

作業の自動化と知識ベース化を取り入れた 補機容器耐震評価システム（ASTEPコード）の開発

Development of Assessment System for Tank Earthquake-Proof Design (ASTEP Code)
Installing Automatic Operation and Knowledge Database

前川 晃 (Akira Maekawa)* 鈴木 道明 (Michiaki Suzuki)* 藤井 有蔵 (Yuzo Fujii)*

要約 原子力発電所の補機容器の耐震健全性評価は原子力発電所耐震設計技術指針（以下、JEAG4601）に基づいて行われる。JEAG4601に記載されている評価方法は容器を単純な質点系モデルに置き換えて評価を行うが、煩雑な体系の耐震評価方法となっており、評価作業は経験・知識と労力・時間が要求される。そこで、作業手順の自動化と知識ベース化を取り入れた補機容器耐震評価システム（ASTEPコード：Assessment System for Tank Earthquake-Proof design）を開発した。本システムが対象としている容器形状は、4脚支持たて置き円筒形容器、サドル支持横置き円筒形容器、スカート支持たて置き円筒形容器、平底たて置き円筒形容器および平底たて置き円筒形貯水容器である。本システムでは耐震設計に関する全ての機能を集約し、作業フローをメニュー化することで設計者に使い易いシステムとした。さらに入力支援を行う入力補助機能や入力パラメータを自動計算するユーティリティ機能を備え、作業の自動化により大幅な作業量の軽減を行うことができ、経験、知識を問わないシステムとしている。本システムは過去の工認や設計の記載要領を整理し、知識ベース化しているので手作業による計算結果と同じ結果が得られる。工認の対象となった容器形状について、モデル容器の手計算結果と本システムによる計算結果の誤差は1%以内であり、システムの妥当性が確認できた。試運用の結果、ユーザーから予想以上の好評を得ることができた。

キーワード 補機容器、円筒形容器、耐震評価、JEAG4601、自動化、知識ベース化、入力補助機能、使い易さ、作業量軽減

Abstract In a nuclear power station, seismic-proof design of the various tanks classified as auxiliary installation are required to follow technical guideline for the seismic-proof design of nuclear power station, which is called JEAG4601 for short in below. This guideline uses simple mechanical multi-mass model but a rather complicated evaluation method requires designers to have knowledge and experience and consumes both time and labor. On purpose to resolve those difficulties, Assessment System for Tank Earthquake-Proof Design, which is called ASTEP in short, has been developed and equipped with automated process and knowledge database. For this system, the targeted types of tank are a vertical cylindrical tank that has four supports or a skirt support, a horizontal cylindrical tank that has two saddle supports, and vertical cylindrical tank or water storage tank with a flat bottom. The system integrated all the seismic-proof design evaluation related tools and equipped with step by step menus in order of the flowchart, so enables designers to use them easily. In addition, it has an input aid that enables users to input with ease and a tool that automatically calculates input parameters. So this system reduces seismic-proof design evaluation related work load dramatically and also does not require much knowledge and experience related to this field. Further more, this system organized seismic-proof design related past statement and technical documents as a knowledge database so user could obtain the identical output as of the manual calculation results. Comparing output of ASTEP code and the manual calculation results of a typical tank that requires government approval of its design evaluation document, the error was within less than a percent so validity of the system was confirmed. This system has gained favorable comment during the trial run, and it was beyond our expectation.

Key Words Auxiliary installation tank, Cylindrical tank, Earthquake-proof design evaluation, JEAG4601, Automatic operation, Knowledge database, Input aid, User-friendliness, Work load reduction

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

地震国である日本においては、原子力発電所の設備機器の設計について耐震性が重要視され、地震に対する機器の耐震安全評価手順が、機器の耐震上のクラス別および形状毎に決められている。

補機容器の耐震健全性評価は、原子力発電所耐震設計技術指針（以下、JEAG4601）⁽¹⁾に基づいて行われる。JEAG4601では、発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針⁽²⁾に従って、地震時の安全性確保の観点から要求される耐震性能を4レベルに分けた耐震重要度分類による耐震クラス分けを行い、さらに容器形状毎に決められた個別の計算式によって応力評価を行っていく。JEAG4601に記載されている評価方法は容器を単純な質点系モデルに置き換える簡易評価であるが、評価条件や評価式が多種多様である煩雑な体系の耐震評価方法となっている。これらの事項を踏まえて正確に耐震健全性評価や工事計画の認可申請資料等を作成するには、経験・知識だけでなく労力・時間が要求される。

