第306号

March 2007

防災科学技術研究所研究資料

Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention No.306

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

Study on Fracture Mechanics of Eroded Pipes under Seismic Loading





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

中村いずみ*・大谷章仁**・白鳥正樹***

A Study on Fracture Mechanics of Eroded Pipes under Seismic Loading

Izumi NAKAMURA*, Akihito OTANI**, and Masaki SHIRATORI***

* Hyogo Earthquake Engineering Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan izumi@bosai.go.jp ** Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., Japan akihito_ootani@ihi.co.jp *** Yokohama National University, Japan masaki@swan.me.vnu.ac.jp

Abstract

Piping systems used for an extended period may develop degradations such as wall thinning or cracks due to aging. In this study, pipe element tests and piping system tests for pipes with wall thinning were conducted to clarify the failure behavior of such piping systems under seismic events. The pipe element tests consisted of displacement-controlled cyclic bending tests on elbows, while the piping system tests were shake table tests for simply-designed piping system models. Through these tests, the failure modes of pipes with wall thinning were obtained under several loading and wall thinning conditions, while the characteristics of the failure behavior of thinned wall pipes under severe cyclic load was ascertained. In addition to these experiments, elastic-plastic FEM analyses were conducted. The purpose of the analyses was to produce a reliable analytical model to reproduce the experimental results, and to establish a method for the life estimation of thinned wall pipes based on the analytical result. As a result, failure areas were identified and their life estimation obtained at an accuracy of 1/2 - 2 times that of the experimental results for pipe elements. The failure areas were in general well predicted through analyses of the piping systems, although the error concerning their life estimation was large in some cases.

Key words : Aging degradation, Piping system, Wall thinning, Seismic load, Shake table test, FEM analysis, Life estimation

^{*} 独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター

^{**} 石川島播磨重工業株式会社

^{***} 横浜国立大学大学院 工学研究院

1.	はじめに	• - • • • • • • • • • • • • • • • • • •	4
	1.1 研究	その背景	4
	1.2 既往	E研究の動向	5
	121	減肉を有する配管の強度評価に関する研究	5
	1.2.1	副等変の弾御州古文送動や上が伝動招復に開まる孤次	5
	1.2.2	正官示の理空性応合学動わよい拡動損防に関する研九	5
	1.2.3	配官の弾型性解析に関する研究	5
	1.3 本研	F究の目的と今期5ヶ年の実施内容	6
	1.4 報信	テ書の構成	6
2.	これまて	*に実施した減肉配管を対象とした研究成果の概要	7
	2.1 概要	μ.	7
	2.2 成身 2.2 前身	2. 中学乳酸	7
	2.2 日山目	+女术叫歌	7
	2.2.1	試験闪谷	/
	2.2.2	試験結果	8
	2.3 配管	音系振動試験	11
	2.3.1	試験内容	11
	2.3.2	試驗結果	12
	24 鼦村	F的檢封	15
	2. T /j+/)	四次町主に対すて詳細知応	15
	2.4.1	即官安糸に刈りる 計細 附前 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
	2.4.2	配管糸の簡易応答解析	17
	2.5 こオ	1までの成果のまとめ	18
3.	配管要素	₹試験	19
	3.1 概要	۲ ۲	19
	3.2 曲管	· · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	19
	3.2 m p	→	10
	3.2.1	叫歌刀伝	17
	3.	2.1.1 試験体の概要	19
	3.	2.1.2 試験条件	19
	3.	2.1.3 計測	21
	3.2.2	試験結果	25
	3.	2.2.1 作用荷重レベルと破損状況	25
	3	2.2.2 机闪动工厂 动 2.00000000000000000000000000000000000	27
	5.	2.2.2 //住友儿	20
	3.	2.2.3 何里发形舆除	28
	3.	2.2.4 曲管部分のひすみ挙動	29
	3.3 実在	E減肉配管と模擬減肉配管の比較	36
	3.3.1	実在減肉配管の入手と調査	36
	3.3.2	実在減肉配管と模擬減肉配管の載荷試験	37
	3.4 配管	マ要素試験のまとめ	39
1			10
ч.		K 型/ 印八湖火 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	40
	4.1 忧労	ξξ	40
	4.2 試懸	〕方法	40
	4.2.1	試験体の概要	40
	4.2.2	試験条件	42
	4.2.3	計測	42
	43 試驗	2.2.4	45
	1.2 日代初	19月1日1月1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1	15
	4.3.1		43
	4.3.2	业体能官糸振期試験じの作用応刀	46
	4.3.3	劣化状況と応答値の関係	48
	4.3.4	エルボの外径変化	49
	4.4 配管	系振動試験のまとめ	49

5.	詳	細解析	による減肉配管の疲労寿命評価	50
	5.1	概要		50
	5.2	配管	要素試験に対する解析評価	50
		5.2.1	解析諸元	50
		5.2.2	累積疲労損傷則を用いた寿命評価	50
		5.2.3	多軸非線形ひずみ下の低サイクル疲労寿命評価法	51
		5.2.4	実験結果と解析結果の比較	52
	5.3	配管	系振動試験に対する解析評価	58
		5.3.1	解析諸元	58
		5.3.2	実験との比較	59
		5.3.3	各条件でのF値の比較	62
		5.3.4	破損箇所の予測	62
		5.3.5	余盛の考慮	62
		5.3.6	精度検証	62
	5.4	まと	Ø	63
6.	結諸	斎		65
	6.1	本研究	そのまとめ	65
	6.2	今後の)課題	65
<	謝辞	≱>		66
<	参考	文献>		67
<	関連	夏 発表論	这>	69
要	Ľ	i		70
<	添付	資料1	> 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 委員会名簿	71
<	添付	資料2	> 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 研究会名簿	72
<	添付	資料3	> 曲管試験体における作用応力算出手順 (3.1.2.1)	73
<	添付	資料4	> 配管系振動試験における計測ひずみからのモーメント算出手順(4.3.2.2)	74
<	添付	資料5	> 実験結果等カラー図版	75

【執筆担当】

第1章~第4章,第6章
 防災科学技術研究所 中村 いずみ
 第5章 横浜国立大学 白鳥 正樹

1. はじめに

1.1 研究の背景

日本では、1963年10月26日、日本原子力研究所(当 時.現,独立行政法人日本原子力研究開発機構)によ り、茨城県東海村で試験炉を用いて初の原子力発電が 行われた. 1966年には日本初の商業用原子力発電所と して日本原子力発電の東海発電所が、1970年には現在 の発電用原子炉の主流である軽水型商業用原子炉であ る関西電力の美浜原子力発電所1号機 (PWR型) が, 1971 年には同じく軽水型商業用原子炉である東京電力の福 島第一原子力発電所1号機(BWR型)が相次いで営業 運転を開始した。2006年6月現在、日本では55基の商業 用原子炉が稼働しており,原子力発電による発電量は総発 電量の3割以上を占めている. 商業用原子炉の運転開始年 ごとの基数は図1-1に示すとおりであり、半数以上の31基 が運転開始から20年以上経過している.原子力発電施設 の耐用年数は従来30年とされてきたが、1999年に通産省・ 資源エネルギー庁(当時)は、運転開始後30年近くを経た 原子力発電施設3基について、60年を視野に入れた長期運 転が技術的に可能とする報告書¹⁾を提出した.この報告書 に基づき,高経年化の影響評価を行い,30年を超えて運転 を継続している原子炉が11基存在する.

長期にわたって使用された施設には、高経年化に伴い構 成機器・配管の劣化が発生すると考えられることから、長 寿命化を実現するためには、適切な管理を行い、高経年プ ラントの改造工事を含めた経年化対策を講じ、安全性を確 保する必要がある.一般に、プラントにおける主要構成要 素の一つである配管系には、高経年化に伴い通常の熱疲労 だけでなく、応力腐食割れや流れ加速型腐食(FAC)な どによる減肉といった劣化の発生が知られている.重 要度の高い配管系に破損が生じた場合、システム全体 に波及する影響が多大であることから、その健全性を 維持することは重要であり、配管系に発生するき裂や 減肉のような劣化の許容条件の検討においては、実験と解 析に基づく合理的な検証データを蓄積する必要がある.特 に日本は地震国であるため,劣化を想定した高経年プラン トの安全性は大地震時においても十分確保されなければな らず,劣化が検出された際には当該劣化状況が耐震上許容 されるかどうかの評価が必要となる.そのためにはこのよ うな劣化部が配管系の動的挙動および耐震安全裕度に与え る影響を明らかにし,地震動を受ける経年劣化配管の挙動 を合理的に評価する手法が必要となる.

これまでに配管の損傷評価に関しては、き裂を対象とし た研究が数多く実施され、き裂については破壊力学的評価 が可能となっている.2000年に初めて策定された日本機械 学会発電用原子力設備維持基準²¹においては、欠陥として き裂を対象とし、破壊力学に基づく欠陥評価が規定され た.一方、この維持基準では非き裂状欠陥は対象とされて おらず、減肉については建設時の基準での必要最小肉厚に よる評価のみが規定されている.世界的に参照される、米 国機械学会(The American Society of Mechanical Engineers, 以下 ASME)の維持基準 ASME Pressure Vessel and Piping Code Sec.XI³¹ では、供用期間中に減肉が発見された場合 の評価方法が規定されているが、通常使用時における評価 のみとなっている.

日本では、各プラントの高経年化技術評価を審査するた めの審査マニュアルが必要となり、原子力安全・保安院の 要請で、原子力安全基盤機構(以下JNES)により、平成 17年12月に高経年化技術評価審査マニュアル^{4)、5)}が作成 された.この中では、想定減肉に対する地震時応力評価に ついて、累積疲れ係数と発生応力の評価をすることと規定 されている.関西電力美浜原子力発電所3号機、東京電力 福島第一原子力発電所3号機、中部電力浜岡原子力発電所 1号機では、高経年化技術評価等報告書において、長期間 の運転に伴い生じる減肉量を想定した耐震評価を実施し、 高経年化プラントの安全性を確認している^{6),5)}が、審査マ ニュアルの中では減肉配管に対する耐震性を評価するため の詳細な規定はなく、事業者ごとに評価手法が統一されて





はいないのが現状である. 地震荷重を考慮した減肉配管の 耐震裕度評価法については, 学会基準等の形には整備され ていない.

1.2 既往研究の動向

1.2.1 減肉を有する配管の強度評価に関する研究

減肉のような非き裂状欠陥を有する配管の健全性評 価に関する研究としては、原子力発電技術機構(当時、 以下NUPEC. 現, 独立行政法人原子力安全基盤機構) において、平成12年度~平成14年度の3ヶ年にわたり 実施された減肉配管の耐震実証試験がある.この試験 では減肉のある曲管およびティの静的繰り返し載荷試 験,減肉を導入した配管系に対する振動台を使用した 加振試験、およびそれらの詳細解析が実施され、減肉 を想定した配管系の耐震強度の信頼性を評価した^{9), 10)}. この他には、1986年に米国Surry原子力発電所で減肉 エルボの破断事故11)が発生したことを受けて日本原子 力研究所で実施された減肉配管の破壊限界を求める試 験12)をはじめとして、局所減肉のある配管の終局強度 や破壊形態を得る実験研究などが行われ,劣化形状と 破損条件との関連づけや評価基準の検討が行われてい る13)-19)が、これらの多くは地震を想定した繰り返し載 荷ではなく一方向載荷によるものであり、全体として は劣化条件として減肉を対象とした配管の耐震挙動評 価に関する研究は数少なく,特に繰り返し荷重下にお ける減肉配管の挙動には不明な点が数多く残されてい る.

1.2.2 配管系の弾塑性応答挙動および振動損傷に関する研 究

内圧を負荷した配管の振動損傷に関する研究は,これま でに健全配管を対象としたものが数多く実施されている. 国内で実施された研究としては、1971年~1973年に日本 電気協会において,科学技術庁(当時)の委託研究として 実施された地震時における原子力施設の限界設計に関する 試験研究20)がある、この中では、直管、曲管、分岐管につ いて静的載荷試験と振動台を用いた加振試験が行われ, ASMEの設計規格と比較した配管の裕度評価が行われた. この試験研究の中で実施された加振試験の結果から,内圧 を受ける配管は繰り返し載荷によりラチェット現象(注) を生じ,破損寿命や安全裕度に影響を与えることが明らか にされた^{21), 22), 23)}. この現象を重点的に解明するため, Hara らは実物大の配管要素に対し内圧を負荷した条件で正弦波 またはランダム波による動的な繰り返し載荷試験を実施 し、破損部分の局所ひずみを考慮することでラチェット現 象を伴う配管要素の低サイクル疲労寿命を評価した24.近 年では電力共通研究として実施された配管耐震設計基準の 合理化研究²⁵⁾、NUPECにより実施された配管終局強度耐 震実証試験²⁰などで配管要素の低サイクル疲労破壊試験, 配管系の振動破壊実験が行われるとともに、有限要素法 (以下 FEM) による詳細解析が実施され,解析で求められ たひずみに基づく詳細な疲労評価が実施されている.国外 で実施されたものとしては、米国の EPRI (Electric Power Research Institute) で実施された配管の動的信頼性評価に 関する研究プログラム(Piping and Fitting Dynamic Reliability Program,以下 PFDRP)²⁷⁾があり,この実験結果や解 析結果から,配管系の終局破損形態や設計基準変更に関す る議論が行われている^{28),29),30)}.また,フランスでは原子 力庁(CEA)により,設計基準の緩和を目的として,実規 模の配管を用いた振動破壊実験と簡易解析コードの開発が 行われた³¹⁾.

(注) ラチェット現象:定常応力の作用する部材に塑性変形 を伴う高応力が繰り返し重畳作用するときに部材が定常 応力の作用方向に次第に永久変形を生じること.配管の 場合は線形範囲内での内圧負荷条件下において非線 形領域の繰り返し載荷の重畳により塑性変形を生じ, 配管外径が増加する現象を指す.

1.2.3 配管の弾塑性解析に関する研究

配管要素単体を対象とし、強制載荷時の弾塑性挙動 を有限要素法解析などの手法を用いて明らかにし、限 界強度を評価する研究は、健全配管を対象としたもの で、かつ単調載荷条件のものが多い. M.A.Shalaby らは、 内圧負荷条件下において, 面内曲げまたは面外曲げ荷 重を受ける健全エルボの非線形解析を実施し、塑性不 安定モーメントや崩壊モーメントに対する内圧や肉厚 の影響を調査している^{32)~35)}. また, Y.Tan らは, 直管 および曲管に対する実験と解析を実施した論文から、 使用する有限要素法解析コードやモデリングによる実 験と解析の誤差について検討している36),37).減肉配管 を対象とした解析としては、Do-Jun Shim らにより、減 肉のある直管について,最大モーメントに対する減肉 深さや減肉角度,軸方向減肉長さや内圧の影響を調査 するパラメトリック解析が実施されている³⁸⁾. これら の解析は単調載荷条件を対象としたものであり、繰り 返し載荷条件下における配管要素の解析検討について は、健全配管では、前項で述べた NUPEC で実施された 配管終局強度耐震実証試験の配管要素試験を対象とし た弾塑性解析³⁹⁾、減肉配管を対象としたものとしては、 同じく NUPEC により実施された減肉配管の耐震実証試 験における配管要素試験を対象とした弾塑性解析⁹⁾が 実施され、材料特性の設定によるひずみ挙動の再現性 の検討、解析により得られたひずみ履歴を用いた疲労 寿命評価について検討が行われた.また、白鳥らは、減 肉部を有する直管について実施した繰り返し載荷試験 に基づき弾塑性解析を実施し、繰り返し荷重下の減肉 配管の損傷メカニズムについて考察した40).

配管系の弾塑性応答解析に関しては,NUPECで実施 された配管終局強度耐震実証試験,減肉配管の耐震実 証試験に基づき,配管系の弾塑性時刻歴応答解析と, その結果を用いた局所のひずみ挙動の評価が実施され た例がある^{9).41)}.一方,解析に多大な時間を要する弾 塑性時刻歴応答解析に代わり,主に耐震設計での適用を視 野に入れた,配管系の弾塑性応答を簡易的に求める手法の 検討も行われている^{42).43)}.

1.3 本研究の目的と今期5ヶ年の実施内容

1.1 で述べたように、高経年配管系の大地震時におけ る安全裕度を合理的に評価するためには, 高経年化に より構造劣化が生じた配管系の限界強度や最終破損形 態を把握する必要がある.しかし、そのような構造劣 化のある配管系を対象とした,静的な一方向荷重下に おける限界強度に関する研究,あるいは健全配管系の 振動損傷や弾塑性応答に関する研究は数多く行われて いるが、構造劣化のある配管系について、動的な地震 荷重を想定し、劣化の存在が配管系の限界強度や損傷 形態、弾塑性応答に及ぼす影響を調査した試験研究は ほとんど行われておらず,劣化配管の破損メカニズム は明らかにされていない、そこで、地震動を想定した 荷重を受ける経年劣化配管の破損形態および動的挙動 を実験的に明らかにし、経年劣化配管の耐震性を解析 に基づき評価する手法を検討することを目的とし、平 成8年度~平成12年度に「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」(以下 AP 研究)を 実施した44). この中では、当初劣化条件としてき裂の みを対象としていたが、繰り返し荷重を受ける減肉配 管の損傷挙動に関する試験研究がほとんどなされてい ないことを考慮して,減肉を対象とした載荷試験を追 加して行った.この試験研究を実施する中で、減肉配 管においては劣化条件と外力条件により複雑な破損挙 動を示すことが明らかになったため、平成13年度~平 成17年度において、減肉配管の破損挙動を明らかにす ることを目的とした継続課題「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」(以下 NAP 研究)を 実施した.この中では主に曲管部分における減肉に着 目し,ねじりを含む荷重条件における損傷挙動の把握 と解析評価を行った,本研究では経年劣化を模擬した 直管または曲管を使用して変位制御の繰り返し載荷試 験を行う配管要素試験と,劣化部分を有する配管系に 対して振動台を用いた加振を行う配管系振動試験を実 施し,劣化条件や荷重条件による破損形態の違いや劣 化部の有無による配管系の地震応答の変化等を実験的 に明らかにした. また, これらの実験結果を精度良く 再現することを目的とした詳細解析モデルを作成し, その解析結果から劣化配管における破損メカニズムの 考察や強度評価を行い、実験結果と比較して解析モデ ルの有用性と精度の検証を行った. さらに, そのよう な解析モデルを使用することにより、劣化のある配管 系の振動応答評価から強度評価までを解析に基づき実 施する方法の適用性の検討や,現行基準に対する裕度 評価を行った.

本報告書は、平成13年度から平成17年度にNAP研究で実施した実験内容と解析評価についてとりまとめたものである。NAP研究は、平成8年度から平成12年度に実施したAP研究との関連性が深いため、適宜AP研究の結果も引用してとりまとめた。

AP研究およびNAP研究の実施に際しては,防災科学技術研究所,横浜国立大学,石川島播磨重工業との三者共同

研究の体制をとり,実験に加え様々な解析・検討を行って いる.この中で,研究の全体計画の策定およびとりまとめ は防災科学技術研究所が,実験の実施は主に防災科学技術 研究所と石川島播磨重工業が,詳細解析の実施は主に横浜 国立大学が担当した.また,上記の研究で対象とする破壊 力学や振動応答といったそれぞれの専門領域に加え,実務 的な観点も含めた広い立場からの意見をいただくため,実 験実施委員会(平成8年度~平成12年度,略称AP委員会, 委員長:白鳥正樹横浜国立大学教授),および実験実施研 究会(平成13年度~平成17年度,略称NAP研究会,主査: 白鳥正樹横浜国立大学教授)を組織し,実験の実施計画や 結果,解析評価についての議論を行っている. **<添付資** 料1>および**<添付資料2**>にAP委員会およびNAP研究 会の名簿を示す.

1.4 報告書の構成

本論文は6章から構成される.各章の概要は以下の 通りである.

第1章では本研究の背景および劣化配管の損傷や配 管系の弾塑性応答に関わる既往の研究と未解明の点に ついて述べ,それらをふまえて本研究の目的を明らか にした.

第2章では、本研究の先行研究にあたるAP研究にお ける成果のうち、減肉を対象とした研究成果の概要に ついて述べる.

第3章では、減肉部を有する曲管(エルボ)に対し、 載荷条件や劣化形状による破損形態を把握するために 実施した繰り返し載荷試験について述べる.

第4章では減肉部を有する基本的な形状の配管系に 対し振動台を用いて実施した加振試験について述べる. 加振試験で得られた加速度応答値や配管系各部の変形 などから構造劣化部分のある配管系について,弾塑性 応答領域に至るまでの振動応答特性を明らかにする. また,劣化配管の振動応答による最終損傷形態につい て述べる.

第5章では,第3章および第4章で述べた実験結果に 対し,有限要素法を用いた詳細解析と,解析に基づく 疲労寿命評価について述べる.ここでは実験で得られ た破損寿命や配管の応答挙動と解析結果の比較を行い, 実験結果の再現精度と解析に基づく寿命評価法の適用 性について検討を行う.

第6章では、本研究のまとめと今後の課題について 述べる.

2. これまでに実施した減肉配管を対象とした研究成果の 概要

2.1 概要

第1章で述べたとおり,著者らが平成8年度から平成12 年度の期間に実施した AP 研究において,減肉配管を対象 とした実験と解析を実施した.本章ではAP研究のうち,減 肉を対象とした研究内容と得られた成果の概要を述べる. なお,研究内容の詳細については文献¹¹にまとめられてい る^(注).

2.2 配管要素試験

2.2.1 試験内容

AP研究では、高レベルの繰り返し荷重下における減肉 配管単体の損傷挙動を把握するため、直管を用いた配管要 素試験(以下直管要素試験)を実施した.直管要素試験で は、機械加工により内面に全周減肉を加工した直管を使用 し、変位制御の繰り返し4点曲げ載荷を行い、劣化条件や 載荷条件による破損形態の違いを把握することを目的とし た.また、同じ材質で健全肉厚の試験体についても載荷試 験を行い、荷重変形特性の比較を行った。

使用した配管の種類は、高圧配管用炭素鋼鋼管 STS410 とした.表2.2.1-1に使用した鋼材の化学組成を、表2.2.1-2 に機械的性質を示す.供試部の配管は100A,sch80(外径: 114.3mm,肉厚:8.6mm)とした.また、4点曲げ試験装置 の支点部分における局所変形を防止するため、補強管とし て試験体部分の配管の両端に100A,sch160(外径: 114.3mm,肉厚:13.5mm)の配管を溶接した.試験体部分 の長さは400mmであり、溶接する補強管の長さを調節し て全体の長さを3,010mmとした.減肉は全周減肉とし、機 械加工により内面の肉厚を低減することで模擬した.減肉 量は公称肉厚の50%(肉厚4.3mm)のものを6体、75%(肉 厚2.15mm)、60%(肉厚3.44mm)、25%(肉厚6.45mm)の ものを各1体製作した.また、このほかに、健全試験体を 2体製作した.減肉試験体、健全試験体の形状を図2.2.1-1 および図2.2.1-2に示す.

載荷は防災科学技術研究所の所有する一次元大型振動台





(d) 60% thinned wall specimen (EC09)

図2.2.1-1 減肉試験体の形状

Fig.2.2.1-1 Geometry of the specimens with wall thinning.



