

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

2004年3月

横浜国立大学附属図書館



11472741

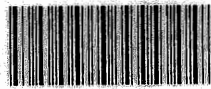
宇村いずみ

377.51
NA

横浜国立大学 博士学位論文

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

横浜国立大学附属図書館



11472741

2004年3月

中村 いずみ

ABSTRACT

Pressurized piping systems used in nuclear power plants are degraded by the effects of aging, and defects such as stress corrosion cracking (SCC) or wall thinning may occur in such piping systems. In order to maintain a plant in safe condition even in the event of a destructive earthquake, it is important to clarify the effects of degradation on the dynamic behavior and failure modes of piping systems and to estimate the allowable degradation conditions under seismic loads. However, there are very few studies on the failure behavior of degraded piping systems under seismic events, though a lot of experimental or analytical studies have been done for piping systems without degradation.

In this study, a series of experiments and finite element analysis was conducted on pipes and piping systems with degradation under seismic loads in order to clarify the dynamic behavior and the failure modes of degraded pipes. The applicability of an analytical method to predict the failure behavior of degraded pipes under seismic loads was also investigated. Pipe element tests, piping system tests, and finite element method (FEM) analysis were conducted. Pipe element tests consisted of displacement-controlled cyclic bending tests on pipe elements with degradation. The degradation conditions considered in the tests were SCC, electric discharge machining (EDM) notches, or wall thinning. Piping system tests consisted of shake table tests using simplified piping system models with degradation. The degradation conditions considered in the tests were wall thinning or EDM notches. FEM analysis was carried out to reproduce the experimental results. The summary of the results obtained through the study is as follows;

- (1) The pipe element tests elucidated the failure mode features which depended on the degradation conditions or loading conditions. The stiffness of the pipe was affected by wall thinning, but not by the existence of cracks. The failure modes for thinned wall pipes were affected by the occurrence of the ratchet phenomena. The configuration of wall thinning and the type of applied bending load affects the degree of occurrence of the ratchet phenomena.
- (2) The piping system tests clarified the effects of degradation on the vibration characteristics and the deformation of the piping system which depended on the degradation conditions and the input excitation levels. The failure mode of the degraded piping system was mainly due to fatigue failure at the weakest elbow. Plastic collapse did not occur except for the model with a full-circumferential deep crack.
- (3) Experimental results showed that the piping systems with cracks can be treated as piping systems without degradation to estimate the response during seismic events, and the integrity of the degraded part can be evaluated from the piping response. On the other hand, the effect of degradation should be considered to estimate the response of the piping systems with wall thinning, because

the existence of wall thinning may affect the stiffness, vibration characteristics, and the failure modes of the piping systems.

- (4) The applicability and the limits of the analytical method to predict the failure behavior of degraded pipes under high-level cyclic loads were clarified through the FEM analysis. Even if some thinned wall parts exist on the piping systems, the elastic-plastic dynamic behavior and failure behavior of piping systems under seismic load can be estimated based on the analytical method. This can be achieved by putting together the elastic-plastic dynamic analyses on the piping system using a simplified analytical model and the static analysis on the degraded part using a more detailed analytical model.

概要

日本では2003年4月現在で52基の商業用原子力発電所が運転されているが、そのうち運転開始から20年以上経過しているものは23基あり、全体の4割以上を占めている。近年はエネルギー需要が高まる一方、エネルギー安全保障や地球環境問題への対応の必要性から原子力発電の重要性が増しているが、様々な社会情勢により原子力発電施設の新規建設は厳しい状況であり、既存の施設を維持保全しつつ継続して使用する必要がある。しかし、長期にわたって使用された施設には高経年化に伴う劣化の発生が想定されるため、長寿命化を実現するためには劣化部分の適切な評価と管理が必要になる。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腐食・壊食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いため、その健全性を維持することは重要であり、き裂や減肉といった劣化のある配管系について、実験や解析に基づく合理的な検証データを蓄積し、許容劣化条件を検討する必要がある。特に日本は地震国であるため、劣化部分が配管系の耐震性能に与える影響を評価する必要があるが、そのためには弾塑性レベルの繰り返し荷重を受ける劣化配管の損傷挙動や劣化のある配管系の弾塑性振動応答挙動を十分に把握しなければならない。しかし、これまでに劣化を想定しない配管の振動損傷や弾塑性振動応答挙動に関わる研究、あるいは劣化のある配管に対する地震を想定しない荷重条件による試験研究は数多くなされているが、き裂や減肉といった構造劣化のある配管系について、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、劣化のある配管系の地震時損傷挙動には不明な点が多い。

そこで、本研究では地震を想定した荷重を受ける経年劣化配管の損傷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合理的に評価する手法を検討することを目的とした。そのような目的に従い実験と解析を実施し、以下に示す事項が明らかになった。

- (1) き裂または減肉といった構造劣化部分のある配管単体に対する繰り返し荷重試験を行い、劣化形状や負荷荷重条件による破損形態の特徴を取得した。その結果、き裂付き配管においては劣化の存在が配管の剛性や反力にほとんど影響しないが、減肉配管の場合には減肉の程度に応じて剛性や反力が低下することがわかった。また、減肉配管ではラチェット現象の発生が配管の最終破損形態に影響すること、および減肉配管におけるラチェット現象の発生は減肉量、減肉形状、作用荷重に

依存することがわかった。

- (2) 劣化部分を有する基本的な形状の配管系に対し振動台を使用した加振試験を行い、弾性域から弾塑性域までの振動応答挙動および最終破損形態を取得した。その結果、減肉が存在する場合は減肉の程度に応じて配管系の固有振動数や弾塑性域の加速度応答値の低下といった影響が表れるが、き裂の存在は配管系の振動応答特性にほとんど影響しないことがわかった。また、弾塑性応答時には配管系の変形が減肉部分のような系の最も弱い部分に集中する傾向のあることが示された。破損まで加振を繰り返した結果、全周にわたる大きなき裂が存在する場合を除き配管の全周破断や損傷の進展に伴い変形が一方向に大きく進展するような不安定な破損は確認されず、配管系の最終的な破損形態は主に負荷荷重の大きい曲管部分における疲労損傷であることがわかった。
- (3) 一連の試験結果から、経年化に伴う構造劣化が検出された配管系の健全性評価に際し、検出された劣化がき裂である場合は、健全を仮定した配管系において地震による振動応答を評価し、当該部位の健全性評価を行えばよいと考えられる。一方減肉に関しては、減肉の程度、部位、作用外力の種類や大きさなどにより配管系の振動応答特性や最終破損形態が変化することから、減肉の存在が配管系の振動応答特性に与える影響を検討した上で健全性評価を行う必要があると考えられる。
- (4) 汎用的な有限要素法解析コードを使用して減肉またはき裂を有する配管要素の詳細解析を実施した。その結果、き裂付き配管についてはラインスプリング要素を使用することで弾塑性域における表面き裂の貫通寿命を実用上問題のない精度で評価できることが示された。減肉配管については定性的なラチェット現象を再現し、最終破損形態を予測することのできる解析モデルを作成した。また、配管系の非線形時刻歴応答解析の結果を配管要素に対する詳細解析の入力条件とすることで配管系試験体の破損評価を行い、劣化のある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。

以上のように、本研究を通じて高経年化に伴い構造劣化の生じた配管系について、劣化の種類や程度による振動応答への影響や高レベルの繰り返し荷重を受ける際の最終的な損傷形態が実験的に把握され、構造劣化のある配管系に対する健全性評価にあたって考慮の必要な事項が明らかになった。また、劣化配管の弾塑性振動応答による損傷予測を解析により評価する手法を検討し、実験結果と比較してその有用性と現時点における解析モデルの問題点を明らかにした。

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

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 これまでに行われた研究	1
1.2.1 健全配管の振動損傷および弾塑性応答に関する試験研究	1
1.2.2 き裂付き配管に対する試験研究	2
1.2.3 減肉配管に対する試験研究	3
1.3 本研究の目的と本論文の構成	3
第2章 配管要素試験	8
2.1 概要	8
2.2 直管要素試験	8
2.2.1 試験方法	8
2.2.1.1 試験体の概要	8
2.2.1.2 試験条件	9
2.2.1.3 計測	10
2.2.2 き裂付き配管の試験結果	20
2.2.2.1 破損状況	20
2.2.2.2 荷重変形特性	21
2.2.2.3 SCC き裂とEDM き裂の破損寿命比較	21
2.2.2.4 破面解析	22
2.2.3 減肉配管および健全配管の試験結果	28
2.2.3.1 破損状況	28
2.2.3.2 健全試験体の荷重変形特性	29
2.2.3.3 減肉試験体の荷重変形特性	29
2.2.3.4 減肉量と試験体反力の関係	30
2.2.3.5 減肉量とラチェット変形量の関係	30
2.3 曲管要素試験	40
2.3.1 試験方法	40
2.3.1.1 試験体の概要	40
2.3.1.2 試験条件	40

2.3.1.3	計測.....	41
2.3.2	曲管試験体の試験結果	52
2.3.2.1	破損状況	52
2.3.2.2	外径変化	53
2.3.2.3	荷重変形特性	54
2.3.2.4	曲管部分のひずみ挙動	55
2.4	考察	74
2.5	結論	75
第3章	配管系振動試験	76
3.1	概要	76
3.2	平面配管系試験	76
3.2.1	試験方法	76
3.2.1.1	試験体の概要	76
3.2.1.2	加振条件	77
3.2.1.3	計測.....	77
3.2.2	試験結果	83
3.2.2.1	破損状況	83
3.2.2.2	劣化条件と応答値の関係	84
3.2.2.3	外径変化	85
3.3	立体配管系試験	97
3.3.1	試験方法	97
3.3.1.1	試験体の概要	97
3.3.1.2	加振条件	98
3.3.1.3	計測.....	99
3.3.2	試験結果	104
3.3.2.1	破損状況	104
3.3.2.2	劣化条件と応答値の関係	106
3.3.2.3	曲管の開閉変形挙動	108
3.3.2.4	試験体の外径変化.....	109
3.4	考察	124
3.5	結論	125

第4章 配管要素に対する詳細解析	126
4.1 概要	126
4.2 き裂つき配管に対する詳細解析	126
4.2.1 ラインスプリング要素を用いたき裂進展解析	126
4.2.1.1 ラインスプリング要素	126
4.2.1.2 繰り返し J 積分範囲 ΔJ の評価	126
4.2.1.3 き裂進展則	127
4.2.1.4 き裂進展の評価手順	127
4.2.2 解析モデルと条件	130
4.2.3 実験結果と解析結果の比較	132
4.3 減肉部分を有する直管に対する詳細解析	137
4.3.1 解析モデルと条件	137
4.3.2 実験結果と解析結果の比較	139
4.3.3 減肉のある直管のき裂発生メカニズムと破損挙動	146
4.3.4 Shellモデルによる簡易解析	152
4.3.5 ランダム振幅波の荷重履歴に対するラチェット挙動比較	157
4.4 減肉部分を有する曲管に対する詳細解析	161
4.4.1 解析モデルと条件	161
4.4.2 実験結果と解析結果の比較	163
4.5 減肉配管に対する累積疲労損傷則を用いた疲労寿命評価	171
4.5.1 累積疲労損傷則の考え方	171
4.5.2 解析結果による疲労寿命評価結果	173
4.6 考察	179
4.7 結論	180
第5章 配管系の振動応答に対する評価	181
5.1 概要	181
5.2 配管系の弾塑性振動応答評価と破損寿命評価	181
5.3 結論	183
第6章 結論	185
6.1 本研究のまとめ	185
6.2 今後の課題	186

<謝辞>	189
<参考文献>	191
<公表論文>	196
<添付資料> AP 委員会、NAP 研究会委員名簿	197

第1章 序論

1.1 背景

我が国では1963年に日本原子力研究所において初の原子力発電が始まった。その後、1966年に商業用原子炉が、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が運転を開始した。今日では、2003年4月現在で52基の商業用原子力発電所が稼働しており、原子力による発電量は総発電量の3割以上を占めている。一方、商業用原子炉の運転開始年ごとの基数は図1-1のようになっているとされており、稼働している発電施設の4割強にあたる23基が運用開始から20年以上経過しているが、現在原子力発電施設の新規建設は厳しい情勢であり、既存の施設を維持保全しつつ継続して使用する必要がある。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を提出した。しかし、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、応力腐食割れや腐食・壊食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岐であることから、その健全性を維持することは重要であるが、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ない。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。

1.2 これまでに行われた研究

1.2.1 健全配管の振動損傷および弾塑性応答に関する試験研究

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²⁾がある。この中では、直管、曲管、分岐管について静的载荷試験と振動台を用いた加振試験が行われ、米国機械学会（The American Society of Mechanical Engineers, 以下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载荷の繰り返し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^{3)、4)、5)}。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负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载荷試験を実施し、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⁶⁾。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⁷⁾、原子力発電技術機構（以下NUPEC）により実施されている配管終局強度耐震実証試験⁸⁾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（the 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）⁹⁾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^{10)、11)、12)}。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¹³⁾。

（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载荷の重畳により配管外径が増加する現象を指す。

1.2.2 き裂付き配管に対する試験研究

経年変化による劣化部を有する配管の健全性評価や耐震安全裕度に関する研究としては、これまでにき裂付き配管を対象としたものが多く行われてきた。日本原子力研究所では、一次冷却系配管について構造強度上の信頼性を実験的に検証することを目的として、1975年～1992年にかけて配管信頼性実証試験を実施し、き裂付き配管の不安定破壊評価、低サイクル疲労破壊評価等を行った^{14)、15)}。また、国外で実施されたものとして、米国原子力規制委員会（Nuclear Regulatory Commission, 以下NRC）が主催した国際共同研究であるき裂付き配管の健全性評価手法を確立するための研究