機器の設計・安全性評価には耐震評価は欠かせないものであるが、近年の電力会社における業務合理化の中で直営設計能力の向上と作業量の軽減というニーズを踏まえて、耐震評価作業は、システム化により合理化できる余地が大きいと考えられた。そこで、煩雑な作業手順の自動化と知識ベース化を取り入れて補機容器耐震評価システム（ASTEPコード：Assessment System for Tank Earthquake-Proof design）を開発した。本システムは、原子力発電所の補機容器として一般的に使用されている4脚支持たて置き円筒形容器、サドル支持横置き円筒形容器、スカート支持たて置き円筒形容器、平底たて置き円筒形容器および平底たて置き円筒形貯水容器の5種類の容器形状を対象として開発した。

本システムは耐震評価作業量の軽減を図ることと電力会社の技術者の直営設計能力向上といった教育的な機能も重視して開発した。作業量の軽減を図るため、耐震評価に必要な各種の計算を一つのシステムに集約し、材料定数、設計震度、局部応力などの入力パラメータを自動計算するユーティリティ機能と耐震計算書を自動作成させる機能をシステムに組み込んだ。教育的な側面として耐震評価フローが一目でわかる画面レイアウトや難解な文章や用語には解説などをコメントボックス表示させる機能を組み込み、経験の浅い技術者が作業をしながら学習でき

るようにした。

本システムのプログラムの妥当性確認は、手計算ベースの結果と比較し確認した。さらに電力会社にて試運用いただいた結果、好評を得ることができた。

2. 開発目的とそのための配慮

(1) 耐震評価作業量の軽減

本システムの耐震評価・計算フローを図1に示す。ここでは耐震評価に必要な構造物の断面特性、局部応力の計算および耐震計算などの全ての計算機能を一つのシステムに集約し、煩雑な作業手順の簡略化を行った。これにより次に述べる自動化と相まって大幅な作業量の軽減を図った。

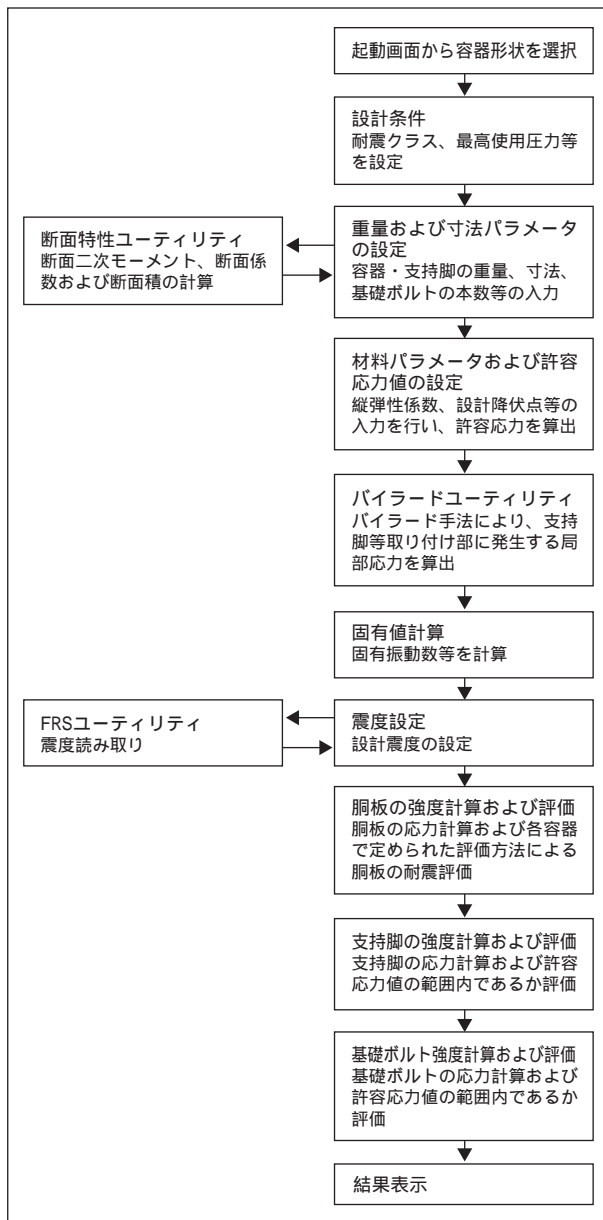


図1 システムの耐震計算・評価フロー図

(2) 耐震評価作業手順の自動化

煩雑な作業フローをメニュー化し、メニューの順番に沿ってデータを入力することで、自動的に作業が進行するような構成とした。さらに、Microsoft社のExcel2000のワークシート上に耐震計算書を自動作成する機能を組み込み、評価対象容器の諸元をシステムに入力することで、自動的に耐震計算書作成を行えるようにした。