図2.2.1-2 健全試験体の形状

Fig.2.2.1-2 Geometry of the specimens without wall thinning (EA01 & EA02).

Material	С	Si	Mn	Р	S
STS410 (EC01~EC04)	0.21	0.18	0.73	0.01	0.006
STS410 (EC05~EC09, EA01, EA02)	0.20	0.24	0.43	0.019	0.002

表 2.2.1-2 鋼材の機械的性質

Table2.2.1-2	Mechanical	properties	of materia	ls
--------------	------------	------------	------------	----

Material	$\sigma_{y}[MPa]$	$\sigma_{\rm u}[{ m MPa}]$	El.[%]
STS410 (EC01~EC04)	345	509	41
STS410 (EC05~EC09, EA01, EA02)	312	470	38

(注) 文献¹⁾は,防災科学技術研究所ホームページでPDF ファイルのダウンロード可能.

http://www.bosai.go.jp/library/pub/technical_note/tec_note1.htm

製本版については著者に問い合わせのこと.

を使用し、振動台と基礎との相対変位を試験体への入力と する変位制御の4点曲げ試験装置を製作して使用した. 表2.2.1-3に大型振動台の基本性能を、図2.2.1-3に4点曲げ 試験装置を示す.4点曲げ試験装置の支持点スパンは 2,400mm, 負荷点スパンは800mmである. 載荷履歴は, 振 幅が一定である1Hzの正弦波と、卓越振動数が1Hzである ランダム振幅波を使用した.図2.2.1-4にこれらの載荷波形 を示す. 試験は常温で行い、すべての試験体に対し水圧に より11MPaの内圧を負荷した.ただし、50%減肉試験体 の1体については、内圧が破損形態に与える影響を把握す るために、内圧および内部水なしで試験を実施した. 試験 では、き裂が貫通し内部水が漏洩するまで図2.2.1-4に示し た載荷波形を繰り返し入力した.内部水なしで載荷を実施 した試験体については映像記録から目視によりき裂貫通を 判断した.実験で使用した試験体の名称、減肉条件、内圧 条件をまとめて表2.2.1-4に示す.

実験では以下の項目を500Hzのサンプリング周波数で 計測した.

- (1) 試験体への入力変位
- (2) 反力
- (3) 内圧
- (4) 試験体外表面の軸方向および周方向ひずみ
- (5) 試験体内面の軸方向および周方向ひずみ(健全試験体 と減肉試験体の一部)

また,このほか,試験の前後においてノギスにより配管外 径を計測した.

表 2.2.1-3 振動台諸元 Table 2.2.1-3 Specification of the shaking table.

Table size	14.5 m × 15.0 m
Driving system	Electro – hydraulic servo control system
Table control method	Displacement control
Shaking direction	Horizontal (one direction)
Excitation force	3,600kN (900kN ×4)
Max. loading capacity	5,000kN
Max. displacement	$\pm 220\mathrm{mm}$
Max. velocity	75 cm/sec
Max. acceleration	0.55G (with 5,000kN model) / 2.2G(without model)
Frequency range	DC - 50Hz
Input wave type	Sinusoidal wave , Random wave, Earthquake wave

2.2.2 試験結果

減肉配管および健全配管の試験結果を表 2.2.2-1 にとり まとめて示す. 試験体のうち, 正弦波により載荷したもの については,破損までに要した正弦波定常部分の波数を表 中に併記した. これらの試験体は, 減肉量および内圧値と の関係により以下の破損形態が確認された.

 減肉量25%~60%,内圧11MPa (EC01~EC05, EC08, EC09)

内圧により減肉部分に生じる膜応力は,降伏応力を σ_yとすると,減肉量に応じて0.30σ_y~0.58σ_yとなった. これらの試験体は,全て減肉部分でラチェットによ り配管外径が膨らみ,このラチェット変形部分で低 サイクル疲労き裂が貫通した.図2.2.2-1に代表的な 損傷としてEC05の損傷状況を示す.ラチェットによ る配管外径の増加は10%~20%となった.入力波形 の違いによる破損形態の違いは確認されなかった.

(2) 減肉量 50%,内圧なし(EC06)

内圧のない試験体では,載荷に伴い減肉部分が配管 内面に折れ曲がる局所座屈が発生した.この座屈変 形の頂部でき裂が貫通し,後続の数サイクルにより 全周破断に至った.この結果から,内圧のない減肉配 管の破損形態は局部座屈を伴う低サイクル疲労破壊 であると考えられる.図2.2.2-2にEC06の損傷状況を 示す.





(3) 減肉量75%,内圧11MPa (EC07)

内圧により減肉部分に生じる膜応力は $0.9\sigma_y$ となった.この試験体では繰り返し載荷に伴い減肉部分で ラチェット変形が顕著に生じた.最終的に減肉部分 で周方向にき裂が貫通するとともに配管周方向の3か 所で軸方向き裂が発生した.図2.2.2-3にEC07の損傷 状況を示す.配管の外径はラチェット変形のために 30%以上増加した.また,軸方向き裂の発生した部 分の肉厚は1.1mm~1.6mmに減少していた.周方向 および軸方向に生じたき裂と軸方向き裂発生位置に おける肉厚の減少から,EC07では内圧による破裂と 低サイクル疲労破壊が混在する破損形態となったと 考えられる.

以上から、本実験で確認された減肉配管の破損形態は、ラ チェットを伴う低サイクル疲労破壊、座屈、低サイクル疲 労破壊と破裂との混在の3種類となった.



Ratchet deformation Circumferential crack

- 図2.2.2-1 ラチェットによる減肉部分の変形 (EC05、内圧あり50%減肉試験体)
- Fig.2.2.1 Deformation at thinned wall part caused by ratchet (EC05, 50% thinned wall with internal pressure).

健全配管については,単調載荷を行ったものは装置の最 大許容入力変位である140mmまで変位を増加させたが破 損は生じなかったため,破損させずに試験を終了した.繰 り返し載荷を行ったものは入力変位±95mmで,試験配管 と補強配管を接合した溶接部分でき裂が貫通した.



Buckling deformation

Circumferential crack

- 図2.2.2-2 減肉部分での局所座屈変形 (EC06,内圧なし50%減肉試験体)
- Fig.2.2.2-2 Buckling deformation at thinned wall part (EC06, 50% thinned wall without internal pressure).



Circumferential crack

Longitudinal crack

- 図2.2.2-3 周方向および軸方向き裂とラチェット変倦 (EC07,内圧あり75%減肉試験体)
- Fig.2.2-3 Circumferential and longitudinal cracks and ratchet deformation

(EC07, 75% thinned wall with internal pressure).

表 2.2.1-4	直管要素試験	試験体一覧
Table 2.2.1-4	Specimens for st	raight pipe element tests.

		c	c	c		Condition of defect		Internal massive	
Name	Material	S _y [MPa]	[MPa]	S _m [MPa]	Type of defect	Full angle in circumference [deg.]	Depth of defect [*]	(P) [MPa]	
EC01									
EC02		245	500	170					
EC03	STS410	345 5	509	170			0.5 t	11	
EC04					Wall				
EC05				157			thinning	360	
EC06		312			tiiiiiiig			0	
EC07			470				0.75 t		
EC08							0.25 t	11	
EC09							0.6 t		
EA01	STS410	312	470	157	No	0	0	11	
EA02	515410	512	4/0		defect	0	0	11	

* 't' denotes the normal pipe thickness

裢果→覧	ht pipe element tests
直管要素試験 試縣	Test results of straigl
表 2.2.2-1	Table 2.2.2-1

		_		_	_		_		-								_
Max reaction force [kN]				1	Low-cycle fatigue failure with	swelling oy ratchet		Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	Broken by accident	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	Buckling and low-cycle fatigue at thinned wall	Mixture of low-cycle fatigue with ratelet and burst	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratehet	No failure (No crack was found after the test)	Crack penetration at weld line
			78					67	¢	64	86	69	38	80	51	981	135
No. of Ioading		loading	15	15	s	w	m	3 (73 cycles)	+	5	l (11 eycles)	1 (9 cycles)	1 (9 eyeles)	7 (164 cycles)	1 (22 cycles)	10	I for each input
	. of input	[rad]	0.04	0.06	0.08	0,09	0.11	0.06	1	60'0	0.09	60.0	0.06	60'0	0,06	0.35	0.006 - 0.24
condition	Max. amp	[mm]	15	33	30	35	45	25	1	35	35	35	25	35	25	Up to 140	2.5 - 95
Input	Pattern of input	disp. wave			Random			Sinusoidal	3£	Random	Sinusoidal	Sinusoidal	Sinusoidal	Sinusoidal	Sinusoidal	Monotonic	Sin 5 cycles
	σ_{ll}/S_y				0.44			0 44	t	0.45	0.46	0.00	0.92	0.30	0.58	0.22	0.22
Hoop stress	by $P(\sigma_{ij})$	[MPa]			137			117	;	140	- 145	0	286	86	180	68	69
Internal pressure (P) [MPa]		- feared ()			=						0		о II		=		
B	In advi	detect								Wall	thinning					No defect	
	Name				EC01			EC02	EC03	EC04	EC05	EC06	EC07	EC08	EC09	EA01	EA02

防災科学技術研究所研究資料 第306号 2007 年3月

2.3 配管系振動試験

2.3.1 試験内容

AP研究では、基本的な形状の配管系の一部に減肉が存 在することによる配管系の振動特性の変化や振動応答によ る最終破損形態を把握することを目的とした配管系振動試 験を実施した.配管系振動試験では、振動台上に減肉部分 を有する配管系を設置し加振試験を行った.試験では配管 系の形状や導入する減肉の種類,減肉の位置を変化させ配 管系の振動特性や破損挙動への影響を調査した.試験体に は平面Z型の平面配管系と、立ち上がり部を持つ立体Z型 の立体配管系の2種類を使用したが、本項では、このうち、 立体配管系試験の概要について述べる.

図2.3.1-1に立体配管系試験体の形状を示す. 試験体はエ



* Weights of model are modified from reference¹), based of the recalculation results of weights really used.

図2.3.1-1 立体配管系試験 試験体形状

Fig.2.3.1-1 3-D piping model for piping system test.

ルボ1を含む部分(部分A), エルボ2を含む部分(部分B), エルボ3を含む部分(部分C)の3つから構成され,フラ ンジで接合した.導入した劣化条件は,エルボ1またはエ ルボ2,もしくは両方の全周減肉である.振動応答特性や 損傷形態の違いを比較するため,劣化のない健全配管系に ついても加振試験を実施した.設定する劣化条件に従い, 部分Aまたは部分Bに劣化を導入した配管を使用した.部 分Cはすべての試験で共通に使用した.

試験で使用した配管は,基本的に高温配管用炭素鋼鋼管 STPT370,100Asch80(口径114.3mm,肉厚8.6mm)とし たが,減肉部分は配管用炭素鋼鋼管FSGPエルボを使用し た.FSGPエルボの公称肉厚は4.5mmであるため,減肉量 は48%となる.減肉を導入する際,健全部分と減肉部分の 肉厚変化部は,エルボに接続する直管に設定し,肉厚を機 械加工で低減した.図2.3.1-2に減肉エルボ周りの加工形状 を示す.



図2.3.1-2 減肉エルボ周りの加工形状

Fig.2.3.1-2 Cross section of thinned wall elbows in longitudinal direction.

衣 2.3.1-1	立体配官糸試験	 訊	
Table 2.2.1-4	Test models for 3-I	D piping system	tests.

	S *1 S *1		c *1	Internal	Condition of defect			
Name	Material	[MPa]	S_u [MPa]	S _m [MPa]	pressure	Туре	Configuration	Defected
					(P)[MPa]			
3D_A01	STPT370	302	473	158	10	No defect		
	FSGP Elbow						Full circumferential thinning Depth : 0.48 t ^{*2}	Ell 1
3D_C01	(Elbow 1 & Elbow 2)	251	452	151		Wall thinning		Elbow I
	/ STPT370	331						
	(Ordinary part)							Elbow 2
	FSGP Elbow		452	151	10			
2D C02	(Elbow 1)	251						Elbow 1
3D_C02	/ STPT370	551	432					
	(Ordinary part)							
	FSGP Elbow]			
20.002	(Elbow 2)	251	251 452	151				
3D_C03	/ STPT370	/ STPT370 351 452	151				EIDOW 2	
	(Ordinary part)							

*1 Value at defected part

*2 't' denotes the normal pipe thickness

試験体の名称と導入した劣化条件は以下の通りである.

- (1) 試験体名: 3D_A01
 劣化条件: 劣化なし
- (2) 試験体名: 3D_C01
 劣化条件:エルボ1およびエルボ2減肉
 図 2.3.1-1 に示したエルボ1 およびエルボ2 部分を FSGP エルボとすることにより全周減肉を模擬した.
- (3) 試験体名:3D_C02 劣化条件:エルボ1減肉 エルボ1部分をFSGPエルボとすることにより全周減 肉を模擬した.
- (4) 試験体名: 3D_C03
 劣化条件:エルボ2減肉
 エルボ2部分をFSGPエルボとすることにより全周減
 肉を模擬した.

表2.3.1-1に試験体の条件をまとめて示す.また,図2.3.1-3 に固有値解析で求めた3D_A01の固有振動数と振動モード を示す.健全状態での一次固有振動数は2.74Hzであり,一 次固有振動モードで支配的な変形はエルボ1およびエルボ 2の面内変形である.応答スペクトル解析の結果,健全状 態の場合,最大応力が発生するのはエルボ1であり,エル ボ2の応力はエルボ1に比べ14%程度低い値になった.

これらの配管系試験体に対し,防災科学技術研究所の所 有する一次元大型振動台を使用して加振実験を行った.振 動台の性能は表2.2.1-3に示したとおりである.加振波形は 試験体の一次固有振動モードのみを励起するよう,1.5Hz~ 3.0Hzの狭帯域ランダム波を作成して使用した.図2.3.1-4 に実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.実験はこの狭帯域ランダム波の入 カレベルを弾性レベル(約100Gal程度まで)から最大 1,850Galまで増加させ,各入カレベルでの応答性状を取得 するとともに,最大レベルで試験体が破損するまで入力を 繰り返した.

試験体には常温水を満たして10MPaの内圧を負荷した. 試験体の破損は、き裂貫通による内部水の漏洩で判断した.3D_A01および3D_C01では漏洩を目視確認した時点で振動台の入力を終了させたが、3D_C02、3D_C03では漏 洩を確認した後も、図2.3.1-4に示した加速度入力が終了す るまで加振を継続した.

試験では,配管系への入力加速度,応答加速度,各部の ひずみを500Hzのサンプリング周波数で計測した.また, このほかに,エルボ1およびエルボ2の配管外径をノギス により計測した.

2.3.2 試験結果

立体配管系試験の結果を表2.3.2-1に示す.各試験体の破 損状況は以下の通りであった.

(1) 健全試験体 (3D_A01)

- 正弦波掃引試験から得られた一次固有振動数は 2.78Hzであった.弾性域レベルで試験体の応答特性 を取得したあと,弾塑性レベルの加振を実施した.そ の結果,入力加速度1,850Galの加振14回目でエルボ 1 脇部片面より配管軸方向に疲労き裂が貫通した. 図2.3.2-1に3D_A01のエルボ1の破損状況を示す.
- (2) エルボ1およびエルボ2減肉試験体 (3D_C01)





Fig.2.3.1-4 Narrow band random wave used for the piping system test of the 3-D piping model.



図 2.3.1-3 立体配管系試験体の振動モード Fig.2.3.1-3 The vibration mode of the 3-D piping model.

表 2.3.2-1 立体配管系試験 試験結果一覧 Table 2.3.2-1 Test results of 3-D piping system tests.

	Condition of	defect	Internal	Natural frequency (f)	by narrow ban	e excitation test d random wave	Transmethy
Value	Type	Depth*	[wBa]	anu damping cano (n) at 1 st mode	Max input acc. [Gal]	Number of times	I CHI I CHITIS
				6 - 04 MO 111 - 2	20-100 (Elastic level)	10	 Penetration of fatigue cracks in a longitudinal
TON DE	No defect	0	10	1 - 2.78 [HZ]	400 - 700	4	direction at Expose 1.
	11-5 Prov.		8	001000	1400	61	A number of small clacks were coserved on the
					1850	14	HERE SERVICE OF LEDGY 4.
	10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 -			5 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	20 – 80 (Elestic level)	4	 Penetration of a fatigue crack in a longitudinal direction at Elbow 1.
3D_001	THE COLUMN NEW	0.48t		[ZI1] 767 - 1	700	1	 No crack was observed at Elbow 2.
	7 22 I MORIE			1710/0-4	1400	2	* The residual deformation was clearly observed
					1850	3	after the test.
					20 – 80 (Elastic level)	4	 Penetration of fatigue cracks in a longitudinal
3D 002	Wall thinning	0.48t	3	T=2.55 [Hz]	700	-	direction at Elbow 1.
	at Elbow1		01	B=0:0151	1400	2	* No crack was observed at Elbow 2.
					1850	3	
					20 – 80 (Elastic level)	4	
1000	Wall thinning	1000		f=2.62 [Hz]	700	-	* Preventation of a fatigue crack in a longitudinal
an us	at Elbow2	0.481		h = 0.0109	1400	61	direction in Elbow 2
	1.21 1.01.01 1.01.01.01.01.01.01				1850	1	THE CLOCK WER COSELVOU OF ENOUNT.
					1850	61	

menual pape uncer ŝ 50

正弦波掃引試験から得られた一次固有振動数は 2.42Hzであった.入力加速度1,850Galの加振1回目 でエルボ1脇腹軸方向の配管外表面にくぼみ発生が確 認された.その後,入力加速度1,850Galの加振3回目 で軸方向に疲労き裂が貫通した.図2.3.2-2に3D_C01 の損傷状況を示す.

(3) エルボ1減肉試験体 (3D_C02)

正弦波掃引試験から得られた一次固有振動数は 2.55Hzであった.入力加速度1,400Galの加振1回目 のあとにエルボ1脇部片面で配管外表面に変化が認め られた.その後,入力加速度1,850Galの加振1回目の あとに,エルボ1の,先に変化が認められたのと反対 側の配管外表面でもくぼみの発生が認められた.こ の試験体は,1,850Galの加振3回目で,これらのくぼ みからき裂が貫通した.図2.3.2-3に3D_C02の損傷 状況を示す.

(4) エルボ2減肉試験体 (3D_C03)

正弦波掃引試験から得られた一次固有振動数は 2.62Hzとなった.入力加速度1,400Galの加振2回目 のあとに,減肉を導入しているエルボ2脇腹片面の配 管外表面軸方向にくぼみが発生した.その後,入力加 速度1,850Galの加振1回目において,この部分で疲労 き裂が貫通した.図2.3.2-4に3D_C03の破損状況を 示す.

試験体の一次固有振動数は,健全配管と比較すると,減 肉が1か所の場合(3D_C02および3D_C03)で6~8%,減 肉が2か所の場合(3D_C01)で約13%低下した.これは, 減肉の存在により配管系の剛性が低下したためと考えられ る.

き裂貫通までに要した弾塑性レベル(入力加速度 400Gal以上)の加振回数は,健全試験体で20回,減肉試 験体で4回~6回となった.配管系の弾塑性応答波形は試 験体ごとに異なるため,加振回数のみで低サイクル疲労損 傷に要したサイクル数を算定することはできないが,これ らの結果から,健全試験体と減肉試験体が同程度の入力加 速度を受ける場合,曲管部分に50%程度の減肉が存在する ことによって,試験体の寿命は1/3以下に低下したと考え られる.

立体配管系試験では、3D_C01において、試験終了後エ ルボ 1が開く方向に約2.6°の残留変形が発生したが、こ の変形が不安定に進行するような現象は生じなかった.実 験で確認された配管系の破損形態は荷重分担の大きい曲管 部分における疲労損傷であった.



図 2.3.2-1 3D_A01 エルボ1における疲労き裂 Fig.2.3.2-1 Fatigue crack at Elbow1, 3D A01.



図 2.3.2-2 3D_C01 エルボ1における疲労き裂 Fig.2.3.2-2 Fatigue crack at Elbow1, 3D_C01.



(a) S047 side



(b) S043 side

- 図2.3.1-3 3D_C02 エルボ1における疲労き裂 (両側に発生)
- Fig.2.3.1-3 Fatigue crack at Elbow1, appeared on the both side of the elbow, 3D_C02.



図 2.3.1-4 3D_C03 エルボ 2 における疲労き裂 Fig.2.3.1-4 Fatigue crack at Elbow2, 3D_C03.

2.4 解析的検討

2.4.1 配管要素に対する詳細解析

直管要素試験の試験体を対象とし,有限要素法を用いた 詳細解析を実施した.解析の目的は,減肉を有する配管に ついて,ある程度の精度で実験結果を再現できるシミュ レーションモデルを構築することである.

解析コードはABAQUSを使用し、それぞれの試験体に 対し、入力波形を模擬した静的な三次元弾塑性解析を行っ た.静的な解析であるため、図2.2.1-4に示した入力変位波 形の時間軸を無視し、図に示された波形順序で強制変位を 入力した.配管はアイソパラメトリック20節点要素を使 用した.以下、このモデルをSolidモデルと称する.また、 形状は対称性を考慮して1/4モデルを作成し、変位制御で 解析している.内圧については実験に準じた値を負荷し、 内圧負荷後に強制変位を入力した.要素数は1,104、節点 数は6,041であり、図2.4.1-1に示すとおり、減肉部分に近 づくに従い分割要素が細かくなるように設定した.

弾塑性解析に使用した式は Mises の降伏条件に基づく Prandtle-Reuss の式である.また,入力した材料特性は移 動硬化則を仮定し,実験で使用した炭素鋼配管 STS410の 単軸引張試験をもとに二直線近似したものを使用した.二 直線近似を行う際,繰り返し硬化により二次直線の勾配が 単軸引張試験より高くなることが懸念されるため,実験結 果と照会しながら勾配を決定した.図2.4.1-2に解析に用い た材料特性を示す. 解析結果のうち,EC05について,解析により得られた 変形状況と実験で得られた配管の変形状況を図2.4.1-3に 比較して示す.図中, *θ*=90°-270°は90°~270°方向(載 荷方向)の断面であることを示す.図2.4.1-3より,実験で 観察されたラチェット変形による配管外径の増加が解析に よりよく再現できていることがわかる.また,図2.4.1-4に 実験と解析の荷重変形関係を,図2.4.1-5に載荷点反力の繰 り返し回数に対する変化(実験結果は載荷点反力の時刻歴 波形)を示す.実験では20サイクル近傍で反力値が急激 に低下しているので,解析は20サイクルまでの計算を 行った.実験と解析を比較すると荷重変形関係および載荷 点反力の繰り返し回数に対する変化ともに定性的によく一 致していることがわかる.ほかの試験体も,若干の差はあ るものの同様の結果が得られていた.

EC05の配管断面での相当塑性ひずみ累積値の分布図 (以下相当塑性ひずみ分布図)を図2.4.1-6に示す.図2.4.1-6 において,色が濃くなるにつれて相当塑性ひずみの累積値 が大きくなることを示している.図から,配管中央断面内 面にあたる点Bで相当塑性ひずみの累積が大きいことがわ かるが,実験ではこの部分からき裂が発生しており,相当 塑性ひずみの累積値は疲労による損傷を予測する一つの目 安になると考えられる.

