

プレストレストコンクリート原子炉圧力容器 (PCRVR) 構造物に関する研究

—II-3 マルティキャビティ型 PCRVR の内圧に対する非弾性挙動解析—

PCRVR 研究グループ

Study on Prestressed Concrete Reactor Vessel (PCRVR) Structures

—II-3 Inelastic Behavior Analysis of Multi-cavity
Type PCRVR Subjected to Internal Pressure—

PCRVR Research Group

Abstract

This paper presents a method of analysis for inelastic behavior of a multi-cavity type PCRVR subjected to internal pressure and the results thereof. The PCRVR, by nature of its geometrical configuration, requires a three-dimensional analysis. However, there are various difficulties encountered in attempting three-dimensional inelastic analysis under the present circumstances. In this study, a series of simplifications is made for the application of a two dimensional analysis to such a PCRVR structure. The concept of effective elastic module and modified local pressure are adopted in the formulation of the analytical model to consider the presence of pressurized cavities in the cylindrical wall of the PCRVR. The calculated results obtained by this method are in good agreement with test results in both elastic and inelastic ranges.

概 要

この報告は内圧を受けたマルティキャビティ型 PCRVR の非弾性挙動についての解析法と結果を述べたものである。その PCRVR は幾何学的形状から 3 次元解析が必要である。しかし、3 次元非弾性解析を行うには今のところ種々の難しさがある。ここでは、そのような PCRVR 構造物を単純化し、2 次元解析を行えるようにする。PCRVR の円筒壁に設けられたキャビティとかその部分に作用する圧力を考え、解析モデルの設定で有効弾性係数と置換荷重の概念を用いている。この方法を用いて計算した結果、それは弾性域だけでなく非弾性域に於いても実験結果と良く一致した。

1. 序

厚肉円筒殻と厚肉円板とで構成されたコンクリート構造物で、且つその円筒側壁部にキャビティを持ったマルティキャビティ型 PCRVR のような構造物の内圧に対する非弾性域に於ける挙動を解析する手法は未だ確立されていない。この報告は、円筒側壁部 6 カ処に S/G キャビティを持ったマルティキャビティ型 PCRVR を軸対称回転体構造物に置換し、非弾性挙動解析を行った結果について述べたものである。

コンクリート構造物の場合、その非弾性域に於ける挙動にはコンクリートのひび割れが大きな影響を与える。構造物の形状が単純な平面とか軸対称回転体の場合、コンクリートひび割れを考慮した解析法も種々検討され、かなり確実性のある解析コードも得られるようになった。(文献：1, 2)

ここで対象とする構造物は、円筒側壁部に設けられたキャビティの存在に依って幾何学的な軸対称性を損

うと共に、その部分に作用する圧力に依って荷重対称性も損ったものとなっている。このため、構造物の応力状態を正確に評価しようとする場合、3 次元解析が必要となる。特に、3 次元有限要素法を用い、PCRVR のような構造物の非弾性挙動解析を行う場合、技術的な問題以外にコンピューターの演算コストの問題という大きな壁に突き当たるのが当然予測される。

一方、マルティキャビティ型 PCRVR の基本的な形状は、厚肉円筒殻と厚肉円板とで構成された軸対称な構造物であるので、厚肉有孔板などで考えられている有効弾性係数の概念を導入すれば、軸対称構造物として解析することが可能である。

更に、S/G キャビティ部に作用する圧力のような局部的荷重に対しても考慮する必要がある。S/G キャビティ圧力はコアキャビティ圧力と同じ大きさを持ち、且つ、その圧力は側壁部の挙動に明らかな影響を与える。従って、そのような荷重が存在する場合と同等な効果を持った軸対称な補正荷重を考える。これにより

軸対称構造物として PCRVR の挙動解析が行える。

2. 平面モデルを用いた置換法の検討

図-1 にマルチキャビティ型 PCRVR モデルの概要図を示す。

円筒殻の場合、膜力に対する剛性は肉厚に一次比例し、曲げに対する剛性は肉厚の2乗に比例する。このため、モデル置換を行う場合、上記2種類の剛性について検討する必要がある。一方、母線方向の膜力に対する剛性と円周方向の膜力に対する剛性とは対応し、又、曲げ剛性に対しても同じことが言えるので、回転軸に直交した厚肉円筒部水平断面についての剛性置換法を検討すれば充分であると考えられる。