(International Piping Integrity Research Groups, 以下 IPIRG)¹⁶⁾があり、日本からは電力中央研究所がこの研究プログラムに参加し、関連して日本国内の炭素鋼配管に対する実断面応力基準 (Net-Section Criterion, 以下 NSC) の適用性の検討、動的繰り返し荷重下におけるき裂進展評価などの研究が行われた^{17), 18)}。IPIRG に関しては1998年より継続研究 Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) Program が行われ、き裂付き配管の破損に対する地震荷重履歴や塑性変形の影響などについての追加実験と評価検討が実施されている¹⁹⁾。また、D.A.Hale らはき裂付き配管の動的繰り返し破損実験を行い、弾塑性応答解析コードの開発や NSC を使用した配管の漏洩荷重評価を行った²⁰⁾。き裂付き配管については、上述のように多くの試験研究が実施されているが、これらのほとんどは配管要素単体にき裂を付与して強制載荷試験または振動試験を実施したものである。複数の配管要素で構成される配管系内にき裂を導入し、配管系の振動応答特性や終局強度を調査した試験研究としては小川らによるき裂付き配管の振動台加振試験²¹⁾以外には見受けられない。この試験研究は防災科学技術研究所で実施されたものであり、本研究の先行研究にあたる。この中ではき裂を付与した炭素鋼配管に対して振動台を使用した加振実験を行い、き裂貫通前後の振動特性の変化等について論じている。

1.2.3 減肉配管に対する試験研究

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、NUPEC 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信頼性を評価した^{22), 23)}。その他には、1986年に米国 Surry 原子力発電所で減肉エルボの破断事故²⁴⁾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¹⁴⁾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^{25)~31)}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安全性評価に関する研究は数少なく、繰り返し荷重を受ける際の減肉配管の損傷挙動には不明な点が多い。

1.3 本研究の目的と本論文の構成

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、き裂や減肉といった構造劣化がある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て本研究を実施した。

上記の目的に従い、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载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を検証した。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を検討した。

本研究では実験を通じた劣化配管の破損挙動の把握が重要な点となるが、これらの実験は防災科学技術研究所において実施している原子力安全研究の一環として行ったものである。防災科学技術研究所では、昭和57年度より原子力安全委員会の策定した原子力安全研究年次計画に基づき配管系の耐震実験を行っており、昭和57年度～昭和61年度に実施した「機器配管系の耐震安全裕度の評価確認に関する研究」において、初めてき裂付き配管の振動実験を行い、NSCを使用した漏洩評価や振動応答評価を行った²¹⁾。その後本格的に劣化配管の地震時損傷挙動を明らかにすることを目的として、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」を実施した²²⁾。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、減肉を対象とした载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」を実施している。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ている。

平成8年度以降は、上記の試験研究の実施に際し、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ている。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～、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。添付資料にAP委員会およびNAP研究会の名簿を示す。

筆者は平成10年度より、防災科学技術研究所において上記の原子力安全研究に携わり、研究計画全体の策定や実験の実施、結果に対する考察などを行ってきた。また、平成13年度以降は横浜国立大学の社会人博士課程の学生として研究を継続し、白鳥研究室において詳細解析に対する検討を行った。本論文ではこれらの試験研究で実施した実験および解析に基づき考察を加え、地震時における劣化配管の損傷挙動の特徴と解析に基づく振動損傷評価の流れをとりまとめた。

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章ではき裂や減肉といった劣化部分を有する配管要素単体に対し、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。載荷試験の結果に基づき、き裂や減肉といった構造劣化部分が配管の強度に及ぼす影響や劣化形状ごとの破損の特徴について述べる。また、内圧の負荷されている減肉配管の最終破損形態にはラチェット現象が大きく影響していることを示し、ラチェット現象の発生に影響を与える要因について考察する。

第3章では劣化部分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4章では、第2章で述べた配管要素試験を対象として実施した、有限要素法を用いた詳細解析について述べる。実験で得られた破損寿命や配管の変形挙動と解析結果との比較を行い、本解析手法の有用性と実験結果の再現精度について検討を行う。

第5章では、第3章で述べた配管系試験を対象として別途実施されている配管系の非線形時刻歴振動応答解析と、応答解析結果を受けて実施した劣化部分の強度評価について述べる。その結果から、配管系全体の振動応答挙動を求める非線形時刻歴解析と、より詳細な解析モデルを使用して劣化のある配管要素の局所的な変形やひずみ挙動を求める静的な弾塑性解析という二種類の解析手法を併用することで、劣化のある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いて評価できることを示す。

第6章では本研究の結論と、今後の課題について述べる。

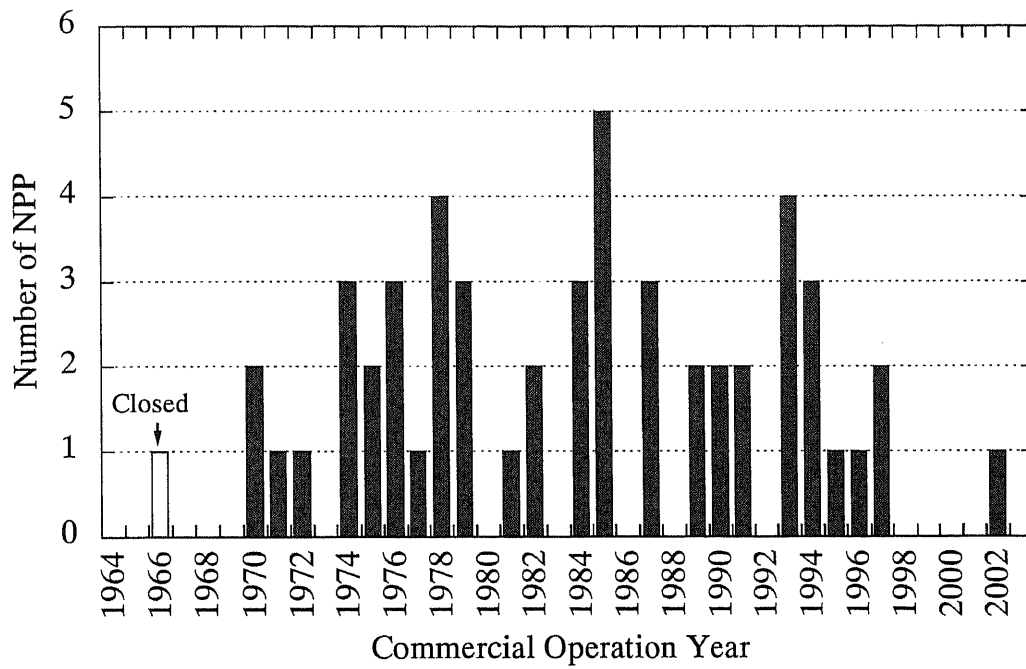


図1-1 日本における商業用原子炉の運用開始年ごとの基数

Fig. 1-1 Numbers of Nuclear Power Plants(NPP) in commercial operation in Japan

第2章 配管要素試験

2.1 概要

本研究ではき裂や減肉といった構造劣化部分を有する配管系の地震時損傷挙動の把握を目的としているが、第1章で述べたとおり、構造劣化部分、特に減肉部分を有する配管の繰り返し荷重による破損実験の例は少ない。従って、配管系全体の振動実験を実施するのに先立ち、そのような劣化部のある配管要素単体について、高レベルの繰り返し荷重下における破損挙動を把握するための配管要素試験を実施した。配管要素試験では、劣化形状や荷重条件による破損形態の違いを把握することを目的として、劣化部分を有する直管または曲管を使用した変位制御の繰り返し荷重試験を実施した。劣化条件は高経年化により配管に発生すると考えられるき裂または減肉とした。

2.2 直管要素試験

2.2.1 試験方法

2.2.1.1 試験体の概要

直管を用いた配管要素試験（以下直管要素試験）では、劣化部を有する直管に対して変位制御の繰り返し4点曲げ試験を行った。直管要素試験で導入した劣化条件は応力腐食割れ（SCC）、放電加工（EDM）き裂、または減肉のいずれかとした。また、減肉試験体と同じ材質で健全肉厚の試験体についても荷重を行い、荷重変形特性の比較を行った。使用した配管の種類は、SCC試験体及びEDMき裂付き試験体（以下EDM試験体）では配管用ステンレス鋼管SUS304を、減肉試験体及び健全試験体では高圧配管用炭素鋼鋼管STS410を使用した。これらはそれぞれき裂及び減肉の発生が想定される材質の配管である。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。なお、経年劣化配管ではき裂や減肉といった構造劣化の他に材質の劣化も想定されるが、本研究では、経年変化に伴う材質変化の影響は考慮していない。

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。試験体部分の配管長さは400mmまたは200mmとし、溶接する補強管の長さを調節して全体の長さを3010mmとした。

試験体は、SCC試験体8体、EDM試験体9体、減肉試験体9体、健全試験体2体の計28体を製作した。各劣化の導入方法と劣化形状は以下の通りである。

(1) SCC

試験配管に溶接を施して引張残留応力を導入し、高温高圧下のオートクレーブ内に200時間～800時間程度格納し、SCCを生成させたり。生成したSCCのき裂位置と深さは実験前に浸透探傷（PT）検査で調査し、最も大きいと思われるき裂位置が最大曲げ方向に一致するよう試験体の設置位置を調整した。SCC試験体は試験終了後、破面検査を行って初期SCC形状を測定した。図2.2.1-1に試験体の形状を、図2.2.1-2にSCC部分でき裂が貫通した試験体の初期SCC形状を示す。

(2) EDM き裂

放電加工（EDM）により配管内面にき裂を導入した。き裂形状は、内角 360° 、き裂深さ4.3mm（肉厚の50%）の全周き裂を持つ試験体を4体、内角 90° 、深さ4.3mmの矩形き裂を施したものを2体、SCCき裂を模擬した半楕円形状のき裂を施したものを3体製作した。ここで、SCCき裂を模擬したEDMき裂付き試験体は、SCCのような自然き裂とEDMき裂のような人工欠陥との破損寿命の違いを確認するために実施した。試験体に導入したき裂はSCC試験体の破断面にある初期SCC形状を、等価な深さと断面積を持つ半楕円形状のEDMき裂で模擬した。図2.2.1-3に試験体の形状を、図2.2.1-4に導入したき裂形状を示す。

(3) 減肉

機械加工により配管内面の肉厚を低減した。減肉は全周減肉とし、減肉量は肉厚の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。図2.2.1-5に試験体の形状を示す。また、この他に健全試験体を2体製作した。健全試験体の形状を図2.2.1-6に示す。

2.2.1.2 試験条件

载荷は防災科学技術研究所所有の一次元大型振動台を使用し、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2.2.1-7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。载荷履歴は定常振幅による载荷とランダム振幅による载荷の破壊に及ぼす影響を把握するために、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2.2.1-8にこれらの载荷波形を示す。正弦波は、定常部分の波数が26波で、試験体に過大な加速度が作用するのを防止するため、前後10秒間に振幅の漸増・漸減部を追加している。ランダ

△振幅波は原子力建屋の床応答を配管系に入力して得られた応答変位波形を卓越振動数が1Hzになるよう時間軸を調整することにより作成した。ランダム振幅波に含まれる波数は46サイクルである。

試験は常温で行い、全ての試験体に対して水圧により内圧を負荷した。内圧は、SCC試験体とEDM試験体で8MPa、減肉試験体と健全試験体では11MPaとした。ただし、減肉試験体のうち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行った。試験ではき裂が貫通し内部水が漏洩するまで図2.2.1-8に示した载荷波形を繰り返し入力した。内部水なしで载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、劣化条件、内圧条件をまとめて表2.2.1-4に示す。なお、SC07、SC08、EM08、EM09、EC08、EC09の6体の試験体についてはき裂貫通に伴う内部水の漏洩を確認した時点で载荷を終了させたが、その他の試験体ではき裂貫通後、図2.2.1-8に示した入力変位波形が終了するまで载荷を継続した。

2.2.1.3 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) 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）
- (6) き裂開口変位（EDM試験体のみ）

図2.2.1-9に各試験体の計測点を示す。これらは全て500Hzのサンプリング周波数で収録した。また、減肉試験体および健全試験体では、この他に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 2.2.1-1 鋼材の化学組成

Table 2.2.1-1 Chemical composition of materials.

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304 (SC01、SC02、EM01～EM04)	0.02	0.49	1.10	0.029	0.006	8.17	18.38
SUS304 (SC03～SC08、EM05～EM09)	0.06	0.51	1.55	0.027	0.003	9.21	18.49
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

Table 2.2.1-2 Mechanical properties.

Material	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	El.[%]
SUS304 (SC01、SC02、EM01～EM04)	325	593	63
SUS304 (SC03～SC08、EM05～EM09)	311	617	64
STS410 (EC01～EC04)	345	509	41
STS410 (EC05～EC09、EA01、EA02)	312	470	38

表 2.2.1-3 振動台諸元

Table 2.2.1-3 Specification of the shaking table.