これにより、経験の浅い技術者でも各種容器の耐震評価を簡単に行うことができる。



図2 システムの起動画面

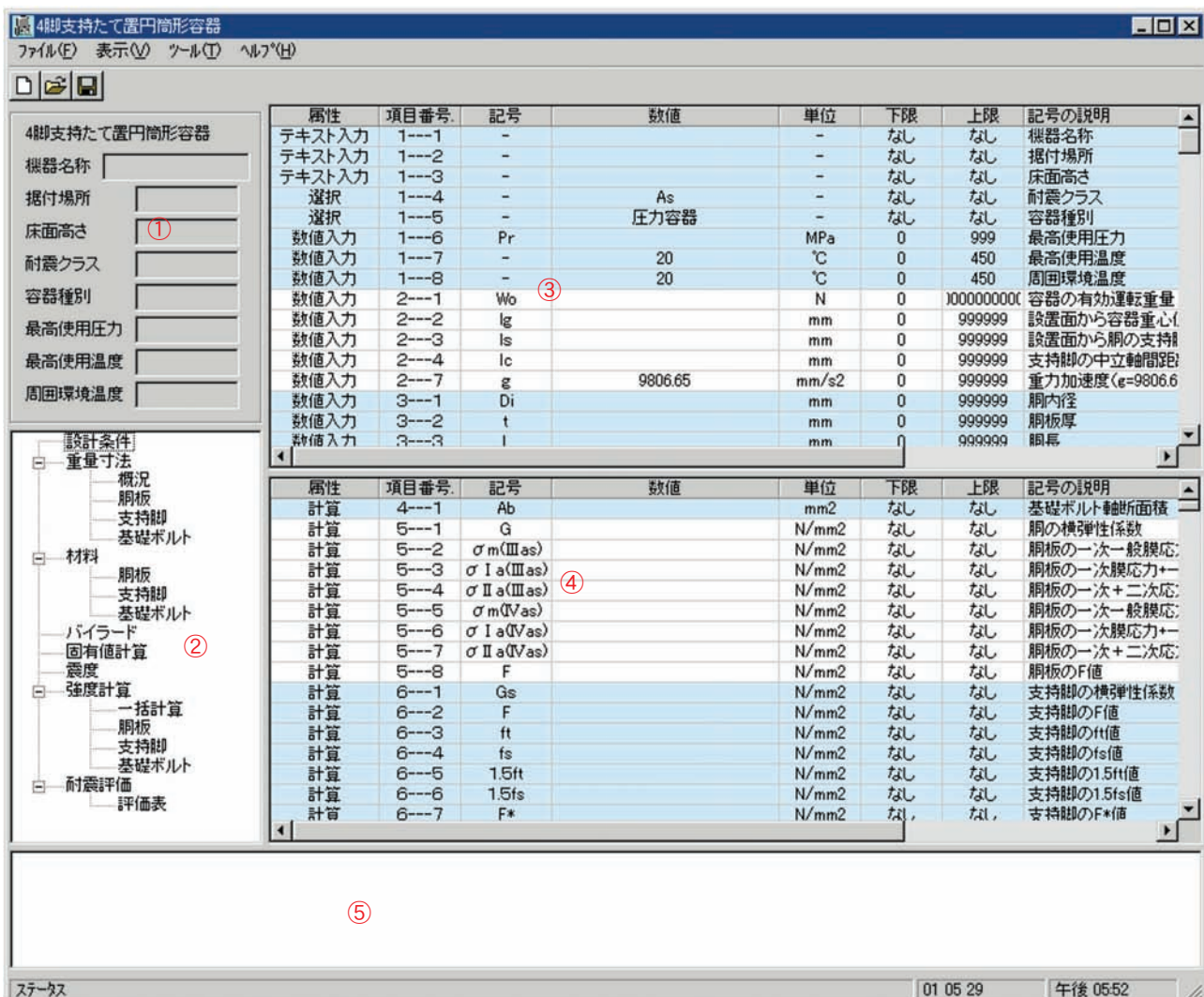


図3 システムのメイン画面

- ① 設計条件ビュー : 容器の設計条件の確認
- ② ツリービュー : パラメータ設定画面の呼出しや耐震計算の実施
- ③ 入力パラメータ表示ビュー : 入力パラメータの確認
- ④ 出力パラメータ表示ビュー : 耐震計算結果の確認
- ⑤ メッセージ表示ビュー : 各種メッセージの表示

