

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)

——実験計画——

PCCV 研究グループ

Studies on Structural Behaviors of Prestressed Concrete Containment Vessels (Part 1)

——Test Program——

PCCV Structural Research Group

Abstract

This report presents the results of static and dynamic model tests on prestressed concrete containment vessels (PCCV), each with hemispherical dome and three vertical buttresses, for 1,000 MWe nuclear power plants being planned at a region of high seismic activity. The tests consist of a static horizontal loading test using a 1/8 scaled model, and two kinds of tests, each using one 1/30 scaled model under static or dynamic loading. The former test is under consignment from The Kansai Electric Power Co., Inc., and the latter tests from Japan Atomic Power Co.

The main purpose of this study is to obtain useful information on structural integrity and safety of PCCV under strong earthquake motions. Part 1 of this report describes the design concept of specimens and a summary of the test program, while Part 2 and Part 3 describe the test results and calculated results of the 1/8 and 1/30 models, respectively.

概 要

この報告は、高震度地域向け 100 万 KW 級原子力発電所用の 1000 t 容量 tendon を用いた半球ドーム 3 バットレス型プレストレストコンクリート格納容器(PCCV)の地震時設計荷重に対する構造健全性と耐力安全性を確認する目的で実施された実験の結果を述べるものである。その実験は、関西電力㈱から委託された縮尺 1/8 の大型全体模型水平加力実験(1 体)と日本原子力発電㈱から委託された縮尺 1/30 の小型全体模型による水平加力実験と振動実験(各 1 体計 2 体)の 3 種類の実験から成る。なお、静的加力実験として、前・後者の場合とも同じ試験体を用い、水平加力実験に加え、プレストレス導入実験、内圧実験、起振機による振動実験も行なっている。

(その 1) では、これらの実験に用いた試験体のモデル化についての基本的な考え方と実験項目について述べ、(その 2) では 1/8 模型実験、(その 3) では 1/30 模型実験それぞれの実験結果と解析結果を述べている。

1. 序

本実験研究は、プレストレストコンクリート格納容器(以下 PCCV とする)を対象としたもので、関西電力(株)の委託で行なった 1/8 縮尺の大型全体模型水平加力実験(1 体)と日本原子力発電(株)の委託で行なった 1/30 縮尺小型全体模型による水平加力実験と振動実験(各 1 体計 2 体)の 3 種類の実験から成り、その結果につい

て報告するものである。

前者の 1/8 模型大型試験体(以下 1/8 モデルと言う)を用いた水平加力実験は、高震度地域向け 100 万 kW 級原子力発電所用 PCCV を対象として計画されたものであり、後者の 1/30 模型小型試験体(以下 1/30 モデルと言う)による水平加力実験と振動実験は、我国で始めて建設される PCCV となる日本原子力発電(株)の敦賀 2 号 PCCV を対象として計画されたものである。これら

ム部分にも配置される (図-3 参照)。

鉄筋は、円筒シェル部では縦・横直交2方向の多段配筋で、半球ドーム部では、スプリングラインから開角45°位置までが経線方向筋と円周方向筋の多段配筋であり、開角45°より上部では逆Uテンドンに平行な直交2方向のマス目状の配筋へと変化している。

このプロトタイプ PCCV の主要設計条件を表-1 に示す。また、同表に敦賀2号 PCCV の主要設計条件も併記した。ここで、S₁ 地震、S₂ 地震は、「原子炉施設に関する耐震設計審査指針」²⁾ に示されるもので、最強地震、限界地震を意味する。また LOCA 荷重は、原子炉の冷却材喪失事故時荷重のことで、それには内圧 (設計圧力)、温度荷重、配管破断に伴うジェット力などが含まれるが、ここでは内圧のみを対象としている。なお、プロトタイプの S₁ 地震時と敦賀2号の S₂ 地震時 (S₂ 地震 (GT2) と表示する) の面内せん断応力度を比較すると、後者が僅かに大きいがほぼ等しいものである。

