

# 論文 BAHTS-PCCV の耐震・耐圧性能に関する研究

杉田 裕行\*1・日野 吉彦\*1・森山 敏行\*2・上戸 恭介\*2

**要旨:** プレストレストコンクリート製格納容器 (PCCV) の tendon を斜め螺旋状に配置し、全ての tendon を脚部に定着する方式 (Bottom Anchored with Helical Tendon System PCCV, 以降 BAHTS-PCCV と呼称) を提案する。本構造システムの採用で脚部に大きなプレストレス力が生じ、耐震性能が向上する。また、斜めに配置された tendon の角度を変えることで最適な張力状態を容易に実現できるメリットを有する。本論文では BAHTS-PCCV の斜めに配置されたレイアウトの成立性を確認するとともに、時刻歴地震応答解析により高い耐震性能を有すること、線形 FEM による応力解析から PCCV として十分な耐圧性能を有することを示した。  
**キーワード:** 格納容器, PCCV, 斜め tendon, 耐震性, 耐圧性

## 1. はじめに

2013年7月に施行された原子力規制委員会の新規制基準においては、原子力発電所の施設に対して地震等に対処するための要求性能が厳格化され、従来を大幅に上回る設計用地震動に対して安全機能を喪失しないことが求められている。

一方、国内の120万kW級の加圧水型軽水炉 (PWR) の格納容器にはプレレストコンクリート製格納容器 (PCCV) が採用されており、新規制基準による要求性能に対して十分な耐震性能を有することが確認されている。

しかしながら、原子力発電所の新規建設においては、更なる安全性向上の観点から、より大きな地震動に対する耐震性能を要求されることが予想される。このような状況を踏まえ、本論文では tendon (緊張材) 配置の見直しによって耐震性能の向上が期待される新たな方式の PCCV を提案する。

従来の PCCV は、円周方向はフープ tendon、経線方向は逆 U tendon によってプレストレス力を導入する方式 (以降、従来 PCCV と呼称) としている。これに対し、提案する PCCV は tendon を斜め螺旋状に配置し (図-1 参照)、全ての tendon を脚部に定着する方式 (Bottom Anchored with Helical Tendon System PCCV, 以降 BAHTS-PCCV と呼称) とする。本方式の採用により、地震動に対して大きな応力が発生する脚部に大きなプレストレス力の導入が可能となり (従来 PCCV で経線方向に配される逆 U tendon の tendon 量に加え、円周方向のフープ tendon 分の tendon 量も脚部に定着されるため大きなプレストレス力の導入が可能となる。)、従来 PCCV よりも高耐震型の PCCV となることが期待される。また、BAHTS-PCCV は定着部を脚部に集中させることで、従来 PCCV で必要であったバットレスが不要となる。また、

tendon 緊張や検査用のバットレスシャフトがなくなることで、周辺建屋の配置上も有利となる。バットレスは構造上の剛性急変部であり、これを無くすことで局所的な応力を低減できるメリットを有する。その他、バットレス部が不要となることからバットレス部における tendon 同士の干渉回避を考慮する必要がなくなり、tendon 配置の自由度向上が図れ、また、斜め配置した tendon の角度により、円周方向・経線方向のプレストレス力のバランス調整が可能となり、適切な張力計画が出来る。

本論文では斜め配置されたレイアウトの成立性の確認、耐震性能に対する BAHTS-PCCV の優位性を確認するため、集中質量系モデルの時刻歴地震応答解析による評価及び PCCV として十分な耐圧性能を有することを確認するため、有限要素法 (以降、FEM と呼称) のモデルを用いた事故時内圧作用時の静的応力解析を実施する。

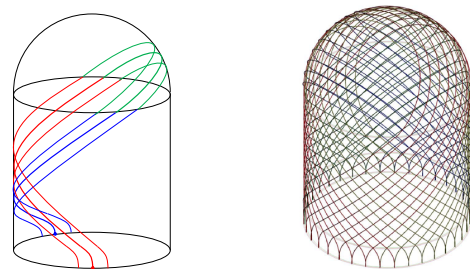


図-1 tendon 斜め配置概念図  
 (左図: 斜め配置概念, 右図: BAHTS-PCCV)