2.1. 解析モデル

図-2 は上記マルチキャビティ型 PCRVR モデルの円筒側壁部の主要な形状寸法と補強材の概要を示したものである。それは、側壁部外周に沿って巻かれたワイヤーによって46.3 kg/cm²の外圧に相当する初期プレストレスが導入され、又、作用内圧に対しては、コアキャビティと側壁部に設けられたS/Gキャビティライナーの位置が圧力バウンダリーとなっている。

図-3-1 は、図-2 と同じ側壁部を対象とした平面応力解析モデルである。又、図-3-2 は上記解析モデルを軸対称なものに置換し、単純化した平面応力解析モデルである。ここで、壁体中央部が剛性置換領域である。

置換方法については、その考え方として2つに大別して説明する。その1つは剛性置換法であり、他の1つは荷重置換法である。

剛性置換では、有孔平面モデルと単純化したモデルの円周方周の軸方向剛性と曲げ剛性をそれぞれ等価にすることを考える。

具体的には、有孔平面モデルの場合、S/Gキャビティ周辺の局部変形の影響を無視し、平均的な剛性評価を行う。即ち、コンクリートの弾性係数を E_c 、コンクリート水平断面積 A_c 、その断面極2次モーメントを I_p とし、軸方向剛性を $E_c A_c$ 、曲げ剛性を $E_c I_p$ と考える。一方、単純化したモデルの場合、剛性置換領域のコンクリート有効弾性係数を E_c' 、その内側と外側の部分のコンクリート弾性係数は E_c 、又、断面積及び断面極2次モーメントについてもそれぞれ A_{c1} 、 A_{c2} 、 I_{p1} 、 I_{p2} とする。以上から

$$\begin{aligned} E_c A_c &= E_c' A_{c1} + E_c A_{c2} \\ E_c I_p &= E_c' I_{p1} + E_c I_{p2} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

