

1/4PCCVの耐圧限界挙動に関する非線形有限要素解析

ラウンドロビン試験前・試験後解析

米澤 健次 井元 勝慶
尾形 隆永
(本社 原子力本部技術部)

Non-Linear Finite Element Analysis for Limit State Behavior of 1/4 PCCV Model Subjected to Internal Pressure Round Robin Pretest and Posttest Analyses

Kenji Yonezawa Imoto Katsuyoshi
Takanori Ogata

Abstract

The objective of this study was to establish an analysis methodology for the nonlinear behavior of actual PCCVs subjected to internal pressure. There is no generally accepted analysis method that takes into account three-dimensional effects.

Limit state pressure tests were carried out on a 1/4-scale PCCV in September, 2000 in Albuquerque, USA. A Round Robin Analysis was also held before and after the test. We participated in the Round Robin Analysis as members of the Japan PCCV research group. The authors conducted a pre- and post-test analyses program that included many types of analysis models and proposed element devices.

This report discusses the feasibility of the pre- and post-test analysis methods developed here for the nonlinear behaviors of PCCV up to ultimate internal pressure by comparing with the test results.

概要

本研究は、漸増内圧を受けるプレストレストコンクリート製原子炉格納容器(PCCV)の耐圧限界挙動を精度良く予測できる解析手法を確立するために行ったものである。既往の解析手法はPCCVを軸対称回転体と仮定した解析が殆どで、大小開口や貫通孔、テンドン配置、バットレス等の非軸対称性を考慮した詳細な3次元非線形解析を実施した例はない。また、1/4縮尺PCCV試験体の耐圧限界試験が米国SNLで実施された際、世界のPCCV解析技術の向上を目的としてラウンドロビン解析が併せて行われた。当社は共同研究グループの一員として、ラウンドロビン解析に参加し、開口部、バットレス、及びテンドンの摩擦すべり挙動を考慮した非線形解析手法を検討してきた。本報告は、ラウンドロビン解析で実施した試験前・試験後解析の概要を述べ、限界状態に至るまでのPCCVの非線形解析結果と試験結果の比較を通して、本研究による解析手法の有効性を検討し、PCCV耐圧性能に関する解析技術の世界的レベルについて論じるものである。

1. はじめに

日本のPWR型原子炉建屋において標準的に採用されつつあるプレストレストコンクリート製格納容器の1/4縮尺試験体(以下、1/4PCCVと略記)を用いた限界耐圧試験が、2000年9月に米国ニューメキシコ州アルバカーキのサンディア国立研究所で実施された¹⁾²⁾。この耐圧試験では、2000年に限界状態試験(LST)¹⁾、2001年に構造破壊モード試験(SFMT)²⁾がSNLで実施された(Table 1)。

また、この耐圧試験に際して、世界のPCCV解析技術の向上を目的として、Table 1に示すラウンドロビン解析という一種の解析的な国際コンペティションが行われた³⁾⁴⁾。当社は共同研究グループ(日本原子力発電(株):幹事、関西電力(株)、九州電力(株)、(株)大林組:幹事、

大成建設(株)、三菱重工業(株))として、このラウンドロビン解析に参加し、1/4PCCVを対象とした試験前解析および試験後解析⁵⁾⁻⁸⁾を実施した。

本研究は、この1/4PCCVを対象として、有限要素法(以下、FEM解析と略記)を用いた試験前解析および試験後解析を通して、漸増内圧を受けるPCCVの耐圧限界挙動を精度良く予測できる解析手法の確立を目的として実施した。

既往の解析手法はPCCVを軸対称回転体と仮定した解析が殆どで、大小開口や貫通孔、テンドン配置、バットレス等の非軸対称性を考慮した詳細な3次元非線形解析を実施した例はない。そこで、試験前解析では非軸対称要因を考慮した数多くの解析モデルを用いた解析を行い、1/4PCCVの非線形挙動および破壊モードを予測した。こ

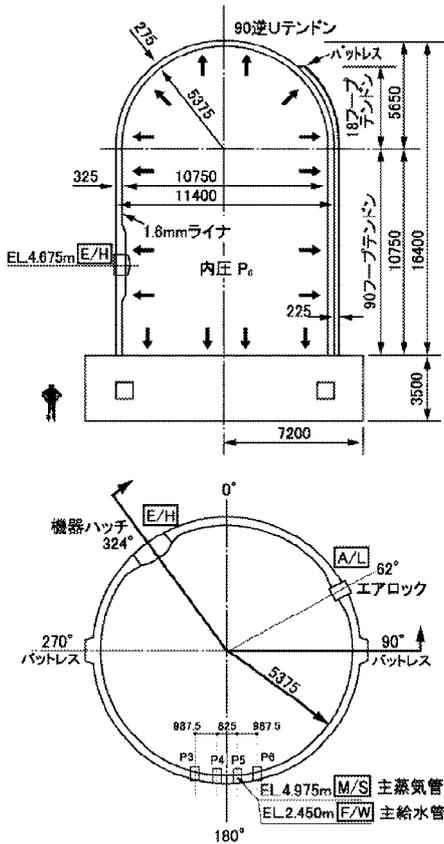


Fig. 1 1/4PCCVの形状
Configuration of 1/4 PCCV Model

ここでは、予測精度を高めるために tendon とシース間の摩擦すべり特性の要素モデルを開発した。試験後解析では、試験前解析と試験結果の相違点を検討し、原因を解明した上で再度解析を実施した。その結果、ラウンドロビン解析に参加した世界17機関のうち、本研究の解析は構造躯体の非線形挙動を最も精度良く予測できており、その解析技術の世界的レベルが確認された。

以下に、ラウンドロビン解析で実施した試験前・試験後解析の概要を述べ、限界状態に至るまでのPCCVの非線形解析結果と試験結果の比較を通して、本研究で検討した解析手法の有効性について論じる。