Table size	14.5m × 15.0m
Driving system	Electro – hydraulic servo control system
Table control method	Displacement control
Shaking direction	Horizontal (one direction)
Excitation force	3,600N (900N × 4)
Max. loading capacity	500ton
Max. displacement	± 220mm
Max. velocity	75 cm/sec
Max. acceleration	0.55G (with 500ton model) / 2.2G(without model)
Frequency range	DC – 50Hz
Input wave type	Sinusoidal wave , Random wave, Earthquake wave

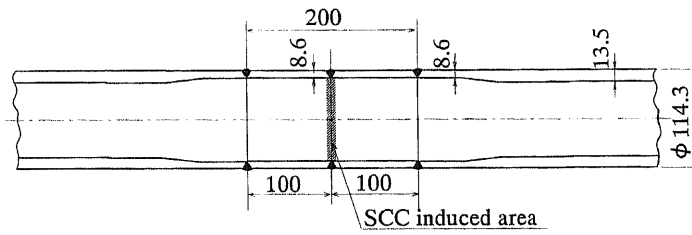
表 2.2.1-4 直管要素試験 試験体一覽

Table 2.2.1-4 Specimens for straight pipe element tests.

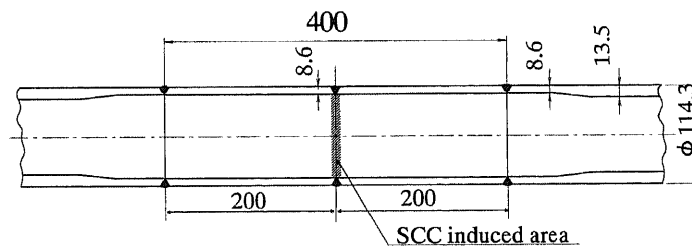
Name	Material	S_y [MPa]	S_u [MPa]	S_m [MPa]	Condition of defect			Internal pressure (P) [MPa]		
					Type of defect	Full angle in circumference [deg.]	Depth of defect*			
SC01	SUS304	325	593	198	SCC	Natural crack	Natural Crack	8		
SC02										
SC03										
SC04										
SC05		311	617	206						
SC06										
SC07										
SC08										
EM01	SUS304	325	593	198	EDM	360	0.5 t	8		
EM02										
EM03										
EM04										
EM05		311	617	206					90	0.5 t
EM06									25.73 ^{*1}	0.49 t ^{*1}
EM07									14.87 ^{*2}	0.49 t ^{*2}
EM08									16.64 ^{*3}	0.34 t ^{*3}
EM09		90	0.5 t							
EC01	STS410	345	509	170	Wall thinning	360	0.5 t	11		
EC02										
EC03										
EC04										
EC05		312	470	157			0			
EC06							0.75 t			
EC07							0.25 t			
EC08							0.6 t			
EC09										
EA01	STS410	312	470	157	No defect	0	0	11		
EA02										

* 't' denotes the normal pipe thickness

*1 Same size as SCC in SC01 *2 Same size as SCC in SC03 *3 Same size as SCC in SC07



(a) SC01 - SC04, SC07, SC08.



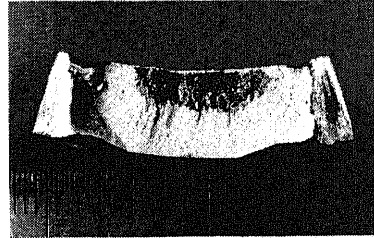
(b) SC05, SC06.

図 2.2.1-1 SCC 試験体の形状

Fig.2.2.1-1 Geometry of the specimens with SCC.



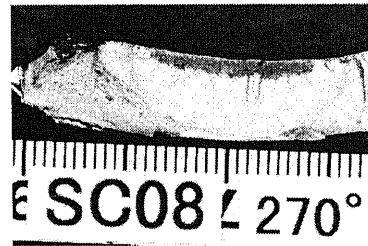
(a) Initial SCC in SC01.



(b) Initial SCC in SC03.



(c) Initial SCC in SC07.



(d) Initial SCC in SC08.

図 2.2.1-2 SCC 試験体の初期 SCC き裂形状
Fig.2.2.1-2 Initial shape of SCC in SCC specimens.

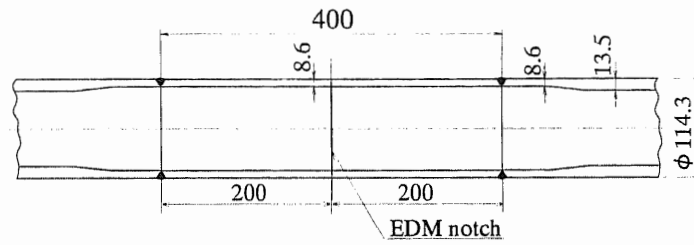


図 2.2.1-3 EDM 試験体の形状

Fig.2.2.1-3 Geometry of the specimens with an EDM notch.

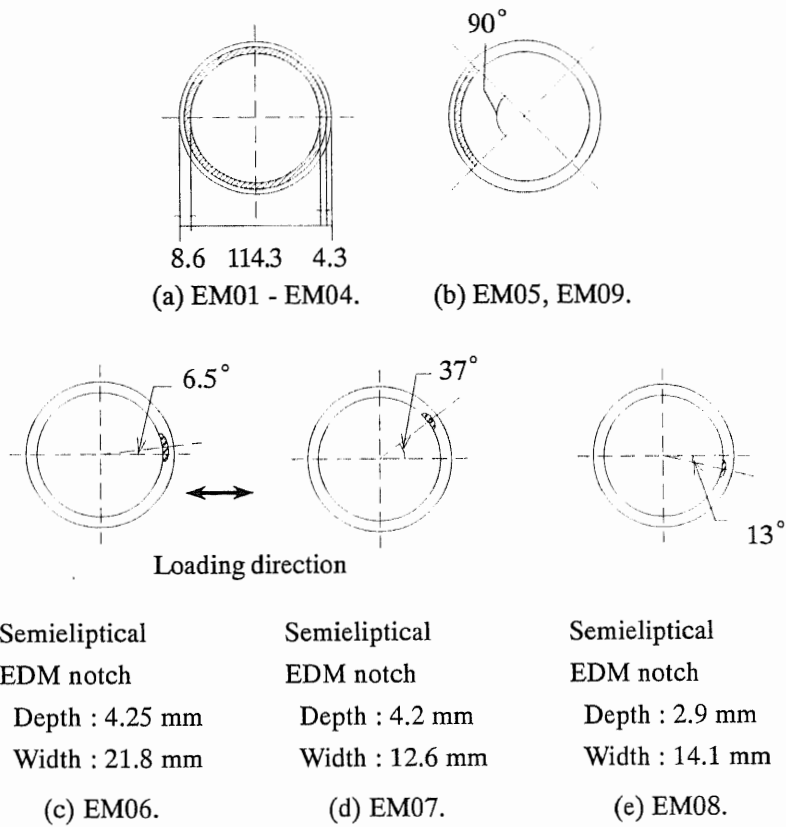
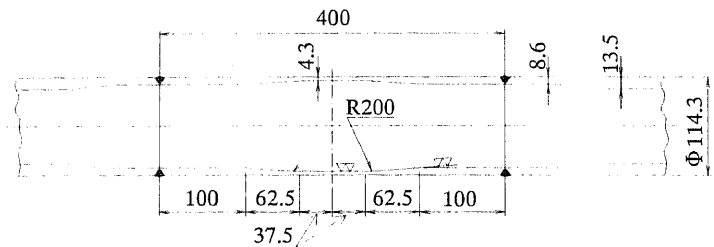
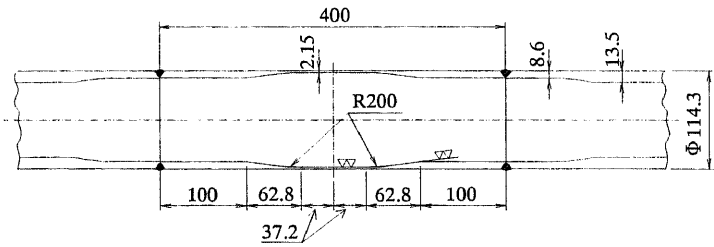


図 2.2.1-4 EDM 試験体の初期き裂形状

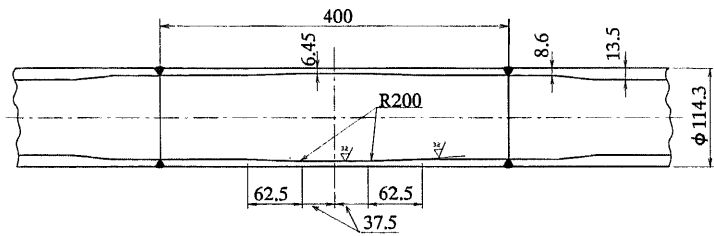
Fig.2.2.1-4 Initial crack shapes of EDM notched pipe specimens.



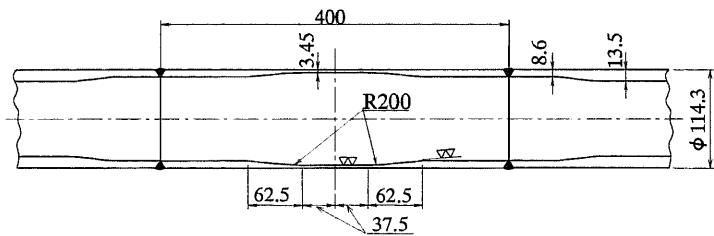
(a) 50% thinned wall specimen (EC01 - EC06).



(b) 75% thinned wall specimen (EC07).



(c) 25% thinned wall specimen (EC08).



(d) 60% thinned wall specimen (EC09).

図 2.2.1-5 減肉試験体の形状

Fig.2.2.1-5 Geometry of the specimens with wall thinning.

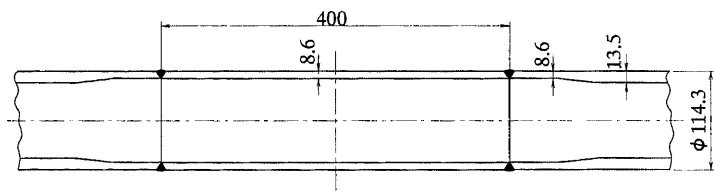


図 2.2.1-6 健全試験体の形状 (EA01 および EA02)

Fig.2.2.1-6 Geometry of the specimens without wall thinning (EA01 & EA02).

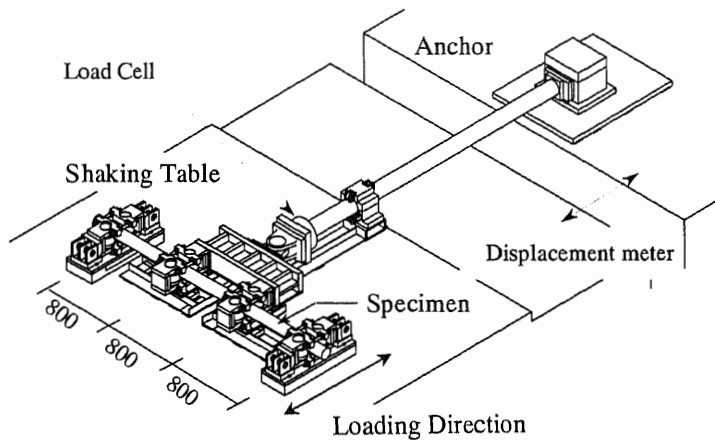
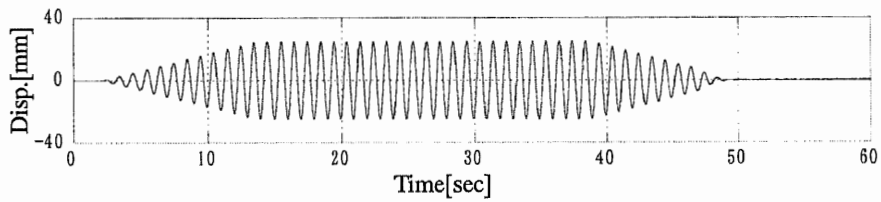
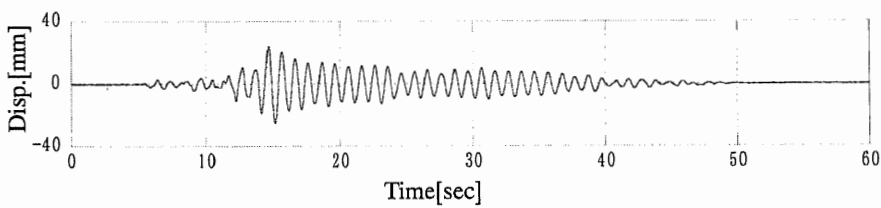


図 2.2.1-7 4点曲げ試験装置

Fig.2.2.1-7 Four-point bending test equipment.



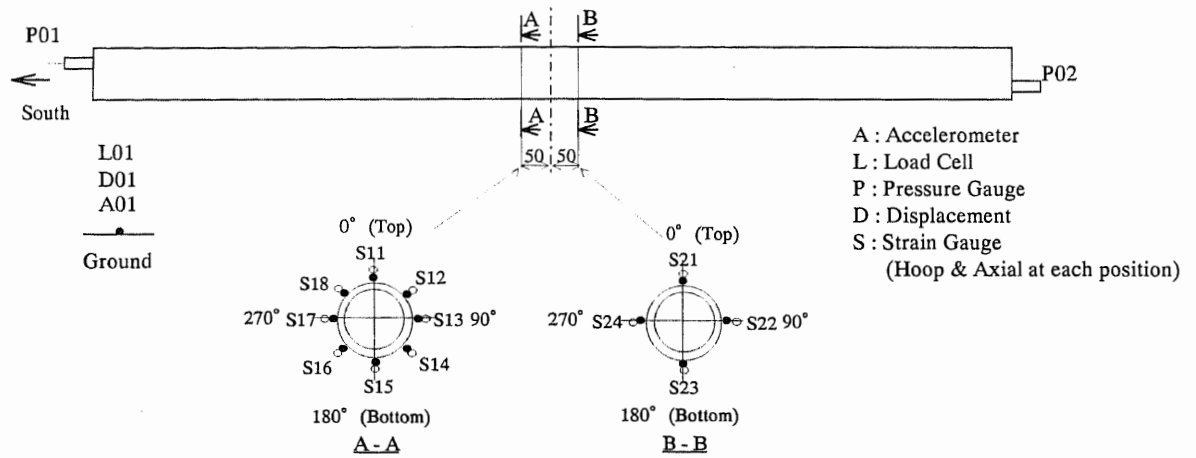
(a) Sinusoidal wave.



