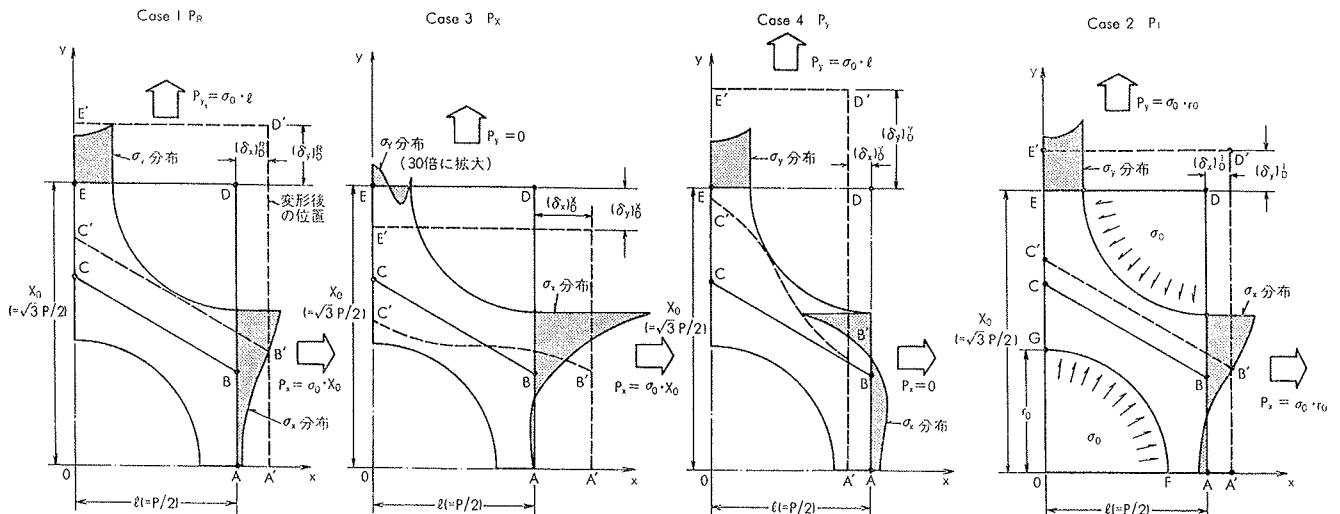


図-2 境界応力分布と変形状

一義的に表示され、分布性状は材料定数とは無関係に形状のみで決定される。一方、円孔部に異種の材から成る補強材のある単位要素の変位には、その補強材による補剛効果が含まれるが、対称条件から変形状は均一材の場合と相似する。

表一1では、単位要素の変位を支配する形状と材料のパラメーターを $\eta = h_L/p$, $\xi = 2t/(p - h_L)$, $\phi_E = E_s/E_c$, $\phi_\nu = \nu_s/\nu_c$ (図一1参照) とし、4種の境界荷重に対する単位要素代表点の変位計算結果を示す。その結果に見られるように、変位及び変形状は形状の影響を強く受けることが認められる。

3. 多孔板材料の弾性定数と有効弾性定数の関係

前記の変位計算結果に基づき、任意の材料定数を持つ単位要素の変位を評価する方法及び有効弾性定数評価法について以下に述べる。

3.1. 単位要素代表点の形状関数

平面応力状態の場合、応力一歪、歪一変位関係から成る単位要素 ($\xi=0$) の変位 δ_x , δ_y は

$$\left. \begin{aligned} E_c \cdot \delta_x &= \int (\sigma_x - \nu \sigma_y) dx \\ E_c \cdot \delta_y &= \int (\sigma_y - \nu \sigma_x) dy \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

と表わせる。ここで、OADE 境界上における $\int \sigma_y dx$ 及び $\int \sigma_x dy$ (図一2参照) は境界荷重で一義的に表示され、要素内の応力 σ_x , σ_y は形状のみに関係し、材料定数とは無関係であるから、 $F(\eta) = \int \sigma_x dx$, $G(\eta) = \int \sigma_y dy$ のような形状関数 $F(\eta)$, $G(\eta)$ が前記の変位計算結果から求められる。この形状関数を用いれば、任意の材料定数を持つ単位要素の変位を評価することが可能であり、 $\xi \neq 0$ の補強材のある単位要素に対しても、次式に示す等価弾性定数 E_e , ν_e を E_c , ν_c の代りに用い、そして $\eta_e = \eta + (1 - \eta)\xi$ を η の代りに用いれば、その変位を近似的に評価することができる。

$$\left. \begin{aligned} (E_e/E_c) &= (A_c/A_e) + (A_s/A_e) \cdot \phi_E \\ (\nu_e/\nu_c) &= (E_e/E_c) / [(A_c/A_e) + (A_s/A_e) \cdot (\phi_E/\phi_\nu)] \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで、 E_e , ν_e は等価ヤング係数、等価ポアソン比を表わし、 $A_e = A_c + A_s$ で、 A_c と A_s はコンクリートと鋼材の正味断面積、そして ϕ_E , ϕ_ν は前述の材料パラメーターを表わす。