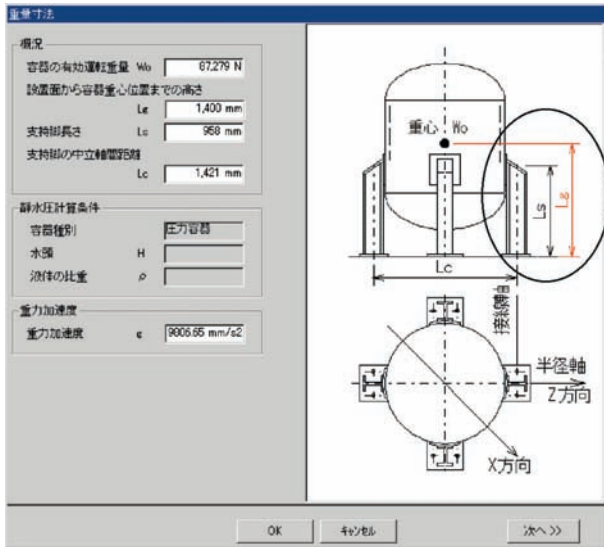


図4 重量寸法の設定画面例

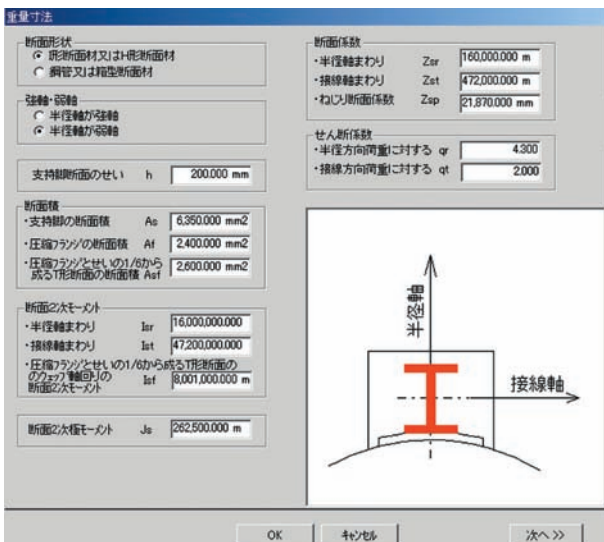


図5 支持脚寸法の設定画面例(半径軸が弱軸のとき)

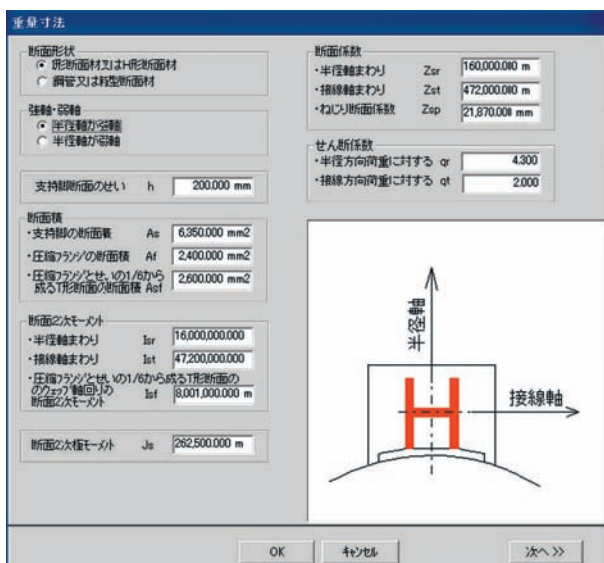


図6 支持脚寸法の設定画面例(半径軸が強軸のとき)

(3) 知識ベース化

過去の工事計画の認可申請手続き時に旧通商産業省と電力との間で取り決められた記載要領を整理し、単位表記、数値の丸め処理および表示桁数などの細かなルールを知識ベース化してシステムへ反映しているため、従来の手計算結果と同等の値を得ることができる。

(4) 使用者に使い易いシステム

入力項目および計算項目をツリービューにして一括表示し、全体の作業フローを把握しやすくすると同時に、入力補助機能やFRSユーティリティをはじめとした各ユーティリティによりパラメータ入力を容易にした。さらに、固有値計算をはじめとした各計算過程でエラーが生じた場合は、計算は中断され、メッセージボックスおよびメッセージ表示ビューにエラーメッセージを表示する。あるいは、強度評価において、評価対象の応力が許容値を超えている場合にもメッセージボックスおよびメッセージ表示ビューに逐次、エラーメッセージを表示するなど、耐震計算状況が把握できるようにした。このように使用者にとって使い勝手が良いシステムとした。

3. システムの特徴

本システムが対象とするユーザは耐震評価作業経験の豊富な技術者から、初めての人までを想定しており、経験者には使い勝手が良く、初めての人には扱いやすいシステムとするため、以下に示す特徴を有している。