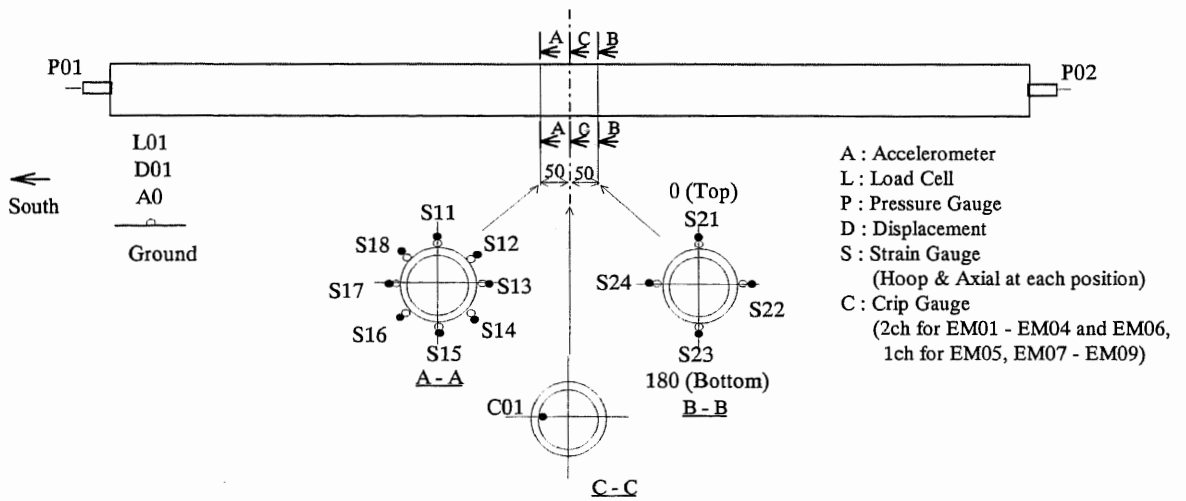
(b) Random amplitude wave.

図 2.2.1-8 入力変位波形

Fig.2.2.1-8 Time histories of input displacement.



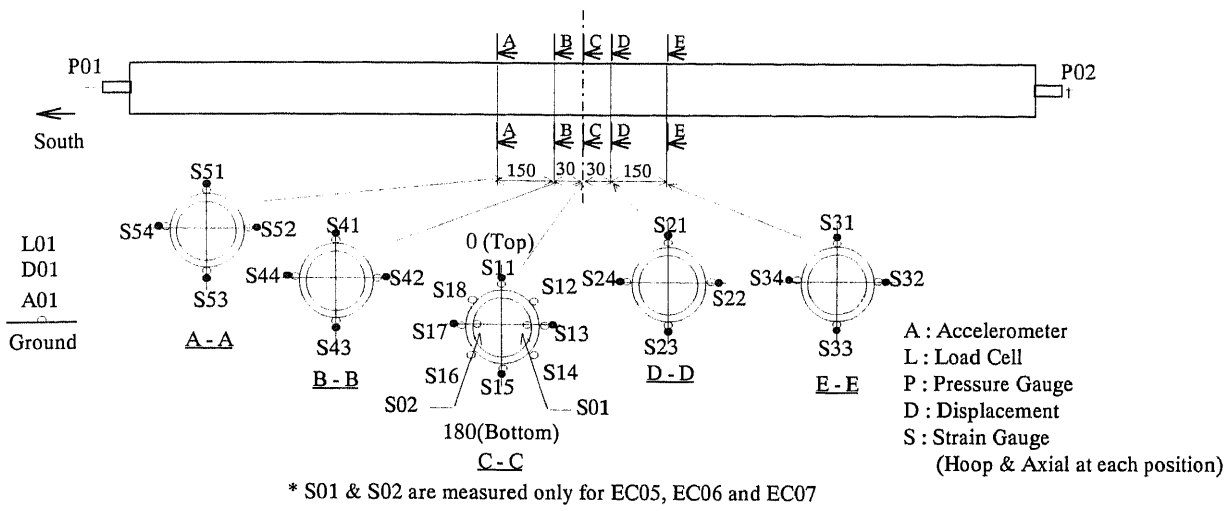
(a) Measurement points of SCC specimens.



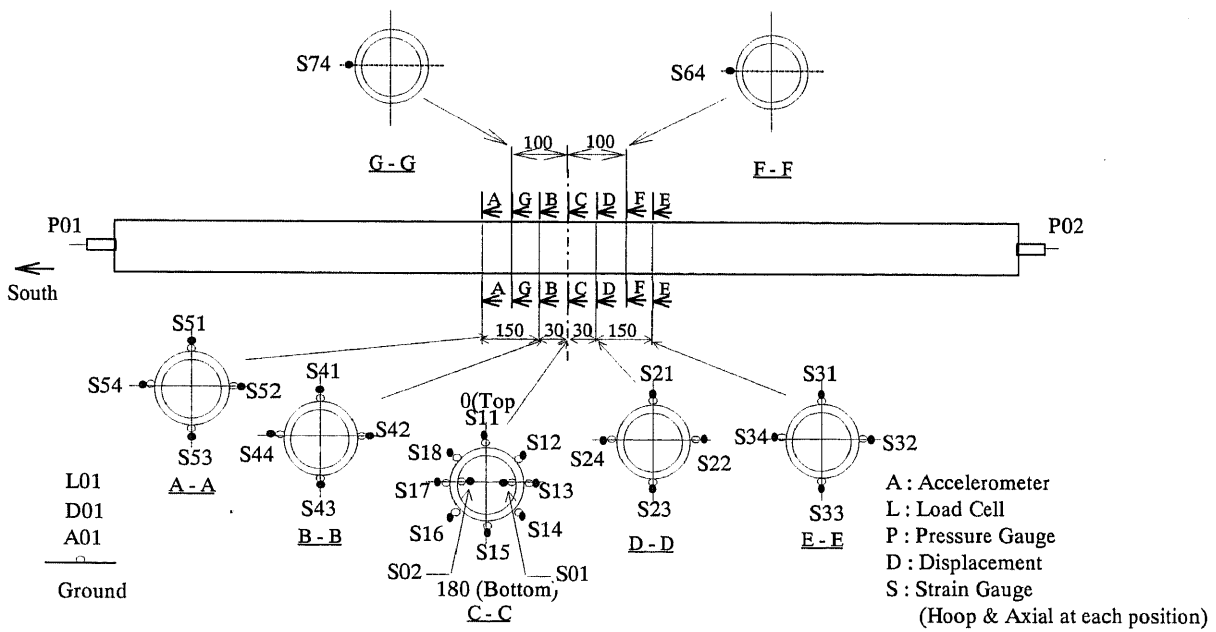
(b) Measurement points of EDM specimens.

図 2.2.1-9 直管要素試験体計測点 (1/2)

Fig.2.2.1-9 Measurement points of specimens for straight pipe element tests (1/2).



(c) Measurement points of EC01 - EC07.



(d) Measurement points of EC08, EC09, EA01 and EA02.

図 2.2.1-9 直管要素試験体計測点 (2/2)

Fig.2.2.1-9 Measurement points of specimens for straight pipe element tests (2/2).

2.2.2 き裂付き配管の試験結果

2.2.2.1 破損状況

直管要素試験のうち、き裂付き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载荷したものについては、き裂貫通までに要した正弦波定常部分の波数を表中に併記した。劣化形状ごとの破損状況は以下ようになった。

(1) SCC 試験体

8 体実施した SCC 試験体のうち、4 体で繰り返し载荷に伴い導入した初期 SCC から疲労き裂が進展し、貫通した。き裂貫通部分に存在した初期 SCC 形状は図 2.2.1-2 に示したとおりである。き裂貫通後の後続サイクルによる周方向への急速伝播は生じなかった。図 2.2.2-1 に試験体 SC01 の破損状況を示す。初期 SCC からき裂が貫通しなかった 4 体は、試験配管を補強管と溶接するために加工した溶接部分やテーパ開始部でき裂が貫通した。図 2.2.2-2 に SCC 試験体の破損位置を示す。

(2) 全周 50% 深さの EDM き裂付き試験体 (EM01 ~ EM04)

全ての試験体において最大曲げモーメントが作用する方向で繰り返し载荷に伴いき裂が肉厚方向に進展し、貫通した。貫通したき裂は後続の数サイクルにより周方向に進展し、全周破断を起こした。図 2.2.2-3 に EM02 の破損状況を示す。実験では正弦波とランダム振幅波の 2 種類の入力変位波形で载荷を行ったが、入力波形による破損形態の違いは見受けられなかった。

(3) 内角 90°、50% 深さの EDM き裂付き試験体 (EM05、EM09)

繰り返し载荷に伴い初期 EDM き裂部分からき裂が進展し、貫通した。き裂は貫通のみで後続サイクルによる周方向への急速伝播は生じなかった。

(4) SCC を模擬した EDM き裂付き試験体 (EM06 ~ EM08)

全ての試験体で導入した EDM き裂部分からき裂が進展し、貫通した。SCC 試験体と同様、破損形態はき裂の貫通および漏洩で、後続サイクルによる周方向へのき裂の急速伝播は生じなかった。

以上から、本実験で確認されたき裂付き配管の破損形態は、部分き裂付き配管ではき裂の貫通、全周き裂付き配管では全周破断となった。

2.2.2.2 荷重変形特性

図 2.2.2-4 に EDM 試験体の最大入力変形角と曲げモーメントとの関係を示す。ただし、EM01 は入力レベルを途中で変更しているため、以下の検討では対象外とした。図では試験体の変形が全てき裂部分で生じているとして入力変位を回転角に、また 4 点曲げの幾何学的形状から反力を試験体中央部の曲げモーメントに換算して示した。ここで、入力変位を δ 、4 点曲げ試験装置の支点間距離を l 、回転角を ϕ 、ロードセル計測値を P 、試験体に作用する曲げモーメントを M とすると、 ϕ 、 M はそれぞれ以下の式で表される。

$$\phi = \frac{2\delta}{l} \quad (2.2.2.1)$$

$$M = \frac{Pl}{2} \quad (2.2.2.2)$$

試験体の反力から計算した曲げモーメントの最大値は入力大きさに応じて約 25kN-m から 40kN-m の範囲に分布している。ランダム振幅波で載荷した EM03 と EM05 は、それぞれ正弦波で載荷した EM02 および EM09 とほぼ同等の反力となっており、入力波形による反力の違いは現れていない。

図 2.2.2-5 に正弦波により載荷を行った EM02、EM08、EM09、および SC07 について、正弦波の漸増部分における回転角と曲げモーメントとの関係を示す。図 2.2.2-5 において、SC07 は SCC 試験体である。また、EM02 は全周き裂を、EM08 は SC07 の初期 SCC き裂形状を模擬した半楕円形状の EDM き裂を、EM09 は内角 90° の矩形き裂を加工した EDM 試験体である。図 2.2.2-5 から、試験体の剛性や反力に対し、き裂の大きさや種類はほとんど影響を与えていないと言える。また、図 2.2.2-6 に、SC07 と EM08 の曲げモーメントの時刻歴を重ねて示す。図 2.2.2-6 から、正弦波の定常部分に至っても両者は良く一致していることがわかる。これらのことから、破損直前まではき裂の有無や存在するき裂の種類は配管の剛性や反力にほとんど影響しないと考えられる。

2.2.2.3 SCC き裂と EDM き裂の破損寿命比較

EDM 試験体 EM06、EM07、EM08 は、それぞれ SCC 試験体 SC01、SC03、SC07 の初期 SCC 形状を等価なき裂深さと面積を持つ半楕円形状で模擬した EDM き裂を付与した試験体である。これらの試験体では、自然き裂と人工欠陥の破損寿命を比較するために、内圧、試験体の材質、入力変位、入力波形の条件を同一にして載荷試験を行った。その結果、き裂貫通に要した正弦波の定常部分のサイクル数は、SC01 で 108 サイクル、SC01 の SCC を模擬した EM06 で 32 サイクルであった。同様に、SC03 で 128 サイクル、

EM07で55サイクル、SC07で117サイクル、EM08で108サイクルとなった。SC01とSC03では対応するEDMき裂を付与した試験体と比較してき裂貫通までに2～3倍の繰り返し数が必要であった。一方SC07ではEDMき裂を付与した試験体よりやや長寿命であるが、ほぼ同程度の寿命となった。本試験で実施した比較载荷は上記の3組のみであり、SCCとEDMき裂の寿命に有意な差があるかどうかは今後さらに検討が必要であるが、試験結果からは概してSCCの方がEDMき裂よりも長寿命となる結果となった。

