令和4年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 原子カシステム研究開発事業

地震荷重を受ける配管系の非弾性を考慮した 高精度シミュレーションモデルの構築

成果報告書

令和5年3月

国立研究開発法人 防災科学技術研究所

本報告書は、文部科学省の原子カシステム 研究開発事業による委託業務として、国立研 究開発法人 防災科学技術研究所が実施した 令和2年度-令和4年度「地震荷重を受ける 配管系の非弾性を考慮した高精度シミュレー ションモデルの構築」の成果を取りまとめた ものです。

概	洛······vii
1.	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.	業務計画 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	2.1 全体計画 ······ 2-1
3.	業務の実施内容および成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.1 高精度シミュレーションモデルの V&V に活用する実測データの取得 3.1-1
	3.1.1 V&V に必要な実験情報の整理【R2】 ····································
	3.1.2 配管継手部の調査【R3】 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1-4
	3.1.3 Eーディフェンス実験の実施【R2-R4】 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	(1)試験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	(2)試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	① 加振試験結果概要 ······ 3.1-11
	② 振動特性 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	③ 破損モード・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.1.4 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	3.2 非弾性現象を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築
	(再委託先:横浜国大) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.2.1 局所非弾性現象が振動応答挙動に及ぼす影響の検証とモデル化【R3-R4】 · 3.2-1
	(1) 損傷を受けたエルボ配管の断面観察【R3】 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-1
	(2) エルボ継手から切り出した試験片の引張試験【R3】 ・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-6
	(3)ティ継手から切り出した試験片の引張試験【R4】 ・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-10
	(4)疲労試験【R3】 ······ 3.2-11
	(5)高精度シミュレーションのための GTN モデルの各パラメータの検討【R4】 3.2-12
	3.2.2 実測データを反映した配管系解析モデルの作成 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-14
	(1) 三次元計測データを用いたティ配管モデルの作成【R2-R3】 ・・・・・・・・・ 3.2-14
	(2)解析モデルの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.2.3 配管系の事前解析による局所非弾性挙動の定量化【R3-4】 ········· 3.2-17
	(1)パラメトリック解析【R4、1 ケースのみ R3】 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-17
	(2)パラメータ検討後の GTN モデル【R4】 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	3.2.4 E-ディフェンス実験の解析、不確かさ評価【R4】 ・・・・・・・・・・・ 3.2-20
	(1) E-ディフェンス実験の解析

目次

(2)	損傷配管から切り出した試験片の引張試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–21
(3)	溶接部の硬さ試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–22
3. 2. 5	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–23
参考文	て献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–24
3.3 高料	青度シミュレーションモデルの提案【R4】 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–1
3. 3. 1	モデル作成手順のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–1
3. 3. 2	V&Vの実施と信頼性評価(再委託先:横浜国大)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–3
(1)	継手形状	3. 3–3
(2)	材料特性 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 3–3
(3)	加速度波形・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–4
(4)	拘束条件	3.3–4
3.3.3	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3.3–4
参考文	と献	3. 3–5
3.4 研究	R推進·····	3. 4–1
参考文南	犬 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	3. 4–1
4. 結言・・・		·· 4–1
4.1 本研	研究のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	·· 4–1
4.2 今後	後の課題 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	·· 4–2

- Appendix 1 E-ディフェンス実験で使用したセンサおよび計測点名称
- Appendix 2 Eーディフェンス実験 データ集録内容
- Appendix 3 研究推進関係打合せ概要

表一覧

表 2.1-1	年次計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 3.1.1-1	材料強度ばらつき結果(STPT370)(単位:MPa)[6]·······3.1-2
表 3.1.2-1	入手したティ配管継手の機械的特性[10]
表 3.1.3-1	加振試験結果概要
表 3. 2. 1-1	引張試験結果(エルボ継手)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 3. 2. 1-2	引張試験結果(ティ継手)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2-10
表 3. 2. 2-1	モード毎の固有値の比較
表 3. 2. 3-1	GTN モデルのパラメータ水準および解析結果 ······ 3.2-18
表 3. 2. 4-1	加振履歴を考慮した解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 3. 2. 4-2	引張試験結果・・・・・・・

図一覧

図 2.1-1	全体計画
図 2.1-2	研究実施体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.1.1-1	エルボ配管肉厚計測結果(150Asch80)[6]・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.1-2
図 3.1.1-2	ティ配管肉厚計測結果(150Asch80)[6]·······························3.1-3
図 3.1.2-1	三次元形状計測結果 (ティ1) [10]
図 3.1.2-2	肉厚計測結果(ティ中央断面)[10]・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.1-5
図 3.1.2-3	材料試験片切り出し位置[10]
図 3.1.2-4	引張試験結果[10]······3.1-6
図 3.1.3-1	試験体形状および各部名称・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1-9
図 3.1.3-2	震動台上設置状況・・・・・・
図 3.1.3-3	固有値解析結果[6] · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 3.1.3-4	模擬地震波(h: 減衰定数) ····································
図 3.1.3-5	正弦波
図 3.1.3-6	ティ配管直上の直管におけるラチェット変形
	(外径増加に伴う塗装剥がれの発生。地震波 500% 3 回入力後) ・・・・・・ 3.1−14
図 3.1.3-7	伝達関数(重錘3位置)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.1-14
図 3.1.3-8	X 方向入力加速度と下部重錘 X 方向応答変位の関係 ············ 3.1-14
図 3.1.3-9	ティ配管損傷状況・・・・・・ 3.1-15
図 3.1.3-10	ティ配管浸透探傷試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.1.3-11	ティ配管直上直管の変形と浸透探傷試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3.2.1-1	ボイド観察位置・・・・・・ 3.2-1
図 3.2.1-2	マクロ断面観察結果【①き裂部】
図 3.2.1-3	マクロ断面観察結果【②き裂端部近傍】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3.2-2
図 3.2.1-4	マクロ断面観察結果【③周溶接部】・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

図 3.2.1-5 金属組織観察結果

	(①き裂部、上段:外面側、中段:肉厚中央、下段:内面側) ・・・・・・・	3. 2–3
🗵 3. 2. 1-6	金属組織観察結果(③周溶接部/内面側)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–3
図 3.2.1-7	SEM 観察結果【①き裂部、内面側】 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2-4
🗵 3. 2. 1-8	SEM 観察結果【①き裂部、健全部】 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2–4
図 3.2.1-9	SEM 観察結果【②き裂部端部近傍、内面側(き裂上端)】 ・・・・・・・・・	3. 2–5
図 3.2.1-10	SEM 観察結果【②き裂部端部近傍、健全部】 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–5
🗵 3. 2. 1-11	エルボからの試験片切り出し・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–6
🗵 3. 2. 1-12	引張試験片形状(エルボ継手)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–7
🗵 3. 2. 1-13	試験片外観(エルボ継手)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–7
🗵 3. 2. 1-14	応力ーひずみ曲線(エルボ継手)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–8
🗵 3. 2. 1-15	DIC によるひずみ分布評価	
	(エルボ継手、YNU-1、左:試験開始時、右:破断直前) ・・・・・・・・・・	3.2–9
🗵 3. 2. 1-16	DIC によるひずみ分布評価	
	(エルボ継手、YNU-2、左:試験開始時、右:破断直前) ・・・・・・・・・・	3. 2–9
図 3.2.1-17	ティ継手からの試験片切り出し・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–10
🗵 3. 2. 1-18	応力-ひずみ曲線(ティ継手、YNU2-1)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–11
🗵 3. 2. 1-19	低サイクル疲労試験片(ASTM E606 準拠) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2–11
🗵 3. 2. 1-20	低サイクル疲労試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–12
🗵 3. 2. 1-21	同定したパラメータセットと、それによる応力-ひずみ曲線	3. 2–13
図 3. 2. 2-1	事前解析モデルの作成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–14
図 3.2.2-2	事前解析用モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–15
🗵 3. 2. 2-3	モード1変形(2.876 Hz、変形倍率:8.4)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–16
🗵 3. 2. 3-1	入力加速度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 2–19
🗵 3. 2. 3-2	解析結果(Case 1、 80 s、左:累積相当塑性ひずみ、右:空隙率)・・・	3. 2–19
🗵 3. 2. 3–3	解析結果(空隙率、GTN モデルのパラメータ修正後、80 s) ・・・・・・・・	3. 2–20
🗵 3. 2. 4–1	相当塑性ひずみ分布(加速度波形倍率:500%)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–20
🗵 3. 2. 4-2	累積相当塑性ひずみ分布(加速度倍率:500%)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–21
🗵 3. 2. 4–3	試験片(上∶未損傷試験片、下∶損傷試験片)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–22
🗵 3. 2. 4-4	硬さ試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–23
🗵 3. 3. 1-1	JIS 規格[7]に規定されるティ配管の寸法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3.3-2
図 3.3.1-2	ティ配管の主管・分岐管接続形状の例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–2
図 3. 3. 2-1	高精度シミュレーション作成手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 3–3
図 3.3.2-2	加速度波形の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3.3–4

略語一覧

ASTM	American Society for Testing and Materials (米国試験标				
	料協会)				
BDBE	Beyond Design Basis Event (設計基準を超えた事象)				
DIC	Digital Image Correlation (デジタル画像相関法)				
FEM	Finite Element Method (有限要素法)				
GTN	Gurson-Tvergaard-Needleman (修正Gurson則の固有名称)				
MPC	Multi-point constraint (多点拘束)				
PT	Penetrant Test (浸透探傷試験)				
SEM	Scanning Electron Microscope (走査型電子顕微鏡)				
V&V	Verification & Validation (検証と妥当性確認)				

用語一覧

実大三次元震動破壊実験施	防災科学技術研究所が兵庫県三木市に所有する世界最大の三次				
設	元震動台。愛称: E-ディフェンス。				
振動台 (震動台)	地震の揺れを再現して構造物の地震時挙動を調査する試験装				
	置。一般的には「振動台」と表記するが、E-ディフェンスで				
	は「震動台」の表記を使用する。				
ラチェット変形	内圧の負荷された配管で、塑性域の繰り返し荷重に伴い配管の				
	外径が増加する変形。				
浸透探傷試験	材料の非破壊検査手法の1 つで、浸透液と現像液を塗布して表				
	面に開口している欠陥を検出し、観察する試験方法。				
デジタル画像相関法	試験片表面にスプレーなどで塗布したランダムパターンと呼ば				
	れる模様の変化を画像解析することで、表面ひずみ分布の時間				
	的変化を解析する手法。				
	(島津テクノリサーチ Web サイトより。				
	https://www.shimadzu-techno.co.jp/annai/tes/s09_05.html				
	参照日:2023年4月15日)				
空隙率	参照日:2023 年 4 月 15 日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合				
空隙率	参照日:2023 年 4 月 15 日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。				
空隙率 0.2%耐力	 参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 				
空隙率 0.2%耐力	 参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と 				
空隙率 0.2%耐力	参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と みなして用いる。				
空隙率 0.2%耐力 ASTM 規格	参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と みなして用いる。 世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称				
空隙率 0.2%耐力 ASTM 規格	参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と みなして用いる。 世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称 American Society for Testing and Materials:米国試験材料				
空隙率 0.2%耐力 ASTM 規格	 参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点とみなして用いる。 世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称American Society for Testing and Materials:米国試験材料協会)が策定・発行する規格。 				
空隙率 0.2%耐力 ASTM 規格 MPC 拘束	参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と みなして用いる。 世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称 American Society for Testing and Materials:米国試験材料 協会)が策定・発行する規格。 1つの独立節点と、その他の複数の従属節点との間に多点拘束方				
空隙率 0.2%耐力 ASTM 規格 MPC 拘束	参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と みなして用いる。 世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称 American Society for Testing and Materials:米国試験材料 協会)が策定・発行する規格。 1つの独立節点と、その他の複数の従属節点との間に多点拘束方 程式を作成し、関係性を定義する有限要素法解析の手法。				
空隙率 0.2%耐力 ASTM 規格 MPC 拘束	参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と みなして用いる。 世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称 American Society for Testing and Materials:米国試験材料 協会)が策定・発行する規格。 1つの独立節点と、その他の複数の従属節点との間に多点拘束方 程式を作成し、関係性を定義する有限要素法解析の手法。 (サイバネットシステム CAE 用語辞典より(一部改変)。				
空隙率 0.2%耐力 ASTM 規格 MPC 拘束	参照日:2023年4月15日) Gurson モデルで定義されるパラメータ。材料中のボイドの割合 を示す。 材料の引張試験を行った時、除荷後に 0.2%の永久ひずみが残る 応力のこと。降伏点が明瞭に現れない材料において、降伏点と みなして用いる。 世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称 American Society for Testing and Materials:米国試験材料 協会)が策定・発行する規格。 1つの独立節点と、その他の複数の従属節点との間に多点拘束方 程式を作成し、関係性を定義する有限要素法解析の手法。 (サイバネットシステム CAE 用語辞典より(一部改変)。 https://www.cybernet.co.jp/ansys/glossary/mpc.html				