## 2. 構造概要

### 2.1 従来 PCCV

#### (1) 躯体形状及び物性値

従来 PCCV として想定する形状は内径 46.5m, 円筒部高さ 46.25m, 円筒部・ドーム部を合わせた全高は 72.05m

\*1 (株)大林組 原子力本部 工修 (正会員)

\*2 三菱重工業(株) 原子力事業部 工修

とした。円筒部はテーパー形状とし、壁厚をスプリングライン(図-2参照)から脚部にかけて1.6m~3.0mとする。ドーム部はスプリングラインから頂部にかけて1.6m~1.4mとする。また、コンクリート強度についてはFc60とし、文献<sup>2)</sup>により単位体積重量、物性値を定める。配筋については表-1(鋼種は全てSD490とする。)に示す。

表-1 配筋要領

高さ (m)	配筋 (全断面)	
	経線方向	円周方向
46.25~35.90	2×5-D51/2°	2×D51@225+D41@450
35.90~30.00	2×5-D51/2° +5-D38/2°	2×D51@225+D41@450
30.00~25.20	2×5-D51/2° +2×5-D38/2°	2×D51@225+D41@225 +D38@450
25.20~17.20	2×5-D51/2° +2×5-D38/2°	2×D51@225+D41@225 +D38@450
17.20~9.60	3×5-D51/2° +5-D38/2°	3×D51@225+D38@225
9.60~0.00	5×5-D51/2°	4×D51@225

※例：「2×5-D51/2° +5-D38/2°」は躯体の2°の範囲に5本のD51が2段、5本のD38が一段の計3段が配筋されていることを示す。

(2) テンドン仕様

表-2にPC鋼材の許容応力度、図-2にテンダンの配置概念図、表-3にテンダンの配置要領を示す。テンドン容量は13MN級を想定し、テンドン張力には弾性ロス、経年ロス(60年後とする)、摩擦ロス、設計マージンを考慮する。摩擦ロスについては文献<sup>2)</sup>より式(1)を用いた。なお、テンドンはアンボンドとし、緊張方法は両引きとする。

$$P_x = P_0 \cdot \exp\{-(\mu\alpha_x + \lambda l_x)\} \quad (1)$$

ここに $P_x$ ：定着端からxの位置におけるテンドン張力(N)

$P_0$ ：定着端におけるテンドン張力(N)

$\mu$ ：テンダンの角変化に対する摩擦係数(0.14/rad)

$\lambda$ ：シースの波打ちに対する摩擦係数(0.001/m)

$\alpha_x$ ：定着端からxの位置までのテンドン全角変化(rad)

$l_x$ ：定着端からxの位置までのテンドン長さ(m)

また、定着時のセットロス $\Delta l$ については0.05mとした。

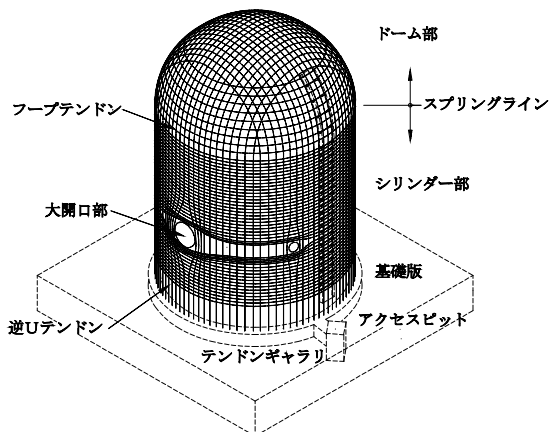


図-2 従来PCCVテンドン配置概念図

表-2 PC鋼材の許容応力度

状態	条件	許容引張荷重 (kN)	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
プレストレス力導入時	緊張時	min{0.75Fu, 0.85Fy}	188.7 (0.85Fy)
	定着完了時	min{0.70Fu, 0.80Fy}	177.6 (0.80Fy)