尚、図一2に示されるD点のy方向変位を無次元化された形状関数を用いて表わすと、

$$\left. \begin{aligned} E_e \cdot (\delta_y)_{D^R} &= (\sqrt{3} p \sigma_0 / 2) \cdot [G(\eta_e)_{D^R} - \nu_e] \\ E_e \cdot (\delta_y)_{D^I} &= (\sqrt{3} p \sigma_0 / 2) \cdot (1 - \eta_e) \cdot [G(\eta_e)_{D^I} - \nu_e / \sqrt{3}] \\ E_e \cdot (\delta_y)_{D^X} &= (\sqrt{3} p \sigma_0 / 2) \cdot [G(\eta_e)_{D^X} - \nu_e] \\ E_e \cdot (\delta_y)_{D^Y} &= (\sqrt{3} p \sigma_0 / 2) \cdot G(\eta_e)_{D^Y} \end{aligned} \right\} (3)$$

となる。ここで、変位と形状関数に付けられた指標は位置と境界荷重を表わす。一方、CASE 3と4のような方向荷重を受ける単位要素のB・C点の変位は、

$$\left. \begin{aligned} E_e \cdot (\delta_y)_{B^X} &= (p \sigma_0 / 2\sqrt{3}) \cdot [G(\eta_e)_{B^X} - d \cdot \nu_e] \\ E_e \cdot (\delta_y)_{C^X} &= (p \sigma_0 / \sqrt{3}) \cdot [G(\eta_e)_{C^X} - (3-d) \cdot \nu_e / 2] \\ E_e \cdot (\delta_y)_{B^Y} &= (p \sigma_0 / 2\sqrt{3}) \cdot [G(\eta_e)_{B^Y} - (1-d) \cdot \nu_e] \\ E_e \cdot (\delta_y)_{C^Y} &= (p \sigma_0 / \sqrt{3}) \cdot [G(\eta_e)_{C^Y} + (1-d) \cdot \nu_e / 2] \end{aligned} \right\} (4)$$

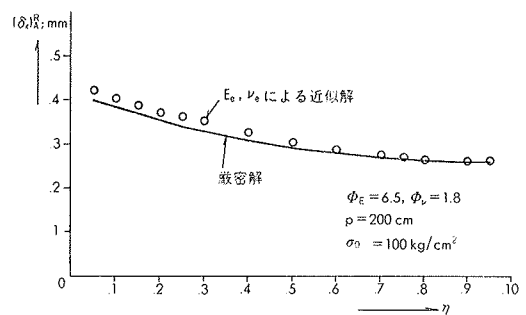
$$; d \approx G(\eta_e)_{B^X} / G(\eta_e)_{D^X}$$

と表わされ、境界AB上に作用する荷重を無視できない。

尚、表一2に形状パラメーター η の広範囲に亘る値に対して求めた形状関数 $F(\eta)$, $G(\eta)$ の値を示す。そして図一3では、半径方向荷重を受ける $\xi=0.1$, $\phi_E=6.5$, $\phi_\nu=1.8$, $p=200$ cm, $\sigma_0=100$ kg/cm² の単位要素の変位の精解値と前記の等価弾性定数 E_e , ν_e を用いた近似解値との比較を示し、この手法で十分な近似精度を持った解を得ることが期待できることを示した。

η	Case 1.		Case 3.				Case 4.			備考	
	$F(\eta)_A^R$	$F(\eta)_A^I$	$F(\eta)_B^X$	$G(\eta)_B^X$	$G(\eta)_B^Y$	$F(\eta)_C^X$	$G(\eta)_C^X$	$G(\eta)_C^Y$	Δ		
1.	1.	0.	1.	0.	0.	0.	0.	1.	1.	1.	
.9	1.018	.3497	1.027	-.0082	-.0097	-.0092	-.0092	1.027	1.028	1.027	.8876
.8	1.075	.5431	1.113	-.0231	-.0451	-.0378	-.0378	1.098	1.120	1.113	.6104
.75	1.120	.6474	1.180	-.0270	-.0787	-.0602	-.0602	1.147	1.197	1.180	.4490
.7	1.178	.7592	1.267	-.0263	-.1202	-.0689	-.0689	1.204	1.298	1.267	.2956
.6	1.339	1.016	1.510	-.0068	-.2530	-.1710	-.1710	1.346	1.593	1.510	.0398
.5	1.586	1.339	1.890	.0398	-.4755	-.3038	-.3038	1.547	2.062	1.890	-.1308
.4	1.970	1.783	2.520	1.224	-.8957	-.5503	-.5503	1.847	2.856	2.520	-.2224
.3	2.603	2.456	3.739	2.713	-.1839	-.1135	-.1135	2.331	4.443	3.739	-.2388
.25	3.092	2.956	4.874	3.879	-.2866	-.1781	-.1781	2.704	5.959	4.874	-.2178
.2	3.795	3.661	6.838	5.454	-.4838	-.3044	-.3044	3.250	8.634	6.838	-.1792
.15	4.890	4.743	10.77	7.596	-.9195	-.5878	-.5878	4.130	14.09	10.77	-.1292
.1	6.854	6.671	20.75	1.059	-.2138	-.1390	-.1390	5.798	28.23	20.75	-.0762
.05	11.59	11.31	62.70	1.808	-.7759	-.5112	-.5111	9.781	89.17	62.70	-.0354