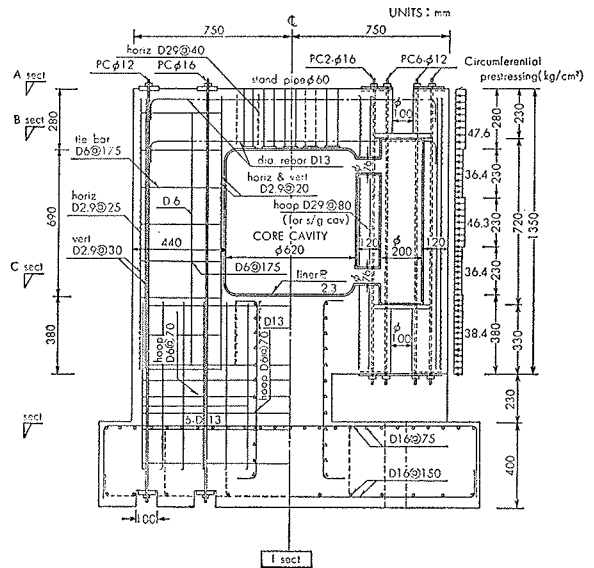


図-1-(1) マルティキャビティ型 PCRVR モデル概要

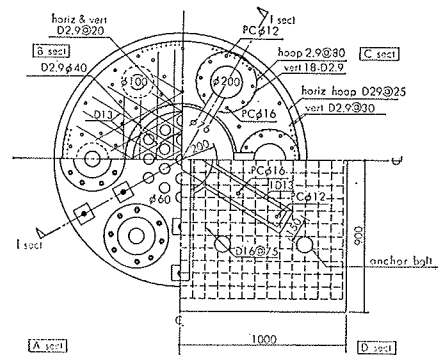


図-1-(2) (同上) 水平断面図

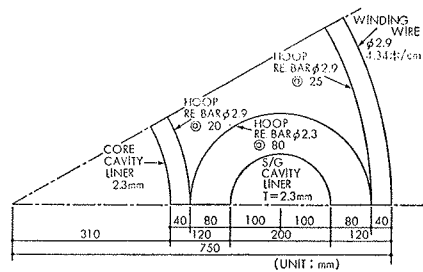


図-2 PCRVR モデル側壁部概要

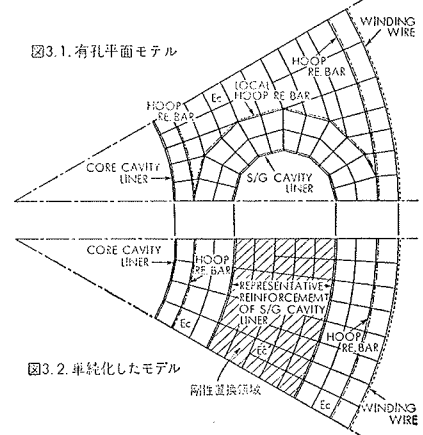


図-3 平面モデル

剛性置換領域を図一3に示すように設定した場合、断面の形状寸法から $E_c' = 0.717 \cdot E_c$ となる。更にS/Gキャビティライナーとその周辺に配筋された局所的な補強材についても同様な考え方で置換する。

荷重置換では、S/Gキャビティに作用する圧力のような局所的な荷重についても、その荷重が構造物全体の挙動に与える効果を考えた置換を行う必要がある。

S/Gキャビティ部に作用する圧力の荷重置換では、基本的には、壁体の中心線上に投影されたその圧力の法線方向成分を単純化したモデルの剛性置換領域の内・外周面に沿って一様に振り分ければ、その局所的な荷重の変形(挙動)に及ぼす効果を有孔平面モデルの場合とほぼ等価なものにすることができる。しかし、それだけでは充分であるとは言えない。図一4に示すように、S/Gキャビティ部圧力に依っても壁体最内縁位置の半径方向変位が外向きに現れ、上記補正荷重だけでは説明がつかない。これは、S/Gキャビティ部圧力の接線方向成分に依る影響であり、その変形に及ぼす効果も考慮する必要がある。

以上から、有孔平面モデルと単純化したモデルのそれぞれ対応した主要な位置の半径方向変位が等価になるような荷重置換を行った。その結果、S/Gキャビティ部の圧力に相当する補正荷重は次のようになる。

$$P_{c1} = -0.313 \cdot P_0$$

$$P_{c2} = 0.335 \cdot P_0$$

ここで、 P_{c1} 、 P_{c2} はそれぞれ剛性置換領域の内・外周面に沿って作用する半径方向圧力で、符号は外向きを正とする。又、 P_0 はキャビティに作用する圧力である。

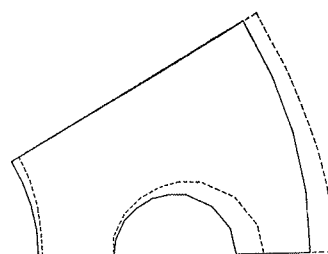
2.2. 計算結果と考察

有孔平面モデルと単純化したモデルを用いて解析した結果を以下に述べる。

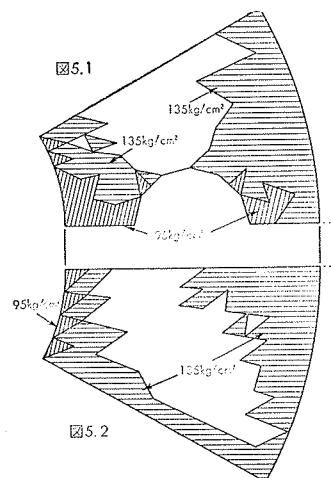
図一5にコンクリートひび割れ進展図、図一6、図一7に主要点の荷重—変形曲線を示す。

単純化したモデルの応力状態は本質的には軸対称性を持つべきものであるが、図一5-2に見られるように、コンクリートひび割れ発生後、特にひび割れ域が広範囲になってくると、軸対称性を損っている。これは、コンクリートの応力状態そのものがかなりクリティカルで、ひび割れに依る応力再分配の際にバランスを崩し、対称性を損ったと考えられる。しかし、それは全体の挙動には大きな影響を与えていない。尚、有孔平面モデルの結果と比較した場合、コンクリートのひび割れ進展状況は良好な一致を示している。