(1) 分かり易い作業画面レイアウト

システムの起動画面を図2に示す。起動画面に評価対象容器のアイコンを作成し、容易に耐震評価を行う容器形状を選択できるようにした。

メイン画面を図3に示す。メイン画面を中心に作業を行う体系としているため、初めての人にも扱いやすいシステムとなっている。メイン画面は、①設計条件ビュー、②ツリービュー、③入力パラメータ表示ビュー、④出力パラメータ表示ビュー、⑤メッセージ表示ビューの機能別に5つの大きな部分に分かれており、作業性の効率化を図っている。

(2) 入力補助機能による入力支援と入力ミス防止

重量寸法や材料のパラメータ入力では、入力作業

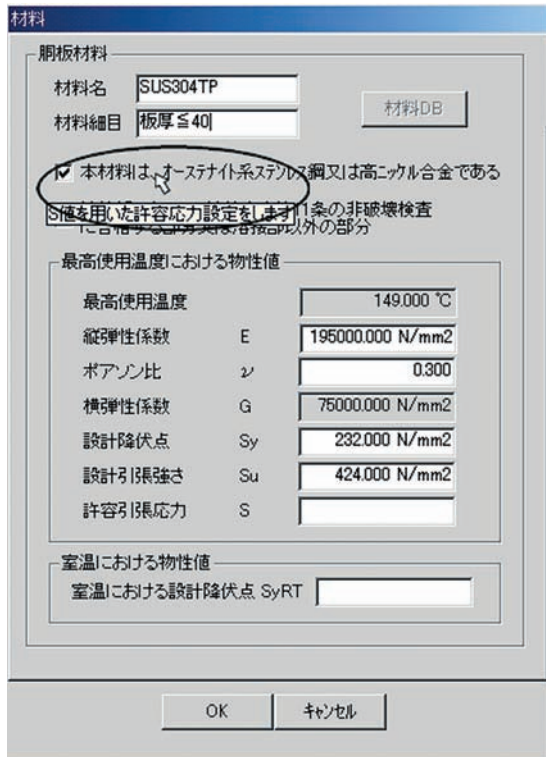


図7 コメントボックスによる入力補助機能例

を支援する入力補助機能を取り入れた．図4の重量寸法の設定画面で入力補助機能の一例を示す．対象とする容器形状が右図に示され，編集集中の入力パラメータに対応する寸法が図中に赤色で強調表示されることで入力時の視認性を高めた．また，図5や図6に示すように，支持脚の胴部への取り付け方向が異なる場合でも対応する寸法図が現れ，入力ミスを防ぐようにした．