表一2 形状関数 $F(\eta)$, $G(\eta)$



図一3 E_e , ν_e を用いた近似解の精度 ($\xi=0.1$)

又、平面歪状態の場合の変位に対しても、前記の形状関数 $F(\eta)$, $G(\eta)$ を用い同様に評価することができる。尚、これ等の変位は $F(\eta)$, $G(\eta)$ 即ち形状の影響を強く受け、平面応力及び平面歪状態におけるそれぞれの変位を同時に3方向等方性材から成る無孔板で正確にシミュレートすることはできない。

3.2. 有効弾性定数を持つ材の応力一歪関係

等価無孔板の弾性定数(有効弾性定数)を E^* , ν^* の

ように表示し、それが x, y, z 3 方向に直交異方性であるとすれば、応力-歪関係は次のように示される。

$$\{\sigma^*\} = [D^*] \{\varepsilon^*\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \{\sigma^*\} &= \{\sigma_x^*, \sigma_y^*, \sigma_z^*, \tau_{xy}^*, \tau_{yz}^*, \tau_{zx}^*\}^T \\ \{\varepsilon^*\} &= \{\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \gamma_{xy}^*, \gamma_{yz}^*, \gamma_{zx}^*\}^T \\ G_{xy}^* &= (E_x^* E_y^*)^{1/2} / 2 [1 + (\nu_{xy}^* \nu_{yx}^*)^{1/2}] \\ G_{yz}^* &= (E_y^* E_z^*)^{1/2} / 2 [1 + (\nu_{yz}^* \nu_{zy}^*)^{1/2}] \\ G_{zx}^* &= (E_z^* E_x^*)^{1/2} / 2 [1 + (\nu_{zx}^* \nu_{xz}^*)^{1/2}] \end{aligned}$$

$$[D^*]^{-1} = \begin{pmatrix} 1/E_x^* & -\nu_{yx}^*/E_y^* & -\nu_{zx}^*/E_z^* & & & \\ -\nu_{xy}^*/E_x^* & 1/E_y^* & -\nu_{zy}^*/E_z^* & & & 0 \\ -\nu_{xz}^*/E_x^* & -\nu_{yz}^*/E_y^* & 1/E_z^* & & & \\ & & & 1/G_{xy}^* & & \\ & & & & 1/G_{yz}^* & \\ & & & & & 1/G_{zx}^* \end{pmatrix}$$

そして、相反定理が成り立つとすれば、

$$\left. \begin{aligned} \nu_{xy}^*/E_x^* &= \nu_{yx}^*/E_y^* \\ \nu_{yz}^*/E_y^* &= \nu_{zy}^*/E_z^* \\ \nu_{zx}^*/E_z^* &= \nu_{xz}^*/E_x^* \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

と与えられる。

一方、前記の形状関数間には $F(\eta)_A^X = G(\eta)_D^Y$, $F(\eta)_A^Y = G(\eta)_D^X$ という関係が認められ、D点についての変形性状は等方性的であり、前回の多孔板の x-y 面内の有効弾性定数は等方性であるという仮定とも一致する。これから、 $E_x^* = E_y^* = E^*$, $\nu_{xy}^* = \nu_{yx}^* = \nu^*$, $\nu_{yz}^* = \nu_{zy}^* = \nu^*$, $\alpha^2 \equiv E^*/E_z^*$ と表示すれば、式(5)のたわみ性マトリックス $[D^*]^{-1}$ は次のように簡略化される。

$$[D^*]^{-1} = \begin{pmatrix} 1/E^* & -\nu^*/E^* & -\nu_z^*/E_z^* & & & 0 \\ -\nu^*/E^* & 1/E^* & -\nu_z^*/E_z^* & & & \\ -\nu_z^*/E_z^* & -\nu_z^*/E_z^* & 1/E_z^* & & & \\ & & & 2(1+\nu^*)/E^* & & \\ & & & & 2(1+\alpha\nu_z^*)/\alpha E_z^* & \\ & & & & & 2(1+\alpha\nu_z^*)/\alpha E_z^* \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(7)$$

3.3. 有効弾性定数

1) Z 方向の有効弾性定数 E_z^* , ν_z^* 多孔板単位要素とそれに対応する無孔板単位要素の平面応力状態の時の Z 方向の平均歪を等価にすると共に、平面歪状態の時の Z 方向の全拘束力についても等価にすると、Slot と O'Donnell が既に導いている²⁾ 次の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} E_z^*/E_c &= A/A_0 \\ \nu_z^*/\nu_c &= 1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、A は多孔板単位要素の正味断面積で A_0 は全断面積である。又、補強材のある場合に対しても、式(8)の E_c, ν_c の代りに E_e, ν_e を用いればよい。

この関係の妥当性については容易に確かめられる³⁾。

2) x-y 面外の有効弾性定数 一方向荷重を受ける多孔板単位要素の変形性状には非線形な挙動も含まれる。これを等価無孔板として厳密にシミュレートすることは不可能である。従って、図-2 に示される D 点の変位を用い、同一の外荷重条件(単位要素の境界応力分布が同一ということではなく、その合力の大きさが等価ということである)に対する多孔板と無孔板単位要素の変位を等価にすることで巨視的に有効弾性定数を評価する。

