

日本原子力発電敦賀2号機 PCCV の 構造性能確認試験

田	村	誠	也 ^{*1}
河	合	郁	朗 ^{*2}
永	田		薫 ^{*3}
木	村		稔 ^{*4}
武	田	寿	一 ^{*5}
山	口	恒	雄 ^{*6}
中	山	達	雄 ^{*7}

1. まえがき

日本原子力発電敦賀発電所2号機に、プレストレストコンクリート製原子炉格納容器（PCCV）が我が国で初めて採用された。

PCCV は、耐圧性、耐漏洩性、耐震性に加え、遮へい機能を要求される重要な構造物であり、高度の安全性を確保しなければならない。このため、我が国への PCCV の導入にあたっては、これまでに各種確証試験^{1)~5)}を実施し、コンクリート格納容器の構造性能を把握するとともに、設計の信頼性を確認してきた。加えて、今回、実機における耐圧・漏洩率試験に並行して変位、ひずみの測定およびひび割れの観察を行い、PCCV の構造健全性を確認する構造性能確認試験を実施した。このうち、変位測定は電気事業法による使用前検査のなかの耐圧検査の一部として実施した。

このため、敦賀発電所2号機 PCCV では、設計の段階から SIT 試験計画が立案・検討され、1982年10月の着工以降、工事の進捗に合わせ、各種検出器を埋設し、試験に備えてきた。本稿は、工事着工から約3年半で完成した敦賀発電所2号機 PCCV の SIT について述べたものである。試験は、1986年2月16日から25

日までの10日間にわたり、耐圧試験（機器系）および全体漏洩率試験（ILRT）と同一の加圧・減圧工程のなかで実施した。

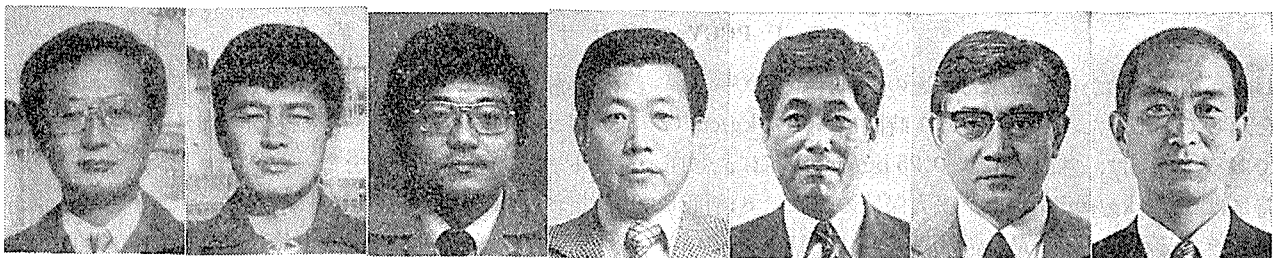
2. 原子炉格納容器の概要

PCCV はプレストレストコンクリートの半球ドーム（内径 43.0 m、壁厚 1.1 m）と円筒シェル（内径 43.0 m、高さ 43.0 m、壁厚 1.3 m）および鉄筋コンクリートの基礎版（厚さ 8.0 m）から構成された構造体で、その内表面は鋼製ライナで内張りされている。基礎版には逆 U テンドン定着用のテンドンギャラリが、円筒シェルと半球ドームにはフープテンドン定着用の3つのバトレスが、それぞれ設けられている。PCCV の形状寸法概要を図-1に示す。

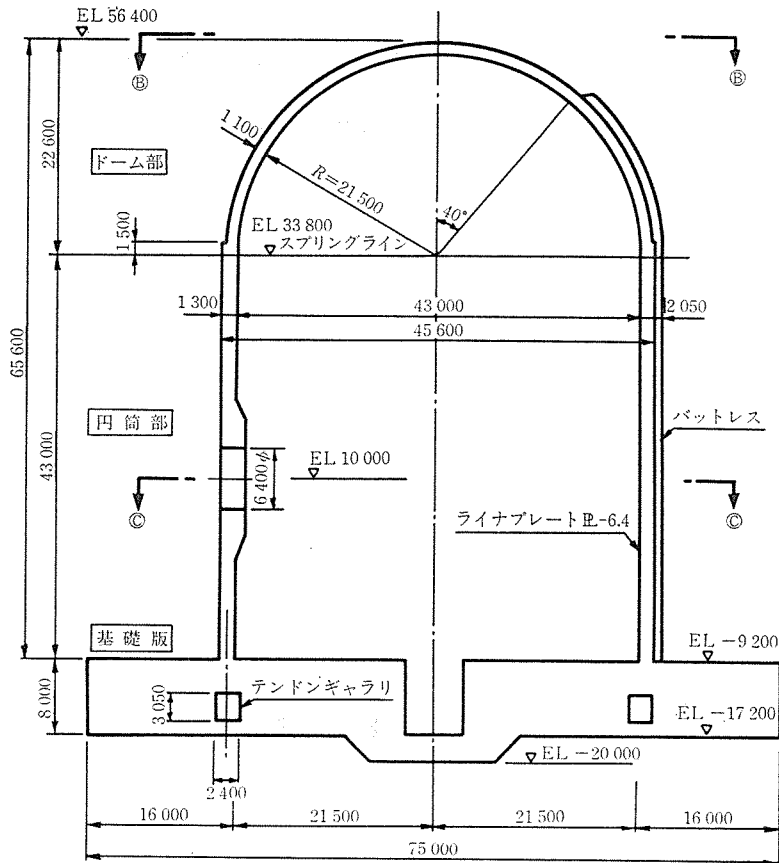
3. 試験方法

3.1 加圧方法

本試験は、図-2に示す加圧・減圧曲線に従って各種試験と同時に実施された。2月16日午前10時に圧力ゼロ時の計測が行われ、約20分後に加圧が開始された。加圧速度は1時間当たり 0.1 kg/cm²G であり、約3日後に試験圧力 4.5 kg/cm²G（設計圧力の 1.125 倍）に達



^{*1} Seiya TAMURA 日本原子力 発電(株)	^{*2} Ikuroh KAWAI 日本原子力 発電(株)	^{*3} Kaoru NAGATA 三菱重工業 (株)	^{*4} Minoru KIMURA 原電敦賀建築 共同企業体	^{*5} Toshikazu TAKEDA (株)大林組 技術研究所	^{*6} Tsuneo YAMAGUCHI (株)大林組 技術研究所	^{*7} Tatsuo NAKAYAMA (株)大林組 技術研究所
---	---	---	---	--	--	---



式-A 断面図

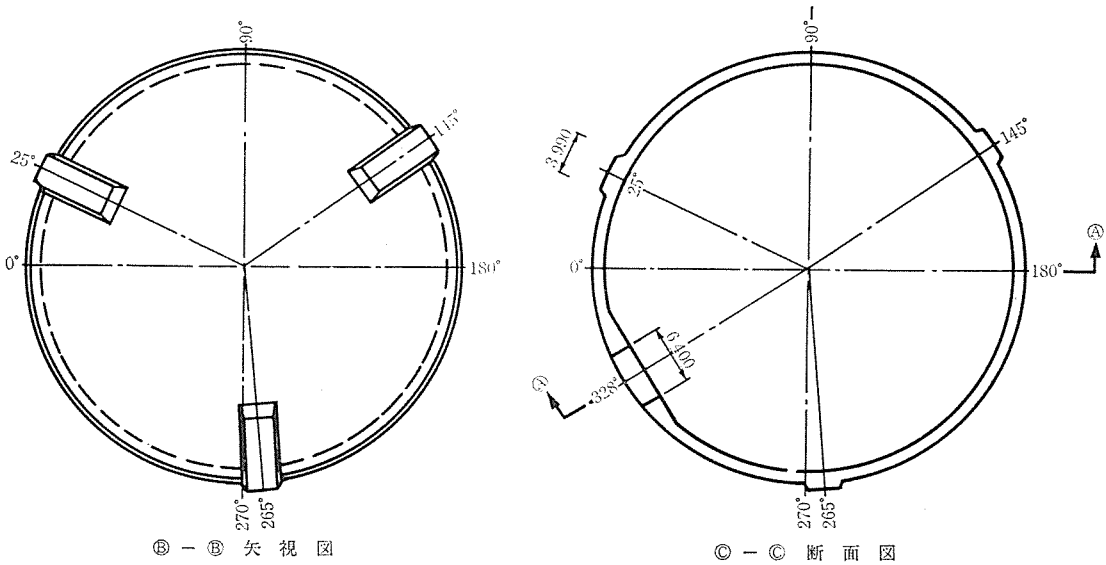


図-1 PCCVの形状寸法概要

した。加圧開始から試験圧力到達の間は、エアクーラーを通して加圧した。減圧速度は1時間当たり $0.2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ である。計測は、加圧時には $0.25 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 毎に、減圧時には $0.50 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 毎に、圧力保持の時には8時間毎に、それぞれ行った。最終計測は2月25日午後10時50分である。試験期間は約10日を要した。

