

プレストレストコンクリート原子炉压力容器(PCR V)構造物に関する研究

I. 研究計画

PCR V研究グループ

Study on Prestressed Concrete Reactor Vessel (PCR V) Structures

I. Research Program

PCR V Research Group

Abstract

This report describes a research program for PCR V structures. The purpose of the research is to obtain both elastic and inelastic behavior of multi-cavity type PCR V structures at abnormal category or when subjected to strong earthquake motions.

Two series of experiments are planned: one consists of static loading tests for PCR V models, two of 1/20-scale and one of 1/10-scale dimensions. Internal pressures and combination loads of pressure and temperature are adopted for the tests. The other series is vibration and static loading tests for PCR V support structure models consisting of six of a 1/50-scale cylinder type, six of a 1/70-scale star type and two of a 1/15-scale star type. All of the models are simulated to the prototype of an actual PCR V for a 1,000-MWe high-temperature gas reactor.

概要

この報告はPCR V構造物に関する一連の研究の計画内容を紹介するものである。特に大型高温ガス炉用マルチキャビティ型PCR V構造物を対象とし、その事故時内圧、温度等の静的荷重に対する挙動と耐力安全性及び強震時に於ける挙動を弾性域から非弾性域に亘って実験的に把握すると共に、理論解析の面からも評価することを目的として種々のモデルテストを計画した。前者の静的荷重に対する挙動については、1/20モデル2体に依る内圧実験でそのメカニズムを検討し、更に1/10モデルに依る内圧温度組合せ荷重実験でそのメカニズムをより詳細に把握する。後者については、特にPCR V支持構造物に重点を置き、1/50シリンダー型サポートモデル、1/70スター型サポートモデル、1/15スター型サポートモデルでの静加力及び振動実験を行い、その形状効果、初期応力レベル、転倒モーメントとせん断力の割合等を考慮の上、動的挙動のメカニズムを把握するものである。

1. まえがき

プレストレストコンクリート原子炉压力容器(PCR V)は原子炉及び蒸気発生器、ガス循環機等を含む全ての一次冷却系を格納する構造物である。又、それは原子炉一次冷却材の圧力バウンダリーとしての機能を持つことを要求されると共に、ガス流量制限器の如き1次冷却材圧力バウンダリーを補助する工学的安全設備と組合わされ、そのシステム全体の安全性をより確実なものとするように要求される。この為、PCR V構造物についての設計では、それに附随する原子炉機器系の機能保全という面からも、その構造物の寿命期間中に予測されるあらゆる荷重要因に対し構造物そのものの耐力安全性を確認するだけでなく、それ等の荷重に対する挙動、特に事故時及至地震における挙動を把握することも重要な課題となる。

PCR Vの形状としては、これまでガス冷却炉など

で採用されてきたのは円筒形のような本質的には力学上単純なものが主流を占めてきた。しかし、原子炉一基当りの出力の大型化に伴い、PCR Vの形状自体も次第に複雑化する傾向がある。英国で現在建設中のHartlepool原子力発電所の出力62万5000Kweの新型ガス冷却炉用PCR Vとか、米国における出力110万Kweクラスの大型の高温ガス冷却炉(HTGR)用に計画されているPCR Vの形状は、ポッドポイラー型とかマルチキャビティ型と言われるもので、炉心及び炉心構造物を内蔵するコアキャビティを囲う周壁部に、蒸気発生器とかガス循環機のような一次系機器用のキャビティを分散配置したもので、かなり複雑なものとなっている。

又一方、耐震設計の上で重要な構造要素の一つであるPCR V支持構造物についても、最近米国では0.5~0.7Gというような高震度の設計地震荷重を想定する動きがあり、このような要求からもPCR V本体及

び基礎スラブと一体となったものを計画するようになって来た。

PCRVR 構造物に関するこの一連の研究は、大型 HTGR 用 PCRVR 構造物を対象とし、その事故時及至地震時における力学的挙動を弾性域から非弾性域に亘って実験的、理論的に把握すると共に、耐力安全性を確認することを目的とするものである。

2. 研究項目

内圧のような荷重に対する PCRVR 構造物の挙動に関係する主な要因を考えると、下記のようになる：

- (1)PCRVR 形状……応力・変形状
- (2)支持構造物形状……応力・変形状、拘束効果
- (3)材料……力学的特性
- (4)初期プレストレス…コンクリートひび割れ
- (5)ライナー…圧力バウンダリー機能