Solid モデルを用いた解析の簡素化を目的として, Shell 要素を用いてモデル化し,比較解析を行った.解 析にあたり,モデルの作成および要素分割を行うプリプロ







図2.4.1-2 解析に用いた材料特性 Fig.2.4.1-2 Material property for the analysis.



(a) Analysis(θ =90deg. - 270deg.)



(b) Experiment

図 2.4.1-3 EC05 の変形比較 Fig.2.4.1-3 Deformation comparison of EC05.







Fig.2.4.1-5 Load point reaction force of EC05 for number of cycles.



図 2.4.1-6 EC05 の相当塑性ひずみ分布図 Fig.2.4.1-6 Equivalent plastic strain distribution of EC05.

セッシングに Microsoft の表計算ソフト Excelを,実際に 計算を行うソルバーに ABAQUS を,解析結果の出力を行 うポストプロセッシングにはABAQUS POSTを使用した. 作成した Shell モデルのモデル図を図2.4.1-7 に示す.モデ ル化にあたっては,変形に伴う板厚変化が考慮できる4節 点厚肉 Shell 要素を使用した.対称性,内圧条件,弾塑性解 析に使用した式などは全て Solid モデルの解析に準じる. 節点数は582,要素数は530で,EC05を例に取ると,Solid モデルに対し約7.3%の時間で計算が実行できるように なった.図2.4.1-8にそれぞれの解析モデルで得られた荷重







(a) Solid model

変形関係を,また,図2.4.1-9に、図2.4.1-6に示す点Bの 位置におけるサイクル数に対するひずみを示す.Shellモデ ルの解析結果とSolidモデルの解析結果を比較すると,そ れぞれの解析で得られた荷重変形関係は形状,最大値とも よく一致した.また,ひずみに関しては,Shellモデルでは 局所的な板厚方向のひずみを出力することはできないが, 軸方向および周方向ひずみについては良い一致を示してお り,Shellモデルの解析によりSolidモデルと同様の解析結 果が得られることがわかった.

2.4.2 配管系の簡易応答解析

過大な地震動が配管系に入力された場合,配管系に過大 な振動応答が生じ,エルボ等の変形の集中部において局所 的な塑性変形が生じる可能性がある.配管系に局所的な塑 性変形が発生する場合,振動エネルギが消散され,配管系 の振動応答は低減することが一般的に知られている.AP 研究では,塑性変形により消散されるエネルギを考慮した 配管系の簡易弾塑性応答予測手法を開発した.

開発した弾塑性応答予測手法は,塑性変形を伴う過大な 地震応答が発生する場合の最大応答量を予測する手法であ る.弾塑性応答予測手法の手順を図2.4.2-1に示す.この弾 塑性応答予測手法は,大きく分けて3種類の計算により構 成される.これらの計算の概要を以下に示す.









図 2.4.1-9 EC05 における点 B のひずみ履歴 Fig.2.4.1-9 Strain histories of EC05 at Point B.

- (1) 配管系の中の応力集中部である配管継手(本検討では エルボ)における消散エネルギを求める.エルボ等の 繰り返し曲げ試験もしくはFEM解析により荷重変位 曲線を求め、その内部面積より消散エネルギを求め る.
- (2) 配管系のモード解析及び線形の振動応答解析(本検討では応答スペクトル解析)を行い,配管系の有効質量,固有振動数,減衰比と地震応答の関係を求める.
- (3) 消散エネルギと配管系全体の振動エネルギの比率から等価減衰比と応答変位の関係を求め、(2)において 求められた地震応答と減衰比の関係を組み合わせる ことにより弾塑性応答量を算出する.

立体配管系試験体3D_A01について,この弾塑性応答予測 手法を用いて最大応答変位量を予測した結果を図2.4.2-2 に示す.図には実験結果もあわせて示している.また,最 大応答量予測の際に得られた各試験体の等価減衰比を 図2.4.2-3に示す.これらの図に示すように,本弾塑性応答 予測手法で求められた最大応答変位量は,入力レベルに対 する変化の傾向をよく再現できていることがわかる.

2.5 これまでの成果のまとめ

AP研究では、減肉を有する配管系を対象とした動的 破壊実験を行った.また、実験で得られたデータを使用し て種々の解析を実施した.直管要素試験により、減肉条件 や内圧条件、荷重条件による破損形態の違いや破損寿命を 実験的に把握した.また、配管系振動試験では、減肉のあ る配管系の弾塑性応答性状、損傷位置および損傷形態、破 損寿命を実験的に把握した.詳細解析では、配管要素を対 象とした有限要素法解析を実施し、解析により実験で得ら れた変形状況や荷重変形特性を精度良く再現できること、 また、相当塑性ひずみ分布の最大位置を参照することで損 傷位置を予測できることがわかった.一方、エルボの塑性 変形により生じる振動エネルギの消散を考慮に入れた弾塑 性応答変位の簡易予測手法を提案し、塑性変形による応答 低減効果を考慮に入れ、実験結果よりも保守的な応答量を 予測できることを確認した.



図2.4.2-1 AP 研究において提案した弾塑性応答予測法の 手順



10

Input Level (m/s²)

15

20



図2.4.2-2 弾塑性応答予測結果 Fig.2.4.2-2 Elastic-plastic response prediction.

5

0



-18 -

3. 配管要素試験

3.1 概要

減肉の発生は曲管や分岐管など流れの変化部分に多く発 生することが知られているため、AP研究で実施した直管 を用いた要素試験に加え、本研究では曲管(エルボ)を用 いた要素試験(以下曲管要素試験)を実施し、繰り返し載 荷による減肉を有する曲管の損傷形態を把握することを目 的とした.これらの実験では、減肉を機械加工で模擬した が、実際の使用環境下で生じた減肉の形状はより複雑であ ることが考えられる.そのため、実際の使用環境下で減肉 を発生した炭素鋼配管を入手し、減肉状況の調査と載荷試 験を行った.

3.2 曲管要素試験

3.2.1 試験方法

3.2.1.1 試験体の概要

曲管要素試験では,供試部に200A,sch80(外径: 216.3mm,肉厚:12.7mm)の,高圧配管用炭素鋼鋼管STS410 の曲管を使用した. 表 3.2.1-1 に使用した鋼材の化学組成 を,表3.2.1-2 に機械的性質を示す.使用した曲管の曲率半 径は304.8mm,曲げ角度90°である.使用する載荷装置に 据え付けるため,曲管の両端には200A,sch80の直管を溶 接した.試験体に導入した減肉形状は全周減肉または部分 減肉とした.図3.2.1-1に試験体の形状を,図3.2.1-2 およ び図3.2.1-3に曲管部分に導入した減肉の形状を示す.

3.2.1.2 試験条件

載荷は振動台と基礎との相対変位を試験体に入力する 載荷装置を製作して使用した.健全配管の場合,曲管では 面内曲げ方向の荷重が応力的に最も厳しい荷重条件とな るが,本研究では,減肉配管が面外方向の曲げ荷重を 受ける場合の破損挙動を調査するために,面内方向の曲げ

表 3.2.1-1	鋼材の化学組成
Table 3.2.1-1	Chemical composition of materials.

Material	С	Si	Mn	Р	S
STS410	0.17	0.20	0.50	0.01	0.002
(ELB01-ELB04)	0.17	0.20	0.50	0.01	0.002
STS410					
(ELB05, ELBI_01, ELBO_01,	0.19	0.25	0.82	0.02	0.004
ELBO_02, ELBM_01)					

表3.2.1-2 鋼材の機械的性質 Table 3.2.1-2 Mechanical properties.

Material	σ _y [MPa]	σ _u [MPa]	El. [%]	
STS410	362	553	32	
(ELB01-ELB04)	002	000		
STS410				
(ELB05, ELBI_01, ELBO_01,	351	506	52	
ELBO_02, ELBM_01)				

荷重に加え、面外方向の曲げ荷重、および面内と面外が混 在する曲げ荷重(以下面内+面外曲げ)の3種類の荷重条 件について試験を行った.これらの荷重条件に対応させる ため、載荷装置は面内曲げ試験用の両端ピン支持型載荷装 置と、面内、面外、および面内+面外曲げ試験用の一端固定 型載荷装置の2種類を製作した.図3.2.1-4 および図3.2.1-5 に載荷装置を示す.一端固定型の載荷装置では、載荷点側 の試験体端部をピン支持としており、載荷方向以外に拘束 による変形が生じないよう載荷ロッドの先端とつながる クレビス部分は長穴としている.また、この載荷装置を使



図 3.2.1-1 曲管試験体の概要 Fig.3.2.1-1 Geometry of the bend pipe specimens.



図 3.2.1-2 軸方向減肉加工形状







用し面外方向の曲げ荷重が混在する載荷を行う場合,載荷 点側の直管では曲げモーメントのみが作用するが,曲管部 分を介して固定端側の直管に移行するに伴いねじりモーメ ントが混在するような負荷荷重となる.図3.2.1-5に示した 載荷装置を使用すると,曲管中央部分における曲げモーメ ントとねじりモーメントの比率は,面外曲げ試験で約1:1, 面内+面外曲げ試験で約1:0.5となる.

試験は全て変位制御で行い,試験体の弾性域における荷 重変形特性を取得するための試験では、0.2Hzの正弦波5 波を1ブロックとした載荷波形を,試験体の破損を目的と した試験では0.2Hzの正弦波20波を1ブロックとした載荷 波形を使用した.図3.2.1-6にこれらの載荷波形を示す.試 験では,最初に健全配管の荷重変形特性を求め,二倍勾配 法により崩壊荷重となる入力変位を取得した.崩壊荷重の 求め方を図3.2.1-7に示す.図3.2.1-4に示す載荷装置を使 用して載荷を行った健全試験体の荷重変形関係は, 図3.2.1-6(a)に示した正弦5波を5mmから80mmまで5mm ピッチで入力を増加させ,各レベルで得られた荷重変形曲 線から作成した骨格曲線を使用した.一方、図3.2.1-5に示 した載荷装置を使用した健全試験体については,一方向に 単調に入力を増加させる単調載荷により取得した荷重変形 関係を使用した.使用する載荷装置および荷重の方向が同 じ試験体については減肉の有無にかかわらず,この方法で求 めた健全配管の崩壊荷重に対応する入力変位振幅で破損まで





(b) Dimension of the test equipment and the specimen 図 3.2.1-4 両端ピン支持型面内曲げ試験用載荷装置 Fig.3.2.1-4 Test equipment for In-Plane bending (Support condition : Pin-Pin).



荷装置 Fig.3.2.1-5 Test equipment for In-Plane and Out-of-Plane bend

ing (Support condition : Pin-Fixed support).





(b) Sinusoidal wave with 20 cycles



の繰り返し載荷を行った.面内+面外曲げを負荷する試験 体については、対応する健全試験体が存在しないため、面 内曲げ試験体の崩壊荷重に対応する変位を入力変位振幅と した.

試験は常温で行い,全ての試験体に対して水圧により 10MPaの内圧を負荷し、アキュムレータで保持した.載荷 は試験体の破損により内部水が漏洩するまで図3.2.1-6に 示した載荷波形を繰り返し入力した.波形入力の途中で試 験体が破損した場合,その時点で入力を低減し,破損から 数サイクル以内で入力を終了させた.実験で使用した試験 体の名称と試験条件をまとめて表3.2.1-3に示す.

3.2.1.3 計測

実験では以下の項目を計測した.

- (1) 試験体への入力変位
- (2) 試験体の開閉変位
- (3) 反力
- (4) 内圧
- (5) 曲管外表面の軸方向,周方向,45°方向ひずみ
- (6) 曲管中央断面脇部内面の軸方向,周方向ひずみ
- (7) 直管外表面の軸方向および周方向ひずみ (面内曲げ) 直管外表面の軸方向,周方向,45°方向ひずみ (面外曲げ,面内+面外曲げ)

図 3.2.1-8 に各試験体の計測点を示す. なお, 図 3.2.1-8 に示したとおり、ひずみを計測した B 断面は、ELB01~

ELB04ではエルボ中央断面より15°の位置であるが、そ の他の試験体では中央断面より27°の位置としている. 上記の実験データは、全て100Hzのサンプリング周波数で 収録した,また、この他に試験前後における曲管部分の配 管外径をノギスにより計測した.



図3.2.1-7 崩壊荷重および入力変位の求め方

Fig.3.2.1-7 A schematic illustration of the way to determine the collapse load level and the input displacement.

表 3.2.1-3	曲管要素試験	試験体一覧
Table 3.2.1-3	Specimens for b	end pipe element tests

		Condition of wall	Bending	Support	Internal Pressure	Input disp.
Name	Material	thinning	direction*	condition	(P) [MPa]	[mm]
ELB01		No defect			10	
ELD02		50% full			10 2 7	
ELB02		circumferential			10 ~ 7	
ELB03	STS410	50% partial	Ι	Pin - Pin		70
ELB04		70% partial			10	
ELD05		50% full			10	
ELD03		circumferential				
ELBI_01		No defect	Ι			185
ELBO_01		No defect				
	STS410	50% full	0	Pin-Fixed	10	195
ELBO_02	515410	circumferential		support	10	
ELBM_01		50% full	I+O			195
		circumferential	1+0			185

* I : In-plane, O : Out-of-plane



S : Strain gauge 💿 : Axial, Hoop, and 45deg between axial and hoop

 \odot : Axial and Hoop

(a) Measurement points of specimens for In-Plane bending (ELB01-ELB04)

図 3.2.1-8 曲管要素試験体計測点 (1/3) Fig.3.2.1-8 Measurement points of specimens for bend pipe element test (1/3).



S: Strain gauge 🛛 : Axial, Hoop, and 45deg between axial and hoop

 \bigcirc : Axial and Hoop

(b) Measurement points of specimens for In-Plane bending (ELB05 and ELBI_01)

図 3.2.1-8 曲管要素試験体計測点 (2/3) Fig.3.2.1-8 Measurement points of specimens for bend pipe element test (2/3).



S : Strain gauge \bigcirc : Axial, Hoop, and 45deg between axial and hoop \bigcirc : Axial and Hoop

(c) Measurement points of specimens for In-Plane bending (ELBO_01, ELBO_02, ELBM_01)

図 3.2.1-8 曲管要素試験体計測点 (3/3) Fig.3.2.1-8 Measurement points of specimens for bend pipe element test (3/3).

3.2.2 試験結果

3.2.2.1 作用荷重レベルと破損状況

曲管要素試験の試験結果を表 3.2.2-1 にとりまとめて示 す.本試験では,負荷荷重の方向および減肉条件により以 下の破損形態が確認された.

 (1) 面内曲げ:健全および部分 50% 減肉試験体(ELB01, ELB03, ELBI_01)

繰り返しに伴い曲管脇部軸方向に疲労き裂が発生し, 貫通に至った.実験後に試験体を背-腹方向で半割 にし,内面に対して浸透探傷(PT)検査を行った ところ,内面に発生したき裂の方が外面に現れた き裂よりも大きく,また内面には多数の未貫通き 裂が確認された.このことから,これらの試験体 では,載荷の繰り返しにより内面にき裂が発生 し,内面から外面に向けて進展,貫通に至ったものと 考えられる.図3.2.2-1にELB01について,曲管内面 のPT検査結果を示す.

- (2) 面内曲げ,面外曲げ,面内+面外曲げ:全周50%減 肉試験体(ELB02, ELB05, ELBO_01, ELBM_01) 載荷に伴い曲管の減肉部分でラチェット現象による 配管外径の増加が生じ,その結果曲管腹部近傍に変 形の集中が起こり,座屈状の変形を伴う疲労破壊を 生じた.図3.2.2-2にELB02,ELBO_02,および ELBM_02の破損状況を示す.これらの試験体につい て内外面に対してPT検査を行ったところ,外面の, 座屈状の変形が集中したき裂貫通部分を中心に多数 の未貫通き裂が確認されたが,内面には貫通部以外 にき裂の発生は認められなかった.
- (3) 面内曲げ:部分70%減肉試験体(ELB04) 載荷に伴い曲管の減肉部分でラチェット現象による 配管外径の増加が生じた.ラチェットの生じない健 全肉厚部分とラチェットの生じる減肉部分が隣接す る曲管軸方向の減肉加工開始部分で配管形状の変化 が大きくなったため,その部分で周方向にき裂が発 生,貫通した.内外面に対するPT検査結果では, 内面のラチェット変形部分周方向に多数の未貫通 き裂が確認されたが,他の位置にはき裂の発生は認 められなかった.図3.2.2-3にELB04の実験後PT検 査結果を示す.

なお,面外曲げを負荷した健全試験体(ELBO_01)に ついては,崩壊レベルに相当する入力変位で300サイク ルまで繰り返し負荷を行ったが,ねじりのかかる直管 部分の表面塗装にわずかな剥がれが生じた程度で,ほ とんど損傷が確認されなかったため破損させずに試験 を終了させた.

本研究では、最終的な損傷状況を調査することを目 的としているため、実験実施時点での耐震設計技術指 針¹⁾で規定されているよりも高い負荷条件で試験を



図 3.2.2-1 曲管脇部軸方向疲労き裂 (ELB01,浸透探傷試験結果) Fig.3.2.2-1 Fatigue failure at a flank of the elbow

(ELB01, the penetration test result).



(a) ELB02



(b) ELBO 02



(c) ELBM_01

- 図 3.2.2-2 ラチェット変形を伴う局所座屈の発生および き裂貫通
- Fig.3.2.2-2 Fatigue and buckling failure accompanied with ratchet deformation.



図3.2.2-3 ラチェット変形部分の周方向き裂 (ELB04, 浸透探傷試験結果)

Fig.3.2.2-3 Fatigue cracks in circumferential direction at ratchet deformation (ELB04, the penetration test result).

表 **3.2.2-1** 曲管要素試験 試験結果 Table **3.2.2-1** Test results of bend pipe element tests.

clibow * A number of small cracks observed at the Fatigue and buckling failure accompanied Finigue and buckling failure accompanied Faigue and buckling failure accompanied Fatigue and buckling failure accompanied inner surface of nominal thickness side. Fatigue failure at ratchet deformation ţ, Fatigue failure at flank of the elbow Fatigue failure at flank of the elbow ъ, **Test results** Fatigue failure at flank with ratchet deformation with ratchet deformation with ratchet deformation with ratchet deformation (thinned wall side) No failure moment [kN-m] Max. reaction ¥ 3 热 131<u>99</u> 80 62 8 83 \overline{a} No. of Input cycles 8 $\frac{6}{10}$ E 蒸 ΩÜ 8 $\overline{\mathbf{Z}}$ 9 表 input disp. $\underline{\mathbf{S}}$ <u>83</u> 8 123 $\mathfrak{G}_{M}(\overline{\mathbb{N}})$ 0.50 0.88 010 0.18 0.22043 043 0430.51 Hoop stress by $P(\sigma_0)$ [MPa] 8 8 83 8 얾 8 8 8 8 Internal Pressure [EJM](J) $\frac{r}{l}$ 2 2 2 2 Pin-Fixed **condition** Pin - Pin Support poddins direction Bending 0+1 0 н circumferential circumferential wall thinning circumferential circumferential 50% partial Condition of 70% pential No defect No defect No defect 50% full 50% full 30% full 50% full ELBO 01 ELBM 01 ELBI_01 ELBO_02 ELB03 ELB04 ELBO2 ELBOS ELBOI Name

*1: In-plane, 0: Out-of-plane

行った. 健全肉厚の試験体について, 弾性域の載荷から得られた入力変位とエルボ中央断面での作用応力レベルの関係から,本試験で試験体に入力した, 崩壊荷重に相当する入力変位によりエルボ中央断面に生じる作用応力レベルは, STS410の設計応力強さ S_m を,日本機械学会の設計・建設規格²⁾で規定されている137[N/mm²]とすると,作用荷重の方向によって異なるが,おおむね11~14 S_m となった.なお,この作用応力レベルの算出手順については**〈添付資料3**〉に記載する.

これまでに他の研究で実施された曲管の面内曲げ試験や 配管系加振試験の結果などから,面内曲げを受ける曲管の 破損形態は主に曲管脇部における軸方向疲労き裂の発生, 貫通となることが予想されたが,本試験では3体の試 験体(ELB02, ELB04, ELB05)で軸方向疲労き裂発生 以外の破損形態が得られた.また,面内曲げ以外の負荷を 受ける50%減肉試験体では,図3.2.2-2に示したように,顕 著なラチェット現象による配管の変形と局所座屈の発生が 確認された.

3.2.2.2 外径変化

図3.2.2-4に、面内曲げを負荷した試験体について試験前後の外径計測結果から求めた外径変化率を示す.外径変化率 Rは、試験前の外径をD。、試験後の外径をD」とし、以下の式で定義する.

$$R = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100[\%]$$
(3.2.2.1)

ここで、A、B、C 断面の位置は図 3.2.1-8 に示したとお りである.また、凡例に表示してある数値は図 3.2.1-3 に示した断面図の角度を示しており、0-180は0°-180° 方向で計測した外径変化率であることを示す. 図 3.2.2-4 に示したとおり、全ての試験体の、曲管部分に 相当するB1~A~B2断面の範囲で載荷により外径が増加 するラチェット変形が発生している.外径変化率は,ほとんどの場合曲管の90°-270°(脇部-脇部)方向で計測したものが最も大きく,0°-180°(腹部-背部)方向で計測したものが最も小さい.配管の外径変化率は約6%~14%となった.また,部分減肉であるELB03とELB04の,45°-225°方向と135°-315°方向の外径変化率を比較すると,45°-225°方向の外径変化率の方が大きい.これらの試験体では図3.2.1-3に示したとおり,90°側の側面に減肉を加工している.このことから,腹部側と背部側を比較すると,腹部側でラチェット変形が大きくなる傾向のあることがわかる.

各試験体について断面ごとの外径変化率を比較すると、 ほとんどの場合いずれの計測方向においてもA断面が最も 大きく変化しているが、腹部でき裂の発生したELB02およ びELB05について0°-180°方向の外径変化率を各断面に ついて比較すると、B断面における外径変化率がA断面に おける外径変化率よりも大きくなっていることがわかる. このことから、これらの試験体で曲管中央断面腹部の周方 向疲労き裂が発生したのは、曲管両端の軸方向肉厚変化部 分にラチェット変形が集中し、外径変化率が大きくなり、 その結果中央断面を圧迫して腹部の折れ曲がるような変形 が発生したためと考えられる.曲管軸方向に肉厚変化部分 があるとその部分にラチェット変形が集中する傾向は ELB04の破損形態からも確認できる.これは軸方向の肉厚 変化が存在することでその位置に応力集中が生じるためと 考えられる. ELB03, ELB04は周方向にも肉厚変化部分が あるが、図3.2.1-3に示したように肉厚の変化がなめらかで あることから明確なラチェット変形の集中は生じなかった と考えられる.なお、ELB02では、試験時の内圧調整不足 のため、入力変位70mmの載荷2回目以降は所定値である 10MPaよりも低い内圧(約7MPa)で実験が行われたため、 同様の減肉条件である ELB05 を追加で実施した.その結



図 3.2.2-4 面内曲げを行った試験体の外径変化率 Fig.3.2.2-4 Diameter deformation ratio of specimens subjected to In-Plane bending.