概略

日本は地震国であり、新技術を社会実装する際には高度な耐震信頼性が求められる。既存の軽 水炉では、これまでに多数の実験や解析により設計に必要な知見が蓄積されてきたが、新技術と なる次世代原子力システムでは経験による蓄積が不足する分、最新の計算科学を取り入れたデジ タルツインを活用した設計が期待される。

デジタルツインを用いた設計・製造技術は自動車分野などをはじめとするさまざまな産業分野 で普及しつつあるが、社会実装段階においては計算結果の品質保証が重要な要素の1つとなる。 計算の品質を保証する「検証と妥当性確認」(Verification & Validation:以下、V&Vと略記。) は産業分野に関わらず重要な技術として、国内外でさまざまな活動が行われている。原子力分野 においても、日本原子力学会が現在の原子力設備を対象とした V&V に関するガイドラインを 2015 年に発行した。試作による検証が困難な原子力施設において計算による検討は必須であり、安全 性の面からも計算の品質確保は不可欠であるが、現在は主に弾性解析に基づく保守的な評価が行 われ、デジタルツインとは大きく乖離した解析モデルが使用されているのが実情である。

原子力発電施設の耐震設計に関する動向では、2011年の東北地方太平洋沖地震における福島第 一原子力発電施設の事故を受け、入力地震動が増加する傾向にある。また設計の想定を超えた条 件(Beyond Design Basis Event:以下、BDBEと略記。)に対する配慮が求められるようになっ ている。これらの動向を踏まえると、次世代原子力システムの耐震設計・耐震性能評価では、終 局挙動も含めた非弾性挙動の適切な評価が重要であり、原子力施設のデジタルツイン構築におい て、実現象を正確に再現するためには非弾性現象を取り込んだモデリングは不可欠である。しか しながら、その実装にあたっては以下の2点が課題になる。

- ① 非弾性現象を取り込んだ高精度シミュレーションモデルの構築
- 高精度シミュレーションモデルの V&V

本研究では、原子力施設の重要構造物の1つである配管系を対象とし、終局強度の評価も含め た非弾性挙動を再現できる高精度シミュレーションモデルを構築する。また、世界最大の震動台 である実大三次元震動破壊実験施設(以下、E-ディフェンスと表記。)を用いた検証実験を実 施し、シミュレーションモデルの V&V に必要となるデータを取得する。これらの実施により、次 世代原子力システムにおいて、デジタルツインに基づく耐震信頼性評価法に必要な基盤データの 構築を進めることを目的とした。

この目的に対し、本研究では以下の研究項目を実施した。

- I. 高精度シミュレーションモデルの V&V に活用する実測データの取得
- Ⅱ. 非弾性現象を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築
- Ⅲ. 高精度シミュレーションモデルの提案

令和2年度~令和4年度の3ヵ年で得られた成果の概要は以下の通りである。

I. 高精度シミュレーションモデルの V&V に活用する実測データの取得

配管系が地震荷重のもとで破壊に至るまでの実測データ取得を目的とし、E-ディフェンスを使用して配管系試験体に対する加振試験を実施した。E-ディフェンス実験の実施により、配管系の弾性域から終局挙動までのデータを取得した。加振試験によりティ配管部の損

傷データを取得するとともに、ティ配管部直上直管でのラチェット変形など、予期していた 変形・損傷以外のデータも取得した。また、E-ディフェンス実験に加え材料強度・継手形 状のばらつき調査、E-ディフェンス実験に使用するティ配管の形状および材料強度の実測 を行い、V&V に活用できる実測データを取得した。

Ⅱ.非弾性現象を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築

配管材料の実測データを用いて、非弾性挙動の影響の精緻化を検討した。損傷を受けたエルボ配管のボイド断面観察から、き裂近傍で微小領域での損傷が認められ、Gurson-Tvergaard-Needleman(以下、GTNと略記。)モデル適用の有効性を確認した。また、配管から切り出した試験片を用いた引張試験を行い、GTNモデルのパラメータ最適化手法を構築した。また、形状および材料モデルに実測データを反映した精緻なE-ディフェンス実験の事前解析モデルを作成した。さらに、GTNモデルの主要パラメータであるボイド生成項のパラメータである平均ひずみ、ひずみ偏差の標準パラメータを設定し、パラメトリック解析を行い、解析モデルを検証した。E-ディフェンス実験後には実験データを用いて事後解析と不確かさ評価を行った。

Ⅲ. 高精度シミュレーションモデルの提案

配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルの作成手順を示し、研究項目 I で取得 した実験データに基づき構築した解析モデルの信頼性を定量的に評価する V&V を行い、デジ タルツイン構築の基礎を提供した。また、簡易な解析モデル構築に向け、三次元形状計測結 果によらないティ配管のモデル化方針を示した。

本研究の実施により、配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルを構築するとともに、 シミュレーションモデルの不確かさ評価に不可欠である配管系の破壊に至るまでの弾塑性地震応 答の実測データ、形状・材料強度の実測データを取得した。

本研究を実施する中で、配管系の基本的な構成要素の1つであるティ配管については、実際の 製作物は規格値に対し形状、材料特性とも大きなばらつきがあること、また三次元形状計測結果 によらない形状のモデル化手法を確立するには実測形状のデータを拡充する必要のあることが明 らかになった。従って、今後より信頼性の高い配管系解析モデルを構築するためには、継手メー カーとの協働により製造プロセスを踏まえた実態形状、実態強度の把握が必要である。これらの 調査結果をティ配管の実測情報のデータベースとしてまとめ、シミュレーションモデル構築に活 用することで、実物のない設計段階でも実物の挙動を精度良く評価するデジタルツイン実現に資 すると考えられる。

また、本研究では常温条件下での炭素鋼配管系を対象としたが、次世代原子カシステムで想定 される実際の使用環境下、特に高温条件下での挙動や、異なる材料で製作された配管系に対して 本研究で構築した手法を拡張することも今後の課題として挙げられる。 1. はじめに

日本は地震国であり、新技術を社会実装する際には高度な耐震信頼性が求められる。既存の軽 水炉ではこれまでに多数の実験や解析により設計に必要な知見が蓄積されてきたが、新技術とな る次世代原子力システムでは経験による蓄積が不足する分、最新の計算科学を取り入れたデジタ ルツインを活用した設計が期待される。

現在の原子力発電施設の耐震設計では、建屋は集中質点モデル、機器・配管系は線形はり要素 による解析モデルが使用され、安全面への配慮から主に弾性解析に基づく保守的評価が実施され ている。研究的には原子炉全体を詳細にモデル化した大規模な三次元有限要素法による弾塑性地 震応答解析も実施されているものの[1]-[3]、材料のモデル化や非弾性挙動のモデル化には課題 が残されている。

また、2011年の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を受け、設計で考慮する入力地震動が引き上げられる傾向にあること、また設計基準の想定を超えた条件(BDBE) に対する配慮が求められるようになっていることなどを踏まえると、次世代原子力システムの耐 震設計・耐震性能評価では終局挙動も含めた非弾性挙動の適切な評価が重要であり、原子力施設 のデジタルツイン構築において非弾性挙動を取り込んだシミュレーションモデルの構築が不可欠 であるが、その実装にあたっては以下のようなボトルネックがある。

① 非弾性現象を取り込んだ高精度シミュレーションモデルの構築

高精度シミュレーションモデルの V&V

①に関しては、例えば、安全性評価で重要となる終局挙動の評価では、破壊に至るまでの多様 な非弾性現象のモデリングが必要になる。学術的には個々の破壊現象について詳細な検討が行わ れてきており、ある程度の破壊予測が可能となっているが、実現象として構造物上に顕在化する 破壊現象を正確に予測するには至っていない。また、構造物の局所的な塑性化や支持部における 摩擦などの非弾性現象は構造物の減衰挙動に影響を及ぼすが、従来の耐震設計では減衰定数を保 守的に設定することで安全裕度を確保してきたため、局所的な非弾性現象のモデル化はこれまで 十分な検討が行われてきていない。

②については、破壊現象までを再現した試験データ自体が極めて限られており、かつ既往の試 験データは V&V への活用を意図して実施されたものではないため、デジタルツインの構築に不可 欠な不確かさ評価などを実施するにはデータの不足がある。

そのような背景を踏まえ、本研究では、原子力施設の重要構造物の1つである配管系を対象と し、これら2つのボトルネックを解消し、終局強度の評価も含めた非弾性挙動を再現できる高精 度シミュレーションモデルを構築することを目的とする。この目的のため、世界最大の震動台で あるEーディフェンス[4]を用いた検証実験を実施し、シミュレーションモデルの V&V に必要と なるデータを取得する。これらの実施により、次世代原子力システムにおいて、デジタルツイン に基づく耐震信頼性評価法に必要な基盤データの構築を進めることとした。

参考文献

- [1] 西田明美、鈴木喜雄、木野千晶、鵜沢憲、「原子力施設のための3次元仮想振動台の研究開発:(1)全体概要」、日本原子力学会年会・大会予稿集、2011f(0)、 pp. 381 (2011)
- [2] 吉村忍、小林敬、秋葉博、鈴木智、荻野正雄、「3次元有限要素法による沸騰水型原 子炉のフルスケール地震応答解析」、日本原子力学会和文論文誌、vol.11、No.3、 pp. 203-221 (2012)
- [3] 宮村倫司、吉村忍、「3次元有限要素法による沸騰水型原子力発電所の弾塑性地震応 答解析」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp. 481-482 (2018)
- [4] 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター、 https://www.bosai.go.jp/hyogo/profile/profile.html (参照日:2023年4月9日)

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務では以下の3項目の研究を実施する。

- I.高精度シミュレーションモデルのV&Vに活用する実測データの取得 高精度シミュレーションモデルの確立にはその信頼性を検証できる物理データの取得が不 可欠である。V&V プロセスを実現するため、配管系の破壊試験実施の実績があるEーディフ ェンスを使用し、安全性評価で重要となる終局挙動に至るまでの加振試験を行い、弾塑性応 答挙動と終局強度に関わる加振試験データを取得する。また、加振試験と並行し、これまで の研究では十分に調査されていない配管継手部の形状や材料のばらつきを調査し、解析モデ ルの不確かさ評価に反映する。
- Ⅱ.非弾性現象を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築(再委託先:横浜国大) 配管系の弾塑性地震応答評価で考慮すべき非弾性現象は多岐にわたるが、既往研究による 試験結果などを鑑み、本研究では対象とする非弾性現象を以下の2点に絞って検証する。
 - 1) 非比例負荷を受ける材料の破壊過程のモデル化
 - 2) 支持部やバルブ等の配管系内要素の接触荷重による非弾性挙動のモデル化

また、形状における不確かさの影響を考慮するため、研究項目 I で取得された形状データの解析モデルへの反映、E – ディフェンス実験で取得したデータを用いた V&V を進める。

Ⅲ. 高精度シミュレーションモデルの提案(再委託先(一部):横浜国大)

I、Ⅱで得られた成果をまとめ、配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルの作 成手順を示す。また、手順に従った解析モデルの信頼性を定量的に評価する V&V を行い、デ ジタルツイン構築の基礎を提供する。また、実務で使用しやすい、より簡易な解析モデルを 構築するための情報を整理し、配管系の耐震性評価の高度化につなげる。

本業務の全体計画を図 2.1-1 に、研究実施体制を図 2.1-2 に示す。本業務の実施期間は令和 2 年度から令和 4 年度までの 3 ヵ年である。表 2.1-1 に年次計画を示す。

	令和2年度	令和3年度	令和4年度
I. 高精度シミュレ	既往試験データの再調査	継手入手、形状計測	
に活用する実測デー	試験体基本設計	試験体製作、振動特性調査	- E-ディフェンス実験
タの取得			
	非弾性モ	デルの基礎特性の検証	
Ⅱ. 非弾性現象を評価できる高精度シミ	事前解析モデルの構築		
ュレーションモデル の構築(再委託先:		事前解析モデルによる	パラメトリック解析
横浜国大)			材料損傷分析
			· ミュレーションモデルの
Ⅲ. 高精度シミュレ		作成手順非	よび簡易モデル構築手法
ーションモデルの提 <i>中 (エ チ × ト (</i>		のまとめ、	V&V の実施、デジタルツ
系 (再		イン構築の	基礎提供
研究推進		専門家との意見交換	
	まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