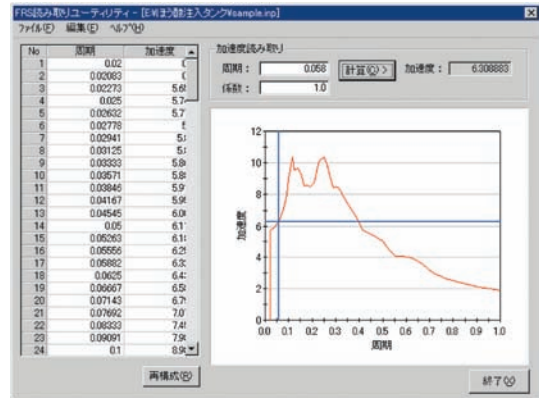


図8 FRSユーティリティ

評価結果		耐震S1	耐震S2												
<p>機器名称 4脚支持たて置円筒形容器</p> <table border="1"> <tr> <th>据付位置(EL, m)</th> <th>耐震クラス</th> <th>最高使用圧力 (MPa)</th> <th>最高使用温度 (°C)</th> <th>重量 (N)</th> <th>重心高さ (mm)</th> </tr> <tr> <td>A/B -16.5</td> <td>A</td> <td>11.4</td> <td>149</td> <td>87279</td> <td>1400</td> </tr> </table>				据付位置(EL, m)	耐震クラス	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	重量 (N)	重心高さ (mm)	A/B -16.5	A	11.4	149	87279	1400
据付位置(EL, m)	耐震クラス	最高使用圧力 (MPa)	最高使用温度 (°C)	重量 (N)	重心高さ (mm)										
A/B -16.5	A	11.4	149	87279	1400										
構造概要		計算モデル	変形モードの組合せ	固有周期 (s)	水平震度		設計震度								
四脚支持たて置円筒形容器		1質点系モデル	A+B+C	0.058	動的 0.658	静的 0.576	水平 0.658	鉛直 0.288							
(動的震度はS1地震時)															
評価部材		一次一般応力 (N/mm ²)		組合せ応力 (N/mm ²)											
		長手方向 (σx)		周方向 (σφ)		一次応力 (σI)		一次+二次応力 (σII)							
胴板	Z方向	54		105		52.5373		104.949							
	横方向					51.93442		51.46795							
	X方向					52.2059		52.719							
評価部材		一次応力 (N/mm ²)				摩擦力 (N)		評価結果							
		引張 (1.5ft)	圧縮 (1.5fc)	曲げ (1.5fb)	せん断 (1.5fs)	140000		F≧FHであり、基礎ボルトにせん断力は作用しない							
支持脚	Z方向	5	12	23	8	水位平方向荷重 FH(N)									
	第2支持脚	5	59	7	3	58000									
	X方向	---	10	57	10										
基礎ボルト	Z方向	59	---	---	---										
	X方向	79	---	---	---										
評価部材		材料	許容応力 (N/mm ²)												
			引張 (1.5ft)	圧縮 (1.5fc)	曲げ (1.5fb)	せん断 (1.5fs)	一次一般応力 (σa)	一次応力 (σIa)	一次+二次応力 (σIIa)						
胴板		SGV480	---	---	---	---	232	348	232						
支持脚	Z方向	SS400	245	141	236	245	---	---	---						
	第2支持脚	SS400	245	141	236	245	---	---	---						
	X方向	SS400	245	141	236	245	---	---	---						
基礎ボルト		SS400	175	---	---	---	---	---	---						
評価部材		組合せ応力評価													
		$\frac{\sigma_o}{1.5f_o} + \frac{\sigma_\phi}{1.5f_\phi} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_\phi}{1.5f_b} \leq 1$		$\frac{\sigma_o}{1.5f_o} + \frac{\sigma_\phi}{1.5f_\phi} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_\phi}{1.5f_b} \leq 1$		$\frac{\sigma_o}{1.5f_o} + \frac{\sigma_\phi}{1.5f_\phi} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_\phi}{1.5f_b} \leq 1$		$\frac{\sigma_o}{1.5f_o} + \frac{\sigma_\phi}{1.5f_\phi} \leq 1$ かつ $\frac{\sigma_b - \sigma_\phi}{1.5f_b} \leq 1$							
支持脚	Z方向	0.15 ≦ 1 かつ 0.05 ≦ 1		0.12 ≦ 1 かつ 0.08 ≦ 1		---		---							
	第2支持脚	0.27 ≦ 1 かつ 0.22 ≦ 1		---		---		---							
	X方向	0.28 ≦ 1 かつ 0.2 ≦ 1		0.25 ≦ 1 かつ 0.22 ≦ 1		---		---							

