

防災科学技術研究所研究資料 第四二九号 配管系の弾塑性地震応答評価に対するベンチマ ク解析

防災科学技術研究所



National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience Tennodai 3-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan



# 防災科学技術研究所研究資料

# 防災科学技術研究所研究資料

第 362 号	地すべり地形分布図 第 49 集「旭川」 16 葉 (5 万分の 1). 2011 年 11 月発行
第 363 号	長岡における積雪観測資料(33)(2010/11 冬期) 29pp. 2012 年 2 月発行
第 364 号	新庄における気象と降積雪の観測(2010/11 年冬期) 45pp. 2012 年 2 月発行
第 365 号	地すべり地形分布図 第 50 集「名寄」 16 葉 (5 万分の 1). 2012 年 3 月発行
第 366 号	浅間山高峰火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 CD-ROM) 30pp. 2012 年 2 月発行
第 367 号	防災科学技術研究所による関東・東海地域における水圧破砕井の孔井検層データ 29pp. 2012 年 3 月発行
第 368 号	台風災害被害データの比較について(1951 年~ 2008 年,都道府県別資料)(付録 CD-ROM)19pp. 2012 年 5 月発行
第 369 号	E-Defense を用いた実大 RC 橋脚(C1-5 橋脚)震動破壊実験研究報告書 - 実在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐
	震性に関する震動台実験及びその解析 - (付録 DVD) 64pp. 2012 年 10 月発行
第 370 号	強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部地盤統合モデルの検討(付録 CD-ROM) 410pp. 2013 年
	3月発行
第 371 号	野島断層における深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(平林・岩屋・甲山)(付録 CD-ROM) 27pp. 2012 年
	12月発行
第 372 号	長岡における積雪観測資料 (34) (2011/12 冬期 ) 31pp. 2012 年 11 月発行
第373号	阿藤山一の宮および白水火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 48pp. 2013 年 2 月発行
第374号	3 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
第375号	新山山の加高ののの人生自人に通知のアニア (Altrona Hand King Constrained Kin
第376号	地すべり地形分布図 第 51 集「天塩・枝幸・稚内」20 葉(5 万分の 1) 2013 年 3 月発行
第377号	地すべり地形分布図 第 52 集「北見・紋別」25 葉(5 万分の 1) 2013 年 3 月発行
第378号	地すべり地形分布図 第53 集「帯広」16 葉(5 万分の1) 2013 年 3 月発行
第379号	車日本大雲災を踏まえた地震ハザード運研の改良に向けた給封 349nn 2012 年 12 日発行
第380号	
第381 号	日本の八田ハワード(フクス・第2版(135 D7D) 100pp. 2010 年7月5日1
第 389 号	
第 383 号	地すべり地形分布図 第55 年 [ 斜田・知庄岬 $_{23}$ 葉 $(5  \text{万分の } 1) 2014 \pm 2  \text{73.1}$
第381 早	地方 $(5 - 2 - 7)$ $(5 - 2 - 7)$ $(5 - 2 - 7)$ $(5 - 7)$
第 304 万	地すべり地形力和因先の $来1$ 動品・低至] $10 \times (0 7 7 0 0 1). 2014 + 2 万元] 市古邦市岡になける水宝紘計データの敷借(付号 DVD) 6nn 2014 年 2 日発行$
第386号	本永郁市西におりる水吉紀市) クの金圃(内頭 D D) opp. 2019 年2万元日 The AITCC User Guide _An Automatic Algorithm for the Identification and Tracking of Convective Cells_ 33nn
1,000 (J	2014 在 3 目発行
第 387 号	新生における気象と降積雪の観測(2012/13 年冬期) 47nn 2014 年 2 月発行
第388号	地立べり地形分布図 第 57 集 「沖縄県域諸島」 25 葉 (5 万分の 1) 2014 年 3 月発行
第 389 号	長岡における積雪観測容料 (36) (2013/14 友期) 22 m 2014 年 12 日発行
第390号	新中における気象と降積重の観測(2013/14 年久期) 47nn 2015 年 2 日発行
第 301 号	大田樽空間品り天共の脱茲被害メカニズム解明のためのFーディフェンス加振宇殿 報告書
N1 001 1	北の脳波納室面相実験な上が耐雪星的王士の耐雪全欲度給証実験— $103nn = 9015 \pm 9 日発行$
筆 392 号	州
第 302 月	地子、19地形力和図第50条「起兄副朱续昭副」21条( $0$ 力力 $0$ 1)、2010年 $0$ 力元(1) 地式べり地形分布図第59年[伊可諾島お上7 $1$ 小笠原諸島」10葉(5万分の1)、2015年3日発行
第 301 号	地子、19地形力和凶争300条「小豆間副450名の小豆原間副110条(0)力分17.2010年 $0$ 力元] 地子、10地形分布図 第 $60$ 集[関東山中域] 15 $\pm$ (5万分の1) 2015 年 3 日発行
第 395 号	
第 305 马	小吉桃山王国版 アンバーン地電(Corbo 地電) になける (安康起の和洋田に開するレマリンが調本 59mp 9015 年 7 日発行
第 350 号	2015年4月本代 // 地震(Contral 地震) における火音情報の利品用に戻するこ / リング調査 00pp. 2015年7月光日 9015年4日マパール抽動(Contral 抽動) における建物抽塞に開える桂根収集調本法報 16pp. 9015年0日発行
第 357 号	2013 中4 月本//一// 地展 (GOI KIId 地展) におりる足初似音に因りる頂報収未調査述報 10pp. 2013 中3 月光1]
弗 390 万	
舟 399 方 笠 400 日	米口平八辰火で増まんに地展期/ハリート計画の以及(竹邨 $DVD$ ) 200月, 2013 年 12 月光行 日本海港に発生する地震にとる確認的街速ハギード部にの毛汁の粉封(日月 $DVD$ ) 916~ 9015 年 19 日発行
- 毋 400 亏 - ∽ 401 □	ロ 平
- 另 401 亏 - ∽ 409 □	土国日田(やい)切火用報ン人) ム 金畑(八 41) PL 2013 年 12 月 元 [
- 另 402 号 - ∽ 402 日	利止にわりる风家と降損当り観測(2014/13 平冬期) 4/pp. 2010 年 2 月第行 地上写真に上て自海山志市対応の電源の日期赤毛知測(1070 - 2015 年) 59 2016 年 9 日発行
- 另 403 亏 - ∽ 404 □	地上ヲ具による局徴山開来料則の当天の技制変則観測(1979~2013年) 32pp. 2010年2月発行 2015年4日ネパール地雷(Contronument)にわけて地震の概要に決機地中に明ティは知识を思われた。「
弗 404 亏	2013 平 4 月 不 / 1 一 ル 地 展 (GOTKIIIa 地 展 ) に お け る 地 展 の 慨 要 と 建 物 彼 書 に 関 す る 情 報 収 集 調 省 報 告 54pp.
弗 405 号	工ゆ 水青 ア 側に 関 9 る 蚶 充 集会 三 現 石 い 課題 と 新 技 鮒 三 フ ロ ン ー テ イ ン ク 220 pp. 2016 年 3 月 発 行

第 406 号	津波ハザード情報の利活用報告書 132pp. 2016 年
第 407 号	2015 年 4 月ネパール地震 (Gorkha 地震) におけ
	120pp. 2016 年 10 月発行
第 408 号	新庄における気象と降積雪の観測(2015/16年冬期)
第 409 号	長岡における積雪観測資料 (38) (2015/16 冬期) 28
第 410 号	ため池堤体の耐震安全性に関する実験研究一改修さ
第 411 号	土砂災害予測に関する研究集会-熊本地震とその周
第 412 号	衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面・地盤
	変動抽出- 107pp. 2017 年 9 月発行
第 413 号	熊本地震被災地域における地形・地盤情報の整備
	ベースの構築- 154pp. 2017 年 9 月発行
第 414 号	2017年度全国市区町村への防災アンケート結果概要
第 415 号	全国を対象とした地震リスク評価手法の検討 450p
第 416 号	メキシコ中部地震調査速報 28pp. 2018年1月発行
第 417 号	長岡における積雪観測資料(39)(2016/17冬期) 29
第 418 号	土砂災害予測に関する研究集会 2017 年度プロシー
第 419 号	九州北部豪雨における情報支援活動に関するインタ
第 420 号	液状化地盤における飽和度確認手法に関する実験的
	驗一 62pp. 2018 年 8 月発行
第 421 号	新庄における気象と降積雪の観測(2016/17 年冬期)
第 422 号	2017 年度防災科研クライシスレスポンスサイト(NI
第 423 号	耐震性貯水槽の液状化対策効果に関する実験研究
	48pp. 2018 年 12 月発行
第 424 号	バイブロを用いた起振時過剰間隙水圧計測による原
	に向けた土槽実験の試み- 52pp. 2019年1月発行
第 425 号	ベントナイト系遮水シートの設置方法がため池堤体
第 426 号	蛇籠を用いた耐震性道路擁壁の実大振動台実験およ
	114pp. 2019 年 2 月発行
第 427 号	津波シミュレータ TNS の開発 70pp. 2019 年 3 月
第 428 号	長岡における積雪観測資料(40)(2017/2018冬期)

- 編集委員	]순 -	防災
(委員長)	淺野 陽一	
(委 員) 三輪 学央 河合 伸一 中村いずみ	下瀬 健一 平島 寛行 市橋 歩	編発
(事務局) 臼田裕一郎 池田 千春	前田佐知子	ŕn
(編集・校正)	樋山 信子	L1

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2019

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ(http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/)をご覧下さい.

≤8月発行 る災害情報の利活用に関するインタビュー調査 - 改訂版-) 39pp. 2017年2月発行 8pp. 2017 年 2 月発行 されたため池堤体の耐震性能検証- 87pp. 2017 年 2 月発行 周辺-プロシーディング 231pp. 2017 年 3 月発行 隆変動調査 -多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の - 航空レーザ計測と地上観測調査に基づいた防災情報データ 要 69pp. 2017 年 12 月発行 pp. 2018 年 3 月発行予定 9pp. 2018 年 2 月発行 ディング 149pp. 2018 年 3 月発行 マビュー調査 90pp. 2018 年7月発行 的研究 -不飽和化液状化対策模型地盤を用いた模型振動台実 45pp. 2018 年 11 月発行 IED-CRS)の構築と運用 56pp. 2018 年 12 月発行 - 液状化による浮き上がり防止に関する排水性能の確認-夏位置液状化強度の評価手法の検討-原位置液状化強度の評価 行 本の耐震性に与える影響 102pp. 2019 年1月発行 、び評価手法の開発-被災調査から現地への適用に至るまで-

|発行| 29pp. 2019 年 2 月発行

## 災科学技術研究所研究資料 第429号

平成 31 年 3 月 28 日 発行

幂集兼 国立研究開発法人 〒 305-0006 茨城県つくば市天王台3-1 電話 (029)863-7635 http://www.bosai.go.jp/

印刷所前田印刷株式会社 茨城県つくば市山中152-4

# 配管系の弾塑性地震応答評価に対するベンチマーク解析

中村いずみ\*1・渡壁智祥\*2・大谷章仁\*3・澁谷忠弘\*4・森下正樹\*2・白鳥正樹\*5

# Benchmark Analyses of Elastic-Plastic Seismic Response Evaluation of Piping Systems

Izumi NAKAMURA<sup>\*1</sup>, Tomoyoshi WATAKABE<sup>\*2</sup>, Akihito OTANI<sup>\*3</sup>, Tadahiro SHIBUTANI<sup>\*4</sup>, Masaki MORISHITA<sup>\*2</sup>, and Masaki SHIRATORI<sup>\*5</sup>

\*<sup>1</sup>Earthquake Disaster Mitigation Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan izumi@bosai.go.jp
\*<sup>2</sup>Japan Atomic Energy Agency, Japan
\*<sup>3</sup>IHI Corporation, Japan
\*<sup>4</sup>Yokohama National University, Japan
\*<sup>5</sup>Professor Emeritus, Yokohama National University, Japan

#### Abstract

To investigate the accuracy and the factors that affect elastic-plastic analytical error for piping systems under excessive seismic loads, a series of benchmark analyses on existing experimental results were performed. The benchmark analyses included (1) the first stage of the benchmark analysis on carbon steel pipes (BA\_#01), (2) parametric analyses on the same experimental results of the first stage of the benchmark analysis (PA), and (3) the second stage of the benchmark analysis on stainless steel pipes (BA\_#02). Based on the BA\_#01 results, the setting of the yield stress has a significant effect on the analytical results, whereas the setting of the second inclination of the bi-linear model and the approximation method of the stress-strain curve are not so significant. The PA results revealed that conservative estimation can be accomplished by postulating the bi-linear approximation using a yield stress that is 1.2 times the design yield stress, with the kinematic hardening law as the material property. The PA indicated further that the difference in the analytical results were reduced by unifying the material property. For stainless steel pipes, the BA\_#02 results indicated that the inelastic behavior could be well evaluated for elbow pipes, and the modeling accuracy for pipe shape affected the results for tee pipes.

Key words: Excessive seismic motion, Elastic-plastic response, FEM analysis, Benchmark analysis, Parametric analysis, Piping system, Pipe element

\*1国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門

\*<sup>3</sup> I H I

<sup>\*2</sup>日本原子力研究開発機構

<sup>\*4</sup> 横浜国立大学

<sup>\*5</sup> 横浜国立大学 名誉教授

# 目 次

1. はじめに	4
1.1 研究の背景	4
1.2 日本機械学会におけるタスク活動	4
1.3 本研究の目的	4
2. 第一段階ベンチマーク解析	6
2.1 目的と実施方法	6
2.2 ベンチマーク問題	6
2.2.1 配管要素試験の概要	6
2.2.2 配管系振動試験の概要	8
2.3 ベンチマーク解析結果	10
2.3.1 配管要素解析	10
2.3.2 配管系振動解析	21
2.4 第一段階ベンチマーク解析のまとめ	26
3. パラメトリック解析	32
3.1 目的	32
3.2 配管要素試験に対するパラメトリック解析	32
3.2.1 検討内容	32
3.2.2 解析結果の分析	33
3.3 配管系振動試験に対するパラメトリック解析	42
3.3.1 検討内容	42
3.3.2 解析結果の分析	43
3.4 パラメトリック解析のまとめ	44
4. 第二段階ベンチマーク解析	51
4.1 目的と実施方法	51
4.2 ベンチマーク問題	51
4.2.1 エルボ要素配管振動試験の概要	51
4.2.2 ティ要素配管振動試験の概要	52
4.3 ベンチマーク解析結果	54
4.3.1 エルボ要素配管振動試験の解析	54
4.3.2 ティ要素配管振動試験の解析	57
4.4 第二段階ベンチマーク解析のまとめ	62
5. まとめ	63
謝辞	63
参考文献	64
関連発表論文	65

<添付資料1>

日本機械学会発電用設備規格委員会原子力専門委員会 耐震許容応力検討タスクフェーズ2委員名簿

<添付資料2>

第一段階ベンチマーク解析における使用データ(CD-R)

1. はじめに

# 1.1 研究の背景

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震における 福島第一原子力発電所の事故以降、原子力発電施設 の設計・評価における地震外力は増大する傾向にあ る.現行の原子力発電施設における配管系の耐震設 計<sup>1)</sup>は弾性解析に基づいており、地震時の発生応力 をおおむね弾性範囲にとどめるように設計されてい る. そのため増大する傾向にある基準地震動に対し、 配管系に発生する応力が許容応力を超過する場合は サポートの追加等の対策が求められる.一方、これ までに実施されてきた地震荷重下における配管系の 終局挙動に関する実験研究<sup>2)~6)</sup>や実地震における 原子力発電施設の被災状況<sup>7)</sup>などから,配管系では 耐震基準における許容応力に対し、内部流体の漏洩 のような実際の破損に至るまでには大きな裕度を有 していること, また, 破損モードは設計で想定して いる塑性崩壊ではなくラチェットを伴う疲労損傷で あることが明らかにされている. これは、大レベル の地震荷重が作用した場合、実際の配管系では破損 に至るまでに大きな弾塑性応答を示すが. 弾性設計 を基本としている現行の耐震設計ではそのような実 挙動を考慮していないことが一因と考えられる. ま た,耐震設計審査指針<sup>8)</sup>においては設計用地震動を 上回る地震力に対する残余のリスクを評価すること が求められているが,配管系の地震応答が現行の耐 震基準での想定を超え, 塑性領域に達した際の応答 挙動,終局強度の評価法は整備されていない.原子 力発電施設における配管系の耐震信頼性をさらに向 上させるためには、大レベルの地震動を受けた際に は配管系がある程度塑性域に達することを想定した 上で, 弾塑性応答挙動を適度な保守性と合理性を 持って評価する手法の整備が必要である.

#### 1.2 日本機械学会におけるタスク活動

弾塑性挙動を明示的に取り入れた配管系の耐震安 全性評価手法を整備することを目的とし,著者らは 2014年4月,日本機械学会の発電用設備規格委員 会原子力専門委員会傘下に「耐震許容応力検討タス クフェーズ2」という名称のタスク活動を立ち上げた (以下,「JSME タスク」).

配管系の耐震安全性評価に弾塑性応答挙動の効果 を取り入れる場合,弾塑性解析による評価が必要と なるが,弾塑性解析では材料特性のモデル化や解析 モデルの設定方法などによって解析結果にばらつき の生じることが予想される.また,耐震安全性評価 において,配管系の破損に対して十分な保守性を維 持するためには,解析結果のばらつきを考慮した上 で適切な評価手法を規定する必要がある.従って, JSME タスクでは,実務においてこのような評価の 実施が可能となるよう,以下の2つのガイドライン を整備することを目標とした.

- (1) 弾塑性挙動を考慮した配管系の耐震安全性評 価手法のガイドライン
- (2) 配管系の弾塑性応答評価のための標準的な解 析手法のガイドライン

ここで,(1)は,弾塑性解析に基づく健全性評価 のための評価クライテリアの規定であり,日本機械 学会で発刊している発電用原子力設備規格設計・建 設規格<sup>9)</sup>(以下,「設計・建設規格」)の事例規格とし ての刊行を目指した.(2)は詳細弾塑性解析手法の 規定であり,事例規格の付属資料とすることとした. 以下,(1)を「事例規格」<sup>10)</sup>,(2)を「解析法ガイドラ イン」<sup>11)</sup>と称する.

#### 1.3 本研究の目的

弾塑性地震応答解析に基づく耐震安全性評価手法 を構築していくにあたり,既存の解析手法により弾 塑性解析を行った場合の解析結果のばらつきの程度 やその要因を把握するとともに,ばらつきを軽減す るための解析上の留意点などを抽出し,事例規格お よび解析法ガイドラインへ反映することを目的と し,タスク活動の第一段階として既往試験のデータ をもとにベンチマーク解析を実施することとした.

- ベンチマーク解析は,
- (1) 第一段階ベンチマーク解析
- (2) パラメトリック解析
- (3) 第二段階ベンチマーク解析

の3つで構成されている.表1-1 にベンチマーク 解析の実施工程を示す.

第一段階ベンチマーク解析では、炭素鋼配管について、既存の解析手法による地震荷重を受ける配管の弾塑性挙動や損傷寿命評価の精度を比較し、解析における誤差の発生程度や要因を調査することを目的とした.そのため、解析に必要な試験データのみ

を提供し,モデル化に関する情報(要素分割,応力 -ひずみ関係のモデル等)は指定せず解析者に任せ るブラインド解析で実施した.

パラメトリック解析では,解析法ガイドラインに 則った解析と,ブラインド解析として実施した第一 段階ベンチマーク解析との解析者間のばらつきの比 較,解析法ガイドラインに則った解析による保守性 の確認,要素分割や材料特性のモデル化が解析結果 に与える影響を調査することを目的とした.

第二段階ベンチマーク解析では, ステンレス鋼配

管への解析法ガイドラインの適用性,およびティ配 管に対する解析精度の確認を目的として,既往の試 験データを用いてベンチマーク解析を実施した.

本報告書は、一連のベンチマーク解析の実施内容, 結果、および得られた知見についてとりまとめたも のである.

一連の研究の実施にあたり,JSME タスクの下に
 ベンチマーク解析 WG,評価法 WG,解析法 WG を
 設置した.
 (添付資料 1 >に JSME タスクおよび各
 WG の委員名簿を示す.

**表 1-1** ベンチマーク解析の実施工程 **Table 1-1** Time schedule for the three stages of benchmark analyses.

		FY2014	FY2015	FY2016
The	e first stage of benchmark analysis			
Par	ametric Analysis			
	Analyses for pipe element			
	Analyses for piping system model		_	
The	e second stage of benchmark analysis		-	

• First stage of benchmark analysis: July 2014 - March 2015

• Parametric analysis on pipe element test: December 2015

• Parametric analysis on piping system test: February 2016 - May 2016

• Second stage of benchmark analysis: March 2016 – December 2016

### 2. 第一段階ベンチマーク解析

# 2.1 目的と実施方法

第一段階ベンチマーク解析は、炭素鋼配管を対象 とし、既存の解析手法を用いて地震荷重を受ける配 管の弾塑性挙動や損傷寿命評価の精度を比較し、解 析における誤差の程度や発生要因を調査することを 目的とした.そのため、実施内容は、既往の配管要 素に対する繰り返し載荷試験(以下、「配管要素試 験」)と、比較的単純な形状の立体配管系に対する一 方向の加振試験(以下、「配管系振動試験」)を対象と するブラインド解析とした.JSME タスクにおいて 有志の解析参加者を募集し、試験体形状、材料試験 結果、試験時に収録した入力データを解析参加者に 提供した.第一段階ベンチマーク解析は 2014 年 7 月から 2015 年 3 月に実施した.