形状関数を用いて表示すると、次の弾性定数と有効弾性定数間の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (E^*/E_c) &= 1/G(\eta)_D^Y \\ \nu^* &= (E^*/E_c) \cdot \nu_c - [G(\eta)_D^X/G(\eta)_D^Y] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

尚、形状関数間の関係 $G(\eta)_D^R = F(\eta)_A^R = G(\eta)_D^X + G(\eta)_D^Y$ から、式(8)は半径方向荷重、X 方向荷重、Y 方向荷重の 3 種の荷重条件のものに対し同時に満足されることが認められる。

又、補強材がある場合に対しては次式が適用される。

$$\left. \begin{aligned} (E^*/E_c) &= 1/G(\eta_e)_D^Y \\ \nu^* &= (E^*/E_c) \cdot \nu_c - [G(\eta_e)_D^X/G(\eta_e)_D^Y] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

尚、Case 2 の円孔部圧力によるものは、その荷重自身内力的なものであり、一般の外力とは異種のものである。この有効弾性定数評価とは無関係なものである。それは置換荷重及び単位要素内の応力評価の問題に関係する。

図-4 に形状パラメーター η に対する $1/G(\eta)_D^Y$ 及び

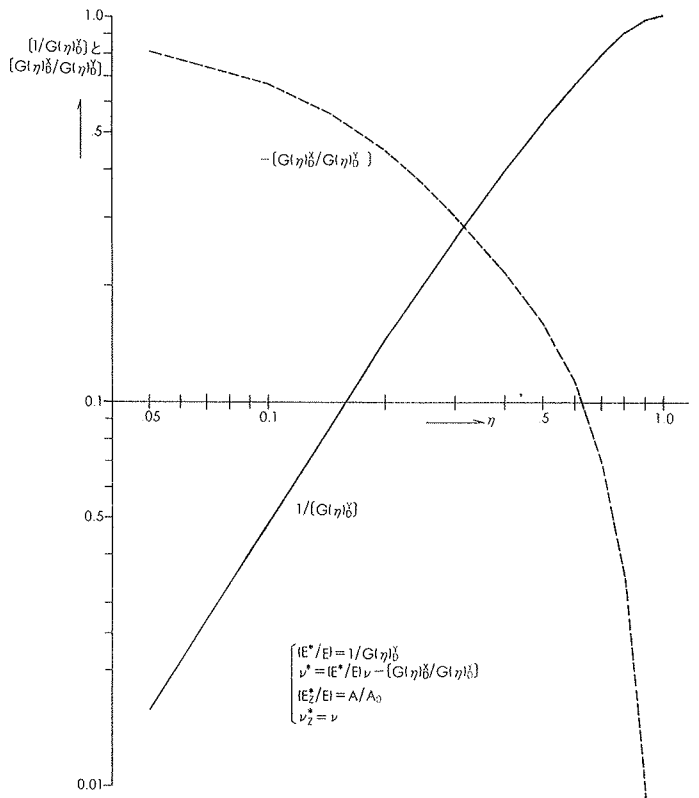


図-4 形状関数 $[1/G(\eta)_D^Y]$, $[G(\eta)_D^X/G(\eta)_D^Y]$

[$G(\eta)_D^*/G(\eta)_D^Y$] の関係を両対数目盛で示す。

4. 円孔部圧力の荷重置換

円孔部圧力を受ける多孔板単位要素の変形性状は半径方向荷重の場合と相似する。この特徴を利用すれば円孔部圧力に対する荷重を軸対称な半径方向荷重に置換することができる。

多孔円板の問題を対象とし、 $r=R^*$ (有効半径) の位置に作用する半径方向単位荷重による単位要素の変位を $(\delta_x)_{A^R}$ とし、円孔部圧力によるものを $(\delta_x)_{A^I}$ とすれば、 $r=R^*$ の位置に作用させるべき置換荷重 P_e は

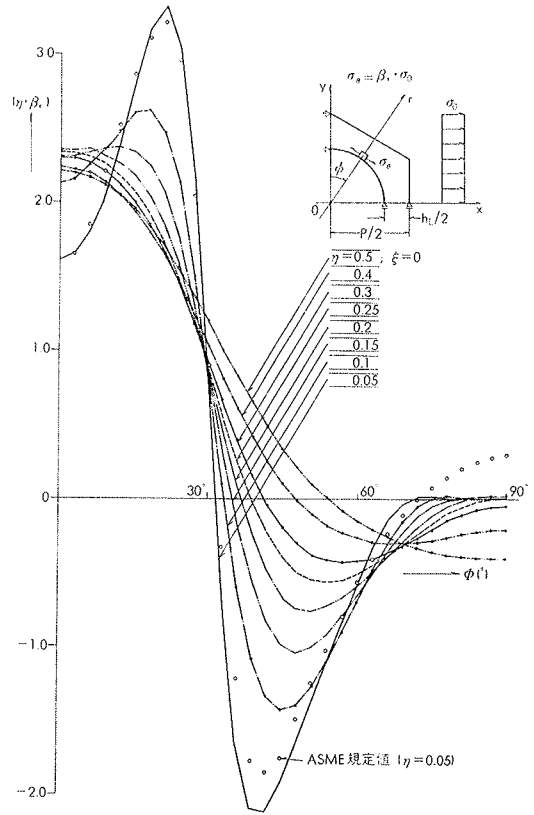
$$P_e = [(\delta_x)_{A^I} / (\delta_x)_{A^R}] \cdot \sigma_0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

