

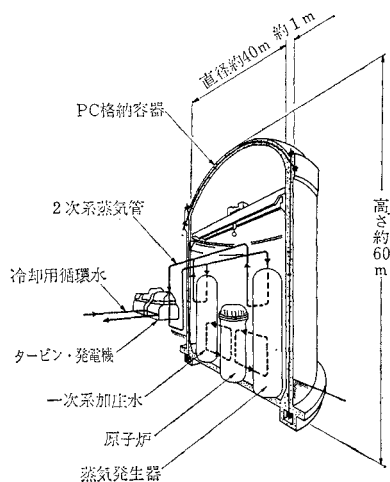
プレストレストコンクリート原子炉格納容器 の実験報告

大野 大明*・渡部 威**
長野 秀二郎***・松井 豊****

1. まえがき

原子発電も実用期に入り、すでに世界各国で多くの発電所が運転を開始している。さらに近年は、技術の向上とともにその出力規模が急ピッチで大型化しつつあるがユニットが大きくなるに伴い、ガス冷却型の原子炉圧力容器や軽水炉の PWR 型の格納容器などは、P C 構造のものが数多く用いられるようになってきた。

今回報告をする格納容器とは、通常は圧力や高温を受けることのない建築物であるが、万一の原子炉の事故時には放射性物質を含む高温高压の水蒸気が放出されるので、その漏洩を防ぐ重要な構造物となる。従来は鋼板製で、それ自体が耐圧気密の構造体をなし、この外部に放射線しゃへいの目的でコンクリートの円筒壁を設ける形



図一 P C 格納容器の概念図

- * 正会員 関西電力(株) 建設部長
- ** 正会員 関西電力(株) 建設部土木課副長
- *** 正会員 新日本技術コンサルタント(株) 土木第2部長
- **** 正会員 新日本技術コンサルタント(株) 土木第2部ダム構造室次長

表一 実際の格納容器の諸元比較

諸元	発電所名	Three Mile Island	高浜発電所
電気出力 (MW)		876	826
形式		P C製	鋼製
内径 (m)		39.5	38.4
全高 (m)		57.6	80
壁厚 (板厚) (mm)		1 060	38
設計内圧 (kg/cm ²)		3.9	2.4
設計温度 (°C)		138	130
実内容積 (m ³)		約 58 000	約 70 000

式のものを用いられ、わが国でも採用されている。しかし、最近では 800 MW 級あるいはそれ以上の大容量のものが計画され、鋼板厚の増大により現場溶接に対する熱処理が必要となるなどの問題が生じ、施工性・経済性の観点から、諸外国では大ユニットのものに P C (あるいは R C) 製のものを採用する例が多くなってきた。P C 格納容器の一例として PWR 型発電所の概念図を図一に、鋼製と P C 製の実例諸元を表一に示した。

このようなすう勢から、国内においても P C 圧力容器や格納容器の構造解析の開発、実験による検討、技術基準の確立などの研究が各方面で活発化している。関西電力でも第一段階として格納容器の設計施工上の諸問題を取上げ、予備的な基礎研究に続いて、ほぼ実物と相似の大型模型を製作し、種々の荷重条件を模擬した一連の実験を行なって、解析手法の開発とその実証につとめてきたが、このほど破壊実験を残して一段落したので、これらの実験の概要と結果の一部を以下に報告する。

2. 予備実験

全体形状の模型実験を実施する前に、予備実験を行なって設計施工上の基礎的な問題を解決しておくことが必要である。そこで、各種解析方法の研究を進めるとともに、他方では部分的あるいは小型の模型による実験的解明や、解析方法の妥当性の裏付けを行なった。この予備実験のおもなものは次のとおりであった。

① 多数の tendon を有する扇形状供試体への prestress (以下 P S と略す) 導入時の挙動。

② tendon のグラウト効果を比較するため、その付着の有無と、ひび割れ発生や破壊荷重との関係。

③ 円筒形容器構造に円周方向の P S を導入した場合の解析手段と実験的研究(石こう模型, P S は巻線方式)。

④ 円環模型への P S 導入と内圧載荷時の挙動。

以上のうち円環模型を用いた実験について概要を示すと次のようである。この供試体は格納容器の円筒部の水平断面の一部を想定したもので 1 周 6 か所の tendon 定着用バットレスと、2 か所の開口部を有し、円周方向の tendon は 1 周 3 分割のものを 図-2 のとおり配置した。