3.2 計測方法

PCCVの構造的な確認試験は、我が国でまだ行われ

た経験はない。そのため本試験では、変位、ひずみ、テンドン張力、温度についての多種多様な計測とコンクリート表面の詳細な観察を行った。

計測項目、計測機器、計測点数の一覧を表-1に示す。鉛直方向、円周方向の基準座標(図-4参照)で表した計測項目の位置を表-2に示す。バットレスを含む②、一般部の③、機器搬入口を含む④の3つの鉛直断面および一般部の④の水平断面を基準に測定位置

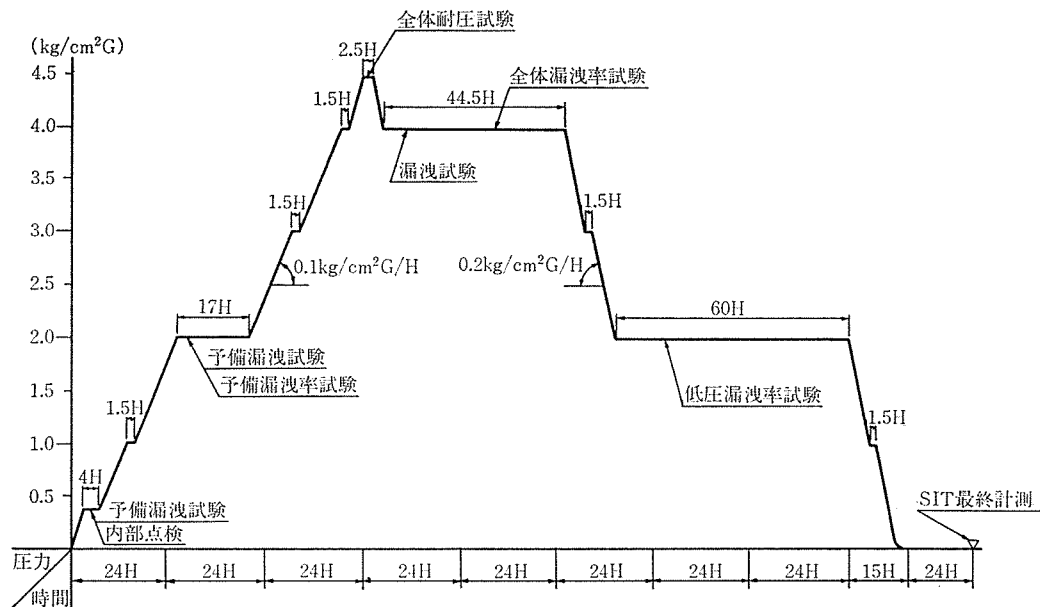
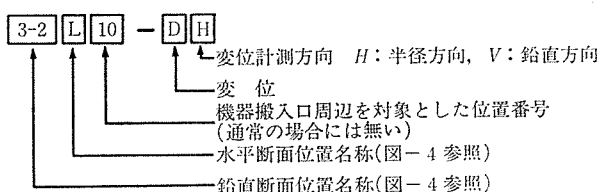


図-2 耐圧，漏洩，漏洩率試験の加圧・減圧曲線

表-1 計測項目一覧

計測項目	計測方法	場所	数量	備考
格納容器変位	インバーワイヤおよび変位計	30 および E/H	51	2×8 か所 1×22-1 14×1 } 51
鉄筋のひずみ	W.S.G (自己温度補償型)	31 および E/H, A/L	172 W.S.G 数-344	4×31 か所 } 172 24×2
コンクリートのひずみ	カールソン型ひずみ計 (自己温度補償型)	51	51	CV 内 32 基礎 19 } 51
テンドン張力	ロードセル	4	4	逆Uテンドン..... 2 フープテンドン..... 2
コンクリートの表面観察	目視 (目盛付きルーベ クランクスケール スチールテープ)	8	8	1か所当り 2m²~8m²
温度	熱電対または測温抵抗体	ほかに E/B 内 3点	51 +6	CV 内 15×3=45 6×1=6 3×2=6 } 57

を設定した。計測点識別記号の変位に関する一例を以下に示す。



変位は、測定区間に張られたインバーワイヤ先端に重錘を設置し、一定張力を与えた状態で重錘の上下方向移動量を電気式変位計で求めたものである。変位計測システムを 図-3 に示す。高さ方向 ⇄ 断面より上方では、PCCV 壁体直径 2 点間の相対変位を計測法 ① で求めた。その場合、計測法 ② と組み合わせ、両者の差を半径方向変位の 2 倍とした。⇄ 断面より下方では、不動点とみなした内部コンクリート構造体と PCCV 壁体間の

相対変位を求めた(計測法 ③)。この際、インバーワイヤが、機器配管等の障害物を避けるため、必ずしも鉛直方向または半径方向に張られていないものについては、変位計の出力を方向成分に変換した。計測位置の一例を図-4 に示す。

ひずみの測定は、図-5 に示すように 1 つの測定位置で、内側筋と外側筋の縦・横方向 4 箇所で行った。測定値は自由膨張ひずみを取り除いた応力ひずみである。テンドン張力は両端に取り付けたロードセルにより測定した。PCCV 壁体断面内の温度は熱伝対によって求めた。PCCV 内部の雰囲気温度については、ILRT で求めた多数の測定データを用いた。コンクリート表面の観察領域を図-6 に示す位置に選定した。

試験開始前に約 24 時間の事前計測を行い、検出器、ケーブル、計測器を含む計測システム全体のドリフトを調べた。

表-2 各種計測項目の位置

	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ	Ⓕ	Ⓖ	Ⓗ	Ⓘ	Ⓛ	Ⓚ	Ⓛ
角 度	0°	25°	50°	70°	115°	145°	180°	205°	250°	265°	295°	330°
バットレス		バットレス				バットレス				バットレス		
中心より 90°		● × △						□				
◇												● ×
67.5°												
◇		● × △						● × □				● × △
45°												● ×
◇		● × △						● × □ △				● × △
22.5°												●
◇		● × △				△		● × □ △				● × △
EL 33.8		●						×				●
◇												
EL 23.3												
◇	● ×	● × △	● ×	● ×	○ ×	● × △	● ×	● × □ △	● ×	● ×	● ×	● × △
EL 12.3												
◇												⊕ ×
◇		●										● ×
EL 1.3		●						● ×				● × △
◇		△			△			● × △				● × △
EL -8.2		×						×				×
△		◇										×
◇							◇					×
TG上部												
基 礎								△				

記 号

変位

- : 鉛直方向および半径方向
- : 半径方向(◇断面より上ではⒺ~Ⓗ間, Ⓕ~Ⓖ間)
- ⊙ : 鉛直方向
- ⊕ : 機器搬入口周辺の半径方向(12点)