※Fu：引張強度(引張荷重, 261kN)  
Fy：降伏点強度(0.2%永久伸びに対する荷重, 222kN)

表-3 テンドン配置要領

		間隔
フープ	円筒	@450 mm
	ドーム	@2.5°
逆U		@2°

2.2 BAHTS-PCCV

(1) 躯体形状及び物性値

躯体形状、物性値及び配筋については従来PCCVと同様とする。

(2) テンドン仕様

テンダンの仕様については基本的には従来PCCVと同様であるが、テンダンの配置については全て脚部で定着するものとし、脚部で2°ピッチに配置する。また、基礎版鉄筋とテンドンシーソとの干渉回避を目的に脚部では基礎版に対して垂直に配置されるようテンドン方向を変える。テンダンの配置概念図については図-1を参照されたい。なお、図-1の右図は概念図のため10°ピッチにテンドンを描画している。

3. BAHTS-PCCVのテンドン配置検討

BAHTS-PCCVでは斜め配置されたテンダンの傾斜角度を変えることによって、PCCV円筒壁の円周方向と鉛直方向のプレストレス力のバランスを変えることが可能である。また、PCCVでは耐圧・耐震性が要求されることから傾斜角度を円周・経線方向にバランスよくプレストレスを導入できる45°とすることが考えられる。しかしながら、ドーム部については角度によってはテンドンが疎となり、プレストレスが不十分な箇所が生ずる可能性がある。そこで本節ではテンダンの傾斜角度を45°、55°に変更した場合のドーム部のテンダンの配置性について検討を行う。図-3に傾斜テンドン配置概念図を示す。本検討では図-3に示すようにテンドン傾斜角度をパラメータにドーム部、円筒部において45°、55°とした場合の検討結果を示す。

テンドンシーソの干渉回避のため壁厚方向にレイヤーを分け、ドームでは外側レイヤーから内側レイヤーに乗り換える必要がある。4つにテンドンをグルーピングした場合の円筒部の伏せ図を図-4に示す(内外のテンダンの対応を色分けした。)