図9 評価表の表示画面

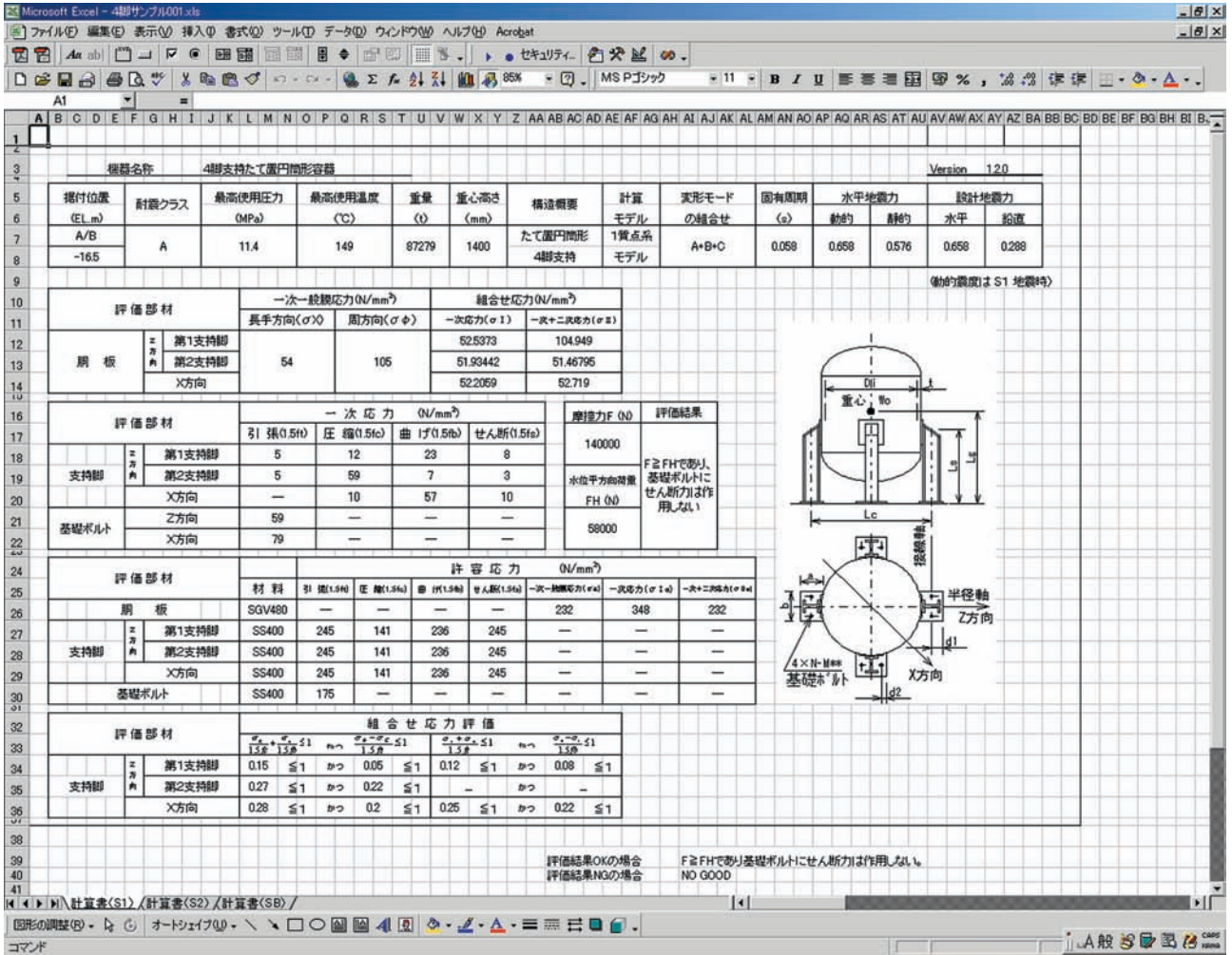


図10 耐震計算書の出力結果例

重量寸法の各設定画面は、前工程の設定が完了していなければ選択できないようにしており、入力ミスを防ぐようにした。この機能は、他のパラメータ設定時や計算実行時においても同様としている。

図7の材料の設定画面に示すように、難解な文章には解説や参照すべき事項をコメントボックスに表示させることで、使用者の入力作業を助勢するようにした。

(3) ユーティリティ機能による煩雑な作業手順の省略

FRSユーティリティをはじめとした各ユーティリティは、パラメータ入力を容易にする補助機能であり、システムは、断面特性ユーティリティ、FRSユーティリティおよびバイラードユーティリティを組み込んだ。

① FRSユーティリティ

ユーティリティの例として、図8にFRSユーティリティの画面を示す。FRSユーティリティによって

固有周期に対応する震度を床応答スペクトルデータから読み取り、入力パラメータへ反映させることができる。床応答スペクトルは、別に作成したデータファイルを指定することができるようにした。

② 断面特性ユーティリティ

断面特性ユーティリティによって、複数の干渉しない矩形形状を設定し、形状全体の断面積、断面二次モーメントおよび断面係数を自動計算できるようにした。

③ バイラードユーティリティ

バイラード手法は円筒容器・配管等に対して比較的小さい支持構造物を取り付けた場合に発生する支持構造物周りの局部応力を評価する簡易評価法である⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。シェル理論による局部応力計算を線図としてまとめ、構造設計時に容易に適用できるようにした手法である。JEAG4601においても4脚支持たて置き円筒形容器やサドル支持横置き円筒形容器の胴部の脚つけ根部に生じる局部応力をバイラード手法

に従い計算することが明記されている。

パイラードユーティリティはパイラード手法を実施するユーティリティで、パイラード線図の読み取りなどの煩雑な作業を軽減できるようにした。

(4) 耐震計算書の自動作成機能

結果を表示する画面を図9に示す。耐震計算の全ての結果は、メイン画面の出力パラメータ表示ビューにて確認できるが、工事計画認可で必要な計算結果は評価表の表示画面に一覧表示させることができるようにした。得られた耐震評価結果は耐震計算書フォーマットで出力できるようにした。図10に耐震

(単位: mm)