2.2.2.4 破面解析²⁾

EDM試験体のうち、全周EDMき裂付き配管で正弦波を用いて载荷したEM02、ランダム振幅波で载荷したEM03、内角90°の矩形EDMき裂を持ち、ランダム振幅波で载荷したEM05の3体について、走査型電子顕微鏡(SEM)を使用した破面観察を行った。破面の観察は図2.2.2-7に示した位置で行った。

マクロ的な破面は、図2.2.2-8に示したように、载荷によりき裂が進展した部分(以下部分Aとする)と急速破断部(以下部分Bとする)に分かれている。このうち、ランダム振幅波で载荷した試験体の部分AをSEMで観察すると、図2.2.2-9に示すように縞模様が認められる領域(A-1、ストライエーション領域)と、ほとんど特徴の現れない領域(A-2、ストレッチゾーン領域)の2種類の破面が交互に現れることが確認された。図2.2.1-8(b)に示したランダム振幅波で载荷した場合にき裂進展部分で2種類の破面が現れるのは、最大振幅部分でA-2の破面が、最大振幅以外の部分でA-1の破面が形成されるためと考えられる。従って、A-1とA-2の破面1組がランダム振幅波1波によるき裂進展量に相当する。一方、正弦波で载荷したEM02のSEM観察結果ではA-1のような破面は認められず、全て部分A-2と同様の破面であり、SEM観察結果から応力サイクルごとのき裂進展量を特定することはできなかった。

表2.2.2-2に実験結果と、第4章で述べる別途実施したFEMによるき裂進展解析結果により得られたき裂貫通までの载荷回数を示す。解析では実験結果と比較して少ない繰り返し数でき裂が貫通するという結果が得られている。一方、ランダム振幅波で载荷した2体について、き裂進展部分でSEM観察により確認された破面A-1とA-2の組は、EM03で10組、EM05で4組となった。上述のように、破面の繰り返し数はき裂貫通に要したランダム振幅波の载荷回数に相当する。従って、実験でき裂貫通までに要した繰り返し数のうち、EDMノッチ先端からの疲労き裂発生に消費された回数は無視できる程度であり、ほとんどはき裂の伝播に費やされていると考えられる。

表 2.2.2-1 直管要素試験 き裂付き試験体 試験結果

Table 2.2.2-1 Test results of straight pipe element tests using cracked specimens.

Name	Type of defect	Internal pressure (P) [MPa]	Hoop stress by P (σ_H) [MPa]	σ_H / S_y	Input condition		No. of loading	Max. reaction force [kN]	Test results
					Pattern of input disp. wave	Max. amp. of input [mm]			
SC01	SCC	8	49	0.16	Sinusoidal	50	5 (108 cycles)	96	Crack penetration at SCC
SC02			49	0.16			21	83	Crack penetration at the tapering section
SC03			49	0.16			5 (128 cycles)	95	Crack penetration at SCC
SC04			49	0.16			6	92	Crack penetration at the tapering section
SC05			48	0.16			6	104	Crack penetration near the weld
SC06			49	0.16			4	114	Crack penetration near the weld
SC07			50	0.16			5 (127 cycles)	92	Crack penetration at SCC
SC08			49	0.16			5 (117 cycles)	93	Crack penetration at SCC
EM01	EDM	8	49	0.16	Random	15 30	35 2	71	Full circumferential break
EM02			49	0.16			25	67	Full circumferential break
EM03			49	0.16			25	69	Full circumferential break
EM04			49	0.16			21	66	Full circumferential break
EM05			50	0.16			35	79	Crack penetration at EDM notch
EM06			49	0.16			50	94	Crack penetration at EDM notch
EM07			48	0.16			50	108	Crack penetration at EDM notch
EM08			51	0.16			50	90	Crack penetration at EDM notch
EM09			48	0.16			35	77	Crack penetration at EDM notch

表 2.2.2-2 実験、FEM 解析、および SEM 観察から得られたき裂貫通に要した
入力繰り返し数

Table 2.2.2-2 Number of loading blocks obtained from tests, FEM analyses and SEM observation.

Name	Condition of defect			Type of loading	Max. $\Delta\sigma$ [MPa]	Loading times		
	Type	Full angle	Depth*			Test results	FEM**	SEM
EM02	EDM	360°	0.5t	Sinusoidal	707	1 (16 cycles)	1 (8cycles)	--
EM03				Random	700	10	2	10
EM05		90°		Random	820	4	2	4

* 't' denotes the normal pipe thickness

** Results from FEM analysis described in Chapter 4

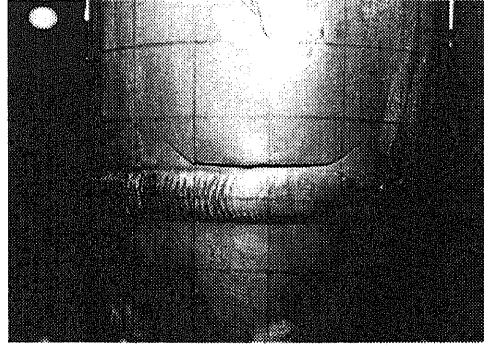


図 2.2.2-1 初期 SCC き裂からの貫通 (SC01)
 Fig. 2.2.2-1 Crack penetration from initial SCC (SC01).

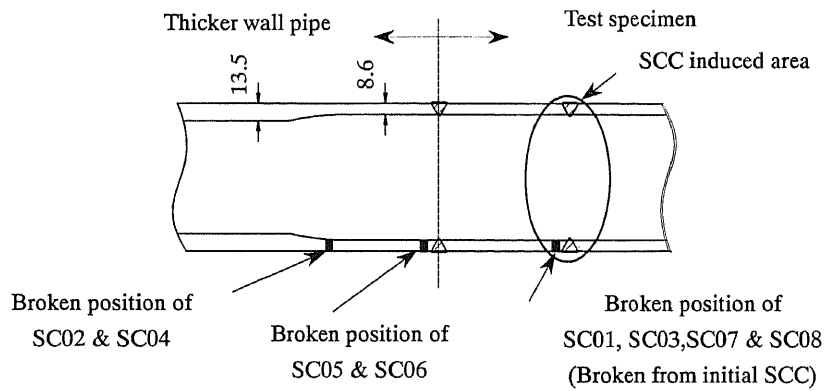


図 2.2.2-2 各 SCC 試験体のき裂貫通位置
 Fig. 2.2.2-2 Broken positions of SCC specimens.

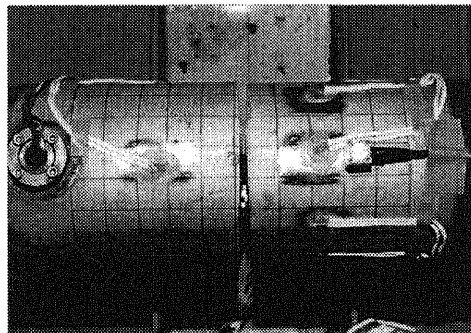


図 2.2.2-3 全周破断の状況 (EM02, 全周 EDM き裂付き試験体)
 Fig. 2.2.2-3 Full circumferential break (EM02, with full circumferential initial EDM notch).

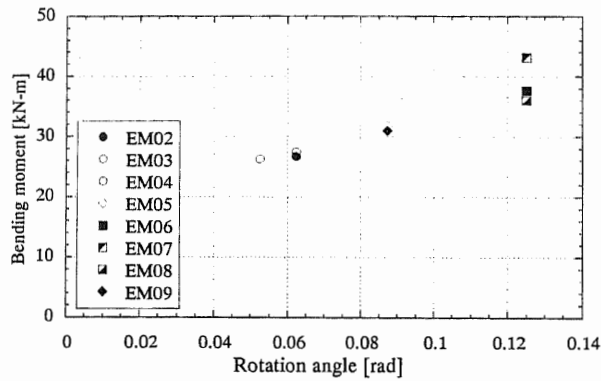


図 2.2.2-4 EDM 試験体における最大入力変形角と最大曲げモーメントの関係
 Fig. 2.2.2-4 Relation between max. input rotation angle and max. bending moment of EDM specimens.

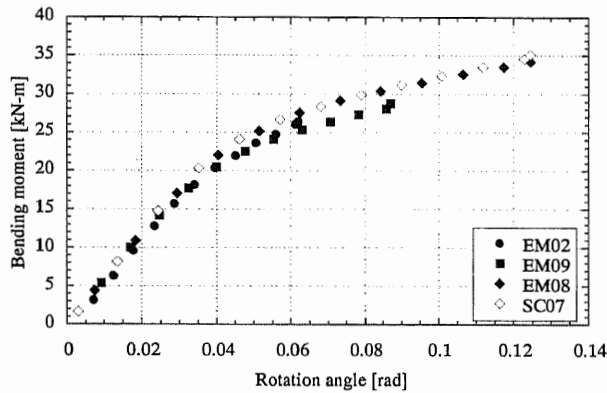


図 2.2.2-5 正弦波の振幅漸増部における入力変形角と曲げモーメントの関係
 Fig. 2.2.2-5 Relation between input rotation angle and bending moment at amplitude increasing part of Sinusoidal input wave.

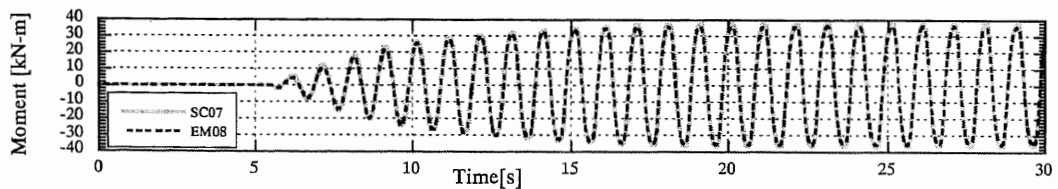


図 2.2.2-6 SCC 試験体と EDM き裂付き試験体の曲げモーメント時刻歴比較 (SC07 & EM08)
 Fig. 2.2.2-6 Bending moment time histories of the SCC specimen and the EDM notched specimen (SC07 and EM08).

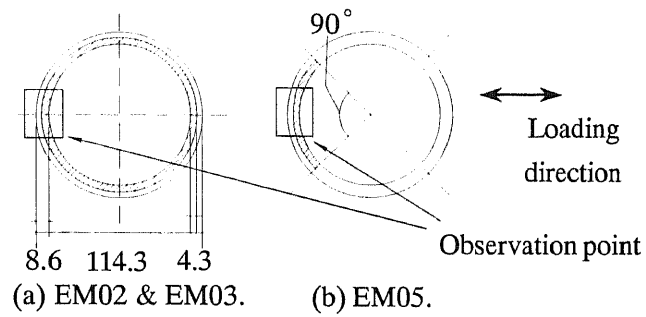


図 2.2.2-7 初期 EDM き裂形状と SEM 観察点

Fig. 2.2.2-7 Geometry of initial EDM notch and observation point by SEM.

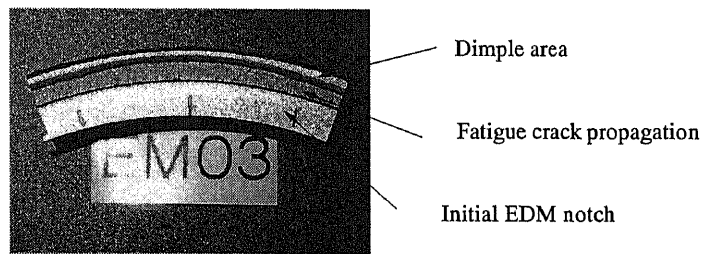


図 2.2.2-8 き裂進展面のマクロ様相 (EM03)

Fig. 2.2.2-8 View of crack surface (EM03).

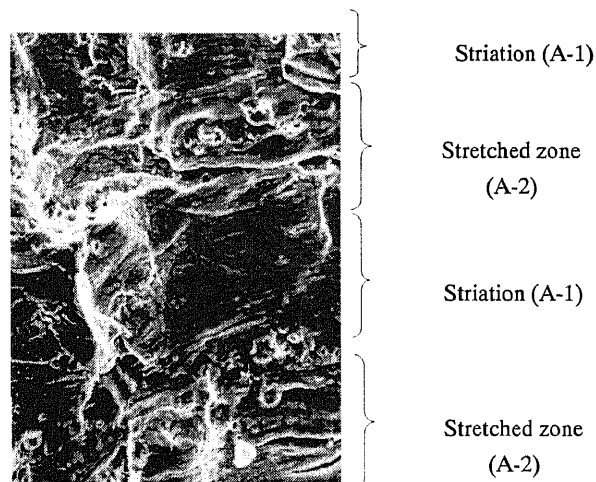


図 2.2.2-9 破面の SEM 観察結果 (EM03, 第 2 ~ 第 3 ブロック)

Fig. 2.2.2-9 SEM image of fracture surface (EM03, block No.2-No.3).