2. 1/4PCCV耐圧試験の概要¹⁾²⁾

試験体は、実機を模擬した1/4縮尺モデルで、鋼製ライナと機器搬入口(E/H)、エアロック(A/L)、主蒸気管(M/S)および主給水管(F/W)等の開口や貫通孔を有し、開口部近傍は円筒壁一般部に比べて鉄筋比は大きく壁厚も厚くなっており、鋼製のシースに納められた90本の逆U tendon、108本のフープ tendon を有している。また、各材料には実機と同等の材質を用いている。Fig. 1~3に1/4PCCVの形状および構造概要を示す。

LSTでは、1/4PCCVは常温の窒素ガスを用いて静的に加圧された。内圧1.0MPa時にライナ破断による漏洩が計測され、内圧1.32MPaでライナ破断部からの漏洩量が大きくなり試験を終了した。試験終了後の検査によると17カ



Fig. 2 1/4PCCVの全景
Whole View of 1/4PCCV Model

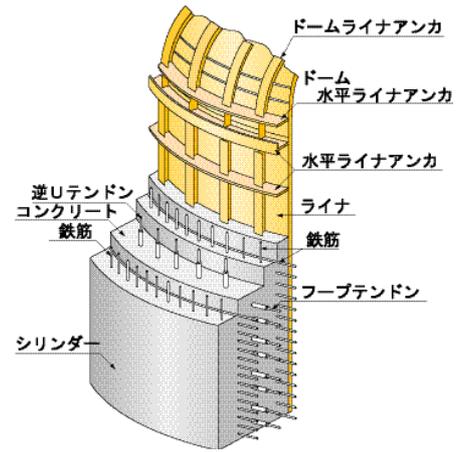


Fig. 3 1/4PCCVの構造
Structure of PCCV Wall

Table 1 研究工程
Major Milestones

年度	1992~	1997	1998	1999	2000	2001
項目						
1/4PCCV耐圧試験	計画・設計・製作・計測システム				★9月 LST	★11月 SFMT
ラウンドロビン解析		▲11月 資料配布		▲10月 試験前解析会議		▲8月 試験後解析会議
共同研究			試験前解析			試験後解析

Table 2 解析コード

Computer Codes and Analysis Models

解析ソフト	解析の種類と適用部位
FINAL	tendon 摩擦モデル ライナアンカモデル 軸対称回転体モデル全体解析 90°シェルモデル全体解析 180°シェルモデル全体解析 円筒脚部-基礎版モデル局部解析 E/H-A/Lモデル局部解析 A/Lモデル局部解析 M/S, F/W周辺モデル局部解析
DIANA	パットレス局部解析
MARC	ライナ解析

所のライナ破断が確認され、そのほとんどが溶接近傍で生じていた。最大圧力時の鉄筋最大ひずみは約1.5%、 tendon 最大ひずみは約1.0%であった。その後、構造体自体の限界挙動を把握する目的で、ライナ破損箇所を修復し、水圧による耐圧試験が再度行われたSFMTでは、構造体の終局破壊が世界で初めて実現された。

3. 試験前解析の概要⁵⁾⁻⁸⁾

Fig. 4に本研究における試験前解析の概要を示す。試験前解析では4種類の全体解析と4種類の局部解析を実施した。全体解析は試験体全体の非線形挙動の把握を、局部解析は鋼材に生じる局部ひずみの評価を目的としている。

Fig.5に全体解析モデルを示す。全体解析では、軸対

称回転体モデル, M/S, F/Wの貫通孔を含む3D90°モデル, A/L, E/Hの開口を含む3D180°モデルによる解析を実施した。なお, 各モデルにおける境界の条件には対称条件を仮定した。3D90°モデルと3D180°モデルの境界条件の妥当性を検証するために試験体全体をモデル化した3D360°モデルによる解析も付加的に実施した。3D90°, 3D180°および3D360°モデルでは, 鉄筋コンクリート部分はRC積層要素を用い, テンドンはトラス要素を用いてドーム部の格子状の配置を, より詳細にモデル化した。

限界状態では内圧の約70%をテンドンが負担するため, テンドンの挙動を正確に評価できるモデルが必要となる。数値解析における非線形領域の摩擦問題は, 剛性の変化が大きいため数値的な不安定現象が生じやすい。そこで, 限界状態に至るまで摩擦滑り挙動を再現でき, 安定した解が得られるテンドンとコンクリート間の摩擦すべりモデルを開発した^{5) 6)}。このモデルは弾性理論解との整合性を確かめ, 一般壁を対象とした数値実験によってその妥当性を検証し, リンク要素を用いてテンドンの節点とRC躯体の節点間に挿入して解析した。

局所解析では, 破壊が想定される部位(円筒脚部-基礎版部, E/H, A/L, M/Sの各周辺部, バットレス)に着目し, それぞれの詳細なモデルを用いて, 局部ひずみ集中による破壊の可能性を検討した⁷⁾。円筒脚部-基礎版部の局所解析では, 円筒脚部および基礎版のテンドンギャラリー上部の躯体せん断破壊とライナ破断に着目した。E/HとA/LおよびM/Sの局所解析では, 開口周辺の鋼材の局部ひずみ集中に着目し, バットレスの局所解析では, 構造躯体の剛性不連続部であることによる局部ひずみおよびテンドン定着端の挙動を検討した。

ライナ破断に対する検討においては, RC躯体ヘライナを定着のためのライナアンカが, ライナプレートひずみ性状に大きな影響を与えることが考えられる。そこで, 内圧下におけるライナアンカの挙動をライナ解析で考慮するために, 円筒一般部におけるライナアンカ挙動を二次元FEM解析を用いて検討した。

使用解析コードとしては, Table 2に示す様に, バットレスの局所解析およびライナ解析を除くその他すべての解析は自社開発ソフト"FINAL"を用いた。

4. 試験前解析結果

Fig.6,7に解析結果から得られた変形モードを示す。

Fig.6の変形モードは, E/H大開口中心の高さ位置における水平断面と躯体の限界状態時の最大変位位置EL7.0m近傍の水平断面について示す。Fig.7の変形モードは,