図-4では例えばIの領域の緑のテンドンは外側を通

っているが、IIIの領域では内側を通っているのがわかる。

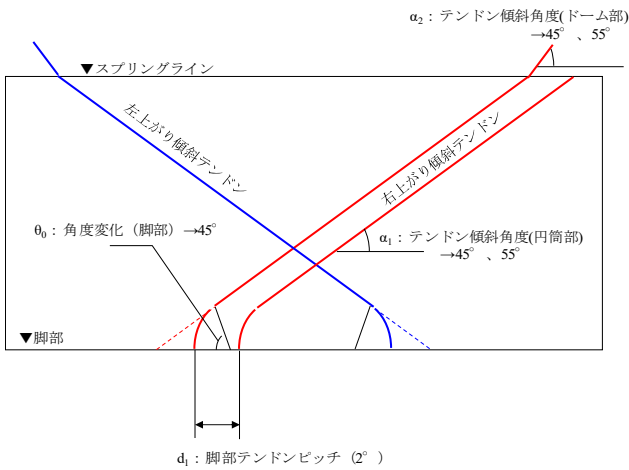


図-3 傾斜テンドン配置概念図

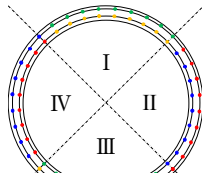


図-4 グループタイプ概念図

図-5に4グループとした場合のテンダンの傾斜角度について検討した結果を示す。なお、本節ではテンドン配置を脚部位置で簡略的に10°ピッチとして検討する。

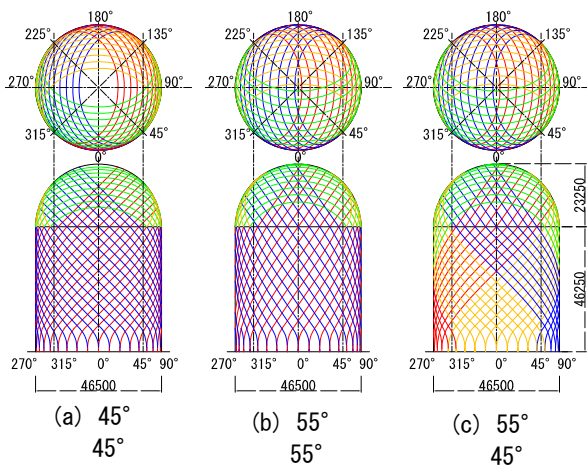


図-5 テンドン傾斜角度検討  
(上：ドーム部，下：円筒部)

図-5の(a)はテンドン傾斜角度をドーム部、円筒部とも45°の場合である。円筒部についてはテンダンの疎密ばらつきが小さいが、ドーム部頂部にテンドンが疎となる部分が生じ、弱点部となる恐れがある。(b)はドーム部、円筒部とも55°の場合である。ドーム部頂部にテンドンが疎となる部分が小さくなりテンドンがバランスよく配

置出来ることわかる。(c)はドーム部55°、円筒部45°の場合である。(c)より、ドーム部、円筒部で角度を変更してもスプリングライン部においてテンダンのつながりを整合させればバランスよくテンダンを配置できる。以上のこと及び前述したように円筒部について45°の方が円周・経線方向にバランスよくプレストレスの導入が可能と考えられることドーム部については55°とする疎な部分が小さくなることからここではテンダンの傾斜角度について(c)の場合のドーム部55°、円筒部45°をテンダンの均一でバランスのよい配置となると判断した。

図-6にドーム部のテンドン配置について検討した結果を示す。

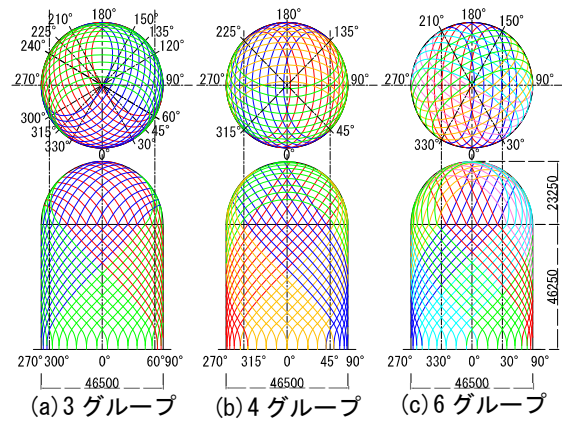


図-6 ドーム部のテンドン配置検討

図-6の(a)はドーム部のテンダンを3グループ、(b)は4グループ、(c)は6グループとしてテンダンの配置検討を行った結果である。

図-6では円筒部のテンダンの傾斜角度はどのグループタイプでも一律45°とし、図-5と同様にドーム部のテンドンに疎な部分が生じないようにドーム部のテンダンの傾斜角度を変化させ3グループでは50°、4グループでは前述の検討同様に55°、6グループでは60°とする必要があることがわかった。この結果より、グループ数が小さくなるにつれ円筒部とドーム部の角度変化が小さくなり、摩擦損失が小さくなると考えられるが、図-6の(a)より3グループタイプでは対応ではスプリングライン近傍のテンドンにおいて、円筒部とドーム部の切り替わり部にゆがみが生じてしまった。この結果から4グループタイプがスプリングラインでの角度変化が小さく、プレストレスの摩擦損失が抑えられ、最もバランスが良い配置と考えられる。

#### 4. 構造検討

##### 4.1 耐震性能

BAHTS-PCCV はすべてのテンダンを脚部で緊張する

ため、脚部ほど大きなプレストレス力が働く。本節では集中質点系モデルによる時刻歴地震応答解析結果により、従来 PCCV と BAHTS-PCCV の比較を行うことで BAHTS-PCCV の脚部に生ずる大きなプレストレス力が耐震性能に与える影響を検討する。なお、テンドン配置について円筒部のテンドン傾斜角度を 45° 方向として非線形性を与え、ドーム部についてはプレストレスの影響を無視し、線形として扱う。なお、テンドンの脚部における基礎版に垂直に挿入するための R 部については要素番号 CV01 内で切り替わる為、R 部の角度変化による摩擦損失を定着部張力から差し引いた。