ベンチマーク解析への参加は個人またはグループ (以下,「参加者」)とし,個人は複数のグループに関 わらないこととした.各解析の参加者数は以下のよ うになった.

(1) 配管要素試験のベンチマーク解析参加者: 14 グループ



Unit: Group / Total 14 groups (a) Analysis for pipe element test



University
Research Institute
Plant manufacturers

Consulting / Vender

Unit: Group / Total 10 groups

(b) Analysis for piping system test

図 2.1-1 第一段階ベンチマーク解析参加者の属性 Fig. 2.1-1 Number and attributions of the participants in the first stage of the benchmark analyses. (2) 配管系振動試験のベンチマーク解析参加者: 10 グループ

各解析の参加者属性を図 2.1-1 に示す. また, 第 一段階ベンチマーク解析で用いられた解析コードを 表 2.1-1 に示す.

#### 2.2 ベンチマーク問題

ベンチマーク問題に供した試験は,防災科学技術 研究所(以下,「防災科研」)が実施した「高経年配管 系に対する耐震裕度の定量評価に関する研究」<sup>12)</sup>の うち,配管要素試験の健全配管 ELB01 と,「機器・ 配管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法の研 究」<sup>13)</sup>のうち,配管系振動試験の健全配管 3D\_A01 である.

#### 2.2.1 配管要素試験の概要

### (1) 試験概要

配管要素試験は変位制御の繰り返しエルボ面内曲 げ試験である.図2.2-1(a)に試験体の形状を示す. また,試験体の設置状況を図2.2-1(b)に示す.配管 要素試験で使用した配管種別は,高圧配管用炭素鋼 鋼管 STS410,200A Sch80(外径:216.3 mm,板厚: 12.3 mm)のロングエルボである.

試験では弾性域から弾塑性域までの荷重変形関係 を取得することを目的とし,段階的に入力変位を増 加させた試験(以下,「試験①」)と,試験体の損傷を 目的とした大変形での繰り返し載荷試験(以下,「試 験②」)を実施した.試験②は,試験①終了後,同じ 試験体を用いて載荷を行った.試験①では入力変位 を段階的に増加させ,±5 mm~±80 mm まで載荷を 行った.試験②では試験①で得られた荷重変形関係 から骨格曲線を取得し,二倍勾配法により崩壊荷重 を求め,その崩壊荷重に対応する入力変位で繰り返

表 2.1-1 第一段階ベンチマーク解析に用いられた解 析コード

 Table 2.1-1
 FEA codes used in the first stage of benchmark analysis.

Analysis for pipe	element test	Analysis for pipi	ng system test
Code	Groups	Code	Groups
ABAQUS	8	ABAQUS	6
ANSYS	2	ANSYS	2
FINAS	2	FINAS	1
FINAS/STAR	1	FINAS/STAR	1
MSC Marc	1		

し載荷を行った. その結果, 試験②における入力変 位は ±70 mm であった.

試験①では 0.2 Hz の正弦波 5 サイクルを1 セット とした変位波形を,また試験②では 0.2 Hz の正弦波 20 サイクルを1 セットとした変位波形を使用した. 図 2.2-2 にそれぞれの入力変位波形を示す.試験は 常温で実施し,試験体の内部に水を充填し,10 MPa の内圧をかけた.試験では,入力変位,反力,エル ボ部ひずみ等を計測した.また,試験前後における エルボ部の配管外径をノギスにより計測した.

載荷試験の結果,試験②の9回目の載荷において エルボ脇部軸方向に疲労亀裂が貫通した.試験②に おける,疲労亀裂貫通までの定常部サイクル数は 179 サイクルとなった.図2.2-3 に損傷状況を示す.

(2) ベンチマーク解析提供データおよび出力指定 データ

配管要素試験に対するベンチマーク解析(以下, 「配管要素解析」)では、参加者に対し以下のデータ を提供した.

- (a) 試験体図面
- (b) 試験体の計測点位置



(a) Dimensions of the specimen and the test equipment



(b) Test setup

図2.2-1 配管要素試験の状況<sup>12)</sup>

Fig. 2.2-1 Schematic diagram and photo of pipe element test.

- (c) 計測に使用した計器種別
- (d) エルボ部の材料特性(ミルシート値)
- (e) エルボ部から採取した試験片による公称応力-公称ひずみ曲線
- (f) エルボ部の外径計測結果(試験前/試験後)
- (g)入力変位波形

参加者には,以下の解析結果と解析情報の提供を 求めた.

- (a) 解析結果
- a) 必須項目

試験①の,入力変位±15 mm(弾性範囲)および ±30 mm(ひずみ範囲で約1%に相当)各5サイクルの 載荷におけるエルボ中央断面脇部内面,脇部外面, 腹部外面の軸方向および周方向ひずみの履歴

- b) 任意項目
  - i) 試験②の、入力変位±70mm(損傷発生レベル) 20サイクル1回目の載荷におけるエルボ中央 断面脇部内面、脇部外面、腹部外面の軸方向 および周方向ひずみの履歴







図 2.2-3 配管要素試験の損傷状況(浸透探傷試験結果) Fig. 2.2-3 Failure mode in the pipe element test (Penetration test results).

- ii) 亀裂発生の予測箇所および疲労寿命評価結果
- iii) 寿命評価に用いたひずみ履歴
- (b) 解析情報
- a)計算環境
  - i) 解析に使用したプログラム名(商用,フリー, 研究用,自己開発)およびバージョン
  - ii) 使用コンピュータ
  - iii) 計算時間
- b) 解析手法, 解析条件
  - i) 解析モデル
  - ii)解析に使用した材料の構成則
  - iii) 寿命評価の手法
  - iv) その他(参加者側で設定した解析実施上のパ ラメータ等)



(b) Test setup

図 2.2-4 配管系振動試験の状況<sup>13)</sup>

# **Fig. 2.2-4** Schematic diagram and photo of piping system test.

#### 2.2.2 配管系振動試験の概要

### (1) 試験概要

配管系振動試験では,試験体に高温配管用炭素鋼 鋼管 STPT370,100A Sch80(外径:114.3 mm,板厚:8.6 mm)を使用した.試験体形状を図2.2-4(a)に,また 試験体の振動台上設置状況を図2.2-4(b)に示す.試 験体は,両端が架台に固定され,途中2箇所のサポー トで支持されている.サポート1箇所につき2本の Uボルトで試験体を固定した.一次固有振動モード は,エルボ1,エルボ2とも面内曲げが卓越する変 形である.試験装置は,防災科研の所有する一次元 大型振動台である大型耐震実験施設(以下,「大型耐 震」)を使用した.

配管系振動試験では,試験体の一次固有振動モードのみを励起するため,1.5 Hz ~ 3 Hz の狭帯域ランダム波を作成して使用した.図2.2-5 に試験で使用した狭帯域ランダム波の加速度時刻歴波形と応答スペクトルを示す.試験では,図2.2-5 に示した波形に倍率をかけ,弾性域(100 Gal以下)から振動台の加振限界(1,850 Gal)まで入力を増加させ,試験体が損傷するまで繰り返し加振を行った.ここで,試験体の損傷は亀裂貫通による内部水の漏洩で定義した.また,弾性域では試験体特性の把握のため,正弦波掃引試験も実施した.試験は常温で実施し,試験体の内部に水を充填し,10 MPa の内圧をかけた.



(b) Acceleration response spectra (h: damping ratio)

図 2.2-5 配管系振動試験の入力 Fig. 2.2-5 Input motion for the piping system test.

試験では、入力加速度、配管応答加速度、エルボ 開閉変位、エルボ部ひずみ等を計測した.また、エ ルボ1およびエルボ2については、試験前後に配管 外径をノギスにより計測した.

表 2.2-1 に配管系振動試験における加振内容と加振回数を示す. なお, 表中, 最大入力加速度値は振動台上計測点の X 方向 (加振方向)加速度計の計測結果である. 正弦波掃引試験から得られた試験体の一次固有振動数は 2.78 Hz, 減衰は 1.06% であった. 試験では, 最大加速度 1,850 Gal の加振 14 回目でエルボ 1 脇部軸方向に疲労亀裂が貫通した. 図 2.2-6 に損傷時の写真を示す.

(2) ベンチマーク解析提供データおよび出力指定 データ

配管系振動試験のベンチマーク解析(以下,「配管 系振動解析」)では,参加者に対し以下のデータを提 供した.

表 2.2-1 配管系振動試験における加振内容

 Table 2.2-1
 Contents of excitations applied to the piping system model.

Input motion	Max. Acc. [Gal]	Iteration
Sinusoidal sweep 1.5Hz-3.5Hz	20	2
	20, 40, 60, 80	2 for each
Narrow band	100, 400, 500	1 for each
random wave	700, 1400	2 for each
	1850	14*

\* A crack penetrated at the 14th excitation test



Crack penetration and leak of water

図 2.2-6 配管系振動試験の損傷状況

Fig. 2.2-6 Failure mode in the piping system test.

- (a) 試験体図面
- (b) 試験体の計測点位置
- (c) 計測に使用した計器種別
- (d) エルボ部の材料特性(ミルシート値)
- (e) 直管部で採取した試験片による公称応力-公称 ひずみ曲線
- (f) エルボ部の外径・板厚計測結果
- (g)入力加速度波形(振動台上の実測値)

参加者には,以下の解析結果と解析情報の提供を 求めた.

- (a) 解析結果
- a) 必須項目
  - i) 弾性域での固有振動数およびモード形状
  - ii) 入力加速度 80 Gal (弾性域) および 700 Gal (ひ ずみ範囲で約 1% に相当)の入力による、以下 の時刻歴データ
    - ・エルボ1,2の開閉変位
    - ・エルボ3における応答加速度
    - エルボ1,2の中央断面脇部外面の軸方向お
       よび周方向ひずみ
- b) 任意項目
  - i) 入力加速度 1,850 Gal (損傷加振レベル)の入力
     による,以下の時刻歴データ
    - ・エルボ1,2の開閉変位
    - ・エルボ3における応答加速度
    - エルボ1,2の中央断面脇部外面の軸方向お
       よび周方向ひずみ
- ii) 亀裂発生の予測箇所および疲労寿命評価結果
- (b) 解析情報
- a) 計算環境
  - i) 解析に使用したプログラム名(商用,フリー, 研究用,自己開発)およびバージョン
  - ii) 使用コンピュータ
  - iii) 計算時間
- b) 解析手法, 解析条件
  - i) 解析モデル
  - ii)解析に使用した材料の構成則
  - iii) 寿命評価の手法
  - iv) その他(参加者側で設定した解析実施上のパ ラメータ等)

#### 2.3 ベンチマーク解析結果

本節では第一段階ベンチマーク解析の結果につい てまとめる.配管要素解析では、14 グループの参加 があり、うち9 グループより任意項目の提出があっ た.また、配管系振動解析では、10 グループの参加 があり、うち5 グループより任意項目の提出があっ た.

以下では、参加者にグループAからOまでの参加者名をつけて解析結果を区別する.参加者名は配管要素解析,配管系振動解析で共通である.

2.3.1 配管要素解析

# (1) 解析条件

(a) 試験体のモデル化方法

試験体のモデル化は,解析参加者により,試験体の全てをモデル化したもの(以下,「フルモ





デル」),対称性を考慮し試験体の半分をモデル 化したもの(以下,「ハーフモデル」)に分かれた. ハーフモデルは,さらに,管軸に沿って試験体 を分割した解析グループと管軸直交方向で試験 体を分割した解析グループとに分かれた.対称 性を考慮すると1/4分割モデルも想定されたが, 本ベンチマーク解析では1/4分割モデルを使用 した参加者はいなかった.図2.3-1に試験体の モデル化の事例を示す.

(b) 材料特性の近似

材料特性のモデル化は,二直線近似で移動硬 化則を適用した参加者が7グループと最多で あったが,二直線近似に使用した特性値は参加 者により異なった.図2.3-2に二直線近似を適 用した参加者の近似結果を示す.また,表2.3-1 (a)に二直線近似を使用した参加者の材料特性 の近似情報を,表2.3-1(b)に多直線近似および その他の近似を使用した参加者の材料特性の近 似情報をまとめる.図2.3-2および表2.3-1に示 すように,ほとんどの参加者は提供した材料試 験結果に準じて降伏応力を設定していたが,グ ループGのみ設計・建設規格で定められている 規格降伏点に準じて設定していた.

(c) 使用要素の種別とエルボ中央断面近傍の要素分割

表 2.3-2 に各解析参加者が使用した要素種別 と,エルボ部中央断面(最大ひずみ発生位置近 傍)の要素分割内容を示す.表中,"~"を付して



図 2.3-2 配管要素解析 解析参加者による二直線近 似のバリエーション

Fig. 2.3-2 Pipe element analysis: Variation in the modeling of the stress-strain relationship by bi-linear approximation.

# 表 2.3-1 配管要素解析 解析参加者の材料特性の近似情報

 Table 2.3-1
 Pipe element analysis: Material property approximations for each group.

#### (a) Bi-linear approximation

	Hondonino milo	Young's modulus	Yield stress	Second inclination of bi-	E/E
	Hardening rule	(E)[GPa]	[MPa]	linear model (E <sub>2</sub> ) [MPa]	$E_2/E$
Group A	Kinematic	203	370	884.3	0.004
Group E <sup>*1</sup>	Kinematic	202	454	1809	0.009
Group G	Kinematic	203	245	812	0.004
Group I	Kinematic	203	374	1300	0.006
Group J	Kinematic	203	362	1200	0.006
Group K	Kinematic	203	380	1500	0.007
Group M	Kinematic	202.35	384	5764	0.028

\*1 Group E sets the tertiary slope in the range exceeding 10% of the true strain.

# (b) Multi-linear approximation and others

	Approximation method	Hardening rule	Young's modulus (E)[GPa]	Yield stress [MPa]	Note
Group C	Multi-linear	Kinematic	206	364.62	
Group F	Multi-linear	Combined	203	369.8	
Group B	Others	Combined	203	362	
Group D	Others	Isotropic / Kinematic	205	375.8*1	Three different constitutive laws were used
Group H	Others	Non-linear kinematic (Chaboche model)	203	374	
Group L	Others	Multi-layer kinematic	203	371	Modified ASME method <sup>14)</sup>
Group O	Others	Non-linear kinematic	203	373	

\*1 Group D conducted the analyses with three different constitutive laws, and the yield stress listed in this table is one example of those constitutive laws.

# 表 2.3-2 エルボ部(最大ひずみ発生位置近傍)の要素分割

 Table 2.3-2
 Element breakdown at the elbow (where the maximum strain was generated).

	Element	Heer (9)	A: = 1 (9)	Thickness		Element	U (9)	A: = 1 (9)	Thickness
	type	H00p (*)	Axial (*)	(layer)		type	Ноор (*)	Axial (*)	(layer)
Group A	Shell	7.5	3.75	-	Group H	Shell	9	3	-
Group B	Shell	9	9	-	Group I	Shell	2.5	2.5	-
Group C	Solid	7.5	4.5	3	Group J	Solid	7.5	3	1
Group D	Solid	11.25	> 3.46	4	Group K	Solid	10	~2.143	6
Group E	Solid	5.625	1.875	6	Group L	Shell	10	3	-
Group F	Shell	9	6	-	Group M	Solid	10	~3.46	6
Group G	Shell	~4.615	3	-	Group O	Shell	5	5	-

いるものは、角度を指定した分割ではなく、一 定の範囲を等間隔に分割しており、割り切れな い値のものである.また、グループDの軸方 向分割は、エルボを軸方向に26分割しており、 エルボ中央部へ向かうに従い細かくするという 設定のため、中央部近傍は3.46°よりも細かい 分割となる.

本ベンチマーク解析では,周方向分割は5° ~10°(全周を36~72分割),軸方向分割は5° (90°を18分割)以下が多かった.

(2) 解析結果の分析

### (a) 荷重変形関係

図 2.3-3 に各解析参加者から提出のあった荷 重変形関係を実験結果と比較して示す. なお, 実験では図 2.2-2 に示した入力変位の正方向が エルボを閉じる方向であるが,解析において入 力変位の正方向をエルボの開く方向に作用させ ている場合があり,それらの解析結果に対して は,提出された変位および荷重データの符号を 反転させて荷重変形関係を作成した.

降伏応力を規格値に準じて設定しているグ ループGは、実験においてはほぼ弾性域である 入力変位量±15 mmの載荷より弾塑性挙動を示 しており、弾塑性解析においては降伏応力の設 定が大きく影響することがわかる.その他の解 析結果については、±70 mmの載荷では塑性化 の程度が大きく、また、実験結果にはそれまで の載荷履歴の影響が含まれていることもありば らつきがやや大きくなっているが、いずれの入 力変位による載荷も解析により実験結果をおお むね再現している.

(b) ひずみ履歴

配管要素解析では、エルボ脇部内外面および エルボ腹部のひずみを解析での出力項目に指定 した.図2.3-4に±30mmの入力における、エ ルボ脇部内面ひずみ(SAI-3A:軸方向ひずみ、 SAI-3H:周方向ひずみ)の試験結果と解析結果 を示す.提出された解析結果の中で、実験結果 と位相が逆転しているものは、解析において入 力変位の正方向をエルボの開く方向に作用させ ている解析結果である.

(c) 強度評価

配管要素解析では,任意項目として疲労寿命 評価を求め、8グループから評価結果の提出が あった.疲労評価に使用するひずみ履歴,疲労 評価曲線、疲労評価式等は全て参加者の判断に 任せた.表 2.3-3 に各参加者が実施した疲労評 価の内容をまとめる.表中、「NUPEC の疲労寿 命評価曲線」は、文献<sup>15)</sup>で提案されている配管 要素の疲労寿命曲線である.疲労評価点の選定 は、参加者により累積相当塑性ひずみ最大点, 主ひずみ範囲最大点, 解析における周方向ひず み発生最大箇所等の差があったが、いずれの場 合でもエルボ脇部やや腹寄りが評価点となっ た. また,明記のある全ての解析結果で配管内 面が評価点となっており, 内面から亀裂の発生 した実験結果とよく一致した.図2.3-5に解析 における損傷予測位置の例を示す.







図 2.3-4 配管要素解析 入力変位 ±30mm エルボ脇部内面ひずみ(試験結果および解析結果) Fig. 2.3-4 Pipe element analysis: Strain time histories for the inner surface of the elbow flank under an input displacement of ±30 mm (Experimental results and analytical results).

	Table 2	Julia cicilicii allaiysis. I aligue allaiysis sullill	1a1y (1/2).	
				Number of cycles when the
	Viewpoint of selecting the evaluation position	Evaluation method for strain and fatigue life	Fatigue curve	cumulative fatigue damage
				index reached unity.
	Max. of the cumulative equivalent plastic strain	Time history of the chain of Dain flower	Entions analog her	
Group A	(at the flank of the elbow, $7.5^{\circ}$ toward the	THE HISTOLY OF THE HOUP SUALE / NAME HOW	raugue curve proposed by	$\sim 61^{*1}$
	intrados direction)		NULEC ,	
	Max. of the cumulative equivalent plastic strain	Evenential framinia by, Arada (barad an tha	Ections and her	
Group B	(at the flank of the elbow, $13.5^{\circ}$ toward the	Experimental totinua by Asaua (based on me	raugue curve proposed by	293.5
	intrados direction)	proposed method in the interature)	NUFEC	
	Max range of the nrincinal strain	T inear cumulative fatione damage rule	Fatigue curve by the modified	09
o dnoiD		Lincal cumulanye langue damage ture	universal slope method	<i></i>
	Max. range of the equivalent strain at the final	Linear cumulative fatigue damage rule, using 1)	Entime annua hu tha madifiad	201/10
Group E	input cycle (at the flank of the elbow, $11.25^{\circ}$	equivalent strain range taking into account the	raugue cui ve uy ure mounneu	1) 40/
	toward the intrados direction)	multi-axial stress, 2) hoop strain range	universal slope method	2) 38
			1) Manson-Coffin equation	1) 51
Ground U	The same position as the failure position in the	Time history of the hoon strain	2) Langer equation	15 (1
u dnoiD	experiment		3) Modified universal slope	2) 11 27 177
			method by Manson	//1 (C
1	Max. hoop strain in the analysis (at the flank of	II.com atomica / Doine florence atomica	Fatigue curve proposed by	1*V7
U u u u u	the elbow, $5^{\circ}$ toward the intrados direction)	поор ѕиаш / маш ном шешоц	NUPEC <sup>15)</sup>	. 00~
*1: Calculate	d from the cumulative fatigue damage by the single	input motion from the analysis reported by the pa	rticipants.	