- × : 鉄筋のひずみ
- : コンクリートのひずみ
- △ : 温 度
- ◇ : 円周方向テンドン張力
- ◆ : 鉛直方向テンドン張力

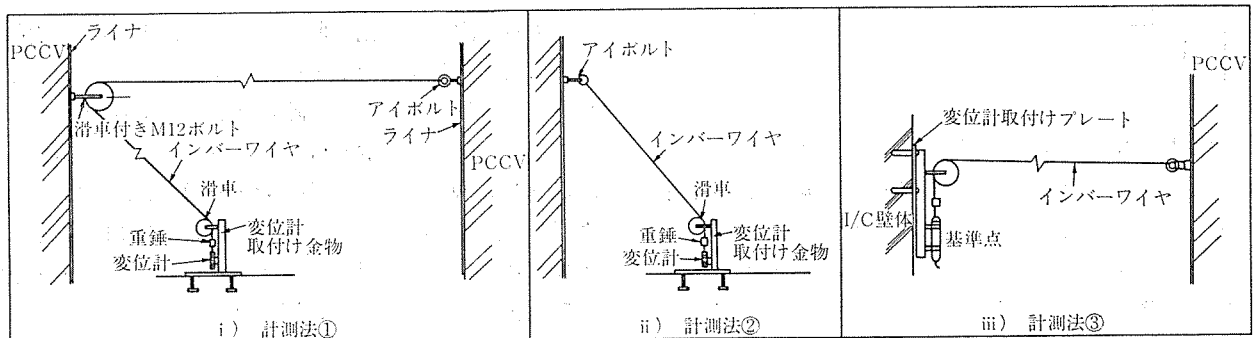
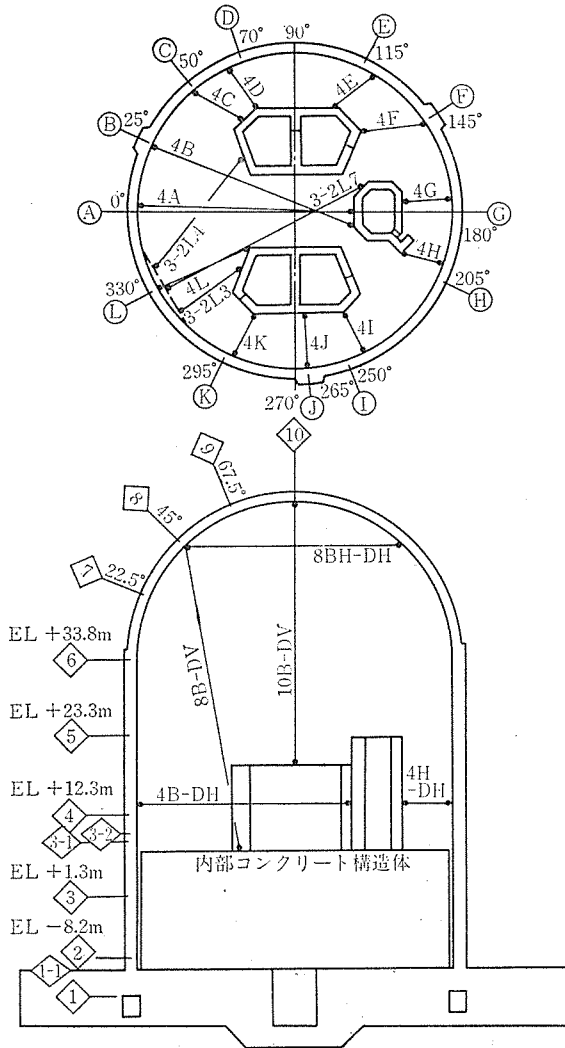
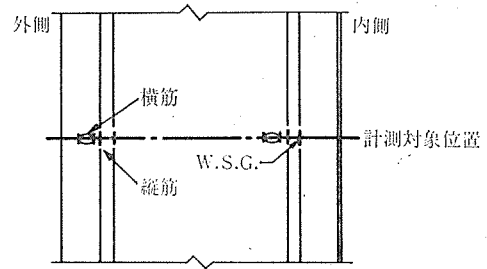


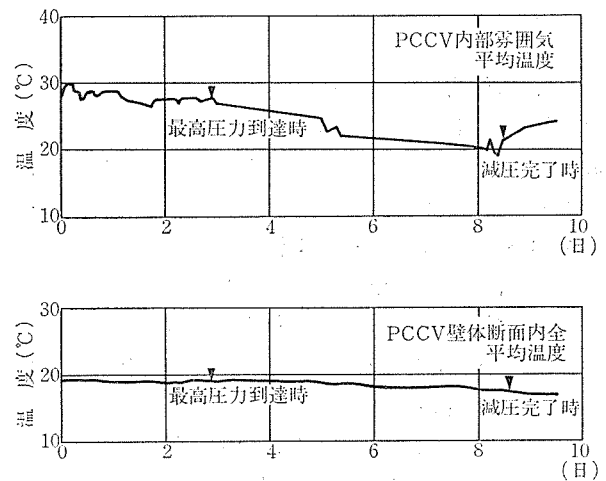
図-3 変位計測システム



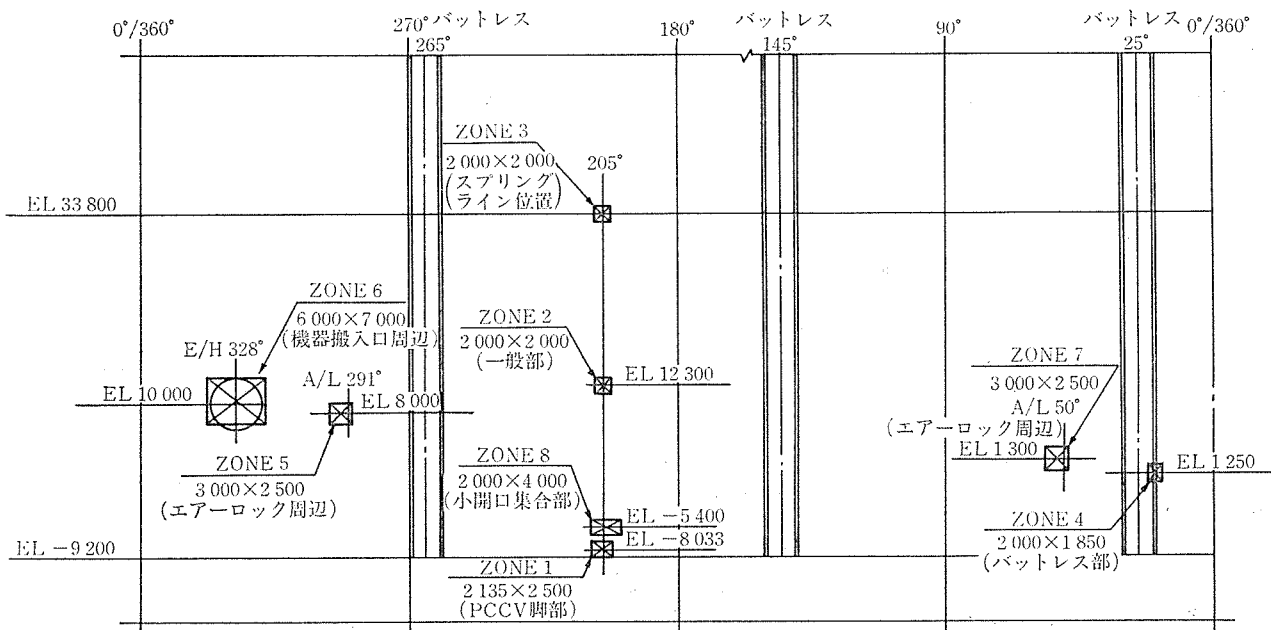
図—4 インバーワイヤ配置の代表例



図—5 鉄筋のひずみ測定位置



図—7 平均温度～時間関係



図—6 コンクリート表面の観察位置全体配置

3.3 温度条件

図-7 に、PCCV 内部の雰囲気温度および PCCV 壁体断面内の全平均温度の経時変化を示す。

両者とも、試験圧力到達までの加圧時ではほぼ一定の温度を保ち、減圧時には温度が低下した。ちなみに、PCCV 内部雰囲気温度の加圧開始時からの変化量は試験圧力到達時で -1.2°C 、同様に減圧完了時で -7.0°C であった。このような雰囲気温度の変化のもとで、PCCV 壁体断面内の全平均温度では、加圧開始時に対して試験圧力到達時に -0.1°C の、減圧完了時に -1.2°C の温度変化があった。

4. 解 析

4.1 設計解析手法の概要

PCCV の設計解析は、鉄筋、テンドン、ライナ等の鋼材およびテンドンダクトの剛性に及ぼす影響を無視し、コンクリートが全断面有効とした 3次元 FEM 弾性解析 (BSAP: 米国 Bechtel 社で実施) によった。

表-3 に、各部位の設計解析に対応した解析モデルのモデル化対象範囲と解析条件の概要を示す。“180°モデル”では、バットレスを考慮した PCCV 全体の変形性状および応力性状を求め、“360°モデル”では、PCCV と内部コンクリート構造体や基礎版を一体としてモデル化し、PCCV 脚部の応力および変形性状を詳細に求めたものである。また、“E/Hモデル”では、機器搬入口 (E/H) やエアロック (A/L) 等の開口周辺の局部応力および局部変形の性状を詳細に求めたものである。なお、“360°モデル”の解析結果は、基礎版の変形が変位測定

値に及ぼす影響の検討に用いた。

これらの設計解析に用いたコンクリートのヤング係数は、設計基準強度 420 kg/cm^2 に対応させ、 $3.04 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$ とした。

4.2 設計予測値の修正

コンクリートのヤング係数については、設計解析で用いた値と実機 PCCV に用いたコンクリートの材料試験値とで相違した。また、PCCV の断面剛性には、コンクリートのヤング係数だけでなく、鉄筋、テンドン、ライナ等の鋼材の剛性およびテンドンダクトによる断面欠損も影響する。このため、それらの影響を考慮した等価ヤング係数を用い、設計予測値を修正した。この修正値を解析値として測定結果の評価に用いた。