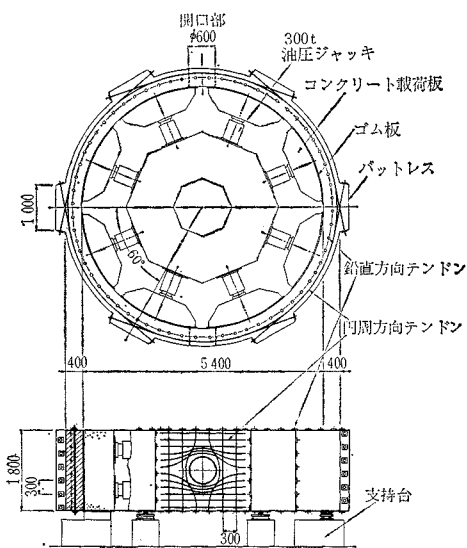


図-2 大型円環模型一般図

この実験の目的は円環形状に対する tendon 配置と定着方法を選定し、開口部周辺での tendon の迂回方法など施工上の問題検討と、開口部での応力状態、ならびに内圧により破壊に至るまでの応力分布の変化過程を測定し、かつ tendon のグラウトによる付着の有無が模型の強度特性にどのような差を与えるかを検討しようとしたものである。模型に導入した圧縮応力は平均 41 kg/cm^2 である。また、内圧に相当する荷重の方法は、放射状に配置した 16 台の 300 t ジャッキを用いて、荷重が平均して伝達するようコンクリート板を介して与えた。この模型では、ジャッキ 1 台当り 115 t (内圧 6 kg/cm^2 相当) のとき、P S により与えられた圧縮応力が打消される。

この実験を通じて次のことが確認された。

① 定着端では、座金を介して P S 導入時約 178 kg/cm^2 、破壊実験終期約 267 kg/cm^2 の局部的圧縮応力が作用したが、定着端は異常なく耐えた。

② コンクリートにひび割れが発生するまでは弾性体

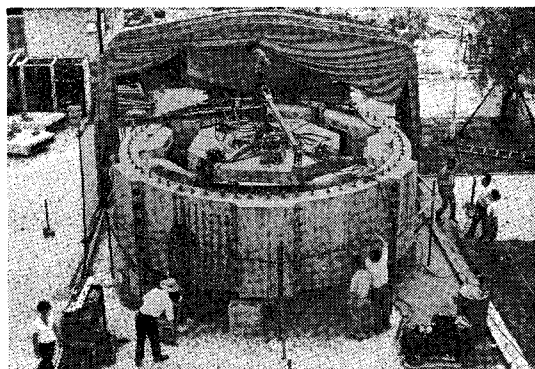


写真-1 円環模型の破壊実験

としての挙動を示し、解析的には非常に取扱いやすい。コンクリートには、 $10 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ の引張応力が生じた時点でひび割れが発生し始めたが、その原因となる荷重を除去すればほぼ完全に閉じてしまい、再びある程度まで弾性体としての性質を回復する。

③ グラウトにより tendon に付着を与えた場合、ひび割れの集中的な発生や増長を防ぎ、最終的な破壊に対する抵抗力を強めた。しかし、弾性領域内での挙動は付着の有無により、ほとんど差が認められなかった。

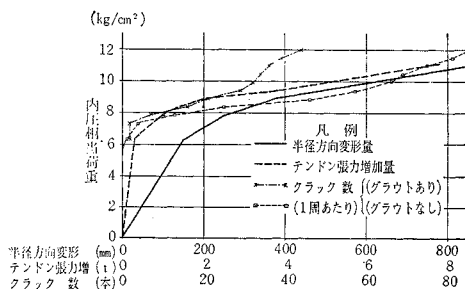


図-3 円環実験の内圧による模型の挙動

図-3 はジャッキ荷重から換算した内圧と、模型の半径方向変形量、 tendon 張力の増加量、外側表面に発生したひび割れクラック数の増加を示す。模型の下半分の tendon はグラウト付着を与え、上半分はグラウトを行なわなかったものである。なお、 tendon システムには定着部がコンパクトなねじ止め方式で、緊張作業が簡便な SEEE 方式のものを用いたが、とくに難点もなく目的を達することができたので、次の大型模型にも採用することとした。