また、断面算定は、「原子力発電用コンクリート格納容器に関する技術基準(案)」³⁾ に示される荷重状態IVの範疇に入る次の3種類の荷重組み合わせ条件、

- (i) S₁ 地震+LOCA 時
- (ii) 1.5 LOCA 時
- (iii) S₂ 地震時

に対する PCCV 各部組み合わせ応力を求めて行なった。図-4 にプロトタイプ PCCV の代表点における荷重状態IVの組み合わせ応力度を示し、表-2 に設計配筋表を示している。

一方、試験体は、1/8 モデル、1/30 モデルとも基本的には次の考え方に基いてモデル化したものである。

(1) 形状寸法: 表-3 に示すように、1/8 モデル、1/30 モデルとも、主要部 (円筒シェル部) の形状寸法はそれぞれプロトタイプの1/8、1/30 とする。なお、ドーム部とかベーススラブ部のモデル化は両者共多少単純化する。また、1/8 モデルでは、バットレス、大開口および小開口などについても考慮し、忠実なモデル化を行うが、

1/30モデルではそれらを設けず単純化する (写真1~3 参照)。

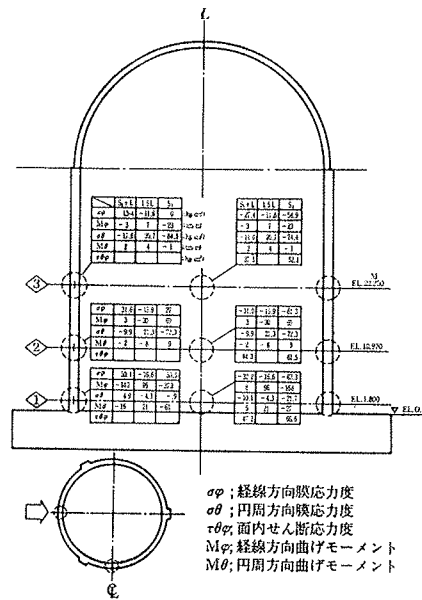


図-4 荷重状態IVの組み合わせ応力

高さ (m)	経線方向	円周方向
21.500	ド	D29 @ 280
	ム	D29 @ 300
10.750	円	D38, 51 @ 280
	筒	D38 @ 225
10.750	部	D38, 51 @ 140
	ベーススラブ	D51 @ 200
10.750		D51 @ 280
		D51 @ 225

表-2 設計配筋

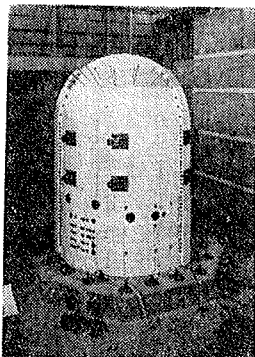


写真-1 1/8模型大型試験体

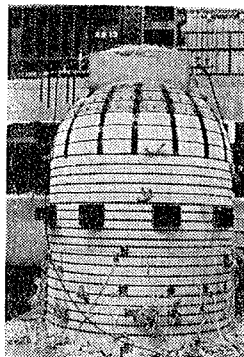


写真-2 1/30模型小型試験体(水平加力)

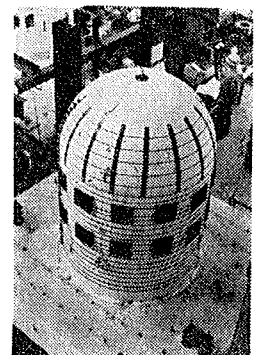


写真-3 1/30模型小型試験体(振動)

(2) 使用材料: 使用材料の力学的特性はプロトタイプに合わせるようにする(表-4参照)。

(3) テンドン: 1/8モデルでは、テンダンの本数および配置方法についてもプロトタイプに合わせる。一方、1/30モデルでは、逆Uテンダンの本数を約1/3にすると共に、フープテンダンの代わりにワインディングワイヤーを用いる(写真-2, 3参照)。