これ等の要因が組合せられて、構造物全体の挙動が決定される。

又、地震荷重のような動的荷重に対する挙動に関するものとしては、構造物の重量、剛性、及び減衰定数等が挙げられる。PCRVR それ自体は非常に剛な構造物であり、このような構造物の振動系全体の挙動を考えた場合、PCRVR に相当する部分を剛体とみなすことができる。反面、支持構造物は、その形状寸法が機器配管類のレイアウトからの制約を受け一方、前述のように大きな地震入力が見込まれる傾向にある上、PCRVR 部の重量が 40,000~50,000 t になるので、弾性限界を越えた応力状態になることも予測される。これから支持構造物の力学的性状、特に履歴性状が動的挙動解析の面で重要な要因となる。この他、プラントシステム全体の地震時挙動では、構造物と地盤との相互作用の問題も無視できない。

他方、理論解析の面では、有限要素法等の近似理論解析法の発展に伴い、複雑な構造物に対してもかなり詳細な解析が可能となってきたが、PCRVR 構造物のような 3次元コンクリート構造物の非弾性挙動解析法については未だ初歩的な域を脱していない。特に、構造物のモデル化、材料の力学的性状等に関しては、理論解析上種々の仮定条件を設定している為、その妥当性を確認する必要がある。

以上の各要因を考慮して、次に示すような、研究計画を立案した。

i. PCRVR モデル内圧実験

(1)シングルキャビティ型 PCRVR モデル内圧実験

PCRVR 構造物のようなコンクリート構造物の非弾性挙動解析では、その構造物の形状効果だけでなく、

初期応力状態、主要材料の力学的特性が重要な要因となる。この為、理論解析の面でモデル化が容易となる円筒型モデルでの実験を計画し、内圧に対する力学的諸性状を実験的に把握すると共に、その理論解析法の妥当性を検討することとした。

(2)マルチキャビティ型 PCRVR モデル内圧実験

このモデルのプロトタイプとして設定したものは、100万KWe クラスの HTGR 用マルチキャビティ型 PCRVR である。モデルの形状寸法はプロトタイプの約1/20としている。又、PCRVR 支持構造についても、プロトタイプのそれに合せ、放射状に配置された6枚の壁からなるスター型のコンクリート構造物で、PCRVR 本体及びコンクリート基礎スラブと一体になったものとしている。プレストレス方式についても同様に、PCRVR 側壁の外周に沿って一定の張力を与えたPC鋼線を巻き付けるワインディング方式と、鉛直緊張材を用いてプレストレス力を与える方式を併用している。これについてはシングルキャビティ型モデルでも同じである。

この実験では、コアキャビティ以外に設けられたSGキャビティ等の全体の挙動に及ぼす形状効果、又支持構造物の拘束効果等を弾性域から非弾性域に亘って把握し、プロトタイプ PCRVR の内圧に対する力学的諸性状を定性的及び定量的に評価しようとしている。

同時に、このように複雑なコンクリート構造物の非弾性挙動についての理論解析上のモデル化の問題、及びその解析法の妥当性について検討する。

尚、表1~表3にシングルキャビティ型 PCRVR モデルとマルチキャビティ型 PCRVR モデルの主要諸元比較表を示す。

形 状		断 面 積			
		マルチキャビティ	シングルキャビティ	マルチキャビティ	シングルキャビティ
PCRVR 外全高	150.0 135.0	150.0 125.0	PCRVR 全体	17,660.0	17,660.0
コアキャビティ内径高	62.0 69.0	62.0 69.0	コアキャビティ	3,020.0	3,020.0
S/Gキャビティ内径高	20.0 79.0	-	S/Gキャビティ(6×As)	314.0 1,890.0	-
スラブ厚 トップボトム	28.0 38.0	28.0 28.0	全キャビティ	4,910.0	3,020.0
スタンドパイプ	φ-6.0 h-28.0 N-19	-	筒 壁	12,750.0	14,640.0
S/Gキャビティダクト	φ-7.6	-	トップスラブ部 ペネトレーション	28.3×19 =540.0	-
内 壁 厚	44.0	44.0			
サポ-ト高	23.0	-			
モデル全高	158.0	-			
サポ-トの型 PCRVRサポ-ト状態	スター 弾性固定	シリンド- フリー			

表—1

プレストレス	マルチキャビティ	シングルキャビティ
鉛直方向プレストレスカ		
側壁外部 (oP)	150 ton	150 ton
側壁内部 (iP)	279	279
S/Gキャビティ部 (sP)	200	-
全鉛直方向プレストレス (TP)	629	429
平均プレストレス荷重		
TP/全側壁面積	49.3 kg/cm ²	29.3 kg/cm ²
TP/全キャビティ面積	128	142
iP/コアキャビティ面積, oP/コアキャビティ面積	92.4 49.7	92.4 49.7
sP/全S/Gキャビティ面積	106	
円周方向プレストレス荷重		
トッスラブ部分	(kg/cm ²) 47.6	(kg/cm ²) 47.6
シリンダー上部	h/3 36.4	h/3 36.4
シリンダー中央部	h/3 46.3	h/3 46.3
シリンダー下部	h/3 36.4	h/3 36.4
ボトムスラブ部分	38.8	47.6