3. 大型模型実験の模型概要

(1) この実験の目的

この実験は先に実施した予備実験をもとに、総合的な

挙動を確認するほか、部分模型では不可能な施工上の諸問題の検討や温度実験、振動実験などを行ない、最終的に内圧による破壊実験の結果をまわって、構造物の総合的な安全性の確認を得ようとするものである。このため、実物の施工方法にほぼ相似させるため壁厚は 40 cm とし、一方、薄肉理論の成立つ限度は半径/厚さ=10 と考えて、内径を 8 m とした。これは実物の 1/5~1/6 に相当し壁厚とライナーの厚さが大きい場合は、ほとんど実物に相似している。その形状は 図-4 のとおりで、主要諸元は 表-2 のとおりである。

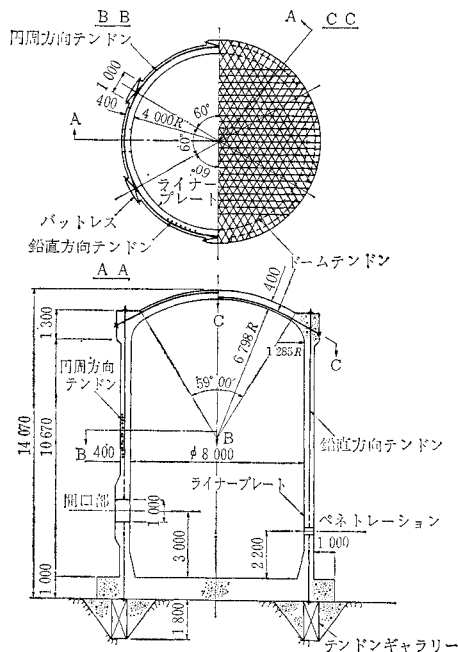


図-4 大型模型一般図

表-2 大型全体形状模型の諸元

項目	諸元	摘要
全高	14.070 m	基礎版を含む
円筒部内径	8.000 m	
壁厚	0.400 m	開口部、リングガーダー部は増厚
ドーム主半径	6.798 m	
開口部直径	1.000 m	対称位置に2か所
ライナープレート	6 mm 厚	SS-34 材
PC テンドン	SEEE 方式	F-50 破断強度 52 t/本
コンクリート設計強度	350 kg/cm ²	
模型縮尺	約 1/5	出力 800 MW 級

この実験のおもな内容は、① 施工法の検討、② P S 導入時の挙動、③ 内圧による挙動、④ 定常的（運転時の内外温度差）あるいは非定常的（事故時）な温度を与えたときの挙動、⑤ 動的挙動、⑥ 破壊に至るまでの挙動、などである。

(2) 設計条件と解析手法

現在、P C 格納容器の技術基準は国内外のいずれも制定されたものはなく、最近、アメリカ合衆国の機械学会 (ASME) とコンクリート協会 (ACI) の合同で詳細な基準案が作成され公表されたのが注目される。今回の模型の設計にあたっては、構造上の点について、これらに関連する基準（あるいは案）や合衆国内の設計実例などを参考とした。

おもな模型の設計条件は

死荷重 (D) : 格納容器の自重

設計内圧 (P) : 4 kg/cm²

設計温度 (T_0) : 内外温度差 20°C

事故時温度 (T_a) : 100°C

地震力 (E) : 地盤加速度 300 gal

荷重の組合せ

$$C_D = 1.0 D + 1.0 P + 1.0 (T_0 + T_a) + 1.0 E$$

$$C_U = 1.0 D + 1.5 P + 1.0 (T_0 + T_a)$$

設計荷重時 (C_D) においては、膜応力はすべて圧縮応力となるようにし、局部的な縁引張応力は鉄筋で負担させる。

また、破壊荷重時 (C_U) では、ストランドの応力が降伏点に達するよう計画した。

P C 格納容器の構造解析は、シェル理論、有限要素法など種々の手法が採用されているが、今回の模型の設計には全体的な応力状態について、薄肉シェル理論を適用し、リングガーダー部やベースとの隅角部および開口部などについては有限要素法を用いて検討した。これらの検討には膨大な計算を必要とするので、電子計算機により実施し、このため次のようなプログラムを用意した。