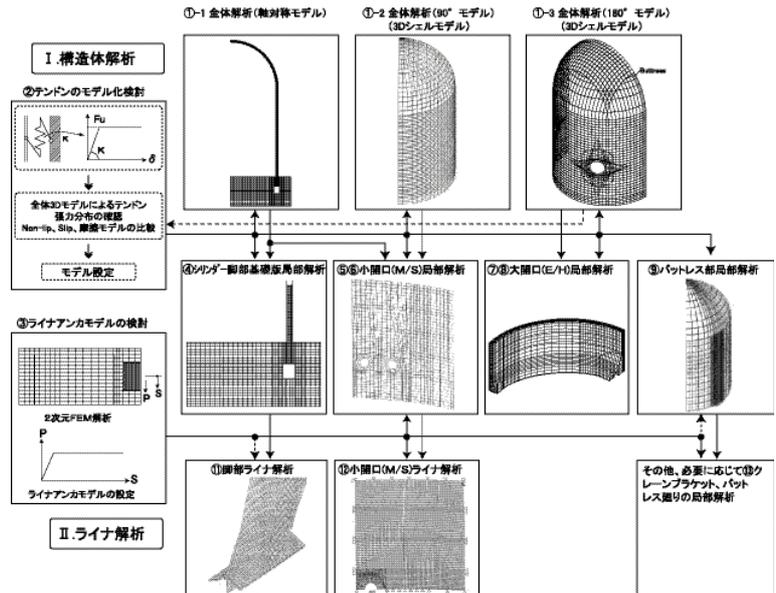


Fig. 4 試験前解析の概要

Outline of Author's Pretest Analyses for Round Robin

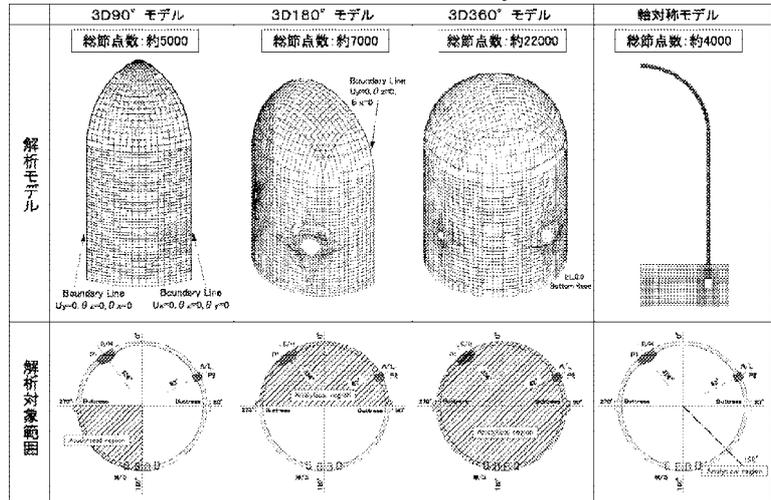


Fig. 5 全体解析モデル

Computational Grids of Global Analysis Models

躯体の限界状態時の最大変位位置における鉛直断面を示す。これら変形モードより, 3D90°, 3D180°モデルによる変形性状は, 3D360°モデルと比べ, ほとんど差異がなく, 与えた境界条件が妥当であることを確認できる。内圧1.2MPa時と1.5MPa時の変形性状の比較より, 開口周辺は開口による断面欠損があるため低内圧レベルでは最も変位が大きいが, 一般部に比べ開口補強筋が多く配筋されているため, 一般部の鉄筋降伏が先行し, 高内圧レベルでは一般部の変位が大きくなる。

全体解析より得られたテンドンの滑り量をFig. 8に示し, 予測した鋼材ひずみ集中箇所をFig. 9に示す。

下記に試験体の挙動に関して試験前解析より得られた知見を挙げる^{5) 7)}。

1) 鉄筋およびライナのひずみ集中は, 円周方向の鉄筋量が変化する部分やバットレス部等の急激に剛性が変化する部分に生じる。(Fig.9参照)