2.2.3 減肉配管および健全配管の試験結果

2.2.3.1 破損状況

直管要素試験のうち、減肉配管および健全配管の試験結果を表 2.2.3-1 にとりまとめて示す。試験体のうち正弦波により载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。減肉配管では、減肉量および内圧値の関係により以下の破損形態が確認された。

(1) 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、25% 減肉試験体 (EC08) で $0.30\sigma_y$ 、50% 減肉試験体 (EC01～EC05) で $0.45\sigma_y$ 、60% 減肉試験体 (EC09) で $0.58\sigma_y$ であった。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 2.2.3-1 に EC05 の破損形態を示す。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。なお、EC03 については、試験前の振動台暖機運転時に载荷装置の不具合のため過大な強制変位が作用し破損したため、データが得られなかった。

(2) 減肉量 50%、内圧なし (EC06)

内圧のない試験体では、载荷に伴い減肉部分が配管内面に折れ曲がる局部座屈が発生した。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 2.2.3-2 に EC06 の破損状況を示す。载荷方向の外径は約 20% 減少していた。

(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、繰り返し载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 箇所軸方向き裂が発生した。図 2.2.3-3 に EC07 の破損形態を、図 2.2.3-4 に軸方向き裂の発生位置を示す。ラチェット変形のために外径は 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。一方、100A の配管で 11MPa の内圧を保持するのに必要な肉厚は 1.46mm となる。従って、周方向および軸方向に発生し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。

健全配管については、単調载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。繰り返し载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。図2.2.3-5に単調载荷を行ったEA01の140mm入力時の変形状態を、図2.2.3-6に繰り返し载荷を行ったEA02の破損状況を示す。

2.2.3.2 健全試験体の荷重変形特性

健全試験体では、単調に入力を増加させる単調载荷と、入力変位を段階的に増加させながら正弦5波を使用して载荷する繰り返し载荷を行った。単調载荷を行った試験体(EA01)について、荷重変形特性を回転角と曲げモーメントの関係として図2.2.3-7に示す。試験では5mmずつ順次入力変位を増加させたが、図2.2.3-7では最大入力変位までの回転角と曲げモーメントを累積して示している。また、図2.2.3-8に、単調载荷の回転角-曲げモーメント関係と繰り返し载荷を行った試験体(EA02)の回転角-曲げモーメント関係を重ねたものを示す。図2.2.3-7から、健全配管は変形角約0.0375[rad](入力変位15mm)程度で塑性域に入ることがわかる。塑性域に入ると単調载荷の回転角-曲げモーメント関係では入力変位が増加しても反力がほとんど増加しない、降伏棚のような状態を経てから再び入力変位量の増加に伴い反力が増加するようになるが、繰り返し载荷で得られた回転角-曲げモーメント関係ではそのような状態は現れず、最大反力は入力変位量の増加に伴い増加している。このような現象のため、弾性域では繰り返し载荷の回転角-曲げモーメント関係は単調载荷で得られた回転角-曲げモーメント関係と良く一致するが、塑性域に入ると繰り返し载荷の反力は同一入力変位の単調载荷で得られた反力に対し10%~20%高い値を示した。

2.2.3.3 減肉試験体の荷重変形特性

図2.2.3-9(a)に、健全配管EA02の25mm変位入力時の荷重変形関係を、図2.2.3-9(b)~(d)に、入力変位25mmの正弦波で载荷したEC02、EC07、EC09について、载荷1回目の荷重変形関係を示す。このうち、EC07およびEC09は载荷1回目で試験体の破損に至っているため、破損前の荷重変形関係を実線で、破損後の荷重変形関係を点線で示した。図2.2.3-9から、健全配管に比べ、減肉配管では減肉量の増加に伴い試験体の剛性およ

び反力が低下していることがわかる。また、破損までに入力を3回繰り返したEC02では、荷重1回目の荷重変形関係は安定したループを描いているが、1回目の荷重で破損に至ったEC07およびEC09は破損に至る前から繰り返しの伴い反力の低下する傾向が現れている。さらにEC07ではき裂貫通後は急激に反力が低下しており、不安定な破損を示したことがわかる。

2.2.3.4 減肉量と試験体反力の関係

前項で述べたように、配管に減肉が存在すると試験体の反力が低下する。ある減肉配管の荷重試験で得られた反力に対し、同じ入力変位の荷重で得られた健全試験体（EA02）の反力値を反力の基準値とする。減肉試験体から得られた反力値の、基準値に対する割合と減肉量の関係は図2.2.3-10のようになる。EC05は例外となるが、その他の試験体ではほぼ減肉量に応じて反力の低下する傾向が現れている。また、図中に示した曲線は、試験配管部分（図2.2.1-5の、中央部400mmの部分）が全て減肉しているとして弾性計算を行った場合の、減肉量に応じて低下する反力のレベルを示している。この曲線は減肉範囲を広く取っているため参考比較となるが、減肉量が多くなると弾性計算から予測される反力レベルよりも低下の度合いが著しくなる。これは、荷重試験では全ての試験体で減肉部分が塑性域に入る応力レベルであり、塑性化に伴い局所的な減肉部分に変形が集中し、期待される反力が得られないためと考えられる。

2.2.3.5 減肉量とラチェット変形量の関係

内圧を荷重して荷重実験を行った試験体では繰り返し荷重に伴いラチェット変形を生じた。ラチェットによる外径変化量を把握するために、試験の前後でノギスを使用して減肉部分の外径を計測した。ここで、試験後の外径から試験前の外径の差をとり、試験前の外径で除した値を外径変化率とする。減肉量と外径変化率の関係は図2.2.3-11のようになる。図中、塗りつぶした印は荷重方向の外径変化率を、白抜き印は荷重方向と直交する方向（以下直交方向とする）の外径変化率を示す。ただし、EC01については破損前に荷重レベルを数回変更しているため、以下の検討では対象外とした。

図2.2.3-11から、繰り返し荷重に伴い荷重方向、直交方向ともにラチェット変形のため外径が増加するが、外径変化率は直交方向に比べて荷重方向の方が大きいことがわかる。図中に曲線で示したように、EC04、EC05、EC08は入力変位35mmで、EC02、EC07、EC09は入力変位25mmで荷重を行った。これらの試験体の比較から、最終的なラチェット変形量は入力レベルが同じであれば減肉量が多いほど大きくなる傾向があることが

わかる。また、減肉量 50% の試験体である EC02 と EC05 の外径変化率から、減肉量が同じ場合、入力レベルが大きいとラチェット変形量は大きくなる傾向があるといえる。一方、EC04 と EC05 は減肉条件および入力変位量が等しく、入力波の種類のみが異なっているが、この 2 つの試験体から入力波の種類は最終的なラチェット変形量には影響しないと考えられる。

ランダム振幅波で载荷した EC04 について、入力変位と载荷方向の周方向ひずみの時刻歴波形を図 2.2.3-12 に示す。周方向ひずみの時刻歴波形から、ラチェット変形に関する周方向ひずみの平均ひずみ増分は主に入力変位の最大振幅近傍で発生し、その他の入力サイクルによるひずみはひずみ振幅としては影響するが平均ひずみの増加としてはほとんど寄与していないことがわかる。

表 2.2.3-1 直管要素試験 減肉試験体および健全試験体試験結果

Table 2.2.3-1 Test results of straight pipe element tests using thinned wall specimens and nominal wall thickness specimens.

Name	Type of defect	Internal pressure (P) [MPa]	Hoop stress by P (σ_H) [MPa]	σ_H / S_y	Input condition		No. of loading	Max. reaction force [kN]	Test results	
					Pattern of input disp. wave	Max. amp. of input [mm] [rad]				
EC01			137	0.44	Random	15	0.04	78	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	
						25	0.06			
						30	0.08			
						35	0.09			
						45	0.11			
EC02		11	137	0.44	Sinusoidal	25	0.06	67	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	
EC03									Broken by accident	
EC04	Wall thinning		140	0.45	Random	35	0.09	64	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	
EC05			145	0.46	Sinusoidal	35	0.09	86	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	
EC06			0	0.00	Sinusoidal	35	0.09	69	Buckling and low-cycle fatigue at thinned wall	
EC07			286	0.92	Sinusoidal	25	0.06	1	38	Mixture of low-cycle fatigue with ratchet and burst
EC08			93	0.30	Sinusoidal	35	0.09	7	80	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet
EC09		11	180	0.58	Sinusoidal	25	0.06	51	Low-cycle fatigue failure with swelling by ratchet	
EA01	No defect	11	68	0.22	Monotonic	Up to 140	0.35	186	No failure (No crack was found after the test)	
EA02			69	0.22	Sin 5 cycles	2.5 - 95	0.006 - 0.24	1 for each input	135	Crack penetration at weld line

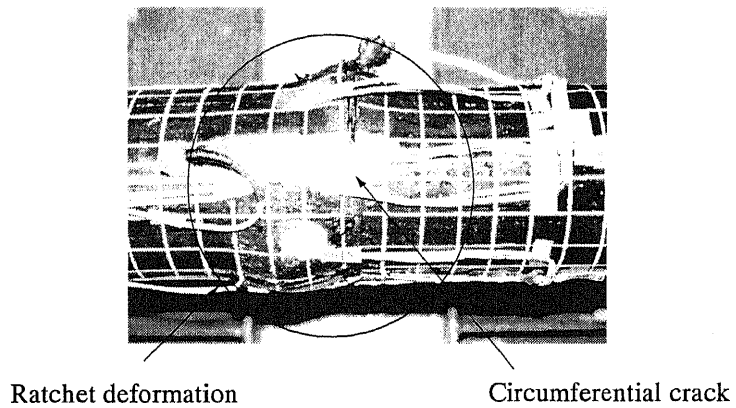


図 2.2.3-1 ラチェットによる減肉部分の変形 (EC05, 内圧あり 50% 減肉試験体)
 Fig. 2.2.3-1 Deformation at thinned wall part caused by ratchet
 (EC05, 50% thinned wall with internal pressure).

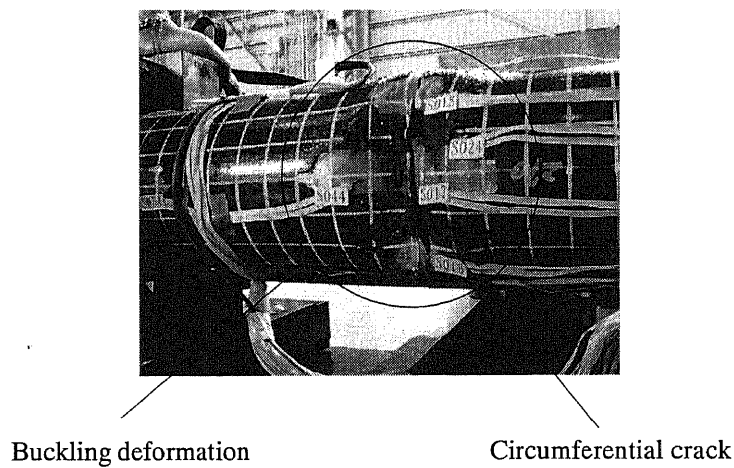


図 2.2.3-2 減肉部分での局部座屈変形 (EC06, 内圧なし 50% 減肉試験体)
 Fig. 2.2.3-2 Buckling deformation at thinned wall part
 (EC06, 50% thinned wall without internal pressure).

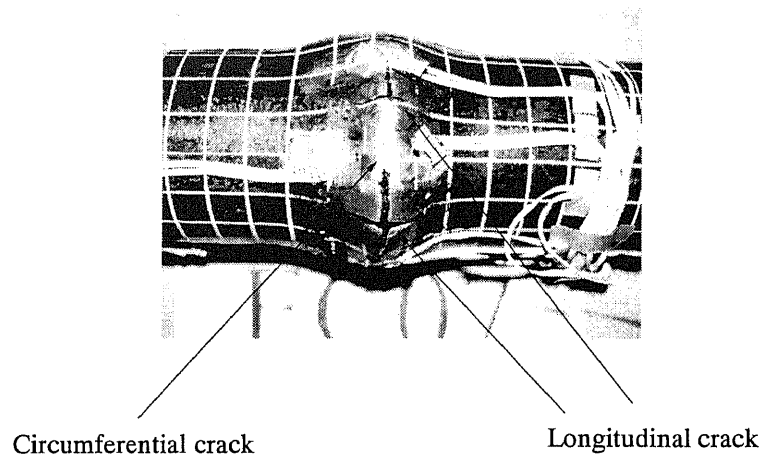


図2.2.3-3 周方向及び軸方向き裂とラチェット変形（EC07，内圧あり75%減肉試験体）
 Fig. 2.2.3-3 Circumferential and longitudinal cracks and ratchet deformation
 (EC07, 75% thinned wall with internal pressure).

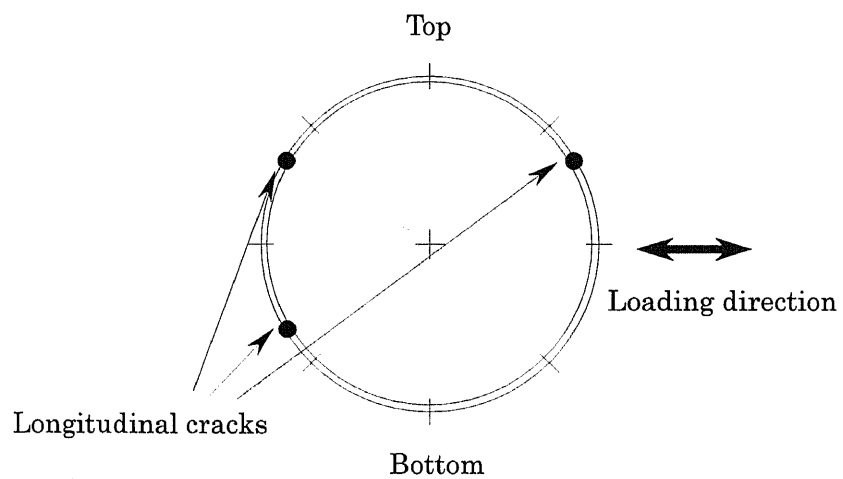


図2.2.3-4 EC07で確認された軸方向き裂の断面上の発生位置
 Fig. 2.2.3-4 Position of the longitudinal cracks that appeared in EC07.