- 軸対称薄肉シェル理論による容器構造物の応力解析
- 軸対称有限要素法による応力解析
- シェル理論有限要素法による応力解析
- 二次元有限要素法による応力解析
- ドーム部の P S 力の分布荷重への変換
- 非定常温度伝導による温度分布解析
- 質点法による容器構造物の動的解析
- 孔周辺の応力分布に関する弾性理論による応力解析

(3) 模型の製作

今回は、できるだけ実際に用いられている施工方法を踏襲し、建設工法に関する問題点も検討することを試みた。模型の設置場所は、振動実験のことも考慮して岩盤上に基礎を求めて、京都府宇治市郊外にある喜撰山ダムのロック採取場の跡地を利用することとした。

模型のライナープレートは現場に搬入できる程度まで工場において加工溶接し、現地に搬入架設ののち、これ

を内側の型枠にも利用してコンクリートを1.5m リフトに分けて打設した。このライナーは実物では気密保持のため重要な役目を有しており、厳密な漏洩テストが行なわれるが、実験でも水圧を保持する必要があるので、簡略化した溶接線の試験を行なった。開口部周辺の tendon 配置は迂回させ、さらにコンクリート増厚と鉄筋により補強した。ドーム部は120°で交差する3方向の tendon によりドームをカバーするよう配置し(図-4 参照)、中立面に緊張力が集まるよう2方向のものについては交互に上下にはさむ配置としたため5層となった。ベ

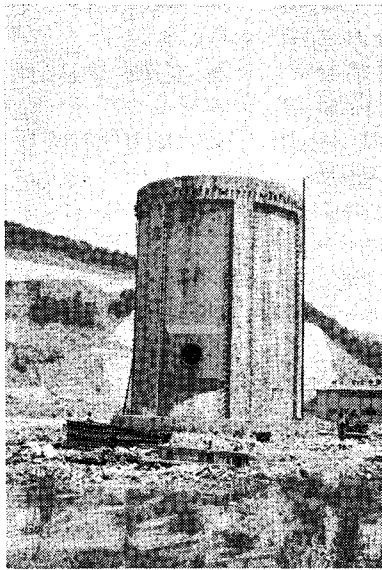


写真-2 完成した PC 格納容器の模型

表-3 模型に用いたコンクリートの特性値

種 別	代 表 値
ク リ ー プ	図-5 参照
乾 燥 収 縮	600×10^{-6}
熱 膨 張 率	$11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
熱 伝 導 率	2.5 kcal/m·h·°C (Niven 法)
熱 拡 散 率	0.004 m ² /h (Glover 法)
圧 縮 強 度	$\sigma_{28} = 350 \text{ kg/cm}^2$
静 弾 性 係 数	$E = 2.6 \sim 2.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

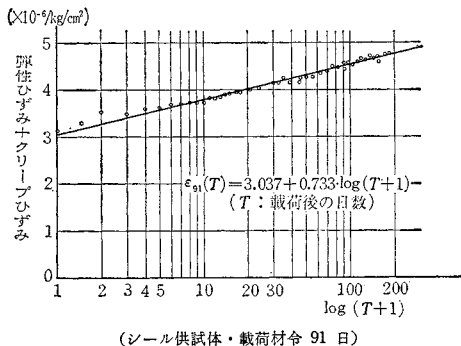


図-5 模型に用いたコンクリートのクリープ特性

ース部は鉄筋コンクリート床版として設計し、プレストレスは導入しない。模型の製作期間はライナーの材料手配と加工に約3か月、現場のライナー据付けとコンクリート工事に4か月ほどを要した。