表 2.3-3 配管要素解析 疲労評価手法のまとめ(1/2) Table 2.3-3 Pipe element analysis: Fatigue analysis summary (1/2). 防災科学技術研究所研究資料 第429号 2019年3月

	Viewpoint of selecting the evaluation position	Evaluation strain and fatigue evaluation method	Fatigue curve	Number of cycles when the cumulative fatigue damage index be to unity.
Group L	Max. of the cumulative equivalent plastic strain at the flank of the elbow, $5^{\circ}$ toward the intrados direction.	Equivalent strain range from the von Mises stress at the 20th cycle	Fatigue curve of STS410 in the literature <sup>16)</sup>	400, 420* <sup>2</sup>
Group M	(Not specified)	<ol> <li>Considering the ductility exhaustion</li> <li>Experimental formula #01 by Asada</li> <li>Experimental formula #02 by Asada</li> </ol>	Fatigue curve proposed by NUPEC <sup>15)</sup>	1) 1124* <sup>1</sup> 2) 375* <sup>1</sup> 3) 1124* <sup>1</sup>
			-	

表 2.3-3 配管要素解析 疲労評価手法のまとめ (2/2) Table 2.3-3 Pipe element analysis: Fatigue analysis summary (2/2). \*1: Calculated from the cumulative fatigue damage by the single input motion from the analysis reported by the participants.

\*2: Two types of the analytical models were used



Crack

(a) Failure position predicted by the analysis (Group B)

(b) Experimental result

図 2.3-5 配管要素解析 解析における損傷予測位置の事例と実験結果 Fig. 2.3-5 Pipe element analysis: example of the predicted failure position by FEM analysis and the experimental results. 配管要素解析 解析における損傷予測位置の事例と実験結果

疲労評価点の,エルボ脇部から腹側へのずれ角度 は5°~13.5°とばらつきがあったが,これは評価点 選定の観点の違いよりは,解析モデルにおける周方 向の要素分割数の影響が現れたものと考えられる.

(d) ばらつき評価

各解析参加者より提出されたベンチマーク解 析結果に対し,試験結果と解析結果との差違, 解析者間の差違を検討した.比較検討にあたっ ては,反力やひずみがおおむね安定するサイク ルを対象とすることとし,±15 mm,±30 mm の 入力については正弦波5波のうち3サイクル目, ±70 mm の入力については正弦波20 波のうち5 サイクル目を抽出した.ばらつき評価は以下に 示す3つのパラメータについて実施した.

- ・荷重変形関係における荷重の範囲(Fm)
- エルボ脇部内面ひずみ (SAI-3H) のひずみ範囲(*dɛm*)
- エルボ脇部内面ひずみ(SAI-3H)の残留ひず み(*ε<sub>rem</sub>*)
- 評価項目の抽出方法を図 2.3-6 に示す.
- i) 荷重の範囲の評価

*F<sub>pp</sub>*の評価結果を**表 2.3-4** に示す. **表 2.3-4** に は,以下の式(2.3-1)で評価した試験結果(*X<sub>exp</sub>*) と解析結果(*X<sub>analysis</sub>*)との比率(*X<sub>ratio</sub>*)と,その 平均値,標準偏差,変動係数もあわせて示す. ここで,変動係数は標準偏差を平均値で除し た値で定義した.

$$X_{ratio} = \frac{X_{analysis}}{X_{exp}}$$
(2.3-1)

グループGについては、解析モデルの項で述 べたとおり、材料特性の近似において他のグ ループが材料試験結果に基づいた降伏応力を 使用しているのに対し、降伏応力に規格値を 用いている関係で塑性変形が顕著になること から、反力を過小に評価する傾向があった. グループG以外の解析結果は、表2.3-4に示 すように、試験結果と解析結果の比率はおお むね10%程度に収まっており、ばらつきも小 さく、解析により試験結果を評価できている と言える.

- ii) ひずみ範囲および残留ひずみの評価 ひずみ範囲および残留ひずみの評価結果を表
  - 2.3-5, 表 2.3-6, 図 2.3-7, 図 2.3-8 に示す. 表 2.3-5, 図 2.3-7 に示すとおり, 材料特性の設 定の影響で塑性変形が顕著に出ているグルー プGを除くと、ひずみ範囲は試験結果に対し ±10%程度の範囲に収まっており、降伏応力 を実際の材料特性に近く設定することで、解 析により試験結果をおおむね評価できている と考えられる。一方、表 2.3-6、図 2.3-8 に示 すように,残留ひずみについては試験結果と の乖離が大きく, 試験においてはほとんど残 留ひずみの生じていない ±30 mm の入力にお いても 0.5% 前後の残留ひずみが発生する解 析グループが多かった. ±70 mm の入力時の 残留ひずみについて, 試験結果に対する解析 結果との比を取ると-0.15~3.37となり、ひ ずみ範囲のばらつきと比較する残留ひずみの ばらつきは大きかった.



図 2.3-6 配管要素解析 ばらつき評価で評価する項目

Fig. 2.3-6 Pipe element analysis: Schematic illustrations of the estimation items for the variation evaluation.

	Value [kN]			Analytical results / Experimental results			
	±15mm	±30mm	±70mm	±15mm	±30mm	±70mm	
Experiment	100.62	190.28	259.76				
Group A	101.05	191.15	262.51	1.00	1.00	1.01	
Group B	98.78	188.08	282.58	0.98	0.99	1.09	
Group C	104.74	192.74	258.68	1.04	1.01	1.00	
Group D	93.69	173.99	-	0.93	0.91	-	
Group E	93.01	183.46	289.12	0.92	0.96	1.11	
Group F	107.12	204.85	304.90	1.06	1.08	1.17	
Group G	78.53	96.49	-	0.78	0.51	-	
Group H	98.03	186.43	276.91	0.97	0.98	1.07	
Group I	100.39	191.55	277.10	1.00	1.01	1.07	
Group J	106.19	216.62	-	1.06	1.14	-	
Group K	94.38	180.43	-	0.94	0.95	-	
Group L	100.73	178.23	274.20	1.00	0.94	1.06	
Group M	98.26	193.07	316.84	0.98	1.01	1.22	
Group O	94.49	179.08	-	0.94	0.94	-	
			Average	0.97	0.96	1.09	
		Standard	0.07	0.14	0.07		
		Coefficient of	0.07	0.15	0.07		
		Average (w	0.99	0.99			
		SD (w	0.05	0.06			
		COV (	0.05	0.06			

**表 2.3-4** 配管要素解析 試験結果と解析結果の比較(荷重の範囲) **Table 2.3-4** Pipe element analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results – Load range.

	Value [%]			Analytical results / Experimental results			
	±15mm	±30mm	±70mm	±15mm	±30mm	±70mm	
Experiment	0.3385	0.9629	2.7422				
Group A	0.3538	0.9880	2.6071	1.05	1.03	0.95	
Group B	0.3605	0.9091	2.5094	1.06	0.94	0.92	
Group C	0.3502	1.0261	3.0933	1.03	1.07	1.13	
Group D	0.1789	0.7221	-	0.53	0.75	-	
Group E	0.3236	0.7711	2.7744	0.96	0.80	1.01	
Group F	0.3613	1.0096	2.7343	1.07	1.05	1.00	
Group G	1.2515	2.5174	-	3.70	2.61	-	
Group H	0.3595	0.9759	2.8511	1.06	1.01	1.04	
Group I	0.3660	0.9885	2.5307	1.08	1.03	0.92	
Group J	0.3532	0.6977	-	1.04	0.72	-	
Group K	0.3133	0.8160	-	0.93	0.85	-	
Group L	0.3947	0.9785	2.8476	1.17	1.02	1.04	
Group M	0.3401	0.8098	2.4975	1.00	0.84	0.91	
Group O	0.3817	1.2404	-	1.13	1.29	-	
			1.20	1.07	0.99		
		Standard	0.73	0.47	0.07		
		Coefficient of	0.61	0.44	0.07		
		Average (w	1.01	0.95			
		SD (w	0.16	0.16			
		COV (	0.16	0.16			

表 2.3-5 配管要素解析 試験結果と解析結果の比較(エルボ脇部内面周方向のひずみ範囲)

 Table 2.3-5
 Pipe element analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results – Hoop strain range at the flank of the elbow.

	Value [%]			Analytical	results / Experime	ntal results
	±15mm	±30mm	±70mm	±15mm	±30mm	±70mm
Experiment	-0.0063	0.0356	1.2141			
Group A	0.0044	0.1471	0.5912	-0.71	4.13	0.49
Group B	0.0038	0.0538	1.2354	-0.60	1.51	1.02
Group C	0.0132	0.0209	-0.1858	-2.11	0.59	-0.15
Group D	0.0000	0.1581	-	-0.01	4.44	-
Group E	0.0000	0.0702	0.0509	-0.01	1.97	0.04
Group F	0.0057	0.2344	3.7066	-0.91	6.59	3.05
Group G	1.5256	2.5212	-	-243.92	70.83	-
Group H	0.0337	0.2723	4.0870	-5.39	7.65	3.37
Group I	0.0030	0.2320	2.5581	-0.49	6.52	2.11
Group J	0.0476	0.2246	-	-7.61	6.31	-
Group K	0.0083	0.0265	-	-1.32	0.74	-
Group L	0.0903	0.5425	1.0645	-14.45	15.24	0.88
Group M	0.0761	0.4247	0.9067	-12.17	11.93	0.75
Group O	-0.0042	-0.2748	-	0.67	-7.72	-
			Average	-20.64	9.34	1.28
		Standard	64.44	18.52	1.27	
		Coefficient of	-3.12	1.98	0.99	
Average (without Group G)				-3.47	4.61	
		SD (w	4.97	5.67		
		COV (	without Group G)	-1.43	1.23	

**表 2.3-6** 配管要素解析 試験結果と解析結果の比較(エルボ脇部内面周方向の残留ひずみ) **Table 2.3-6** Pipe element analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results – Residual strain in the hoop direction at the flank of the elbow.



図 2.3-7 配管要素解析 エルボ脇部周方向ひずみのひずみ範囲ばらつき Fig. 2.3-7 Pipe element analysis: Variation of the strain range of the hoop direction at the elbow flank.



図 2.3-8 配管要素解析 エルボ脇部周方向ひずみの残留ひずみばらつき Fig. 2.3-8 Pipe element analysis: Variation of the residual strain of the hoop direction at the elbow flank.

### 2.3.2 配管系振動解析

- (1) 解析条件
- (a) 試験体のモデル化方法 試験体のモデル化方法は以下の3種類に分か れた.
  - ・配管系全体をはり要素でモデル化し、動的解 析で配管系の振動応答(応答加速度とエルボ 部の開閉変形の時刻歴データ)を求める.次 に損傷の予測されるエルボ部をシェル要素で モデル化し、動的解析により求めたエルボ部 の開閉変形を入力とした静解析でひずみ履歴 を求める手法(二段階解析,以下,「ズームアッ プモデル」).
  - ・配管系の直管部をはり要素で、エルボ部を シェル要素でモデル化し、振動応答と同時に ひずみ履歴を求める手法(以下、「ハイブリッ ドモデル」).





 ・配管系全体を同一要素(シェル要素またはソ リッド要素)でモデル化し、振動応答と同時 にひずみ履歴を求める手法(以下、「フルモデ ル」).

表 2.3-7 に各解析参加者のモデル化手法をま とめる. また,図 2.3-9 に各モデル化手法によ る解析モデルの事例を示す.解析モデルの作成 範囲は,図 2.2-4 のアンカ A01 からアンカ A02 までの範囲をモデル化した参加者が多かった が,試験体架台も含めて解析モデルを作成した 参加者が 2 グループあった.

- 表 2.3-7 配管系振動解析 各解析参加者の試験 体モデル化手法
- Table 2.3-7
   Piping system analysis: Modeling methods of the test specimen for each group.

	Modeling method of the specimen
Group A	Hybrid
Group B	Zoom-up
Group D	Full
Group E	Hybrid
Group F	Hybrid
Group G	Zoom-up
Group I	Hybrid
Group J	Full
Group L	Full
Group N	Zoom-up



図 2.3-10 配管系振動解析 解析参加者による二直線 近似のバリエーション

**Fig. 2.3-10** Piping system analysis: Variation in the modeling of the stress-strain relationship by bilinear approximation.

(b) 材料特性の近似

材料特性のモデル化は、二直線近似で移動硬 化則を適用した参加者が6グループと最多で あった.多直線近似が1グループ、その他の近 似が3グループであった.図2.3-10に二直線近 似を適用した参加者の材料特性を示す.また、 表2.3-8(a)に二直線近似を使用した参加者の材 料特性近似の情報を,表 2.3-8(b)に多直線近似 およびその他の近似を使用した参加者の材料特 性近似の情報を示す.

(c) 使用要素の種別とエルボ部の要素分割

表 2.3-9 に各解析参加者がひずみ評価部分に 使用した要素種別と,ひずみ評価を行ったエル ボ部中央断面の要素分割を示す.エルボ部中央

表 2.3-8 配	管系振動解析	解析参加者の材料特性の近似情報
-----------	--------	-----------------

 Table 2.3-8
 Piping system analysis: Material property approximations of each group.

(a) Bi-linear approximation

	Hardening rule	Young's modulus $(E)$ [GPa]	Yield stress [MPa]	Second inclination of bi- linear model ( <i>E</i> <sub>2</sub> ) [MPa]	$E_2/E$
Group A	Kinematic	203	297.2	927.2	0.005
Gloup II	Temematic	203	291.2	521.2	0.005
Group E	Kinematic	202	350	1700	0.008
Group G (Dynamic)*	Kinematic	203	215	24360	0.120
Group G (Static)*	Kinematic	203	215	812	0.004
Group I	Kinematic	203	286	1280	0.006
Group J	Kinematic	203	289	7.5	0.000
Group N	Kinematic	202	258	2020	0.010

\* In Group G, the bi-linear approximation of the material properties is different between the dynamic analysis and the static analysis.

(b) Multi-linear approximation and others

	Approximation method	Hardening rule	Young's modulus (E) [GPa]	Yield stress [MPa]	Note
Group F	Multi-linear	Combined	2.3	296.652	
Group B	Others	Combined	203	285.3	
Group D	Others	Kinematic	205	280	
Group I	Others	Multi-layer	202.83	268	Modified ASME
Group L	Others	kinematic	202.85	208	method <sup>14)</sup>

表 2.3-9 配管系振動解析 ひずみ評価部分に使用した要素種別とエルボ部中央断面の要素分割

 Table 2.3-9
 Piping system analysis: Element type used at the strain estimation point and the element breakdown at the elbow central section.

	Element	$H_{00}$ (°)	Avial (°)	Thickness		Element	Hoop (°)	Avial (°)	Thickness
	type	1100p()	Axial ()	(layer)		type	1100p()	Аліаі ()	(layer)
Group A	Shell	7.5	3.75	-	Group G	Shell	4.615	3	-
Group B	Shell	9	9	-	Group I	Shell	2.5	2.5	-
Group D	Solid	11.25	1.875	3	Group J	Solid	22.5	15	2
Group E	Shell	5.625	1.875	-	Group L	Shell	10	3	-
Group F	Shell	9	6	-	Group N	Shell	9	3.1	-

断面の要素分割は配管要素解析と同程度の分割 が多かった.

(d) 弾性域の減衰比の設定

すべての解析参加者が振動応答の解析には直 接積分法を用い,弾性域の減衰比には Rayleigh 減衰を用いていた.弾性域の減衰比は,グルー プAでは試験における正弦波掃引試験から同 定された1.06%としていたが,他の9グループ は日本電気協会原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008(以下,「JEAC4601-2008」)<sup>17)</sup>に 基づき0.5%に設定していた.また,設定する 振動数帯域は,試験体の一次固有振動数に合わ せたグループ,入力波の振動数帯域である1.5 ~3 Hzとしたグループ,一次固有振動数から 打ち切り振動数までの帯域としたグループに分 かれていた.

- (2) 解析結果の分析
- (a) 固有值解析

表 2.3-10 に各解析参加者の固有値解析結果を 示す.表には一次固有振動数を対象とした正弦 波掃引試験により得られた試験結果もあわせて 示す.表 2.3-10 に示すように,いずれの解析も 一次固有振動数を精度良く評価していた. (b) 時刻歷応答

配管系振動解析では,エルボ3位置の応答加 速度,エルボ1,2の開閉変位,エルボ1,2の 脇部ひずみについて時刻歴波形の提出を求め た.図2.3-11に,入力加速度700 Galの加振に ついて,実験における計測結果と,グループA から提出されたこれらの解析結果を代表として 示す.

表 2.3-10	配管系振動解析	固有値解析結果
Table 2.3-10	Piping system anal	ysis: Natural frequencies
	by the analysis and	the experiment.

	1st mode	2nd mode	3rd mode
Experiment	2.78	-	-
Group A	2.83	7.34	10.37
Group B	2.83	7.49	10.47
Group D	2.88	7.10	9.49
Group E	2.74	6.69	9.07
Group F	2.77	7.61	10.21
Group G	2.86	7.5	10.7
Group I	2.81	7.03	9.50
Group J	2.84	7.10	9.50
Group L	2.79	7.08	9.49
Group N	2.72	6.32	8.77

(Unit: Hz)

表 2.3-11 配管系振動試験 疲労評価の実施内容 Table 2.3-11 Piping system analysis: Summary of the fatigue analysis.

	Evaluation position	The procedure of the fatigue evaluation	Fatigue curve	Number of the 1850Gal input excitations until the cumulative fatigue damage index is unity.
Group A	Inner surface of Elbow 1	Hoop strain time histories at the evaluation point. Ratchet strain is ignored. Rain flow method.	Fatigue curve proposed by NUPEC <sup>15)</sup>	48*
Group B	Inner surface of Elbow 1	Experimental formula by Asada <sup>13)</sup>	Fatigue curve proposed by NUPEC <sup>15)</sup>	7
Group E	Inner surface of Elbow 1	Hoop strain time histories at the evaluation point. Rain flow method. Multi-axial effect is considered.	Fatigue curve by the modified universal slope method	15
Group N	Inner surface of Elbow 1	Hoop strain time histories at the evaluation point. Rain flow method.	Fatigue curve proposed in a reference <sup>18)</sup>	14

\* Calculated from the cumulative fatigue damage by the single input motion from the analysis reported by the participants.

(c) 強度評価

配管系振動解析では,任意項目として配管 系内の損傷位置の予測と寿命評価を求め,4グ ループより評価結果の提出があった.疲労評価 点の選出やひずみ範囲の抽出方法等は全て解析 参加者の判断に任せた.表2.3-11に疲労評価を 実施した解析グループの評価内容をまとめる. 解析参加者により,図2.2-5に示す波形の最大 加速度レベル1,850 Gal 1回の入力で累積され る疲労損傷度を提出した参加者と,累積疲労損 傷値が1に到達するまでの1,850 Gal の入力回 数で疲労評価結果を報告した参加者に分かれた ため,前者の場合は,損傷値が線形的に累積す ると仮定し,提出された解析レポートより,累 積疲労損傷値が1となる1,850 Galの入力回数 を換算した.試験結果は2.2.2で述べたように, 1,850 Galの入力14回目でエルボ1脇部におい て疲労亀裂が貫通している.表2.3-11に示すと おり,全ての解析参加者が疲労評価点をエルボ 1内面としており,試験で得られた損傷箇所を よく予測していた.一方,き裂貫通までに要す る1,850 Galによる入力は7回~48回となり, 大きくばらつく結果となった.



図 2.3-11 配管系振動解析 入力加速度 700 Gal の加振における時刻歴波形(実験および解析結果(グループ A))

Fig. 2.3-11 Piping system analysis: Time histories at the 700 Gal input excitation (Experimental results and the analysis results of Group A).

(d) ばらつき評価

配管系振動解析の結果を試験結果と比較する にあたり,以下の事前処理を行った.

- i) 出力データ間隔の調整 解析参加者により出力データ間隔が異なった ことから、実験データも含め、全て 0.001 秒 の等間隔データに補問.
- ii) 初期値ゼロ点補正
   時刻歴データの初期10%のデータの平均値を
   算出し、全データよりその平均値を除去。
- iii) ハイパスフィルタ処理

FFT を用いて1Hz以下の成分を除去. 配管系振動試験は配管要素試験と異なりラン ダム波による加振であること,特に弾性域にお いては減衰比が小さいため,試験体の固有振動 数のわずかな違いで応答波形が大きく変化する ことなどから,配管系振動解析では配管要素解 析の分析で行ったような波形形状の直接比較は 難しい.そのため,配管系振動解析では,事前 処理を行った波形データに基づき波形の範囲 (時刻歴中の最大値と最小値の幅.以下,「PP」) および RMS 値を比較することとした. RMS 値 は以下の式(2.3-2)で定義する値とする.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i^2)}$$
 (2.3-2)

ここで, *x<sub>i</sub>*: 試験データまたは解析データのデ ジタル値, *N*: データ個数.

解析結果と試験結果の波形の範囲 (PP) を比較 することで応答の大きさの再現性を, RMS 値を 比較することで波形形状の再現性を検討することでなる. 図 2.3-12 に評価項目のイメージを示す.