### (1) 解析概要

図-7 に地震応答解析モデルを示す。図-7 に示すように、地震応答解析モデルは基礎固定とし、部材を梁要素とした集中質点系モデルとする。軸曲げに対しては線形、せん断に対してドーム部は線形、円筒部は非線形である JEAC4601-2015<sup>3)</sup>に示されるせん断応力度 $\tau$ -せん断ひずみ $\gamma$ 関係のトリリニアの骨格曲線を採用し、履歴特性は最大点指向型とした。材料減衰についてはひずみエネルギー比例型減衰とし、文献<sup>3)</sup>を参考に減衰定数は3%とした。解析は汎用解析プログラム TDAPIIIにより行った。

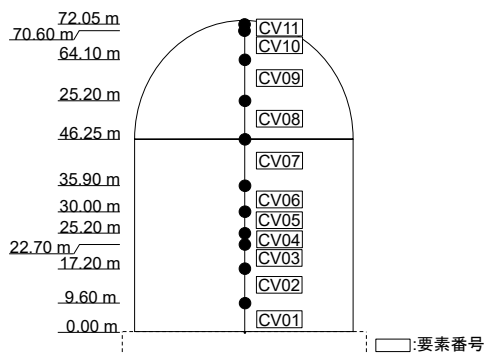


図-7 地震応答解析モデル

表-4 に円筒部の壁厚をスプリングラインから脚部にかけて 1.6m~3.0m とした場合の諸元表（高さ、質点重量 m, 軸断面積 A, せん断断面積 As, せん断断面係数 $\kappa$ , 断面 2 次モーメント I）を示す。

表-4 諸元表（脚部 3m の場合）

要素番号	高さ (m)	m (kN)	A (m <sup>2</sup> )	As (m <sup>2</sup> )	$\kappa$ (-)	I (m <sup>4</sup> )
CV11	72.05	20,936	211	105	2.00	18,549
CV10	70.60	41,345	211	105	2.00	45,051
CV09	64.10	47,007	211	105	2.00	59,412
CV08	54.90	48,982	211	105	2.00	56,522
CV07	46.25	68,915	291	146	2.00	85,391
CV06	35.90	45,010	319	160	2.00	94,427
CV05	30.00	39,712	343	171	2.00	101,920
CV04	25.20	21,788	355	177	2.00	105,873
CV03	22.70	50,611	382	191	2.00	114,696
CV02	17.20	76,030	419	209	2.00	127,172
CV01	9.60	106,236	467	233	2.00	143,413

### (2) 地震動

地震動については BCJ-L2 地震動を用い、原子力発電所の弾性設計用地震動 Sd を想定して最大加速度が 670 cm/sec.<sup>2</sup> ( $\approx 1,000 \text{ cm/sec.}^2 \times 2/3$ ) になるように加速度を係数倍した。

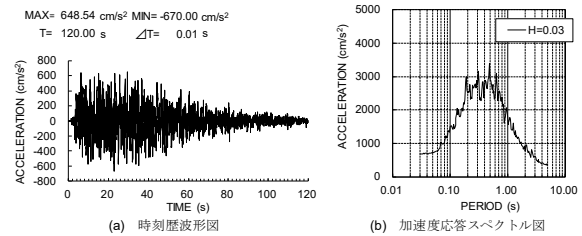


図-8 地震動(BCJ-L2 を 670cm/sec.<sup>2</sup> 相当に係数倍)

### (3) プレストレス力の比較

従来 PCCV と BAHTS-PCCV について、円筒部の壁厚をスプリングラインから脚部にかけて 1.6m~3.0m とした場合の鉛直方向の軸応力度 $\sigma_v$ の比較を図-9 に、図-10 に CV01(脚部)のせん断力 Q-せん断ひずみ $\gamma$ 関係を示す。