模型材料の主要特性は表-3に示すとおりである。

(4) 主要測定計画

この実験では、多くのテーマを取上げて実験を予定したので、測定計器の選定および配置については予備実験の資料などを参考にして慎重に行なった。

測定対象は主としてコンクリート内部のひずみであるが、試験が長期にわたるのでカールソン型ひずみ計を主体とし、それに加えて表面貼付およびモールド型の電気抵抗線式ひずみ計を併用した。その他、 tendon の緊張力測定にはロードセルを用い、温度実験箇所の壁体内にはサーミスター式温度計を埋設して測定した。これら諸計器の一覧表を表-4に示す。

表-4 主要測定計器一覧

計器種類	カールソン型ひずみ計		抵抗線式ひずみ計 (貼付)		抵抗線式ひずみ計 (モールド型) 五成分計	温度計 (サーミスター)	ロードセル	センサーホール型	備 考
	一成分	二成分	一成分	三成分					
模型一般部	47	100		補					補: 補助的使用
ベース隅角部		12							
リングガード部	2	10							
開口部周辺部	24	16		補					
温度実験箇所			20		15	27			
ライナープレート内面			3	19					
tendon 定着端部								13	代表 tendon にのみ

4. 各種実験の概要

以下にすでに実施した各種実験についての概要を記したが、紙数の関係もあり主要結果にしぼった。また、その詳細については、別途機会をみて報告することとした。

(1) PS 導入実験

a) 実験方法

PS 導入作業については、導入順序の解析を行なってその安全性を確認し、また導入作業の研究の立場をも配慮のうえ、その導入順序を次のように決定した。まず、鉛直方向 tendon を1本おきに最終緊張力(30 t/本)の半分(15 t/本)まで緊張し、続いて同様の方法でドーム tendon、円周方向 tendon の順に緊張したのち、さらに

テンドン緊張力：30 t/本

コンクリート線応力	外側	内側
実測値	—	---
シェル理論による計算値	—	---
有限要素法による計算値

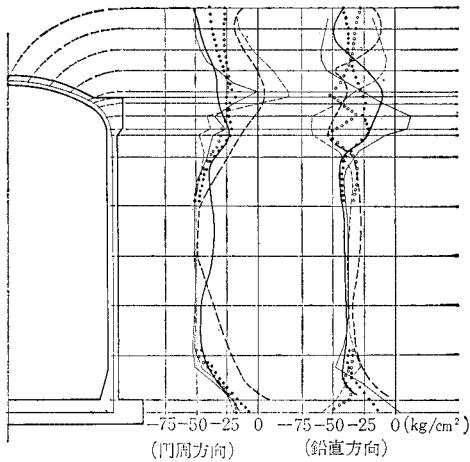


図-6 PS 導入実験応力分布

残した1本おきのテンドンについても同様手順でPS導入を行なった。これで模型全体について設計値の半分のPS力を導入したこととなり、この後さらに最終緊張力まで各テンドンを前と同じ順序で緊張し、全体のPS導入を完了させた。各段階のPS導入時点でひずみ計の測定を行ない、PS導入が完了するまでこれを繰り返した。また、実際の緊張力およびその損失は代表テンドンに取付けたロードセルにより検定を行なった。

b) 実験結果

前述したようなPS導入について、各段階での測定値が得られ詳細なPS導入過程が確認できた。導入作業完了後の模型の応力状態と各種解析結果との比較を図-6に示した。リングガーダー隅角部内側の円周方向にわずかな引張応力が生じているが、これは計算からも予測されたもので、実測値のほうが小さい。これはドーム曲率の変化点で局部的なものと考えられ、鉄筋で十分補強することができる。なお、PS導入中のライナープレートに座屈の徴候は認められなかった。

テンドンに与えた緊張力の摩擦損失は、片引きの鉛直方向テンドンの固定端部で平均5%であった。円周方向テンドン、ドームテンドンに関しては両引きであり、その緊張力平均損失は、円周方向テンドンで5.8%、ドームテンドンで8.8%であった。