果, ELB05ではELB02よりも最終的なラチェット変形量 は大きくなることが確認されたが、これは内圧が高いこと が影響したものと考えられる.

図3.2.2-5 に面外曲げおよび面内+面外曲げを負荷した 試験体の外径変化率を示す.破損しなかった ELBO_01 は 2% 程度の外径変化率であるが,座屈状の変形を示した ELBO_02, ELBM_01では両者とも大きな外径変化率を示 していることがわかる.また,これらの試験体ではきわめ て短寿命で破損に至った.これらの結果から,健全な肉厚 を持つ配管では面外曲げは厳しい荷重条件ではないが,配 管に減肉が存在する場合,作用荷重レベルと減肉の条件に よっては,ラチェット現象の発生により配管形状が変化す るため,面外曲げ荷重による破損の危険性が高くなる可能 性があると考えられる.

3.2.2.3 荷重変形関係

載荷を実施した試験体のうち,減肉条件を変化させ て比較を行った面内曲げ試験体について,入力変位 70mm 1回目の載荷による荷重変形関係を図3.2.2-6に示 す.図では変形が曲管部分のみで発生しているとして, 入力変位を曲管の変形角に,反力を曲管中央断面にお ける曲げモーメントに換算した.ここで,両端ピン支持型 載荷装置および一端固定型の載荷装置における変形は, 図3.2.2-7に示すようになる.従って,振動台入力変位をδ, 載荷方向で計測された反力を*P*,載荷点から曲管両端に接 続する直管の材軸交差点までの距離を*l*₀,載荷点から曲管 中央断面までの距離を*l*₁とすると,曲げモーメント*M*およ び変形角θはそれぞれの載荷装置の形状に従って以下の式 で表される.

(1) 両端ピン支持型載荷装置

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2 \times \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}l_0 - \delta}{2l_0} \right)$$
(3.2.2.2)

$$M = P \cdot l_1 \cos \theta \tag{3.2.2.3}$$

(2) 一端固定型載荷装置

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{l_0} \right) \tag{3.2.2.4}$$

$$M = P \cdot l_1 \tag{3.2.2.5}$$

図3.2.2-6から,減肉配管では健全な配管と比較して減肉の 存在により剛性と試験体反力が低下し,同じ入力変位量に









対しては履歴による吸収エネルギーが小さくなることがわ かる. 健全試験体 (ELB01) に対する全周50%減肉試験体 (ELB05) の反力は約55%であった.

図3.2.2-8に、脇部軸方向に疲労き裂の発生したELB03, および面内曲げ,面外曲げ,面内+面外曲げで座屈状の変 形を伴う破損形態を示したELB05,ELBO_02,ELBM_01 について,破損が生じた載荷ブロックの荷重変形関係を示 す.図3.2.2-8で,実線が破損前の荷重変形関係,点線が破 損後の荷重変形関係である.図3.2.2-8から,面内曲げで載 荷を行ったELB03およびELB05については,破損前後で 安定した荷重変形関係を示していることがわかる.一方, ELBO_02,ELBM_01については,破損前は安定した荷重 変形関係を保っているが,破損後には大きな耐力低下が生 じており,注意すべき破損形態であると考えられる.



(a) In-plane bending by Pin - Pin type test equipment



(b) In-plane or/and Out-of-plane bending by Pin - Fixed support type test equipment

* In this series of tests, $l_0=1650$ mm and $l_1=1560.7$ mm

- 図 3.2.2-7 各曲管載荷装置における曲げモーメントおよび 変形角の換算関係
- Fig.3.2.2-7 A schimatic illustration of bending moment and elbow deformation angle according to the type of test equipments.

3.2.2.4 曲管部分のひずみ挙動

図3.2.2-9~図3.2.2-13 に、ELB03、ELB05、ELB0_01, ELB0_02、ELBM_01の5体について、弾塑性レベルの繰 り返し載荷1回目で計測された曲管中央断面(図3.2.1-8に 示すA断面)の軸方向および周方向のひずみ履歴を示す. 図中、SA-1~SA-8、SAI-3、SAI-7は図3.2.1-8に示した計 測点を表し、凡例の中で計測点ラベルに続いて示されてい るAは軸ひずみを、Hは周ひずみを意味している.また、 SAは配管外面の、SAIは配管内面の計測点であることを意 味している.これらの図から、それぞれの載荷方向につい てひずみ挙動に以下の特徴があることがわかる.



Fig.3.2.2-8 Relation between rotation angle and bending moment at failure.

(1) 面内曲げ

図3.2.2-9から、ELB03においては脇部にあたるSA-3、 SA-7の周ひずみにおいてラチェット現象が発生して いることを示す平均ひずみの増加が認められる.ま た,ひずみ振幅についても脇部周ひずみが大きい.脇 部の内外面ひずみ履歴を比較すると、内面ひずみの 方がひずみ振幅,平均ひずみともに大きく,3.2.2.1で 述べた内面軸方向からき裂の発生した破損形態を裏 付けている.減肉側脇部のひずみ(SA-3)と健全側 脇部のひずみ (SA-7) を比較すると、ひずみ振幅は 健全側の方が大きいが, 平均ひずみは減肉側の方が 大きい. ELB03の最終的な破損形態は減肉側におけ る軸方向疲労き裂の発生・貫通であり、健全側の内面 には未貫通の微小き裂が発生していたが貫通には 至っていない.両者の寿命にどの程度の定量的な差 があるのかは検討が必要であるが,このことから,ラ チェット現象を伴う配管の破損寿命を評価する際に は、平均ひずみを含めて評価する必要があると考え られる.

ELB03と同様面内曲げを負荷したELB05について は、図 3.2.2-10 に示すように、全周減肉であるため SA-3 およびSA-7両側ともにラチェット現象が顕著である 以外は, 最終損傷形態が異なるにもかかわらず ELB03と比較して載荷1回目のひずみ履歴に明確な違 いは現れていなかった. そこで, 両者について載荷の 繰り返しに伴う曲管中央断面の腹部および脇部で計 測されたひずみ振幅の変化を比較した. その結果を 図3.2.2-14に示す.図3.2.2-14で、縦軸は図3.2.1-6に 示した入力変位波形5波目の1サイクルで計測された ひずみの全振幅であり、横軸は載荷回数である. 図 3.2.2-14(a) と図 3.2.2-14(b) を比較すると、初期の 載荷のうちはELB05はELB03と同様脇部周方向の内 面ひずみ (SAI-3H) の振幅が大きいが、載荷回数の 増加に伴い振幅が減少し、その一方で腹部の軸方向 ひずみ (SA-1A) の振幅が増加していくことがわか る. SAI-3Hは4回目の載荷で、SA-1Aは7回目の載 荷でひずみゲージが損傷しているため以降のデータ は存在しないが、それまでに取得できているひずみ の傾向から、5回目の載荷前後でSA-1Aのひずみ振幅 がSAI-3Hのひずみ振幅を上回ることが推測できる. このことから、ラチェットによる変形の少ない初期 の載荷ではELB05においてもELB03と同様脇部周方 向ひずみの大きくなる変形挙動を示していたが、ラ チェット変形が発生し配管形状が変化するに従い腹 部の圧迫される座屈状の変形が支配的となり、最終 的な破損形態が変化したものと考えられる.

- (2) 面外曲げ, 面内+面外曲げ
 - 図 3.2.2-11 から、ELBO 01 では崩壊レベルの入力で あっても曲管中央部分のひずみは大きくなく、ラ チェット現象もわずかであることがわかる.ひずみ 振幅が最も大きい位置はSA-3の軸ひずみで,1%程度 であった.一方図 3.2.2-12 から, ELBO 02 では全体 にひずみ振幅が大きく、脇部から腹部にかけてのSA-2、 SA-3, SA 7, SA-8の周ひずみにおいてはラチェット による平均ひずみの増加が生じている.また、これら の計測点では,周方向・軸方向とも大きなひずみ振幅 を示している. 脇部周方向の内面ひずみについては、 面内曲げと異なりラチェット挙動は顕著であるがひ ずみ振幅はほとんど現れていなかった. ELBM 01に ついては,図3.2.2-13に示したように,脇部~腹部に かけてのSA-3, SA-7, SA-8で大きな平均ひずみの増 加を示しており、ELBO 02と類似した挙動となって いた.一方,内面の周方向ひずみについてはひずみ振 幅・平均ひずみともに大きく、ELBO 02よりも、面 内曲げであるELB03やELB05に近い挙動を示してい る. ELBO 02, ELBM 01ともにき裂貫通部直近のひ ずみ履歴は取得できていないが、図3.2.2-12、図3.2.2-13 に示したひずみのラチェット挙動から、脇部から腹 部にかけて大きなラチェットが生じていること、ま たその周辺ではひずみ振幅も大きく他の位置に比べ て損傷が発生しやすい状況にあったことが推測でき る.

図3.2.2-9~図3.2.2-13 に示したように、曲管の背側 (SA-4 ~SA-6)にあたる計測点では、どの載荷方向の試験におい ても脇部~腹部にかけての計測点に比べて,周方向・軸方 向とも小さなひずみ振幅であり、ラチェット現象もほとん ど生じていない. これらのことは面内曲げ, 面外曲げとも に曲管の背側には他の位置に比べて大きな負荷がかからな いことを意味していると考えられる.曲管の部分減肉の形 状と耐荷重や損傷形態の関係については、白鳥らにより解 析に基づく調査が実施されている³⁾. この中で背側に減肉 がある場合は健全な場合と比較して剛性の低下率は小さい ことが報告されているが,これは上述のように曲管の断面 内における荷重分担が相対的に脇~腹側で大きく,背側で 小さいためと考えられる. 白鳥らによる解析では面内曲げ のみ実施しており,面外曲げが混在する負荷については今 後検討が必要になるが,本試験で得られたひずみの分布か らは,面外曲げが混在する場合でも背側の減肉は試験体の 剛性低下に与える影響は小さいと考えられる.



図 3.2.2-9 ELB03 弾塑性載荷1回目のひずみ履歴 Fig.3.2.2-9 Strain time histories of ELB03 at 1st elastic-plastic cyclic load.



図 3.2.2-10 ELB05 弾塑性載荷1回目のひずみ履歴 Fig.3.2.2-10 Strain time histories of ELB05 at 1st elastic-plastic cyclic load.

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-中村ほか



図 3.2.2-11 ELBO_01 弾塑性載荷1回目のひずみ履歴 Fig. 3.2.2-11 Strain time histories of ELBO_01 at 1st elastic-plastic cyclic load.

防災科学技術研究所研究資料 第306号 2007年3月



図 3.2.2-12 ELBO_02 弾塑性載荷1回目のひずみ履歴

Fig. 3.2.2-12 Strain time histories of ELBO_02 at 1st elastic-plastic cyclic load.



図 3.2.2-13 ELBM_01 弾塑性載荷1回目のひずみ履歴

Fig. 3.2.2-13 Strain time histories of ELBM_01 at 1st elastic-plastic cyclic load.


図 3.2.2-14 ELB03 と ELB05 の載荷に伴うひずみ振幅の変化 Fig.3.2.2-14 Strain amplitude transition of ELB03 and ELB05.

3.3 実在減肉配管と模擬減肉配管の比較

3.3.1 実在減肉配管の入手と調査

これまでに述べた配管要素試験では減肉形状を機械加工 で模擬したが,実際の使用環境下で生じた減肉の形状はよ り複雑であることが考えられる.そのため,実際の使用環 境下で減肉を発生した炭素鋼配管を入手し,減肉状況の調 査と載荷試験を行った.

入手した配管は、火力発電プラント等の、水・蒸気環境 下で減肉を発生した炭素鋼配管5体(以下実在減肉配管と 称する)である.入手した配管の外観を図3.3.1-1に、材質 及び使用条件等を表3.3.1-1に示す.入手した5体の炭素鋼 配管のうち,配管表面に経年劣化によるものと考えられる 明確な凹凸が発生していた50Aの配管(配管 B)と200A の配管(配管 E)について、外観調査と板厚計測を実施し た.図3.3.1-2に配管 Bの外観及び内面状態を、図3.3.1-3 に配管 Eの外観及び内面状態を示す.入手時には配管 B, E とも錆や塗料に覆われていたが、図3.3.1-2および図3.3.1-3 に示したものは錆及び塗料を除去したあとの状態である.



図 3.3.1-1 入手した実在減肉配管 Fig.3.3.1-1 Obtained pipes with wall thinning produced by the actual corrosive environment.

表3.3.1-1 入手した実在減肉配管一覧

Table 3 3 1-1	List of nines	with wall thinning	produced by the	actual corre	sive environment
Table 5.5.1-1	List of pipes v	with wan thinning	produced by the	actual cont	sive environment.

Name	Diameter [*] [mm]	Wall thickness [*] [mm]	Length [mm]	Material of pipe	Fluid material	Duration of operation (approx.)
А	34.0 (25A)	3.4	800	STPT370	Water	4 years
В	60.5 (50A)	3.9	~930	STPT38	Water and steam	23 years
С	89.1 (80A)	7.6	880	STPT42	Water and steam	23 years
D	114.3 (100A)	6.0	600	Carbon steel	Unknown (Water and/or steam)	23 years
Е	216.3 (200A)	8.2	~800	Carbon steel	Unknown (Water and/or steam)	23 years

* Nominal value

配管 B の外面は、全体にわたって浅い凹凸に覆われていた.また、内面は、図 3.3.1-2(b) に示すように、ある一つの方位に一列となって液滴によるものと思われるやや深いくぼみが並んでいた.配管 E の外面は、目立った腐食はなく、なめらかな表面をしていたが、内面は図 3.3.1-3(b) に示すような不規則な形状の浅い凹凸が全面に広がっていた.

外観調査後、それぞれの配管に対して周方向10°ピッ チ(36方位), 管長300mmの範囲を10mmピッチで超音波 板厚計測を実施した.図3.3.1-4と図3.3.1-5に超音波板厚 計測により計測した配管の板厚分布を示す. 健全な場合の 公称肉厚は, 配管Bでは3.9mm, 配管Eでは8.2mmである. 配管Bの最小肉厚は2.9mm,最大肉厚は4.4mmで,平均は 4.0mmであった. 配管 E では, 最小肉厚 6.5mm, 最大肉厚 8.4mmで、平均は7.8mmであった.図3.3.1-4から、配管 Bではピット状の欠陥が存在する0°方向で残存肉厚が 3mm程度となっているが、その他の位置では大きな肉厚 の減少は認められない.なお、配管Bでは公称肉厚よりも 厚肉の部分が多くあるが、これは配管が製作された時点で やや厚肉になっていたためと考えられる.一方,図3.3.1-5 から, 配管 E では 180°~210°方向でやや残存肉厚が小 さくなっているが,ほぼ全周にわたって一様に肉厚が減少 していることがわかる.配管B,配管Eともに、軸方向に



(a) Outer surface

(b) Inner surface





図 3.3.1-4 配管 B の超音波板厚計測結果 Fig.3.3.1-4 Wall thickness of Pipe B measured by ultrasonic meter.

は肉厚分布に大きな傾向の差は見られなかった.

3.3.2 実在減肉配管と模擬減肉配管の載荷試験

3.3.1で入手した実在減肉配管のうち,配管Eを使用して 繰り返しねじり負荷試験を実施した.負荷荷重をねじりと した理由は, 直管にねじりを負荷した場合, 理想的には配 管全体が一様な応力分布になるため,実在減肉配管のよう に肉厚分布が均一でない場合に応力分布の偏りによる損傷 への影響を軽減できると考えたためである. 試験体の概要 を図3.3.2-1に示す. 試験体は, 図3.3.2-1の減肉導入位置 に配管 E を使用した実在減肉配管試験体(以下 AEC 01) と、機械加工で全周減肉を模擬した模擬減肉試験体(以下 MEC 01) の2体を使用した. 配管 E を使用した AEC 01 では、超音波板厚計測の0°方向が曲管腹側、180°方向が 曲管背側になるよう試験体への設置位置を調整した. MEC 01の減肉部分は、配管Eの平均肉厚である7.8mmの 一様な全周減肉とした.試験前に実施した浸透探傷検査の 結果,配管Eには内面に凹凸がある以外に,特に予き裂の ような欠陥は認められなかった. 載荷試験は、3.2.1.1で述 べた一端固定型の載荷装置を使用し,減肉導入部である直 管部分にねじりが負荷されるよう,振動台上に設置する固 定端側架台を図3.2.1-5(b)に示す,面外曲げ載荷試験と同 じ位置に設置した.入力変位量は、健全試験体の面外曲げ による崩壊荷重レベルに相当する±195mmとした.



(a) Outer surface

(b) Inner surface





図 3.3.1-5 配管 E の超音波板厚計測結果 Fig.3.3.1-5 Wall thickness of Pipe E measured by ultrasonic meter.

表3.3.2-1 に試験条件と試験結果を示す. 試験では、 AEC 01, MEC 01とも, 載荷に伴い試験体部分でラチェッ ト変形が発生した. MEC 01では、ラチェット変形の端部 にあたる溶接部近傍で配管のほぼ1/4周にわたる周方向き 裂が発生した.一方,AEC 01では配管軸方向にき裂が発 生し、貫通した.両試験体の破損状況を図3.3.2-2に示す. AEC 01のき裂貫通位置は、周方向に約30°の近傍であっ た. AEC 01に使用した配管Eでは、もっとも肉厚の薄い 部分は図3.3.1-5に示すように、200°方向の近傍であるが、 き裂の貫通した30°近辺もやや薄肉の領域である. AEC 01のき裂の方向は軸方向であったが、試験後に計測 したき裂貫通位置の肉厚は約6.2mmであり、200Aの配管 で内圧によるバーストの生じる肉厚よりも十分に厚く,内 圧によるバーストが発生した可能性は低いと考えられる.

AEC_01とMEC_01の比較載荷試験では、表面粗さを有 する実在減肉と,機械加工でなめらかに加工した模擬減肉

とを比較することを目的としたが、AEC 01、MEC 01 と もに溶接部近傍で損傷が生じた.また,配管Eの材質につ いては、炭素鋼であるということ以外の情報がなかったた め、MEC 01の模擬減肉部分にはSTS410の直管を使用し たが、配管EとSTS410の単調引張試験の結果を比較する と、実在減肉配管に対しSTS410では、降伏強度、引張強 度ともに50MPa程度高い値を示した. AEC 01とMEC 01 の損傷形態の違いには、表面粗さの他に、このような溶接 部の影響や材料特性の違いが影響していることが考えら れ,表面粗さの影響は明確に確認できなかった.損傷形態 はAEC 01とMEC 01とでは異なったが、損傷に至までの 繰り返し数は、それぞれ60サイクルと128サイクルであ り、それぞれの試験体の初期肉厚の差や疲労損傷における 寿命のばらつきを考慮すると,実在減肉配管と模擬減肉配 管とで損傷寿命に大きな差はなかったと考えられる.





(a) AEC 01

図3.3.2-2 実在減肉配管および模擬減肉配管試験の破損状 況

Fig.3.3.2-2 Failure mode of the actual and modified wall thinning specimens.

図 3.3.2-1	美仕減肉配官および模擬減肉配官試験体の形状
Fig.3.3.2-1	Geometry of the actual and modified wall thinning
	specimens.

表 3.3.2-1	実在減肉配管および模擬減肉配管の試験条件および結果
Table3.3.2-1	Test conditions and results of the actual and modified wall thinning specimens.

Name	Material	Condition of wall thinning	Wall thickness	Loading condition	Internal pressure	Input disp.	No. of input cycles	Test results
AEC_01	Carbon steel	Actual wall thinning	6.5 [*] mm				60	Fatigue crack in the axial direction at the ratchet deformation
MEC_01	STS410	Machined full circumferential wall thinning	7.8 ^{**} mm	Twist	9.8 MPa	±195mm	128	Fatigue crack in the circumferential direction at the end of the ratchet deformation

* Minimum wall thickness measured by the ultrasonic method

3.4 配管要素試験のまとめ

曲管部分に機械加工により減肉を施した試験体を使用 し,繰り返し強制載荷を行い,面内曲げ,面外曲げ,面内 +面外曲げの各載荷条件における減肉配管の損傷挙動を調 査した.その結果,減肉配管の破損形態は、ラチェット変 形を伴う疲労損傷となることがわかった.ラチェット現象 の発生は配管の形状変化をもたらすため,全周50%減肉試 験体のように,最終破損形態が健全配管で確認される破損 形態と異なる場合があり,減肉が検出された場合の破損評 価を行う際にはラチェット現象の影響を考慮する必要があ ると考えられる.また,ねじりを含む荷重が作用する場 合,健全配管と比較して大幅な寿命低下を起こす可能性が あり,作用荷重の種類を考慮した評価が必要であると考え られる.曲管断面内のひずみ振幅を比較すると,作用荷重 の種類にかかわらず,ひずみ振幅の大きい位置は脇~腹に かけての範囲に存在し,背側では大きなひずみは発生しな かった.従って,曲管においては背側に存在する減肉より も,脇~腹側に存在する減肉の方が配管の損傷挙動に及ぼ す影響は大きくなると考えられ,検査によりこの位置に減 肉が検出された場合,減肉の影響を考慮に入れる必要が生 じると考えられる.

本研究では,機械加工で模擬した減肉に加え,実際の腐 食環境下において生じた実在減肉配管を入手し,表面状態 の調査を行った.また,入手した配管と,その平均肉厚を 機械加工で模擬した模擬減肉配管を用いて両者を比較する 載荷実験を行い,実在減肉と模擬減肉との寿命には大きな 差はないと考えられる結果が得られた.得られた損傷形態 には溶接の影響などが考えられるため,表面粗さに起因す る損傷の差などは明確にできなかったが,これらの載荷実 験は,実在減肉と模擬減肉の比較に関する課題の抽出に有 用であった.

4. 配管系振動試験

4.1 概要

配管系振動試験では減肉部分を有する配管系試験体に対 し振動台を用いた加振試験を行うことで,減肉の存在が配 管系の振動特性に与える影響を明らかにすることを目的と している.一般に,配管が健全である場合,面内曲げが配 管の損傷に対し厳しい荷重条件であることが知られている が,第3章で述べたとおり,曲管要素試験により面外曲げ を含む荷重を受けるエルボ部分に減肉が存在する場合,健 全な場合と比較して大幅な寿命低下の可能性があることが わかった. AP研究において,面内曲げを受けるエルボ部 分に減肉がある場合の試験を実施していたため,本研究で は,主に面外曲げを含むエルボ部分に減肉が存在するよう な試験体を使用した配管系振動試験を実施し,作用荷重の 種類による振動応答挙動や損傷形態の違いについて,実験 的に把握することを目的とした.