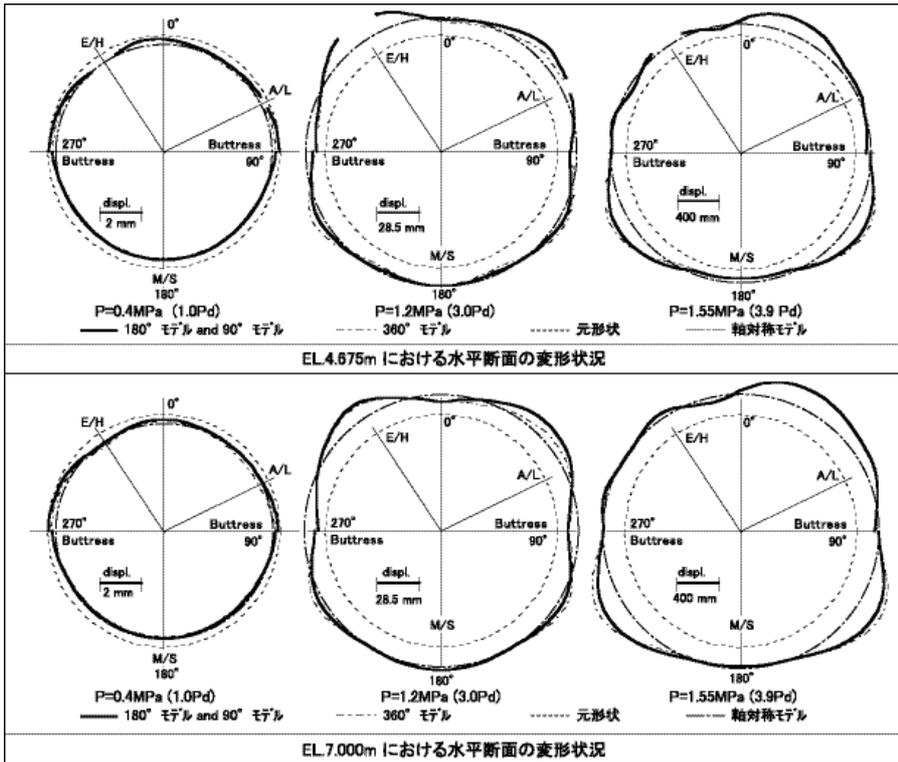


Fig.6 水平断面上の変形モードの比較
Deformation Modes of Horizontal Section

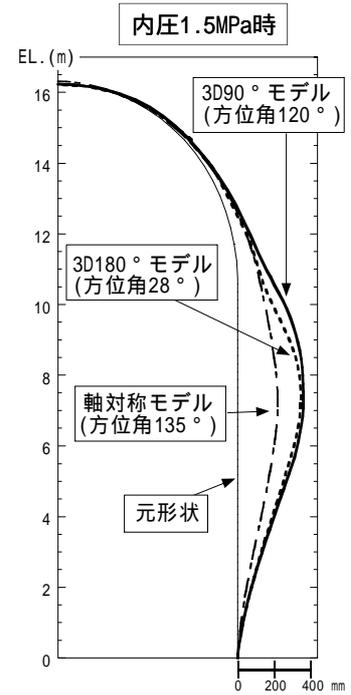


Fig.7 鉛直断面上の変形モードの比較
Deformation Modes of Vertical Section

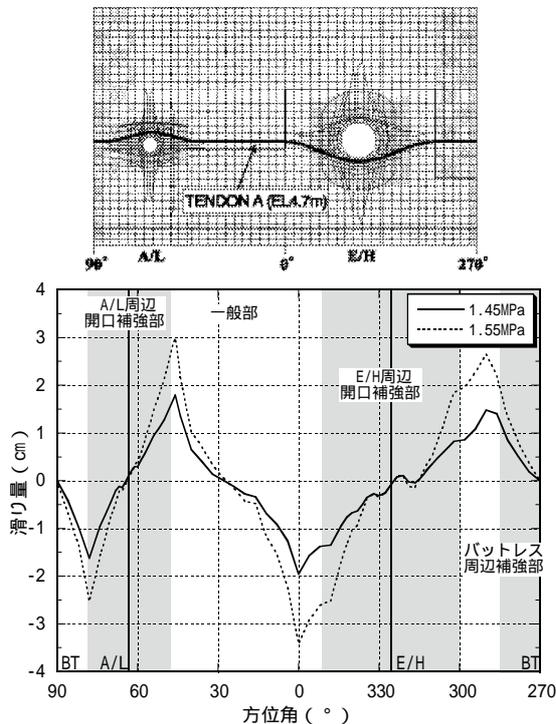


Fig.8 テンドンすべり分布
Tendon Slip Distribution by Pretest Analysis

2) 円筒脚部 - 基礎版部におけるRC躯体のせん断破壊およびライナ破断が先行する可能性は少ない。
3) テンドン滑り量は円周方向の剛性が変化する部分で大きくなり、大開口周辺ではほとんどゼロに近い。テンダンの滑り挙動に関しては、今まで実験・解析により定

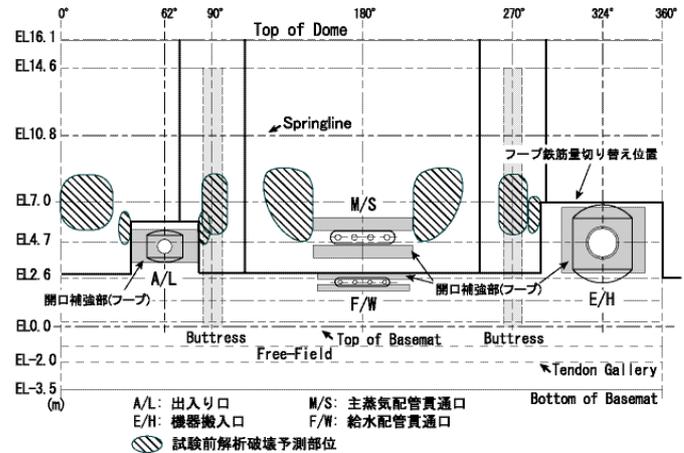


Fig.9 試験前解析から予測されたひずみ集中箇所
Local Strain Concentration Areas by Pretest Analyses

量的な評価がなされた例はなく、テンドン摩擦モデルの導入により得られた新しい知見である。

4) テンドンひずみは、定着端部よりもEL7.0m近傍の円筒一般部が大きく、内圧1.5MPa時に素材の破断ひずみに最も早く達し、テンドン破断が先行する可能性がある。今までのPCCVの限界挙動に関する研究では、テンドンが破断する際は、定着端での破断が先行すると一般的に言われていたが、本解析ではテンダンの摩擦すべりを考慮することで、定着端よりも一般部での破断が先行する新しい知見が得られた。