なお、われわれがこれまでにやってきた予備実験の結果によれば、設計内圧程度まででは

グラウトの有無による差がほとんど見られなかったので今回の模型実験では、テンドンにグラウトによる付着を与えていない。

(2) 内圧実験

a) 実験方法

実験は模型内部に充水し、水圧により载荷を行ない、そのときのひずみと変形を測定した。

b) 実験結果

測定は、内圧 2 kg/cm²、4 kg/cm² との2段階に分け、おのおの3回の加圧減圧を繰返し測定を行なった。各測定値には、それほどばらつきは見られず良好な結果が得られた。実測結果と各種計算結果との比較は図-7に示したとおりで、模型壁体の応力状態に著しい無理はなく、またベース隅角部、リングガーダー部分にも過大な応力集中は生じていない。内圧载荷時のライナープレートのひずみ分布も図-7の右端にあわせ示したが、コンクリート内側表面ひずみと、よく対応している。これは、ライナープレートとコンクリートが一体的な挙動をしていることを示すものである。

(3) 非定常状態(事故時)温度実験

この実験は、原子炉事故時における内部圧力上昇と同時に生ずる、瞬間的な温度上昇によるコンクリートおよびライナープレートの挙動を究明しようとするものである。実物における事故時の格納容器内の温度と圧力変化の様相は、図-8に示されるように、事故発生後3~10

内圧：4 kg/cm²

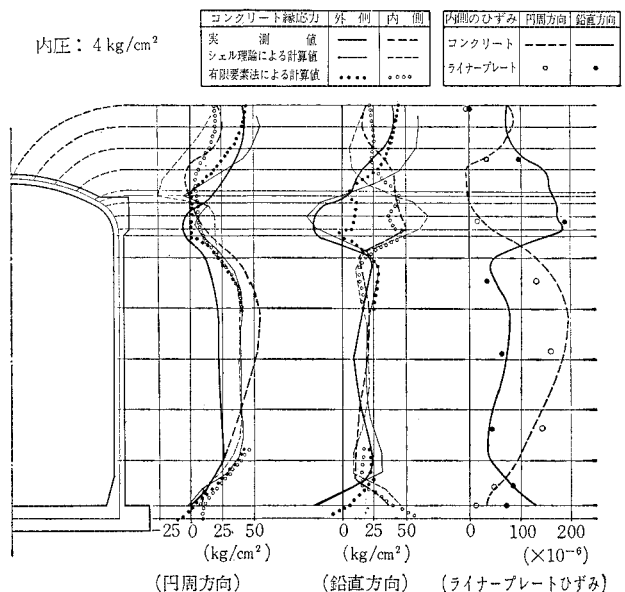


図-7 内圧実験応力分布とライナーひずみ分布

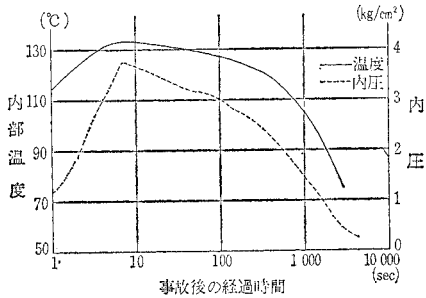


図-8 事故時の温度-内圧遷移曲線の一例

秒で約 130~140°C に達し、以降この高温が 1000 秒程度継続する。この継続時間は、本模型で 3~4 分に相当する。したがって、模型では約 3~4 分間熱湯を模型内面の特定部分に噴射させ、コンクリート壁体内およびライナープレート表面の時間的ひずみ変化と温度変化を記録した。測定については、温度記録はサーミスター温度計、ひずみはモールド型抵抗線ひずみ計を使用した。図-9 に示したのは熱湯噴射後 30 分間の温度履歴およびコンクリート、ライナープレートの拘束ひずみ変化の一般的傾向である。コンクリートの内側部分では、温度上昇に伴い引張ひずみとなり、以降圧縮ひずみに反転している。これは内部に急激な温度上昇が与えられた場合、早い時期に熱伝導のよいライナープレートに温度上昇に伴う拘束による圧縮ひずみが発生し、熱の伝導しにくいコンクリート部分には、それをキャンセルするために引張ひずみが発生することによるものである。また、中央部および外側部分にも引張ひずみが継続して発生しており、配筋計算をする際に考慮すべき点となろう。ライナープレートの場合、熱湯噴射直後 500×10^{-6} の圧縮ひずみが発生しているが、実物の場合、内圧増加によってライナープレートには引張ひずみが同時に発生するので座屈などに対しては安定となる。