表 2.3-12 ~表 2.3-14 に, エルボ 3 位置での応 答加速度(A03X), エルボ1の開閉変形(D01), エルボ1 脇部周方向ひずみ(S043H)の PP および RMS 値の算出結果を示す. また, 図 2.3-13 に 全解析参加者についての実験結果と解析結果の 比較を、図 2.3-14 に材料特性の近似で二直線近 似・移動硬化則を使用したグループに関する実 験結果と解析結果の比較を示す.図 2.3-13、図 2.3-14 では、各図の左列が入力加速度 80 Gal, 中央が入力加速度 700 Gal, 右列が入力加速度 1,850 Gal の結果であり、図中の一点鎖線上が解 析結果と試験結果が一致する点となる. なお, グループ D については解析条件やデータの詳細 が確認できなかったため、表 2.3-12~表 2.3-14 に示した試験結果に対する解析結果の比では, グループDを除いた評価結果も併記した.

表 2.3-14 および図 2.3-13 に示したエルボ脇部 ひずみ範囲の評価結果から,静的解析である配 管要素解析と比較するとばらつきが大きいこと が分かる.これらの評価結果のうち,試験体が やや弾塑性挙動を示す 700 Gal の結果に着目す ると,グループFおよびグループJの値が試験 結果と比較するとやや小さく,非保守側の評価 となっている.これは,グループFについては ひずみ履歴を取得するためエルボ部の詳細解析 モデルを作成した際,エルボに接続する直管部 の長さが短かった影響であると考えられること が解析実施者から報告されている.また,グルー



図 2.3-12 配管系振動解析 ばらつき評価で評価する項目

Fig. 2.3-12 Piping system analysis: Schematic illustrations of the estimated items for the variation evaluation.

プJについては、ソリッド要素を使用した解析 モデルの要素分割において、板厚方向の分割数 が少なかったため適切なひずみが算出されな かったことが要因であることが分かっており、 いずれの解析グループにおいても解析モデル作 成時にこれらの点を留意することで解析結果が 改善する見通しが得られている.グループDを 除いた全解析グループを対象とすると、ひずみ 範囲の変動係数は0.4 程度であった.

配管系振動解析におけるひずみ範囲は全体に ばらつきが大きく,図2.3-13 ではばらつきの分 布に特定の傾向は確認できないが,材料特性の 近似で二直線近似・移動硬化則を使用している グループを抜粋した図2.3-14 ではばらつきは軽 減する傾向にあり,解析手法を統一することで 解析者間のばらつきが軽減できる可能性がある と考えられる.二直線近似・移動硬化則を使用 しているグループを抜粋した場合,ひずみ範囲 の変動係数は0.25 となった.

#### 2.4 第一段階ベンチマーク解析のまとめ

第一段階ベンチマーク解析では、炭素鋼配管を対 象とし、配管要素に対する繰り返し載荷試験と比較 的単純な形状の立体配管系に対する一軸の加振試験 に対するブラインド解析を実施した.それらの結果 より、弾塑性解析結果には降伏応力の設定が大きく 影響する一方、二次勾配の設定や構成則の種別の影 響は小さいことがわかった.また、ブラインド解析 として実施した場合の解析者間のばらつきは、配管 系振動試験のひずみ範囲の変動係数で 0.4 程度であ り、配管要素解析の変動係数と比べるとやや大きい ことが確認された.しかし、材料特性のモデル化に 二直線近似・移動硬化則を使用しているグループを 抜粋した場合、ひずみ範囲の変動係数は 0.25 となり、 解析手法を統一することで解析者間のばらつきが軽 減できる可能性がある見通しが得られた.

	Experimental and analytical results (value) [Gal]					
	800	Gal	700	Gal	1850	OGal
	RMS	РР	RMS	PP	RMS	РР
Experiment	420	2500	1280	8530	2086	11015
Group A	210	1575	1097	6948	1633	7984
Group B	492	3203	1694	9464	2372	11221
Group D	98	603	793	5098		
Group E	329	1822	1703	8999	2347	11465
Group F	391	2098	1249	7007		
Group G	218	1764	1029	5605		
Group I	255	1841	1206	7513	1721	8903
Group J	306	2062	1375	7864	1778	9373
Group L	206	1522	1209	7220	1772	9293
Group N	350	2308	1611	8523	1988	9705
		Ana	alytical results / ]	Experimental res	sults	
	800	Gal	700	Gal	1850	)Gal
	RMS	РР	RMS	RMS	РР	RMS
Group A	0.50	0.63	0.86	0.81	0.78	0.72
Group B	1.17	1.28	1.32	1.11	1.14	1.02
Group D	0.23	0.24	0.62	0.60		
Group E	0.78	0.73	1.33	1.05	1.13	1.04
Group F	0.93	0.84	0.98	0.82		
Group G	0.52	0.71	0.80	0.66		
Group I	0.61	0.74	0.94	0.88	0.83	0.81
Group J	0.73	0.82	1.07	0.92	0.85	0.85
Group L	0.49	0.61	0.94	0.85	0.85	0.84
Group N	0.83	0.92	1.26	1.00	0.95	0.88
Average	0.68	0.75	1.01	0.87	0.93	0.88
Standard deviation (SD)	0.27	0.26	0.23	0.16	0.15	0.11
Coefficient of variation (COV)	0.39	0.35	0.23	0.19	0.16	0.13
Average (without Group D)	0.73	0.81	1.06	0.90		
SD (without Group D)	0.23	0.20	0.20	0.14		
COV (without Group D)	0.31	0.25	0.19	0.15		

**表 2.3-12** 配管系振動解析 試験結果と解析結果の比較(A03X) Table 2.3-12 Piping system analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results (A03X).

	Experimental and analytical results (value) [mm]					
	80Gal		700Gal		1850Gal	
	RMS	РР	RMS	РР	RMS	РР
Experiment	0.62	3.75	2.03	13.63	4.00	28.62
Group A	0.39	2.90	2.13	16.56	3.56	25.51
Group B	0.68	4.43	2.44	17.10	3.69	23.94
Group D	0.19	1.21	1.20	7.47		
Group E	0.55	3.07	2.99	21.21	3.55	27.50
Group F	0.61	3.32	2.15	15.19		
Group G	0.42	3.40	2.17	15.73		
Group I	0.39	2.91	1.95	16.50	3.12	24.63
Group J	0.48	3.29	2.18	15.21	3.25	25.21
Group L	0.30	2.19	1.85	13.52	3.13	22.97
Group N	0.49	3.22	2.41	17.09	3.55	27.50
		Ana	alytical results / ]	Experimental res	sults	
	80Gal		700Gal		1850Gal	
	RMS	РР	RMS	RMS	РР	RMS
Group A	0.62	0.77	1.05	1.21	0.89	0.89
Group B	1.09	1.18	1.20	1.25	0.92	0.84
Group D	0.30	0.32	0.59	0.55		
Group E	0.89	0.82	1.48	1.56	0.89	0.96
Group F	0.99	0.88	1.06	1.11		
Group G	0.68	0.91	1.07	1.15		
Group I	0.63	0.78	0.96	1.21	0.78	0.86
Group J	0.77	0.88	1.07	1.12	0.81	0.88
Group L	0.48	0.58	0.91	0.99	0.78	0.80
Group N	0.78	0.86	1.19	1.25	0.89	0.96
Average	0.72	0.80	1.06	1.14	0.85	0.88
Standard deviation	0.24	0.22	0.23	0.25	0.06	0.06
(SD)	0.21	0.22	0.25	0.23		0.00
Coefficient of variation	0.33	0.28	0.21	0.22	0.07	0.07
(COV)						
Average (without Group D)	0.77	0.85	1.11	1.21		
SD (without Group D)	0.19	0.16	0.17	0.15		
COV (without Group D)	0.25	0.18	0.15	0.13		

表 2.3-13配管系振動解析試験結果と解析結果の比較(D01)Table 2.3-13Piping system analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results (D01).

	Experimental and analytical results (value) [%]					
	80Gal		700Gal		1850Gal	
	RMS	РР	RMS	РР	RMS	PP
Experiment	0.018	0.110	0.065	0.521	0.137	1.083
Group A	0.013	0.101	0.089	0.906	0.159	1.295
Group B	0.019	0.151	0.078	0.787	0.132	1.159
Group D	0.004	0.022	0.025	0.153		
Group E	0.014	0.080	0.082	0.679	0.168	1.356
Group F	0.010	0.056	0.039	0.332		
Group G	0.015	0.123	0.078	0.567		
Group I	0.013	0.100	0.078	0.824	0.137	1.264
Group J	0.024	0.161	0.038	0.351	0.048	0.426
Group L	0.008	0.057	0.046	0.381	0.088	0.688
Group N	0.018	0.119	0.122	1.081	0.214	1.713
		Ana	alytical results / ]	Experimental res	ults	
	80Gal		700Gal		1850Gal	
	RMS	РР	RMS	RMS	PP	RMS
Group A	0.73	0.91	1.37	1.74	1.16	1.20
Group B	1.02	1.37	1.20	1.51	0.96	1.07
Group D	0.19	0.20	0.38	0.29		
Group E	0.79	0.73	1.27	1.30	1.22	1.25
Group F	0.57	0.51	0.60	0.64		
Group G	0.83	1.12	1.21	1.09		
Group I	0.73	0.91	1.20	1.58	1.00	1.17
Group J	1.28	1.46	0.59	0.67	0.35	0.39
Group L	0.42	0.51	0.71	0.73	0.64	0.63
Group N	0.97	1.08	1.88	2.07	1.55	1.58
Average	0.75	0.88	1.11	1.26	0.98	1.04
Standard deviation	0.21	0.40	0.42	0.51	0.20	0.40
(SD)	0.31	0.40	0.42	0.51	0.39	0.40
Coefficient of variation	0.41	0.45	0.29	0.41	0.40	0.29
(COV)	0.41	0.45	0.38	0.41	0.40	0.38
Average	0.81	0.96	1.11	1.26		
(without Group D)						
SD (without Group D)	0.25	0.34	0.42	0.51		
COV (without Group D)	0.31	0.35	0.38	0.41		

表 2.3-14配管系振動解析試験結果と解析結果の比較(S043H)Table 2.3-14Piping system analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results (S043H).



図 2.3-13 配管系振動解析 実験結果と解析結果の比較(全解析グループ) Fig. 2.3-13 Piping system analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results (all participants).



図 2.3-14 配管系振動解析 実験結果と解析結果の比較(二直線近似・移動硬化則を使用したグループ) Fig. 2.3-14 Piping system analysis: Comparison of the experimental results and the analytical results (participants who use the bi-linear approximation and the kinematic hardening rule as the material properties).

3. パラメトリック解析

# 3.1 目的

第2章で述べた第一段階ベンチマーク解析から得 られた知見を踏まえ,解析法ガイドラインの原案を まとめた<sup>19)</sup>.解析法ガイドラインでは,弾塑性解 析の実施にあたり,炭素鋼配管の材料特性を以下の ようにモデル化することを推奨した.

- 真応力-真ひずみの関係は弾性域と塑性域の2 直線で近似する.
- 弾性域には、日本機械学会発電用原子力設備規 格材料規格(以下、「材料規格」)で定められた縦 弾性係数を使用する.
- 降伏応力は材料規格で規定される設計降伏点の 1.2 倍の値を用いる.
- ・ 塑性域には弾性域の縦弾性係数の 1/100 の勾配 を使用する.

(注:これらは解析法ガイドラインで定めた材料 特性の設定方法の一部抜粋.)

解析法ガイドラインで定めた配管系弾塑性応答挙 動の詳細解析手法について,以下の点を評価・検討 するため,第一段階ベンチマーク解析参加者のうち の有志によるパラメトリック解析を実施した.

- 解析法ガイドラインに準じた解析と、ブライン ド解析として実施した第一段階ベンチマーク解 析との解析者間のばらつきの比較
- 解析法ガイドラインに準じた解析による,保守 性の確認
- 要素分割の粗密や材料特性のモデル化,減衰の 設定などが解析結果に与える影響

解析参加者は4グループで、以下、グループI~ グループIVの識別番号で区別する.

# 3.2 配管要素試験に対するパラメトリック解析3.2.1 検討内容

配管要素試験のパラメトリック解析では,二直線 近似時における降伏応力,材料特性の二次勾配,要 素の粗密の影響を検討した.解析条件を以下に示す. (a)解析対象

第一段階ベンチマーク解析の配管要素試験

- (b) 解析モデル パラメトリック解析参加者が第一段階ベンチ マーク解析で使用した配管要素解析モデル
- (c)材料特性の近似 二直線近似,移動硬化則とする.降伏応力,縦 弾性係数,二次勾配は次項の解析条件に示すと おり.
- (d) 解析条件

二直線近似の降伏応力と二次勾配をパラメータ とした解析を実施する.解析対象とする入力変 位振幅は±30 mmを基本とし,一部の解析では ±70 mmも対象とした.解析条件は**表 3.2-1**の組 み合わせとした.解析④は要素分割の影響を検 討した解析ケースである.解析④の材料特性 の近似は,解析法ガイドライン準拠条件(降伏 応力 1.2 *S<sub>y</sub>*,二次勾配 *E*/100)とした. なお,設計降伏点(*S<sub>y</sub>*)および縦弾性係数(*E*)

は、日本機械学会発電用原子力設備規格材料 規格(2014年追補)(以下,「材料規格2014追補

Second inclination Yield stress\*1 Analytical condition Input displacement Note of bi-linear model\*2 РА-Е #01-1 *E*/100  $1.2S_{v}$  $\pm 30 \text{ mm}$ Compliant condition with the PA-E #01-2  $1.2S_v$ *E*/100 ±70 mm analytical guideline PA-E #02-1  $1.0S_{v}$ E/100  $\pm 30 \text{ mm}$ РА-Е #02-2  $1.5S_y$ *E*/100  $\pm 30 \text{ mm}$ РА-Е #03-1  $1.2S_{v}$ *E*/30  $\pm 30 \text{ mm}$ РА-Е #03-2  $1.2S_v$ E/300 ±30 mm PA-E #04 *E*/100  $\pm 30 \text{ mm}$ Coarse element mesh  $1.2S_{v}$ 

**表 3.2-1** 配管要素試験に対するパラメトリック解析 解析条件 **Table 3.2-1** Parametric analysis on the pipe element test: analytical condition.

\*1:  $S_y=245[N/mm^2]$ ,  $1.2S_y=294[N/mm^2]$ ,  $1.5S_y=367.5[N/mm^2]$  / Yield stress by the material test =  $\sim 360[N/mm^2]$ 

\*2: *E*=203,000[N/mm<sup>2</sup>], *E*/100=2,030[N/mm<sup>2</sup>], *E*/30=6,766.7[N/mm<sup>2</sup>], *E*/300=676.67[N/mm<sup>2</sup>]

版」)<sup>20)</sup>に基づき,

# $S_y = 245 \text{ N/mm}^2$

# *E*=203,000 N/mm<sup>2</sup>

とする.解析に使用した真応力-真ひずみ線図は図 3.2-1 のようになる.

(e) 要素分割

パラメトリック解析では、パラメトリック解析 参加者が第一段階ベンチマーク解析で使用した 配管要素解析モデルを基本としたが、その解析 モデルの周方向および軸方向の要素分割の粗さ を2倍(分割数を1/2)とした条件も実施する.

表 3.2-2 にパラメトリック解析参加グループと各 グループの基本情報をまとめる. 解析参加グループ のうち, グループ IV は, 同一解析者が使用する要 素を変えた解析結果を提出したため, 以降の分析で は区別して示す.

### 3.2.2 解析結果の分析

表 3.2-3 ~表 3.2-5 に、荷重の範囲とエルボ脇部内 面周方向のひずみ範囲について、ベンチマーク解析 時とパラメトリック解析時の結果の数値、試験結果 に対する解析結果の比、および解析者間のばらつき を示す.また、各解析条件における荷重変形関係を 図 3.2-2 ~図 3.2-5 に、エルボ脇部内面周方向ひずみ 履歴を図 3.2-6 ~図 3.2-9 に示す.

# (1) ガイドライン準拠条件による解析結果

## (解析①-1,解析①-2)

本ベンチマーク解析に使用した材料について,エ ルボ部から切り出した試験片を用いて実施した材料 試験結果より得られた降伏応力は約360[N/mm<sup>2</sup>]で あった.試験結果と解析結果を比較すると,解析法 ガイドライン準拠条件では降伏応力を材料試験結果 で得られた実力値よりも低く設定しているため,塑





	FEM Code	Element type	Element mesh (basic)			Element mesh (PA-E_#04)		
			Ноор	Axial	Thickness	Ноор	Axial	Thickness
					(Meshes)			(Meshes)
Group I	ABAQUS	Shell	7.5°	3.75°	-	15°	7.5°	-
Group II	ANSYS	Solid	7.5°	2.25°	3	15°	7.5°	3
Group III	FINAS/STAR	Shell	10°	3°	-	20°	7.5°	-
Group IV_solid2	ANSYS	Solid	7.5°	3.5°	1	15°	7.5°	1
Group IV_shell2	ANSYS	Shell	7.5°	3.5°	-	15°	7.5°	-

表 3.2-2	配管要素試験のパラメトリック解析参加グループと各グループの解析基本情報
<b>Table 3.2-2</b>	Participants in the parametric analysis of the pipe element test and element mesh information used in the FEM model

性変形が生じやすくなる影響で荷重の範囲は試験結 果よりも小さい値となった.一方,ひずみ範囲につ いては,全般に試験結果よりも解析法ガイドライン 準拠条件による解析結果の方が大きく評価してい た.グループ-IV\_solid2 については,ひずみ範囲を 試験結果よりも小さく評価しているが,これはモデ ル化においてソリッド要素を使用し板厚方向分割を 1層としている影響であると考えられる.表3.2-3 および表3.2-4の解析結果に示すように,パラメト リック解析(解析①-1)とベンチマーク解析時の結果 を比較すると,解析に用いる材料特性の設定方法を 揃えることで解析者間の解析結果のばらつきは小さ くなっていることがわかる.

# (2) 降伏応力の設定を変動させた場合の解析結果

(解析②-1,解析②-2)

降伏応力を 1.5 S<sub>y</sub> (367.5[N/mm<sup>2</sup>]) とした解析② -2 は、実際の試験体の降伏応力に近い値であり、表 3.2-3 に示したように、荷重変形関係は試験結果を よく再現している.一方、解析② -1 は、降伏応力 を規格値としているため、降伏応力を 1.2 S<sub>y</sub> とした 解析① -1 よりも荷重の範囲は小さく評価されてい る.解析者間のばらつきは、解析② -1、解析② -2 とも解析① -1 と同程度であった.エルボ脇部内面 周方向ひずみについては、表 3.2-4 に示したように、 グループ -IV\_solid2 を除き、解析② -1 では、解析① -1 と比較し試験結果のひずみ範囲よりもさらにやや 大きめに評価していた.グループ -IV\_solid2 を 除いて評価すると解析② -1、解析② -2 とも、解析 者間のばらつきは小さい.

# (3) 二次勾配の設定を変動させた場合の解析結果 (解析③-1,解析③-2)

表 3.2-3,表 3.2-4 に示すように,いずれの解析グ ループにおいても二次勾配の設定を変動させた場合 は荷重変形関係,ひずみ履歴ともに解析①-1 との差 は小さく,本パラメトリック解析で設定した変動の 範囲 (*E*/30 ~ *E*/300)では,降伏応力の設定と比較し 二次勾配の設定が解析結果に与える影響は小さい.

# (4) 要素分割を変動させた場合の解析結果

# (解析①-1,解析④)

要素分割をベンチマーク解析実施時よりも2倍の 粗さにしても、ほとんどの解析結果はほぼ変わらな かったが、グループ IV-solid2 では、ベンチマーク 解析実施時よりも粗い分割とした場合、荷重変形関 係、ひずみ履歴ともに大きく変動する結果となった. これは、本項(1)で述べたように、板厚方向の分割 を1としている影響があるものと考えられる.本検 討より、ソリッド要素を使用し板厚方向の分割が少 ない場合を除き、周方向20°ピッチ、軸方向7.5°ピッ チ程度までの分割においては、おおむね要素分割の 影響は小さいと考えられる.