ここで、等価ヤング係数 E_e は、下式で評価した。

$$E_e = \beta E_c \{1 + (n-1) P_t\}$$

ここに、

E_c : コンクリートヤング係数材料試験値 ($3.95 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$)

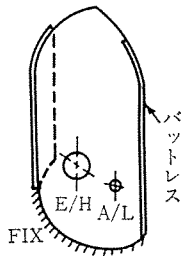
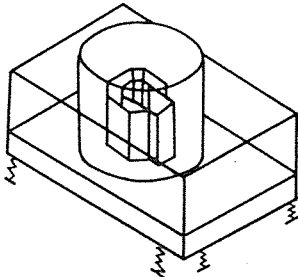
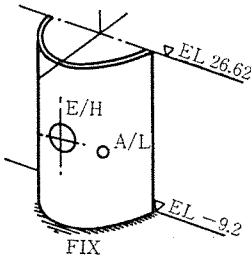
β : テンドンダクトによる剛性低下率 (0.9)

n : 鋼材のヤング係数 E_s ($2.0 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$) とコンクリートのヤング係数 E_c の比 (5.1)

P_t : 鋼材断面積のコンクリート断面積に対する比 (円筒中腹位置で、鉄筋 1.04%, テンドン 1.07%, ライナ 0.49%, 計 2.60%)

なお、テンドンダクトによる剛性低下率は、フープテンドンダクトが等間隔で設けられた円筒断面に一樣な膜力が作用する条件での FEM 弾性解析から求めた剛性低下率に、鉛直方向の逆 U テンドンダクトの断面欠損によ

表-3 解析モデルの概要

解析モデル名	180°モデル	360°モデル	E/Hモデル
対象部位	PCCV ドーム部およびシリンダー一般部	PCCV 脚部および基礎版	機器搬入口およびエアロック回り
モデル化	 バットレス, E/H, A/L 回りモデル化	 PCCV は円筒一般部のみモデル化	 E/H, A/L 回りモデル化
材料定数	$E_c = 3.04 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.17$ ただし、B/H については $E_c = 2.30 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$		
解析条件	内圧は分布荷重 脚部の境界条件は固定 両側面は対称拘束条件	内圧は分布荷重 円筒上部の境界は 180°モデルによる応力結果から境界荷重として入力	内圧は分布荷重 脚部の境界条件は固定 両側面は対称拘束条件 円筒上部は 360°モデルによる応力結果から境界荷重として入力

る剛性低下率（断面積比で評価）を加算して求めた値である。テンドンダクトの配置条件は、鉛直方向と水平方向で多少の差があり、厳密には、鉛直と水平の剛性低下率に差が生ずると考えられるが、ここでは上記の手法で求めた剛性低下率を用いることにした。

以上で求めた等価ヤング係数 E_e とコンクリートヤング係数設計値 E_D の比 (E_e/E_D) は、1.3 となる。したがって、変位、ひずみとも、設計予測値を 1/1.3 倍し、それを解析値とした。

さらに、鉛直方向変位測定値は内部コンクリート構造体に設けた基準点からの相対変位であるため、そこには基礎版や内部コンクリート構造体の加圧による変形成分が含まれる。これから、各点の鉛直方向変位解析値は、PCCV 脚部固定として求めた解析値に、“360°モデル”で得られる基礎版の鉛直方向変位成分（内部コンクリート位置の PCCV 脚部に対する相対変位）として試験圧力時で 0.6 mm を加算した。

5. 試験結果

5.1 変位

図-8 に、圧力～変位関係の代表例を示す。変位計出力の方向成分への変換は、下式によった。

$$\delta_v^*(\delta_r^*) = \delta_{test} / \cos \theta$$

ここに、

δ_v^* : 温度補正前鉛直方向変位

δ_r^* : 温度補正前半径方向変位

δ_{test} : 変位計の出力

θ : 計測点と基準点を結ぶインバーワイヤの考えている方向軸となす角度

図に示すように、圧力～変位関係の加圧時の性状は弾性的挙動を示した。しかし、詳細に見ると、加圧の初期段階での変位曲線の立ち上がり現象および圧力が 2 kg/cm²G を超える付近からわずかな非線形性が認められる。これらは、変位計測システムのなじみの問題、PCCV 構造体とインバーワイヤの熱変形、および基準点を設けた内部コンクリート構造体（不動点）の熱変形等に影響されたと考える。また、減圧時で圧力一定保持のとき、変位の戻り現象を示すものがあった。これは温度変化の影響と考えられる。ドーム頂部の鉛直方向変位測定位置を対象にすると、PCCV 内部の雰囲気温度 1°C の下降に対してインバーワイヤ ($l=40$ m) は 0.03 mm の収縮（したがって、変位計の出力は増加）が生ずるのに対し、PCCV 壁体断面内温度 1°C の下降に対して構造体の熱変形はドーム頂部 ($L=65$ m) の変位で 0.65 mm 程度の減少が生ずる。ちなみに、圧力 4 kg/cm²G を保持している間の温度変化は、PCCV 内部の雰囲気で 1.75°C