		プロトタイプ	1/8モデル	1/30モデル
内法高さ(M)		64.5	8.08	2.19
内径(M)		43.0	5.38	1.434
シェル厚	ドーム部(M)	1.10	0.16	0.05
	シリンダー部(M)	1.50	0.19	0.05

表-3 プロトタイプPCCVと試験体の形状寸法

		プロトタイプ	1/8モデル	1/30モデル
緊張材(テンドン)	テンダンの種類	—	19本よりストランド 12.7φ	7本よりストランド 6.2φ
	引張荷重 F _{pu}	1,030ton	17.7ton	4.11ton
テンダンの本数又はピッチ	逆Uテンドン	78本	76本	24本
	フープテンドン	@{350+700}	@{50+100}	3-2.9φ@68
コンクリート強度 F _c		420kg/cm ²	420kg/cm ²	420kg/cm ²
鉄材		SD40	SD40	SD30
筋形		D51	D13, D16	D6

注) *1 逆Uテンドンに使用、フープテンドンにはφ2.9ワイヤー(F_{pu}=1.30t)を使用

表-4 プロトタイプPCCVと試験体の使用材料

		プロトタイプ	1/8モデル	1/30モデル
テンドン	テンダンの種類	—	19本よりストランド 12.7φ	7本よりストランド 6.2φ
	降伏荷重 F _{py} *2	868ton	16.38ton	3.66ton
	テンダンの本数	N=78本	N=76本	N=24本
	降伏時拘束力 2N·F _{py}	1.35×10 ⁶ ton	2.49×10 ⁶ ton	1.76×10 ⁶ ton
自重 σ _D		9.3kg/cm ²	1.2kg/cm ²	0.9(4*)kg/cm ²
拘束応力度 σ _D +σ _{Fy}		73.9kg/cm ²	76.1kg/cm ²	75.3kg/cm ²
フープテンドン				
		プロトタイプ	1/8モデル	1/30モデル
テンドン	テンダンの種類	—	19本よりストランド 12.7φ	ワイヤー 3-2.9φ
	降伏荷重 F _{py} *2	868ton	16.38ton	3×1.30ton
	テンダンのピッチ P	@350+700	@50+100	@68
	降伏時拘束力 F _{py} /P	1,653t/m	218.4t/m	57.4t/m
拘束応力度 σ _{Fy}		110.2kg/cm ²	114.9kg/cm ²	114.7kg/cm ²

注) *1 振動モデルの場合、付加重量によるものを含める
*2 試験体の F_{py}には実際の使用材料の降伏荷重を使用

表-5 テンドン降伏時拘束力の比較

なお、コンクリートの単位断面積に対するテンダンの降伏時拘束力(降伏時拘束応力度)と自重による応力度の和がプロトタイプと試験体で等価になるようにする(表-5参照)。

(4) プレストレス: 導入プレストレスは、プロトタイプの設計プレストレスと試験体の実験時プレストレスとが等価になるように初期導入力を決定する。また、形状寸法の差によって生ずる自重による鉛直方向応力度の差もプレストレスで考慮する(表-6参照)。

なお、クリープ、レラクセーション、弾性縮みなどに

		経線方向応力度 σ _e			
		プロトタイプ PCCV	1/8モデル	1/30モデル	
				静的水平加力モデル	振動モデル
自重	σ _D (kg/cm ²)	9.3 (EL=21.75m)	3.0 (EL=2.72m)	≈ 0 (EL=72cm)	9.4
緊張直後のプレストレス	σ _{Fo} (kg/cm ²)	56.1	59.6	61.5	51.7
σ _D +σ _{Fo} (kg/cm ²)		65.4	62.6	61.5	61.1
プレストレス有効率	%	88.0	94.0	96.0	96.0
設計時又は実験時プレストレス	σ _{Fi} (kg/cm ²)	49.7	56.0	59.0	49.6
σ _D +σ _{Fi}		59.0	59.0	59.0	59.0