4.2 試験方法

4.2.1 試験体の概要

立体配管系振動試験は平成15年度から平成17年度にか けて実施したが、平成15年度の試験では、試験体の特性と 振動台の加振性能との関係で,減肉を有する場合であって も加振試験により配管系の損傷に至らず,最終的に配管の 損傷までの挙動を確認できなかった¹⁾. そのため、平成16年 度, 平成17年度には, 最終損傷形態を取得することを目的 として,配管系試験体の形状を変えて配管系振動試験を実 施した. 平成16年度, 平成17年度に使用した試験体は, AP研究で使用した配管系試験体の形状(図2.3.1-1)を基 本とし、アンカA-01からエルボ1までの水平直管の方向を 変化させることで、エルボ1部分の作用荷重を変化させ た.図4.2-1に本研究で使用した立体配管系試験体の形状 を示す.水平直管の設置方向により,試験体が一次モード で振動した際,図4.2-1(a)の試験体のエルボ1部分では面 外曲げが、図4.2-1(b)の試験体のエルボ1部分では面内+ 面外曲げが優勢となるような形状とした.以下、図4.2-1(a)の

試験体形状を面外曲げ試験体,図4.2-1(b)の試験体形状を 面内+面外曲げ試験体という.また,AP研究で使用した 試験体形状を面内曲げ試験体と称する.試験体は,AP研 究の試験体と同様,エルボ1を含む部分(部分A),エルボ 2を含む部分(部分B),エルボ3を含む部分(部分C)の 3つから構成され,フランジで接合している.部分A,部 分Bは使用した試験体数分作成したが,部分Cは全ての試 験体で共通に使用した.

試験体には基本的に高温配管用炭素鋼鋼管 STPT370, 100Asch80 (口径114.3mm, 肉厚8.6mm)を使用したが, 減 肉部分は配管用炭素鋼鋼管 FSGP エルボを使用した.実施 した試験条件は,面外曲げ試験体,面内+面外曲げ試験体 ともに,健全またはエルボ1減肉とした.試験体の名称と 試験体種類,および減肉条件は以下の通りである.

- (1) 面外曲げ試験体
- (a) 試験体名: 3D_A11劣化条件: 劣化なし(健全)
- (b) 試験体名:3D_C12 劣化条件:エルボ1減肉 図4.2-1(a)に示すエルボ1部分をFSGPエルボにする ことにより全周減肉を模擬した.FSGPエルボの公称 肉厚は4.5mmであり,減肉量は48%となる.エルボ 部減肉については,面内曲げ試験体と同様,減肉エル ボに接続する直管部分に機械加工による肉厚の低減 部を設定した.減肉エルボまわりの加工形状は, 図2.3.1-2に示す面内曲げ試験体と同様である.
- (2) 面内+面外曲げ試験体
- (a) 試験体名: 3D_A21劣化条件: 劣化なし(健全)
- (b) 試験体名:3D_C22 劣化条件:エルボ1減肉 図4.2-1(b)に示すエルボ1部分をFSGPエルボにする ことにより減肉量48%の全周減肉を模擬した.減肉 エルボの模擬方法は3D C12と同様である.



Fig.4.2-1 Configuration of the test models for the 3-D piping system test (2004, 2005).





Fig.4.2-3 Vibration modes of the in-plane and out-of-plane bending type model.

		c	c	c		Condition	of defect		Internal				
Name	Material				Trme	Configuration*2	Defected	Bending	pressure				
		[IVIFa]	[IVIF a]	[IVIF a]	Туре	Configuration	part	direction	[MPa]				
3D_A11	STPT370	318*1	467 ^{*1}	156*1	No defect	-	-						
3D_C12	STPT370 (Normal Part)	318 ^{*1}	467 ^{*1}	156 ^{*1}	Wall	Full circumferential	Elbow1	Out-of-plane	10				
	FSGP Elbow (Elbow1)	-*3	>290*3	_*3	umming	ummig		umining	umming	Depth : $0.48t$			
3D_A21	STPT370	313*1	458 ^{*1}	153 ^{*1}	No defect	-	-	In plane					
3D (22	STPT370 (Normal Part)	313*1	458 ^{*1}	153 ^{*1}	Wall	Full circumferential	Elbow1	and Out-of-plane	10				
50_022	FSGP Elbow (Elbow1)	283*4	358*4	119*4	thinning	thinning Depth : 0.48 <i>t</i>	LIDOWI	Out-or-plane					

表 4.2-1 立体配管系試験 試験体一覧 Table 4.2-1 Test models for 3-D piping system test.

*1. From the data of mill sheets. $S_{\rm m}$ was obtained by min(2/3Sy,1/3Su).

*2. 't' denotes the normal wall thickness of the pipe.

*3 Material properties of FSGP used for 3D_C12 were not described in mill sheets. Only tensile stress is prescribed by JIS code, and it has to be over 290MPa for FSGP.

*4 From the results of material testing

表4.2-1に試験体の特性をまとめて示す.表中の降伏応 力および引張強度は,STPT370についてはエルボに使用し た配管のミルシート値を記載した.FSGPエルボについて は、JIS 規格では引張強度についてのみ規定されており、 3D_C12に使用したFSGPエルボではミルシートに実測値 の記載がなかったため記載していない.3D_C22に使用し たFSGPエルボでは、別途引張試験を実施し、その結果を 記載している.

図4.2-2 および図4.2-3に、それぞれの試験体形状の、健 全状態の場合(3D_A11および3D_A21)について、固有 値解析で求めた固有振動数と振動モードを示す.対象とす る振動モードはそれぞれの一次固有振動モードである.面 内曲げ、面外曲げ、面内+面外曲げのそれぞれの健全試験 体について、減衰比0.5%とした1Gの応答スペクトル解析 により求められるエルボ1およびエルボ2部分の一次応力 を表4.2-2に示す.表4.2-2に示したとおり、健全状態にお いては、面内曲げ試験体ではエルボ1が、面外曲げ試験体 および面内+面外曲げ試験体ではエルボ2がもっとも作用 応力の大きいエルボと予測された.

4.2.2 試験条件

前項で述べた配管系試験体に対し、一次元大型振動台を 用いた加振実験を行った.加振波形は試験体の一次固有振 動モードのみを励起するため、AP研究で使用したものと同 じ、1.5Hz~3.0Hzの狭帯域ランダム波を使用した.実験 で用いた狭帯域ランダム波の加速度時刻歴波形と応答スペ クトルは図2.3.1-4に示したとおりである.実験は、この狭

表4.2-2 エルボに生じる一次応力

(1Gの応答スペクトル解析結果) Table 4.2-2 Primary stress at each elbow

(Response spectrum analyses at 1G).

Madal	Bending direction	Primary stress [MPa]		
Widdel	of Elbow1	Elbow1	Elbow2	
3D_A01	In-plane	2021	1671	
3D_A11	Out-of-plane	2157	2733	
3D_A21	In-plane and out-of-plane	2092	2166	





帯域ランダム波の入力レベルを,弾性レベル(20Gal~ 100Gal)から,最大1,850Galまで増加させ,各入力レベル での応答性状を得るとともに最大レベルで試験体が破損す るまで入力を繰り返した.試験体には常温水を満たして 10MPaの内圧を負荷した.本試験において,試験体の破損 は配管本体の損傷による内部水の漏洩と,それに伴う内圧 低下により判断した.試験では,図2.3.1-4に示した加速度 入力の途中で試験体が破損しても入力終了まで加振を継続 した.

4.2.3 計測

実験では,以下の項目を計測した.

- (1) 振動台加速度および変位
- (2) 試験体のエルボ部, 重錘部, アンカ部の応答加速度
- (3) エルボ3位置の応答変位
- (4) エルボ1, エルボ2の面内方向開閉変位
- (5) エルボ1の面外方向変位
 - (6) 内圧
- (7) 試験体外表面のひずみ

これらは全て500Hzのサンプリング周波数で収録した.また,このほか,試験の前後においてエルボ1およびエルボ2の配管外径を計測した.面外曲げ試験体の計測点位置を図4.2-4に,面内+面外曲げ試験体の計測点位置を図4.2-5に示す.また,エルボ1,2まわりのひずみ計測断面位置を図4.2-6に,配管外径の計測位置を図4.2-7に示す.



図4.2-7 配管外径の計測位置

Fig.4.2-7 Measurement section of the pipe diameter.



図 4.2-4 面外曲げ試験体 計測点位置 Fig.4.2-4 Measurement points of the out-of-plane bending type model.



図 4.2-5 面内+面外曲げ試験体 計測点位置 Fig.4.2-5 Measurement points of the in-plane and out-of-plane bending type model.

4.3 試験結果

4.3.1 損傷状況

立体配管系振動試験の試験結果を表4.3-1にまとめて示 す.各試験体の損傷状況は以下のようになった.

- (1) 面外曲げ・健全試験体 (3D A11)
 - 正弦波掃引試験で得られた一次固有振動数は2.77Hz であった.弾性域レベルで試験体の応答特性を得た あと弾塑性レベルの加振を実施した.入力加速度 1,850Galの加振では、部分Aと部分Cを接続するフ ランジ部分のボルトのゆるみが何度か生じ、その都 度増し締めして試験を継続した.この試験体では, 1,850Galの加振を20回継続したが損傷には至らな かった.また,その時点のエルボ部分のひずみ挙動と 配管外観の観察から、試験体の破損までにはさらに 相当数の繰り返しが必要になると判断し、その時点 で加振を終了した. 試験終了後, エルボ1およびエル ボ2を切り出し、浸透探傷試験(PT)を実施したとこ ろ, 面内曲げを受けるエルボ2の内面軸方向に未貫通 き裂が認められた.面外曲げを受けるエルボ2には内 外面ともにき裂は確認されなかった.図4.3-1にエル ボ2の浸透探傷試験結果を示す.
- (2) 面外曲げ・エルボ1減肉試験体(3D_C12) 正弦波掃引試験から得られた一次固有振動数は 2.69Hzであった.入力加速度700Galの加振より減肉 を模擬したエルボ1部分でラチェット変形の発生が認 められ,入力加速度1,850Galの加振1回目で,エルボ 1と立ち上がり部配管とを接続する溶接部近傍に周方 向の未貫通き裂が発生した.その後,1,850Galの加振 2回目において,このき裂が進展し破損に至った. 図4.3-2に1,850Gal加振1回目のあとに生じた未貫通 き裂を,図4.3-3に3D_C12の損傷状況を示す.試験 終了後,エルボ1およびエルボ2のPTを実施したが, 面内曲げを受けるエルボ2には内外面ともにき裂の 発生は認められなかった.
- (3) 面内+面外曲げ・健全試験体(3D_A21) 正弦波掃引試験から得られた一次固有振動数は 2.83Hzであった.弾性域・弾塑性域の応答を取得し たあと、入力加速度1,850Galの加振を繰り返したが、 20回の繰り返しによっても破損に至らず、計測して いたひずみの挙動と外観観察から破損までにはさら に相当数の繰り返しが必要になると判断し、加振を 終了した.加振終了後、エルボ1およびエルボ2を切 り出し、PTを実施したが、エルボ1、エルボ2とも内 外面にき裂の発生は認められなかった.
- (4) 面内+面外曲げ・エルボ1減肉試験体(3D_C22) 正弦波掃引試験から得られた一次固有振動数は 2.68Hzとなった.入力加速度700Galの加振から,減 肉を導入しているエルボ1部分でラチェット変形が 発生し,加振に伴い目視でわかる程度にエルボ部分 に変形が生じた.入力加速度1,400Galの加振2回目の あと,図4.3-4に示すように,エルボ1と立ち上がり 部配管とを接続する溶接部脇において周方向に未貫



図 **4.3-1** 3D_A11 エルボ 2 浸透探傷試験結果 **Fig.4.3-1** Penetration test result of Elbow2, 3D_A11.



- **図4.3-2** 3D_C12 エルボ1溶接部近傍に生じた未貫通き裂 (1,850Gal 1回目加振後)
- Fig.4.3-2 Surface crack beside the weld line of Elbow1, 3D_C12 (after 1,850Gal_#01).



図 4.3-3 3D_C12 の損傷状況 (エルボ1) Fig.4.3-3 Failure mode of 3D C12 (Elbow1).



図4.3-4 3D_C22 エルボ1溶接部近傍に生じた未貫通き裂 (1,400Gal 2回目加振後)

Fig.4.3-4 Surface crack beside the weld line of Elbow1, 3D_C22 (after 1,400Gal_#02).



図 4.3-5 3D_C22 の損傷状況 (エルボ1) Fig.4.3-5 Failure mode of 3D_C22 (Elbow1).

通き裂が発生した.その後,1,850Gal 1回目の加振中 に,この未貫通き裂部分よりき裂が進展・貫通し,破 損に至った.図4.3-5にき裂貫通時の状況と損傷した エルボ1を示す.試験後のPT検査結果では,エルボ 1,エルボ2とも,貫通部以外にき裂の発生は認めら れなかった.

配管の損傷に至ったのは,面外曲げ試験体および面内+ 面外曲げ試験体のエルボ1減肉試験体のみであった.損傷 形態はともにエルボ1と直管部分を溶接した溶接線脇での 疲労損傷であり,損傷に伴い変形が不安定に進展するよう な現象は見られなかった.

健全試験体については、3D_A11、3D_A21ともに入力加 速度1,850Galの加振20回を実施しても有意な損傷は観察 されず,配管の肉厚が健全である場合,面外曲げは配管の 損傷に対し厳しい荷重条件ではないことが確認された.ま た、3D_A11では、実験後のPT検査結果より、加振を継 続した場合は面内曲げを受けるエルボ2部分で損傷が生じ ると考えられる.エルボ1減肉試験体は、3D_C12、3D_C22 ともにエルボ1部分で損傷が生じた.この要因としては、 減肉の存在により内圧で生じる応力が高まり、そこへ加振 による繰り返し負荷が重畳し大きなラチェット変形が生じ たためと考えられる. このような場合,通常損傷に対して は重要ではない面外曲げを受けるエルボ部分においても損 傷の発生する可能性が出てくると考えられる. また, 3D_A11と3D_C12のように,健全な場合とは異なる位置 が損傷する可能性が生じうると考えられる.

以下の項では,適宜 AP 研究で実施した面内曲げ試験体 の結果も含め,立体配管系振動試験で得られた結果につい て検討する.

4.3.2 立体配管系振動試験での作用応力

試験では、図4.2-4および図4.2-5に示したように、エルボ1,エルボ2周りを中心としてひずみゲージを貼付し、振動応答により発生するひずみを計測している.面内曲げ試験体、面外曲げ試験体、面内+面外曲げ試験体それぞれの、健全試験体(以下順に3D_A01,3D_A11,3D_A21)について、入力加速度20Galの加振におけるエルボ1,エルボ2周りの直管に貼付したひずみゲージから求めた作用モーメントの分布を図4.3-6(a)~(c)に示す.ひずみからのモーメント算出方法は巻末の<添付資料4>に記載する.これらの図において、横軸は図4.2-6に示したひずみ計測断面、縦軸は、エルボ3の単位応答変位あたりの発生モーメントである.図の凡例中、M_bは曲げモーメントを,M_zはねじりモーメントを意味する.エルボ1,エルボ2の中

表 4.3-1 立体配管系試験 試験結果 Table 4.3-1 Test results of 3-D piping system test.

	Condition	of defect	Natural frequency	Contents of the obvious by parrow band ra	excitation test	
Name	Туре	Depth ^{*1}	ratio (h) at 1st mode ^{*2}	Max. input acc. [Gal]	Number of input times	Test results
				20-100 (Elastic level)	5	* Failure did not occur after repeating the excitation test 20 times at
3D A11	No defect	_	<i>f</i> =2.77 [Hz]	300 - 700	4	1850Gal input acceleration.
5D_111	1 to delect	_	h=0.0233	1400	2	* A number of small surface cracks
				1850	20	were observed on the inner surface of Elbow2.
				20-80 (Elastic level)	4	* Crack penetrated at the side of the weld line of Elbow1
20 (12	Wall	0.40	f=2.69 [Hz] h=0.0239	700	1	* A remarkable ratchet deformation
3D_C12 thinning Elbow	Elbow1	0.48t		1400	2	occurred at Elbow1.
	Elbowi			1850	2	* Cracks were not observed at Elbow2
				20-100 (Elastic level)	5	* Failure did not occur after repeating the excitation test 20 times at
3D_A21	No defect	-	J = 2.83 [HZ]	300 - 700	4	1850Gal input acceleration.
			<i>n</i> =0.0109	1400	2	* Cracks were not observed at
				1850	20	Elbow1 and Elbow2.
				20-80	4	* Crack penetrated at the side of the
3D C22	Wall			(Elastic level)	4	weld line of Elbow1
	thinning at	0.48t	<i>f</i> =2.68 [Hz]	700	1	* A remarkable ratchet deformation
00_000	Elbow1	01104	h=0.0166	1400	2	occurred at Elbow1. * Cracks were not observed at Elbow2.
				1850	1	

*1. 't denotes the normal wall thickness of the pipe

*2. Results of the sinusoidal sweep excitation

央断面のモーメントは、その両端の直管部分で計算した モーメントの平均値として求めた.

各試験体の形状は、エルボ1につながるアンカの方向を 変化させることでエルボ1に作用する荷重の方向を調整し ており、AP研究で使用した試験体の形状(3D A01)では 面内曲げが,面外曲げ試験体 (3D A11) では面外曲げが 優勢になり、面内+面外曲げ試験体(3D A21)では面内 曲げと面外曲げがほぼ同程度になるようにしている. 平成 13年度および平成14年度に実施した配管要素試験の結果 から,エルボ部分の作用荷重が純粋な面内曲げの場合,エ ルボ中央断面に生じる曲げとねじりのモーメント比率は約 1:0, 面外曲げの場合約1:1, 面内+面外曲げの場合約1:0.5 となる結果が得られている.一方、図4.3-6に示したとお り,配管系試験体では全てのエルボに曲げとねじりの成分 が含まれている. 面内曲げが作用するとしたエルボ (3D A01のエルボ1, エルボ2, 3D A11のエルボ2, 3D A21 のエルボ2)では曲げモーメントが優勢であり、面外曲げ が作用するとしたエルボ (3D A11のエルボ1) では曲げ とねじりの比率が約1:1で面外曲げが優勢であったと考え られるが、面内+面外曲げが作用するとしたエルボ (3D A21のエルボ1)では、3D A11のエルボ1に比べて 若干曲げモーメントが大きいものの,曲げモーメントとね じりモーメントの比率は約1:0.87であり,想定していた作 用荷重よりもねじりモーメントが優勢な荷重が作用してい たと考えられる. これは, 配管要素試験では, 荷重を作用 させる方向以外の変位を拘束することで,エルボを挟んで 荷重点に接続する直管には純粋な曲げを,固定端に接続す る直管にはねじりや曲げが生じるように変形させている が,配管系振動試験では,配管要素試験と異なり,試験体 の振動応答によりエルボに接続する両方の直管に同時にね じりが作用するような変形が生じるためと考えられる.面 内+面外曲げ試験体のエルボ1減肉試験体(3D C21)の損 傷形態は,面外曲げ試験体のエルボ1減肉試験体 (3D C12) に類似のものであったが、これは想定よりもね じりモーメントが優勢な作用荷重となり,面外曲げ試験体 の作用荷重に近いものとなった影響が考えられる.

実験では, 試験体の損傷を目的としたため, 振動台の限 界性能に近い1,850Galの入力加速度で試験を実施した.以 下では, 面内曲げ試験体, 面外曲げ試験体, 面内+面外曲 げ試験体それぞれの健全試験体を対象とし,本実験で使用 した入力波による弾性域の加振から, 1,850Gal入力時の一 次応力レベルを求める.日本機械学会の発電用原子力設備 設計規格²⁾および原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987)³によると, 地震慣性力により生じる一次応力 は, 下記の式で与えられる.

$$S = B_1 \cdot \frac{PD_0}{200t} + B_2 \cdot \frac{M_i}{Z}$$
(4.3.1)

$$M_i = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$$
(4.3.2)

 $D_0: 配管外径 P: 内圧 B_1, B_2: 応力係数$ エルボの場合, $B_1 = 0.5$, $B_2 = \frac{1.3}{h^3}$, $h = \frac{t \cdot R}{r^2}$ $M_1: 配管に作用するモーメント (合成モーメント),$ Z: 配管の断面係数, t: 公称肉厚, R: エルボの回転 $半径, r: 配管断面の平均半径 <math>(r = \frac{D_0 - t}{2})$

式(4.3.1)において、第1項が内圧によるもの、第2項が 地震慣性力によるものである.本研究で使用した配管にお いては、健全肉厚の場合、 D_0 =114.3 mm、t=8.6 mm, R=152.4 mmから、 B_2 =2.153 である.また、内圧値は10MPa としたため、第1項は約33[N/mm²]となる.

実験結果からは以下の手順で作用応力レベルを求めた.

- (1) 20Gal~80Galまでの,弾性域加振の応答を使用し,エ ルボ1,エルボ2周りのひずみ計測点より,二軸の曲 げモーメント(*M_x*, *M_y*)とねじりモーメント(*M_z*)を 求める.ひずみ計測値からのモーメント算出方法は 巻末の**<添付資料4**>に示したとおりである.
- (2) 式(4.3.1)および(4.3.2)から弾性域加振時の一次応力を 求める.



(c) 3D_A21 (In-plane and out-of-plane bending)
 図 4.3-6 エルボ1, エルボ2まわりの作用モーメント
 Fig.4.3-6 Applied moment around Elbow1 and Elbow2.

ここで,

- (3) 弾性域加振における、入力加速度と対象とするエルボ 位置での一次応力の関係について、線形近似式を求 める.
- (4) 目標とする入力加速度における一次応力を(3)で求めた近似式から求める.弾塑性領域の加振を行う場合,実際の配管応答は配管の塑性変形に伴うエネルギー吸収のため低減されるが、ここで求める一次応力は仮想的に弾性とした場合の応力となるため比例倍して求める.

以上の手順で求められた、1,850Gal入力時における各試 験体のエルボ1,エルボ2位置の作用応力とそれらが設計 応力強さ*S*_mの何倍に相当するかをまとめて表4.3-2に示 す.ここで、*S*_mは日本機械学会の設計規格²⁾で規定されて いる、125[N/mm²]を使用した.平成17年6月時点におけ る配管の耐震設計では、地震慣性力により生じる一次応力 の制限を、曲げが優勢の場合は3.0*S*_m以下,ねじりにより 生じる応力が0.78*S*_mを超える場合は2.4*S*_m以下としている. 表4.3-2にはそれぞれの試験体について、一次応力制限に 達する入力加速度レベルとその位置も併記した.

表4.3-2 に示すように,実験結果からは,本研究で使用 した試験体では,減肉が存在しない場合は試験体の形状に かかわらず3種類全ての試験体についてエルボ1における 作用応力の方がエルボ2における作用応力よりも大きかっ た.本研究で使用した試験体について健全試験体の弾性域

表4.3-2 実験結果から求めた1,850Gal入力時のエルボの 一次応力

	Primary str	ess [*] [N/mm ²]	Input acc. when the	
	Elbow1 Elbow2		at the design limitation	
2D A01	3414	2597	187Gal (at Elbayd)	
3D_A01	27.3Sm	20.8Sm	1870al (at Elbow1)	
2D 411	2180	1876	222 Gal (at Elbow1)	
JD_AII	17.4Sm	15.0Sm	2550al (at El00w1)	
3D_A21	2738	2183	185Gal (at Elbow1)	
	21.9Sm	17.5Sm	1850al (at £100w1)	

 Table 4.3-2 Applied primary stress at the elbows at 1850Gal input acceleration calculated by the test result.