図 3.2-10 に,入力変位 ±30 mm における試験結果, ベンチマーク解析結果,およびパラメトリック解析 の各条件におけるエルボ脇部内面ひずみの残留値を 解析グループごとに示す.図 3.2-10 から,試験では 残留ひずみがほとんど生じていないものの,解析結 果では大きな残留ひずみが表れていること,また, 全体として降伏応力が低い場合(解析②-2),また二 次勾配が小さい場合(解析③-2)に残留ひずみが大き くなる傾向があるが,その値は解析グループ・解析 条件によって大きくばらつくことがわかる.
			Experimental an	nd analytical resu	ults (value) [kN]		
	$BA^{*1}$	PA-E_#01-1	PA-E_#02-1	PA-E_#02-2	PA-E_#03-1	PA-E_#03-2	PA-E_#04
Exp.	191.26	191.26	191.26	191.26	191.26	191.26	191.26
Group I	191.51	174.68	156.09	189.95	176.37	174.19	174.57
Group II	193.03	172.79	153.25	191.38	174.89	171.98	172.87
Group III	178.23	185.43	166.95	201.47	186.99	184.98	185.19
Group IV_solid2	217.57	178.44	158.54	194.44	179.96	178.13	223.75
Group IV_shell2	-	184.95	166.07	200.29	186.91	184.31	184.47
			Analytical	results/Experime	ental results		
	$BA^{*1}$	PA-E_#01-1	PA-E_#02-1	PA-E_#02-2	PA-E_#03-1	PA-E_#03-2	PA-E_#04
Group I	1.00	0.91	0.82	0.99	0.92	0.91	0.91
Group II	1.01	0.90	0.80	1.00	0.91	0.90	0.90
Group III	0.93	0.97	0.87	1.05	0.98	0.97	0.97
Group IV_solid2	1.14	0.93	0.83	1.02	0.94	0.93	1.17
Group IV_shell2	-	0.97	0.87	1.05	0.98	0.96	0.96
Average	1.00	0.94	0.84	1.02	0.95	0.93	0.98
$\mathrm{SD}^{*2}$	0.09	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.11
COV <sup>*3</sup>	0.09	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.11
		Evaluation	results in PA-E_	#04 without Gro	up IV_solid2		
					Ave	rage	0.94
					S	D	0.03
					CC	)V	0.04

表 3.2-3 入力変位 ±30mm の解析結果とばらつき評価(荷重の範囲) Table 3.2-3 Load ranges at the ±30 mm input displacement and their variations.

\*1 BA: Benchmark analysis

\*2 SD: Standard Deviation

			Experimental a	nd analytical res	ults (value) [%]		
	$BA^{*1}$	PA-E_#01-1	PA-E_#02-1	PA-E_#02-2	PA-E_#03-1	РА-Е_#03-2	PA-E_#04
Exp.	0.963	0.963	0.963	0.963	0.963	0.963	0.963
Group I	0.988	1.169	1.233	0.969	1.092	1.331	1.036
Group II	1.026	1.177	1.221	1.006	1.124	1.182	1.153
Group III	0.978	1.190	1.337	1.019	1.130	1.217	1.153
Group IV_solid2	0.698	0.578	0.576	0.521	0.568	0.579	0.410
Group IV_shell2	-	1.113	1.163	0.948	1.029	1.300	1.019
			Analytical	results/Experime	ental results		
	$BA^{*1}$	PA-E_#01-1	PA-E_#02-1	PA-E_#02-2	PA-E_#03-1	PA-E_#03-2	PA-E_#04
Group I	1.03	1.21	1.28	1.01	1.13	1.38	1.08
Group II	1.07	1.22	1.27	1.04	1.17	1.23	1.20
Group III	1.02	1.24	1.39	1.06	1.17	1.26	1.20
Group IV_solid2	0.72	0.60	0.60	0.54	0.59	0.60	0.43
Group IV_shell2	-	1.15	1.21	0.98	1.07	1.35	1.06
Average	0.92	1.08	1.15	0.93	1.03	1.16	0.99
$SD^{*2}$	0.17	0.27	0.31	0.22	0.25	0.32	0.32
$COV^{*3}$	0.18	0.25	0.27	0.23	0.24	0.28	0.33
		Eval	uation results wi	thout Group IV_	solid2		
Average	0.96	1.22	1.31	1.04	1.16	1.29	1.16
SD	0.14	0.04	0.08	0.03	0.05	0.07	0.08
COV	0.15	0.03	0.06	0.03	0.04	0.06	0.07

表 3.2-4 入力変位 ±30 mm の解析結果とばらつき評価(ひずみ範囲) Table 3.2-4 Strain ranges at the ±30 mm input displacement and their variations.

\*1 BA: Benchmark analysis

\*2 SD: Standard Deviation

		Experimental and analy	ytical results (value)	
	Load rang	ge [kN]	Strain ra	nge [%]
	$BA^{*1}$	PA-E_#01-2	BA <sup>*1</sup>	PA-E_#01-2
Exp.	261.27	261.27	2.745	2.745
Group I	263.08	224.92	2.607	3.185
Group II	258.86	215.36	3.093	3.000
Group III	272.99	254.13	2.848	3.274
Group IV_solid2	-	230.04	-	1.573
Group IV_shell2	-	242.52	-	2.593
		Analytical results/Ex	perimental results	
	Load ra	ange	Strain	range
	$BA^{*1}$	PA-E_#01-2	BA <sup>*1</sup>	PA-E_#01-2
Group I	1.01	0.86	0.9498	1.1602
Group II	0.99	0.82	1.1268	1.0929
Group III	1.04	0.97	1.0374	1.1928
Group IV_solid2	-	0.88	-	0.5732
Group IV_shell2	-	0.93	-	0.9446
Average	1.01	0.89	1.04	0.99
$SD^{*2}$	0.03	0.06	0.09	0.25
COV*3	0.03	0.07	0.09	0.26
	Evaluation	results without Group IV	/_solid2	
			Average	1.10
			SD	0.11
			COV	0.10

表 3.2-5 入力変位 ±70 mm の解析結果とばらつき評価 Table 3.2-5 Analytical results at the ±70 mm input displacement and their variations.

\*1 BA: Benchmark analysis

\*2 SD: Standard Deviation



図 3.2-2 配管要素試験のパラメトリック解析 解析法ガイドライン推奨値による解析結果(荷重変形関係) Fig. 3.2-2 Parametric analysis on the pipe element test: Analytical results according to the analytical guideline (Load-deformation relationship).



図 3.2-3 配管要素試験のパラメトリック解析 降伏応力の設定を変動させた場合の解析結果(荷重変形関係) Fig. 3.2-3 Parametric analysis on the pipe element test: Analytical results when varying the yield stress (Loaddeformation relationship).



図 3.2-4 配管要素試験のパラメトリック解析 二次勾配の設定を変動させた場合の解析結果(荷重変形関係) Fig. 3.2-4 Parametric analysis on the pipe element test: Analytical results when varying the second inclination of bilinear model (Load-deformation relationship).



図 3.2-5 配管要素試験のパラメトリック解析 要素分割を粗くした場合の解析結果(荷重変形関係) Fig. 3.2-5 Parametric analysis on the pipe element test: Analytical results with coarse element mesh (Loaddeformation relationship).



図 3.2-6 配管要素試験のパラメトリック解析 解析法ガイドライン推奨値による解析結果(ひずみ履歴) Fig. 3.2-6 Parametric analysis on the pipe element test: Analytical results according to the analytical guideline (Time history of the strain).



図 3.2-7 配管要素試験のパラメトリック解析 降伏応力の設定を変動させた場合の解析結果(ひずみ履歴) Fig. 3.2-7 Parametric analysis on the pipe element test: Analytical results when varying the yield stress (Time history of the strain).







- 図 3.2-9 配管要素試験のパラメトリック解析 要素分割を粗くした場合の解析結果(ひずみ履歴)
- Fig. 3.2-9 Parametric analysis on the pipe element test: Analytical results with coarse element mesh (Time history of the strain).



図 3.2-10 配管要素試験のパラメトリック解析 エルボ脇部内面周方向ひずみの残留値 Fig. 3.2-10 Parametric analysis on the pipe element test: Residual strain of the hoop strain at the inner surface of the elbow flank.

#### 3.3 配管系振動試験に対するパラメトリック解析

## 3.3.1 検討内容

配管系振動試験のパラメトリック解析では,二直 線近似時における降伏応力,材料特性の二次勾配の 影響を検討した.解析条件を以下に示す.

(a) 解析対象

第一段階ベンチマーク解析の配管系振動試験

(b) 解析モデル

パラメトリック解析参加者が第一段階ベンチ マーク解析で使用した配管系振動解析用モデル を基本とする.ただし,解析所要時間等を考慮 し,より簡易な解析モデルにするなどの変更を 行っても良い.

(c) 材料特性の近似 二直線近似,移動硬化則とする.降伏応力,縦 弾性係数,二次勾配は次項の解析条件に示すと おり.

- (d) 解析条件
  - i) 材料特性の近似と解析を実施する入力加速度 二直線近似の降伏応力と二次勾配をパラ メータとした解析を実施する.解析対象とす る入力加速度は700 Galを基本とし,一部の 解析では1,850 Galも対象とした.解析条件 は表3.3-1の組み合わせとした.なお,設計 降伏点(S<sub>y</sub>)および縦弾性係数(E)は,材料規格 2014 追補版<sup>20)</sup>に基づき,

# $S_v = 215 \text{ N/mm}^2$

# *E*=203,000 N/mm<sup>2</sup>

とする.解析に使用した真応力-真ひずみ線 図を図 3.3-1 に示す.

**表 3.3-1** 配管系振動試験に対するパラメトリック解析 解析条件 **Table 3.3-1** Parametric analysis on the piping system test: analytical condition.

Analytical condition	Yield stress <sup>*1</sup>	Second inclination of bi-linear model *2	Input acceleration	Note
PA-S_#01-1	$1.2S_y$	<i>E</i> /100	700Gal	Compliant condition with the
PA-S_#01-2	$1.2S_y$	<i>E</i> /100	1850Gal	analytical guideline
PA-S_#02-1	$1.0S_y$	<i>E</i> /100	700Gal	
PA-S_#02-2	$1.5S_y$	<i>E</i> /100	700Gal	
PA-S_#03-1	$1.2S_y$	<i>E</i> /30	700Gal	
PA-S_#03-2	$1.2S_y$	<i>E</i> /300	700Gal	

\*1:  $S_y=215[N/mm^2]$ ,  $1.2S_y=258[N/mm^2]$ ,  $1.5S_y=322.5[N/mm^2]$  / Yield stress by the material test =  $\sim 285[N/mm^2]$ 

\*2: *E*=203,000[N/mm<sup>2</sup>], *E*/100=2,030[N/mm<sup>2</sup>], *E*/30=6,766.7[N/mm<sup>2</sup>], *E*/300=676.67[N/mm<sup>2</sup>]





Fig. 3.3-1 True stress- true strain relationship used in the parametric analysis of the pipe element test.

- ii) 解析の共通条件
  - a) Rayleigh 減衰
     減衰比は, JEAC4601の規定に準じ, 0.5%
     とする. 下限振動数は試験体の一次固有振

動数 (2.78 Hz) の 90% である 2.50 Hz, 上限 振動数は打ち切り振動数として 20 Hz とす る. 従って, Rayleigh 減衰の係数 *α*, *β* は 以下の通り.

*α*=0.139626

 $\beta = 7.0736 \times 10^{-5}$ 

b)解析に用いる入力波のデータ範囲

ベンチマーク解析で提供している入力波 データ(A00X)のうち、以下の時間範囲の データを使用する.

700 Gal : 5.5 sec  $\sim$  66.5 sec

1850 Gal : 6.0 sec  $\sim$  67.0 sec

表 3.3-2 に配管系振動試験に対するパラメトリック解析参加グループと各グループの基本情報をまとめる. なお,解析参加グループの識別名は配管要素 試験のパラメトリック解析と共通である.

# 3.3.2 解析結果の分析

配管系振動試験に対するパラメトリック解析で は、ベンチマーク解析時と同様、提出された解析結 果にゼロ点調整および1Hzのハイパスフィルタ処 理を行い、波形の範囲(PP)とRMS値を比較した. 表 3.3-3 ~表 3.3-6に、エルボ3位置における応答加 速度(A03X)、エルボ1開閉変位(D01)、エルボ1脇 部周方向ひずみ(S043H)について、ベンチマーク解 析時とパラメトリック解析時の結果の数値、試験結 果に対する解析結果の比、および解析者間のばらつ きを示す.

# (1) ガイドライン準拠条件による解析結果

#### (解析①-1,解析①-2)

解析①-1の結果から,入力加速度700 Gal に対

する解析では、試験結果に対する解析結果の比は A03X, D01, S043H のいずれもおおむね1以上と なっており、解析法ガイドラインに準拠した解析に より保守的な評価がなされていることが分かる. 一 方,解析①-2の結果より,入力加速度1,850 Gal に 対する解析では、A03X、D01は1よりやや小さく、 S043Hについては、おおむね1以上の解析結果が多 いものの、解析①-1の結果と比較すると試験結果 に対する解析結果の比は小さくなる傾向があった. これは,配管系振動解析において,弾塑性応答の程 度が大きくなるに伴い履歴減衰が顕著となり、配管 系全体の応答が抑制された結果と考えられる. ベン チマーク解析時とパラメトリック解析時のばらつき を比較すると、パラメトリック解析の変動係数が小 さくなっており,解析に用いる材料特性や減衰比の 設定を揃えることで解析者間のばらつきを小さくで きることがわかる.

# (2) 降伏応力の設定を変動させた場合の解析結果 (解析② -1,解析② -2)

解析①-1,解析②-1,解析②-2の結果から,降 伏応力を低く設定すると応答加速度,開閉変形,ひ ずみのいずれにおいても全般に解析結果は小さく, 降伏応力を高く設定すると大きくなる傾向がある. これは,降伏応力を低く設定した場合,降伏応力を 高く設定した場合と比較し,同一地震外力下では配 管系が早期に塑性化するため履歴減衰の影響により 応答が抑制されるためであると考えられる.変動 係数は最大で0.2程度であり(解析②-2,ひずみの RMS),解析者間のばらつきはベンチマーク解析時 と比べて軽減していることが確認できる.

なお,3.2.2 で述べたように,配管要素解析の場合, 設定する降伏応力が低い場合ひずみ範囲は大きく, 降伏応力が高い場合ひずみ範囲は小さくなる傾向が あった.配管系振動解析で確認された傾向は配管要

表 3.3-2	配管系振動試験のパラメトリック解析参加グループと各グループの解析基本情報

	Table 3.3-2	Participators in the j	parametric analysis of	the piping system	n test and element m	esh information used i	n the FEM model.
Е							

	EEM Codo	Modeling method of the	Ele	ement type	Eleme	ent mesh at th	ne elbow
	FEM Code	piping system model	Elbow	Other parts	Ноор	Axial	Thickness
Group I	ABAQUS	Hybrid	Shell	Beam	7.5°	3.75°	-
Group III	FINAS/STAR	Full	Shell	Shell	10°	3°	-
Group IV	ANSYS	Full	Solid	Solid	7.5°	3.5°	4 <sup>*1</sup>

\*1 The element mesh is modified from the condition at the benchmark analysis

素解析の場合と逆となっており,降伏応力を低く設 定することが必ずしもひずみ範囲を大きく評価する ことにはならないことに注意が必要である.

# (3) 二次勾配の設定を変動させた場合の解析結果

(解析③-1,解析③-2)

解析①-1,解析③-1,解析③-2の結果を比較す ると、A03X および D01 ではこれらの解析結果の値 はほぼ同程度であることが確認できる.図3.3-2 に 各解析グループの A03X の時刻歴波形を示すが、こ れらの図から、波形形状も含めて3種の解析で得ら れた結果はほぼ一致しており、本パラメトリック解 析で設定した変動の範囲 (E/30 ~ E/300)では、二次 勾配の設定が応答加速度や開閉変形のような配管系 の巨視的挙動に与える影響は小さいと考えられる. S043H については二次勾配の設定が小さいと(解析 ③-2)やや大きくなる傾向があった.

# (4) 同一解析者による解析結果の比較

配管系振動試験に対するパラメトリック解析で, 各パラメータの影響を比較するため、表 3.3-7 に同 一解析者によるパラメトリック解析の各条件に対す る解析結果をまとめた. 表には A03X, D01, S043H のそれぞれについて、試験結果に対する解析結果の 比を示した. (2), (3) で述べたとおり, 解析①-1 と比較し,降伏応力を低く設定すると(解析2-1)応 答値は全般に低下する傾向がある. また, 二次勾配 の設定は応答加速度や開閉変位にはほとんど影響が ないが、ひずみについては二次勾配の設定が小さい と(解析③-2)やや大きくなる傾向がある.しかし、 パラメータの変動量に対する影響程度を考慮する と、降伏応力の変動量(1.2 S, に対し 1.0 S, ~ 1.5 S,) の影響と比較し、二次勾配の変動量(E/100 に対し E/30~E/300)の影響は小さく,配管系振動解析に おいてもひずみを含めた応答評価を適切に行うには 降伏応力の設定が重要であると考えられる.

図 3.3-3 に,入力加速度 700 Gal における試験結果, ベンチマーク解析結果,およびパラメトリック解析 の各条件におけるエルボ脇部内面ひずみの残留値を 解析グループごとに示す.図 3.3-3 から,配管要素 試験のパラメトリック解析と同様,解析結果では残 留ひずみを大きく評価する傾向があること,また, その値は解析グループ・解析条件によって大きくば らつくことが確認できる.

#### 3.4 パラメトリック解析のまとめ

パラメトリック解析では,第一段階ベンチマーク 解析と同じ配管要素試験および配管系振動試験を対 象に,解析法ガイドライン準拠条件による解析の精 度,降伏応力,二次勾配,要素分割の設定等の影響 を調査した.その結果,解析法ガイドラインに従っ た解析で,ひずみ範囲は試験結果と比較しおおむね 大きく算出する傾向が確認された.また,解析者間 のばらつきはベンチマーク解析時よりも小さくなる 傾向が確認された.

パラメトリック解析の結果,ベンチマーク解析時 と同様,降伏応力が弾塑性挙動に与える影響は大き く,二次勾配の影響は小さい傾向が確認された.ま た,二次勾配の設定は,本パラメトリック解析で検 討した範囲では配管系の巨視的挙動(応答加速度お よびエルボ開閉変形)に与える影響は非常に小さい こと,ひずみ挙動についても,降伏応力の設定と比 較し二次勾配の設定の影響は小さいことがわかっ た.

	700 G
エルボ3位置応答加速度)	ation at Elbow 3 (A03X) at the $7$
いつき評価(A03X,	he resnonse acceler:
対する解析結果とばら	time history (PP) of t
入力加速度 700 Gal に5	RMS and the range of th
表 3.3-3	Table 3.3-3

		#03-2	ΡP		8070.0	8738.7	9608.8		#03-2	ЪР	0.95	1.02	1.13	1.03	0.09	0.09
their variation		PA-S_	RMS		1477.3	1522.5	1779.4		PA-S_	RMS	1.15	1.19	1.39	1.24	0.13	0.10
eleration and 1		#03-1	ЪР		8340.7	8970.1	9741.4		#03-1	ЪР	0.98	1.05	1.14	1.06	0.08	0.08
) Gal input acc		PA-S_	RMS		1490.2	1537.9	1825.4		PA-S_	RMS	1.16	1.20	1.43	1.26	0.14	0.11
3X) at the 700	alue) [Gal]	#02-2	ЪР		9722.8	10269.4	11410.8	esults	#02-2	PP	1.14	1.20	1.34	1.23	0.10	0.08
t Elbow 3 (A0	ical results (va	PA-S_	RMS		1683.7	1706.4	2175.7	xperimental re	PA-S_	RMS	1.32	1.33	1.70	1.45	0.22	0.15
acceleration a	tal and analyt	#02-1	ΡΡ		6932.4	7621.8	8500.7	tical results/E	#02-1	PP	0.81	0.89	1.00	0.90	0.09	0.10
f the response	Experimen	PA-S_	RMS		1336.4	1396.7	1551.9	Analy	PA-S_	RMS	1.04	1.09	1.21	1.12	0.09	0.08
history (PP) of		#01-1	ЪР		8140.8	8805.0	9636.5		#01-1	PP	0.95	1.03	1.13	1.04	0.09	0.08
ge of the time		PA-S_	RMS		1479.9	1526.7	1793.3		PA-S_	RMS	1.16	1.19	1.40	1.25	0.13	0.11
S and the rang		*1	ЪР	8530.4	6947.9	7219.5	7863.8		×1	ЪР	0.81	0.85	0.92	0.86	0.06	0.06
ble 3.3-3 RM		BA	RMS	1279.9	1097.0	1209.2	1375.3		BA	RMS	0.86	0.94	1.07	0.96	0.11	0.11
Та				Exp.	Group I	Group III	Group IV				Group I	Group III	Group IV	Average	$\mathrm{SD}^{*2}$	$COV^{*3}$

- 45 -

\*1 BA: Benchmark analysis

\*2 SD: Standard Deviation

	<del>.</del>
エルボ1開閉変形)	r disulacement of Elbow
度 700 Gal に対する解析結果とばらつき評価(D01, ;	the range of the time history (DD) of the mening-closing
入力加速	PMC and
.3-4	033.4