表 2.1-1 年次計画



図 2.1-1 全体計画



* エフォート率は課題提案時のもの

図 2.1-2 研究実施体制

3. 業務の実施内容および成果

3.1 高精度シミュレーションモデルの V&V に活用する実測データの取得

3.1.1 V&V に必要な実験情報の整理【R2】

過去に研究代表者らが実施してきた配管系の加振試験データを再調査し、V&V に必要とな ると考えられる情報のうち、材料強度と形状ばらつきの情報をまとめた。調査結果の一例と して、高温配管用炭素鋼鋼管 STPT370[5]の配管の材料強度ばらつき結果を表 3.1.1-1 に、ま た配管サイズ 150Asch80 (公称外径: 165.2 mm、肉厚: 11.0 mm)のエルボ配管およびティ配 管の肉厚計測結果を図 3.1.1-1、図 3.1.1-2 に示す[6]。調査結果より、材料強度のうち降伏 応力については、ミルシートに基づく実態強度は JIS 規格[5]で定められている下限値に対 し 1.27~1.4 倍程度の強度となっていることが確認された。また、形状に関しては、エルボ 配管の肉厚は腹側でやや厚く背側でやや薄い傾向にあること、JIS 規格値[7]に対する実測肉 厚の平均値の比は 1.0~1.08 程度であることが確認された。一方、ティ配管の肉厚は図 3.1.1-2 に示すように、全体として JIS 規格値に対して厚肉であること、継手内部でも肉厚 分布が大きくばらつくことが確認された。JIS 規格値に対する実測肉厚の平均値の比は、全 ての肉厚計測値の平均に対しては 1.25 程度であるが、肉厚が比較的厚く分布している位置 (ティ主管の底部にあたる位置)では 1.30~1.38 程度であった。ティ配管の形状ばらつき は有限要素法(FEM)解析結果に影響することが報告されており[8]、[9]、シミュレーショ ンモデルの高精度化には実測形状の情報が必要であると考えられたことから、本研究では配 管系試験体に使用するティ配管の三次元形状の取得、肉厚・外径計測を行うこととした。

	JIS	配管	具十位	具正体	亚均位	標準	変動	平均值/
	規格値	種別	取入恒	取小胆	平均恒	偏差	係数	JIS 規格値
	215	直管	352	256	300.4	27.2	0.09	1.40
$\sigma_{ m y}$		エルボ	318	288	304.2	11.8	0.04	1.41
		ティ	286	258	272	19.8	0.07	1.27
	370	直管	488	447	468.4	15.0	0.03	1.27
$\sigma_{\!\mathrm{u}}$		エルボ	476	447	464.2	11.8	0.03	1.25
		ティ	461	434	447.5	19.1	0.04	1.21

表 3.1.1-1 材料強度ばらつき結果(STPT370)(単位:MPa)[6]

σy:降伏応力(0.2%耐力)、σu:引張強さ



図 3.1.1-1 エルボ配管肉厚計測結果(150Asch80)[6]



(a) 肉厚計測位置



(b) 肉厚計測結果

図 3.1.1-2 ティ配管肉厚計測結果(150Asch80)[6]

3.1.2 配管継手部の調査【R3】

3.1.1 で述べた形状ばらつきの調査結果[6]から、ティ配管では肉厚ばらつきが大きく、実 測形状の取得が必要であると考えられたため、E-ディフェンス実験で使用する配管系試験 体の一部となるティ配管継手を入手し、形状計測と材料試験を行った[10]。

ティ配管継手の種別とサイズは高温配管用炭素鋼鋼管 STPT370[5]、100Asch40(公称値: 外径114.3 mm、肉厚6.0 mm)とし、同一ロットで製作されたものを3個入手した。表3.1.2-1に入手したティ配管継手のミルシートに基づく機械的特性を示す。

これらのティ配管継手を以下ティ 1~ティ 3 とする。このうち配管系試験体に使用するテ ィ配管継手はティ 1 とし、三次元形状計測を実施した。三次元形状計測に加え、3 体全てに ついてノギスによる外径計測と超音波板厚計測計による肉厚計測を実施した。図 3.1.2-1 に 三次元形状計測結果を、図 3.1.2-2 にティ配管中央断面の肉厚計測結果を示す。肉厚分布の 傾向は令和 2 年度に実施した既往実験におけるティ配管の肉厚分布傾向の調査結果と同様で あったが、公称値に対する実測肉厚の比は、令和 2 年度の調査結果では最大で 1.38 程度で あったのに対し、今回調査したティ配管継手ではより厚肉となっている傾向が確認された。

形状計測後、ティ2より材料試験用試験片を切り出し、引張試験と繰り返し疲労試験を実施した。図3.1.2-3に試験片の切り出し位置を、図3.1.2-4に引張試験から得られた応力ひずみ関係を示す。引張試験で得られた0.2%耐力の平均値は347 N/mm²であり、JIS 規格値に対する実態強度の比を取るとミルシート値では1.40、引張試験結果では1.62 となった。引張試験結果では降伏応力がミルシート値よりもさらに高く、かつ図3.1.2-4 に示したように明瞭な降伏点が現れていなかった。これはティ配管継手形成時の加工硬化の影響が現れているものと考えられる。

	耐力 (σ_{y}) [N/mm ²]	引張強さ(σ_{u}) [N/mm ²]	伸び [%]
ミルシート	300	492	34
JIS 規格規定值[5]	215	370	28

表 3.1.2-1 入手したティ配管継手の機械的特性[10]



図 3.1.2-1 三次元形状計測結果 (ティ1) [10]



図 3.1.2-2 肉厚計測結果 (ティ中央断面) [10]



図 3.1.2-3 材料試験片切り出し位置[10]



図 3.1.2-4 引張試験結果[10]

3.1.3 E-ディフェンス実験の実施【R2-R4】

本研究では、配管系の弾塑性応答挙動と終局強度に関わる加振試験データを取得するため、 防災科学技術研究所(以下、防災科研と略記。)の有するE-ディフェンスを使用した加振 試験を実施した。

[R2-R3]

令和2年度には、E-ディフェンス実験で使用する配管系試験体の基本条件検討を行い、 試験体形状を決定した。既往研究ではティ配管部における損傷事例が少ないため、E-ディ フェンス実験ではティ配管部の損傷データを取得することを意図して試験体形状を検討した。 また、入力地震波1種に対する設計解析および弾塑性時刻歴応答解析を実施し、E-ディフ ェンスを使用した加振試験で現行の設計基準を超えるレベルの加振が可能であることを確認 した[6]。

令和3年度には、E-ディフェンス実験で使用する配管系試験体を製作し、打撃試験等で 弾性域の基本特性を調査した。基本特性調査の結果、1次固有振動数は令和2年度に実施し た固有値解析結果とよく一致した。また、支持構造物と配管との間の静摩擦係数を取得する とともに、摩擦特性に対する塗装の影響を確認した[10]。

【R4】

(1) 試験条件

令和4年度は、令和3年度に製作した配管系試験体を使用した加振試験を実施した。図3.1.3-1に試験体形状と各部名称を、図3.1.3-2に震動台への設置状況を示す。試験体に使用した配管種別およびサイズは高温配管用炭素鋼鋼管STPT370[5]、100Asch40(外径:114.3 mm、肉厚:6.0 mm)とした。試験体は5箇所のエルボと1箇所のティを有し、立ち上がり部を含むやや複雑な立体的な形状とした。また、試験体には加振試験時の応答増幅と試験体固有振動数の調整を目的として1箇所あたり400 kgの重錘を設置した。図3.1.3-3に設計時に実施した固有値解析結果を示す[6]。

試験体は設置・撤去が容易となるよう2箇所のフランジで分解・組立する構成とした。フ ランジにより分割された試験体のうちティ配管を含む部分には注水し、6.8 MPaの内圧を負 荷した。

加振試験では模擬地震波を用いた三軸同時加振と、正弦波を用いた Y 方向単軸加振を行っ た。また、地震波加振、正弦波加振に加え、振動数帯域 0.2 Hz~35 Hz の広帯域ランダム波 加振を行い、試験体の振動特性を把握した。模擬地震波は、実地震波の位相を有し、試験体 の 1 次、2 次モードを主として励起するよう 1.5 Hz~5.5 Hz の帯域を有する狭帯域ランダム 波とした。図 3.1.3-4 に加振試験で使用した模擬地震波の加速度時刻歴波形と加速度応答ス ペクトルを、図 3.1.3-5 に正弦波の加速度時刻歴波形を示す。加振試験では図 3.1.3-4 に示 す模擬地震波に 25%~500% (震動台加振限界)までの倍率をかけた入力を使用し、弾性域か ら弾塑性域に至るまでの応答を取得した。また、倍率 500%の地震波加振により試験体が損傷 しない場合、正弦波加振により試験体の損傷までのデータを取得することとした。ここで、 事前の設計解析では、模擬地震波を倍率 100% (等倍)で入力した時にティ部が弾性域を超え るという評価であった[10]。

加振試験では震動台上および配管系の加速度(3 方向)、アンカ部、ティ部、エルボ部周

辺のひずみ、下部水平配管重錘の X 方向応答変位、ティ部の分岐管および主管部の応答変位、 内圧をサンプリング振動数1 kHz で集録した。また、これらの物理データに加え、ノギスに よるティ部の外径計測、試験体全景およびティ部の拡大映像の撮影を行った。Appendix-1に 計測に使用したセンサ種別および計測箇所、センサ命名則をまとめる。なお、計測箇所のう ちティ配管部ひずみゲージ設置位置は、3.2.3 で実施した事前解析結果を参照し、破損が生 じると予測された箇所に貼付した。



(a) 試験体形状(単位:mm)

(b) 試験体各部名称





図 3.1.3-2 震動台上設置状況



図 3.1.3-3 固有値解析結果[6]



3.1-10

(2) 試験結果

① 加振試験結果概要

加振試験は令和4年8月~9月にE-ディフェンスで実施した。表3.1.3-1に加振試験 結果概要を示す。E-ディフェンス実験の全てのデータ集録内容は Appendix-2 にまとめ た。模擬地震波による加振では、100%入力時にティ配管外面の計測ひずみが 2900 µɛに達 し、塑性域に達したことを確認した。その後入力レベルを増幅して加振を継続したとこ ろ、ティ配管部およびティ配管直上部の直管において塑性域に達するひずみを確認する とともに、ラチェット変形の発生が確認された(図 3.1.3-6)。500%に増幅した加振を 5 回繰り返したが試験体の損傷には至らなかったため、目標加速度 9.8 m/s²の正弦波加振 を実施した。その結果、正弦波加振 2 回目においてティ配管部分でき裂が貫通し、加振 試験を終了した。

2 振動特性

図 3.1.3-7 に広帯域ランダム波加振試験において重錘 4 位置で計測した加速度から得 られた伝達関数を示す。図 3.1.3-7 に示すように、2.81 Hz に Y 方向の卓越が、6.10 Hz に X 方向の卓越が認められる。これらはそれぞれ設計時に実施した固有値解析結果(図 3.1.3-3)の1次モードおよび3次モードに相当し、いずれも固有値解析と実験結果はお おむね一致していた。一方、固有値解析で得られた2次モードは広帯域ランダム波加振 ではほとんど現れなかった。固有値解析結果で得られた2次モードは下部水平配管が X 方 向に振動するモード形状であるが、2 つの下部水平配管の間に設置されているサポート 4 位置における摩擦の影響で、入力加速度レベルの小さい広帯域ランダム波加振では 2 次 モードが励起されなかったためと考えられる。図 3.1.3-8 に X 方向入力加速度の最大値 と下部水平配管重錘部の X 方向応答変位 (D01)の最大値の関係を示す。図 3.1.3-8 に示 すように、入力加速度 6 m/s² 程度までは D01の計測結果は極めて小さく、入力加速度レ ベルの小さい領域では摩擦の影響が大きかったことが確認できる。また、入力加速度が 大きくなると摩擦よりも慣性力が大きくなり、配管管軸方向の応答変位が発生したこと が確認できる。

③ 破損モード

3.1.2(2)①で述べたように、加振試験ではティ配管部でき裂が貫通した。試験終了後のティ配管部外観を図 3.1.3-9 に、ティ配管内外面の浸透探傷試験(PT)結果を図 3.1.3-10 に示す。PT 試験結果では、ティ配管の内面には貫通き裂のほか、その周りに多くの未完通き裂が確認された。これらの観察結果より、本加振試験の破損モードは疲労損傷であり、加振の繰り返しにより配管内面に疲労き裂が発生・成長し、配管外面に進展することで貫通き裂となったと考えられる。

既往研究で実施されたティ配管単体を対象とした研究[11]、[12]より、面内曲げを受けるティ配管の破損モードは肩部における管軸方向の疲労き裂となることが知られている。これらの既往研究では疲労き裂の発生範囲は肩部に限られていた。一方、本加振試験では最初に肩部においてき裂が発生した点は既往研究と同様であったが、き裂貫通後にも地震波入力が継続したため、主管周方向および分岐管軸方向へき裂が進展し、最終的な貫通き裂は図 3.1.3-9(a)に示すように大規模なものとなった。また、最初にき裂が

貫通した面と反対側でも貫通き裂が発生した(図 3.1.3-9(b))。既往研究で報告されて いるき裂よりも大型なき裂となった理由には試験体形状が影響したものと考えられる。 既往研究ではティ配管単体を試験対象としているのに対し、本試験では立体配管系を使 用しており、当該ティ配管部の上部には大きな重錘が設置されている。そのため、ティ 配管肩部で疲労き裂が貫通したのち、立体配管系としての荷重バランスが影響し、主管 周方向および分岐管軸方向へき裂が進展したと考えられる。

3.1.2(2)①で述べたように、加振試験中、ティ配管直上の直管でもラチェット変形の 発生と塗装剥がれが確認された。加振試験終了時の当該直管の外観と PT 試験結果を図 3.1.3-11 に示す。ラチェット変形の顕著な位置ではき裂の発生は確認されなかったが、 溶接部の近傍では PT 試験によりわずかな指示が確認された。これは、溶接部近傍ではラ チェット変形が拘束され、局所的に変形が集中するため局所ひずみが大きくなり、負荷 の繰り返しにより疲労き裂が生じたものと考えられる。