試験前解析の結論としては、内圧1.5MPa時において円筒一般部EL7.0m近傍の鋼材いずれかの破断が生じることを予測した。

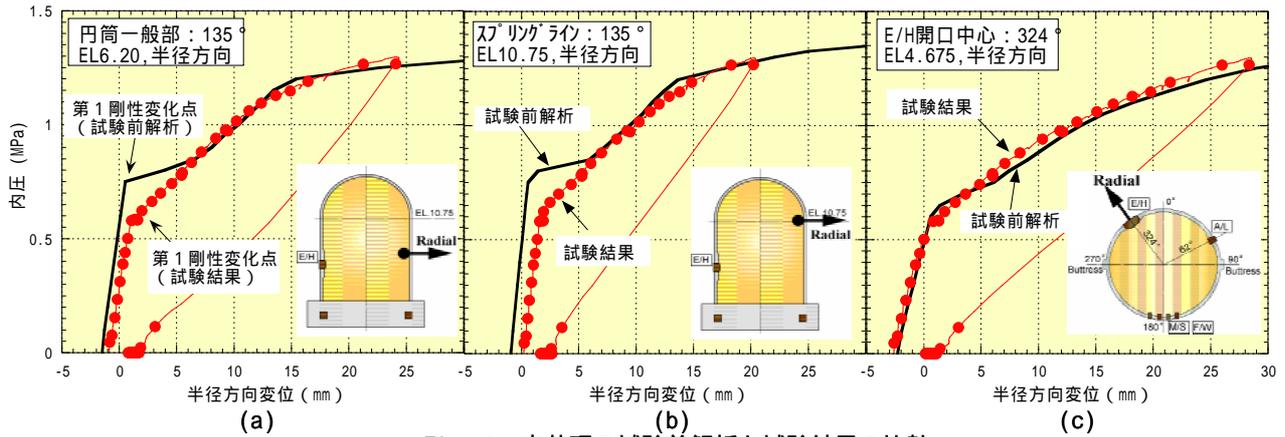


Fig.10 本共研の試験前解析と試験結果の比較
Comparison of Pretest Analyses with Test Results

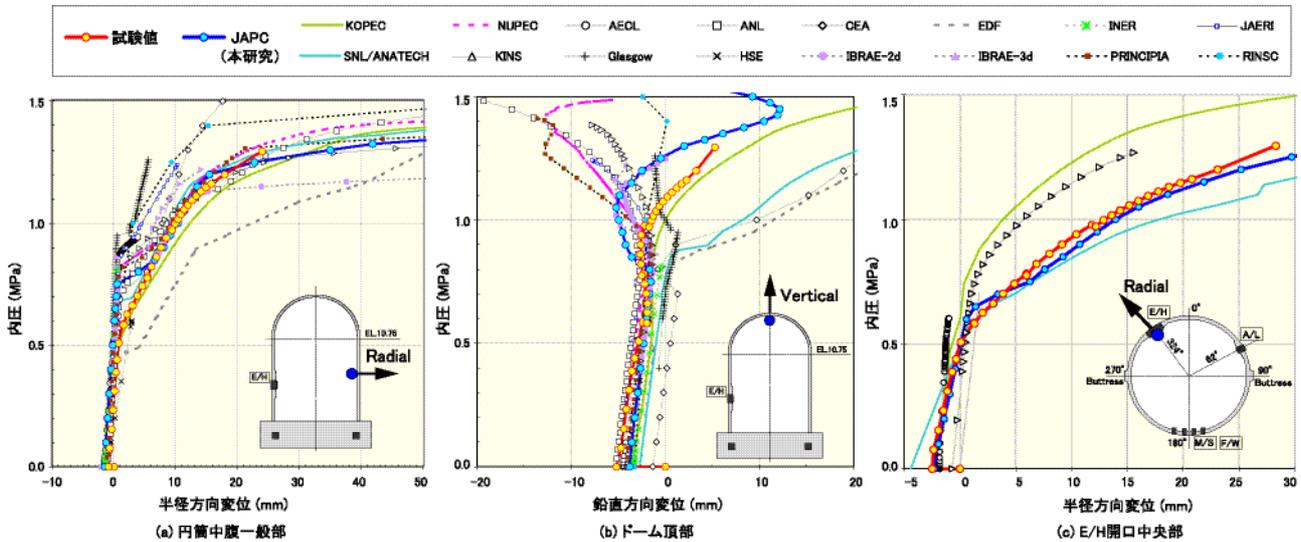


Fig.11 各ラウンドロビン解析参加者の予測値と試験結果の比較
Comparison of Round Robin Pretest Analysis Results by Participants with Test Results

5. 試験前解析結果と試験結果の比較

試験では101カ所で変位が計測されたが、ここでは代表的部位の内圧 - 半径方向変位関係を取り、Fig. 10 に試験前解析結果と試験結果の比較を示す。同図(a)は円筒壁中腹部(EL.6.20m)の一般部(方位角135°)での比較を示している。同図(b)はスプリングラインレベルの一般部、同図(c)はE/H開口中心位置での比較を示している。

図より、内圧 - 変位関係の曲線で表現される非線形挙動に関して、試験前解析結果と試験結果は良好に対応し、1/4PCCVの全体的な内圧挙動を精度良く予測していたことがわかる。その他の測定点についても同様な傾向を示しており、試験前解析で仮定した解析手法の有効性を確認できた。

ラウンドロビン解析の各参加機関の解析と試験結果の比較を代表的な部位についてFig. 11に示す。参加機関の殆どは、軸対称回転体による解析のみを実施しているものが多く、開口やバットレス等の構造不連続部の影響を考慮し、安定した解が得られた機関は、17機関のうち

ずか6機関程度であった³⁾⁴⁾。Fig. 11(a)に示す一般部円筒中腹部の挙動は、開口やバットレスの非軸対称要因の影響が最も小さいにも拘わらず、各機関の予測値は大きく異なり、解析精度の違いが顕著に現れている。特にFig. 11(b)に示すドーム頂部の変位は、試験値は圧力が増加するにつれて複雑な挙動を示したが、各予測値はばらばらであった。また、Fig. 11(c)に示すように、3次元解析により得られるE/H開口部中央の変位を提出したのは6機関であった。そのうち4機関(KOPEC, KINS, SNL, 本研究)が限界状態近傍まで解析できているが、本研究のものが試験結果に最も近い。以上のように、本研究の試験前解析は、ライナ破断による漏洩は予測できなかったが、構造躯体の非線形挙動に関しては、ラウンドロビン解析に参加した17機関のうち最も精度良く予測することができた。なお、試験におけるライナ破断のほとんどは溶接シームに沿って生じており、ライナ破断の要因として、溶接による影響が大きかったものと考えられる。

解析結果と試験結果の相違点としては、Fig. 10(a)に見られるように、第1剛性変化点において、解析は試験に比べ大きめに評価する傾向を示した。第1剛性変化点

Table 3 コンクリート調合の比較
Comparison of Concrete Mix Proportion

		1/4PCCV 試験体	実機
コンクリート設計基準強度 (kgf/cm ²)		450	450
空気量(%)		5	4
水セメント比(%)		34	39
細骨材率(%)		45.8	43.7
単位重量 (kgf/m ³)	セメント	465	332
	フライアッシュ	116	75
	水	198	159
	細骨材	652	758
	粗骨材	771	1003

は、コンクリートのひび割れの発生に起因する点であり、この相違の原因は主にコンクリートの乾燥収縮による影響が解析上で考慮されていないことが考えられる。ひび割れ後の挙動に関しては、解析と試験の結果はほぼ一致している。