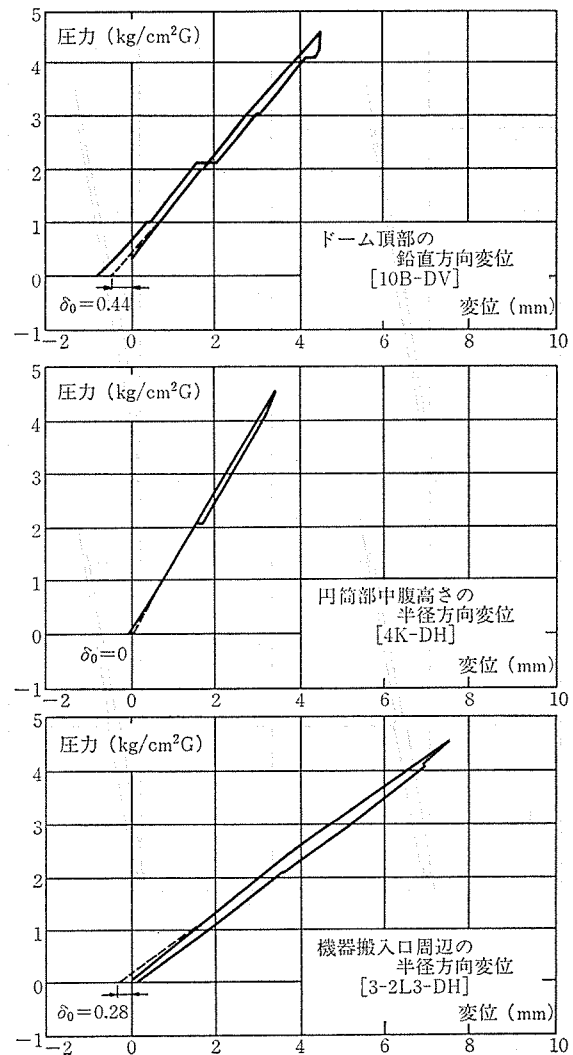


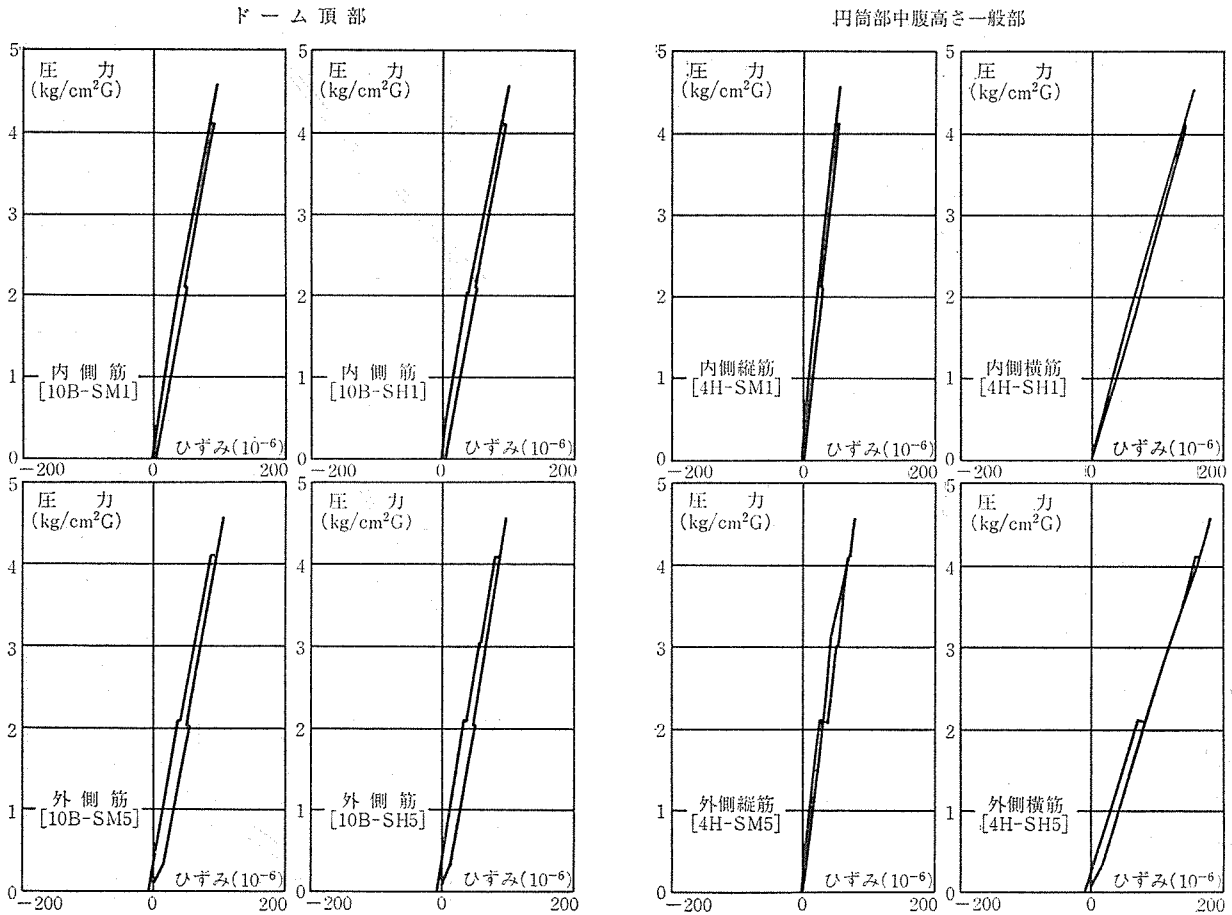
図-8 圧力～変位関係（温度補正前）

の低下（PCCV 断面内で平均 0.3°C の低下）、同様に圧力 2 kg/cm²G 保持のとき 1.45°C の低下（同 0.8°C の低下）であった。圧力 4 kg/cm²G のときで 0.15 mm の、圧力 2 kg/cm²G のときで 0.48 mm の変位の戻りが現われることになる。一方、変位の測定では、それぞれ 0.21 mm, 0.47 mm の戻りが生じた。温度変化の変位に及ぼす影響は大きい。

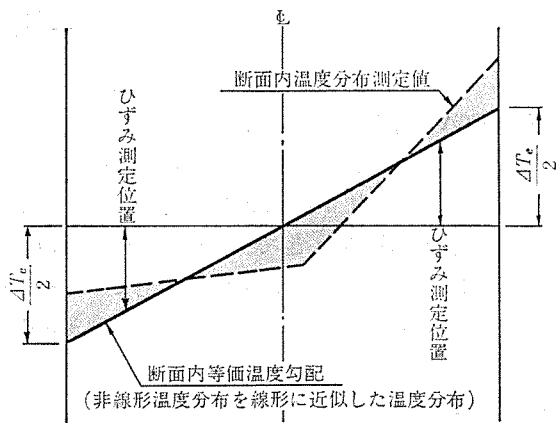
5.2 ひずみ

図-9 に、ドーム頂部（ \diamond 断面）および円筒部中腹高さ一般部（ \diamond 断面）位置の縦筋と横筋について、圧力～ひずみ関係を内側、外側別に示した。PCCV 構造体の弾性的挙動が、ひずみの面からも認められる。

しかし、変位の場合と同様に、減圧時で圧力一定保持のとき、ひずみの変動が生じた。ドーム頂部を対象にすると、圧力 4 kg/cm²G 保持している間のひずみ変動量は内側筋で 5×10^{-6} の増加（外側筋で 6×10^{-6} の減少）、同様に、圧力 2 kg/cm²G 保持のときで 3×10^{-6} の増加（同 5×10^{-6} の減少）をした。このとき、ドーム頂部の内

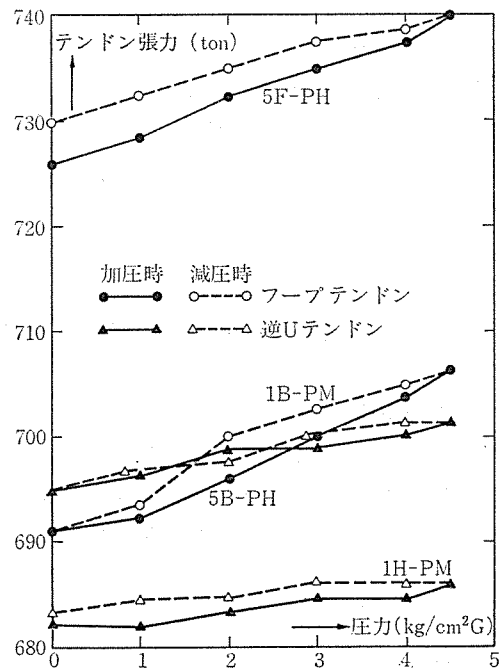


図—9 圧力～ひずみ関係



図—10 断面内等価温度勾配

外表面の等価温度差 ΔT_e (図—10 参照) は、圧力 $4 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 保持のときで $+1.74^\circ\text{C}$ (内表面温度 $<$ 外表面温度); 圧力 $2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 保持のときで $+0.87^\circ\text{C}$ であった。断面内等価温度勾配によって熱応力ひずみを推定すると、温度変化に伴うひずみ変動量は、圧力 $4 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 保持のとき内側筋で 4×10^{-6} の増加 (外側筋で 7×10^{-6} の減少), 同様に圧力 $2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 保持のとき 2×10^{-6} の増加 (同 3×10^{-6} の減少) となる。以上のことから、減



図—11 圧力～テンドン張力関係

圧時の圧力一定保持のとき見られたひずみの変動は熱応力に起因するものとする。

5.3 テンドン張力

図—11 に、圧力～テンドン張力関係を示す。張力測定の対象位置は、④断面のフープテンドン（⑧-⑨-⑩間）と⑥～⑧断面に配置された逆Uテンドン各々1本の両端の計4点である。

図に示すように、圧力と張力の関係はほぼ線形を保持した。試験圧力時の張力変動量は、フープテンドンで13.9tと15.2t、逆Uテンドンで3.8tと6.3tを示し、両端で必ずしも一致しない。これらの測定値は、構造体の変形から求めた計算値（構造体の変形量とテンドンの伸びが対応するものとして求めた値。フープテンドンで20.4t、逆Uテンドンで13.2t）に比べて小さい。これは、テンドン摩擦による張力分布の問題やロードセルの精度（容量1000tに対して変動量が小さい）に原因があると考えられる。

5.4 コンクリート表面の観察

図—12 に、コンクリート表面観察結果の代表例を示す。図中、幅0.2mm以上のひび割れを記録した。

図に示すように、観察されたひび割れは、長さ・幅ともに非常に限定されたものである。それらは、コンクリートの収縮ひずみ等で予め生じていたひび割れ幅が加圧

時に広がったものである。他の観察領域でもほぼ同程度もしくはそれ以下であり、構造的なひび割れは観察されなかった。加圧開始から試験圧力到達時の間のひび割れ幅の変動量は、埋込み金物周辺の局部的なものを含めても、0.2mm以下であった。

6. 考 察

6.1 変 位

(1) 測定値の補正

前章に述べたように、試験時に PCCV 内部の雰囲気温度および PCCV 壁体断面内の温度が変化した。そのため、変位計の出力 (δ_{test}) には、インバーワイヤおよび PCCV 構造体の熱変形が含まれることになる。これらは圧力に直接対応する性質のものではないので、変位の測定値から取り除くことを考えた。インバーワイヤの熱変形 (δ_{WT}) および PCCV 構造体の熱変形 (δ_{ST}) は、下式で評価できる。

$$\delta_{WT} = \alpha_s \cdot \Delta T_E \cdot l$$

$$\delta_{ST} = \alpha_c \cdot \Delta T_S \cdot L$$

ここで、

α_s, α_c : それぞれインバーワイヤおよびコンクリートの線膨張係数 ($0.67 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)