これらのE-ディフェンス実験を通じて取得したデータは項目 3.2 で実施する解析モデル 構築に提供した。

	西 沖に封むて位本	入力加速度(計測値)			
	「「「「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」「」」「	$[m/s^2]$			備考
		Х	Y	Z	
広帯域				•	1 次モード : 2.81 Hz
ランダム波加振	N/A	0.25~0.89			2 次モード:不明
(X、Y、Z 各軸)					3 次モード: 6.10 Hz
	25%	0.54	0.65	0.27	
	50%	1.1	1.4	0.64	
	75%	1.8	2.3	0.97	
	100%	2.5	3.2	1.2	ティ1外表面ひずみで塑 性域到達を確認
	125%	3.1	4.1	1.6	
	150%	3.9	5.1	1.9	
	200%	5.7	6.9	2.7	
地長仮加派 (二軸回時)	250%	7.6	9.0	3.6	
(二甲间内叶子)	300%	9.6	11	4.3	
	350%	12	13	5.2	
	400%	14	15	7.0	
	450%	16	17	7.7	
	500%	18	20	9.1	 5回繰り返し ティ1および直上直 管でのラチェット変 形確認
正弦波加振 (Y 軸)	100%	0.3	15	2.0	 ・ 2回繰り返し ・ 2回目の途中でき裂 貫通

表 3.1.3-1 加振試験結果概要



図 3.1.3-6 ティ配管直上の直管におけるラチェット変形 (外径増加に伴う塗装剥がれの発生。地震波 500% 3 回入力後)







図 3.1.3-8 X方向入力加速度と下部重錘 X方向応答変位の関係





(a) Y 軸マイナス側 外観

(b)Y 軸プラス側 外観





(i) 外面





(ii) 内面

(a) Y 軸マイナス側

(ii) 内面(b)Y 軸プラス側





(a) 全加振終了後の外観

浅い表面き裂



(b) PT 結果

図 3.1.3-11 ティ配管直上直管の変形と浸透探傷試験結果

3.1.4 まとめ

本研究項目では高精度シミュレーションモデルの V&V に活用する実測データの取得を目的 とし、配管系試験体に対するE-ディフェンスを使用した加振試験を実施した。既往研究で はティ配管部における損傷事例が少ないことを鑑み、E-ディフェンス実験ではティ配管部 の損傷データを取得することを意図して試験体形状を検討した。

E-ディフェンス実験の実施により、配管系の弾性域から終局挙動までのデータを取得した。加振試験により当初目的通りティ配管部の損傷データを取得するとともに、ティ配管部 直上直管でのラチェット変形など、予期していた変形・損傷以外のデータも取得した。

また、E-ディフェンス実験と合わせ継手形状・材料強度のばらつき調査、E-ディフェ ンス実験に使用するティ配管の形状および材料強度の実測を行い、V&V に活用するデータを 取得した。

参考文献

- [5] 日本鉄鋼連盟、「高温配管用炭素鋼鋼管」、日本産業規格 JIS G3456 (2019)
- [6] 防災科学技術研究所、「地震荷重を受ける配管系の非弾性を考慮した高精度シミュレーションモデルの構築 令和2年度委託業務成果報告書」(2021)
- [7] 日本金属継手協会、日本規格協会、「配管用鋼製突合せ溶接式管継手」、日本産業 規格 JIS B2312 (2015)
- [8] T. Watakabe, I. Nakamura, A. Otani, M. Morishita, T. Shibutani, and M. Shiratori, "Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis Part 4- Second Round Benchmark Analyses with Stainless Steel Piping Component Test", Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2017-65324. (2017)
- [9] 中村いずみ、澁谷忠弘、「同径ティ配管の実測形状と FEM 解析による強度評価結果 への影響」、日本機械学会 2020 年度年次大会、S10108 (2020)
- [10] 防災科学技術研究所、「地震荷重を受ける配管系の非弾性を考慮した高精度シミュ レーションモデルの構築 令和3年度委託業務成果報告書」(2022)
- [11] T. Watakabe, K. Tsukimori, A. Otani, M. Moriizumi, and N. Kaneko, "Study on Strength of Thin-Walled Tee Pipe for Fast Breeder Reactors Under Seismic Loading", Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2014-28619. (2014)
- [12] K. Yoshino, R. Endou, T. Sakakida, H. Yokota, T. Fujiwaka, Y. Asada, and K. Suzuki, "Study on Seismic Design of Nuclear Power Plant Piping in Japan Part 3: Component Test Results", Proceedings of the ASME 2000 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 407, pp. 131-137. (2000)

- 3.2 非弾性現象を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築(再委託先:横浜国大) 終局状態に近いところまで高精度なシミュレーションを実施するため、実験結果を正確に 再現できる高精度シミュレーションモデルの構築に向けて、以下の業務を実施した。
 - 3.2.1 局所非弾性現象が振動応答挙動に及ぼす影響の検証とモデル化【R3-R4】
 - (1) 損傷を受けたエルボ配管の断面観察【R3】

過去に実施された中規模配管振動実験[13]で破壊したエルボ配管に対し、き裂近傍の損 傷状態について断面観察を実施した。図 3.2.1-1 に示すように、き裂発生個所に沿って① き裂部、②き裂端部近傍、③周溶接部の 3 箇所から観察資料を切り出し、走査型電子顕微 鏡(以下、SEM と略記。)による断面観察を実施した。観察は、管長手方向横断面につい て、板厚方向に外面側、中央部、内面側の 3 箇所について行った。観察面は、研磨後コロ イダルシリカで仕上げた。図 3.2.1-2、図 3.2.1-3、図 3.2.1-4 は、それぞれ①き裂部、 ②き裂端部近傍、③周溶接部のマクロ断面観察結果を示す。



図 3.2.1-1 ボイド観察位置

図3.2.1-5は、①き裂部の金属組織観察結果を示す。母材の組織はフェライト+パーラ イト組織を呈していた。また、微細な介在物が点在していることが確認された。図 3.2.1-6は、周溶接部(内面側)の組織観察結果を示す。1.5 mm 程度の溶接熱影響部が観 察され、細粒部においても微細な介在物が観察された。

図 3.2.1-7 は、①き裂部内面側における断面観察結果を示す。き裂近傍において、5~ 10 µm 程度の微細な空洞が確認された。図 3.2.1-8 は、①き裂部近傍のき裂から離れた健 全部での観察結果を示す。同様に、数µm 程度の微細な空洞が確認された。図 3.2.1-9 は、 ②き裂端部近傍における断面観察結果を示す。①き裂部同様に 5~10 µm 程度の微細な空 洞が確認された。図 3.2.1-10 は、②き裂端部近傍のき裂から離れた健全部での観察結果 を示す。①き裂部と同様に、数µm 程度の微細な空洞が確認された。

断面観察面作製時の研磨処理により、介在物が除去され、研磨の時間などで空洞の見 え方も変化するため、観察面から微細な空洞をボイドと断定することは困難である。し かし、き裂近傍内面側で比較的大きな空洞が確認されており、介在物を起点として、ひ ずみによりボイド成長が生じた可能性を示唆している。



図 3.2.1-2 マクロ断面観察結果【①き裂部】



図 3.2.1-3 マクロ断面観察結果【②き裂端部近傍】



図 3.2.1-4 マクロ断面観察結果【③周溶接部】



図 3.2.1-5 金属組織観察結果(①き裂部、上段:外面側、中段:肉厚中央、下段:内面側)



図 3.2.1-6 金属組織観察結果(③周溶接部/内面側)



視野B

図 3.2.1-7 SEM 観察結果【①き裂部、内面側】



図 3.2.1-8 SEM 観察結果【①き裂部、健全部】


図 3. 2. 1-9 SEM 観察結果【②き裂部端部近傍、内面側(き裂上端)】



図 3.2.1-10 SEM 観察結果【②き裂部端部近傍、健全部】

(2) エルボ継手から切り出した試験片の引張試験【R3】

非弾性挙動の影響を精緻化するため、配管材料から切り出した試験片の引張試験を実施 した。実際に用いる配管材料の非弾性特性を取得することで、非弾性解析に用いる Gurson-Tvergaard-Needleman(以下、GTN と略記。)モデル[14]、[15]のパラメータ設定 における精度向上を図ることができる。また、できる限り破断近傍までのデータを取得す るため、ひずみをデジタル画像相関法(以下、DIC と略記。)で計測した。

引張試験片は、図 3.2.1-11 に示すようにエルボ配管(100Asch40))の側面部よりそれ ぞれ1本ずつ採取した JIS 13B 試験片である。試験片形状を図 3.2.1-12 に示す。引張試 験は、室温大気中でひずみ制御(2 mm/min)で実施した。

引張試験中のひずみ分布を、DIC を用いて計算し、経時的変化毎に解析を実施した。試験片は図 3.2.1-13 に示すようにDIC用のペイントを施し、引張試験中の変形を撮影した。

引張試験結果を表 3.2.1-1 に、応力-ひずみ曲線を図 3.2.1-14 に示す。試験時の応力 -ひずみ曲線からは明確な降伏点が認められ、両試験片間で有意な差は認められなかった。 エルボは熱間加工により製作されたことにより、降伏点が明確になったものと推測される。 別途防災科研で実施したティ部から切り出した小型試験片では、明確な降伏点は現れず、 伸びも小さい値となっていた(図 3.1.2-4)。このため、解析モデルにおいてもティ部と エルボ部では非弾性特性をそれぞれの特性に合わせて設定する必要がある。

図 3.2.1-15 および図 3.2.1-16 は、破断直前のひずみ分布を示す。いずれも中央部にひ ずみの局所化が確認された。



図 3.2.1-11 エルボからの試験片切り出し

試験片 符号	上降伏応力 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
YNU-1	332	331	477	33.4	31.2
YNU-2	340	331	479	34.8	31.9

表 3.2.1-1 引張試験結果(エルボ継手)



図 3.2.1-12 引張試験片形状 (エルボ継手)



図 3.2.1-13 試験片外観(エルボ継手)



図 3.2.1-14 応カーひずみ曲線 (エルボ継手)



図 3.2.1-15 DIC によるひずみ分布評価 (エルボ継手、YNU-1、左:試験開始時、右:破断直前)



図 3.2.1-16 DIC によるひずみ分布評価 (エルボ継手、YNU-2、左:試験開始時、右:破断直前)

(3) ティ継手から切り出した試験片の引張試験【R4】

非弾性挙動の影響を精緻化するため、E-ディフェンス実験の損傷予測箇所であるティ 継手から切り出した試験片の引張試験を実施した。

引張試験片は、図 3.2.1-17 に示すように主管および枝管会合部から採取した。試験片 軸方向は、供試材主管軸方向と平行とし、試験片中央が主管と枝管の交線になるように採 取した。引張試験は、室温大気中でひずみ制御(2 mm/min)で実施した。

引張試験中のひずみ分布は、画像相関法を用いて算出した。ひずみの計測には、GOM 社製 ARAMIS および GOM Correlate を用いた。画像撮影のフレームレートは、5 fps である。

引張試験結果を表 3.2.1-2 に、応力-ひずみ曲線を図 3.2.1-18 に示す。試験時の応力 -ひずみ曲線からは明確な降伏点が認められ、両試験片間で有意な差は認められなかった。 別途防災科研で実施したティ部から切り出した小型試験片では、明確な降伏点は現れず、 伸びも小さい値となっていた(図 3.1.2-4)。防災科研で実施した試験片は、主管端部と なっており、成形時の変形や端部加工の影響が考えられる。



図 3.2.1-17 ティ継手からの試験片切り出し

表 3.2.1-2 引張試験結果 (ティ継手)

	上降伏 応力 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	幅絞り (%)
YNU2-1	320	311	465	49	35
YNU2-2	324	311	465	50	35



図 3.2.1-18 応カーひずみ曲線 (ティ継手、YNU2-1)

(4) 疲労試験【R3】

GTN モデルの繰り返し負荷の影響を検証するための基礎データ収集を目的として、繰り返し負荷試験を実施した。試験片形状を図 3.2.1-19 に示す。試験片は別途用意した圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG370 より切り出した。試験片形状は ASTM E606 に準拠した板状試験片であり、疲労試験機の最大荷重値より板厚を2.85 mm とした。試験は室温、大気中で実施した。

図 3.2.1-20 に疲労試験結果を示す。図には、試験片を有限要素解析でモデル化して算 出したひずみと DIC を用いて計測したひずみの両方についてプロットしている。つかみ部 の影響のため、解析から算出したひずみは DIC で直接計測したひずみと比較して高い値を 示した。



図 3.2.1-19 低サイクル疲労試験片(ASTM E606 準拠)