6. コンクリートの乾燥収縮の影響

1/4PCCVのプレストレス導入は、円筒中腹部のコンクリート打設から1年2ヶ月後、限界耐圧試験はさらに6ヶ月後に実施され、試験前に乾燥収縮によるひび割れが多数、外表面の鉄筋配置方向に沿って生じていたことが確認されている。

1/4PCCVのコンクリート調合は、鉄筋間隔や最大骨材寸法(1/4PCCV:10mm,実機:25mm)などのワーカビリティを考慮した上で、所定の強度が得られるように決められている。Table 3に1/4PCCVと実機PCCV⁹⁾のコンクリート調合の比較を示す。一般的にコンクリートは単位水量が多いほど、セメント量が多いほど、粗骨材量が少ないほど、乾燥収縮によるひずみが大きくなることが認められている。Table 3から1/4 PCCVのコンクリートは、実機と比較して単位水量が25%程度、セメント量が40%程度多く、また、粗骨材量は30%程度少なく調合されており、このことから、1/4PCCVは実機と比較して乾燥収縮ひずみが生じ易い調合であったことがわかる。

また、試験地アルバカーキは日本に比べかなり乾燥した気候であり、また、製作過程で屋根は特に設置されなかった。故に、現地での過酷な気候条件が乾燥収縮を増大させたことが容易に推定できる。

参考としてFig. 12に1987年にサンディア国立研究所で実施された1/6RCCV内圧試験結果¹⁰⁾と解析結果を比較して示す。内圧40psig近傍において、解析では明瞭にひび割れ点が判別できるのに対し、試験結果では全く観察されない。このことから厳しい気候条件においてコンクリートの乾燥収縮がひび割れ点近傍の挙動に大きな影響を与えていることが推定できる。

試験前解析ではコンクリートの引張強度(f_t)として、設計基準強度($f_c=44.1\text{N/mm}^2$)を関数とした評価式で近似した。試験後解析では、前述の乾燥収縮による影響を考

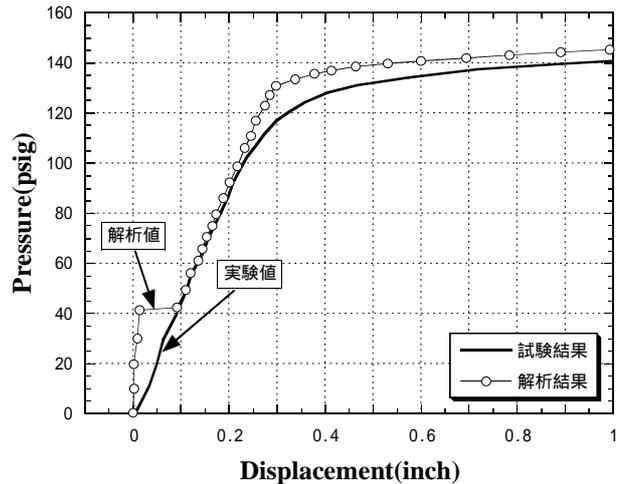


Fig. 12 1/6RCCVの内圧 - 変位関係¹⁰⁾
Pressure-Displacement Relationship of 1/6 RCCV¹⁰⁾

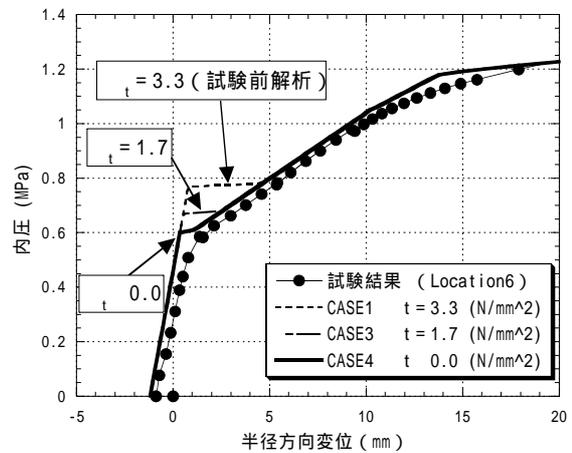


Fig. 13 数値実験の結果
Results of Numerical Study

慮した解析上の引張強度を設定する。

7. 試験後解析

7.1 解析上のコンクリート引張強度の設定

ここでは乾燥収縮による影響を解析に反映するために、解析上のコンクリート引張強度(f_t)を低減した数値実験を実施する。これは、コンクリート材料としての引張強度が低いと考えたものでなく、乾燥収縮による影響を考慮した解析を試験後解析で行うためである。この数値実験では1/4PCCVの側壁一般部を対象とした。Fig. 13に内圧-半径方向変位関係の数値実験結果と試験値を比較して示す。この図より、引張強度を実際のコンクリート引張強度の1/2倍(1.7N/mm²)とした解析値でも実験値とそれほど整合していない。さらに、コンクリート引張強度をゼロとして解析した場合、この結果が試験結果に最も一致することが確認された。それゆえ、この数値実験結果と試験値の整合性から1/4PCCVは加圧試験の前に既にコンクリート部はひび割れていたものと判断される。従って、試験後解析では解析上のコンクリート引張強度をゼロとして行うこととする。ただし、非線形解析時の数値的不安定を回避するため、ここでは解析上の