表 3 Table	<b>3.3-4</b> 入力力 3.3-4 RMS :	II速度 700 Ga and the range (	ul に対する解 <sup>)</sup> of the time his	忻結果とばら tory (PP) of th	つき評価(D0 s opening-clos	1, エルボ1  sing displacerr	開閉変形) 1ent of Elbow	1 (D01) at the	700 Gal input	acceleration a	nd their variati	ons.
					Experimen	tal and analyt	ical results (v:	alue) [mm]				
	B/	4*1	PA-S_	#01-1	PA-S_	#02-1	PA-S_	_#02-2	_PA-S_	#03-1	PA-S_#	±03-2
	RMS	ЪР	RMS	ЪР	RMS	ЬР	RMS	ЪР	RMS	ΡΡ	RMS	ЪР
Exp.	2.027	13.632						/				
Group I	2.129	16.562	2.289	16.472	2.115	15.014	2.553	18.433	2.306	16.555	2.282	16.430
Group III	1.850	13.516	2.329	18.238	2.174	17.074	2.553	18.908	2.350	18.269	2.320	18.217
Group IV	2.176	15.208	2.284	16.404	2.030	15.396	2.667	17.439	2.327	16.379	2.264	16.418
					Analy	/tical results/E	3xperimental r	esults				
	B/	4*1	PA-S_	#01-1	PA-S_	#02-1	PA-S_	#02-2	PA-S_	#03-1	PA-S_#	£03-2
	RMS	ЪР	RMS	ЬР	RMS	ЪР	RMS	ЪР	RMS	РР	RMS	ЪР
Group I	1.05	1.21	1.13	1.21	1.04	1.10	1.26	1.35	1.14	1.21	1.13	1.21
Group III	0.91	0.99	1.15	1.34	1.07	1.25	1.26	1.39	1.16	1.34	1.14	1.34
Group IV	1.07	1.12	1.13	1.20	1.00	1.13	1.32	1.28	1.15	1.20	1.12	1.20
Average	1.01	1.11	1.13	1.25	1.04	1.16	1.28	1.34	1.15	1.25	1.13	1.25
$\mathrm{SD}^{*2}$	0.09	0.11	0.01	0.08	0.04	0.08	0.03	0.05	0.01	0.08	0.01	0.08
COV*3	0.09	0.10	0.01	0.06	0.03	0.07	0.03	0.04	0.01	0.06	0.01	0.06
*1 BA· Bench	imark analysis	U										

# 防災科学技術研究所研究資料 第429号 2019年3月

\*3 COV: Coefficient of variation \*2 SD: Standard Deviation

-5 RM	S and the ran							-			
				Experime	ntal and analy	tical results (v	alue) [%]				
[*]		PA-S_	#01-1	PA-S_	#02-1	PA-S_	#02-2	PA-S_	_#03-1	PA-S_	#03-2
Р	Ь	RMS	dd	RMS	dd	RMS	dd	RMS	dd	RMS	ЪР
0.5	211										
6.0	056	0.0980	0.8835	0.0922	0622.0	0.1070	0.9868	0.0959	0.7959	0.1028	0.9711
0.3	806	0.0678	0.6742	0.0648	0.6341	0.0716	0.6748	0.0680	0.6319	0.0676	0.7009
0.35	515	0.0965	0.8453	0.0873	0.7671	0.1064	0.8449	0.0969	0.7970	0.0963	0.8609

	$\sim$
エルボ1脇部周方向ひずみ)	the flank of Elbow 1 (S043H) at the
ばらつき評価(S043H,	of the hoon strain at the
'00 Gal に対する解析結果と(	range of the time history (PP)
入力加速度7	RMS and the I
表 3.3-5	Table 3.3-5

0.21 0.19 0.260.600.57 \*1 BA: Benchmark analysis \*2 SD: Standard Deviation 0.480.42

COV\*3

\*3 COV: Coefficient of variation

#03-2

PA-S\_

PA-S\_#03-1

PA-S\_#02-2

PA-S\_#02-1

PA-S #01-1

 $BA^{*1}$ 

-47 -

Analytical results/Experimental results

1.861.35 1.65 1.62 0.260.16

1.53

1.891.29 1.621.600.30

1.49 1.221.47 1.39 0.15 0.11

1.21

1.53 1.42 0.180.13

1.340.25 0.19

0.19

0.21 0.31

0.18

0.14

1.260.23

1.35

1.621.54

0.59

Group III Group IV 0.89

Average  $\mathrm{SD}^{*2}$ 

1.29

1.05 1.49 1.35

1.70

1.51

1.74 0.73 0.67 1.05

1.37 0.71

Group I

ΡР

RMS 1.59 1.041.49 1.370.290.21

ΡР

RMS 1.481.05 1.50

ΡР

RMS 1.65 1.11 1.641.47

РР

RMS 1.42 1.00

ΡР

RMS

РР

RMS

			#01-2	ЪР		1.1593	0.9897	1.2124			#01-2	ЪР	1.07	0.91	1.12	1.03	0.11	0.10	
		[%] I	PA-S	RMS		0.1672	0.1223	0.1587		3H	PA-S	RMS	1.22	0.89	1.16	1.09	0.17	0.16	
		S043F	I*	ЪР	1.0832	1.2952	0.6876	0.4258		S04	S0	ЬР	1.20	0.63	0.39	0.74	0.41	0.56	
			BA	RMS	0.1373	0.1590	0.0879	0.0480			BA	RMS	1.16	0.64	0.35	0.72	0.41	0.57	
	(value)		#01-2	ЪР		26.019	27.378	25.978	sults	sults	#01-2	ЪР	0.91	0.96	0.91	0.92	0.03	0.03	
-	lytical results	[mm]	PA-S_	RMS		3.711	3.718	3.488	xperimental re	Analytical results/Experimental re D01	PA-S_	RMS	0.93	0.93	0.87	0.91	0.03	0.04	
	nental and ana	D01	۱*1	ЪР	28.620	25.514	22.971	25.210	rtical results/E		D	A*1	ЪР	0.89	0.80	0.88	0.86	0.05	0.06
	Experir		B/	RMS	4.003	3.556	3.128	3.254	Analy		B/	RMS	0.89	0.78	0.81	0.83	0.05	0.07	
)			#01-2	ЪР		9200	9942	11909			#01-2	ЪР	0.84	06.0	1.08	0.94	0.13	0.14	
		[Gal]	PA-S	RMS		2056	2154	2290		3X	PA-S_	RMS	0.99	1.03	1.10	1.04	0.06	0.05	
		A03X	\_*1	ЪР	11015	7984	9293	9373		A0:	\*1	ЪР	0.72	0.84	0.85	0.81	0.07	0.09	
			BA	RMS	2086	1633	1772	1778			BA	RMS	0.78	0.85	0.85	0.83	0.04	0.05	
					Exp.	Group I	Group III	Group IV					Group I	Group III	Group IV	Average	$\mathrm{SD}^{*2}$	COV*3	

表 3.3-6 入力加速度 1,850 Gal に対する解析結果とばらつき評価 Table 3.3-6 RMS and the range of the time history (PP) at the 1,850 Gal input acceleration and their variations.

> \*1 BA: Benchmark analysis \*2 SD: Standard Deviation

**表 3.3-7** 配管系振動試験のパラメトリック解析 同一解析者による各解析条件に対する結果(解析結果/実験結果) Table 3.3-7 Parametric analysis of the piping system test: Results of each analytical condition by the same analysis group (Analytical result/Experimental results).

(a) Group	Ι
-----------	---

	A03X		D	01	S043H	
	RMS	РР	RMS	РР	RMS	РР
Benchmark Analysis	0.86	0.81	1.05	1.21	1.37	1.74
PA-S_#01-1	1.16	0.95	1.13	1.21	1.51	1.70
PA-S_#02-1	1.04	0.81	1.04	1.10	1.42	1.49
PA-S_#02-2	1.32	1.14	1.26	1.35	1.65	1.89
PA-S_#03-1	1.16	0.98	1.14	1.21	1.48	1.53
PA-S_#03-2	1.15	0.95	1.13	1.21	1.59	1.86

# (b) Group III

	A03X		D	01	S043H		
	RMS	РР	RMS	РР	RMS	РР	
Benchmark Analysis	0.94	0.85	0.91	0.99	0.71	0.73	
PA-S_#01-1	1.19	1.03	1.15	1.34	1.05	1.29	
PA-S_#02-1	1.09	0.89	1.07	1.25	1.00	1.22	
PA-S_#02-2	1.33	1.20	1.26	1.39	1.11	1.29	
PA-S_#03-1	1.20	1.05	1.16	1.34	1.05	1.21	
PA-S_#03-2	1.19	1.02	1.14	1.34	1.04	1.35	

(c) Group IV

	A03X		D	01	S043H		
	RMS	РР	RMS	РР	RMS	РР	
Benchmark Analysis	1.07	0.92	1.07	1.12	0.59	0.67	
PA-S_#01-1	1.40	1.13	1.13	1.20	1.49	1.62	
PA-S_#02-1	1.21	1.00	1.00	1.13	1.35	1.47	
PA-S_#02-2	1.70	1.34	1.32	1.28	1.64	1.62	
PA-S_#03-1	1.43	1.14	1.15	1.20	1.50	1.53	
PA-S_#03-2	1.39	1.13	1.12	1.20	1.49	1.65	



図 3.3-2 配管系振動試験のパラメトリック解析 解析① -1, ③ -1, ③ -2 におけるエルボ 3 応答加速度 Fig. 3.3-2 Parametric analysis of the piping system test: Response acceleration at Elbow 3 by PA-S\_#01-1, PA-S\_#03-1, and PA-S\_#03-2.



図 3.3-3 配管系振動試験のパラメトリック解析 エルボ1 脇部周方向ひずみの残留値 Fig. 3.3-3 Parametric analysis of the piping system test: Residual strain of the hoop strain at the flank of Elbow 1.

#### 4. 第二段階ベンチマーク解析

# 4.1 目的と実施方法

第二段階ベンチマーク解析は,既往研究で実施さ れたステンレス鋼製配管要素の振動試験を対象とす るブラインド解析とした.JSME タスクにおいて有 志の解析参加者を募集し,試験体形状,材料特性, 試験時に収録したデータを解析参加者に提供した. 解析参加者から指定した出力項目に対する解析結果 の提出を受け,試験結果と解析結果を比較整理した. 第二段階ベンチマーク解析の実施期間は2016年3 月から2016年12月であり,解析法ガイドライン の概要がおおむねまとまった時期に相当する.第二 段階ベンチマーク解析には7グループの参加があっ た.表4.1-1に第二段階ベンチマーク解析で使用さ れた解析コードを示す.

表 4.1-1	第二段階ベンチマーク解析に用いられ
	た解析コード

 Table 4.1-1
 FEA codes used in the second stage of benchmark analyses.

Code	Groups
ABAQUS	4
FINAS	1
FINAS/STAR	1



図 4.2-1 エルボ要素配管振動試験の外観 Fig. 4.2-1 Setup of the elbow pipe element shaking test.



図 4.2-2 エルボ試験体の形状および設置状況 Fig. 4.2-2 Configuration of the elbow specimen test setup.

#### 4.2 ベンチマーク問題

第二段階ベンチマーク解析で比較対象とした試験 は、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」)が実 施した「地震荷重下における高速炉配管の終局強度 に関する研究」<sup>21),22)</sup>で実施されたエルボの面内加 振試験と、同径ティの面外加振試験である.

# 4.2.1 エルボ要素配管振動試験の概要

#### (1) 試験概要

図 4.2-1 に試験の状況を,図 4.2-2 に試験体の形状 を示す.試験体には 150A Sch5S (外径:165.2 mm, 板厚:2.8 mm)のステンレス鋼配管 SUS304TP を使 用した.エルボ試験体の一端を振動台に固定し,も う一方の端部には慣性力を得るための錘を設置して いる.試験体の両端部はピン支持されており,錘は リニアベアリングによって支持されており,錘は リニアベアリングによって支持されている.これに より,試験体に錘の自重は負荷されず,錘の加振方 向(水平一方向,図 4.2-2 の X 軸方向)以外への変位 は拘束されている.振動台を加振すると,錘に発生 する地震慣性力によってエルボに面内曲げモーメン トが負荷される試験となっている.錘部(錘+クレ ビス+フランジ)の質量は,実測値で 170 kg であっ た.試験は常温で実施し,圧力は負荷していない.

図 4.2-3 に加振試験で使用した入力地震波の加速 度時刻歴波形および加速度応答スペクトル(減衰比 3%で計算)を示す.入力波には、実機の配管が受け る地震波形を意識し、あるプラントの原子炉建屋解



(b) Acceleration response spectra (damping: 3.0%)

図4.2-3 エルボ要素配管振動試験の入力

Fig. 4.2-3 Input motion for the elbow pipe element shaking test.

析モデルの応答波形を使用した.試験では,波形の 振動特性を保持したまま振幅レベルを係数倍し,入 力波として使用した.

入力振幅レベルを徐々に増大させ,破損するまで 複数回の加振を行った漸増加振試験のうちの1ケー スをベンチマーク解析の試験ケースとして選定し た.具体的には,加振回数全9回のうち,試験体が 塑性域に到達するレベルからひずみ振幅1%の範囲 に収まる試験を対象とした.この試験の最大入力加 速度は約1.4Gであった.

(2) ベンチマーク解析提供データおよび指定した出 力項目

エルボ要素配管振動試験に対するベンチマーク解 析(以下,「エルボ解析」)では、参加者に対して以下 のデータを提供した.

- (a) 試験体設計図面
- (b) エルボ部の形状
  - ・外径および板厚の実測データ
- (c) エルボ部の材料特性
  - ・ミルシート値
  - ・解析法ガイドラインで提供する SUS304 の弾 塑性応力--ひずみ関係式
- (d) 入力加速度時刻歴波形データ
- (e) 計測位置図
- (f) 試験における減衰比1次モードに対して 3.0%(弾性試験結果より)

参加者には、以下の解析結果の提供を求めた.

- (a) 弾性域での一次固有振動数およびモード図
- (b) 錘部の応答加速度(時刻歴)
- (c) エルボの開閉変位(時刻歴)
- (d) エルボ外面指定点(試験計測位置,エルボ中央 断面脇部)の全ひずみ(時刻歴)
- (e) 相当塑性ひずみコンター図
- 4.2.2 ティ要素配管振動試験の概要
- (1) 試験概要

図 4.2-4 に試験の状況を,図 4.2-5 に試験体の形状 を示す. 試験体には 150A Sch10S (外径:165.2 mm, 板厚:3.4 mm)のステンレス鋼配管 SUS304TP を使 用した.ティ試験体の主管両端を振動台に固定し, 枝管の自由端には慣性力を得るために錘を設置して いる.振動台加振時に錘で発生する地震慣性力によ る曲げモーメントがティに負荷される試験である. 垂部は支持されておらず、試験体は自立している.

錘部は収納箱と質量調整用の内部錘で構成され、錘

部全体(錘収納箱+内部錘+フランジ)の質量は、実

測で 255 kg であった.本試験では、ティが面外曲

げを起こす方向(図 4.2-5 の Z 軸方向)の一方向に加振を行った.

試験は常温で実施し、亀裂貫通の検出

を目的として 22 kPa のごく低圧を負荷した.

加振試験ではエルボ要素配管振動試験と同じ入力 地震波を使用し,波形の振動特性を保持したまま振 幅レベルを係数倍し,入力波として使用した.図 4.2-6 に入力地震波の加速度時刻歴波形と加速度応 答スペクトル(減衰比 0.5% で計算)を示す.

入力振幅レベルを徐々に増大させ,破損するまで 複数回の加振を行った漸増加振試験のうちの1ケー スをベンチマーク解析の試験ケースとして選定し た.対象とした試験の選定の観点はエルボ要素配管 振動試験と同様である.対象とした試験の最大入力 加速度は約1.4Gであった.



図 4.2-4 ティ要素配管振動試験の外観 Fig. 4.2-4 Setup of the tee pipe element shaking test.



図 4.2-5 ティ試験体の形状および設置状況 Fig. 4.2-5 Configuration of the tee specimen test setup.

(2) ベンチマーク解析提供データおよび指定した出 力項目

ティ要素配管振動試験に対するベンチマーク解析 (以下,「ティ解析」)では,参加者に対して以下のデー タを提供した.

- (a) 試験体設計図面
- (b) ティの形状(図 4.2-7 参照)
  - ・外形の三次元計測データ
  - ・ティR部曲率半径
     三次元計測データからティのR部(肩の部分)
     のデータを抽出し、それをもとに寸法を算定.
  - ・ティ代表点での板厚の実測データ
- (c) ティ部の材料特性
  - ・ミルシート値
  - ・試験体から採取した材料試験片による単調引
     ・ 試験から得られた公称応カー公称ひずみ曲
     線
  - ・解析法ガイドラインで提供する SUS304 の弾 塑性応力--ひずみ関係式
- (d) 入力加速度時刻歴波形データ
- (e) 計測位置図
- (f) 試験における減衰比
  - 1次モードに対して0.1%(弾性試験結果より)





(b) Acceleration response spectra (damping: 0.5%)

図 4.2-6 ティ要素配管振動試験の入力

Fig. 4.2-6 Input motion for the tee pipe element shaking test.

参加者には、以下の解析結果の提供を求めた.

- (a) 一次固有振動数およびモード図
- (b) 錘部の応答加速度(時刻歴)
- (c) ティ外面指定点(試験計測位置,図4.2-8参照)
   の全ひずみ(時刻歴)
- (d) 相当塑性ひずみコンター図



(a) 3-D geometry measurement data



A tee was divided into 1/4, and the wall thickness at the representative points were measured.



(b) Wall thickness measurement points

図 4.2-7 ティ試験体の形状データ Fig. 4.2-7 Configuration information of the tee specimen.



図 4.2-8 ティ解析におけるひずみ評価点 Fig. 4.2-8 Strain evaluation point in the analysis on the tee.

#### 4.3 ベンチマーク解析結果

本節では第二段階ベンチマーク解析の結果につい てまとめる.以下では、参加者にグループAからグ ループGまでの参加者名をつけて解析結果を区別す る.参加者名は第一段階ベンチマーク解析時のもの とは区別し、第二段階ベンチマーク解析のエルボ解 析とティ解析では共通である.

4.3.1 エルボ要素配管振動試験の解析

#### (1) 解析条件

表 4.3-1 に参加者の解析条件をまとめる.

(a) 試験体のモデル化範囲

表 4.3-1 に示すとおり, すべての解析で, 配管に はシェル要素またはソリッド要素を, 管の端部およ び錘には剛なはりを使用していた. 試験体のモデル 化の範囲は, 試験体の全てをモデル化したもの(フ ルモデル)と対称性を考慮し試験体の半分をモデル 化したもの(ハーフモデル)の2パターンに分かれ た. 図 4.3-1 に解析モデルの事例を示す. エルボの 幾何形状(外形・板厚)は, すべてのグループで公称 寸法をもとに作成されていた.

(b) 材料特性の近似

表 4.3-1 に示すとおり,材料のモデル化は,二直 線近似で移動硬化則を適用した参加者が6グループ



図 4.3-1 エルボ解析 試験体のモデル化事例 Fig. 4.3-1 Analysis of the elbow: Variation of modeling the test specimen.



図 4.3-2 エルボ解析 材料特性の近似 Fig. 4.3-2 Analysis of the elbow: Stress-strain relationships.

表 4.3-1 エルボ解析 解析参加者の解析条件 Table 4.3-1 Analysis of the elbow: Analytical conditions of each group.

	Motoriol proports	Element	Element me	esh at the cer of the elbow	Modeling of the geometry	
	Material property	type	Hoop (°)	Axial (°)	Thickness (layer)	Modeling of the geometry
Group A	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	2.5	1.89	-	Nominal dimension for both pipe shape and thickness
Group B	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	7.5	4.29	-	Nominal dimension for both pipe shape and thickness
Group C	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	7.5	3.75	-	Nominal dimension for both pipe shape and thickness
Group D	Multi-linear Combined hardening	Shell	7.5	2.6	-	Nominal dimension for both pipe shape and thickness
Group E	Bi-linear Kinematic hardening	Solid	5	2.5	5	Nominal dimension for both pipe shape and thickness
Group F	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	7.5	3.75	-	Nominal dimension for both pipe shape and thickness
Group G	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	7.5	3.75	-	Nominal dimension for both pipe shape and thickness

と最多であり、二直線近似のパラメータである降伏 点および二次勾配は、解析法ガイドラインの規定を 参考に決められていた.図4.3-2に二直線近似を適 用した参加者の材料特性近似結果を示す.ほとんど の参加者は解析法ガイドラインに準じて特性値を決 定しているため、材料特性の近似にそれほど大きな 差は現れていない.グループFの二次勾配が他のグ ループよりも大きくなっているが、これは、グルー プF以外の参加者は二直線近似のパラメータを決め る際に考慮する範囲を最大ひずみ3%(解析法ガイド ライン推奨値)としたのに対し、グループFでは最 大ひずみ1%と設定したためである.

(c) エルボ部のモデル化ならびに使用要素と要素分割

表 4.3-1 に示すとおり,エルボ部の幾何形状は, すべての解析グループで公称値をもとに作成されて いた.解析モデルに使用した要素は,ほとんどの参 加者がシェル要素を用いていたが,グループEのみ ソリッド要素を使用していた.エルボ部中央断面(最 大ひずみ発生位置近傍)の要素分割については,周 方向分割が 2.5°~7.5°程度(全周を 48 分割~144 分 割)程度,軸方向分割が 1.8°~4.3°(90°を 21~50 分割)程度の範囲で分割数が決められていた.