図 3.2.1-20 低サイクル疲労試験結果

(5) 高精度シミュレーションのための GTN モデルの各パラメータの検討【R4】

高精度シミュレーションのための GTN モデルの各パラメータを検討するためには、まず シミュレーションで用いる硬化則を検討する必要がある。解析対象の材料は STP370 高温 配管用炭素鋼鋼管であり、この材料の規格の降伏応力は 215 MPa である。本節での検討で は、シミュレーション結果と実験結果を比較しながら検討を進めるため、実験結果として 図 3.2.1-18 の応力--ひずみ曲線の降伏伸びを除いたものを用いた。また、本検討ではヤ ング率 *E* は 200 GPa とした。配管系の弾塑性地震応答解析に基づく耐震評価について規定 した日本機械学会の事例規格 NC-CC-008[16]では、降伏点の値は規格の降伏点の 1.2 倍、 塑性勾配は *E*/100 = 2 GPa としている。これらを基準としてシミュレーションに入力する 硬化則として① 規格降伏点×1.2 = 258 MPa と塑性勾配 *E*/100、② 実際の降伏点 311 MPa と塑性勾配 *E*/100、③ 塑性勾配 *E*/100 で降伏伸びを除いた実験結果に接するように定めた 降伏点 360 MPa と塑性勾配 *E*/100 の3 条件で検討した。その結果、異なる降伏点を用いて も塑性勾配を一定にすると精度の良いシミュレーションのための硬化則とはならなかった。

次に、降伏点と塑性勾配の両方を変更することを考え、④ 塑性勾配 E/75 と降伏伸びを除いた実験結果に接するように定めた降伏点 337 MPa、⑤ 塑性勾配 E/50 と降伏伸びを除いた実験結果に接するように定めた降伏点 318 MPa の新たな2条件で GTN モデルを用いて予備検討を行った結果、④ 塑性勾配 E/75 と実験結果に接するように定めた降伏点 337 MPa をその後のシミュレーションに用いる硬化則とした。

また、以後の配管の解析では、最大でも真ひずみ 10%程度の範囲まで必要なため、ここでは GTN モデルの臨界ボイド空隙率、最終破断時のボイド空隙率を考慮しないこととした。 この条件での GTN モデルの降伏関数は以下で示される。

$$\Phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_y^2} + 2fq_1 \cosh(\frac{3}{2}q_2\frac{\sigma_m}{\sigma_y}) - (1 + q_3(f)^2) = 0 \qquad (\not \exists 1)$$

 σ_y は降伏応力、 σ_{eq} は相当応力、 σ_m は静水圧応力であり、 $q_1 = 1.5$, $q_2 = 1.0$, $q_3 = 2.25$ とした。上式のボイドの空隙率fはボイドの発生項と成長項の和で表される。

$$\dot{f} = \dot{f}_{Nucleation} + \dot{f}_{Growth}$$
 (式 2)
この発生項は相当塑性ひずみの増分 $\dot{\epsilon}_{eq}^{p}$ を用いた以下の式で表される。

 $\dot{f}_{Nucleation} = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{eq}^p - \varepsilon_N}{S_N}\right)^2\right]$

(式3)

 f_N は発生ボイドの総空隙率、 ε_N はボイドの発生に必要な臨界塑性ひずみ、 S_N は標準偏差である。成長項は体積ひずみの増分 ε_{kk}^p を用いて以下のように表される。

$$\dot{f}_{Growth} = (1 - f)\dot{\varepsilon}_{kk}^p \tag{\vec{x}_4}$$

ここでは高精度シミュレーション構築のために、GTN モデルのボイド発生に関する f_N 、 ε_N 、 S_N の3つのパラメータを求める。まず、 ε_N = 0.05、 S_N = 0.0167を用いて、解析 結果と図 3.2.1-18の実験結果の各ひずみでの応力の誤差が最小となる f_N を求めたところ、 f_N = 0.0613となった。この求めた f_N を用いて、 ε_N を0.0500、0.0832、0.166、 S_N を 0.0166、0.0332、0.0830としてそれぞれ変化させた9条件で得られた解析結果と実験結果 との各ひずみでの応力の誤差を応答曲面で評価したところ、 ε_N = 0.0512、 S_N = 0.0183に 最適値があった。以上までに求めたパラメメータで得られた結果を図 3.2.1-21に示す。



図 3.2.1-21 同定したパラメータセットと、それによる応力-ひずみ曲線

本項で求めた硬化則と GTN モデルのパラメータを用いることで、真ひずみ 10%の範囲ま で実験結果を精度良く表現できており、これを用いることで高精度なシミュレーションが 可能になることが期待できる。

3.2.2 実測データを反映した配管系解析モデルの作成

(1) 三次元計測データを用いたティ配管モデルの作成【R2-R3】

図 3.2.2-1 に示すように、三次元形状計測データを用いて事前解析用の形状モデルを作成した。まず、解析規模の適正化を図るため、Meshlab を用いてスキャンデータのデータ量を削減した。スキャンデータは、欠損データが含まれており、このままでは解析モデルとしては適用できないため、Microsoft 社製の 3DTools を用いてデータの修復を行った。 修正された点群データは CAD ソフトウェア(シーメンス社製 NX)を用いてモデル化し、エルボおよび直管部のモデルを追加して配管系モデルを構築した。



図 3.2.2-1 事前解析モデルの作成

(2) 解析モデルの構築

解析は、汎用有限要素解析コード ANSYS (Version 2021R1)を用いた。図 3.2.2-2 に解 析モデルを示す。ティ配管およびエルボ配管 (隣接直管部含む)はソリッド要素でモデル 化した。ソリッド要素は三次元 10 節点構造ソリッド要素 (solid187)を使用した。それ 以外の直管部は、ビーム要素 (beam188)を使用した。ソリッド要素とビーム要素は MPC 要素を用いて接続した。重錘 (400 kg)および閉止フランジはそれぞれ質量要素でモデル 化した。

配管から切り出した小型試験片を用いた引張試験の結果より、エルボおよびティのそれ ぞれについて 0.2%耐力を設定した。なお、事前解析の時点では、材料の加工硬化特性は日 本機械学会発電用原子力設備設計・建設規格 NC-CC-008 に準拠して二直線移動硬化則を 採用した[16]。

事前解析モデルの検証を目的として、別途実施された試験体の特性調査[10]から得られ た試験体の固有値と事前解析モデルの固有値を比較した。図 3.2.2-3 にモード1の変形を 示す。図中のコンターマップは全変形量を表している。重錘に起因してティ上部のエルボ 部のY方向変位が大きくなっている。なお、モード2は、サポート4位置(下部水平配管 重錘間にあるサポート)の水平方向変位が発生しており、摩擦の影響を強く受ける変形と なった。モード3はティ上部エルボのX方向変位が最大となった。

表 3.2.2-1 は、令和 2 年度に実施された設計解析[6]、事前解析モデル、特性調査の固 有値をそれぞれ示す。特性調査は、モード1において最大変位を示した Y 方向の固有値解 析結果(図 3.2.2-3)およびモード 3 において最大変位を示した X 方向の固有値解析結果 を示している。モード 1 については、設計解析(2.84 Hz)に比べて、事前解析モデル (2.876 Hz)および特性調査(2.875 Hz)は若干高い値となっている。ティ部の実測デー タは、規格値よりも肉厚が大きくなっており、高い剛性を有しているため、設計解析に比 べて高い振動数となっていると推定される。また、事前解析モデルではフランジ部の重量 も考慮しているため、特性調査で得られた固有値により近い値を示していると考えられる。

モード3においては、設計解析および事前解析モデルは特性調査に比べて大きな値となっている。設計解析および事前解析モデル両方で、上部アンカを固定するための架台をモデル化していないため、その剛性が考慮されていないことが原因と推定される。



図 3.2.2-2 事前解析用モデル



図 3.2.2-3 モード1 変形 (2.876 Hz、変形倍率:8.4)

	設計解析	事前解析モデル	特性調査
モード1 [Hz]	2.84	2.876	2.875
モード2 [Hz]	3. 50	3.576	-
モード3 [Hz]	6.34	6.385	5.875

表 3.2.2-1 モード毎の固有値の比較

3.2.3 配管系の事前解析による局所非弾性挙動の定量化【R3-4】

(1) パラメトリック解析【R4、1 ケースのみ R3】

パラメトリック解析の水準を表 3.2.3-1 に示す。入力加速度を図 3.2.3-1 に示す。設計 解析と同じ波形であり、入力倍率は3倍とした。

図 3.2.3-2 は、令和 3 年度に実施した Case 1 における解析の終了時(80 s)のティ配 管の累積相当塑性ひずみ分布を示す。ひずみは、ティ継手内面上側で最大となった。ひず みの最大箇所は Case 1~5 でほぼ一致しており、損傷挙動に大きな変化はない。図 3.2.3-3 は、Case 1 における解析終了時(80 s)の空隙率を示す。累積相当塑性ひずみ分布で最 大値を示した場所と同様ティ部内面で最大値となった。空隙率の分布は、累積相当塑性ひ ずみの分布と比較すると局所化していた。モード解析より、本試験体ではティ管の上部に 取り付けられた重錘により、ティ上部の配管の曲げ変形が発生するため、ティ主管側の上 部に損傷が集中しやすい。各解析条件における解析終了時の累積相当塑性ひずみおよびボ イド発生率を表 3.2.3-1 にまとめて示す。Case 1 と比較すると、Case 2 および 4 で累積 相当塑性ひずみは若干増大した。空隙率も Case 1 に対して累積相当塑性ひずみと同様の 傾向を示した。Case 2 は、ひずみが小さい領域でボイドの発生率が高くなるため、空隙率 は Case 1 に比べると大きくなる。一方、比較的ひずみが大きくないとボイドが発生しな い Case 3 および 5 では、ボイドの発生率は非常に小さい。ボイド発生率の変化は、相当 塑性ひずみの変化に比べ大きくなっており、適切なパラメータ設定が高精度シミュレーシ ョンでは必要となる。

(2) パラメータ検討後の GTN モデル【R4】

図 3.2.3-3 は、3.2.1(4)で検討された GTN モデルのパラメータを用いた解析結果を示す。 解析では、空隙率はティ継手上部外面で最大となった。なお、相当塑性ひずみはティ継手 上部内面側で最大であった。ティ継手上部は、内圧と繰り返し変形により膨らんでいるこ とが目視により確認されており、空隙率の上昇は繰り返し変形に伴うラチェット変形の影 響が表れていると考えられる。

特性	変数	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
第 1 Tvergaard- Needleman 定数	q 1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
第 2 Tvergaard- Needleman 定数	q ₂	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
第 3 Tvergaard- Needleman 定数	<i>q</i> ₃	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
ボイド生成の空隙率	f_N	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
平均ひずみ	ε_N	0.1	0.03	0.16	0.1	0.1
ひずみの偏差	S _N	0.03	0.03	0.03	0.06	0.015
累積相当塑性ひずみ [%]		6.0	6.4	5.9	6.1	5.9
ボイド発生率 [-]	_	3.0×10 ⁻³	2.0×10 ⁻²	9.0×10 ⁻⁶	5.4×10 ⁻³	7.9×10 ⁻⁵

表 3.2.3-1 GTN モデルのパラメータ水準および解析結果



図 3.2.3-1 入力加速度





図 3.2.3-3 解析結果(空隙率、GTN モデルのパラメータ修正後、80 s)

3.2.4 Eーディフェンス実験の解析、不確かさ評価【R4】

E-ディフェンス実験実施後、局所非弾性損傷の分析を実施した。まず、実験後に損傷した配管を対象として、試験片を切り出し、引張試験を実施した。また、不確かさの検証に必要なデータを抽出するため、ティ継手の溶接近傍の硬さ試験を実施した。

(1) Eーディフェンス実験の解析

加速度波形の倍率が 500%の時の相当塑性ひずみ分布を図 3.2.4-1 に示す。破損したティ 部側面とティ継手上側直管部に相当塑性ひずみが発生しており、E-ディフェンス実験で 観測された挙動と一致している。ティ継手上部では、溶接部近傍のひずみゲージ(計測 点:S123A)において 1%前後のひずみが計測された。解析値では 1%より小さな値をとって いるが、加振波の履歴の影響も考慮すると妥当な値であった。





図 3.2.4-1 相当塑性ひずみ分布(加速度波形倍率:500%)

図 3.2.4-2 は、三次元スキャンにより得られたティ継手内面データと解析結果を比較した結果を示す。き裂の発生位置は累積相当塑性ひずみが最大値を示す箇所とおおむね一致していた。ひずみ分布形状は、き裂の進展経路とも一致しており、相当塑性ひずみによる損傷の蓄積により破損が生じたと考えられる。



図 3.2.4-2 累積相当塑性ひずみ分布(加速度倍率:500%)

事前解析モデルを用いて、実際の加速度履歴を考慮した解析を実施した。解析は、塑性 域加振試験を実施した2日目の加振プロファイル(倍率を150%から500%まで段階的に増 加)に沿って実施した。表3.2.4-1に解析結果(相当塑性ひずみ)を示す。比較のため、 実験値は塑性ひずみが測定されたひずみゲージ(計測点:S005R)の値に初日の残留ひず みを加えた値を示している。解析値は、測定箇所近傍の最大値を示す節点での値とした。 加振倍率が小さい時、FEMのひずみがかなり低めに評価される傾向が認められた。これは、 初日の加振で発生した塑性ひずみの影響を考慮していないためと考えられる。倍率が大き くなるとともに残留塑性ひずみは増大する。倍率が大きくなるほど解析値が高く評価され た。