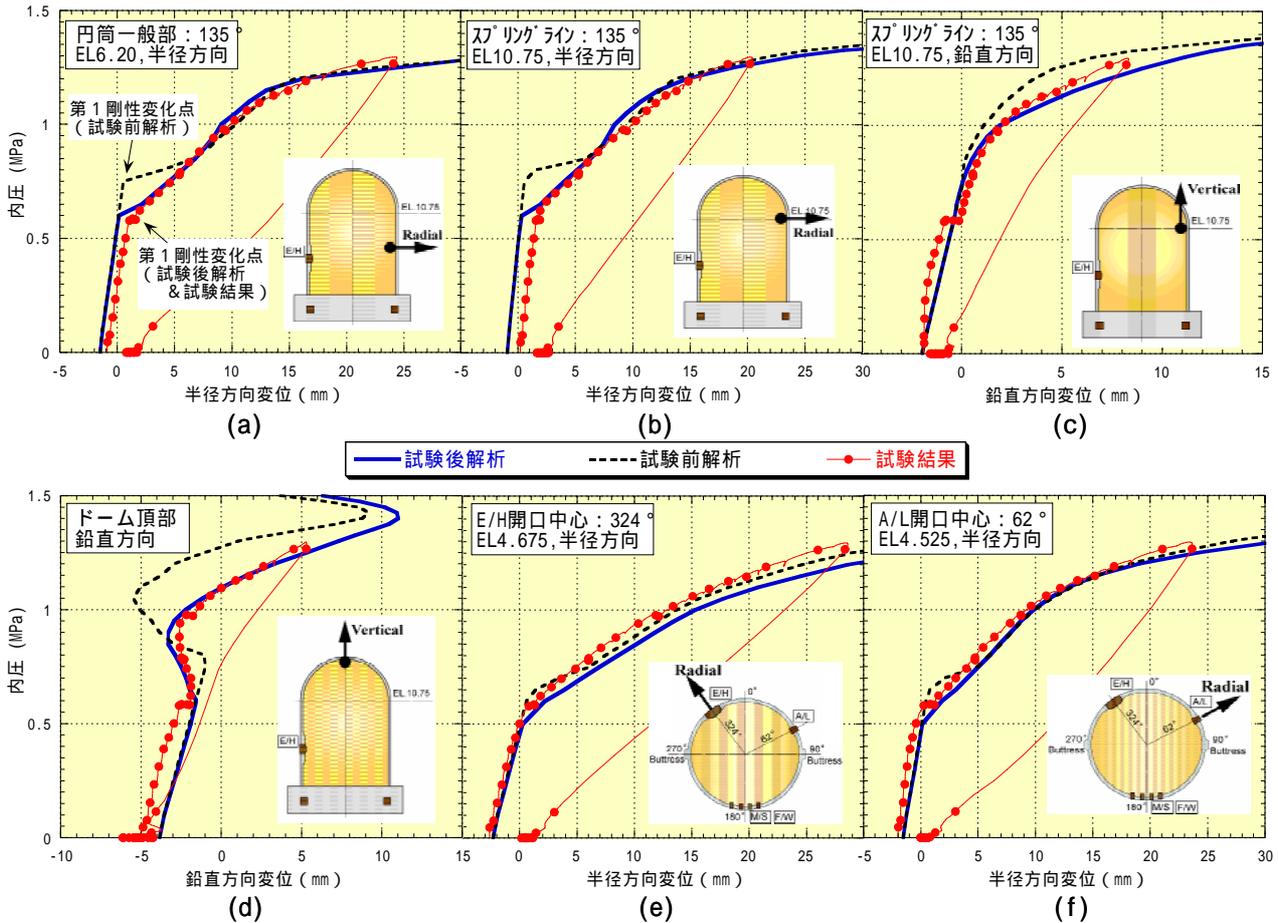


Fig. 14 試験前・試験後解析結果と試験結果の比較
Comparison of Pretest and Posttest Analyses with Test Results

コンクリート引張強度として 0.2N/mm^2 を用いている。

試験後解析では試験前解析で用いた解析モデルをそのまま用い、解析上の引張強度のみを変更した。解析モデルはFig.5に示す全体解析について実施した。また、使用解析コードは自社開発ソフトFINALとした。

7.2 試験後解析結果¹¹⁾

Fig.14は6つの測定点での内圧 - 変位関係について試験後解析結果を試験結果と比較して示す。参考として、試験前解析結果も同図中に示す。この図より、試験後解析結果と試験結果の非線形挙動はほとんど同じ性状を示していることが確認できる。特筆すべき点は、Fig.14(a),(b)の半径方向変位は第1剛性変化点近傍だけの挙動が改善されているのに対し、Fig.14(c),(d)の鉛直方向変位に関しては限界状態に達するまでの非線形挙動全般にわたって、改善されていることである。特にドーム頂部の鉛直変位は試験体全体の挙動が集約される位置であり、この位置での非線形挙動が試験後解析結果は非常に良く再現している。

また、E/H、A/L開口、バットレスといった構造不連続部や、その他の測定点に関しても試験後解析と試験結果は良好な対応を示していることが確認できた。試験後解析結果の例としてFig.15に3D180°モデルの全体解析から得られた変形状態コンターを示す。赤色が最も変形量の大きな部位を示し、内圧 1.0MPa 時では、E/H開口部周

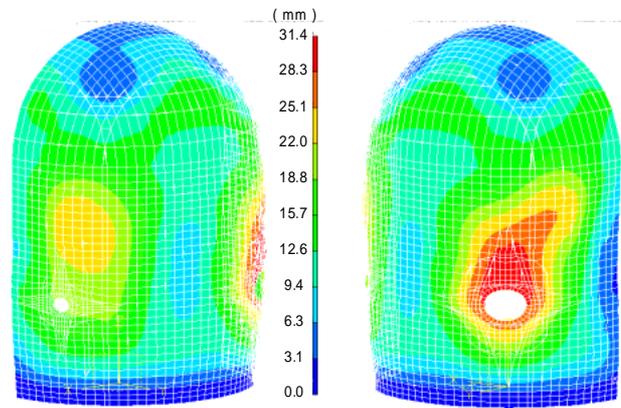


Fig. 15 変形状況コンタ
Displacement Contour Obtained from 3D180° Model

辺が最も大きな変形量を示す。この性状は試験結果とほぼ一致している。

8. 構造破壊モード試験(SFMT)²⁾

限界耐圧試験はライナ破断部からの漏洩量が窒素ガス供給量を上回り試験終了となったが、試験後の調査から躯体としての強度は十分保持されていることがわかった。その後、躯体の構造的な破壊モードを確認することを目的として構造破壊モード試験が計画された。この試