* Under the assumption of fictitious elasticity

の加振により生じるモーメントから求めたエルボ1部分に 発生する一次応力は、1,850Gal入力時には約7~9倍となっ た.また、1,400Gal入力は約4~6倍に相当する.本研究 で実施した減肉試験体のうち、もっとも低寿命となったの は3D_C03および3D_C22であるが、ともに1,400Gal 2回 の入力終了までは損傷に至らなかった.本試験で使用した 入力波は設計で使用される入力地震動とは異なる考え方で 作成されたものであるため、振動応答による応力繰り返し 数の算定など検討すべき事項が残されているが、本試験の 結果からは、現行の耐震基準に基づき設計された配管系に 50%程度の全周減肉が存在しても、配管の損傷までにはあ る程度の裕度を有していると考えられる.

4.3.3 劣化状況と応答値の関係

立体配管系試験体で,実験から得られた一次固有振動数 をまとめて表4.3-3に示す.健全配管試験体の一次固有振 動数はおよそ2.8Hz前後であり,エルボ1箇所が減肉して いる場合,試験体の形状や減肉を有するエルボの位置にか かわらず一次固有振動数は約5~8%低下した.また,面 内曲げ試験体の結果からエルボ2箇所が減肉している場合 は約13%の固有振動数の低下があり,固有振動数の低下率 は減肉の程度に依存していることが確認された.

図4.3-7に、立体配管系振動試験で使用した全ての試験 体について、試験体への入力加速度とエルボ3位置で計測 された応答加速度の関係を示す.おおむね入力加速度 400Gal以上の弾塑性域レベルの加振で、試験体の一部に塑 性変形が生じることに伴うエネルギー吸収のため応答加速 度が低下する傾向を確認した.同一の入力加速度に対する



図 4.3-7 入力加速度とエルボ 3 位置の応答加速度の関係 Fig.4.3-7 Relation between input acceleration and response acceleration at Elbow3.

表 4.3-3	立体配管系試験体	一次固有振動数一覧	

Table 4.5-5 Natural frequencies at the 1st mode of 5-D piping system models.						
	Model name	Thinned wall elbow	Natural frequency at the1st mode			
	3D_A01	(Sound)	2.78 Hz			
In-plane bending type	3D_C01	Elbow1 and Elbow2	2.42 Hz			
model	3D_C02	Elbow1	2.55 Hz			
	3D_C03	Elbow2	2.62 Hz			
Out-of-plane bending type	3D_A11	(Sound)	2.77 Hz			
model	3D_C12	Elbow1	2.69 Hz			
In-plane and Out-of-plane	3D_A21	(Sound)	2.83 Hz			
bending type model	3D_C22	Elbow1	2.68 Hz			

応答加速度のレベルを試験体間で比較すると,減肉のある 試験体では健全試験体に比べて低い応答加速度となる.こ れは減肉部では健全な場合と比較して同一入力でより大き な塑性変形が生じ,エネルギー吸収が大きくなることによ ると考えられる.応答加速度の低下の傾向は,固有振動数 の低下傾向と同様減肉の程度に依存しており,配管系の形 状,減肉の存在位置などによる違いは明確ではなかった.

4.3.4 エルボの外径変化

面外曲げ試験体および面内+面外曲げ試験体では,試験 の前後においてエルボ1およびエルボ2の外径を計測した. 外径計測を行った断面は図4.2-7に示したとおりである. 各試験体のエルボ1,2について、A断面の面内方向(図4.2-7(a) の0°-180°方向)と面外方向(図4.2-7(b)の90°-270° 方向)の外径変化率を図4.3-8に示す.ここで,外径変化 率は,試験後の外径と試験前の外径の差を取り,試験前の 外径で除したものとした.また,図中,白抜きの点は減肉 したエルボを、塗りつぶした点は健全なエルボを意味す る.図4.3-8に示すように、3D A11および3D A21ではエ ルボ2の面外(90°-270°)方向に1~2%弱の変形が生 じているのみであり、エルボ1、エルボ2とも加振による 外径の変化は非常に小さい. 一方, 3D C12および3D C22 では、減肉のあるエルボ1でラチェット現象に伴う8~14% の外径の増加が認められた.面内方向と面外方向の外径変 化率を比較すると,面外方向の外径変化の方が大きい傾向 があった.図4.3-9に、大きな外径変化が認められた 3D C12 および 3D C22 のエルボ1 について,外径計測を 行った全ての断面における外径変化率を示す.図4.3-9の 凡例の数値は図4.2-7(a)に示した周方向断面上での角度を



図4.3-8 配管系試験体の外径変化率





意味し、0-180はエルボの0°-180°方向の外径計測値で あることを意味する.3D_C12のエルボ1について、中央 断面(A断面)をはさんでアンカA-01側(C1,B1断面) と、アンカA-02側(B2,C2断面)とで外径変化率を比較 すると、外径の増加はA断面をはさんで対称ではなくアン カA-02側で大きいことがわかる.この変形と4.3.1で述べ た損傷状況から、3D_C12ではエルボ1の変形に伴いアン カA-02側の溶接線近傍で形状不連続が生じ、局所的に大 きな曲げ荷重が作用し、き裂発生に至ったものと考えられ る.3D_C22についてもアンカA-02側で、き裂発生位置に 近い270°~315°方向を含む外径変化率が大きく、 3D C12と同様の損傷が生じたと考えられる.

4.4 配管系振動試験のまとめ

エルボ部分に減肉を有する基本的な形状の配管系試験体 を使用し、振動台を用いた加振実験を行った. 試験体は, 加振により減肉エルボ部分に面外曲げを含む荷重が作用す るような形状とした.実験の結果、これまでに得られた結 果と同様,減肉のある配管系では健全な場合と比較して固 有振動数の低下が認められた.実験で確認された損傷形態 は、減肉のあるエルボ近傍での疲労き裂貫通であった.こ の損傷は、ラチェット現象によるエルボ部分の変形のため に局所的に大きな曲げ荷重が作用したためと考えられる. 急速な全周破断や損傷に伴い配管系全体の変形が一方向に 進展するような不安定な損傷は生じなかった. 実験の結 果から,配管系の損傷は全てのエルボが健全である場合は 面内曲げを受けるエルボで生じると考えられ、面外曲げは 配管の損傷に対し厳しい負荷条件ではないことが確認され た.しかし、面外曲げの重畳するエルボに減肉が存在し、 地震応答によりラチェット変形が発生する場合,エルボの 形状が変化することに伴う応力集中が生じることにより面 外曲げを受けるエルボでも損傷の生じる可能性が発生する と考えられる. 実験では現在の耐震設計における応力制 限よりも数倍の応力が生じる条件で加振を行ったが,減肉 試験体においても損傷までには複数回の加振を要してお り、現行の耐震基準に基づき設計された配管系に50%程度 の全周減肉が存在しても,損傷までにはある程度の裕度を 有していると考えられる.





5 詳細解析による減肉配管の疲労寿命評価

5.1 概要

詳細解析では,曲管要素試験および配管系振動試験の結果 を精度良く再現する解析モデルを作成するとともに,解析に 基づく減肉配管系の損傷寿命評価法を構築することを目的 とし,有限要素法(以下 FEM)による弾塑性解析を行った.

5.2 配管要素試験に対する解析評価

5.2.1 解析諸元

第3章で述べた実験に対し FEM を用い解析を行った.こ こでは、有限要素解析の仕様とその条件について記述する.

解析に関してはモデルの作成及び要素分割を行うプリプ ロセッシングには HYPERMESH を, ソルバーには ABAQUS を,ポストプロセッシングには ABAQUS VIEWER をそれぞ れ用いた.配管要素試験のモデル化には ABAQUS の Shell 要素 S4R を使用し,メッシュ作成において,エルボ部の周 方向分割を 40 分割,軸方向分割を 30 分割とし,要素数は 2,160,節点数は 2,200 とした.また,なるべくコンター図の 不連続を発生させないためにオフセットコマンドを使用し ていない.メッシュ分割図を図 5.2-1 に示す.

弾塑性解析に使用した式は Mises の降伏条件に基づく Prandtle-Reuss の式である.また入力した材料特性を図 5.2-2 に示す.この際、移動硬化則を用いた.材料特性は、

ヤング率	E = 203GPa
ポアソン比	v=0.3
降伏応力	σ_y =424MPa
二次勾配	<i>S</i> ' = 1200MPa
である	







図 5.2-2 解析に用いた材料特性



5.2.2 累積疲労損傷則を用いた寿命評価¹⁾²⁾

ラチェット変形を伴う疲労寿命の予測には、ひずみ振幅に 加え、延性消耗を考慮した累積ひずみが重要なパラメータと 考えられる.これは Coffin らが提唱する累積ひずみの存在 に伴う延性消耗の影響により、低サイクル疲労強度が低下す るという考え方に基づいている.基本的な考え方としてはひ ずみ振幅から求められる疲労損傷のパラメータ D_fに対し、 累積ひずみの存在に伴う延性消耗を考慮した D_dを求め、累 積ひずみの存在に伴う低サイクル疲労強度の低下を定量的 に評価する事を目的としている.

疲労損傷のパラメータ D_f はマイナー則に従うものと考え られ、その際、炭素鋼 STS410 材の低サイクル疲労曲線は Manson-Coffin 則、及び Basquin 則から次式のように表され る. この式に従えば全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_t$ と破断寿命 N_f の関係 が得られる.

$$\Delta \varepsilon_t = C_e N_f^{-k_e} + C_p N_f^{-k_p} \tag{5.2-1}$$

上式において C_eは弾性疲労強度係数, -k_eは弾性疲労強度 指数, C_pは塑性疲労強度係数, -k_pは塑性疲労強度指数であ る.本研究では次式で表される原子力発電技術機構¹⁾で求め られた炭素鋼 STS410 の室温試験の結果を用いる事とした.

$$\Delta \varepsilon_{t} = 0.6158 N_{t}^{-0.0746} + 89.08 N_{t}^{-0.5414}$$
(5.2-2)

上式を用いた結果,マイナー則より,複数の全ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon_{ii}$ がそれぞれ N_i 回繰り返された場合の損傷率 η は次式に よって表される.

$$\eta = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i}{N_{fi}}$$
(5.2-3)

上式において,累積ひずみが無い場合,η=1 になった時 破断する.

また Coffin らによると延性消耗のパラメータ D_d は以下のように表される.

$$D_d = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{f0}} \tag{5.2-4}$$

上式において ε_f は累積ひずみ量, ε_n は供試材の真破断 延性を表す. ε_n については次式で示される単調引張試験で 得られる破断絞り ϕ (%)によって定義される.

$$\varepsilon_{f0} = \ln \frac{100}{100 - \varphi}$$
 (5.2-5)

なお本解析で用いた真破断延性 ϵ_{f0} の値は原子力発電技 術機構で求められた炭素鋼 STS410 の材料試験結果 ¹⁾より 112.4%とした.

低サイクルラチェット疲労強度の評価法として Coffin は 次式を提案している.

$$D_d + D_f = 1$$
 (5.2-6)

$$D_f = (\eta)^n \tag{5.2-7}$$

上式において n は定数を示す. 鵜戸口³⁾の見解及び朝田⁴⁾ らの試験結果に基づけば,一般的な鉄鋼材料の *D*_fは, η を 0.6 乗した値とされている。朝田は薄肉部を設けた配管を用 いた内圧ラチェット疲労試験の結果から,実験的に内圧によ る多軸応力場においては、式(5.2-6)で求められる値より 低サイクル寿命が短くなるとして、多軸応力場における低サ イクルラチェット疲労寿命評価式として,以下の2つの実験 式を提案した.

$$3D_d + D_f = 1 \left(D_f \le 0.25 \right)$$
 (5.2-8)

$$D_d + 3D_f = 1 (D_f > 0.25)$$

朝田の実験式Ⅱ

$$F \equiv D_f + 2\sqrt{D_f D_d} + D_d = 1 \tag{5.2-9}$$

なお、上式において ε_f は膨張した配管の最終的な周方向 ひずみとしている.また、クロスヘッドによる負荷変位を薄 肉部平行長さで除した公称値を全ひずみ振幅として D_fを算 出している. すなわち式 (5.2-8) 及び (5.2-9) ではき裂発 生部における試験体の局所的な真ひずみを用いないマクロ 的な変形から類推した実験式である.本研究では上記の朝田 の実験式Ⅱが複雑な変形挙動をする配管の局所の真ひずみ に対して成立するものと仮定する.この局所の真ひずみ挙動 は FEM 解析により得られる. したがって局所的な真ひずみ 範囲を朝田式に適用すると過度に安全側の結果となる事は 否めない.しかしながらラチェット変形の考察を行う上で、 延性消耗を考慮する事は重要な要因であり、Dfに対する Da の値を抽出する事は減肉配管の安全性評価に非常に有効で あると考えられる.本来,朝田の実験式を拡張する際に,妥 当性の検証をするための基礎実験をすべきであるが、本研究 では便宜的に拡張して使用した.本仮定の妥当性は実験結果 との比較により検証する.本研究では、式(5.2-9)の左辺 から得られる値をFと定義し,F値により疲労損傷を評価し た.

5.2.3 多軸非線形ひずみ下の低サイクル疲労寿命評価手法

ここでは本研究で提案した多軸ひずみ下の低サイクル疲 労寿命評価手法について説明する.

軸方向ひずみを*ε*,周方向ひずみを*ε*,せん断ひずみを*γ* とする. 図 5.2-3 に示すように角度θについては軸方向ひず みなの方向を0°としその方向から時計回りを正にとる.ま た角度θの取り得る範囲は0°≤θ≤180°となる.

$$\varepsilon(\theta) = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \gamma_{xy} \sin 2\theta$$
$$\left(0^\circ \le \theta \le 180^\circ\right) \tag{5.2-10}$$

 $\Delta \varepsilon(\theta) \longrightarrow D_f(\theta)$ (5.2-11)

$$\varepsilon_f(\theta) \xrightarrow{(5.2-4)} D_d(\theta)$$
 (5.2-12)

$$\max\left[D_d(\theta)\right] \longrightarrow D_d \tag{5.2-13}$$

式(5.2-10)により、それらのひずみを角度θの関数として出 力する.次に、角度θを固定しひずみ履歴を再出力し、それ ぞれの角度でひずみ範囲 $\Delta \varepsilon(\theta)$ と累積ひずみ量 $\varepsilon_{\ell}(\theta)$ を計算 する. 算出方法は単軸ひずみの場合と同様である.

次に式(5.2-2), (5.2-3), (5.2-7) により $\Delta \varepsilon(\theta)$ から $D_f(\theta)$ を 算出し、また式(5.2-4)により $\varepsilon_t(\theta)$ から $D_d(\theta)$ を算出し、最大 値を取る.これらの計算を行うと図 5.2-4 の F値と角度の関 係、図 5.2-5 の F値とサイクル数の関係を作成する事ができ ろ









図 5.2-4 を見ると, 軸方向から 87°方向に F 値のピークを 取る事が分かる.これは, 軸方向から 87°傾いた面が開く ようにき裂が入り破壊に至る事を示唆している.つまり 177°(87°+90°)の方向にき裂が入る事を示している. また,図 5.2-5 により,220 サイクルで F=1.0 に達する.こ れは,220 サイクルで破壊に至るということを予測している. これにより,き裂の入る方向と,破壊に至るまでのサイク

ル数を知ることができる.

5.2.4 実験結果と解析結果の比較

ここでは ELB01, ELB02, ELBO_02, ELBM_01の試験体 に関して,実験で得られたデータと解析結果を比較する事に より,解析モデルの精度,信頼性に関する評価を行う. 図 5.2-6 から図 5.2-9 まで,試験ケースごとに実験と解析を 比較した結果を示している.それぞれにおいて,(a)は実験 の,(b)は解析の変位-反力曲線,(c)は破損した試験体の図, (d)は解析で得られた変形図(拡大率3倍),(c)は内面の,(f)

は外面の相当塑性ひずみ分布図(それぞれの試験体で最大値 を等しく設定してある)である.この際,相当塑性ひずみ分 布図では色の濃い部分がひずみ集中点である.

総じて変位反力曲線は実験と解析でおおよその一致を示 した.

ELB01 について考察する.実験における破損位置は内面の脇部である.解析では、この位置を相当塑性ひずみ分布図の最大位置として特定できた.内面の脇部にひずみが集中す

るのは、断面偏平化によるオーバリングの影響である.

ELB02 について考察する.実験における破損位置は外面の腹部である.この位置を相当塑性ひずみ分布図の最大位置として特定できた.これは,試験体の剛性に対し過大な入力であったため,座屈に至ったものと考えられる.

ELBO_02 について考察する.実験における破損位置は外面の脇部と腹部の中間位置である.この位置を相当塑性ひずみ分布図の最大位置として特定することはできなかった.これは,破壊評価手法に問題があるのか,ひずみの再現性に問題があるのかを特定することは難しい.

ELBM_01 について考察する. このモデルは ELBO_02 と 非常に似たような傾向を示している. 破損位置を相当塑性ひ ずみ分布の最大値として出力することはできなかった.

最後に、図 5.2-10 の実験と解析の寿命比較のグラフおよ び表 5.2-1 の破損までの回数を考察する.図 5.2-10 は縦軸が 解析での破損までのサイクル数,横軸が実験の破損までのサ イクル数である.図中と表中の $F や D_I \ge k$,Fが式(5.2-9) により評価したもので, D_f は式(5.2-7)により評価したもので ある.F値による評価, D_f 値による評価ともにおおよそ 1/2 ~2 倍の一致を示しているが,F値による評価では,全般に やや安全側に寿命を評価している.



(a) Disp.-Reaction force curve(Experiment)

(b) Disp.-Reaction force curve(Simulation)



(c) Experimental result



(d) Deformation (\times 3)



(e) Distribution of eq. strain at inner surface

(f) Distribution of eq. strain at outer surface





(a) Disp.-Reaction force curve(Experiment)

(b) Disp.-Reaction force curve(Simulation)



(c) Experimental result



(d) Deformation (\times 3)



(e) Distribution of eq. strain at inner surface

(f) Distribution of eq. strain at outer surface





(a) Disp.-Reaction force curve(Experiment)

(b) Disp.-Reaction force curve(Simulation)



(e) Distribution of eq. strain at inner surface

(f) Distribution of eq. strain at outer surface



防災科学技術研究所研究資料 第306号 2007年3月



(a) Disp.-Reaction force curve(Experiment)

(b) Disp.-Reaction force curve(Simulation)



(e) Distribution of eq. strain at inner surface

(f) Distribution of eq. strain at outer surface





表 5.2-1	破損までの繰り返し数
Table5.2-1	Cycle number until leak.

	N-exp	N-F	N-Df
ElbowB01	179	206	453
ElbowB02	264	56	131
ElbowBO_02	40	12	47
ElbowBM_01	34	19	50

5.3 配管系振動試験に対する解析評価

5.3.1 解析諸元

配管系振動試験の解析は動解析, 静解析, 寿命評価の三部 構成となっている.動解析では配管系全体の挙動を把握し, 塑性変形を生じるエルボ両端での並進変位および回転変位 を得る.静解析では, エルボ部のみをモデル化しその両端に 動解析で得られた相対変位の結果を入力し,変形モードや相 当塑性ひずみが最大となる部分でのひずみ履歴などを得る. 寿命評価では,静解析で得られたひずみ履歴から疲労損傷を 評価する.

配管系試験体の形状を図 5.3-1 に示す. 配管系はエルボ部 と直管部から構成されており,各エルボ部を図のようにエル ボ1,エルボ2,エルボ3とする. 配管は高温配管用炭素鋼 管 STPT370 100A Sch80 (JIS 規格)を使用した.外径114.3mm, 健全部肉厚 8.6mm である. 減肉エルボは炭素鋼 FSGP エル ボで代用した. FSGP エルボの肉厚は公称 4.5mm であり,減 肉量は約 50%となる. 表 5.3-1 に解析条件を示す. このうち 実験は, 3D_A01, 3D_C01, 3D_C02, 3D_C03, 3D_C12, 3D_A21, 3D_C21 ついてのみ実施されている.

動解析では全ての配管にエルボ要素を使用してモデル化 した.トーラス半径をゼロとすることにより直管としても使 用でき,曲管部と直管部の相互作用を考慮することができる. 節点数は405 (ユーザーが定義した節点数は54),要素数は 106である.図5.3-2に示すように材料定数は炭素鋼STPT370 の単調引張試験結果の5%ひずみから10%ひずみまでを最 小二乗法で近似した直線を二次勾配として2直線近似をし た.この際,

ヤング率	<i>E</i> = 203GPa
ポアソン比	v=0.3
降伏応力	σ_y =35.3MPa
二次勾配	$S' = 2000 MP_{2}$

である.硬化則としては移動硬化則を用いた.弾性域での減 衰の設定にはレーリー減衰を用いた.レーリー減衰はαとβ で決定される.図5.3-3に示したように、減衰は弾性設計で 用いられる0.5%とし、入力波形が成分を持つ1.5Hzから 3.0Hzでほぼ一定となるようにα、β値を決定した.自重は節 点に集中荷重で分布させ、内部水の慣性力は集中質量で分布 させた.入力波形は実験での測定結果を使用した.この際、 解析が発散しにくいようにラージマス法を用いた.

静解析では,低減積分厚肉シェル要素を用いてエルボ部の みをモデル化した.周方向に40分割,軸方向に30分割で節 点数は2,000,要素数は2,000である.材料特性は,

ヤング率	<i>E</i> = 203GPa
ポアソン比	$\nu = 0.3$
降伏応力	σ_y =424MPa
二次勾配	S' = 1200MPa

である.

寿命評価の手順は 5.2.3 に示した通りである.



(a) Elbow1 : In-plane







(c) Elbow1 : In-plane and Out-of-plane

図 5.3-1 配管系試験体の概要

Fig.5.3-1 Configuration of the 3-D piping system test models.

表 5.3-1 解析検討を行う試験体条件

Table5.3-1 Model configuration and wall thinning condition for analytical investigation.

Name	Туре	Elbow1	Elbow2	Elbow3
3D_A01	0	Sound	Sound	Sound
3D_C01	0	Thinning	Thinning	Sound
3D_C02	0	Thinning	Sound	Sound
3D_C03	0	Sound	Thinning	Sound
3D_A11	1	Sound	Sound	Sound
3D_C11	1	Thinning	Thinning	Sound
3D_C12	1	Thinning	Sound	Sound
3D_C13	1	Sound	Thinning	Sound
3D_A21	2	Sound	Sound	Sound
3D_C21	2	Thinning	Thinning	Sound
3D_C22	2	Thinning	Sound	Sound
3D_C23	2	Sound	Thinning	Sound

Type 0····Elbow1 : In-plane(Fig. 5.3-1(a))Type 1····Elbow1 : Out-of-plane(Fig. 5.3-1(b))Type 2···Elbow1 : Mixed(Fig. 5.3-1(c))







5.3.2 実験との比較

実験は 3D_A01, 3D_C01, 3D_C02, 3D_C03, 3D_C12, 3D_A21, 3D_C21 について実施された. このうち, 3D_C02 と 3D_C12 について解析結果と実験結果を比較する. 図 5.3-4 と図 5.3-7 に動解析結果を示す. (a)はエルボ3上部における加振方向の応答加速度の時刻歴波形, (b)はエルボ1のエルボ開閉変位の時刻歴波形, (c)はエルボ2のエルボ開閉変位の時刻歴波形を示している. 3D_C02 については, エルボ1 およびエルボ2の開閉変形の頻度分布を図 5.2-4(d), (e)に示した. また, 3D_C12 については, エルボ1の加振方向の応答変位の時刻歴波形を図 5.2-7(f)に示した.