		円周方向応力度 σ _e			
		プロトタイプ PCCV	1/8モデル	1/30モデル	
				静的水平加力モデル	振動モデル
緊張直後のプレストレス	σ _{Fo} (kg/cm ²)	89.8	79.0	77.4	77.4
プレストレス有効率	%	83.0	94.0	96.0	96.0
設計時又は実験時プレストレス	σ _{Fi} (kg/cm ²)	74.3	74.3	74.3	74.3

注) *1 σ_{Fo}は全テンドン定着直後のプレストレスを表わす
*2 試験体のプレストレス有効率は、テンドン定着直後から実験開始までの期間に見込まれるクリープ、収縮およびレラクセーション等によるプレストレス損失量から算定

表-6 自重とプレストレスによる応力度

実験名	荷重及び実験内容	振動実験
1	プレストレス導入実験 1. 設計プレストレスの導入 2. PS導入時の縦・横筋・コンクリートのひずみ及びテンドン張力の測定	
2	内圧実験 1. 内圧4.2kg/cm ² の15%増まで加圧 2. 事故時内圧(L)に対し、弾性挙動を示すことを確認する	
3	水平加力実験 1. S ₂ 荷重相当の水平力荷重(荷重状態IV) 2. S ₂ 地震荷重に対する安全性の確認	
4	水平加力及び内圧実験 1. S ₁ 荷重+L相当の水平力と内圧を載荷 内圧:一定、水平力:変動 2. 地震荷重、事故時内圧の組合わせ応力に対する安全性の確認	
5	水平加力実験 1. S ₂ 荷重以上の荷重またはS ₂ 荷重時変位以上の大きな変位における繰返し載荷 2. 大変形時における挙動の確認	
6	破壊実験 1. 最終破壊まで水平力荷重 2. 終局時の強度と変形の確認及び最終破壊状況の把握	

表-7 実験項目

よるプレストレスロスについては、土木学会式⁴⁾を参考にして予測する。

(5) 鉄筋：鉄筋は鉄筋比をプロトタイプに合わせると共に、1/8モデルでは配筋法についても可能な限り合わせ、ダブル配筋とする。しかし、1/30モデルでは、配筋法を単純化し、シングル配筋とする。

なお、1/8、1/30モデルとも、縦筋の下端を逆Uテンドン定着用リングプレートに溶接し、ベーススラブからの縦筋の抜け出しを評価できるようにする。

(6) 鋼製ライナー：プロトタイプ PCCV に用いられる鋼製ライナーは構造要素ではないので、試験体では考慮しない。なお、水圧実験を行なう 1/8モデル、1/30モデルとも、その内面はネオプレンゴムシートでライニングし、気密性を保持できるようにする。

2.2. 実験項目

1/8モデル、1/30モデルを用いたそれぞれの実験の特徴と実験項目について述べる。

1/8モデルはプロトタイプ PCCV を忠実にモデル化したものであり、それを用いた実験は実証試験的な性格の強いものである。一方、1/30モデルはプロトタイプを単純化してモデル化したものであるが、それを用いた振動実験結果から PCCV 構造物の動的挙動を巨視的には把握できよう。さらに、1/30モデルによる静的水平加力実験と振動実験両者の結果の比較から、構造体の静的応答と動的応答の関連性、1/30モデルと 1/8モデルの結果の比較から、スケールエフェクトおよびバットレス、開口に関係する形状効果などにつき、解析的検討を加えれば、評価することができよう。

以上のことを勘案し、1/8モデルおよび1/30モデルの静的加力実験の実験項目は、表一7に示すように、基本的には同じとしている。

(1) プレストレス導入実験：1/8モデルでは、実機 PCCV のテンドン緊張作業手順と同じ手順で所定のプレストレスを導入する。1/30モデルでは、上記の作業手順を簡略化して所定のプレストレスを導入する。

(2) 内圧実験：1/8、1/30モデルとも、設計圧力の 1.15倍までの圧力（プロトタイプの試験圧力相当）を水圧を用いて作用させる。圧力は、水頭圧を考慮し、円筒シェル中腹位置で所定の圧力になるようにする。