(d) 弾性域の減衰比設定

試験における弾性域の減衰は、実機配管にはな い試験体特有の条件に由来するもの(主に錘を支持 するリニアベアリングの摩擦) であるため、ベンチ マーク解析の解析誤差要因として含まれないよう, あらかじめ試験の弾性応答から求めた減衰比を提供 した. 解析で仮定する減衰の種類は任意としたとこ ろ,剛性比例減衰もしくは Rayleigh 減衰のいずれか が用いられた.剛性比例減衰を用いたグループは, 解析モデルの1次モードに対して3.0%の減衰が 得られるように剛性比例減衰の係数が決められた. Rayleigh 減衰を用いたグループは、着目する振動数 範囲の上限・下限の振動数に対して 3.0% の減衰が 得られるように Rayleigh 減衰の係数が決められた. いずれにしても、1次モードが卓越するような本試 験体系に対し1次モードで3.0%程度の減衰が得ら れるように設定されており, 選択した減衰の種類が 解析結果に与える影響は小さいと考えられる.

# (2) 解析結果の分析

# (a) 固有振動数

図 4.3-3 に解析参加者の固有値解析結果と試験結

果を示す.図4.3-3に示すように,いずれの参加者 も試験の一次固有振動数を精度良く評価していた. この結果から,エルボの幾何形状および弾性域での 材料特性がすべての解析モデルにおいて精度良く再 現できていると考えられる.4.3.1(1)(a)で述べたよ うに,すべての解析において,解析モデルの幾何形 状は公称寸法をもとに作成されていた.解析の誤差 要因として配管の製造誤差が懸念されるが,本ベン チマーク解析の範囲では,エルボについては解析モ デルを作成する際に特別配慮をする必要はなく,公 称寸法に基づき作成した解析モデルによって十分正 確に再現できると考えられる.

(b) ひずみ範囲の最大値および RMS 値

時刻歴応答解析結果のうち,エルボの疲労評価を 行う上で最も重要となるひずみに着目し,ひずみ範 囲の最大値とひずみ時刻歴波形の RMS 値を試験結 果と比較したものを図 4.3-4 に示す.なお,データ 比較のための事前処理として,デジタルフィルタに よるラチェット成分の除去を実施した.

すべての解析結果は、試験結果に対して0.9 倍~ 1.4 倍の精度で評価する結果となった.一般的に、 非弾性挙動を伴う動的解析は、材料特性のパラメー タの増加により、弾性解析と比べて精度が低下する が、このことを考慮するとベンチマーク解析結果は 試験結果を良好に再現できていると考えられる.全 体的には応答を大きめに見積もる傾向が確認される が、これは多くの解析者が二直線近似を使用してい たことが一因と考えられる.第3章で述べた配管系



図 4.3-3 エルボ解析 一次固有振動数 Fig. 4.3-3 Analysis of the elbow: The first mode's natural frequency.

振動試験に対するパラメトリック解析において,降 伏点を高めに設定するほどひずみが大きくなるとい う傾向が確認されている.ステンレス鋼の場合,材 料特性を二直線近似とするとその降伏点は実際の 材料の降伏応力よりも高めに評価することとなるた め,応答を大きめに評価したものと考えられる.図 4.3-4 に示すとおり,すべての解析結果は試験結果 の80% 以上となっている. (c) 相当塑性ひずみのコンター図

図 4.3-5 (a) ~ (g) に, エルボ最大変形時の相当塑 性ひずみコンター図を, 図 4.3-5 (h) に試験結果を示 す. コンター図の比較から, エルボ面内曲げに特徴 的な, エルボ脇部の軸方向に沿ったひずみ集中が確 認できる. 図 4.3-5 (h) に示す試験結果の亀裂貫通箇 所と解析のひずみ集中箇所はよく一致しており, 解 析によりエルボの損傷箇所を予測することができた と考えられる.



図 4.3-4 エルボ解析 エルボ脇部外面周方向ひずみの試験結果と解析結果の比較 Fig. 4.3-4 Analysis of the elbow: Comparison between the experimental results and the analytical results on the hoop strain at the flank of the elbow (outer surface).



図 4.3-5 エルボ解析 相当塑性ひずみコンター図と試験結果 Fig. 4.3-5 Analysis of the elbow: Comparison of the equivalent plastic strain contour figures and the experimental results.

#### 4.3.2 ティ要素配管振動試験の解析

#### (1)解析条件

表 4.3-2 に参加者の解析条件をまとめる.

(a) 試験体のモデル化範囲

表 4.3-2 に示すとおり, すべての解析で, 配管を シェル要素またはソリッド要素でモデル化し, 管の 端部および錘を剛なはりによってモデル化してい た.モデル化の範囲については, エルボ解析の場合 と同様, 試験体の全てをモデル化したフルモデルと 試験体の半分をモデル化したハーフモデルに分かれ た.図 4.3-6 に解析モデルの事例を示す.

(b) 材料特性の近似

表 4.3-2 に示すとおり,材料のモデル化は,二直 線近似で移動硬化則を適用した参加者が5 グループ と最多であり,二直線近似のパラメータである降伏 点および二次勾配は,解析法ガイドラインの規定を 参考に決められていた.図 4.3-7 に二直線近似を適 用した参加者の近似結果を示す.

ティ解析では、ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線 として、解析法ガイドラインで提供する応力-ひず み曲線の算定式に加えて、ティから切り出した試験 片を用いた材料試験により取得した応力-ひずみ曲 線を提供した.それぞれの応力-ひずみ曲線の間で 降伏点にして10%程度の差があるため、どちらを 参照するかによって材料特性の近似結果に差が現れ た.二次勾配については、参加者間での差はほとん ど見られなかった.

(c) ティ部のモデル化ならびに使用要素と要素分割 表4.3-2 に示すとおり、グループA、B、D、G は、 三次元計測データをもとにティの外形を作成し、板 厚も代表点の計測データを内挿近似するなどして実 際の形状に極力近くなるように設定していた.その 他のグループは、基本的に設計図面を参照して外形 を作成していた.板厚について、グループF はティ をいくつかの領域に分割して計測データをもとに設 定していた.グループE は公称板厚を、グループC は、公称板厚と実際の板厚との差を考慮し、公称板 厚の1.4 倍の値を使用していた.

解析モデルに使用した要素は、ほとんどの参加者 がシェル要素を用いており、グループEのみソリッ ド要素を使用していた.

(d) 弾性域の減衰比設定

試験では、実機配管系で減衰の要因とされている

配管支持装置や保温材等が設置されていないため, 弾性域の減衰比は0.1%と低かった.これは、本試 験体系特有のものであるため、ベンチマーク解析の 解析誤差要因として含まれないよう、あらかじめ試 験の弾性応答から求めた減衰比を提供した. 解析で 仮定する減衰の種類は任意としたところ,剛性比例 減衰もしくは Rayleigh 減衰のいずれかが用いられ た. 剛性比例減衰を用いたグループは、解析モデル の1次モードに対して0.1%程度の減衰が得られる ように剛性比例減衰の係数が決められた. Rayleigh 減衰を用いたグループは,着目する振動数範囲の上 限・下限の振動数に対して 0.1% 程度の減衰が得ら れるように Rayleigh 減衰の係数が決められた.いず れにしても、1次モードが卓越するような本試験体 系に対し1次モードで0.1%程度の減衰が得られる ように設定されており, 選択した減衰の種類が解析 結果に与える影響は小さいと考えられる.







図 4.3-7 ティ解析 材料特性の近似 Fig. 4.3-7 Analysis of the tee: Stress-strain relationships.

	Material	Element	Element mesh at the	Modelin	g of the geometry
	property	type	tee	Pipe shape	Wall thickness distribution
Group A	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	$\begin{array}{c} 1 \\ 18 \\ 18 \\ 15 \\ 3 \end{array}$	Based on the 3-D geometry measurement data	Using the measurement data
Group B	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \end{array} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \\ \end{array} $	Based on the 3-D geometry measurement data	Using the measurement data
Group C	Bi-linear Kinematic hardening	Shell		Based on the nominal and provided <i>R</i> dimension*	1.4 times of the nominal thickness
Group D	Multi-linear Combined hardening	Shell		Based on the 3-D geometry measurement data	Using the measurement data

表 4.3-2 ティ解析 解析参加者の解析条件(1/2) Table 4.3-2 Analysis of the tee: Analytical conditions of each group (1/2).

\* "R" is the curvature radius at the branch base, obtained from 3-D geometry measurement data

	Material	Element	Element mesh at the	Modeling of the geometry		
	property	type	tee	Pipe shape	Wall thickness distribution	
Group E	Bi-linear Kinematic hardening	Solid	$\begin{array}{c} \bullet \\ \bullet $	Based on the nominal and provided <i>R</i> dimension*	Nominal thickness	
Group F	Bi-linear Kinematic hardening	Shell		Based on the nominal and provided <i>R</i> dimension*	Using the measurement data	
Group G	Bi-linear Kinematic hardening	Shell	→ 12	Based on the 3-D geometry measurement data	Using the measurement data	

表 **4.3-2** ティ解析 解析参加者の解析条件(2/2) **Table 4.3-2** Analysis of the tee: Analytical conditions of each group (2/2).

\* "R" is the curvature radius at the branch base, obtained from 3-D geometry measurement data

#### (2) 解析結果の分析

## (a) 固有振動数

図 4.3-8 に解析参加者の固有値解析結果と試験結 果を示す.全体的に,解析結果は試験の一次固有振 動数を精度良く評価していた.グループEについ ては,試験およびその他の解析結果と比べ,固有振 動数を1 Hz 程度低めに評価する結果となっていた. この要因は,解析モデルと実際のティ配管の幾何形 状の差による影響が一因であると考えられる.解析 モデルと実際の形状との比較については,本項(d) で詳しく述べる.

#### (b) ひずみ範囲の最大値および RMS 値

表 4.3-3 に, 試験における計測点に対応するティ 正面 2 箇所 (図 4.2-8 参照)のひずみ時刻歴波形から 求めたひずみ範囲の最大値について, 試験結果と解 析結果の比を示す. なお, データ比較のための事前 処理として, デジタルフィルタによるラチェット成 分の除去を実施した.表 4.3-3 に示すように, ティ 解析ではエルボ解析の結果と比べ試験と解析の差が やや大きい傾向が確認された.



図 4.3-8 ティ解析 一次固有振動数 Fig. 4.3-8 Analysis of the tee: The first mode's natural frequency.

#### (c) 相当塑性ひずみのコンター図

図 4.3-9 (a) ~ (g) に、最大変形時の相当塑性ひず みコンター図を,図4.3-9(h)に試験結果を示す.グ ループA, B, D, Gについては、ティの肩の部分 にひずみが集中しており,図4.3-9(h)に示した試験 結果の亀裂貫通箇所とこれらのグループの解析のひ ずみ集中位置はよく一致していた.一方,グループ C. E. F については、試験とは異なる位置にひずみ 集中が現れている.ここで、図 4.3-10 にティ配管 の三次元計測データと各参加者が作成した解析モデ ルとの比較を示す. 三次元計測データをもとにティ の解析モデルを作成したグループA, B, D, Gは, 枝管と主管の結合部分の曲面形状をよく再現してい るが, グループ C, E, F では曲面の部分において 明らかな違いが確認できる.このため、解析におけ るひずみ集中箇所にずれが生じ、計測位置のひずみ を実際より小さく評価する結果となったと考えられ る.

#### (d) 相当ひずみ範囲

本項(a)~(c)に示した結果の通り,ティ解析では 計測点におけるひずみの値およびひずみ集中箇所に ついて,エルボ解析と比べて試験と解析の差がやや 大きい傾向にあった.これは,解析モデルでティの 複雑な三次元形状を十分再現していないグループの 結果がいくつか含まれているためである.幾何形状 の再現が十分でない解析では,計測点におけるひず みの値を比較した場合,試験結果と比べて解析結果 が小さくなっていた.

一方,解析に基づく強度評価を行う際は,ティ配 管の局所的な破損箇所の特定までは考慮せず,解析 上の最大ひずみ発生点における相当ひずみを評価す ることが考えられる.すなわち,強度評価で必要と なるのはティ全体の中で最大となる相当ひずみ波形

**表 4.3-3** ティ解析 ティ外面計測点における最大ひずみ範囲の試験結果に対する解析結果の比 **Table 4.3-3** Analysis of the tee: Ratio of the analytical results to the experimental results of the strain range.

	Group A	Group B	Group C	Group D	Group E	Group F	Group G
Strain Y	0.98	0.82	0.55	1.04	0.72	0.94	0.88
Strain X	1.82	1.02	0.38	0.42	0.47	0.58	1.36
Average	1.40	0.92	0.47	0.73	0.60	0.76	1.12

\* "Strain Y" is the strain to the branch direction, "Strain X" is the strain perpendicular to the Strain Y. See Fig. 4.2-8.



図 4.3-9 ティ解析 相当塑性ひずみコンター図と試験結果

Fig. 4.3-9 Analysis of the tee: Comparison of the equivalent plastic strain contour figures and the experimental results.



図 4.3-10 ティ解析 三次元形状計測データと解析モデル形状の比較 Fig. 4.3-10 Analysis of the tee: Comparison of the 3-D geometry measurement data and the analysis model shape. である. これを念頭に置いて, 試験との比較で最も 精度が良かったグループBの結果をリファレンスと し, ティ全体の中で最も厳しい箇所の相当ひずみ範 囲で整理した結果を図4.3-11に示す. ここで, グルー プBの解析モデルはティの形状を三次元計測データ に基づき作成し, 材料特性も多直線近似としており, ベンチマーク解析の中で最も詳細なモデルである. また, 表4.3-3に示した, 計測点におけるひずみ値 の試験結果に対する解析結果の比を見ても, 試験結 果と最もよく一致している結果であることから, リ ファレンスとしてグループBを選定した.

図 4.3-11 より,各解析で最も厳しい位置と予測される点における相当ひずみを評価した場合,グループB以外の解析グループの解析結果はグループBの解析結果と同等もしくは大きめの評価になることがわかった.この結果から,幾何形状のモデル化の精度によりひずみ集中箇所のずれは生じるものの,ティの中で発生する最大相当ひずみで評価する場合,保守的な評価が可能であると考えられる.

#### 4.4 第二段階ベンチマーク解析のまとめ

第二段階ベンチマーク解析では、ステンレス鋼製 のエルボおよびティの振動台試験を対象としたブラ インド解析を実施した.

エルボ解析では、多くの解析モデルは解析法ガイ ドラインに基づき作成され、その解析結果から、ス テンレス鋼製配管についても十分信頼できる解析結 果が得られることを確認した.

ティ解析では,解析モデルにおけるティ部の幾何 形状の違いによってひずみ集中箇所が変化し,試験 結果と解析結果の差が大きい傾向にあった.従って, ひずみを精度良く算定するためには,解析モデルに おいて実際のティの幾何形状をできるだけ忠実に再 現することが望ましい.しかし,幾何形状の再現が 十分でない解析モデルを使用した場合でも,解析で 最も厳しい位置と予測される点における相当ひずみ を使用して相当ひずみ範囲を評価した場合,幾何形 状を精度良く再現した解析モデルによるひずみと比 較し同等もしくは大きめに算定する傾向にあること を確認した.



図 4.3-11 ティ解析 グループ B を基準とした相当ひずみの比較 Fig. 4.3-11 Analysis of the tee: Comparison of the equivalent strain between Group B and the other groups.

#### 5. まとめ

原子力発電施設の配管系を対象とし,既往の解析 手法により弾塑性地震応答解析を行った場合の解析 結果のばらつきの程度やその要因を調査するととも に,ばらつきを軽減するための解析上の留意点など を抽出することを目的とし,既存の試験結果に対す るベンチマーク解析を実施した.一連のベンチマー ク解析より得られた主な知見を以下に示す.

- (1)第一段階ベンチマーク解析では解析参加者により多様な材料特性の定義がなされたが、提出された解析結果の分析より、解析結果には降伏応力の設定が大きく影響し、構成則の違いや、二直線近似を適用した場合の二次勾配の違いの影響は、降伏応力の設定と比較すると小さいことが確認された.この傾向は、降伏応力と二次勾配を変化させたパラメトリック解析によっても確認された.
- (2)第一段階ベンチマーク解析結果およびパラメト リック解析結果より、炭素鋼の場合、降伏応力 を実際の配管の降伏応力に近い設定とすると荷 重変形関係、応答加速度、ひずみ範囲等の試験 結果をより精度良く評価することが確認された.
- (3) パラメトリック解析結果より,解析手法を統一 することで異なる解析者間での解析結果のばら つきは減少する傾向となり,配管系の弾塑性応 答解析手順の規定が有効であることが確認された.
- (4) パラメトリック解析結果より,解析による評価のうち,残留ひずみについては試験結果よりも解析が大きく評価する結果が多く,また,解析手法を統一した場合でも解析者間のばらつきは大きく,精度良く評価することは難しいことが分かった.
- (5) 第二段階ベンチマーク解析より、ステンレス鋼 製のエルボ配管では、別途整備した解析法ガイ ドラインに従った材料特性の設定で解析を実施 した場合、解析で得られたひずみは試験結果を 良好に再現することが確認された.
- (6) 第二段階ベンチマーク解析において、ティ配管では、解析モデルにおけるティ部の幾何形状の違いによってひずみ集中箇所が変化し、試験結果と解析結果の差が大きい傾向にあったが、幾

何形状の再現が十分でない解析モデルを使用し た場合でも,解析で最も厳しい位置と予測され る点における相当ひずみを使用して相当ひずみ 範囲を評価した場合,幾何形状を精度良く再現 した解析モデルによるひずみと比較し同等もし くは大きめに算定する傾向にあることを確認し た.

本研究から得られた知見に基づき,JSME タスク では事例規格および解析法ガイドラインをとりまと めた.これらの評価手法は,日本機械学会発電用設 備規格委員会の審査を経て2019 年春に発刊される 見通しである.

#### 謝辞

本報告で述べたベンチマーク解析活動は,日本機 械学会発電用設備規格委員会原子力専門委員会[耐 震許容応力検討タスクフェーズ2]「配管系の耐震安 全性評価に対する弾塑性評価導入の検討」(2014年4 月~2018年3月)の一環として実施した.本報告で 述べたベンチマーク解析およびパラメトリック解析 は,当該タスク活動に参加した委員の有志によって 実施された.また,解析結果の評価,事例規格の整 備にあたっては,委員各位に多くの有意義な議論を いただいた.

第一段階ベンチマーク解析で使用した配管要素試 験は、「地震荷重を受ける減肉配管の破壊過程解明 に関する研究」(文部科学省原子力試験研究費,2001 年度~2005年度),配管系振動試験は、「機器・配 管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法の研 究」(科学技術庁国立機関原子力試験研究費),第二 段階ベンチマーク解析で使用した試験は「薄肉配管 の終局強度に関する研究」(日本原子力研究開発機構 とIHIとの共同研究)により実施した.また、ベ ンチマーク解析結果、パラメトリック解析結果の分 析には、防災科研運営費交付金プロジェクト「地震 減災技術の高度化と社会基盤の強靭化に関する研 究」の支援を受けた.

日本機械学会のタスク活動の実施にあたっては, 著者らの所属機関,日本機械学会事務局に多大なご 協力をいただいた.また,事例規格案の審査につい ては日本機械学会発電用設備規格委員会,原子力専 門委員会委員より多く議論をいただいた.

関係各位に深く感謝します.

# 参考文献

- 1) 日本電気協会(1987):原子力発電所耐震設計技 術指針, JEAG4601-1987.
- 2)藤田勝久・白木万博・北出浩三・中村友道(1978): わん曲管の耐震限界強度に関する振動破壊実験. 日本機械学会論文集(第1部), 44-386, 3437-3445.
- Yoshino, K., Endou, R., Sakakida, T., Yokota, H., Fujiwaka, T., Asada, Y., and Suzuki, K. (2000): Study on Seismic Design of Nuclear Power Plant Piping in Japan Part 3: Component Test Results, Proc. ASME PVP 2000, 407, 131-137.
- Tagart, S.W. Jr., Tang, Y.K., Guzy, D.J., Ranganath, S. (1990) : Piping Dynamic reliability and Code Rule Change Recommendation, Nuclear Engineering and Design, **123**, 373-385.
- 5) Nakamura, I., Otani, A., and Shiratori, M. (2004): Failure Behavior of Piping Systems with Wall Thinning under Seismic Loading, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 126, 85-90.
- Varelis, G.E., Karamanos, S.A., and Gresnigt A.M., (2013) : Pipe Elbows Under Strong Cyclic Loading, Journal of Pressure Vessel Technology, **135**, 011207-1-011207-9.
- 7)長澤和幸・奈良林直(2016):東北地方太平洋沖 地震における福島第一原子力発電所の地震応答 に関する分析について.日本機械学会論文集, 82-837, p.16-00007.
- 8) 原子力安全委員会(2006):発電用原子炉に関す る耐震設計審査指針.
- 9) 日本機械学会(2016):発電用原子力設備規格
   設計・建設規格(2016 年版)第 I 編軽水炉規格, JSME S NC1-2016.
- 10) 日本機械学会:弾塑性応答解析に基づく耐震 S クラス配管の耐震設計に関する代替規定,事例 規格 NC-CC-008(発行予定).
- 日本機械学会:配管系の弾塑性応答解析の方法, 事例規格 NC-CC-008 Mandatory Appendix SEGP-1 (発行予定).
- 12) 中村いずみ・大谷章仁・白鳥正樹(2007): 地震荷 重を受ける減肉配管の破壊過程解明に関する研 究報告書. 防災科学技術研究所研究資料, 306.