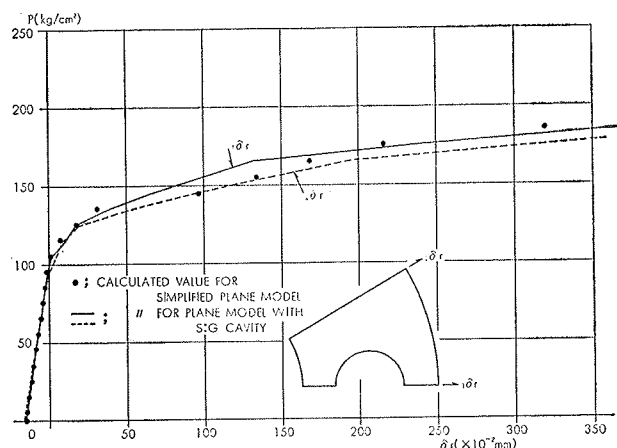
図一6、図一7の荷重—変形曲線についても同様な



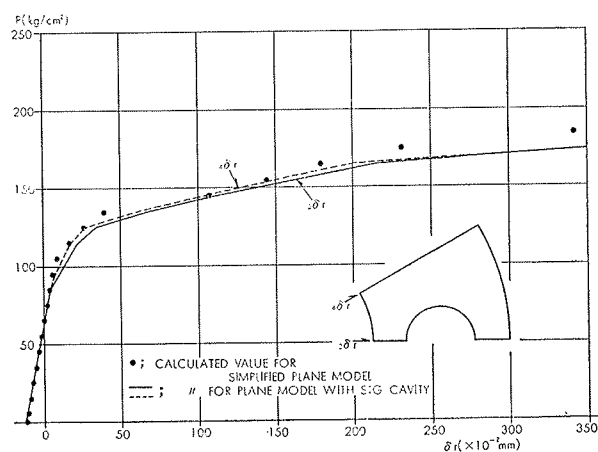
図一4 S/Gキャビティ部圧力に依る変形



図一5 コンクリートひび割れ進展図



図一6 荷重—変形曲線：外周部半径方向変位



図一7 荷重—変形曲線：内周部半径方向変位

ことが言え、各荷重段階に於ける剛性低下率、換言すればコンクリートひび割れの進展状況に多少の差が認められても、全体の挙動としては両者は良く一致している。

尚、有孔平面モデルの場合、当然 S/G キャビティ周辺の局部応力の影響で、コンクリートひび割れ分布は対称性を持たないものであるが、荷重—変形曲線で見ると、その影響は顕著でない。

以上の結果から、マルチキャビティ型 PCRJV 側壁のように壁体内にキャビティが設けられた構造物でも、軸対称回転体構造物への置換が可能であり、局部荷重に対しても十分な考慮を払えば、弾性域だけでなく非弾性域に於ける挙動についても近似的には十分な確実度で解析できると言える。

3. マルティキャビティ型 PCRJV の挙動解析

3.1. 解析モデル

図—8 に解析モデル、表—1 にこの解析で設定した材料の力学的諸定数を示す。この解析モデルはこれまでに述べた置換法に基き、マルチキャビティ型 PCRJV モデルを軸対称回転体構造物に置換したものである。

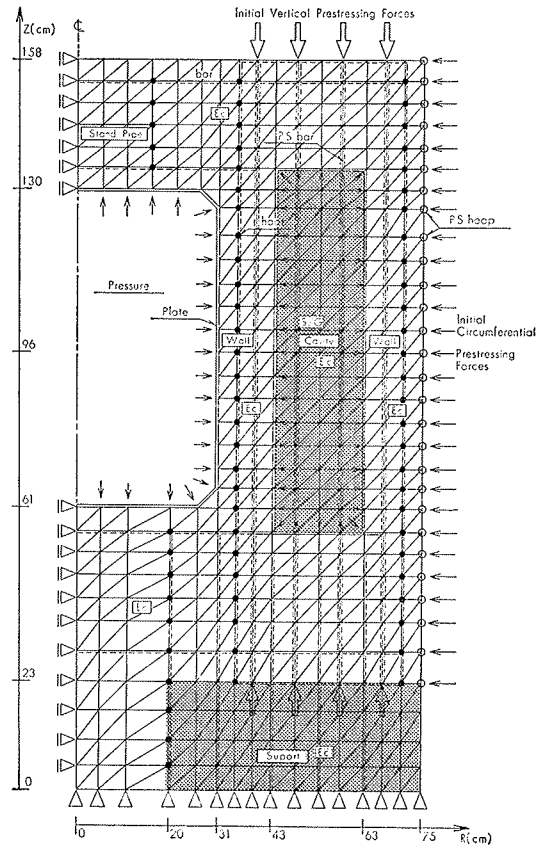
尚、図—1 に示すように、実際のモデルのトップスラブは19カ処のペネトレーションが設けられた有孔厚肉円板で、又サポートは PCRJV ボトムスラブとマットスラブと一体となった6脚型のコンクリート構造物である。