$\Delta T_E, \Delta T_S$: それぞれ、PCCV 内部雰囲気温度および PCCV 壁体断面内平均温度の加圧開始直前に対する変化量

l, L : それぞれ、インバーワイヤの長さ、PCCV 構造体の曲率半径または基礎版上面からの高さに相当する値

このようにして得られる熱変形、および原点移動量を考慮し、変位測定値の補正を下式によって行った。

$$\delta_v(\delta_r) = \frac{1}{\cos \theta} (\delta_{test} + \delta_{WT}) + \delta_0 + \delta_{ST}$$

ここで、 δ_v : 温度および原点補正後鉛直方向変位

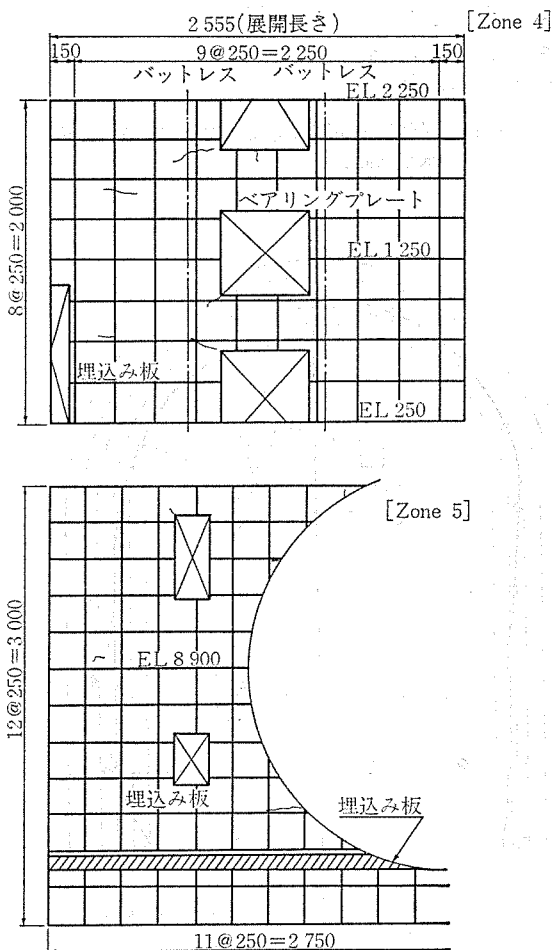
δ_r : 温度および原点補正後半径方向変位

δ_0 : 原点補正量

試験圧力到達時の変位測定値（温度と原点の補正後）に占める構造体の熱変形の割合は、ドーム頂部の鉛直方向変位で約2.6%、円筒部中腹高さの半径方向変位で約0.5%、機器搬入口周辺の半径方向変位で約0.3%である。加圧時の温度変化の影響は無視できる程度である。

(2) 温度および原点補正後の変位と圧力との関係

熱変形および原点移動量を考慮した変位測定値と圧力との関係の代表例を図—13 に示す。●印で示した測定値のうち、実線が加圧時を、破線が減圧時を、それぞれ表わす。また、解析値を実線のみで示した。図に示すよ



図—12 コンクリート表面の観察結果

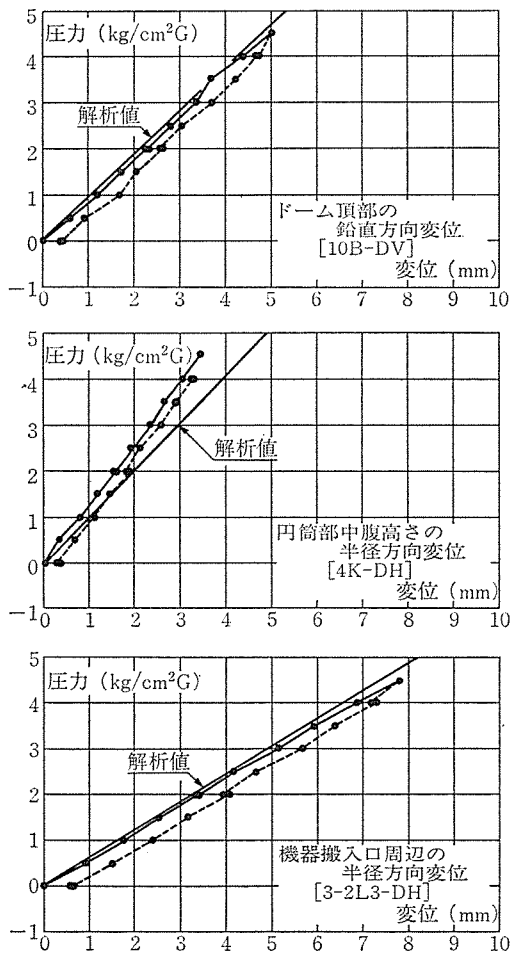


図-13 圧力～変位関係 (温度, 原点補正後)

うに, 圧力～変位関係はほぼ弾性挙動を示した。

(3) 試験圧力時の変位分布

図-14, 図-15 は, 一般部鉛直断面 (㊸ 断面), 機器搬入口を含む鉛直断面 (㊹ 断面) および一般部水平断面 (㊺ 断面) について試験圧力到達時の変位分布を示したものである。㊺ 断面の変位分布図のうち ㊸, ㊹, ㊺ 点 (バットレス部) を除けばいずれも測定値と解析値とは比較的良く一致した。

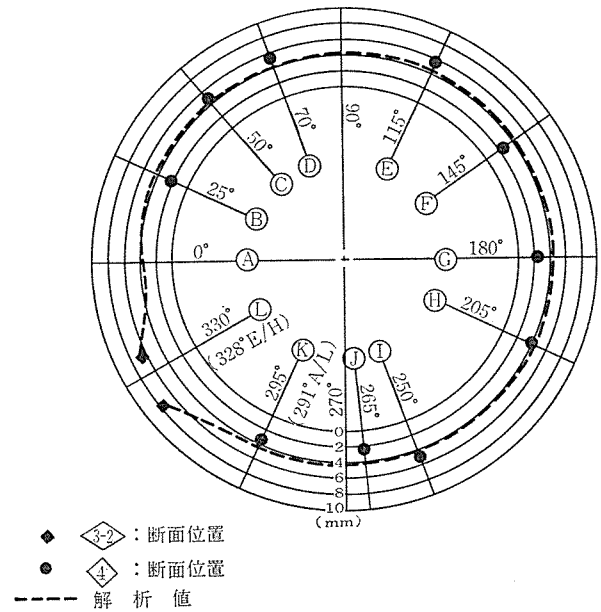


図-15 試験圧力時変位分布 (円筒部中腹高さの水平断面)

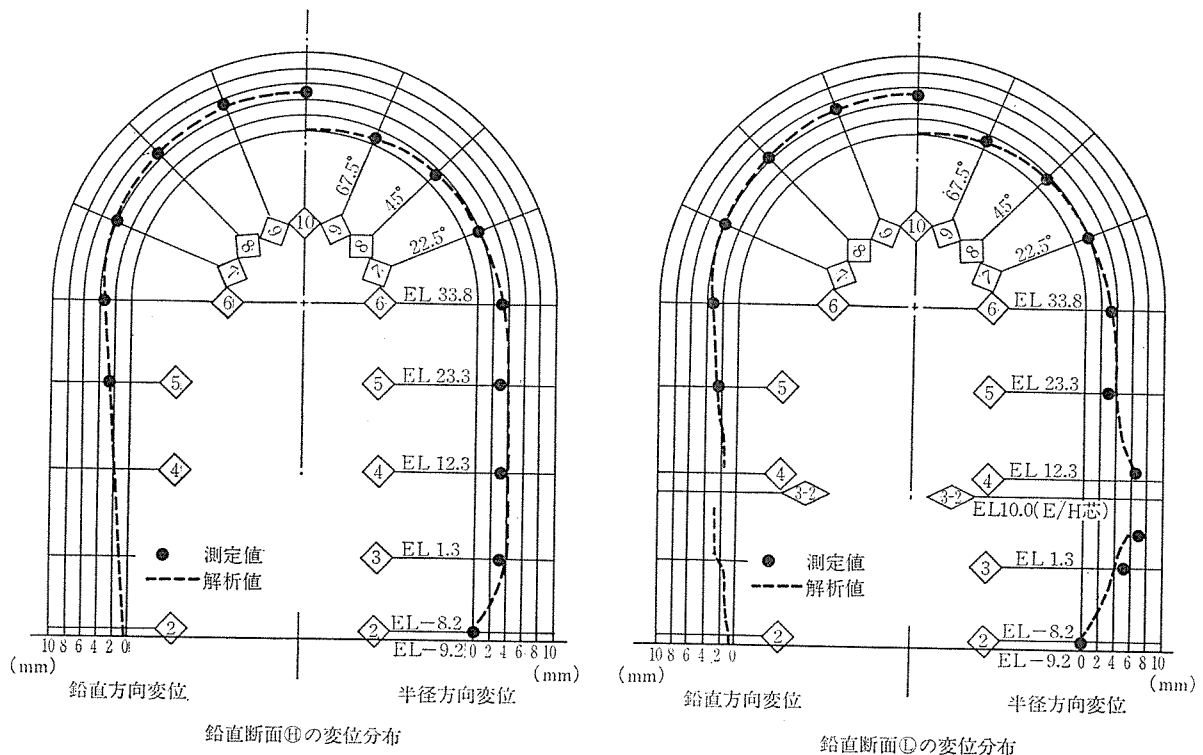


図-14 試験圧力時変位分布 (鉛直断面)