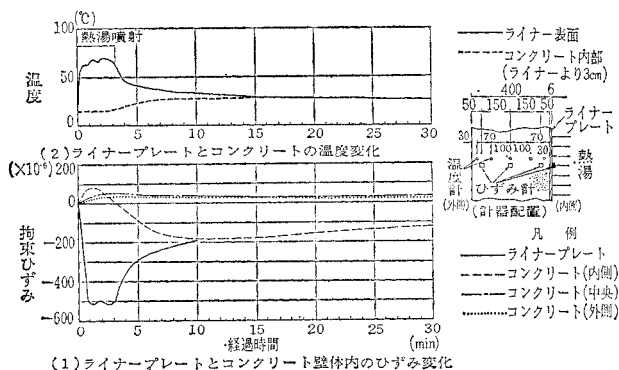


図-9 非正常温度実験結果の一例

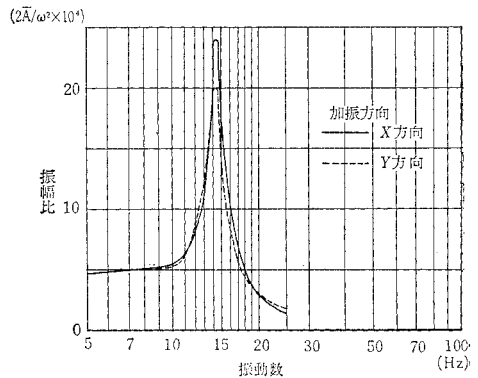
(4) 振動実験

原子炉格納容器の安全性を検討する際、容器構造の耐震性が大きな問題となる。本振動実験においても格納容器の設計資料として振動特性を求めることが目的の一つである。今回は模型のドーム頂部に起振機（最大起振力 1 t, 0~40 Hz）を据付け、強制振動を与えて模型の振動特性を実測した。

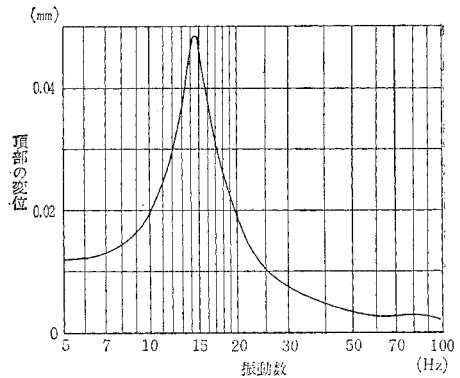
起振力は、互いに直角な X, Y の 2 方向に水平交番力として与えた。X 方向とは、その鉛直面内に開口部を含む方向、Y 方向とはそれに直角な方向である。

以下に主要測定結果について述べる。

① 一次固有振動数は X 方向で 14.5 Hz, Y 方向において 14.3 Hz で、両方向とも大差がない。



(1) 実測結果



(2) 計算結果

図-10 模型の共振曲線

② X, Y 方向の共振曲線は、図-10 (1) に示すとおりで、別に 40 Hz まで調べたところ、二次固有振動数は認められなかった。

③ 減衰係数は、共振曲線から試算すると、X 方向に対して 4.5%, Y 方向に対して 5.9% の値が得られた。

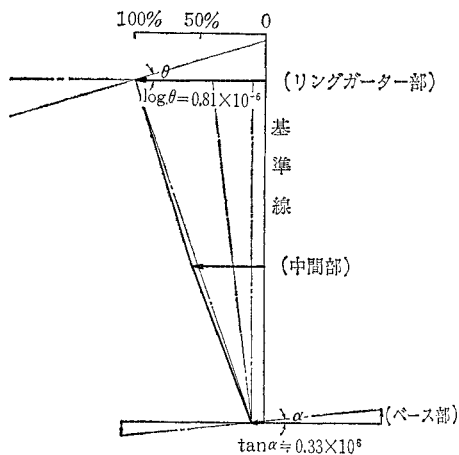


図-11 変位モード

④ 共振点における鉛直断面内のモードを 図-11 に示す。これから基礎のスウェイおよびロッキングの影響が明らかであり、また構造物の変形モードからは、曲げのみならず、せん断変形の要素が大きく作用していることが推測される。