(3) 水平加力実験：設計で想定している地震時荷重に相当する静的水平力を正負繰り返し載荷する。この水平加力実験は次の3段階の実験から成る。第1段階は、 S_1 、 S_2 地震時荷重に対応するレベルまでの載荷、第2段階は S_1 地震+LOCA時荷重（内圧のみ）に対応するレベルまでの載荷である。さらに、第3段階では、設計荷重を超過したレベルまでの水平力のみによる繰り返し加力で、

構造体が破壊するまで載荷する。なお、水平力は、曲げモーメントとせん断力分布が設計に対応するように、高さ方向に3段（1/8モデル）または2段（1/30モデル）の載荷断面を設けて加力する。これらの実験で、水平力または水平力と内圧を同時に受ける PCCV 構造体の弾性挙動、非弾性挙動、終局耐力、破壊モードおよび復元力特性を求め、設計荷重に対する安全余裕を確認する。

(4) 起振機による振動実験：試験体頂部に設置した電動型起振機による強制加振実験、または自由振動実験により、各種荷重レベル経験後の構造体の動的応答性状を把握する。

一方、1/30モデルによる振動実験では、模型則に基き試験体に付加重量（約 22t の鉛ブロック……後述）を取り付け、円筒中腹位置の自重による応力度をプロトタイプ PCCV のそれと等価にする。また、入力波の時間軸を、プロトタイプの場合の $1/\sqrt{30}$ とすることにより、固有周期が $1/\sqrt{30}$ 、応答加速度と応答ひずみ度が 1/1、応答変位が 1/30 の比率でプロトタイプに対応させる。

この振動実験は科学技術庁国立防災科学技術センターの大型振動台を用いて行ない、基本的には次の2種類の入力波実験から成る。

(1) 模擬地震波実験：敦賀2号 PCCV の設計用模擬地震波を振動台に入力し、弾性応答範囲から非弾性応答範囲に亘る振動性状を把握する。

(2) 正弦波実験：エンベロップ正弦波などを用いた加振で、動的な入力による構造体の破壊性状などを把握する。

3. 実験工程と分担

1/8モデル水平加力実験および1/30モデル水平加力実験と振動実験は、試験体製作期間を含め、昭和53年12月から昭和55年3月までの16カ月間に亘って並行して行なわれてきた。なお、これらの実験を担当した PCCV 研究グループ構成員を以下に示す。

〔PCCV 研究グループ構成員〕

○実験研究担当……構造研究室

武田 寿一	竹本 靖
山口 恒雄	吉岡 研三
高橋 泰彦	中山 達雄
表 佑太郎	山口 義博
江戸 宏彰	鈴木 哲夫
古屋 則之	菊池 利武
小池 健仁	木村 耕三
中村 嶽	大内 一
末 永 正	町田 伍兆

- コンクリート材料管理……材料研究室
高橋久雄 久保田昌吾
中根淳 永井康淑
川口徹
- 設計・製作協力……東京本社 GT-2 プロジェクト部
- PS 導入作業協力……東京本社建築技術部

4. むすび

本報告にあたり、関西電力(株)および日本原子力発電(株)の御厚意により資料⁵⁾⁶⁾を引用させていただいたことを記し、謝意を表します。また、これらの実験を行なうにあたり、1/8 では関西電力(株)、1/30 では国立防災科学技術センター、日本原子力発電(株)の関係者多数の方々御指導を得ると共に、さらに1/30モデル実験では三菱重工業(株)および大林・清水・竹中共同企業体の関係者多数の方々御協力いただき、感謝致します。

参考文献

- 1) 小垣, 小林, 他: プレストレストコンクリート円筒

壁体のせん断耐力に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和54.9)

- 2) 原子力委員会: 原子炉施設に関する耐震設計審査指針, (昭和53.9)
- 3) 資源エネルギー庁: 原子力発電用コンクリート格納容器に関する技術基準(案), (昭和52.7)
- 4) 土木学会: プレストレストコンクリート標準示方書, (昭和53)
- 5) 小垣, 小林, 他: 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和55.9)
- 6) 加藤, 渡部, 他: 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和55.9)

(文責 山口恒雄)