で与えられる。ここで σ_0 は作用圧力である。そしてこの関係は 1 つの円孔を持つ有孔円板の平面問題で弾性理論的に求められる結果とも一致する。

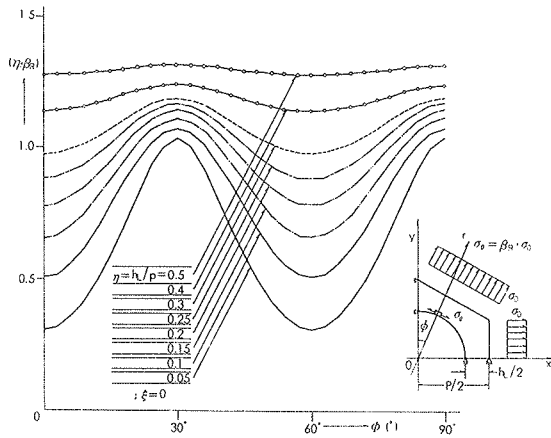
5. 円孔周辺の局部応力評価

多孔板単位要素の応力・変形性状の項でも述べたように、単位要素内の局部応力分布についても幾何学的対称条件が満足される。この特徴を利用し、単位境界荷重に対する単位要素内の応力分布を基準とし、等価無孔板解析で得られる対象とする要素の変位ないし境界荷重を用

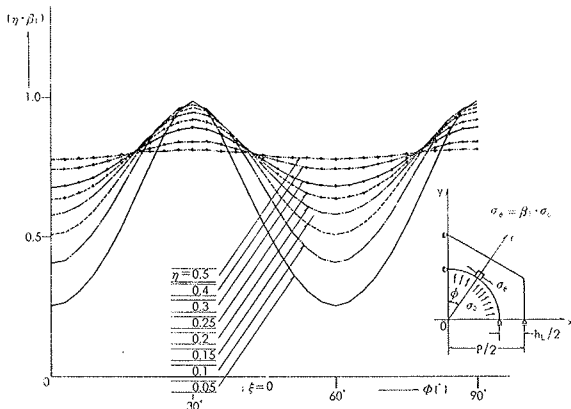
いれば、その局部応力についても評価することが可能である。



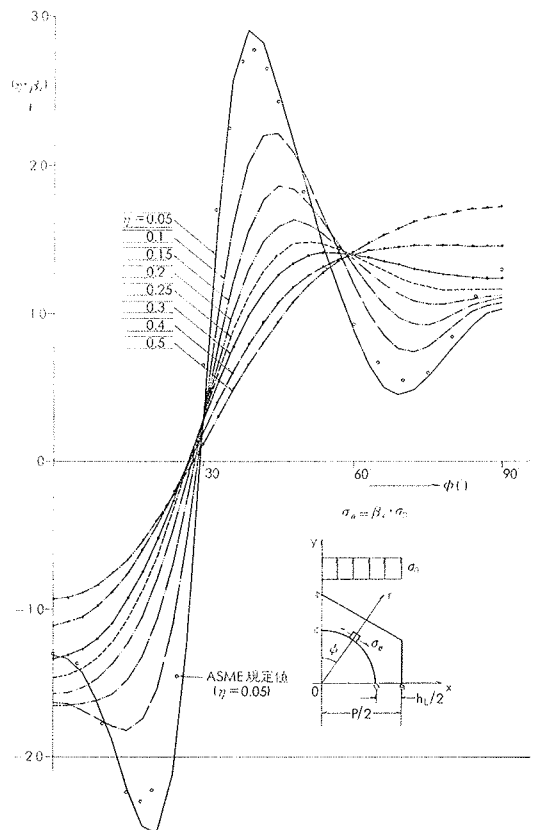
図一7 局部応力乗数 (β_x)



図一5 局部応力乗数 (β_R)



図一6 局部応力乗数 (β_I)



図一8 局部応力乗数 (β_Y)

図一5～8に示す局部応力乗数 β は4種の、単位境界荷重に対する円孔周辺の応力 σ_θ の分布を表わしたものである。

尚、対象とする単位要素に作用する境界荷重は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} (\delta_x)_D^* - (\delta_x)_D^I \cdot \sigma_0 &= (\delta_x)_D^X \cdot P_x + (\delta_x)_D^Y \cdot P_y \\ (\delta_y)_D^* - (\delta_y)_D^I \cdot \sigma_0 &= (\delta_y)_D^X \cdot P_x + (\delta_y)_D^Y \cdot P_y \end{aligned} \right\} \dots\dots(12)$$

ここで、 $(\delta_x)_D^*$ 、 $(\delta_y)_D^*$ は等価無孔板解析で得られる単位要素境界上の変位、 $(\delta_x)_D^I$ 、 $(\delta_x)_D^X$ 、 \dots はそれぞれ単位境界荷重による変位で、 σ_0 は円孔部作用圧力、 R_x 、 P_y は外側境界上に作用する境界荷重である。

以上から、円孔周辺の応力 σ_θ は次式で与えられる。

$$\sigma_\theta = \beta_I \cdot \sigma_0 + \beta_x \cdot P_x + \beta_y \cdot P_y \dots\dots\dots(13)$$