図-9 より、BAHTS-PCCV の $\sigma_v$  は従来 PCCV に比べ約 1.61 倍程度大きくなっている。また、図-10 より第 1, 2 折れ点のせん断力を比較すると BAHTS-PCCV は従来 PCCV に比べ約 1.12 倍程度大きくなるのがわかる。これは JEAC4601-2015 に示される $\tau$ - $\gamma$ 関係の第 1, 2 折れ点の $\tau$ について $\sigma_v$  が大きくなるに従い、大きくなるためである。また、第 3 折れ点については両者一致しているがこれは本論文の条件下では JEAC4601-2015 に示される $\tau$ - $\gamma$ 関係において $\sigma_v$  の影響が無視される式が適用されるためである。

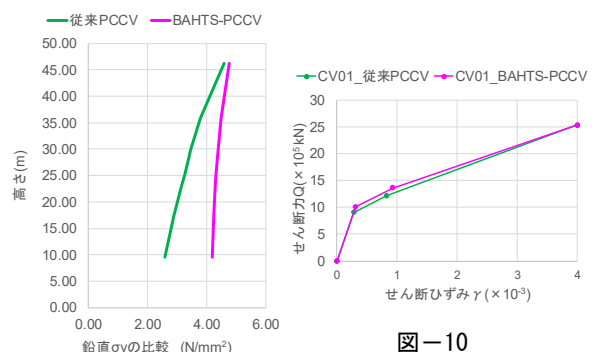


図-10 CV01(脚部)の骨格曲線

図-9 鉛直方向の軸応力度  $\sigma_v$

### (4) 解析結果

本節では従来 PCCV と BAHTS-PCCV の耐震性能の比較を行う。なお、本節ではテーパ形状となっている円筒部の脚部を 3.0m~1.6m まで 0.1m 刻みで変更し(スプ

リングライン部の壁厚は1.6mで固定), それぞれ応答値の比較を行った。

図-11, 図-12 にベースシア係数 CB-せん断ひずみ $\gamma$  関係の骨格曲線上に最大応答点をプロットした図を示す。なお, 図-11 は従来 PCCV の結果を, 図-12 は BAHTS-PCCV の結果を示す。なお, 本論文におけるベースシア係数 CB は CV01 に発生する応答せん断力を PCCV の全重量で除したものとす。

図-11 より, 従来 PCCV は全ての脚部厚で応答値は第一折れ点を超えている(第一折れ点のせん断ひずみ $\gamma$  と比べ応答値は約 1.19 倍~2.53 倍)。一方, 図-12 より, BAHTS-PCCV は脚部厚 3.0m~2.2m で第一折れ点のせん断ひずみ $\gamma$  と比べ比較的同程度の応答(第一折れ点のせん断ひずみ $\gamma$  と比べ応答値は約 0.97 倍~1.09 倍) となっていることから概ね弾性範囲であることがわかる(脚部厚第一折れ点のせん断ひずみ $\gamma$  と比べ応答値は約 0.97 倍~1.09 倍)。このことから本テンドン配置を適用することで耐震性の高い構造とすることが出来, 脚部の壁厚を合理化できる可能性がある。

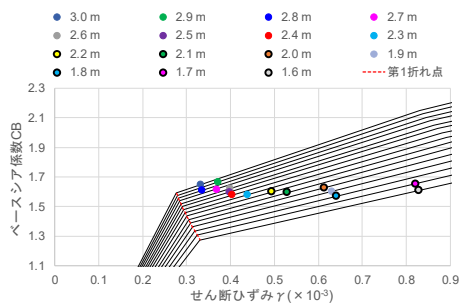


図-11 最大応答値図(従来 PCCV)