(4) 測定値と解析値との比較

表—4 に、変位の測定値と解析値との比較を示した。試験圧力到達時の解析値に対する測定値の比は、ドーム頂部の鉛直方向変位で 1.04 倍、円筒部中腹高さの半径方向変位（10点の単純平均）で 0.84 倍、機器搬入口周

表—4 試験圧力時の変位測定値と解析値との比較

断面位置名称	計測点識別記号	変位方向成分	測定値* (mm)	解析値 (mm)			測定値/ 解析値	
				①断面	②断面		① ②	① ③
					②	③		
◇	10 B-DV	鉛直	5.00	4.83	4.83	1.04	1.04	
◇	9 L-DV	鉛直	5.45	4.68	4.68	1.16	1.16	
	9 FL-DH	半径	1.05	0.89	0.89	1.18	1.18	
◇	8 B, 8 H, 8 L-DV	鉛直	4.81	4.59	4.59	1.05	1.05	
	8 BH, 8 FL-DH	半径	1.27	1.46	1.46	0.87	0.87	
◇	7 L-DV	鉛直	3.92	3.94	3.94	0.99	0.99	
	7 FL-DH	半径	2.03	1.97	1.97	1.03	1.03	
◇	6 B, 6 H, 6 L-DV	鉛直	3.56	3.36	3.36	1.06	1.06	
	6 BH, 6 FL-DH	半径	3.29	3.22	3.22	1.02	1.02	
◇	5 B, 5 LDV	鉛直	2.59	2.68	2.68	0.97	0.97	
	5 BH, 5 FL-DH	半径	3.25	4.36	4.36	0.75	0.75	
◇	4 B~4 K-DH	半径	3.73	—	4.43	—	0.84	
	4 L-DH	半径	6.83	7.39	—	0.92	—	
◇	3-2 L 3-DH	半径	7.78	7.39	—	1.05	—	
	3-2 L 10-DH	半径	7.75	7.39	—	1.05	—	
◇	3 B, 3 H-DH	半径	3.89	—	4.36	—	0.89	
	3 L-DH	半径	5.71	4.90	—	1.17	—	
◇	2 H, 2 L-DH	半径	0.49	0.42	0.42	1.17	1.17	

* 測定値は計測点識別記号の棟に載せた計測点の平均値
原点補正量、熱変形（インパーワイヤ、PCCV 構造体）考慮

辺の半径方向変位（2点の平均）で 1.05 倍であった。

(5) 残留変位

減圧完了後さらに 24 時間経過した時点の残留変位測定値の試験圧力到達時の変位に対する比は、ドーム頂部で約 9%，円筒部中腹高さで約 10%，機器搬入口周辺で約 8% であり、約 90% 以上の変位の回復が認められた。

内部コンクリート構造体（基準点）の熱変形を考えると、残留変位は今回の測定値より小さいものと予想される。それは、内部コンクリート構造体の熱変形で基準点が原点位置から移動すると考えられるからである。すなわち、内部コンクリート構造体が温度低下で PCCV の中心方向に熱変形するものと考えると、図—4 に示すように、4 A, 4 B, 3-2 L 7 のようなインパーワイヤの配置条件の場合に 2 点間の相対変位は減少する方向に現われ、その他の各測定点における 2 点間の相対変位は増大する方向に現われる。

6.2 ひずみ

(1) 試験圧力時膜ひずみ分布

内側鉄筋と外側鉄筋のひずみから壁厚中心位置の膜ひずみを求めた。膜ひずみは、ドーム頂部（◇）で約 100×10^{-6} 、ドーム部仰角 45° 位置（◇）で経線方向および円周方向とも約 110×10^{-6} 、円筒部中腹高さ（◇）で約 70×10^{-6} （経線方向）と約 200×10^{-6} （円周方向）を示した。図—16, 図—17 に一般部鉛直断面（② 断面）、機器搬入口を含む鉛直断面（① 断面）および円筒部中腹高さの水平断面（◇ 断面）における膜ひずみ分布を示す。図中、等価ヤング係数による解析値を実線で示した。一般部のみならず機器搬入口周辺およびバットレス部についても、ひずみ測定値と解析値とは定性的のみな