6. 適用性の検討

等方性材として求めた前回提案の有効弾性定数と直交異方性材として求めた今回提案値とを比較しながらその適用性について検討する。

表一3、に $\phi_E = E_s/E_c = 6.5$ 、 $\phi_\nu = \nu_s/\nu_c = 1.8$ の多孔板に対する有効弾性定数を示す。そこで、 $\xi \neq 0$ のときの今回提案値は式(2)、(8)、(10)を用いて求めたものである。そして、これ等有効弾性定数を用いた等価無孔板単位要素と多孔板単位要素の変位比較を表一4、に示す。それに認められるように、今回提案値は各種荷重条件で十分な近似精度を持っていることが分る。一方前回提案値については、その適用性が制約されることも認められる。

尚、 $\xi = 0$ の均一材から成る多孔板の場合、今回提案する有効弾性定数は前記SlotとO'Donnellの求めた結果と本質的に同等のものとなる。しかし、彼等が導いた関係式には $\nu = 0$ のときの有効ポアソン比 ν_0^* が含まれ $[\nu^* = \nu_0^* + (E^*/E)\nu]$ 、任意の材料定数のものに対する有効弾性定数を評価する場合かなり面倒な面もある。又、円孔部ライナー材のような補強材がある場合に対しても、ASMEのPressure Vessel Code⁴⁾に記述がある。ここでは、 $\eta_0 = \eta + (E_s/E_c) \cdot (1 - \eta)\xi$ で与えられる形状パラメータ η_0 を用い、それに対応する (E^*/E_c) 、 ν^* を求めている。この手法で、 $\xi = 0.1$ 、 $\eta = 0.25$ 、 $\phi_E = 6.5$ 、 $\phi_\nu = 1.8$ のときの有効弾性定数を求めると、 $(E^*/E_c) = .8321$ 、 $\nu^* = .1948$ となり、表一3に示す今回提案値とかなりの差異が認められる。そしてZ方向の直交異方性の性質についての規定は無い。又その値の適用性について検討すると、半径方向荷重とか円孔部圧力のような荷重に対しては、かなり良い近似精度を持ったシミュレーションが可能であるが、一方向荷重のようなものに対しては近似精度が低下し、前回提案値と同様にその適用範囲が制約される傾向を持つことが認められる。

ξ	η	前回提案値		今回提案値			
		等方性		直交異方性			
		(E^*/E_c)	ν^*	(E^*/E_c)	ν^*	(E^*/E_c)	ν^*
0	.75	.8799	.1610	.9434	.1667	.8475	.1923
	.5	.6009	.1469	.7734	.1667	.5291	.2489
	.25	.2974	.1300	.4898	.1667	.2052	.3996
	.05	.0774	.1162	.1815	.1667	.0160	.8180
.05	.75	.8984	.1974	.9792	.1694	.8872	.1926
	.5	.7360	.1922	.9170	.1791	.6423	.2505
	.25	.5224	.1924	.8132	.2024	.3746	.3728
	.05	.3429	.2122	.7003	.2485	.1173	.7007
.1	.75	.9291	.2015	1.013	.1720	.9264	.1928
	.5	.8426	.2065	1.053	.1890	.7589	.2508
	.25	.7139	.2183	1.120	.2222	.5557	.3529
	.05	.5916	.2378	1.192	.2674	.3006	.5904

$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_s = 0.3$

表一3 多孔板の有効弾性定数
($\phi_E = E_s/E_c = 6.5$, $\phi_\nu = \nu_s/\nu_c = 1.8$)