Waveform	倍率(%)	Experiment*1 (R005, %)	FEM*2 (Max, %)
地震波加振(3軸)	150	0.17	0.0051
地震波加振(3軸)	200	0.18 (0.01)	0.027 (0.02)
地震波加振(3軸)	250	0.24 (0.06)	0.072 (0.05)
地震波加振(3軸)	300	0.33 (0.09)	0.15 (0.08)
地震波加振(3軸)	350	0.39 (0.06)	0.27 (0.12)
地震波加振(3軸)	400	0.46 (0.07)	0.40 (0.13)
地震波加振(3軸)	450	0.49 (0.03)	0.54 (0.14)
地震波加振(3軸)	500	0.58 (0.09)	0.67 (0.13)

表 3.2.4-1 加振履歴を考慮した解析結果

括弧内の値は増分値(当該加振により生じた残留ひずみ)

*1初日の残留ひずみ(0.13%)を足した値

*2 実験の計測箇所とは一致していない。FEMの測定箇所近傍の最大値を示す節点での値

(2) 損傷配管から切り出した試験片の引張試験

E-ディフェンス実験後の損傷配管から試験片を切り出し、引張試験を実施した。なお、 比較のため同じロットの試験未実施のティ継手から同じ部位の試験片を参照試験片(未損 傷材)として作製し、試験に供した。試験片形状を図 3.2.4-3 に示す。3.2.1(3)で述べた ティ継手から切り出した試験片と異なり、損傷が発生している箇所から切り出すため、試験片サイズが小さくなっているが、DIC によるひずみ計測が可能となるようにできるだけ 大きな試験片を切り出した。試験結果を表 3.2.4-2 に示す。損傷を受けた配管は、明確な 降伏点を示さなかった。損傷試験片の0.2%耐力は、未損傷材より若干高い値を示していた。



図 3.2.4-3 試験片(上:未損傷試験片、下:損傷試験片)

表 3.2.4-2 引張試験結果

	上降伏 応力 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置
未損傷材	292	290	455	34	36	А
損傷材		318	440	39	36	А

(3) 溶接部の硬さ試験

事前解析モデルでは、溶接部はモデリングしていないが、不確かさの検証に必要なデー タとして、溶接部の硬さ試験を実施した。内面側、中央部、外面側について、それぞれビ ッカース硬さを測定し、その影響を検討した。図 3.2.4-4 は、硬さ試験の結果を示す。測 定位置は溶融線を基準位置とし、溶接金属をマイナス、母材側をプラスとした。溶接金属 部から溶接熱影響部において、硬さは 165~185 HV であった。なお、最外面側は硬さ近傍 の領域より 20 HV 程度高かった。母材部の硬さは、160~195 HV とばらつきが大きかった。



3.2.5 まとめ

3ヵ年計画の業務実績を以下に示す。

(1) 局所非弾性現象の振動応答挙動に及ぼす影響の検証とモデル化

配管材料の実測データを用いて、非弾性挙動の影響の精緻化を検討した。損傷を受けた エルボ配管のボイド断面観察から、き裂近傍で微小領域での損傷が認められ、GTN モデル 適用の有効性を確認した。一方、ボイドの直接観察による定量評価は困難であったため、 引張試験におけるひずみの局所化に着目した評価を実施した。エルボ配管から切り出した 引張試験において、解析に用いる非弾性特性を取得するとともに、DIC によるひずみ評価 を実施して、ひずみの局所化を定量データとして収集した。また、破損個所と予測される ティ継手から切り出した試験片についても、同様に引張試験を行い非弾性挙動の精緻化に 必要なデータを取得した。

詳細解析における GTN モデルの精緻化を行うため、取得したデータを用いて GTN モデルのパラメータ最適化手法を構築した。

(2) 実測データを反映した配管系事前解析モデルを用いた局所非弾性挙動の定量化

E-ディフェンス実験に用いられるティ配管の三次元形状計測データから解析モデルの 構築を実施した。損傷モデルについては、同一ロットのティ配管から切り出した小型試験 片もしくは同等材料の試験片を用いた破壊試験の結果から得られた非弾性特性を用いた。 また、ティ配管、エルボ配管のそれぞれについて、製造過程に起因して非線形特性が異な ることを考慮することでより精緻な解析モデルを構築した。

(3) 配管系の事前解析による局所非弾性挙動の定量化

GTN モデルの主要なパラメータとして、ボイド生成項のパラメータである平均ひずみ、

ひずみの偏差について応力-ひずみ線図のデータと対応させた標準的なパラメータを設定 し、パラメトリック解析を実施して、解析モデルの検証を行った。

- (4) Eーディフェンス実験の解析、不確かさ評価
 - E-ディフェンス実験の後、局所非弾性損傷の分析を実施した。まず、実験後に損傷した配管を対象として、試験片を切り出し、引張試験を実施した。また、不確かさの検証に必要なデータを抽出するため、ティ配管の溶接近傍の硬さ試験を実施した。

参考文献

- [13] I. Nakamura, A. Otani, Y. Sato, H. Takada, and K. Takahashi, "Tri-Axial Shake Table Test on the Thinned Wall Piping Model and Damage Detection before Failure", Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2010-25839.
- [14] A. L. Gurson, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media", Journal of Engineering Materials and Technology, 99(1), pp. 2-15 (1977).
- [15] V. Tvergaard, A. Needleman, "Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar", Acta Metallurgica, Volume 32, Issue 1, pp. 157-169 (1984).
- [16] 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」、日本機械学会発電用原子力設備設計・建設規格 NC-CC-008、日本機械学会(2019)

3.3 高精度シミュレーションモデルの提案【R4】

3.3.1 モデル作成手順のまとめ

配管系の弾塑性地震応答解析のための詳細 FEM 解析モデル作成手順は、日本機械学会事例 規格 NC-CC-008 [16]の中で Mandatory Appendix SEGP-1 としてまとめられ、この中で配管系 モデル化のための使用要素の選択、要素分割方法、材料特性の設定について規定されている が[17]、この事例規格における想定ひずみ範囲は1%程度であり、終局挙動の評価は対象とし ていない。また、事例規格ではティ配管部のモデル化手順は定められておらず、今後の課題 として残されていた[18]。

本研究における解析モデル構築も基本手順はこの事例規格に従っているが、ティ配管部分 のモデル化には実測形状を反映した。また、材料モデルに対しては材料損傷を表現する GTN モデルの導入により解析モデルの精緻化を図った。その結果、3.2 節で述べたように事例規 格の適用範囲を超えたひずみ範囲でも解析結果は実験結果を精度良く評価できることが確認 された。従って、事例規格で規定されている解析モデル作成手順に則った上で、弾塑性材料 特性やティ配管部の形状を実測に即した条件とすることで、終局挙動の評価が可能な高精度 なシミュレーションモデルを作成できると考えられる。

一方、本研究ではティ配管部のモデル化に三次元形状計測結果を活用したが、実務におい ては実測形状を入手できない場合がほとんどである。従って、JIS 規格等で規定されている 公称寸法や、外径・肉厚計測のような基本的な計測結果から解析モデルを構築する簡易手法 が必要となる。ここで、鋼製配管継手の形状を規定する JIS 規格[7]ではティ配管の寸法と して図 3.3.1-1 が示されており、配管外径・肉厚のほかには、継手中央部から主管端部まで の長さ(図 3.3.1-1 の C)、および分岐管端部までの長さ(図 3.3.1-1 の M)が規定されて いる。しかし主管と分岐管の接続形状や主管と分岐管を接続する曲率(肩部の曲率半径)に ついては規定がなく、解析モデル構築上の課題である。

三次元形状計測結果によらない解析モデルの構築については、炭素鋼鋼管 SGP のティ配管 を対象とし、公称寸法と肩部曲率半径の計測結果から三次元 CAD ソフトを使用したモデル構 築と精度検証が大川らによって実施された[19]。この検討では、主管と分岐管の接続を図 3.3.1-2(a)に示すようなフィレット接続ではなく図3.3.1-2(b)に示すようなトーラスで構成 する接続とし、かつ肩部曲率半径を実測値に基づきフィッティングして形状モデルを作成す ると三次元形状計測結果に基づく解析モデルによる解析結果とよく一致するという結果が得 られている。この知見より、今後、継手メーカーへのヒアリング等を通じ肩部曲率半径の実 態や肉厚分布の傾向などの製造プロセスに起因する知見を収集することで、三次元形状計測 によらない簡易な解析モデル構築が可能となると考えられる。

これらの成果について、対外発表を行った[20]。



図 3.3.1-1 JIS 規格[7]に規定されるティ配管の寸法





3.3.2 V&V の実施と信頼性評価(再委託先:横浜国大)

配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルの作成手順について、実施したE-デ ィフェンス解析の結果より検討した。解析手順の概要を図 3.3.2-1 に示す。実施した試験結 果と事前解析の結果より得られる解析における不確かな要因として、(1)ティ継手形状、(2) 材料特性、(3)加速度波形、(4)拘束条件、がある。各項目について、シミュレーションモデ ルの作成における留意事項を以下に示す。



図 3.3.2-1 高精度シミュレーション作成手順

(1) 継手形状

本研究では、ティ配管の三次元形状を計測し、スキャンデータから解析モデルを構築し た。実物のティ配管は板厚が規格値よりも大きな値をとるため、ティ配管の剛性や強度が 製造プロセスにより異なる。ティ配管は規格に沿って作製された場合においても形状のば らつきが大きく、メーカー・使用用途によっても形状が変化する。このため、ティ配管の 設計において、実測形状を考慮したばらつきの検討が不可欠となる。現在、ティ配管を含 む配管系において、設計解析などでティ部のばらつきを考慮した評価体系とはなっていな い。今後は、ティ配管のばらつきを考慮した評価体系の見直しが必要である。

(2) 材料特性

日本機械学会発電用原子力設備設計・建設規格 NC-CC-008[16]では、炭素鋼の材料特 性として二直線近似を採用している。ただし、引張特性が入手できた場合にはそちらを採 用することを推奨している。本研究では GTN モデルを用いて二直線近似モデルに損傷を考 慮した解析を行った。ひずみが高い領域でより高精度な応力-ひずみ曲線が得られたため、 事前解析モデルで解析した結果、ラチェット変形による外面の膨らみもよく再現した解析 結果となっていた。GTN モデルのパラメータについては、使用用途によって最適化を図る 必要性があるが、シミュレーションの高度化に有効なモデルである。

(3) 加速度波形

事前解析では、加振加速度を元の波形に倍率を乗じて入力波としているが、実験時の震動台上で計測された実測加速度は、震動台のオーバーシュートの影響によりピーク時の加速度が約 20%大きくなっている(図 3.3.2-2)。最大加速度による塑性変形が損傷に大きな影響を与える低サイクル疲労評価では、この影響を考慮して V&V を実施する必要がある。 実験結果で得られた加速度波形(倍率:500%)を入力値とした解析と事前解析結果を比較した結果、累積相当塑性ひずみは実際の加速度波形の方が約 20%大きくなった。V&V の不確かさ評価において、実際の加速度波形の影響は大きな要因の1つとなる。



図 3.3.2-2 加速度波形の比較

(4) 拘束条件

E-ディフェンス実験では、支持部(サポート 4)において大きな摩擦が発生し、直管 部に損傷が確認された。ただし、試験時の動画や重錘位置での配管応答変位計測結果より、 加振加速度が増大すると配管管軸方向にも大きな変位が発生しており、レベルの大きい入 力加速度に対する応答を評価する場合は、摩擦を考慮しない通常の変位拘束条件でもその 影響は小さいと考えられる。

これらの成果について、対外発表を行った[21]。

3.3.3 まとめ

得られた成果を整理して、配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルの作成手順 について検討した。E-ディフェンス実験に対する事前解析と実験結果との比較から、高精 度シミュレーションモデル作成における留意事項を示すとともに、手順に従った解析モデル の信頼性を加振履歴の影響や加速度設定における誤差等について定量的に評価する V&V を行 い、デジタルツイン構築の基礎を構築した。

また、簡易な解析モデル構築に向け、三次元形状計測結果によらないティ配管のモデル化

方針を示した。

参考文献

- [17] A. Otani, T. Shibutani, M. Morishita, I. Nakamura, T. Watakabe, and M. Shiratori, "Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis Part 2- A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Analysis", Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2017-65190 (2017)
- [18] 中村いずみ、森下正樹、大谷章仁、渡壁智祥、澁谷忠弘、白鳥正樹、「配管系の耐 震設計に対する弾塑性応答解析の導入と今後の課題」、JCOSSAR 2019 論文集、pp. 402-407 (2019)
- [19] 大川友悠馬、中村いずみ、「同径 T 配管の弾塑性有限要素解析に用いる三次元 CAD モデリング手法の比較検討」、関東学生会第 62 回学生院卒業研究発表講演会、#432 (2023)
- [20] 中村いずみ、澁谷忠弘、「ティ配管の実態材料強度と弾塑性 FEM 解析結果への影響」、日本機械学会 2022 年度年次大会、#J101-04 (2022)
- [21] 澁谷忠弘、栗山幸久、笠井尚哉、中村いずみ、「ティ部を有する配管系の弾塑性応 答解析モデルの高度化」、日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス、#0S0105 (2022)