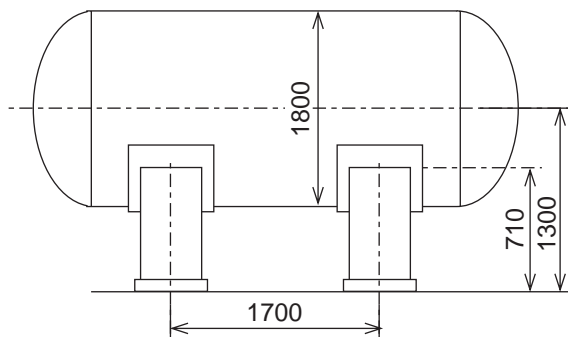


図11 サドル支持横置き円筒形容器モデル図

表1 耐震計算結果の誤差比較

評価項目	ASTEP コード	手計算	誤差 (%)	誤差 評価
固有周期 長手	0.039	0.039	0.00	
固有周期 横	0.016	0.016	0.00	
胴板 一次 長手	88.8	88.5	0.34	
胴板 一次 横	36.4	36.4	0.00	
支持脚 引張 長手	0.0	0.0	0.00	
支持脚 圧縮 長手	3.5	3.5	0.00	
支持脚 曲げ 長手	28.8	28.8	0.00	
支持脚せん断 長手	2.1	2.1	0.00	
支持脚 圧縮 横	2.8	2.8	0.00	
支持脚 曲げ 横	2.7	2.7	0.00	
支持脚せん断 横	1.1	1.1	0.00	
基礎ボルト長手	35.4	35.3	0.28	
基礎ボルト横	1.2	1.2	0.00	

長手: 容器長手方向、横: 容器横方向
単位 固有周期: 秒、その他: N/mm^2 (応力)

計算書の出力結果例を示す。耐震計算書はMicrosoft社のExcel2000ファイル形式として出力することが可能である。このように評価対象容器の諸元を本システムに入力すれば、耐震計算書を自動作成するので、経験の浅い技術者でも極めて短時間で耐震計算書を作成することができるようにした。

(5) システム環境

本システムは、ユーザの作業環境を配慮してCPU: Intel Pentium 互換機 133Hz 以上, RAM: 64MB 以上, OS: Windows 2000 以降にて動作可能とし、パソコン上で動作可能な負荷の軽いシステムとした。

4. システムの妥当性評価

本システムは、補機容器の各種容器形状の耐震評価ができるだけでなく、官庁への提出資料または、説明資料作成に活用できることをも目的としたため、システムで耐震計算を行い、数値の丸め処理や表示桁処理をした後に出力された計算値は手計算で行ったものと一致する必要がある。したがって、工認の対象となった容器について形状毎にモデルを設定し、手計算で実施した耐震評価値とシステムで出力した計算値とを比較し、プログラムの妥当性確認を行った。全てのケースにおいて手計算値とシステムによる計算値との誤差は最大でも1%以内であり、プログラムの妥当性が確認できた。一例を図11および表1に示す。

表2 ユーザの評価

項目	評価
利用後の感想	<ul style="list-style-type: none"> ・耐震評価作業が楽になった ・便利なツールである ・感覚的ではあるが作業量が1/10から1/30になったと思う ・パイラード手法に熟知していなくても耐震評価作業が半日で完了できる
システムへの要望事項	<ul style="list-style-type: none"> ・システム内で単位換算できる機能を追加してほしい ・鉛直方向についても動的評価ができる機能を追加してほしい ・パラメーターサーベイができる機能を追加してほしい

システムの性能評価については、関西電力(株)若狭支社保修グループ直営設計チームにて試運用していただき利用後の評価を集めた。主な評価を表2に示す。定性的ながら作業量をかなり低減でき、使いやすさについても十分な評価を得た。現行機能の改良ではなく、追加機能の要望が多いことから現在のシステムの機能に満足していると受け取れ、予想以上の良い評価が得られたと考えられる。

5. おわりに

補機容器耐震評価システム(ASTEPCコード)は、耐震評価作業を効率的に進めるために、耐震評価作業手順の自動化および知識ベース化を取り入れて開発を行った。本システムは、使用者にとって使い易く、耐震評価作業量を大幅に軽減することができる。試運用によって十分な使い勝手があることを確認できた。手計算ベースとの誤差は1%以内であり、実用に際して問題ない。

謝辞

本システムを開発するにあたり、関西電力(株)若狭支社保修グループ直営設計チームの方々からご協力をいただいた。ここに厚く感謝します。

文献

- (1) 電気技術基準調査委員会, “原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987”, 日本電気協会, (1987).
- (2) 原子力安全委員会, “発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針”, (1981)
- (3) Wichman, K. R., Hopper, A. G. and Mershon, J. L., “Local Stress in Spherical and Cylindrical Shell due to External Loadings”, Welding Research Council bulletin, March 1979 revision of WRC bulletin 107/August 1965, (1979).
- (4) Bijlaard, P. P., “Stresses from Radial Loads in Cylindrical Pressure Vessels”, Welding Research Supplement, p.615-623 (1954).
- (5) Bijlaard, P. P., “Stresses from Radial Loads and External Moments in Cylindrical Pressure Vessels”, Welding Research Supplement, p.609-617 (1955).

- (6) Bijlaard, P. P., and Ithaca, N. Y., “Stresses from Local Loadings in Cylindrical Pressure Vessels”, Transactions of the ASME, p.805-816 (1955).