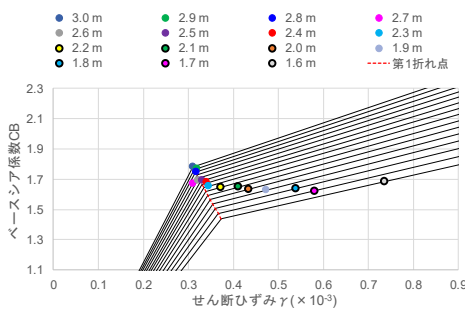


図-12 最大応答値図(BAHTS-PCCV)

## 4.2 耐圧性能

本節では線形 FEM モデルを用いた応力解析により, 事故時に配管が破断し格納容器内の内面に一様に圧力が作用する荷重(以降, 内圧荷重と呼称)に対する BAHTS-PCCV の耐圧性能について検討する。なお, ここでは BAHTS-PCCV の円筒部壁厚を一律 1.6m とし, テンドンレイアウトについてはテンダンの傾斜角度を円筒部

45°, ドーム部 55° とした。耐震検討では躯体脚部を 3.0m としていたがテンダンの総量は変えないことから全体の内側への締め付け力は変わらないため, 本節において円筒部壁厚を一律 1.6m と簡略化した場合でも内圧への抵抗性は概ね同様と考えられる。

### (1) 解析概要

図-13 に応力解析用の FEM モデルを示し, 図-14 に円筒部においてモデル化したテンドンに設定した張力分布を示す(高さ方向の張力の変動は摩擦損失及び脚部においてはセットロスによるものである)。FEM モデルについては躯体を線形のシェル要素にてモデル化した。プレストレス力についてはテンドンに梁要素でモデル化した, 軸力を入力した。また, 躯体はテンドンレイアウトに従うメッシュ分割とし, 脚部で 5° ピッチに分割するようにし, テンドンは 2° ピッチに配置したものを 5 本ずつ集約し 10° ピッチにモデル化した(テンドンを模擬した梁要素には 5 本分(=10° ÷ 2° / 1 本)の張力を導入した)。なお, 梁要素についてはヤング率  $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ , 断面積  $33981.5 \text{mm}^2$  (=テンドン 1 本  $6796.3 \text{mm}^2 \times 5$  本)としてモデル化した。解析は Msc.NASTRAN2008 を使用した。

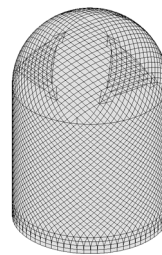


図-13 線形 FEM モデル

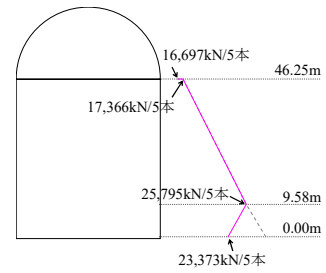


図-14 テンドン張力分布(円筒部)

図-15 にテンドン張力のコンター図を, 図-16 に常時(自重+プレストレス時)の変形コンターを示す。図-15 より, テンドン張力の分布は脚部に大きな張力が生じ, 脚部にテンドン定着部を集約することで耐震上メリットがあることがわかる。

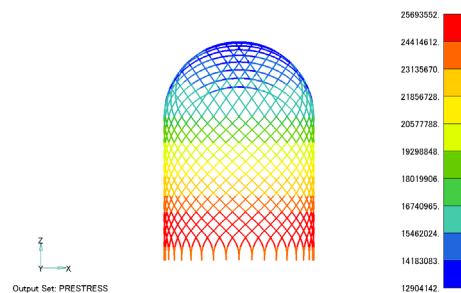


図-15 テンドン張力コンター【単位: N】

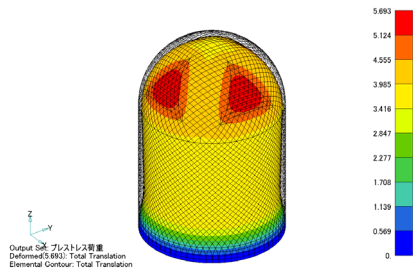


図-16 変形コンター【単位：mm】  
(自重+プレストレス時，変形倍率 500 倍)