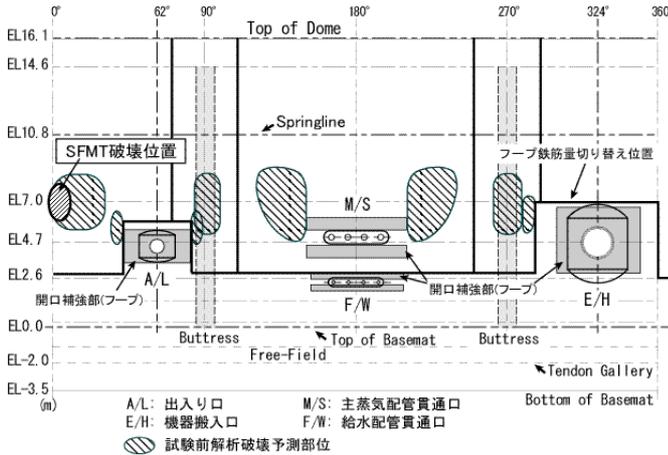


Fig. 16 試験前解析の破壊予測位置とSFMTの結果
Comparison between Predicted and SFMT Failure Modes

験は、確実に躯体で破壊させることを目的としているため、ライナ破断部を補修しライナ表面に約5mm厚の合成ゴム材を溶射コーティングしている。試験結果の詳細は文献2)に示されているが、最終的には方位角6°近傍のエレベーション6~7m付近の円筒壁一般部で、フープテンダンの破断が先行したと思われる割裂破壊が発生した。Fig.16に試験前解析による破壊部位の予測と構造破壊モード試験結果の比較を示す。円筒壁一般部のフープテンダン破断によると思われるSFMTでの破壊位置は、試験前解析で予測した破壊部位と一致した。このことから躯体構造上の耐圧限界状態挙動に関しても、本解析手法による結果はほぼ妥当であるといえる。

8. まとめ

本研究により次の事項がまとめられる。

- 1) 提案したテンダン摩擦モデルは、限界状態に至るまで数値的な不安定性を回避でき、摩擦挙動を予測できることを確認した。従って、本モデルは工学上合理的にアンボンドテンダンの3次元的な挙動を解析する実用的なツールの一つと考えられる。
- 2) 試験前解析は試験体の限界状態に至るまでの非線形挙動を良好な精度で予測できた。この非線形挙動に関してはラウンドロビン解析の17参加機関のうち本研究の試験前解析が最も精度良く予測できた。しかしながら、両者には、第1 剛性変化点においてわずかな相違点があることがわかった。
- 3) コンクリートの乾燥収縮の影響を考慮した試験後解析による非線形挙動は試験前解析結果と比較して試験結果との整合性に関して大幅な改善が見られた。
- 4) 構造上の観点からは、内圧を受けるPCCVは、躯体コンクリートに初期ひび割れが生じていても、その全体の耐圧限界挙動にあまり大きな影響を及ぼさないことが判明した。
- 5) 1/4PCCVは、フープテンダンが定着端²⁷⁾ではなく一般部で破断して、限界状態に達することが、実験と試験前・後解析から明らかになった。

6) 本研究で論じた解析手法および解析モデルと、コンクリートの乾燥収縮の影響を考慮することによって、内圧を受けるPCCVの耐圧限界性能の精度の高い評価ができるものと判断できる。

ラウンドロビン解析に参加することによって、コンクリート構造のFEM解析技術の向上がはかられたことは、大きな成果である。また、本研究の解析技術の優位性が、諸外国の解析技術との比較により確認できたことは解析技術開発の方向性が妥当であること示しているものと考えられる。

謝辞：本研究は、日本原子力発電、関西電力、九州電力、大林組、大成建設および三菱重工の共同研究「PCCV耐圧限界性能評価法に関する研究」の一部を引用しています。

参考文献

- 1) 原子力発電技術機構：溶接部等熱影響部信頼性実証試験（原子炉格納容器）に関する報告書，1996.3,1998.3,2001.3
- 2) 原子力発電技術機構：重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）に関する報告書，2002.3
- 3) Hessheimer, M.F., Luk, V.K., Klammer, E., Shibata, S., Mitsugi, S. and Costello, J. F. :Pretest Round Robin Analysis of 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, Paper #1305, SMiRT 16, Washington DC, August 2001
- 4) NUREG/CR-6678, SAND00-1535: Pretest Round-Robin Analysis of a Prestressed Concrete Containment Vessel Model, Report of U.S. Nuclear Regulatory Commission, August, 2000
- 5) 尾形隆永，米澤健次，井元勝慶，前野仁：コンクリート製原子炉格納容器の耐圧限界挙動に対する有限要素解析，その1 1/4PCCV試験体の全体解析，日本建築学会構造系論文集，第546号，pp.95-102，2001.8
- 6) Yonezawa, K., Imoto, K., Watanabe, Y. and Akimoto, M. :Ultimate capacity analysis of 1/4 PCCV model subjected to internal pressure, Nuclear Engineering and Design, 212, pp. 357-379, 2002
- 7) 渡部征男，尾崎昌彦，清原一彦，村角保行，他：1/4PCCVのラウンドロビン試験前解析(その1~10)，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp.1109-1126，2000.9
- 8) 川里健，加藤朝朗，井元勝慶，木谷朋之，他：1/4PCCVのラウンドロビン試験後解析(その1~4)，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，pp.1021-1028，2002.8
- 9) 山本貢，瀬戸川稔，木村稔：大飯原子力発電所3・4号機PCCVにおけるコンクリート工事，コンクリート工学，Vol.29，pp.27-40，1991.2
- 10) NUREG/CR-5341: Round-Robin Analysis of the Behavior of a 1:6-Scale Reinforced Concrete Containment Model Pressurized to Failure:Posttest Evaluations, Report of U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1989.10
- 11) Yonezawa, K., Imoto, K., Kato, A., Ozaki, M., Kiyohara, K., Murazumi, Y. and Sato, K. :Pretest and Posttest Analyses for Nonlinear Behavior of 1/4PCCV model Subjected to Internal Pressure, E-298, The First FIB Congress, Osaka ,Oct.2002