3.4 研究推進

本研究課題を推進するため、研究代表者と研究分担者とはおおむね毎月1回Web 会議による 打合せを行い、進捗状況を確認した。また、他機関の専門家との意見交換としては、日本機 械学会発電用設備規格委員会原子力専門委員会耐震許容応力検討タスクフェーズ2の幹事グル ープや本会合委員に対し研究の実施内容と進捗状況の紹介を行い、意見交換を行った。令和4 年度には日本塑性加工学会チューブフォーミング分科会において講演を行い、Eーディフェ ンス実験を紹介するとともに、配管継手形成の観点からの意見交換を行った。さらに、シミ ュレーションモデルの高度化にあたり、特にティ配管については実物配管の形状・材料強度 ばらつきを解析モデルに反映する必要のあることが分かったため、国内における大手配管継 手メーカーへのヒアリングを行い、エルボおよびティ配管の製造方法や準拠規格について知 見を収集した。Appendix 3 にこれらの研究打合せ・意見交換の議事概要をまとめる。

研究成果の対外発表は、日本機械学会年次大会、M&M Conference において実測データのば らつき評価[20, 22]、材料モデルの構築に関する報告[21]等を行った。また、令和4年度に実 施したE-ディフェンス実験については米国機械学会 Pressure Vessels and Piping Conference 2023 (ASME PVP2023) での発表を予定している[23]。

参考文献

- [22] 中村いずみ、澁谷忠弘、「配管継手の材料・形状ばらつき調査」、日本機械学会 2021 年度年次大会、#C000797 (2021)
- [23] I. Nakamura, T. Shibutani, Y. Kuriyama, and N. Kasai, "Shaking Table Test on a Piping System Model for Developing High-Quality Simulation Model", Proceedings of the ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2023-106081 (2023)

4. 結言

4.1 本研究のまとめ

本研究では、原子力施設の重要構造物の1つである配管系を対象とし、終局強度の評価も 含めた非弾性挙動を再現できる高精度シミュレーションモデルを構築することを目的とした。 また、高精度シミュレーションモデルの構築のため、E-ディフェンスを用いた検証実験を 実施し、シミュレーションモデルのV&Vに必要となるデータを取得することとした。

この目的のために以下の3つの研究項目を実施することとした。

I. 高精度シミュレーションモデルの V&V に活用する実測データの取得

Ⅱ. 非弾性現象を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築

Ⅲ. 高精度シミュレーションモデルの提案

3ヵ年を通じ、各研究項目について以下の成果が得られた。

I. 高精度シミュレーションモデルの V&V に活用する実測データの取得

配管系が地震荷重のもとで破壊に至るまでの実測データ取得を目的とし、配管系試験体に 対するEーディフェンスを使用した加振試験を実施した。Eーディフェンス実験の実施によ り、配管系の弾性域から終局挙動までのデータを取得した。加振試験により当初目的通りデ ィ配管部の損傷データを取得するとともに、ティ配管部直上直管でのラチェット変形など、 予期していた変形・損傷以外のデータも取得した。また、Eーディフェンス実験に加え継手 形状・材料強度のばらつき調査、Eーディフェンス実験に使用するティ配管の形状および材 料強度の実測を行い、V&V に活用できる実測データを取得した。

既往研究ではティ配管の実測形状や地震時損傷に関する知見は極めて限られていた。取得 したデータは信頼性の高い配管系の地震応答を評価する高精度シミュレーションモデル構築 に活用できるとともに、配管系の破損モードに関する新たな知見が得られた。

Ⅱ. 非弾性現象を評価できる高精度シミュレーションモデルの構築

配管材料の実測データを用いて非弾性挙動の影響の精緻化を検討した。損傷を受けたエル ボ配管のボイド断面観察から、き裂近傍で微小領域での損傷が認められ、GTNモデル適用の有 効性を確認した。また、配管から切り出した試験片を用いた引張試験を行い、GTNモデルのパ ラメータ最適化手法を構築した。また、形状および材料モデルに実測データを反映した精緻 なEーディフェンス実験の事前解析モデルを作成した。さらに、GTNモデルの主要パラメータ であるボイド生成項のパラメータである平均ひずみ、ひずみ偏差の標準パラメータを設定し、 パラメトリック解析を行い、解析モデルを検証した。Eーディフェンス実験後には実験デー タを用いて事後解析と不確かさ評価を行った。

Ⅲ. 高精度シミュレーションモデルの提案

配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルの作成手順を示し、研究項目 I で取得 した実験データに基づき構築した解析モデルの信頼性を定量的に評価する V&V を行い、デジ タルツイン構築の基礎を提供した。また、簡易な解析モデル構築に向け、三次元形状計測結 果によらないティ配管のモデル化方針を示した。 これらの研究の実施にあたっては研究代表者・研究分担者間で定期的に意見交換を行うとともに、他機関の専門家との意見交換を行い、研究推進に努めた。

本研究の実施により、配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルを構築するとと もに、シミュレーションモデルの不確かさ評価に不可欠である配管系の破壊に至るまでの弾 塑性地震応答の実測データ、形状・材料強度の実測データを取得した。

以上より、本研究は当初計画通りの目標を達成し、3ヵ年の研究を終了した。

4.2 今後の課題

本研究の実施により、配管系を対象とした高精度シミュレーションモデルの構築手法については一定の成果が得られた。一方、本研究を実施する中で、配管系の基本的な構成要素の1つであるティ配管については、実際の製作物は規格値に対し形状、材料特性とも大きなばらっきがあること、また三次元形状計測結果によらない形状のモデル化手法を確立するには実測形状のデータを拡充する必要のあることが明らかになった。従って、今後より信頼性の高い配管系解析モデルを構築するためには、継手メーカーとの協働により製造プロセスを踏まえた実態形状、実態強度の把握が必要である。これらの調査結果をティ配管の実測情報のデータベースとしてまとめ、シミュレーションモデル構築に活用することで、実物のない設計段階でも実物の挙動を精度良く評価するデジタルツイン実現に資すると考えられる。

また、本研究では常温条件下での炭素鋼配管系を対象としたが、次世代原子力システムで 想定される実際の使用環境下、特に高温条件下での挙動や、異なる材料で製作された配管系 に対して本研究で構築した手法を拡張することも今後の課題として挙げられる。 Appendix 1 Eーディフェンス実験で使用したセンサおよび計測点名称

1. 実験で使用したセンサ

E-ディフェンス実験に置ける使用センサを表 A1-1 にまとめる。

センサ種別	型番	メーカー	台数	計測 CH 数	備考					
3 方向サーボ型	TA-25E-10-1	東京計器	12	36	10 G					
加速度計										
レーザー変位計	LK-500	キーエンス	2	2	±400 mm					
	IL-600	キーエンス	2	2	± 250 mm					
圧力計	PGM-200KE	共和電業	2	2	20 MPa					
ひずみゲージ	YEFLAB-2-	東京測器研究所	32	32						
(1 軸)	10LJBT									
ひずみゲージ	YEFRAB-2-	東京測器研究所	50	150						
(3 軸)	10LJBT									
	224									

表 A1-1 使用センサー覧

2. 計測点位置図

加速度計、変位計、圧力計の計測点位置を図 A1-1 に、ひずみゲージの計測点位置を図 A1-2 に示す。



図 A1-1 加速度計、変位計、圧力計設置位置



*ティ部のひずみゲージ設置位置はイメージ。 具体的な設置位置は事前解析結果に基づき決定した。

図 A1-2 ひずみゲージ設置位置

3. センサ命名則

各センサの命名則は以下の通り。

(1) 接頭辞

A:加速度計、D:変位計、P:圧力計、S:ひずみ

(2) 加速度計



(3) 変位計



(4) 圧力計





01:下部水平配管フランジ部
 2) 02:上部水平配管フランジ部

(5) ひずみゲージ



	作兒内穴	入力波	倍率	目標加速度(m/s2)		再現加速度(m/s2)			(供土)	
加振口	未球内谷			Х	Y	Z	A00X	A00Y	A00Z	调考
	昇圧(0→6.8 MPa)		/	/	/		/	/	/	
	昇圧-2(0→6.8 MPa 再)		/	/	/		/	/	\backslash	
	昇圧-3(微調整)		/	/	/		\backslash	\backslash	\backslash	
	ランダム波A(Y軸)X方向_X10%	特性把握ランダム波A(Y軸)	10%	0.35	/		0.2535	0.1091	0.1317	加振前 圧力計以外バランス実行
	ランダム波A(Y軸)Y方向_Y10%	特性把握ランダム波A(Y軸)	10%	/	0.35		0.144	0.2655	0.0996	
	ランダム波A(Y軸)Z方向_Z10%	特性把握ランダム波A(Y軸)	10%	/	/	0.35	0.0917	0.0902	0.4068	
	ランダム波A(Y軸)X方向_X20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%	0.7	/		0.5435	0.1049	0.1898	
	ランダム波A(Y軸)Y方向_Y20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%	/	0.7		0.0814	0.5548	0.1757	
	ランダム波A(Y軸)X方向_X30%	特性把握ランダム波A(Y軸)	30%				0.8773	0.0997	0.2109	
8月26日	ランダム波A(Y軸)Y方向_Y30%	特性把握ランダム波A(Y軸)	30%	/	1.05		0.1042	0.8902	0.2416	
	震動台着座・試験体観察									
	地震波加振(3軸)_25%	AP3_EDF007_edf	25%	0.5975	0.7225	0.2625	0.5385	0.6482	0.2695	
	地震波加振(3軸)_50%	AP3_EDF007_edf	50%	1.195	1.445	0.525	1.126	1.4175	0.6366	
	地震波加振(3軸)_75%	AP3_EDF007_edf	75%	1.7925	2.1675	0.7875	1.827	2.289	0.9736	
	震動台着座・試験体観察									
	地震波加振(3軸)_100%	AP3_EDF007_edf	100%	2.39	2.89	1.05	2.547	3.1533	1.1899	
	地震波加振(3軸)_125%	AP3_EDF007_edf	125%	2.9875	3.6125	1.3125	3.137	4.1022	1.5989	
	震動台着座・試験体観察									
	降圧		/	/	/			\backslash	/	

	传行中国	传得中的。		再現加速度(m/s2)		(供				
加振日	果颏闪谷		10 90	Х	Y	Z	A00X	A00Y	A00Z	一 でつ
	昇圧(0→6.8 MPa)			/	/	/	/		/	計測前 圧力計のみバランス実行
	昇圧-2(微調整)		\sim	\sim	/	/	\sim	\sim	/	
	ランダム波A(Y軸)X方向_X20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%	0.7	\backslash	/	0.5245	0.0674	0.1188	加振前 圧力計以外バランス実行
	ランダム波A(Y軸)Y方向_Y20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%		0.7	/	0.0906	0.5312	0.1476	
	ランダム波A(Y軸)Z方向_Z20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%			0.7	0.0915	0.0927	0.6664	
	地震波加振(3軸)_150%	AP3_EDF007_edf	150%	3.585	4.335	1.575	3.899	5.1057	1.9071	
	地震波加振(3軸)_200%	AP3_EDF007_edf	200%	4.78	5.78	2.1	5.6707	6.9335	2.6918	
	地震波加振(3軸)_250%	AP3_EDF007_edf	250%	5.975	7.225	2.625	7.5827	8.9946	3.562	
	地震波加振(3軸)_300%	AP3_EDF007_edf	300%	7.17	8.67	3.15	9.6021	11.115	4.2771	
8月29日	震動台着座・試験体観察									
	地震波加振(3軸)_350%	AP3_EDF007_edf	350%	8.365	10.115	3.675	11.6958	13.3078	5.2115	
	地震波加振(3軸)_400%	AP3_EDF007_edf	400%	9.56	11.56	4.2	13.6773	15.3822	6.9912	
	地震波加振(3軸)_450%	AP3_EDF007_edf	450%	10.755	13.005	4.725	15.6961	17.3509	7.6769	
	震動台着座・試験体観察									
	地震波加振(3軸)_500%(1回目)	AP3_EDF007_edf	500%	11.95	14.45	5.25	17.6084	19.704	9.0515	
	地震波加振(3軸)_500%(2回目)	AP3_EDF007_edf	500%	11.95	14.45	5.25	17.6697	19.7027	9.5777	
	地震波加振(3軸)_500%(3回目)	AP3_EDF007_edf	500%	11.95	14.45	5.25	17.6084	19.6472	8.9647	
	震動台着座・試験体観察									
	降圧		\backslash		/		\sim	\sim	/	
	昇圧(0→6.8 MPa)		/		/	/	/		/	計測前 圧力計のみバランス実行
	昇圧-2(微調整)		/				/			
	ランダム波A波(Y軸)X方向_X20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%	0.7	/	/	0.5398	0.0653	0.1164	加振前 圧力計以外バランス実行
	ランダム波A波(Y軸)Y方向_Y20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%		0.7		0.0742	0.5372	0.1566	
	ランダム波A波(Y軸)Z方向_Z20%	特性把握ランダム波A(Y軸)	20%			0.7	0.1142	0.1038	0.6693	
9月1日	地震波加振(3軸)_500%(4回目)	AP3_EDF007_edf	500%	11.95	14.45	5.25	17.6065	19.8755	9.0062	
	地震波加振(3軸)_500%(5回目)	AP3_EDF007_edf	500%	11.95	14.45	5.25	17.5711	19.7877	9.1709	
	正弦波加振(Y軸)_980%(1回目)	sin2.5Hz-50cycles_EDF	980%		9.8		0.3139	15.4738	2.0382	
	震動台着座・試験体観察									
	昇圧-3 (微調整)		\geq	\geq	/		\geq	\geq	/	計測前 JB03-01、05、10、13、17、21、04-37のみバランス実施
	正弦波加振(Y軸)_980%(2回目)	sin2.5Hz-50cycles_EDF	980%		9.8	/	0.315	15.448	1.5663	き裂貫通、試験終了