### (2) 内圧

内圧荷重は 0.392MPa(gage)とし，PCCV 内面に一様に載荷する。

### (3) 解析結果

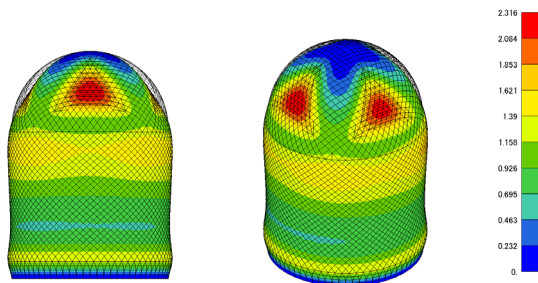


図-17 変形コンター【単位：mm】  
(自重+内圧+プレストレス時，変形倍率 1,000 倍)  
(左図：正面図、右図：鳥瞰図)

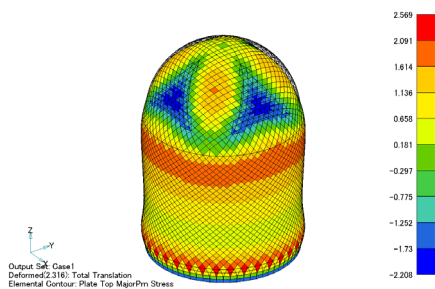


図-18 最大主応力コンター【単位：N/mm²】  
(自重+内圧+プレストレス時，変形倍率 1,000 倍)

図-17 に変形コンター図を，図-18 に最大主応力コンター図を示す。

図-17 より，内圧荷重に対して変形は最大で約 2.3mm と常時の最大変形である約 5.7mm (図-16 参照) に比べ小さいことがわかる。但し，スプリングライン及び脚部近傍において内圧により，若干外側に膨らんでいる。この変形はスプリングラインにおいてはテンダンの傾斜角度の見直しにより，また，脚部近傍についてはテンダンの

の脚部の 45° から 90° に角度変化する位置を下方に移動することで膨らみを抑えることが可能と考えられる。また，図-18 より，最大主応力についても最大で約 2.5N/mm²であり，コンクリートの引張強度と考えられる  $0.33 \times 601/2 = 2.56 \text{N/mm}^2$  (文献 4)の引張強度) と同等程度であるため，躯体内に配筋される鉄筋で十分に負担可能である。以上のことから BAHTS-PCCV は PCCV として十分な耐圧性能を有することが確認された。

## 5. まとめ

本論文では BAHTS-PCCV についてテンダン配置性・耐震性能・耐圧性能について明らかとするためにテンダンレイアウトの検討，集中質点系モデルを用いた時刻歴地震応答解析，線形 FEM モデルによる応力解析を行った。

以下に得られた知見についてまとめる。

- (1) BAHTS-PCCV のテンダン傾斜角度についてテンダンの配置検討から，テンダンの均一でバランスの良い配置が可能であり，PCCV 円筒壁の円周方向と鉛直方向のプレストレス力について最適な張力状態を容易に実現できることがわかった。
- (2) BAHTS-PCCV では脚部にテンダン定着部を集約することで大きなプレストレス力を導入することが可能となり，脚部壁厚を 3.0m とした本論文の条件下では従来 PCCV と比べ第一折れ点耐力が約 1.12 倍大きくなることがわかった。
- (3) 時刻歴地震応答解析結果から BAHTS-PCCV は円筒部の壁厚を低減できる可能性があり，本論文の構造では脚部壁厚を 2.2m としても応答値は概ね弾性範囲に納まることがわかり，耐震上躯体の合理化が図れることがわかった。
- (4) 応力解析結果から BAHTS-PCCV は事故時内圧作用時に，変形の発生量は小さく，最大主応力についてもコンクリートの引張強度に比べ小さいことから PCCV として十分な耐圧性能を有することがわかった。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会，鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- 2) 日本建築学会，プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説，1998
- 3) 日本電気協会，原子力発電所耐震設計技術規定 (JEAC4601-2015)，2015
- 4) 日本建築学会，鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説，1997