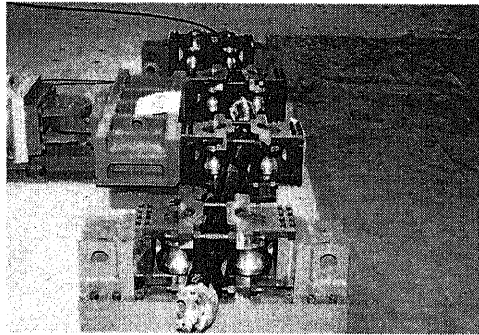


図 2.2.3-5 140mm 入力時の EA01 の変形
Fig. 2.2.3-5 Deformation of EA01 at 140 mm input displacement.

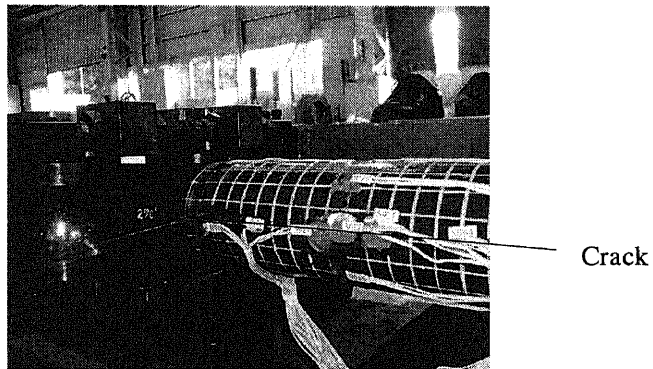


図 2.2.3-6 溶接線脇でのき裂貫通 (EA02, 健全試験体)
Fig. 2.2.3-6 Crack penetration at welding line (EA02, no defect).

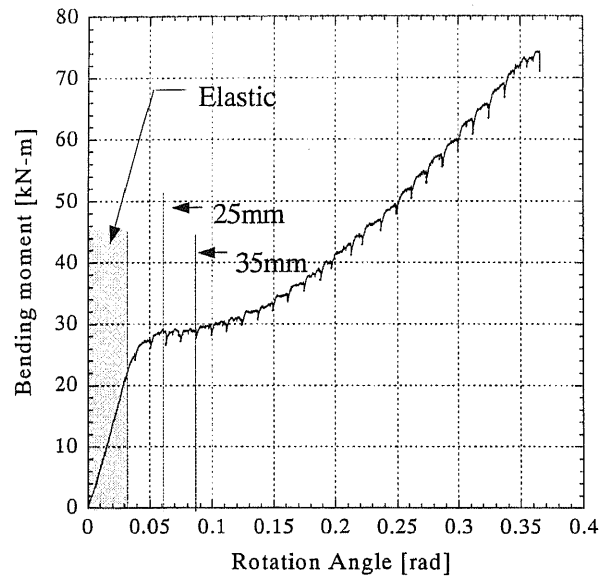


図 2.2.3-7 回転角-曲げモーメント関係 (EA01)
 Fig. 2.2.3-7 Relation between rotation angle and bending moment of EA01.

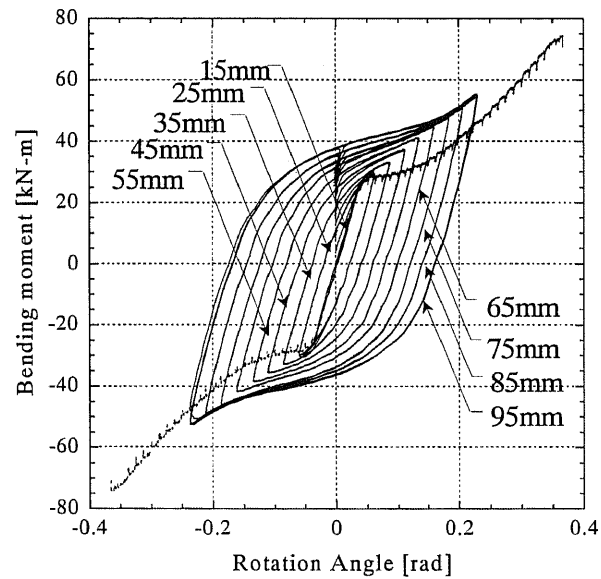
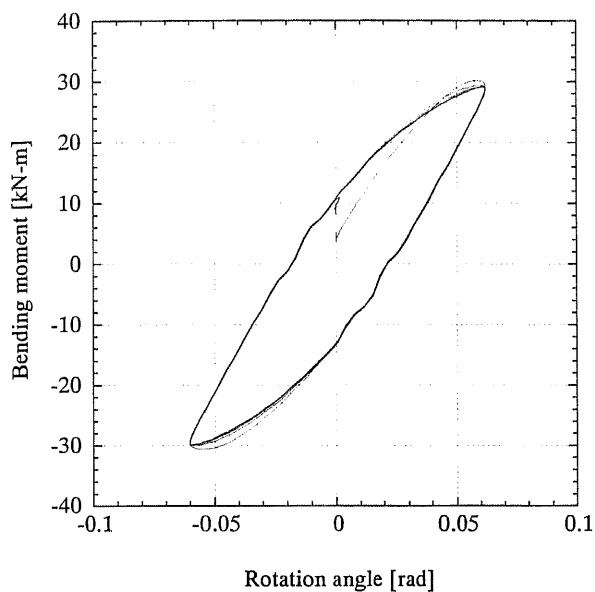
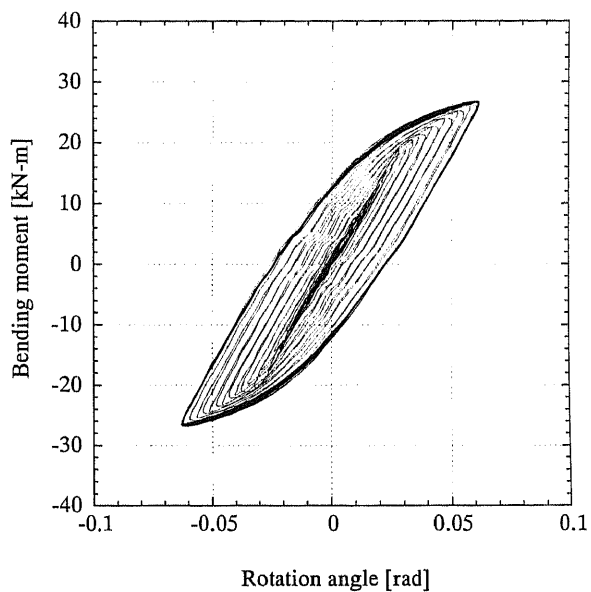


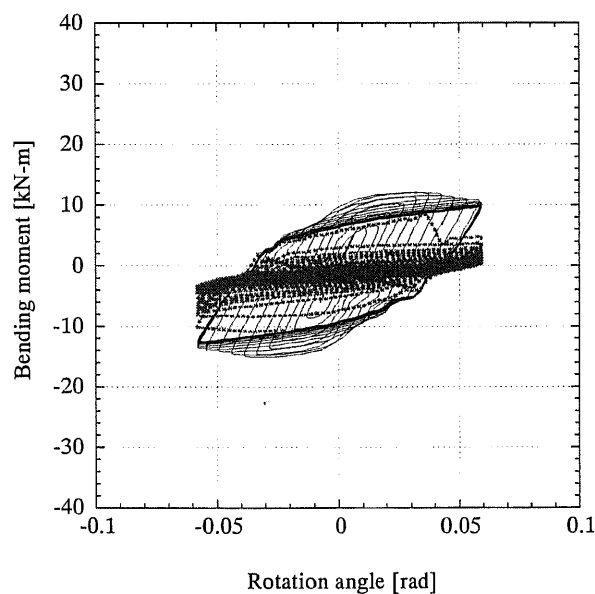
図 2.2.3-8 EA01 と EA02 の回転角-曲げモーメント関係
 Fig. 2.2.3-8 Relation between rotation angle and bending moment of EA01 & EA02.



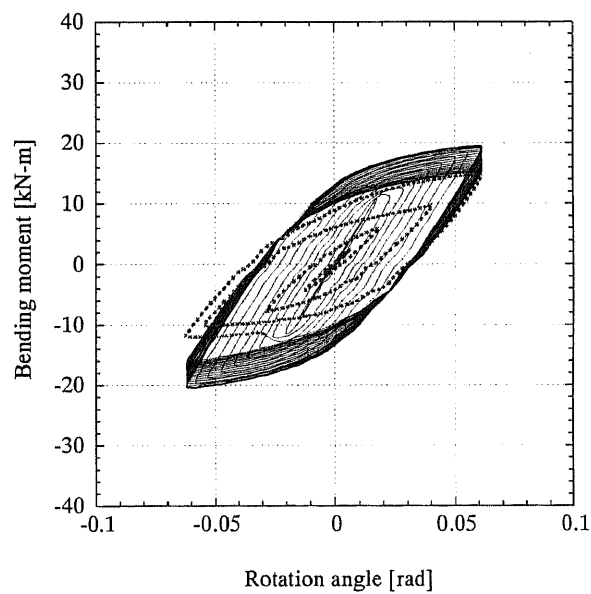
(a) EA02 (Input 25mm).



(b) EC02.



(c) EC07.



(d) EC09.

図 2.2.3-9 健全試験体と減肉試験体の回転角 - 曲げモーメント関係

Fig. 2.2.3-9 Relation between rotation angle and bending moment of the nominal wall thickness specimen and the thinned wall specimens.

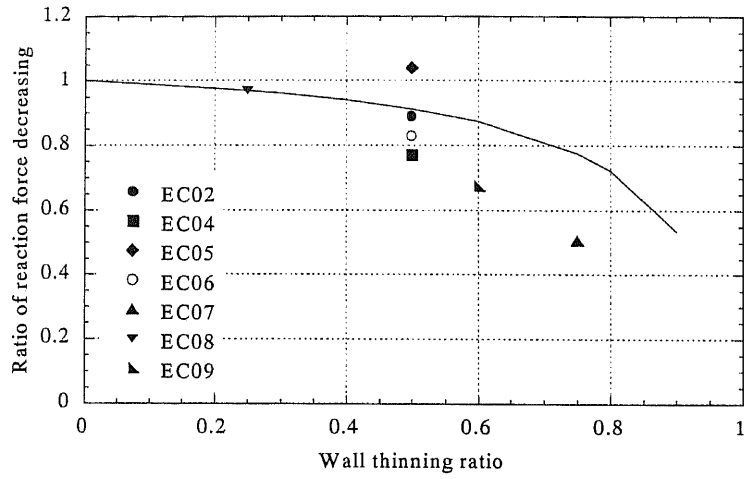


図 2.2.3-10 減肉量と反力低下率の関係

Fig. 2.2.3-10 Relation between wall thinning ratio and decreased reaction force ratio.

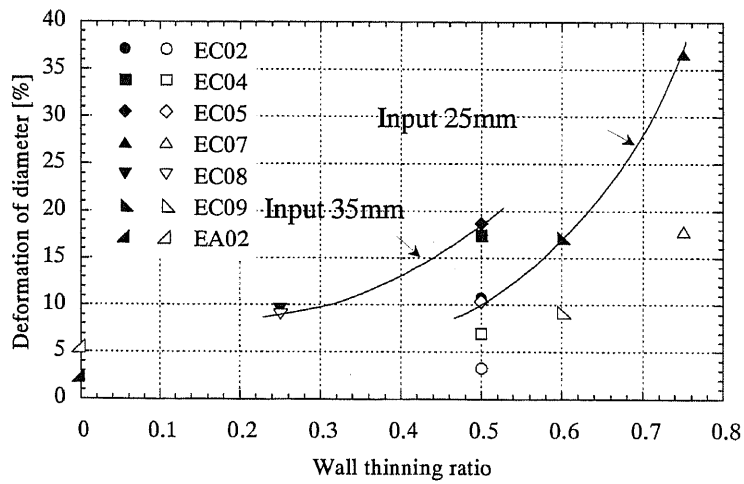
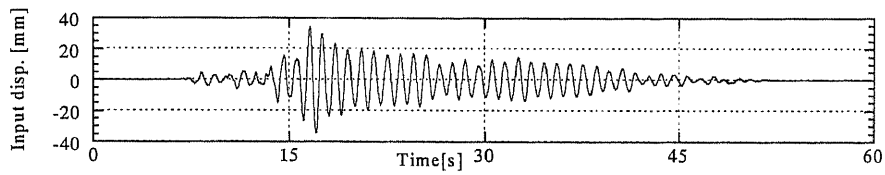
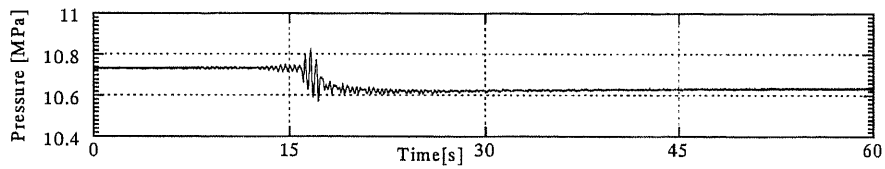


図 2.2.3-11 減肉量と外径変化率の関係

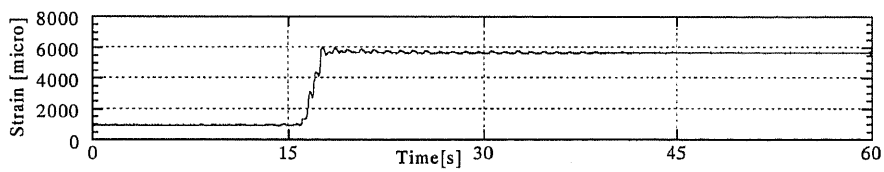
Fig. 2.2.3-11 Relation between wall thinning ratio and deformation of diameter.