- 13) 中村いずみ・大谷章仁・白鳥正樹(2001):機器・ 配管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法 の研究報告書.防災科学技術研究所研究資料, 220.
- 14) Iwata, K., Karakida, Y., Jin. C., Nakamura, H. and Kasahara, N. (2015) : Multilayer Kinematic Hardening Model for Carbon Steel and its Application to Inelastic Analyses of an Elbow Subjected to Cyclic In-Plane Bending, Proc. ASME PVP 2015, PVP2015-45853.
- 15) 原子力発電技術機構(2002):平成13年度原子力
   発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 その
   2 配管系終局強度, p.83.
- 16) 日本原子力技術協会(2012):中越沖地震後の原子力機器の健全性評価(平成22~23年度報告), pp. 4-15.
- 17) 日本電気協会 (2009): 原子力発電所耐震設計技 術規程, JEAC4601-2008.
- 18) Uesaka, M., Kojima, N., Muroya, I., Nomura, H., Yamazaki, J., and Otani, A. (2014): Investigation on Fatigue Curve against Cyclic Loads of an Earthquake for Piping Components, Proc. ASME PVP 2014, PVP-2014-28234.
- 19) 大谷章仁・澁谷忠弘・森下正樹・中村いずみ・ 白鳥正樹(2016):弾塑性応答を考慮した配管 系の耐震安全性評価(その3 弾塑性地震応答 解析による配管系の耐評価関手法ガイドラン). 日本機械学会2016年度年次大会講演論文集, J1010103.
- 20) 日本機械学会(2014):発電用原子力設備規格材 料規格(2014年追補), JSME S NJ1-2014.
- 21) Watakabe, T., Tsukimori, K., Kitamura, S., Morishita, M. (2016) : Ultimate strength of a thin wall elbow for sodium cooled fast reactors under seismic loads", ASME J. of P.V.T., 138-2, pp.021801.
- 22) Watakabe, T., Tsukimori, K., Otani, A., Moriizumi, M., Kaneko, N., 2014, "Study on strength of Thin-Walled Tee Pipe for Fast Breeder Reactors under Seismic Loading", ASME-PVP, PVP2014-28619.

# 関連発表論文

- Nakamura, I., Shiratori, M., Morishita, M., Otani, A., and Shibutani, T. (2015) : A Research Activity to Introduce the Inelastic Behavior Effect to the Seismic Safety Evaluation on Piping Systems, ICONE23 (Presentation only).
- 2) 中村いずみ・白鳥正樹・森下正樹・大谷章仁・ 澁谷忠弘(2015):配管系の耐震安全性評価に対 する弾塑性評価導入のタスク活動.日本機械学 会 2015 年度年次大会講演論文集,G1000805.
- 3) 中村いずみ・白鳥正樹・森下正樹・大谷章 仁・澁谷忠弘(2015):エルボ面内曲げ試験に 対する弾塑性ベンチマーク解析.日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス講演論文集, OS0910-237.
- 4) 中村いずみ・大谷章仁・澁谷忠弘・永守飛雲・ 高橋宏治・三浦孝広・倉光俊喜雄・金伝栄・渡 邉浩志・白鳥正樹(2016):弾塑性応答を考慮し た配管系の耐震安全性評価(その1 弾塑性解析 による応答挙動評価のばらつきと影響因子の考 察).日本機械学会2016年度年次大会講演論文 集,J1010101.
- 5) 森下正樹・大谷章仁・渡壁智祥・中村いずみ・ 白鳥正樹(2016):弾塑性応答を考慮した配管系 の耐震安全性評価(その2 弾塑性地震応答解析 による配管系の耐震性評価に関する事例規格). 日本機械学会2016年度年次大会講演論文集, J1010102.
- 6)大谷章仁・澁谷忠弘・森下正樹・中村いずみ・ 白鳥正樹(2016):弾塑性応答を考慮した配管 系の耐震安全性評価(その3 弾塑性地震応答 解析による配管系の耐評価関手法ガイドラン). 日本機械学会2016年度年次大会講演論文集, J1010103.
- Nakamura, I., Shiratori, M., Otani, A., Morishita, M., Shibutani, T., and Nakamura, H. (2015) : Introduction of a Research Activity on the Seismic Safety Evaluation of Nuclear Piping Systems Taking the Effect of Elastic-Plastic Behavior into Account, Proc. of ASME PVP2015, PVP2015-45262.

- Nakamura, I., Otani, A., Shibutani, T., Morishita, M., and Shiratori, M. (2016) : Findings from the Benchmark Analyses on an Elbow In-Plane Bending Test and a Piping System Test, Proc. of ASME PVP2016, PVP2016-63419.
- Morishita, M., Otani, A., Watakabe, T., Nakamura, I., Shibutani, T., and Shiratori, M. (2017) : Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis Part 1- A Code Case for Piping Seismic Evaluation Based on Detailed Inelastic Response Analysis, Proc. of ASME PVP2017, PVP2017-65166.
- 10) Otani, A., Shibutani, T., Morishita, M., Nakamura,
  I., Watakabe, T., and Shiratori, M. (2017) : Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis Part 2- A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Analysis, Proc. of ASME PVP2017, PVP2017-65190.
- 11) Nakamura, I., Otani, A., Morishita, M., Shiratori, M., Watakabe, T., and Shibutani, T., (2017) : Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis Part 3- Variation in Elastic-Plastic Analysis Results on Carbon Steel Pipes from the Benchmark Analyses and the Parametric Analysis, Proc. of ASME PVP2017, PVP2017-65316.
- 12) Watakabe, T., Nakamura, I., Otani, A., Morishita, M., Shibutani, T., and Shiratori, M. (2017) : Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis Part 4- Second Round Benchmark Analyses with Stainless Steel Piping Component Test, Proc. of ASME PVP2017, PVP2017-65324.
- Nakamura, I., Morishita, M., Otani, A., Shiratori, M., Watakabe, T., and Shibutani, T. (2017) : Approaches to Establish a Seismic Safety Evaluation Procedure Based on the Inelastic Response Analyses, Proc. of SMiRT24, 419.

(2019年1月11日原稿受付,2019年1月15日原稿受理)

# <添付資料1>

日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 耐震許容応力検討タスクフェーズ2

委員名簿

1. 本委員会
---------

【委員】

主査	白鳥正樹	横浜国立大学 名誉教授
幹事	大谷章仁	(株) I H I
	澁谷忠弘	横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 准教授
	中村いずみ	(研)防災科学技術研究所 主任研究員
	森下正樹	(研)日本原子力研究開発機構
	渡壁智祥	(研)日本原子力研究開発機構
		(2016年11月~)
	中村 均	伊藤忠テクノソリューションズ(株)(当時)
	113 3	(~ 2015 年 3 月)
委員	笠原直人	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授
<u> </u>	並 小 邑 八 洒 井 信 介	東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻 教授
		$(\sim 2016 \pm 3 \pm)$
	些田	( 2010 平 5))) 亩古大学 名誉教授
	不山 石	本ホ八子 11言教以 構近国立士学士学院工学研究院 シフテムの創生郊明 教授
	回山 <b></b>	「「「「「「」」」「「」」」「「」」「「」」「「」」「」「」「」「」」「「」」「」」「」」「」「
	向	(快四立八十八十阮二十町九阮   版記の創土即日 教授
	口座 伯 比川住分	朱尔电磁八子埕上子叩电」。 磁阀上子术 化铁汉 达丁丁类十学 丁学과 继续工学纪 准教授
	百川任加	「「「」「「「」」「」」「「」」」「「」」」「「」」「」」「「」」「「」」「
	四田明天	(例)日平原 J 刀例九囲光險悟 例九土轩 (2015 年 4 日)
	木 阳山	
	学 報生	(研)日本原丁刀研究開発機構 女主研究・防災又援部門 女主研究センター 構造健全性評価研究グループリーダー
	酒井理哉	(財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域
	三浦直樹	(財)電力中央研究所 軽水炉保全特別研究チーム 副チームリーダー
	山崎達広	原子力安全推進協会 技術支援部 プラント設備グループ
	尾西重信	中部電力(株) 発電本部 原子力部 設備設計グループ 課長
	田中良彦	東京電力(株) 技術統括部 技術開発センター
	田村伊知郎	中国電力(株) 電源事業本部 原子力耐震担当 マネージャー
	野元滋子	関西電力(株) 原子力事業本部 プラント・保全技術グループ マネ
	第11 日	ノヤー 開西電力(姓) 百乙力車業大部 百乙力は添却用 プラント・伊会は冻げ
	前川 光	
	南田寺立	ルーノ マインヤー (卅)市芸
	兴田羊彦	(体) 朱之 原丁刀ノノノト改計師 順長・悟垣独及詳価担当 土宜 (歴) 東葉 西乙カプニント 読礼如 副簿読礼和火 如臣仏珊
	世田隆生	(休) 宋乙 原丁ガノフント設計部 配官設計担当 部長代理
	龙球翔平	ロエGEニュークリア・エアシー(株)ロエ争乗所 原丁刀計画部 脳震計画 グループ
	釜谷敬太	日立GEニュークリア・エナジー(株)原子力プラント部 プラント設計グ
		ループ
	北条公伸	三菱重工業(株) エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 機器設計部
		主席技師
	神島吉郎	三菱FBRシステムズ(株) プラント設計部
	小島信之	MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株)構造
		安全技術部 構造安全設計グループ グループ長
	佐藤 学	川崎重工業(株) プラント・環境カンパニー エネルギープラント総括部
	· ··· ·	解析技術課

	荒川 学	(株)テプコシステムズ 原子力エンジニアリング事業部 原子力プラント技 術部
	小坂部和也	みずほ情報総研(株) サイエンスソリューション部
	金 伝栄	伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム開発部
	塩見忠彦	(株)マインド 三次元ラボ
		(2015年4月~)
	三浦孝広	サイバネットシステム(株)メカニカル CAE 事業部
	渡邉浩志	エムエスシーソフトウエア(株) テクニカルサポート部
		シニアアプリケーションエンジニア
【オブザーバ】		
	伊藤智博	大阪府立大学 教授
	原 文雄	東京理科大学 名誉教授
	藤本 滋	神奈川大学 工学部 機械工学科 教授
	宇田川誠	(研)日本原子力研究開発機構 安全研究センター 構造健全性評価研究グ
		ループ
		(~2016年3月)
	鬼澤高志	(研)日本原子力研究開発機構
	小林博栄	原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ
	嶋津龍弥	(財)電力中央研究所
		(2015 年 4 月~)
	飯島唯司	日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力計画部 耐
		震計画グループ グループリーダー
	牛尾裕一	日立製作所日立研究所 機械研究センター 信頼性科学研究部 RS4ユニッ
		$\triangleright$
	奥 達哉	(株)東芝 原子力プラント設計部 耐震・構造技術担当
		(2016年4月~)
	平山 浩	(株)東芝 電力システム社 原子力事業部 技監
	山口敦嗣	(株)東芝 原子カプラント設計部 耐震・構造強度評価担当
	綿貫辰憲	(株)東芝 原子力プラント設計部 配管設計担当
	入木信好	三菱重工業(株)エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 プラント設計
		部 配管計画設計課 主席技師
	増田 望	千代田化工建設
	蒲谷拓郎	MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株)
	日置裕右	MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株) 構
		造安全技術部 配管構造設計グループ
	岩田耕司	(元・伊藤忠テクノソリューションズ(株))
	一宅 透	アンシス・ジャパン
	倉光俊喜雄	サイバネットシステム(株) メカニカル CAE 事業部
	眞崎浩一	みずほ情報総研 サイエンスソリューション部

(任期: 2014年4月~2018年3月. 所属等は特記ない限り2017年1月時点)

2. ベンチマー	ク WG	
【委員】		
主査	白鳥正樹	横浜国立大学 名誉教授
幹事	大谷音仁	(株) 「 H I
TI J.	法公中乱	横近国立大学 安心・安全の私学研究教育センター 准教授
	血壮いずみ	(研究) は、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、
	中村いりの	
	新下止 <b>倒</b>	
	<b></b>	(研)日本原于刀研究開発機構
		(2016年11月~)
	中村 均	伊藤忠テクノソリューションズ(株)(当時)
		(~2015年3月)
委員	笠原直人	東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授
	酒井信介	東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻 教授
		(~ 2016 年 3 月)
	些田	( →→→ → → → → → → → → → → → → → → → → →
	不山 石 百场空 <u>运</u>	本小八丁 11号 30 k 按近国立十尚十尚陀丁尚矼宠陀 继纶页创开如明 新博
	同個么伯	てていた。 て、 「一般」の 「」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一般」の 「一の 「」の 「」の 「」の 「」の 「」の 「」の 「」の 「」
	四田明夫	(研)日本原丁刀研究開完機構 研究主幹
	t. Ann at	(2015 年 4 月~)
	李 銀生	(研)日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター
		構造健全性評価研究グループリーダー
	酒井理哉	(財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域
	松浦真一	(財)電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域
	三浦直樹	(財)電力中央研究所 軽水炉保全特別研究チーム 副チームリーダー
	山崎達広	原子力安全推進協会 技術支援部 プラント設備グループ
	尾西重信	中部電力(株) 発電本部 原子力部 設備設計グループ 課長
	田中良彦	車 京 雷 力 (株) 技術 統括 新 技術 開発 センター
	前川 显	周西雲力(株) 百子力事業大部 百子力技術部門 プラント・保全技術グ
	10170 JL	
		ルーノードインヤー (批)ませ、ビストペニントかりの、お香、排水や広気にわれ、 シオ
	火田羊彦	(林) 朱之 原丁刀ノフノト設計部 脳震・構道強度評価担当 土省
	笹山隆生	(林) 東之 原子力フラント設計部 配官設計担当 部長代理
	牛尾裕一	日立製作所 日立研究所 機械研究センター 信頼性科学研究部 RS4 ユニット
		(2016年1月~)
	鬼塚翔平	日立GEニュークリア・エナジー(株)日立事業所 原子力計画部 耐震計画
		グループ
	釜谷敬太	日立GEニュークリア・エナジー(株)原子力プラント部 プラント設計グ
		ループ
	北条公伸	三菱重工業(株) エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 機器設計部 主席技師
	袖鳥吉郎	三差FBRシステムズ(株) プラント設計部
	小自信之	
	小句旧之	安全技術部 構造安全設計グループ グループ長
	荒川 学	(株)テプコシステムズ 電力エンジニアリング本部 原子力プラント技術部
	小坂部和也	みずほ情報総研(株) サイエンスソリューション部
	金伝栄	伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム開発部
	三浦老広	サイバネットシステム(株)メカニカル CAE 車業部
	一	エムエスシーソフトウェア(株) テカーカルサポート郊
	収度旧心	エムエハマ ファーフエア (14) フラールルソサート 中 シーママプロケーションエンジーマ
【ナブギ パ】		マーノノノリノーマヨマエマシーノ
[オブサーハ]	수미미수	
	于田川誠	(研)日平尿丁刀研究開充機構 女全研究センター 構造健全性評価研究ク

「誠 (研)日本原子力研究開発機構 安全研究センター 構造健全性評価研究クループ
 (~2016年3月)

小林博栄	原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ
嶋津龍弥	(財)電力中央研究所
	(2015年4月~)
奥 達哉	(株)東芝 原子力プラント設計部 耐震・構造技術担当
	(2016年4月~)
山口敦嗣	(株)東芝 原子力プラント設計部 耐震・構造強度評価担当
綿貫辰憲	(株)東芝 原子力プラント設計部 配管設計担当
増田 望	千代田化工建設
蒲谷拓郎	MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株)
日置裕右	MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株) 構
	造安全技術部 配管構造設計グループ
岩田耕司	(元・伊藤忠テクノソリューションズ(株))
一宅 透	アンシス・ジャパン
倉光俊喜雄	サイバネットシステム(株) メカニカル CAE 事業部
眞崎浩一	みずほ情報総研 サイエンスソリューション部

(任期: 2014年4月~2018年3月.所属等は特記ない限り2017年1月時点)

# 3. 評価法 WG

# 【委員】

主査	森下正樹	(研)日本原子力研究開発機構
幹事	大谷章仁	(株) I H I
委員	小林博栄	原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ
	北条公伸	三菱重工業(株) エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 機器設計部
		主席技師
	小島信之	MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング (株) 構造
		安全技術部 構造安全設計グループ グループ長
	入木信好	三菱重工業(株)エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 プラント設計
		部 配管計画設計課 主席技師
	笹山隆生	(株)東芝 原子力プラント設計部 配管設計担当 部長代理
	奥田幸彦	(株)東芝 原子力プラント設計部 耐震・構造強度評価担当 主査
	飯島唯司	日立GEニュークリア・エナジー(株)日立事業所 原子力計画部 耐震計画
		グループ グループリーダー
	武内幸一郎	日立GEニュークリア・エナジー(株)日立事業所 原子力プラント部 プ
		ラント設計グループ
	鬼塚翔平	日立GEニュークリア・エナジー(株)日立事業所 原子力計画部 耐震計画
		グループ
	前川 晃	関西電力(株) 原子力事業本部 原子力技術部門 プラント・保全技術グ
		ループ マネジャー
	渡壁智祥	(研)日本原子力研究開発機構
	李 銀生	(研)日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター
		構造健全性評価研究グループリーダー
	尾西重信	中部電力(株) 発電本部 原子力部 設備設計グループ 課長
	西田明美	(研)日本原子力研究開発機構 研究主幹
	荒川 学	(株)テプコシステムズ 電力エンジニアリング本部 原子力プラント技術
		部
	田村伊知郎	中国電力(株) 電源事業本部 原子力耐震担当 マネージャー
	山崎達広	原子力安全推進協会 技術支援部 プラント設備グループ
	松浦真一	(財)電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域

【オブザーバ】

白鳥正樹	横浜国立大学 名誉教授	
中村いずみ	(研)防災科学技術研究所 主任研究員	
柴田 碧	東京大学 名誉教授	
古屋 治	東京電機大学理工学部電子・機械工学系	准教授

(任期: 2015年4月~2018年3月.所属等は特記ない限り2017年1月時点)

# 4. 解析法 WG

【委員】		
主査	大谷章仁	(株) I H I
幹事	澁谷忠弘	横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 准教授
委員	高橋宏治	横浜国立大学大学院工学研究院 機能の創生部門 教授
	小島信之	MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株)構造
		安全技術部 構造安全設計グループ グループ長
	飯島唯司	日立GEニュークリア・エナジー(株)日立事業所 原子力計画部 耐震計画
		グループ グループリーダー
	奥田幸彦	(株)東芝 原子力プラント設計部 耐震・構造強度評価担当 主査
	渡邉浩志	エムエスシーソフトウエア(株) テクニカルサポート部
		シニアアプリケーションエンジニア
	李 銀生	(研)日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター
		構造健全性評価研究グループリーダー
	西田明美	(研)日本原子力研究開発機構 研究主幹
	酒井理哉	(財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域
【オブザーバ	Ň]	
	白鳥正樹	横浜国立大学 名誉教授
	森下正樹	(研)日本原子力研究開発機構

中村いずみ (研)防災科学技術研究所 主任研究員

(任期: 2015年4月~2018年3月.所属等は特記ない限り2017年1月時点)
## <添付資料2>

第一段階ベンチマーク解析における使用データ

第一段階ベンチマーク解析で使用したデータ(ベンチマーク解析実施前の配付データ,ベンチマーク解析実施 後の配付データ)を添付資料 2 として CD-R にて添付する.

## 要 旨

地震荷重を受ける配管系の弾塑性応答解析の精度や誤差要因を調査するため、既往の試験結果に対 するベンチマーク解析を実施した.ベンチマーク解析は、炭素鋼配管に対する第一段階ベンチマーク 解析およびパラメトリック解析、ステンレス鋼配管に対する第二段階ベンチマーク解析の3種類を実 施した.第一段階ベンチマーク解析の結果より、弾塑性解析結果には降伏応力の設定が大きく影響す る一方、二次勾配の設定や構成則の種別の影響は小さいことが分かった.パラメトリック解析では、 材料特性を二直線近似・移動硬化則に統一し、降伏応力を規格降伏点の1.2倍とすることで、解析によ りひずみ範囲を保守的に評価すること、また、解析者間での結果のばらつきが軽減する傾向となるこ とが確認された.第二段階ベンチマーク解析では、ステンレス鋼製のエルボ配管についてある程度の 精度で評価できること、ティ配管については形状のモデル化精度が解析結果に影響を与えることが確 認された.

**キーワード**:過大地震荷重,弾塑性応答,有限要素法解析,ベンチマーク解析,パラメトリック解析, 配管系,配管要素