トップスラブ部のような有孔厚肉円板に対しては、ASME, Nuclear Vessels Code (文献3) にも規定があるが、この解析ではその部分のコンクリートの有効弾性係数として $1.0 \cdot E_c$ を用いた。又、サポート部分に対しても回転体への置換を行っているが、この置換では EA, EI_p (E : 弾性係数, A : サポート部水平断面積, I_p : 断面極2次モーメント) を等価にすると共に、その部分の円周方向剛性を零としている。

解析はコンクリートひび割れを考慮したリング要素を用いた有限要素法で行った。詳細については文献2を参照されたい。

3.2. 計算結果と考察

図—9 と図—10 に内圧 $P = 50 \text{ kg/cm}^2$ 時の側壁中腹位置に於ける A-A 断面内の円周方向と鉛直方向の歪分布を示す。その計算値のうち、2D と表示のあるものは、上記の回転体置換モデルを用いて解析した結果を有孔平面モデルでの解析結果にフィードバックして求めたものである。尚、この場合、平面モデルの半径方向変位が回転体モデルで想定した位置の変位と等し



図—8 解析モデル：軸対称回転体

1. Concrete							
1) basic concrete (measured)							
-0.455	ton/cm ²	compressive strength (σ_{cr})					
-0.300	"	yield strength (σ_y)					
0.035	"	tensile strength (σ_r)					
315.	"	young's modulus (E_1)					
150.	"	plastic modulus (E_2)					
-0.003	"	ultimate strain (ϵ_{cr})					
0.167	"	poisson's ratio (ν)					
assumed ratio of concrete properties of the other regions versus basic concrete							
region	σ_{cr}	σ_y	σ_r	E_1	E_2	ϵ_{cr}	ν
2) inner wall	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3) outer wall	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4) cavity	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717	1.0	1.0
5) stand pipe	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6) support	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	1.0	1.0
2. Steel							
hoop element	17.0	ton/cm ²	σ_y				
	2070.	"	E_1				
	20.	"	E_2				
bar element	element No. 1-108						
	12.77	ton/cm ²	σ_y				
	2000.	"	E_1				
	20.	"	E_2				
	element No. 109-313						
	2.4	ton/cm ²	σ_y				
	2000.	"	E_1				
	20.	"	E_2				
plate element (liner)	2.8	ton/cm ²	σ_y				
	2100.	"	E_1				
	21.	"	E_2				
	0.3	"	ν				

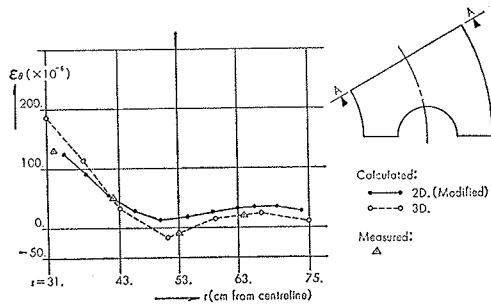
表—1 材料の力学的諸定数

ければ、その面内応力は実際の構造物のそれと充分対応したものとなるが、反面、面外応力については依然対応していない。この為、面外応力成分については、回転体モデルでの解析結果そのままのものを利用して