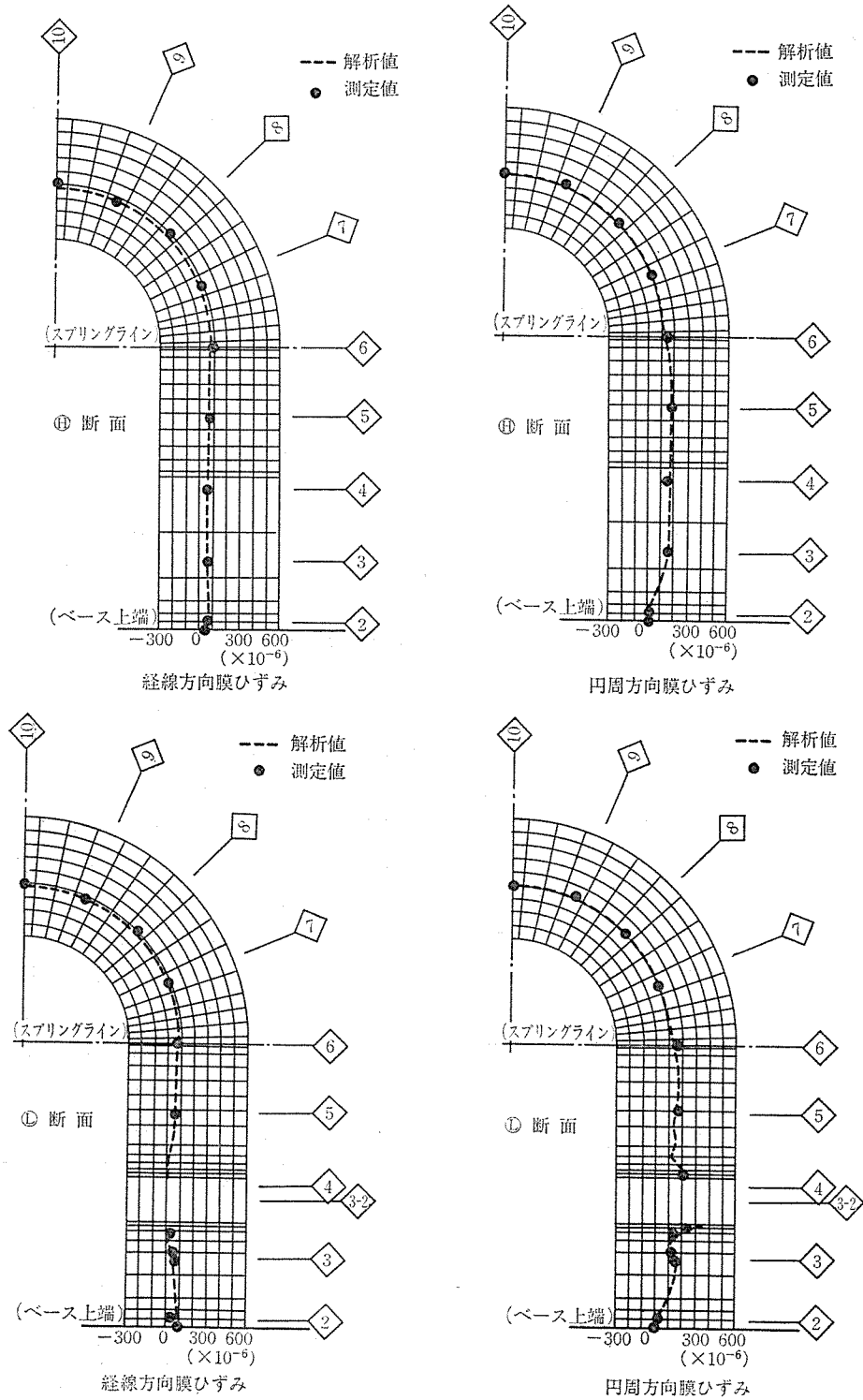
表—5 ひずみ測定値から求めた変位と変位測定値との比較（試験圧力時）

断面位置名称	鉛直方向変位				半径方向変位				対象とする変位
	ひずみ測定値*1		変位測定値 ③ δ_v (mm)	②/③	ひずみ測定値*1		変位測定値 ⑥ δ_r (mm)	⑤/⑥	
	① ϵ_ϕ (10^{-6})	② δ_v (mm)			④ ϵ_θ (10^{-6})	⑤ δ_r (mm)			
◇	100	5.62**	5.00	1.12	—	—	—	—	10 B-DV
◇	83	5.46**	5.45	1.00	122	1.03	1.05	0.98	9 L-DV
									9 FL-DH
◇	110	4.99**	4.81	1.04	111	1.73	1.27	1.36	8 B, 8 H, 8 L-DV
									8 BH, 8 FL-DH
◇	92	4.30**	3.92	1.10	101	2.06	2.03	1.01	7 L-DV
									7 FL-DH
◇	99	3.48**	3.56	0.98	137	3.03	3.29	0.92	6 B, 6 H, 6 L-DV
									6 BH, 6 FL-DH
◇	78	2.78**	2.59	1.07	175	3.88	3.25	1.19	5 B, 5 L-DV
									5 BH, 5 FL-DH
◇	63	—	—	—	194	4.30	3.73	1.15	4 B~4 K-DH
◇	70	—	—	—	164	3.63	3.89	0.93	3 B, 3 H-DH
◇	55	—	—	—	19	0.42	0.49	0.86	2 H, 2 L-DH

注) *1 ひずみ測定値は壁厚が変化する領域を除いた値の相加平均値

*2 ◇ ~ ◇ までの平均ひずみ ($\epsilon_\phi = 67 \times 10^{-6}$) による δ_v の値に $\delta_F (= 0.6 \text{ mm})$ を加算

*3 ◇ ~ ◇ の平均ひずみ ($\epsilon_\phi = 97 \times 10^{-6}$) より、 $r \cdot \epsilon_\phi$ で法線方向変位を求め、その鉛直方向成分と ◇ の δ_v を加算



図—16 膜ひずみ分布 (鉛直断面)

らず定量的にも良く一致した。

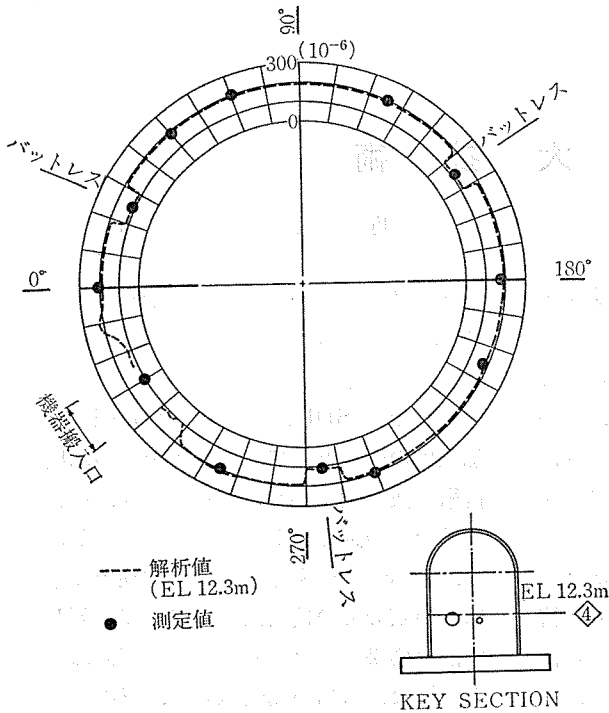
(2) ひずみ測定値と変位測定値との整合性

ひずみ測定値と変位測定値との整合性を検討した。表—5 は、ひずみ測定値から算定した一般部鉛直断面の半径方向変位および代表点の鉛直方向変位と変位測定値との比較を示したものである。表に示したひずみ測定値は、壁厚が変化する領域のバットレス部 (③ 断面) およ

び機器搬入口周辺 (① 断面) を除いた対称性のある位置の測定値の相加平均値である。それぞれ、円周方向膜ひずみ $\epsilon_{m\theta}$ 、経線方向膜ひずみ $\epsilon_{m\phi}$ として表わしたものである。これらのひずみから、鉛直方向変位 δ_v 、半径方向変位 δ_r は下式で求めた。

$$\delta_v = h \cdot \epsilon_{m\phi} + \delta_F$$

$$\delta_r = r \cdot \epsilon_{m\theta}$$



図一17 円筒部中腹高さ (◇断面) における円周方向膜ひずみ分布

ここで、

δ_F : 基礎版の鉛直方向変形成分 (0.6 mm)

r : 壁心位置の曲率半径

h : 基礎版上面から対象位置までの高さ

表に示すように、ひずみ測定値から求めた変位は、変位測定値に対し、0.88~1.40倍 (全平均で1.04倍) となった。ひずみ測定値と変位測定値との整合性が認められる。

7. ま と め

プレストレストコンクリート格納容器の構造性能確認試験の結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) PCCV 構造体の圧力~変位関係 および 圧力~ひずみ関係は、ほぼ線形を保持した。
- 2) 試験圧力 (4.5 kg/cm²G) 時の変位測定値は、等価剛性による解析値と定量的に良く一致した。熱変形を考慮すると、ドーム頂部の鉛直方向変位 (5.0 mm)、円筒部中腹高さの半径方向変位 (4.26 mm) および 機器搬入口周辺の半径方向変位 (7.77 mm) は、解析値に対して 1.04 倍、0.96 倍、1.05 倍であった。
- 3) 試験圧力時の膜ひずみは、ドーム頂部で約 100×10^{-6} 、ドーム部仰角 45° の位置で経線方向および円周方向とも約 110×10^{-6} 、円筒部中腹高さ (バット

レス、開口周辺を除く) で約 70×10^{-6} (経線方向) と約 200×10^{-6} (円周方向) が得られ、解析値とも良く一致した。ひずみ測定値と変位測定値の対応は良い。

- 4) 残留変位は全体的にかなり小さく、弾性的挙動をうらづけるものであった。
- 5) テンドン張力変動量測定値は、フープテンドン・逆Uテンドンとも、構造体の変形量から単純に求めた計算値に比べて小さい。
- 6) コンクリート表面の観察結果、コンクリートの収縮ひずみ等に起因するものを除き、新たに生じたひび割れは認められなかった。

以上の結果から、PCCV 構造体は試験圧力時 (4.5 kg/cm²G) において構造健全性を確保していると判断した。また、変位およびひずみ測定値が実際の剛性で設計予測値を補正した解析値と一致することは、設計解析手法の妥当性を示している。

なお、今回採用した計測方法 (変位、ひずみ、温度) は良好であった。特に、大型構造物で変位を測定する場合、温度変化を受けるときでも、インバーワイヤ方式が有効であった。

謝 辞

今回の原子炉格納容器構造性能確認試験では、多数の関係各位の協力を得た。誌上を借りて深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 渡辺征男, 加藤宗明, 山原 浩, 岡田克也, 山口恒雄, 武田寿一, ほか: プレストレストコンクリート格納容器の構造耐力に関する動的並びに静的実験 (その 1) ~ (その 7), 日本建築学会大会梗概集 (近畿), 昭和 55 年 9 月
- 2) 小林正則, 小垣善一, 武田寿一, 山口恒雄, ほか: プレストレストコンクリート格納容器 1/8 模型の水平加力試験 (その 1) ~ (その 5), 日本建築学会大会 梗概集 (近畿), 昭和 55 年 9 月
- 3) 武田寿一, 竹本 靖, 山口恒雄, 吉岡研三, 表 佑太郎, 中山達雄, ほか: プレストレストコンクリート格納容器 (PCCV) の力学的挙動に関する一連の研究 (その 1) ~ (その 3), 大林組技術研究所所報, No. 22, 1981
- 4) 竹本 靖: プレストレストコンクリート格納容器のテンドンシステムに関する実証試験, 大林組技術研究所所報, No. 22, 1981
- 5) 小垣善一, 加藤宗明, 武田寿一: プレストレストコンクリート格納容器の 1/8 模型及び 1/30 模型による構造耐力実験, プレストレストコンクリート, Vol. 23, No. 1, Jan. 1981
- 6) 川口 徹, 高橋久雄: 高強度コンクリートの長期性状に関する研究 (その 3・コンクリートクリープ特性モデル化への時間依存性線型粘弾性理論の適用), 日本建築学会大会梗概集 (近畿), 昭和 55 年 9 月