3D_C02 において,エルボ1の開閉変位の頻度分布は,実験と解析でよく一致している.しかし,エルボ2では解析結果がやや大きい傾向にある.解析と実験との応答値の差については 5.3.6 で検討する.

3D_C12はエルボ1が面外変形を主に生じる条件であるが 加振方向の応答変位,エルボ開閉変位ともに傾向をよく再現 できている.



(a) Time history of response acceleration.



(b) Time history of elbow opening-closing disp. (Elbow1).



(c) Time history of elbow opening-closing disp. (Elbow2).



(d) The histogram of elbow opening-closing disp. (Elbow1)



(e) The histogram of elbow opening-closing disp. (Elbow2)
図 5.3-4 動解析結果 (3D_C02)
Fig.5.3-4 The result of dynamic analysis (3D C02).



図 5.3-6 破損箇所 (3D_C02, Elbow1) Fig.5.3-6 Damaged area (3D_C02, Elbow1).



(a) Time history of response acceleration



(b) Time history of elbow opening-closing disp. (Elbow1)



(c) Time history of elbow opening-closing disp. (Elbow2)



(f) Time history of translational disp. of Elbow1 to the shaking direction

図 5.3-7 動解析結果 (3D_C12)

Fig.5.3-7 The result of dynamic analysis (3D_C12).



(a) Deformation (\times 5)



(b) Distribution of eq. strain at outer surface



(c) Distribution of eq. strain at inner surface

図 5.3-8 静解析結果 (3D_C12, Elbow1) Fig.5.3-8 The result of static analyses (3D_C12, Elbow1).



図 5.3-9 破損箇所 (3D_C12, Elbow1) Fig.5.3-9 Damaged area (3D C12, Elbow1).

5.3.3 各条件での F 値の比較

ここでは寿命予測結果と実験結果を比較検討する.

図 5.3-10 に実験と解析における破壊が発生するまでの加振回数を示す. 図の黒い数字は解析による破壊に至るまでの加振回数であり, 灰色の数字は実験での破壊に至った加振回数である. 棒グラフのひとつひとつの長方形は一回の加振で生じる F 値を現している.

図 5.3-11 に各試験ケースによる F 値を示す. 配管形状で は全てのエルボが健全のもの(3D_A*1)と減肉が一箇所の もの(3D_C*2, 3D_C*3)で Elbow1が面内+面外曲げを受 ける場合が最も F 値が大きくなった. 減肉の位置と個数で は,全ての配管形状で Elbow1 のみが減肉している条件で最 も F 値が大きくなった.

5.3.4 破損箇所の予測

ここでは破損箇所について検討する. 図 5.3-5 と図 5.3-6 に 3D_C02, 図 5.3-8 と図 5.3-9 に 3D_C12 の静解析結果と実 験での破損箇所を示した. また, 表 5.3-2 に実験破損箇所と 解析破損予測箇所をまとめた. 白丸が実験破損箇所, 黒丸が 解析破損予測箇所である.実験での破損箇所と静解析結果と 比較すると 3D_A01, 3D_C01, 3D_C02, 3D_C03 において よく一致している.

3D_C12 (エルボ1が面外曲げを受ける条件), 3D_C22 (エ ルボ1が複合曲げを受ける条件)において,実験では余盛の 近傍でき裂が生じた.今回の解析モデルでは余盛は考慮して いないのでこの結果を再現できていない.この実験結果を評 価することを目的として,余盛を考慮した解析を実施した.

5.3.5 余盛の考慮

実験において 3D C12 と 3D C22 は溶接余盛の近傍でき裂 が生じた.そこで溶接余盛を考慮したモデルで解析を行う. 溶接余盛部は凹凸がありモデル化は非常に難しいが,本研究 ではシェル要素の一部を厚くすることで溶接余盛を模擬し た.図 5.3-12 にエルボ部の板厚分布を示した.余盛部の厚 さは 7.0mm, 降伏応力は 500MPa と他の部分の 424MPa より 高く設定し、二次勾配は共通で1,200MPaとした.図 5.3-13, 14 に変形図(変形拡大率5倍),相当塑性ひずみ分布図(外 面),相当塑性ひずみ分布図(内面)を示す.変形が複雑な ため,解析においては実験での破損箇所以外でも数箇所で高 い相当塑性ひずみの分布が見られる.またこのモデルでは溶 接余盛部を簡略的に表現したものであり,解析により得られ るひずみ履歴の値は余盛部のひずみ集中を正確に反映した ものではない.よって疲労寿命まで評価するにはソリッド要 素などを用いて更なる詳細モデルを構築する必要があるが、 このモデルにより余盛部で破損する可能性の有無は判断す る事が可能である.

5.3.6 精度検証

図 5.3-15 に、面内曲げ試験体について、動解析における エルボ開閉変位の最大値と最小値の実験値との誤差率を示 した. 3D_A01 はよく一致しているが 3D_C01 では両エルボ とも解析結果が小さく、3D_C02 と 3D_C03 では健全エルボ の解析結果が大きくなっている. このことより、解析モデル では減肉部への変形の集中が実際より少ないと考えられる. 本研究で検討した疲労寿命評価法では、動解析の結果を用い



図 5.3-10 破壊までの加振回数の比較





表 5.3-2	実験と解析における破損箇所の比較

Table5.3-2	Comparison of damaged areas between
	experiments and analyses.

	Elbow 1	Elbow 2
3D_A01	•0	
3D_A11		
3D_A21		
3D_C01	•0	
3D_C11		
3D_C21		
3D_C02	•0	
3D_C12	•0	
3D_C22	•0	
3D_C03		
3D_C13		
3D_C23		

: Simulation () : Experiment Sound

Wall thinning

て静解析を,静解析の結果を用いて疲労評価を行うため,静 解析,疲労評価と進むに従い誤差は累積されていく.本研究 で検討した解析モデルでは破損形態や破損位置を数箇所ま で特定することは可能であるが,疲労寿命を精度良く予測す るためには,それぞれの解析モデルや評価における精度向上 が必要である.

5.4 まとめ

局所的減肉部を有するエルボの静的繰り返し載荷試験で 得られた実験結果を再現できるようなFEMモデルを構築す ることを目的として,代表的な試験ケースに対し実験結果と 解析結果を比較した.その結果,破損箇所をおおむね特定し, 寿命を1/2倍~2倍の精度で評価することができた.また, 配管系振動試験で得られた結果を対象に,簡易モデルによる 非線形時刻歴応答解析と局部を詳細に解析する静的な弾塑 性解析を組み合わせ,減肉部を有する配管系の非線形時刻歴 応答から破損評価までを解析に基づき評価した.その結果, 配管系内における損傷の生じる位置は精度良く予測するこ とができた.一方,エルボ内部での損傷位置の予測にはより 詳細なモデルによる解析が必要になるなど,現状の解析モデ ルによる評価の精度と限界,今後の改善点が明らかになった.



図 5.3-12 溶接余盛を考慮したエルボ部のモデル Fig.5.3-12 Elbow part modeled in consideration of welding.



図 5.3-13 静解析結果 (3D_C12, Elbow1)

Fig.5.3-13 The result of static analyses (3D_C12, Elbow1).



(a) Deformation (\times 5)



(b) Distribution of eq. strain at outer surface



(c) Distribution of eq. strain at inner surface

図 5.3-14 静解析結果 (3D_C22, Elbow1) Fig.5.3-14 The result of static analyses (3D_C22, Elbow1).



図 5.3-15 各条件における最大値-最小値の誤差率

Fig.5.3-15 Error ratio of difference between maximum and minimum for each case.

6. 結論

6.1 本研究のまとめ

高経年化に伴い減肉を生じた配管系を対象とし,地震時の損傷挙動を把握することを目的として配管要素試験 と配管系振動試験を実施した.また,実験で得られたデー タをもとに,有限要素法による詳細解析と,解析に基づく 寿命評価の適用性について検討した.得られた主な知見を 以下に示す.

(1) 配管要素の損傷挙動

- 曲管部分に減肉を有する配管要素に対し,作用荷重 の種類や減肉条件を変化させた繰り返し載荷試験 を実施し,それぞれの条件における特徴的な損傷 形態と破損寿命を把握した.その結果,減肉配管の 破損形態は、ラチェット変形を伴う疲労損傷とな ることがわかった.ラチェット現象の発生には,減 肉量,減肉形状,作用荷重の条件が影響すると考え られる.
- 2) ラチェット現象の発生は配管の形状変化をもたらす ため、ラチェット現象が顕著に現れる場合、最終破 損形態が健全配管で確認される破損形態と異なる 場合があり、減肉が検出された場合の破損評価を 行う際にはラチェット現象の影響を考慮する必要 があると考えられる.また、ねじりを含む荷重が作 用する場合、この影響のため、健全配管と比較して 大幅な寿命低下を起こす可能性があり、作用荷重 の種類を考慮した評価が必要であると考えられる.
- 3) 曲管断面内のひずみ振幅を比較すると、作用荷重の 種類にかかわらず、ひずみ振幅の大きい位置は脇 ~腹にかけての範囲に存在し、背側には大きなひ ずみは発生しなかった.このことから、曲管におい ては背側に存在する減肉よりも、脇~腹側に存在 する減肉の方が配管の損傷挙動に及ぼす影響は大 きくなると考えられる.
- (2) 配管系の振動特性および破損挙動
 - 減肉部を有する基本的な形状の配管系試験体に対し、振動台を用いた加振実験を行い、減肉がある配 管系の弾塑性応答挙動、損傷形態、損傷寿命を実験 的に把握した.実験では減肉の存在により、剛性が 低下し配管系の固有振動数や応答加速度の低下と いった影響が現れた.この影響の程度は、減肉の程 度に依存しており、作用荷重の種類による影響の 差は確認されなかった.
 - 2) 配管要素試験と同様,通常では面外曲げは配管の損傷に対し厳しい条件ではないが,面外曲げを含む荷重を受ける部分に減肉が存在する場合,作用荷重のレベルによっては減肉部分の変形が大きくなり,損傷の可能性が生じる.
 - 3) これまでの研究も含め,配管系試験で確認された損 傷形態は、減肉部を有する配管本体もしくは減肉 部直近の溶接部近傍での疲労損傷であった.損傷 に伴い変形が不安定に進行するような不安定破壊 は確認されなかった.

- 4) 配管系振動試験においては現行の耐震基準で規定されている一次応力制限を超える入力の加振を行ったが、全ての試験体について、損傷が生じるまでには一次応力制限を超える応力が発生する入力による加振を複数回繰り返しており、本研究の結果からは、全周50%程度の減肉である場合、減肉のある配管系においてもある程度の裕度を有していると考えられる。
- (3) 解析的検討
 - 配管要素試験を対象に、局所的減肉部を有する曲管の有限要素法解析モデルを構築した.この解析モデルにより、実験で得られた変形状態や荷重変形特性を精度良く再現することができた.また、解析により破損箇所の特定と、その位置での局所ひずみを用いて1/2~2倍の寿命評価が可能となった.
 - 2) 配管系振動試験で用いた試験体を対象として,簡易 なエルボ要素による配管系の非線形時刻歴応答解 析とシェル要素による静的な強度解析を組み合わ せ,配管系の損傷寿命評価を行った.その結果,寿 命については誤差の大きい場合があるが,損傷の 生じる曲管はほぼ予測可能であった.この解析手 順により,配管系の弾塑性振動応答から破損予測 までを解析に基づき評価できる見通しが得られた.

6.2 今後の課題

本研究を実施する中で,未解明の点やさらに検討を深 めるべき点がいくつか明らかになった.以下にそれらを 今後の課題として挙げる.

- (1) 減肉配管の破損挙動に影響を与える要因,配管系の振動応答に影響を与える要因の定量的評価本研究を通じ,減肉配管の破損挙動や振動応答への減肉の影響について,定性的な傾向と損傷に影響を及ぼす要因は抽出されたが,それらの要因の定量的評価には至っていない.また,配管の口径や公称肉厚は配管要素試験,配管系振動試験を通じ2種類のみを使用しており,t/R等を用いた配管形状と減肉形状の一般化が必要である.これらの定量評価や一般化には,実験によるデータを蓄積するとともに,第5章で述べたような詳細解析モデルを併用し,効果的に実施していく必要がある.
- (2) 減肉を生じやすい他の配管種類に対する実験および解析的検討 本研究では、減肉を生じやすい配管種類のうち、曲管のみを対象とした.減肉は、ティ、レデューサ、直管でもオリフィス下流等で生じやすいとされている. 他機関による研究で実施されているものもあるが、 体系的な実験および解析的検討が必要である.
- (3) 解析モデルと疲労評価法の精度向上 解析に基づき減肉配管の健全性を評価するには、破 損が予測される位置のひずみ挙動を定量的に精度 良く再現する必要がある.現時点での解析モデル では、定性的な傾向は良く再現できるが、平均ひ

ずみ・ひずみ振幅とも,定量的に精度良く一致させる には至っていない.特に面内曲げについては解析に より損傷箇所,寿命ともほぼ予測可能であるが,面外 曲げを含む荷重が作用する場合については誤差が大 きく,解析モデルのさらなる精度向上の検討が必要 である.また,本研究の解析で使用した材料特性は実 験結果と解析結果を比較しながら二直線近似を行っ た.今後載荷試験を行っていない材質の配管につい て健全性評価を行うことを考慮すると,材料試験結 果やミルシート値から解析で使用する材料特性を決 定する手法を検討していく必要がある.

本研究では平均ひずみの増加を伴う疲労寿命評価 法として、朝田による提案式を拡張して使用した. 一方、原子力発電技術機構により実施された試験結 果の評価では、材料試験から求められた疲労曲線に 対し回数を1/5倍とした疲労曲線を使用することでラ チェットによる寿命低下を含めて配管要素の破損寿 命を評価できるとしている.いずれの評価法が妥当 であるかに関しては本研究の中では検討を行ってお らず、今後の課題と考えられる.

- (4) 自然欠陥と模擬欠陥の比較データの拡充 本研究では、一組の実在減肉と模擬減肉について比 較載荷を行ったが、疲労寿命のばらつきを考慮する と、実環境下で腐食した減肉と機械加工で模擬した 減肉について、より多くの比較データを拡充する必 要がある.また、表面の凹凸状況や材質的な劣化が 配管の損傷に与える影響については明確にされてお らず、試験や調査を通じ、実際の腐食状況および材 質劣化の影響を明らかにする必要がある.
- (5) 許容できる減肉の条件と安全裕度の把握
 - 本研究では減肉を有する配管の破損形態を明らかに し、その挙動を解析に基づき評価する手法を確立す ることを目的としている.配管系振動試験の結果に ついて、現在の耐震基準で規定されている一次応力 制限との比較を行ったが、減肉を有する配管系の耐 震安全裕度の評価法や地震荷重下で許容されうる減 肉の条件については検討が進んでいない.今後は、 実験や詳細解析を通じ、地震荷重を考慮した際に許 容される減肉条件を把握するとともに、裕度評価の 手法について整理し、減肉における欠陥評価法を確 立する必要がある.

< 豁辞>

本研究は、原子力安全研究年次計画(平成13年度~平 成17年度、原子力安全委員会策定)に基づいており、主 に、研究の計画、実験の実施およびとりまとめについては 原子力委員会の評価に基づき文部科学省原子力試験研究費 の交付を受け実施されました.また、解析部分については 日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号 16360049) による補助のもとで実施されました. その他各 機関独自の研究費も利用しています.関係機関の援助に感 謝いたします.本研究の実施にあたって組織した NAP 研 究会では,委員各位より数多くの貴重なご意見をいただき ました.また,柴田碧東京大学名誉教授には,研究全体の 計画から実験実施、とりまとめに至るまで数々のご指導を いただきました.実験の実施にあたっては、防災科学技術 研究所の飯田晴男氏,石川島播磨重工業の相田重一氏,石 川島検査計測の内田弘氏のご協力をいただきました.ま た,第5章で述べた解析の実施には、横浜国立大学白鳥研 究室の越智洋次氏(現 キャノン(株)),青島誠氏(現 全日本空輸(株)), 宇田川誠氏(現 (独)日本原子力研 究開発機構),楊毓傑氏(現 (株)タンガロイ),角井聖 氏,同大学高田研究室の三上晃氏に多くのご協力をいただ きました. ここに記して感謝の意を表します.

NAP研究会の委員である(独)日本原子力研究開発機構 の故柴田勝之氏には,先行研究であるAP研究開始時から 研究全般にわたり数多くのご助言をいただきましたが,思 いがけず報告書完了寸前にご逝去されました. 記して感 謝の意を表するとともに,ご冥福を心よりお祈り申し上げ ます.

<参考文献>

第1章

- 通商産業省資源エネルギー庁(1999):電気事業者の原 子力発電所高経年化対策の評価及び今後の高経年化に 関する具体的取り組みについて.
- 日本機械学会(2000):発電用原子力設備規格 維持規 格(2000年版). JSME S NA1-2000,日本機械学会.
- American Society of Mechanical Engineer (1998) : Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning. ASME B&PV Code Sec.XI, Division 1, Code Case N-597, ASME.
- 原子力安全基盤機構(2005):高経年技術評価審査マニュアル 耐震安全性評価.JNES-SS-0513-00,原子力安全基盤機構.
- 5) 原子力安全基盤機構(2006):高経年技術評価審査マ ニュアル 配管減肉. JNES-SS-0510-01,原子力安全 基盤機構.
- 6) 原子力安全基盤機構(2006):高経年化技術評価等報告
 書に対する技術審査報告書(東京電力株式会社福島第 一原子力発電所3号機).
- 7) 原子力安全基盤機構(2006):高経年化技術評価等報告 書に対する技術審査報告書(中部電力株式会社浜岡原 子力発電所1号機).
- 原子力安全基盤機構(2006):高経年化技術評価等報告 書に対する技術審査報告書(関西電力株式会社美浜発 電所3号機).
- Namita, Y., Suzuki, K., Abe, H., Ichihashi, I., Shiratori, M., Iwata, K., Kojima, N., and Ishiwata, M. (2002) : Seismic Proving Test of Eroded Piping (Program and Preliminary Analysis of Eroded Piping Tests. ASME PVP 445-1, 91 -97.
- (財)原子力発電技術機構(2003):平成14年度 原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その2 減肉配管.
- 宮園昭八郎,植田脩三,柴田勝之,磯崎鉄邦,鬼沢邦 雄,中城憲行,栗原良一,橋口一生,加藤潔(1987): サリー原子力発電所の配管破断事故.日本原子力学会 誌, 29-11, 952-969.
- 12) 日本原子力研究所(1983):配管信頼性実証試験技術 報告書. JAERI-M 93-076.
- 13) Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M. F., and Anderson, M. (1997) : Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, **119**, 457-466.
- 14) 安碩煥,安藤柱,石渡雅幸,長谷川邦夫(1998):減 肉部を有する配管が曲げ荷重を受けたときの塑性崩壊 挙動と減肉の許容限界(第1報:減肉部を有する配管 の曲げ強度と破壊挙動). 圧力技術, 36-4, 225-233.
- Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H., and Ando, K. (1999) : Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to

bending load. Nuclear Engineering and Design, **191**, 195-204.

- 16) Ahn, S.H., Nam, K.W., Yoo, Y.S., Ando, K., Ji, S.H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K. (2002) : Fracture behavior of straight pipe and elbow with local wall thinning. Nuclear Engineering and design, 211, 91-103.
- 17) Miyazaki, K., Nebu, A., Ishiweata, M., and Hasegawa, K. (2002) : Fracture strength and behavior of carbon steel pipes with local wall thinning subjected to cyclic bending load. Nuclear Engineering and Design, 214, 127-136.
- 18) Kim, J.W. and Park, C.Y. (2003) : Effect of length of thinning area on the failure behavior of carbon steel pipe containing a defect of wall thinning. Nuclear Engineering and design, 220, 274-284.
- 19) 長谷川邦夫, 菅野智, 平野明彦, 石渡雅幸, 後藤伸穂 (1991):軸力を受ける炭素鋼配管のエロージョンによ る局部減肉の許容基準. 日本機会学会論文集(A編), 57-539, 1470-1474.
- 日本電気協会(1973, 1974, 1975): 地震時における 原子力施設の限界設計に関する試験研究 成果報告書 (昭和46年度,昭和47年度,昭和48年度).
- 21)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損実験.日本機 会学会論文集(第1部),44-386,3437-3445.
- 22) 中山秀一, 佐々木陽一 (1976): 配管系の繰り返し強 度について. 高圧ガス, 13-4, 149-152.
- 23) Udoguchi, Y., Akino, K., and Shibata, H. (1975) : On the Behavior of Pressurized Pipings under Excessive - Stresses Caused by Earthquake Loadings. 3rd SMiRT, K7/5.
- 24) Hara, F. and H. Shibata (1981) : Ratcheting Fatigue in Full-Scale Piping Elements. 6th SMiRT, K15/3.
- 25) Yokota, H., Endou, R., Kawabata, M., Sakakida, T., Fujiwaka, T., Asada, Y., and Suzuki, K. (2000) : Study on Seismic Design of Nuclear Power Plant Piping in Japan (Part 1: Overview of the Study). ASME PVP- 407, 117-123.
- 26) Namita, Y., Suzuki, K., Abe, H., Ichihashi, I., Suzuki, K., Ishiwata, M., Yoshino, K., and Tai, K. (2001) : Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Piping Component test result and Simplified Piping System Test Planning. ASME PVP- 428-1, 13-19.
- 27) Tagart, S.W., Jr., Tang, Y.K., Guzy, D.J., and Ranganath, S. (1990) : Piping dynamic reliability and code rule change recommendations. Nuclear Engineering and Design, 123, 373-385.
- 28) Slagis, G.C. (1997) : Experimental Data on Seismic Response of Piping. ASME PVP- 345, 163-177.
- 29) Iwan, W.D., Huang, C.T., Jaquay, K.R., and Chokshi, N.C. (1997) : Seismic margins for nuclear power plant piping systems. Proceedings of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability.
- 30) Slagis, G.C. (2000) : Assessment of Piping Seismic Re-

sponse, ASME PVP- 402-1, 49-55

- 31) Touboul, F., Blay, N., and Lacire, M.H. (1999) : Experimental, Analytical, and Regulatory Evaluation of Seismic Behavior of Piping Systems. Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 121, 388-392.
- 32) Shalaby, M.A. and Younan M.Y.A. (1998) : Limit Loads for Pipe Elbows With Internal Pressure Under In-Plane Closing Bending Moments. Transactions of ASME Journal of Pressure Vessel Technology, **120**, 35-42.
- 33) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A. (1999) : Effect of Internal Pressure on Elastic-Plastic Behavior of Pipe Elbows Under In-Plane Bending Moments. Transactions of ASME Journal of Pressure Vessel Technology, **121**, 400-405.
- 34) Mourad, H.M.and Younan, M.Y.A (2001) : Nonlinear Analysis of Pipe Bends Subjected to Out-of Plane Moment Loading and Internal Pressure. Transactions of ASME Journal of Pressure Vessel Technology, **123**, 253-258.
- 35) Mourad, H.M.and Younan, M.Y.A (2002) : Limit-Load Analysis of Pipe Bends Under Out-of-Plane Moment Loading and Internal Pressure. Transactions of ASME Journal of Pressure Vessel Technology, **124**, 32-37.
- 36) Tan, Y., Matzen, V.C., and Yu, L. (2002) : Correlation of Test and FEA Results for the Nonlinear Behavior of Straight Pipes and Elbows. Transactions of ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 124, 465-475.
- 37) Tan, Y., Wilkins, K., and Matzen, V. (2002) : Correlation of test and FEA results for elbows subjected to out-of-plane loading. Nuclear Engineering and Design, 217, 213-224.
- 38) Shim, D.J., Choi, J.B., and Kim, Y.J. (2004) : Failure Strength Assessment of Pipes With Local Wall Thinning Under Combined Loading Basesd on Finite Element Analyses. Transactions of ASME Journal of Pressure Vessel Technology, **126**, 179-183.
- 39) Fujiwaka, T., Endou, R., Furukawa, S., Ono, S., and Oketani, K. (1999) : Study on Strength of Piping Components Under Elastic-Plastic Behavior Due To Seismic Loading. ASME PVP -387, 19-26.
- 40) 白鳥正樹, 矢倉武蔵, 小笠原永久, 中村いずみ, 大谷 章仁(2001):局所的減肉部を有する配管の耐震裕度 評価に関する解析的研究.日本機械学会論文集(A 編), 67-654, 209-215.
- 41) Suzuki, K., Abe, H., and Suzuki, K. (2004) : Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Design Method Confirmation Test). ASME PVP-486-2, 187-194.
- 42) 佐々木陽一, 丹羽博志 (1984): 配管の弾塑性振動解 析. 日本機械学会論文集 (C編), **50**-453, 765-773.
- 43) 飯島唯司,小野悟 (2002):等価線形化法による配管
 系の簡易的な弾塑性地震応答解析.日本機械学会論文
 集(C編). 68-673, 26-32.
- 44) 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,No.220.