⑤ 構造物のねじれ振動および円環断面の変形によって生じる副次的な振動は、頂部および側部の主要点においてチェックしたが、それらは今回の実験ではまったく無視できる程度のものであり、この模型は加振方向のみ並進運動をすることが認められた。

さらに、この振動実験に対して質点法による動的解析を実施した。ここに用いた基礎のスウェイおよびロッキングを考慮するためのばね定数の決定は Vogt の式により、また構造物のコンクリートの弾性係数は 300 000 kg/cm²、減衰係数は 5% とした。基礎の弾性係数値としては、模型の下の岩盤で実施したジャッキ試験の結果から 30 000 kg/cm² の値を用いた。

図-10 (2) は頂部に 1t の最大起振力を与えた場合の質点法による動的解析による模型構造物の共振曲線を示し、一次固有振動数は 14.5 Hz で実験で得られた値とほぼ一致している。

5. ま と め

P C 格納容器構造物の安全性の最終的な立証は、非弾性領域での構造物の挙動、および破壊実験などの結果を待って論ぜられるべきであろうが、その実物への適応性

については、今回までに実施した P S 導入、内圧、温度および振動などの一連の弾性領域内の実験を通じても十分判断することができよう。なぜならば、実際の構造物は、その事故想定時に発生する圧力上昇、温度上昇、あるいはその地域で予想される十分大きな地震作用に対しても、弾性的に挙動するよう設計されるからである。

今回の模型の計画、設計および一連の実験を通じて実際の P C 格納容器に対する貴重な資料を得ることができた。

模型製作上から得た施工上の詳細な経緯については省略したが、ライナーの製作と架設、コンクリートの打設、テンドンの設置および P S 導入などにおいて、基本的なトラブルを生じることもなく、また 4 kg/cm² (実物でもほぼ同じ大きさ) 相当の内圧時に対しても異常は認められなかった。これらは正しい設計と施工が守られるならば、十分安全な P C 格納容器を製作することが可能なことを示している。

一連の実験を通じて得られた各種の測定データは、P C 格納容器が、種々の外力、すなわち P S 力、内圧、温度、および地震力などに対して良好な状態で抵抗できる構造物であることを示しており、これらの結果は、各種の解析方法で得られた計算結果と照合された。それらは比較的よい対応を示し、現在までに開発された解析方法で十分構造物の安全性の評価と設計が可能であることを示している。

最後に、この研究は関西電力の総合技術研究所、建設部、原子力部、新日本技術コンサルタント(株)の協同で実施したが、この実験のうち振動実験に関しては建設省建築研究所、ならびに材料特性に関しては電力中央研究所のご援助を受け、また研究の計画から実施にあたっては、東京大学国分教授・大崎教授・久保教授、埼玉大学岡本教授、九州大学表教授、芝浦工大藤井教授、秋田大学色部教授、建築研究所中野部長、日本構造橋梁(株)猪股副社長、神奈川県工業試験所戸塚科長などの方々から終始ご懇切なるご指導をいただいた。また、模型の製作にあたっては、三菱重工(株)神戸造船所、大成建設(株)、飛鳥建設(株)、新構造技術(株)などの会社にご尽力を願ひ、鹿島建設(株)から起振機を借用させていただいた。ここに深甚の謝意を表するしだいである。

(1972.7.21・受付/1972.9.13・再受付)

OECD トンネル会議視察団編・OECD トンネル会議の全貌と現場視察報告

1. 体 裁：B5判 406 ページ・タイプオフセット印刷
2. 内 容：I. 概要、II. 会議の内容、III. 勧告書、IV. 会議についての各国の意見、V. 現地視察
3. 頒 価：12 000 円(〒 270 円) ● 頒価と送料をお払込みしだい送本します。