荷重種別	η	精密解 (P.M.M.)		等価無孔板								
				前回提案値				今回提案値				
		δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2	δ_1	δ_2			
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
半径方向	.75	.2951	.5112	.2952	1.00	.5112	1.00	.2950	1.00	.5110	1.00	
	.5	.4394	.7611	.4394	1.00	.7611	1.00	.4394	1.00	.7611	1.00	
	.25	.9055	1.568	.9055	1.00	1.568	1.00	.9056	1.00	1.569	1.00	
	.05	3.535	6.122	3.534	1.00	6.122	1.00	3.532	1.00	6.118	1.00	
	.75	.0372	.0644	.0372	1.00	.0644	1.00	.0372	1.00	.0644	1.00	
	.5	.1815	.3144	.1815	1.00	.3144	1.00	.1815	1.00	.3144	1.00	
	.25	.6476	1.122	.6476	1.00	1.121	1.00	.6477	1.00	1.122	1.00	
	.05	3.278	5.678	3.277	1.00	5.677	1.00	3.275	1.00	5.673	1.00	
	.75	.3653	-.1216	.3518	.96	-.0981	.81	.3652	1.00	-.1216	1.00	
	.5	.5850	-.2522	.5151	.88	-.1311	.52	.5850	1.00	-.2522	1.00	
	.25	1.509	-1.044	1.041	.69	-.2343	.22	1.508	1.00	-1.044	1.00	
	.05	19.41	-27.49	3.999	.21	-.8949	.03	19.41	1.00	-27.49	1.00	
円孔部圧力	.75	-.0702	-.6328	-.0566	.81	-.0693	.96	-.0702	1.00	-.6326	1.00	
	.5	-.1456	1.013	-.0757	.52	-.8922	.88	-.1456	1.00	1.013	1.00	
	.25	-.6030	2.613	-.1353	.22	1.803	.69	-.6030	1.00	2.613	1.00	
	.05	-15.87	33.62	-.4647	.03	6.925	.21	-15.87	1.00	33.61	1.00	
	.75	.2769	.4796	.2769	1.00	.4796	1.00	.2769	1.00	.4794	1.00	
	.5	.4172	.7226	.4172	1.00	.7226	1.00	.4172	1.00	.7226	1.00	
	.25	.8703	1.508	.8703	1.00	1.507	1.00	.8705	1.00	1.508	1.00	
	.05	3.428	5.937	3.428	1.00	5.935	1.00	3.437	1.00	5.933	1.00	
	.75	.0337	.0583	.0349	1.04	.0505	1.04	.0349	1.04	.0504	1.04	
	.5	.1714	.2969	.1723	1.01	.2965	1.01	.1723	1.01	.2965	1.01	
	.25	.6220	1.077	.6224	1.00	1.078	1.00	.6226	1.00	1.078	1.00	
	.05	3.176	5.501	3.177	1.00	5.504	1.00	3.187	1.00	5.520	1.00	
x方向	.75	.3551	-.1358	.3427	.97	-.1139	.84	.3472	.98	-.1341	.99	
	.5	.5887	-.2626	.5040	.89	-.1503	.57	.5596	.98	-.2647	1.01	
	.25	1.467	-1.033	1.023	.70	-.2648	.26	1.454	.99	-1.048	1.01	
	.05	18.86	-26.75	3.945	.21	-.8984	.03	18.88	1.00	-26.88	1.00	
	.75	-.0783	.6150	-.0658	.84	.5935	.97	-.0774	.99	.6014	.98	
	.5	-.1516	.9851	-.0868	.57	.8729	.89	-.1528	1.01	.9893	.98	
	.25	-.5961	2.540	-.1529	.26	1.772	.70	-.6048	1.01	2.518	.99	
	.05	-15.44	32.68	-.5187	.03	6.833	.21	-15.52	1.01	32.70	1.00	
	y方向	.75	.2765	.4789	.2765	1.00	.4789	1.00	.2817	1.02	.4879	1.02
		.5	.3397	.5884	.3397	1.00	.5884	1.00	.3612	1.12	.6256	1.12
		.25	.4785	.8268	.4785	1.00	.8268	1.00	.5182	1.08	.8975	1.08
		.05	.7104	1.230	.7111	1.00	1.232	1.00	.7899	1.11	1.368	1.11
.75		.2660	.4607	.2660	1.00	.4607	1.00	.2697	1.01	.4671	1.01	
.5		.2915	.5049	.2915	1.00	.5049	1.00	.3055	1.05	.5291	1.05	
.25		.3389	.5870	.3389	1.00	.5870	1.00	.3604	1.06	.6242	1.06	
.05		.3888	.6907	.3888	1.00	.6907	1.00	.4217	1.06	.7304	1.06	
X		$\xi = 0.1$.5529	-.3705	.4336	.78	-.1639	.44	.5570	1.01	-.3404	.92
			-.2140	-.9575	-.0946	.44	.7510	.78	-.1965	.92	-.9647	1.01

$\xi = 2t/(p-h_L)$, $\eta = h_L/p$, $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_s = 0.3$

表一4 一様な各種面内荷重を受け
る単位要素D点の変位比較
($\phi_E = E_s/E_c = 6.5$, $\phi_\nu = \nu_s/\nu_c = 1.8$)
($p = 200 \text{ cm}$, $\sigma_0 = 100 \text{ kg/cm}^2$)

一方、実際の多孔板の場合、平面的な広がりには有限であり、その外縁部では形状及び応力・変形状に乱れが生ずる。従って、多孔円板を等価無孔円板として解析する場合、この乱れの影響を考慮し、有効半径 R^* を設定する必要がある。ASME Codeでは $R^* = r_0 + (p - h_L)/4$ と与えられ、内側の等価無孔板とその外側のソリッドリム(多孔板材料から成る円形リング)とを一体として解

析する手法を示している。それに対し

$$R^* = r_0 + 3(p - h_L)/8 \dots\dots\dots(14)$$

とすると、半径方向面内荷重を受ける多孔円板外縁部の外力負担率とソリッドリムの外力負担率とをほぼ等価にすることができる。

表一5と6に、一様な各種面内荷重と圧力のような等分布荷重を受ける多孔円板のFEM解析結果と等価無孔板解析結果との比較を示す。

対象とする多孔円板の円孔数は19で、数が少ないため、FEM解析結果には外縁部の乱れの影響がかなり反映したものとなっているが、多孔円板全体としては一方向荷重条件の場合でも、FEM解析結果を相加平均的に評価すると等価無孔板解析結果と良く一致することが認められる。

図9はx方向に一様な面内荷重を受ける多孔円板中央の円孔周辺の σ_θ 分布を示したものである。図のように、局部応力についても、等価無孔板解析で近似的に評価できることが認められる。