表-2

鉄筋	マルチキャビティ	シングルキャビティ
鉛直方向		
側壁外部	D2.9 @ 30 Dbl	D2.9 @ 30 Dbl
側壁内部	D2.9 @ 20	D2.9 @ 20
S/Gキャビティ部	6 × (18-D2.9)	-
S/Gクロスダクト部	6 × (4-D2.9)	-
円周方向		
側壁外部	D2.9 @ 25	D2.9 @ 25
側壁内部	D2.9 @ 20	D2.9 @ 20
S/Gキャビティ部	D2.9 @ 80	-

表-3

(3)マルチキャビティ型 PCRV モデル総合試験

このモデルでは、前記のものより更にプロトタイプに忠実なモデル化を行い、縮尺率も1/10とする。実験は次の3種類の荷重で行う。その1つは内圧と温度を組合せた荷重である。残りの2つはジャッキに依る水平載荷と起振機に依る動的載荷である。尚、最終的には内圧で破壊させる。これに依り、マルチキャビティ型 PCRV 構造物の使用時荷重条件に対する挙動、事故時の過圧力に対する挙動、及び地震時挙動を総合的に評価すると共にその安全性を確認する。

ii. PCRV 支持構造物の振動実験

(1)シリンダー型サポートモデル実験

PCRV 本体の地震荷重に依る応力は、他の内圧、温度、プレストレス力のような荷重に依る応力に較べ、設計上大きな問題にはならないと思われる。しかし、支持構造物を含めた PCRV 構造物全体の地震時における挙動については、前述のように、支持構造物部分に非弾性域が発生した時の挙動を無視できない。PCR V 本体、及び基礎スラブと一体となったコンクリート支持構造物の動的な非弾性挙動には、その履歴性状が大きな影響を及ぼす。換言すれば、その形状効果だけでなく初期応力状態等と密接な関係を持っている。この為、初期応力レベル、支持構造部高さ、剛性等を変化させた解析上単純な中空円筒形サポートモデルに依り静加力実験と振動実験を行い、弾性域から非弾性域に亘る動的な挙動を把握する。

(2)スター型サポートモデル実験

初期応力レベル、鉄筋比、及び動的挙動時の転倒モーメントと剪断力の大きさの比率を、プロトタイプ PCRV 支持構造物に合せた1/70の縮尺モデルで静加力実験及び振動実験を行ない、スター型サポートの動的挙動を巨視的に把握する。なお、(1)(2)とも、PCR V 部を剛体とみなし、単なる質量として扱っている。

(3)スター型サポートモデル静加力実験

モデルの形状寸法をプロトタイプの1/15とし、断面内の応力分布等の形状効果及び変形状等をより詳細に把握し、プロトタイプ支持構造物の弾性域から非弾性域に亘る挙動及び耐力安全性を確認する。

iii. コンクリート材料試験

コンクリートの、高温下での特性、多軸応力状態での特性、さらに、高温多軸応力下でのクリープ特性などについての試験を長期間継続的に行い、コンクリート材料の力学的性状を評価する。

3. 研究工程と分担

図1. に示すような研究工程でこの一連の研究を行っている。尚、今回の報告は、それらのうちシングルキャビティ型 PCRV モデル内圧実験と、シリンダー型サポートモデル実験に関するものである。以下数次に亘って報告する予定である。

	1972	1973	1974
内圧実験	1/20 SINGLE CAVITY TYPE		
	1/20 MULTI CAVITY TYPE		
支持構造物実験	1/50 CYLINDER TYPE		
	1/70 STAR TYPE		
	1/15 STAR TYPE		
コンクリート実験	CONCRETE CREEP		
総合実験	1/10 OVERALL MODEL		

図-1

PCR V 研究グループ

技術研究所 中川恭次, 寺沢一夫

構造研究室 武田寿一, 竹本靖, 山口恒雄,

伊藤雅保 (解析担当), 井元勝慶 (同前)

鈴木哲夫 (振動実験担当), 多田利正 (内圧実験)

振動研究室 渡辺清治, 若松邦夫 (振動実験)

材料研究室 高橋久雄, 中根 淳,

川口 徹 (材料試験)

原子力室 松本 崇, 戸村英正,

宮本明倫 (解析)