第2章

 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、No.220.

第3章

- 1) 電気技術基準調査委員会(1987):原子力発電所耐震設 計技術指針.JEAG4601-1987,(社)日本電気協会.
- 日本機械学会(2005):発電用原子力設備規格 設計・ 建設規格(2005年版) <第 I 編 軽水炉規格>. JSME S NC1-2005,日本機械学会.
- Shiratori, M., Ochi, Y., Nakamura, I., and Otani, A. (2002) : Failure analysis of thinned wall elbows under excessive seismic loading. ASME PVP- 445-1, 7-16.

第4章

- 中村いずみ、御子柴正(2005):51. 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. 平成15年度国 立機関等原子力試験研究成果報告書(第44集).51-1-51-2.
- 日本機械学会(2005):発電用原子力設備規格 設計・ 建設規格(2005年版) <第 I 編 軽水炉規格>. JSME S NC1-2005,日本機械学会.
- 3) 電気技術基準調查委員会(1987):原子力発電所耐震設 計技術指針.JEAG4601-1987,(社)日本電気協会.
- 第5章
- (財)原子力発電技術機構(2000):平成11年度 原子 力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その3 配管系終局強度耐震実証試験.
- 2) 日本機械学会(1983):金属材料疲労強度の設計資料Ⅳ 低サイクル疲労強度.
- 3) Namaizawa, J., Ueno, K, Ishikawa, A., and Asada, Y. (1993)
 : Life Prediction Technique for Ratcheting Fatigue. ASME PVP- 266, 3-11.
- Asada, Y. (1985) : Fatigue Criterion on Low-Cycle Fatigue with Excessive Progressive Deformation, Proceeding of 3rd German-Japanese Joint Seminar, II 2.2, 3-11.

<関連発表論文>

(2001年~2006年発表)

- 1. 査読付論文集(国際学会で論文査読があるものを含む)
- Nakamura, I., Otani, A. and Shiratori, M. (2002): Failure Behavior of Piping Systems with Wall Thinning Under Seismic Loading. ASME PVP-445-1, 1-6.
- Shiratori, M., Ochi, Y., Nakamura, I. and Otani, A. (2002): Failure Analysis of Thinned Wall Elbows Under Excessive Seismic Loading. ASME PVP-445-1, 7-16.
- 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.
- 大谷章仁,中村いずみ,高田一(2004):配管系の簡易 弾塑性応答解析手法.日本機械学会論文集(C編),70-694,1622-1628.
- 5) Mikami, A., Udagawa, M. and Takada, H. (2004) : Study On Estimation Method For Seismic Safety Margin Of 3d Piping System With Degradation- Establishing Elasto-Plastic Analysis Model. ASME PVP-473, 125-132.
- Nakamura, I., Otani, A. and Shiratori, M. (2004): Failure Behavior of Elbows with Local Wall Thinning under Cyclic Load. ASME/JSME PVP-486-2, 173-180.
- Otani, A., Nakamura, I. and Takada, H. (2004): Simplified Elasto-plastic Response Analysis Method of Piping. ASME/JSME PVP-472, 93-100.
- Nakamura, I., Otani, A. and Shiratori, M. (2005) Effect of Local Wall Thinning on the Dynamic Behavior of Piping Systems. ASME PVP, #PVP2005-71442.
- Hasegawa, K., Miyazaki, K., and Nakamura, I. (2005): Failure Mode and Falure Strengths for Wall Thinning Straight Pipes and Elbows Subjected to Cyclic Loading. ASME PVP, # PVP2005-71358.
- 三上晃,大谷章仁,高田一 (2006):経年劣化を有する三次元配管系の疲労寿命予測に関する研究.日本機械学会論文集(C編),72-714,347-354.
- 2. 国際研究集会(アブストラクトのみ査読があるもの)
- Shiratori, M., Ochi, Y., Karasawa, T., Nakamura, I. and Otani, A. (2001): Low Cycle Crack Growth Analysis for the Piping with a Surface Crack. Proc. of APCFS and ATEM '01 2, 1005-1012.
- Shiratori, M., Udagawa, M. Aoshima, M., Nakamura, I., and Otani, A. (2003): Failure Analysis of Thinned Wall Elbows Under Excessive Seismic Loading (Comparison with Experiment). Proc. of ATEM2003, #OS12W0087.
- Shibata, H., Nakamura, I. and Ogawa, N. (2005): An Approach to Seismic PSA; Evaluation of a Nuclear Power Plant with Aged Pipings, 9th International Conference on Structural Safety and Reliability, 3797-3804.
- 4) Nakamura, I., Shibata, H., Ogawa, N., Otani, A., and Shiratori, M. (2005): A Research Program on Thinned Wall

Piping Systems under Seismic Events. SMiRT18, 2952-2963.

- 3. 学会発表・ワークショップ等での発表
- 白鳥正樹,越智洋次,唐澤巧,大谷章仁,中村いずみ (2001):表面き裂を有する配管の低サイクル疲労き裂 進展解析,日本機械学会材料力学部門講演会講演論文 集,297-298.
- 中村いずみ,大谷章仁,白鳥正樹 (2002):構造的劣化 部を有する配管系の耐震安全裕度に関する研究(その 1 実験的研究),材料力学部門2002年春のシンポジウム第2部 - 21世紀の研究戦略- 講演論文集,66-71.
- 3) 白鳥正樹,中村いずみ,越智洋次,青島誠,大谷章仁 (2002):構造的劣化部を有する配管系の耐震安全裕度 に関する研究(その2 解析的研究),材料力学部門2002 年春のシンポジウム 第2部 - 21世紀の研究戦略-講演論文集,72-77.
- 4) 青島誠,白鳥正樹,中村いずみ,大谷章仁(2002):構造的劣化部を有する配管系の耐震安全裕度に関する解析的研究(第2報:エルボ要素試験).第15回計算力学講演会 講演論文集,651-652.
- 5) 大谷章仁, 中村いずみ, 高田一 (2003): 配管系の簡易 弾塑性応答解析手法. 関東支部第9期講演会 講演論 文集, 273-274.
- 6) 中村いずみ,大谷章仁,宇田川誠,白鳥正樹(2003):
 繰り返し荷重を受ける減肉配管の破損挙動, M&M2003材料力学部門講演会講演論文集,949-950.
- 7) 三上晃, 宇田川誠, 中村いずみ, 大谷章仁, 高田一, 白 鳥正樹(2003): 立体配管系の耐震安全裕度評価手法 に関する研究. 第16回計算力学講演会 講演論文集, 737-738.
- Nakamura, I., Otani, A. and Shiratori, M. (2004): Failure behavior of piping system with local degradation under excessive seismic load, Proc. of CSNI Workshop on "Seismic Input Motions. Incorporating Recent Geological Studies".
- 4. その他
- 中村いずみ(2004):経年劣化部を有する配管の地震時 損傷挙動と耐震性評価に関する研究. 横浜国立大学学 位論文.
- 大谷章仁 (2004):配管系の弾塑性応答解析法に関する 研究.横浜国立大学学位論文.
- 3) 大谷章仁,中村いずみ,高田一(2005):配管系の簡易 弾塑性応答解析手法<塑性変形による振動抑制効果の 推定法>.配管技術,47-4,21-26.
- 4) 中村いずみ,大谷章仁,白鳥正樹 (2005):減肉配管の 耐震安全性評価に関する研究<研究概要と今後の課題
 >.配管技術, 47-8, 44-51.
- 5) 三上晃 (2006): 減肉を有する立体配管系の弾塑性応答 評価に関する研究. 横浜国立大学学位論文.

要 旨

長期にわたって使用された配管系には、高経年化に伴いき裂や減肉といった劣化が生じうる.本研究では減 肉を生じた配管系を対象とし、地震時の損傷挙動を把握することを目的として曲管を用いた変位制御の繰り返 し載荷試験と配管系試験体を用いた振動台実験を実施した.これらの実験を通じ、いくつかの減肉条件や荷重 条件における減肉配管の損傷挙動を取得し、過大な繰り返し荷重下での減肉配管の損傷挙動の特徴を把握した. また、実験結果を精度良く再現する解析モデルを作成するとともに、解析に基づき過大な繰り返し荷重を受け る減肉配管の損傷寿命評価法を構築することを目的とし、有限要素法による弾塑性解析を行った.その結果、配 管要素単体に対しては、静的な弾塑性解析により破損箇所の特定と1/2~2倍程度の精度での寿命評価が可能で あった.配管系を対象とした解析では、寿命については誤差の大きい場合があるものの、損傷の生じる位置は ほぼ予測できた.

キーワード:経年劣化,配管,減肉,地震荷重,振動台実験,有限要素法解析,寿命評価

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-中村ほか

<添付資料1> 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 委員会名簿

委員長	白鳥 正樹	横浜国立大学工学部生産工学科 教授
	安藤 柱	横浜国立大学工学部物質工学科教授
	高田 一	横浜国立大学大学院工学研究科機械システム管理工学 教授
	奥田 洋司	横浜国立大学工学部生産工学科 助教授
	于 強	横浜国立大学工学部生産工学科 助教授(平成11年7月まで)
	小笠原 永久	防衛大学校システム工学群機械工学科強度設計講座 助手 (平成10年7月から)
	小川 信行	防災科学技術研究所総合防災研究部門 総括主任研究員
	中村 いずみ	防災科学技術研究所総合防災研究部門 研究員
	柴田 勝之	日本原子力研究所東海研究所地震情報伝達研究
		特別チームリーダー・次長
	鹿島 光一	電力中央研究所金属材料部 部長
	三浦 直樹	電力中央研究所金属材料部 主任研究員 (平成11年10月から)
	高橋 祐治	東京電力(株)原子力技術部 課長 (平成11年1月まで)
	福田 俊彦	東京電力(株)原子力技術部 課長 (平成11年10月から)
	佐藤 隆	東京電力(株)原子力技術部 副長 (平成12年7月から)
	長澤 和幸	東京電力(株)原子力技術部 主任 (平成11年7月から平成11年10月まで)
	白井 英士	関西電力(株)原子力火力本部原子力安全技術課 課長
	石渡 雅幸	(株)日立製作所日立工場原子力プラント建設部 主任技師
	小島 信之	三菱重工(株)原子力事業本部軽水炉プラント技術部
	中島 政隆	(株)東芝原子力機器設計部 主查
	岡本 旦夫	石川島播磨重工(株)原子力総合設計部 部長
	小林 博栄	石川島播磨重工(株)原子力総合設計部 課長
	三枝 努	石川島播磨重工(株)原子力容器設計部 課長
	大谷 章仁	石川島播磨重工(株)原子力第1プラント設計部 (平成11年1月から)

(所属・役職は平成13年3月時点のもの)
防災科学技術研究所研究資料 第306号 2007年3月

<添付資料2> 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 研究会名簿

横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門 システムのデザイン分野 教授 主查 白鳥 正樹 横浜国立大学 工学部物質工学科 教授 安藤 柱 高田 一 横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門 システムのデザイン分野 教授 山田 貴博 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 人工環境と情報部門 助教授 奥田 洋司 東京大学 大学院工学研究系研究科 教授 防衛大学校 システム工学群 機械工学科 助手 小笠原永久 小川 信行 千葉科学技術大学 危機管理学部 教授 中村いずみ 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 研究員 柴田 勝之 日本原子力研究所 東海研究所 原子炉安全工学部 研究主幹 電力中央研究所 金属材料部 主任研究員 三浦 直樹 東京電力(株) 原子力技術部 課長 福田 俊彦 佐藤 隆 東京電力(株) 原子力技術部 副長 関西電力(株) 原子力事業本部 プラント技術グループ マネージャー 白井 英士 堤 喜隆 中部電力(株) 原子力計画部 建設グループ 副長 日高 章隆 (株)日立製作所 原子カプラント部 原プ設 三菱重工業(株) 軽水炉プラント技術部 機器構造技術課 主席技師 小島 信之 平山 浩 (株) 東芝 原子力機器設計部 担当部長 中島 政隆 (株) 東芝 原子力機器設計部 主査 小林 博栄 石川島播磨重工業(株) 原子力プロジェクト部 技術グループ 部長代理 大谷 章仁 石川島播磨重工業(株) 原子カプロジェクト プラントグループ 課長

(所属・役職は平成17年4月時点のもの)

<添付資料3> 曲管試験体における作用応力算出手順(3.1.2.1)

- (1) 各試験体の,第1回目の載荷サイクルの最初にある弾 性域部分のデータから,C4断面の曲げモーメントを 求める.
- (2) (1)で求めた曲げモーメントを載荷点~C4断面計測位置(370mm)の距離で除し、反力の曲げモーメントに寄与する分力(Pm)を求める.
- (3) (2) で求めた P_mに対し、載荷点~エルボ中央断面位置
 (1560.7mm)の距離をかけ、エルボ中央断面位置の曲
 げモーメント(M)を求める.
- (4) 弾性域において、(3)で求めた曲げモーメント(M)と、
 入力変位(δ)の関係を求める(弾性域の剛性)
- (5) (4) で求めた *M*-δ 関係から,目標変位入力時の仮想弾
 性モーメント(*M_r*)を求める.

(6) 目標変位入力時の仮想弾性モーメントより,日本機械 学会の発電用原子力設備設計規格で定められる下記 の式から目標変位入力時の,弾性を仮定した場合の一 次応力を求める.

$$S = B_1 \cdot \frac{PD_0}{200t} + B_2 \cdot \frac{M_i}{Z}$$
(A3.1)

ここで.

 $D_0:$ 配管外径 P:内圧 $B_1, B_2:$ 応力係数 エルボの場合, $B_1 = 0.5$, $B_2 = \frac{1.3}{h^{\frac{3}{3}}}, h = \frac{t \cdot R}{r^2}$

 $M_i: 配管に作用するモーメント (合成モーメント),$ Z: 配管の断面係数, <math>t: 公称肉厚, R: エルボの回転 $半径, <math>r: 配管断面の平均半径 (r = \frac{D_0 - t}{2})$

であり, M,の代わりに(5)で求めたM,を使用する.

C4 断面位置は本文図 3.1.1-8 を,載荷装置の寸法は本文 図 3.1.1-4 および図 3.1.1-5 を参照.

<添付資料4> 配管系振動試験における計測ひずみからのモーメント算出手順(4.3.2.2)

算出にあたっては平面応力状態を仮定した.実験での ひずみ計測断面の模式図と局所座標系を図A4-1に示す.x, y軸は配管断面内の直交二軸, z軸は配管の材軸方向とす る.曲げモーメントは M_x , M_y ,ねじりモーメントは M_z と する.それぞれの計測点では,三軸ひずみゲージを用いて 配管の軸方向,周方向,45°方向の3方向のひずみを計測 している.それぞれのひずみを ε_A , ε_H , ε_R ,計算される軸方 向応力,周方向応力を σ_A , σ_H とする.以下,ひずみおよび 応力の添え字は図A4-1の計測点位置を示す.

- (1) M_x, M_yの算出
- 1) 各計測点について,下記の式から軸方向応力を求める.
- 2) x軸, y軸の対面にある計測点の軸方向応力から,下記 の式で曲げモーメントを求める.

$$\sigma_{A} = \frac{E}{1 - \nu^{2}} (\varepsilon_{A} + \nu \varepsilon_{H})$$
 (A4.1)

ここで、E:ヤング率、v:ポアソン比、Z:断面係数

$$M_x = Z \cdot \left(\frac{\sigma_{A1} - \sigma_{A5}}{2}\right) \tag{A4.2}$$

$$M_{y} = Z \cdot \left(\frac{\sigma_{A7} - \sigma_{A3}}{2}\right) \tag{A4.3}$$

- (2) M_の算出
- 各計測点位置におけるせん断ひずみを以下の手順で求める.材軸方向の座標軸をz,周方向をθとする.表面ひずみで,z-θの座標軸から角度α回転した座標軸をz'-θとする. z'-θ軸のひずみは,

$$\begin{cases} \varepsilon_{zz'} = \varepsilon_{zz} \cos^2 \alpha + \varepsilon_{\theta\theta} \sin^2 \alpha + \gamma_{z\theta} \cos \alpha \sin \alpha \\ \varepsilon_{\theta\theta'} = \varepsilon_{zz} \sin^2 \alpha + \varepsilon_{\theta\theta} \cos^2 \alpha - \gamma_{z\theta} \cos \alpha \sin \alpha \\ \gamma_{z\theta'} = 2(\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz}) \cos \alpha \sin \alpha + \gamma_{z\theta} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \end{cases}$$
(A4.4)

となる. α=45°とすると,

$$\begin{cases} \varepsilon_{zz'} = \frac{1}{2} \varepsilon_{zz} + \frac{1}{2} \varepsilon_{\theta\theta} + \frac{1}{2} \gamma_{z\theta} \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{2} \varepsilon_{zz} + \frac{1}{2} \varepsilon_{\theta\theta} - \frac{1}{2} \gamma_{z\theta} \\ \gamma_{z'\theta'} = \varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz} \end{cases}$$
(A4.5)

になる.

本実験の計測で考えると、 $\varepsilon_x = \varepsilon_A$ 、 $\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_H$ 、 $\varepsilon_{zz'} = \varepsilon_R$ なので、

$$\begin{cases} \varepsilon_{R} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{A} + \varepsilon_{H} + \gamma_{z\theta}) \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{A} + \varepsilon_{H} - \gamma_{z\theta}) \\ \gamma_{z\theta'} = \varepsilon_{H} - \varepsilon_{A} \end{cases}$$
(A4.6)

となる.
$$\varepsilon_{A}$$
, ε_{H} , ε_{R} が既知なので, せん断ひずみは
 $\gamma_{\tau \theta} = 2\varepsilon_{R} - \varepsilon_{A} - \varepsilon_{H}$ (A4.7)

により求められる. せん断力が作用していなければ ねじりによるせん断ひずみは周方向で一定となるた め,45°方向ひずみを計測している1,3,5,7の4点 の計測点で求めたせん断ひずみの平均を取ってねじ りによるせん断ひずみとする.

3D_A11について,狭帯域ランダム波20Galの加振時のS030計測断面における,計測点1,3,5,7のせん断ひずみとそれらの平均を比較すると図A4-2のようになる.図A4-2から,若干のばらつきはあるがせん断ひずみが周方向にほぼ一律という仮定は成立していると考えて良い.

 上記の計算で求められたせん断ひずみγ₂₀を使用すると、 z軸周りのねじりモーメント M₂は、

$$M_{z} = Z_{p}G\gamma_{z\theta} = \frac{E}{2(1+\nu)}Z_{p}\gamma_{z\theta}$$
(A4.8)

で与えられる. ただし, Z_a: 配管の極断面係数.

なお、本研究では上記の手順でモーメントを算出したが、 計測ひずみから曲げひずみを求めて算出した曲げモーメン ト、計測点1、3、5、7の4点で計測した45°方向ひずみの 平均値から求めたせん断ひずみを用いて算出したねじり モーメントは上記の手順で求めたものとほとんど違いがな く、簡易的には計測ひずみから直接算出しても問題ないと 考えられる.



図A4-1 ひずみ計測断面と局所座標系

Fig.A4-1 Strain measurement section and local coordinate system.



図A4-2 各計測点のせん断ひずみと平均

Fig.A4-2 Shearing strain at each measurement points and average of them.

<添付資料5> 実験結果等カラー図版

<配管要素試験> (本文 P18~P38)



図 A5-1 曲管脇部軸方向疲労き裂(ELB01,浸透探傷試験結果) Fig.A5-1 Fatigue failure at a flank of the elbow (ELB01, the penetration test result).



(a) ELB02

(b) ELBO_02

(c) ELBM_01

図 A5-2 ラチェット変形を伴う局所座屈の発生およびき裂貫通 Fig.A5-2 Fatigue and buckling failure accompanied with ratchet deformation.



- 図 A5-3 ラチェット変形部分の周方向き裂 (ELB04, 浸透探傷試験結果)
- **Fig.A5-3** Fatigue cracks in circumferential direction at ratchet deformation (ELB04, the penetration test result).



- 図A5-4 入手した実在減肉配管
- Fig.A5-4 Obtained pipes with wall thinning produced by the actual corrosive environment.



(a) Outer surface

(b) Inner surface





図A5-6 配管 E (200A)の外観および内面状態 Fig.A5-6 Outer and inner surface of Pipe E (200A).



(b) Inner surface



図A5-7 配管 B の超音波板厚計測結果 Fig.A5-7 Wall thickness of Pipe B measured by ultrasonic meter.



図 A5-8 配管 E の超音波板厚計測結果 Fig.A5-8 Wall thickness of Pipe E measured by ultrasonic meter.



(a) AEC_01
 (b) MEC_01
 図 A5-9 実在減肉配管および模擬減肉配管の破損状況
 Fig.A5-9 Failure modes of the actual and modified wall thinning specimens.

<配管系振動試驗> (本文P39~P48)



図 A5-10 3D_A11 エルボ2 浸透探傷試験結果 Fig.A5-10 Penetration test result of Elbow2, 3D_A11.



図 A5-11 3D_C12 エルボ1溶接部近傍に生じた未貫通き裂(1850Gal 1回目加振後) Fig.A5-11 Surface crack beside the weld line of Elbow1, 3D_C12 (after 1850Gal_#01).



図 A5-12 3D_C12 の損傷状況 Fig.A5-12 Failure mode of 3D_C12.



図 A5-13 3D_C22 エルボ1溶接部近傍に生じた未貫通き裂(1400Gal 2回目加振後) Fig.A5-13 Surface crack beside the weld line of Elbow1, 3D_C22 (after 1400Gal_#02).



図 A5-14 3D_C22 の損傷状況 Fig.A5-14 Failure mode of 3D_C22.