7. まとめ

以上に述べてきたように、多孔板の有効弾性定数を直交異方性材として評価しても、単位要素に含まれる局部変形まで等価無孔板で正当にシミュレートできない。しかし、巨視的には単位要素の変形を充分正当に評価でき、実用的には充分な信頼性があると言える。そして、今回提案値は前回のものより適用性の面でより一般性を持っていると言える。

円孔部ライニング材のある多孔板に対しても、その有効弾性定数を均一材から成る場合を基準として評価でき、実用的にはその適用性も充分認められる。

尚、多孔円板に対する有効半径 R^* については、その妥当性の検討が不十分で、定性的にどのようなものが適当か判定できないが、式(14)の値を用いても又、ASMEの式を用いても、その差は近似誤差の範囲内のものと言える。

(文責 山口)

参考文献

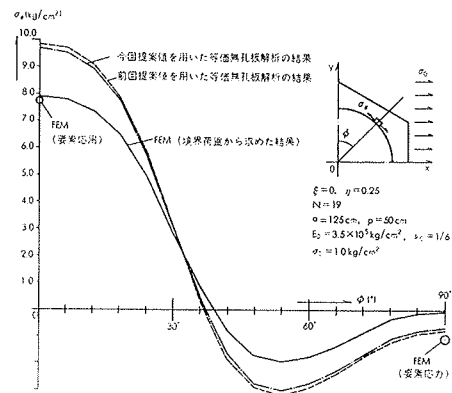
- 1) 山口, 他: プレストレストコンクリート原子炉压力容器 (PCRВ) 構造物に関する研究, II-4 コンクリート多孔板の有効弾性定数, 大林組技研所報 No. 12, (1976)
- 2) T. Slot, W. J. O'Donnell: Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates with Square and

荷重条件	位置と方向	FEM解析	等価無孔板の解析結果 (w: 単位: $\times 10^{-4}$ cm)					
			前	後	前	後	前	後
(1) 円周方向	A X	1781	1778	1.00	1779	1.00	1678	94
	B X	1782	1778	1.00	1778	1.00	1678	94
	C Y	1033	1027	0.99	1027	0.99	9269	93
	D X	2070	2053	0.99	2053	0.99	1938	94
	E Y	1783	1778	0.99	1779	0.99	1679	94
	F Y	3112	3080	0.99	3080	0.99	2907	93
(2) X方向	A X	754	8271	1.04	8272	1.01	7571	95
	B X	3386	2370	0.70	3708	1.10	3552	1.05
	C Y	3194	2359	0.74	3052	1.15	3521	1.10
	D X	6882	-4025	-	1074	-	1039	-
	E Y	-2512	-4582	0.27	-2221	0.88	-2129	0.89
	F Y	2847	2729	0.81	3182	1.19	3110	1.13
(3) Y方向	A X	-2065	-1018	0.49	-3176	1.54	-3068	1.49
	B X	1.688	8059	0.58	1.832	0.94	1.496	0.81
	C Y	-5925	-4037	0.69	-6045	1.60	-6190	1.29
	D X	-1411	-0531	0.37	-1920	1.20	-1873	1.17
	E Y	0976	1351	1.38	2101	2.15	2001	1.20
	F Y	1582	2739	0.60	4277	0.93	4096	0.89

表一5 一様な各種面内荷重を受ける多孔円板の変位計算結果の比較

位置と方向	FEM解析	等価無孔板の解析結果 (w: 単位: cm)						
		前	後	前	後	前	後	
(1) 円周方向	A	2.092	2.175	1.08	2.262	1.12	2.132	1.05
	B	1.983	2.158	1.08	2.222	1.12	2.093	1.02
	C	1.219	1.382	1.07	1.363	1.09	1.277	1.02
	D	1.212	1.380	1.07	1.329	1.10	1.215	1.03
	E	1.584	1.794	1.08	1.787	1.11	1.651	1.01
	F	5.065	5792	1.08	5818	1.08	5126	1.01
(2) X方向	A	1.102	1.144	1.04	1.137	1.05	1.111	1.04
	B	1.083	1.124	1.04	1.137	1.05	1.120	1.03
	C	0.827	0.832	1.03	0.81	1.04	0.805	1.01
	D	0.649	0.689	1.03	0.630	1.03	0.621	1.01
	E	0.670	0.832	1.03	0.690	1.01	0.831	1.02
	F	2.289	2079	1.03	2316	1.03	2170	0.96
(3) Y方向	A	0.783	0.850	1.07	0.819	1.02	0.841	1.02
	B	0.717	0.844	1.02	0.813	1.02	0.804	1.02
	C	0.674	0.795	1.02	0.769	1.02	0.753	1.02
	D	0.654	0.829	1.02	0.740	1.02	0.733	1.02
	E	0.502	0.616	1.02	0.645	1.02	0.618	1.02
	F	2.141	2.174	1.02	2.172	1.01	2.169	1.01

表一6 等分布荷重を受ける多孔円板の変位計算結果の比較



図一9 X方向荷重を受ける多孔円板中央の円孔周辺の σ_θ 分布

- Triangular Penetration Patterns, Journal of Eng. for Industry, (Nov. 1971)
- 3) 山口: コンクリート多孔板の有効弾性定数 その2, 建築学会大会梗概集, (昭和51.10)
- 4) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Nuclear Vessel, Article 1-9, (1968)