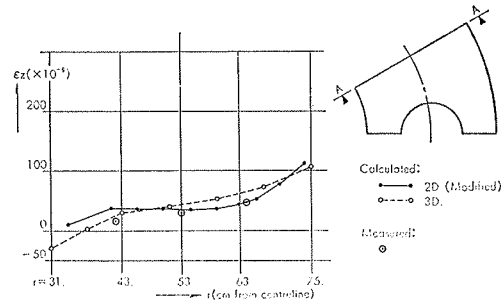
図に見られるように、実験値、計算値ともそれぞれ良く一致している。

図一11に側壁中腹位置の半径方向変位に対する荷重変形曲線、図一12にトップスラブ中央の鉛直方向変位に対する荷重—変形曲線を示す。

図に見られるように、側壁部、トップスラブ部ともその変形に対する初期剛性、コンクリートひび割れ及び鋼材降伏に依る剛性低下の割合、最大耐力の大きさ



図一9 円周方向歪分布 (P = 50 kg/cm²); 側壁中腹位置A-A断面



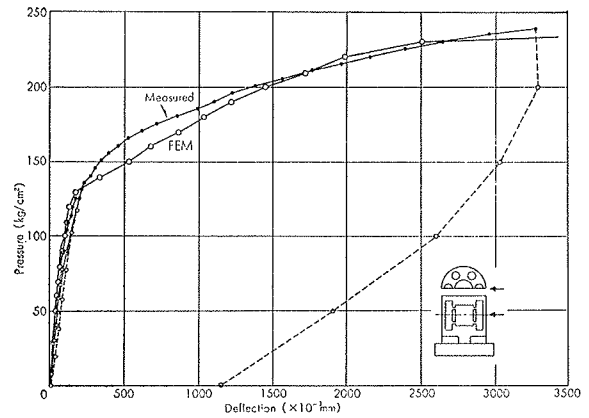
図一10 鉛直方向歪分布 (P = 50 kg/cm²); 側壁中腹位置A-A断面

等、ほぼ実験結果と一致している。

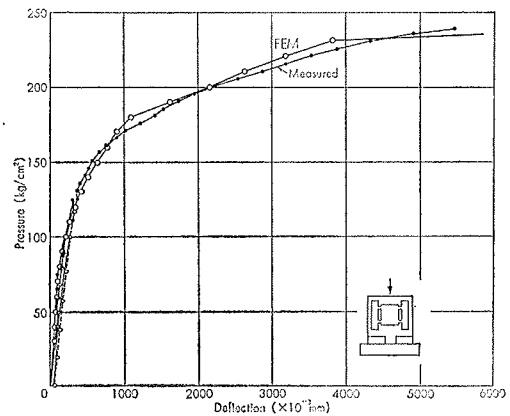
尚、終局荷重は、実験値が 238 kg/cm²、計算値が 235 kg/cm² で、良く一致している。

図一13に示すように、コンクリートのひび割れは、最初に壁体内側上部隅角部に円周方向に発生する。次にトップスラブ外側中央に円周方向・放射方向のひび割れ及び壁体内側下部隅角部に円周方向のひび割れがほぼ同時に発生する。それから壁体内側中腹位置の半径方向ひび割れ、壁体外側中腹位置の円周方向・半径方向ひび割れの順序で現れ、内圧が 135~140 kg/cm² 程度までになると側壁部はほぼ全断面に亘って半径方向のひび割れが入った状態になる。この結果は実験結果とも良く対応している。

又、表一2にモデル各部に於けるコンクリートひび割れ発生荷重の比較表を示す。



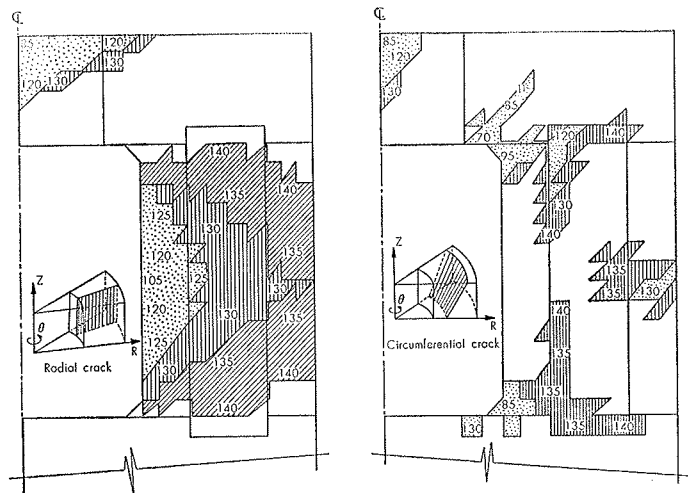
図一11 荷重—変形曲線：側壁中腹位置半径方向変位



図一12 荷重—変形曲線：トップスラブ中央鉛直方向

ひび割れ発生位置	計算結果	実験結果
壁体内側上部隅角部	70	90
壁体内側S/Gキャビティ部中腹位置	105	100
壁体内側下部隅角部	85	90~100
トップスラブ中央外側	85	120
壁体外側中腹位置	115	120