Appendix 3 研究推進関係打合せ概要

- 1. 研究関係者打合せ
- 1.1 令和2年度
- (1)開催日時:令和2年11月24日(火) 開催形態:Web
 出席者:中村(防災科研)、澁谷(横浜国大) 打ち合わせ内容:
 - ・ 令和2年度の業務計画内容の確認を行った。
- (2)開催日時:令和2年12月21日(月) 開催形態:Web 出席者:中村(防災科研)、澁谷(横浜国大) 打ち合わせ内容:
 ・ 令和2年度の業務進捗確認を行った。
- (3)開催日時:令和3年1月20日(水)
 開催形態:Web
 出席者:中村(防災科研)、澁谷(横浜国大)
 打ち合わせ内容:
 - ・ 令和2年度の業務進捗確認を行った。
- (4)開催日時:令和3年3月5日(金)
 開催形態:Web
 出席者:中村(防災科研)、澁谷(横浜国大)
 打ち合わせ内容:
 - ・ 令和2年度の業務進捗および成果報告書取りまとめ方針の確認を行った。

1.2 令和3年度

- (1)開催日時:令和3年5月6日(木)10:30~11:30
 開催形態:Web
 出席者:中村(防災科研)、澁谷(横浜国大)
 打ち合わせ内容:
 - ・ 令和2年度の成果確認および令和3年度の業務計画内容の確認を行った。
- (2) 開催日時:令和3年6月9日(木) 10:00~10:20
 - 開催形態:Web
 - 出席者:中村(防災科研)、澁谷(横浜国大)
 - 打ち合わせ内容:
 - ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
 - ・ ティ配管から切り出す試験片を用いる材料試験の実施内容について意見交換を行った。
 - エルボ配管から切り出した材料試験も実施することとし、試験体に使用するエルボ配
 管と同一ロットのものを手配することとした。

- (3) 開催日時:令和3年7月7日(木) 10:30~11:30
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員) 打ち合わせ内容:

- ・ 今回から横浜国大から笠井先生、栗山先生が出席することとなった。
- ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- ・ 今回対象とする負荷条件や材料モデルの高度化、疲労試験の内容等について意見交換 を行った。
- (4) 開催日時:令和3年8月4日(水) 10:30~11:45
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)

- 打ち合わせ内容:
- 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- ティ配管継手の形状、今後の材料モデルの高度化、疲労試験の内容等について意見交換を行った。
- (5) 開催日時:令和3年9月2日(水) 10:30~11:45
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)

打ち合わせ内容:

- 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- 配管系試験体の摩擦特性の計測、材料モデルのパラメータ設定、配管系試験体の事前 解析モデル作成等について意見交換を行った。
- (6) 開催日時: 令和3年10月5日(火) 10:00~12:00
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)

打ち合わせ内容:

- ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- 実測形状データを用いた事前解析モデルの作成、摩擦計測の内容、配管系試験体での ひずみ計測等について意見交換を行った。
- (7) 開催日時: 令和3年11月9日(火) 9:30~11:30
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)

- 打ち合わせ内容:
- ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- ・ E-ディフェンス実験の試験体条件、材料試験のボイド観察結果、今後の材料試験の 実施内容等について意見交換を行った。
- (8) 開催日時:令和3年12月9日(木)9:30~11:00
 - 開催形態:Web
 - 出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)
打ち合わせ内容:

- ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- ティ配管継手の形状ばらつき、材料試験のボイド観察結果、材料モデルのパラメータ 設定、材料試験の結果速報の解釈等について意見交換を行った。
- (9) 開催日時: 令和4年1月13日(木) 9:30~11:15
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)

打ち合わせ内容:

- ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- ・ 令和4年度の業務計画内容の確認を行った。
- E-ディフェンス実験用試験体の製作状況、疲労損傷の評価等について意見交換を行った。
- (10) 開催日時:令和4年2月16日(水)9:30~12:00

```
開催形態:Web
```

```
出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)
```

- 打ち合わせ内容:
- ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。
- ・ E-ディフェンス実験用試験体の特性調査実施状況、事前解析モデルの作成状況、疲労損傷の評価等について意見交換を行った。
- (11) 開催日時: 令和4年3月9日(水) 9:30~11:30
 - 開催形態:Web
 - 出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)

打ち合わせ内容:

- ・ 令和3年度の業務の進捗確認を行った。また、令和3年度の委託業務完了報告書作成 について執筆方針を確認した。
- E-ディフェンス実験の計測内容案、配管継手の加工の影響、材料モデルの構築等に ついて意見交換を行った。

1.3 令和4年度

(1) 開催日時: 令和4年4月13日(水) 9:30~11:00

開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生2名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和3年度の成果確認および令和4年度の業務計画内容の確認を行った。
- ・ Gurson モデルの検討方針について意見交換を行った。
- (2) 開催日時: 令和4年5月18日(水) 14:30~16:30

開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生3名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- ・ 対外発表計画に関して意見交換を行った。
- (3) 開催日時:令和4年6月8日(水)9:30~11:30
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生2名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- ・ E-ディフェンス実験の試験条件および材料試験に関する意見交換を行った。
- (4) 開催日時:令和4年7月6日(水)9:30~11:15
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生2名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- ・ E-ディフェンス実験準備および材料モデル構築に関する意見交換を行った。
- (5) 開催日時:令和4年8月9日(火)9:30~11:30
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生2名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- E-ディフェンス実験準備および材料試験結果、材料モデル構築に関する意見交換を 行った。
- (6) 開催日時:令和4年9月21日(水) 15:30~18:00
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生3名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- E-ディフェンス実験報告および事後解析、材料モデル構築に関する意見交換を行った。
- (7) 開催日時:令和4年10月13日(水) 13:30~15:00
 - 開催形態:Web
 - 出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生2名 打ち合わせ内容:
 - 令和4年度業務の進捗確認を行った。
 - ・ E-ディフェンス実験結果および材料モデル構築に関する意見交換を行った。
- (8) 開催日時:令和4年11月15日(火)13:00~14:30
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生4名 打ち合わせ内容:

 ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。

- P0 中間フォロー準備および材料モデル構築、外部研究会との連携に関する意見交換を 行った。
- (9) 開催日時:令和4年12月14日(水)11:00~12:40
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生3名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- P0 中間フォロー結果報告、材料モデル構築、継手メーカーヒアリング結果に関する意 見交換を行った。
- (10) 開催日時: 令和5年1月17日 (火) 9:30~11:30
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生4名 打ち合わせ内容:

- 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- ・ E-ディフェンス実験事後解析、材料モデル構築、継手形状の規格に関する意見交換 を行った。
- (11) 開催日時: 令和5年2月15日(水) 9:30~11:20
 - 開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生3名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度業務の進捗確認を行った。
- ・ 外部研究会での研究紹介内容、材料モデル構築に関する意見交換を行った。
- (12) 開催日時: 令和5年3月22日(水) 9:30~12:00

開催形態:Web

出席者:中村(防災科研)、澁谷、笠井(横浜国大)、栗山(横浜国大客員)、学生2名 打ち合わせ内容:

- ・ 令和4年度成果報告書の取りまとめ方針を確認した。
- 外部研究会、外部機関との意見交換結果の共有を行った。また、材料モデル構築、ティ配管形状モデルの構築に関する意見交換を行った。

2. 外部専門家との意見交換

- (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 2-2]本会合
 - 開催日時:令和2年11月11日(月)13:30~17:00
 出席者:奥田幸彦(JAEA)、大谷章仁(IHI)、白鳥正樹(横浜国大名誉)、澁谷忠 弘(横浜国大)、中村いずみ(防災科研)、他委員・オブザーバー 21名 打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):

・ 本研究の採択報告と研究概要の紹介を行い、実施内容に関する意見交換を行った。
2) 開催日時:令和3年3月10日(水)13:30~17:05

- 出席者:森下正樹、奥田幸彦、渡壁智祥、奥田貴大(JAEA)、白鳥正樹(横浜国大名 誉)、澁谷忠弘(横浜国大)、中村いずみ(防災科研)、他委員・オブザーバ - 20名
- 打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):
- ・ 本研究の進捗報告を行い、実施内容に関する意見交換を行った。
- 3) 開催日時: 令和5年3月24日(金) 13:30~16:30
 - 出席者:大谷章仁(IHI)、奥田幸彦、渡壁智祥、奥田貴大、滝藤聖崇(JAEA)、白 鳥正樹(横浜国大名誉)、酒井理哉、嶋津龍弥(電中研)、中村いずみ(防災 科研)、他委員・オブザーバー 27名
 - 打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):
 - E-ディフェンス実験結果報告を行い、実験結果および材料モデルの構築に関する 意見交換を行った。
- (2) 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 2-2] 幹事会
 - 開催日時:令和2年10月28日(水)13:30~15:30
 出席者:森下正樹、奥田幸彦、奥田貴大(JAEA)、大谷章仁(IHI)、白鳥正樹(横浜国大名誉)、澁谷忠弘(横浜国大)、中村いずみ(防災科研)

打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):

- ・ 本研究の採択と研究概要について報告し、意見交換を行った。
- 2) 開催日時:令和3年2月5日(金)13:30~17:40
 - 出席者:森下正樹、奥田幸彦、奥田貴大(JAEA)、大谷章仁(IHI)、白鳥正樹(横 浜国大名誉)、澁谷忠弘(横浜国大)、中村いずみ(防災科研)
 - 打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):
 - ・ 本研究の進捗状況を報告した。
 - ・ 配管系試験体形状、非弾性のモデル化方法について意見交換を行った。
- 3) 開催日時:令和3年3月5日(金)13:30~15:00
 - 出席者:森下正樹、渡壁智祥、奥田貴大(JAEA)、白鳥正樹(横浜国大名誉)、澁谷 忠弘(横浜国大)、中村いずみ(防災科研)

打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):

- ・ 本研究の進捗状況を報告した。
- ・ E-ディフェンス実験の事前解析、負荷の評価内容について意見交換を行った。
- 4) 開催日時: 令和3年9月16日(木) 15:00~17:00
 - 出席者:森下正樹、渡壁智祥、奥田幸彦、奥田貴大(JAEA)、大谷章仁(IHI)、白 鳥正樹(横浜国大名誉)、澁谷忠弘(横浜国大)、中村いずみ(防災科研) 打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):
 - ・ 本研究の進捗状況を報告した。
 - ・ 材料試験の実施内容、三軸応力の影響、Gurson モデルの適用範囲等について意 見交換を行った。
- 5) 開催日時:令和4年9月22日(金)10:00~12:00

出席者:大谷章仁(IHI)、奥田幸彦、渡壁智祥、滝藤聖崇(JAEA)、白鳥正樹(横浜国大名誉)、酒井理哉、嶋津龍弥(電中研)、中村いずみ(防災科研) 打ち合わせ内容(本研究に関連する部分のみ):

- E-ディフェンス実験結果を報告し、実験結果に関する意見交換を行った。
- (3)日本塑性加工学会チューブフォーミング分科会第160回研究例会 開催日時:令和5年3月16日(木)13:00~17:30
 開催形態:ハイブリッド(対面+オンライン)
 - 開催場所:ものつくり大学(埼玉県行田市前谷 333 番地)
 - 出席者:対面・オンライン合わせて40名程度
 - 発表者:栗山幸久(横浜国大客員)、中村いずみ(防災科研)
 - 意見交換内容(本研究に関連する部分のみ)
 - ・ E-ディフェンス実験結果および耐震性能評価に関する研究紹介を行い、ティ配管の 形状特性や破損の要因についての意見交換を行った。
- (4) 配管継手メーカー意見交換
 - 日時: 令和4年12月7日(木) 14:00~18:00
 - 訪問先:ベンカン機工 藪塚工場・桐生工場
 - 訪問者: 澁谷忠弘(横浜国大)、栗山幸久(横浜国大客員)、中村いずみ(防災科研)、 学生1名

意見交換内容:

- ・ 配管継手の形状、規格、製造方法について情報交換を行った。
- ・ エルボおよびティ配管の製造工程の見学を行った。

以上