表一2 コンクリートひび割れ発生内圧 (kg/cm²)



図一13 コンクリートひび割れ進展図

図一14は各荷重段階に於けるモデルの変形分布を示したものである。荷重—変形曲線からも推定できるように、内圧が 125 kg/cm² の時点までは、計算結果と

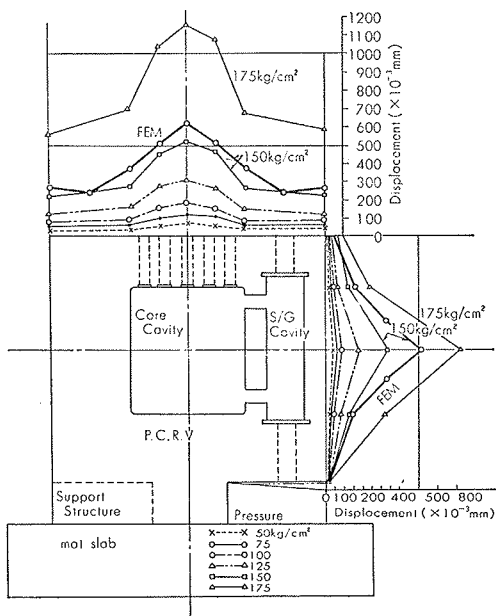
実験結果とは良く一致しているが、 150 kg/cm^2 になるとその性状に差が生じてくる。もっとも、この時点になると、側壁部及びトップスラブ部共ほぼ全域に亘ってコンクリートひび割れが進展してくるので、剛性の低下も著しくなる。従って、変形量に差が認められても問題とはならないし、変形の定量的な比較そのものが無意味であると考えられる。

4. まとめ

以上の結果から次のことが言える。

(1) マルティキャビティ型 PCRVR のような構造物を軸対称な構造物に置換することは可能である。

尚、側壁部に設けられたS/Gキャビティとかトップスラブ部のペネトレーション域に対しては、有効弾性係数の概念を用いればよい。一方、S/Gキャビティ部圧力のように軸対称でない局部荷重に対しても、それが構造物の挙動に与える効果と等しいものを持った補正荷重を求める必要がある。この場合、平面弾性理論などがかなり有効な方法である。



図一14 各荷重段階における変形分布

(2) 上記置換モデルを用い、2次元有限要素法でPCRVRの非弾性挙動を解析した結果、荷重-変形曲線終局耐力、コンクリートひび割れ発生荷重及び性状等計算結果と実験結果とは良く一致し、この方法が充分有効なものであることが認められた。

(3) 回転体置換モデルと有孔平面モデルとを併用して解析すれば、S/Gキャビティ周辺のような局部的な領域の挙動を3次元的に評価することも可能である。

参考文献

- 1) 武田・井元 “有限要素法によるRC部材の弾塑性解析(その1)” 大林組技研所報 No. 7, '73
- 2) 武田・井元 “同上(その2, 3)” 同上 No. 8, '74
- 3) ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE “Section III, Nuclear Vessels, Article 1-9”, '68
- 4) 武田, 他 “プレストレストコンクリート原子炉圧力容器(PCRVR)に関する研究(その1~6)” 建築学会大会梗概集 S. 48. 10
- 5) 武田, 他 “同上(その7, 8)” 関東支部研究報告集 S. 49. 3
- 6) G. N. SAVIN, “Stress Concentration around Holes” Pergamon Press
- 7) Timoshenko, “Theory of Elasticity,” McGraw-Hill
- 8) 林編 “軽構造の理論とその応用上” 日科技連
- 9) D. Langan, et. “The Design of Pod Boiler Pressure Vessels with Particular Reference to Hartlepool Nuclear Power Station,” Proceedings of the 1st International Conf. on SMiRT, '71. 9
- 10) G. E. Rosemeier, “Zur Biegetheorie der dicken Kreiszyllinderschale” Beton-und Stahlbetonbau, '73. 12

(文責: 山口)