(a) Input displacement.



(b) Internal pressure.



(c) Hoop strain at S043H.

図 2.2.3-12 周ひずみのラチェット挙動 (EC04, 2 回目の载荷)
 Fig. 2.2.3-12 Ratcheting behavior of hoop strain (EC04, 2nd time loading).

2.3 曲管要素試験

2.3.1 試験方法

2.3.1.1 試験体の概要

高経年化により配管に発生すると想定される劣化のうち、減肉に関して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、減肉については直管を用いた要素試験に加え、曲管を使用した要素試験（以下曲管要素試験）を実施した。

曲管要素試験では、供試部に 200A、sch80（外径：216.3mm、肉厚：12.7mm）、高圧配管用炭素鋼配管 STS410 の曲管を使用した。表 2.3.1-1 に使用した鋼材の化学組成を、表 2.3.1-2 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。曲管要素試験では、試験体に導入した劣化形状は全周減肉または部分減肉とした。図 2.3.1-1 に試験体の概要を、図 2.3.1-2 および図 2.3.1-3 に曲管部分に導入した減肉の形状を示す。

2.3.1.2 試験条件

載荷は直管要素試験と同様、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 2.3.1-4 および図 2.3.1-5 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は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に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。本試験の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ブロックとした载荷波形を使用した。図2.3.1-6にこれらの载荷波形を示す。図2.3.1-6に示したように、直管要素試験とは異なり、これらの载荷波形には漸増・漸減部は付加していない。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。健全試験体の荷重変形関係は、図2.3.1-4に示す载荷装置を使用して载荷を行った健全試験体では、図2.3.1-6(a)に示した正弦5波を5mm単位で最大80mmまで入力を増加させ、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2.3.1-5に示した载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载荷により取得した荷重変形関係を使用した。使用する载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の繰り返し载荷を行った。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。载荷は試験体の破損により内部水が漏洩するまで図2.3.1-6に示した载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ている。実験で使用した試験体の名称と試験条件をまとめて表2.3.1-3に示す。

2.3.1.3 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2.3.1-7に各試験体の計測点を示す。なお、図2.3.1-7に示した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。

表 2.3.1-1 鋼材の化学組成

Table 2.3.1-1 Chemical composition of materials.

Material	C	Si	Mn	P	S
STS410 (ELB01~ELB04)	0.17	0.20	0.50	0.01	0.002
STS410 (ELB05、ELBI_01、ELBO_01、 ELBO_02、ELBM_01)	0.19	0.25	0.82	0.02	0.004

表 2.3.1-2 鋼材の機械的性質

Table 2.3.1-2 Mechanical properties.

Material	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	El.[%]
STS410 (ELB01~ELB04)	362	553	32
STS410 (ELB05、ELBI_01、ELBO_01、 ELBO_02、ELBM_01)	351	506	52

表 2.3.1-3 曲管要素試験 試験体一覧

Table 2.3.1-3 Specimens for bend pipe element tests.

Name	Material	S_y [MPa]	S_u [MPa]	S_m [MPa]	Condition of wall thinning	Bending direction*	Support condition	Internal Pressure (P) [MPa]	Input disp. [mm]
ELB01	STS410	362	553	184	No defect	I	Pin - Pin	10	70
ELB02					50% full circumferential			10 ~ 7	
ELB03					50% partial			10	
ELB04					70% partial				
ELB05					50% full circumferential				
ELBI_01	STS410	351	506	169	No defect	I	Pin - Fixed support	10	185
ELBO_01					No defect	O			195
ELBO_02					50% full circumferential	I + O			
ELBM_01					50% full circumferential				185

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

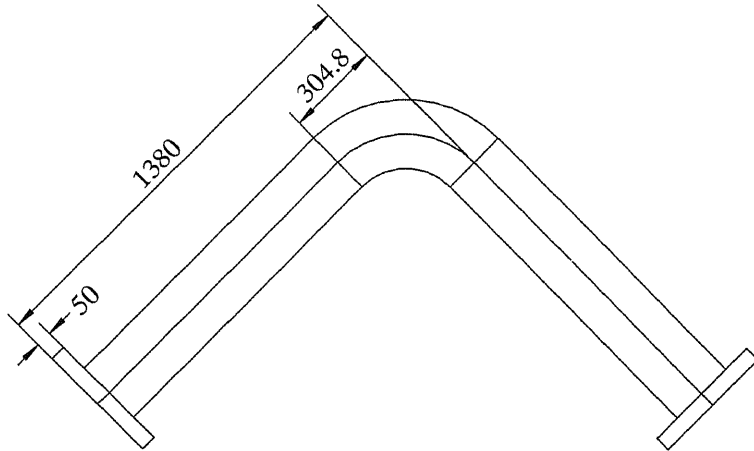


図 2.3.1-1 曲管試験体の概要

Fig.2.3.1-1 Geometry of the bend pipe specimens.

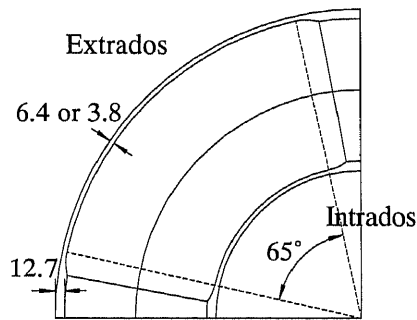


図 2.3.1-2 軸方向減肉加工形状

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

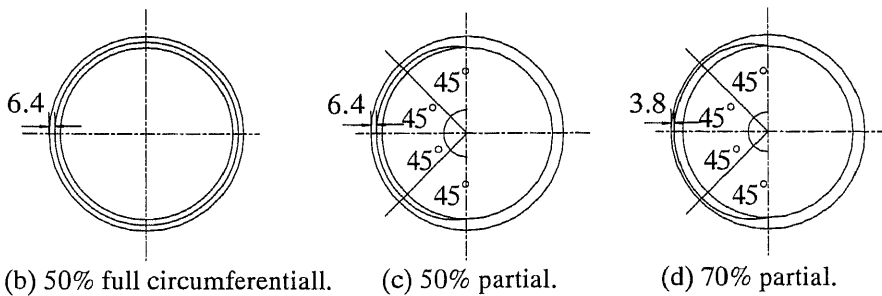
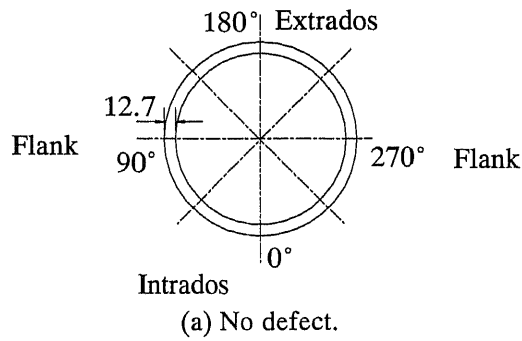
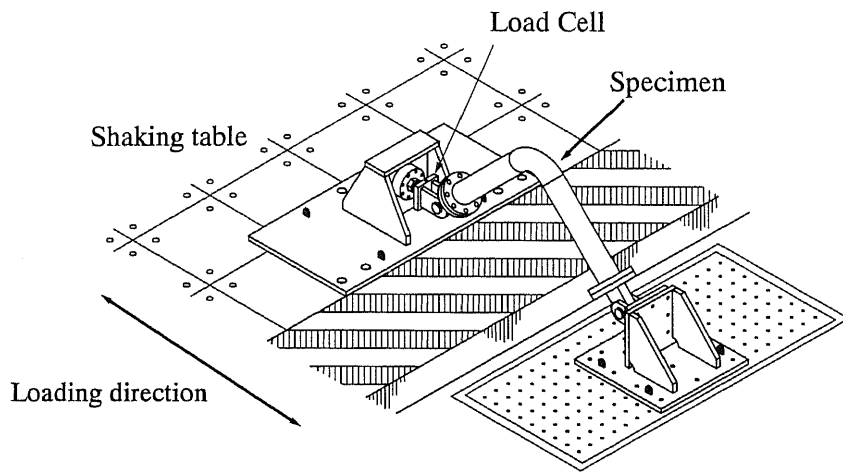
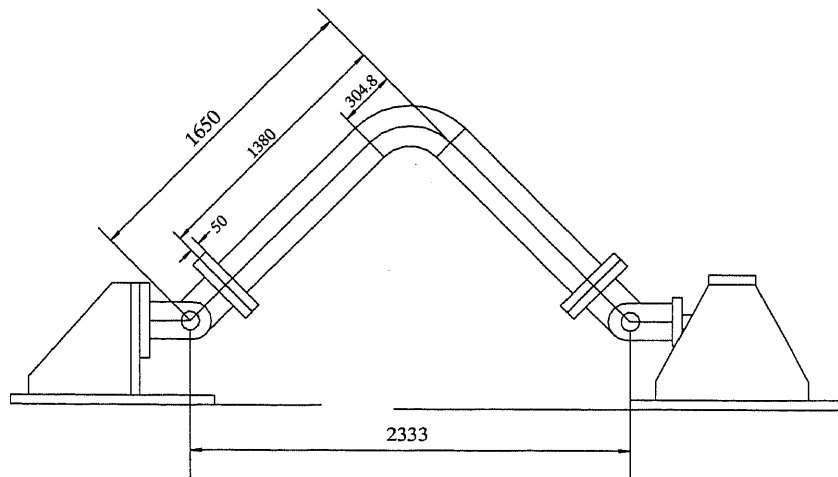


図 2.3.1-3 周方向断面形状

Fig.2.3.1-3 Cross section in circumferential direction.



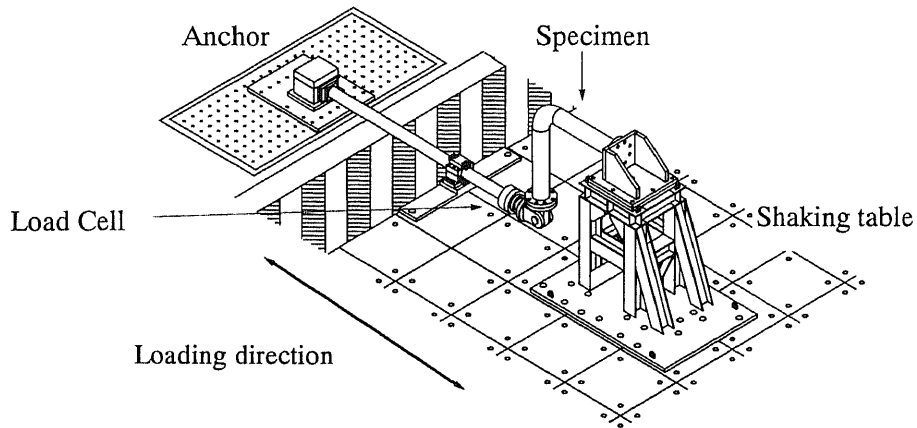
(a) Schematic illustration.



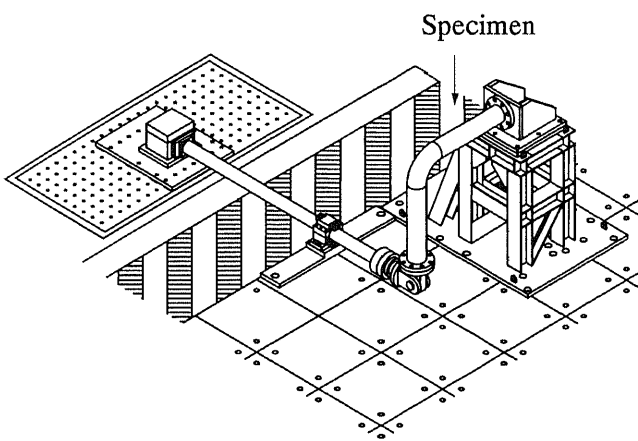
(b) Dimension of the test equipment and the specimen.

図 2.3.1-4 両端ピン支持型面内曲げ試験用載荷装置

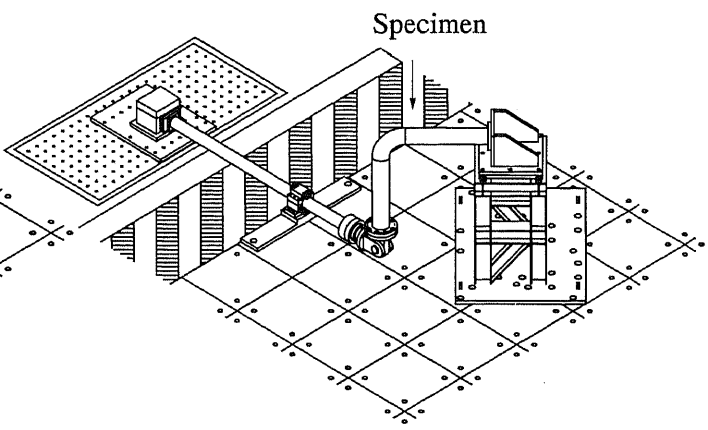
Fig.2.3.1-4 Test equipment for In-plane bending (Support condition : Pin - Pin).



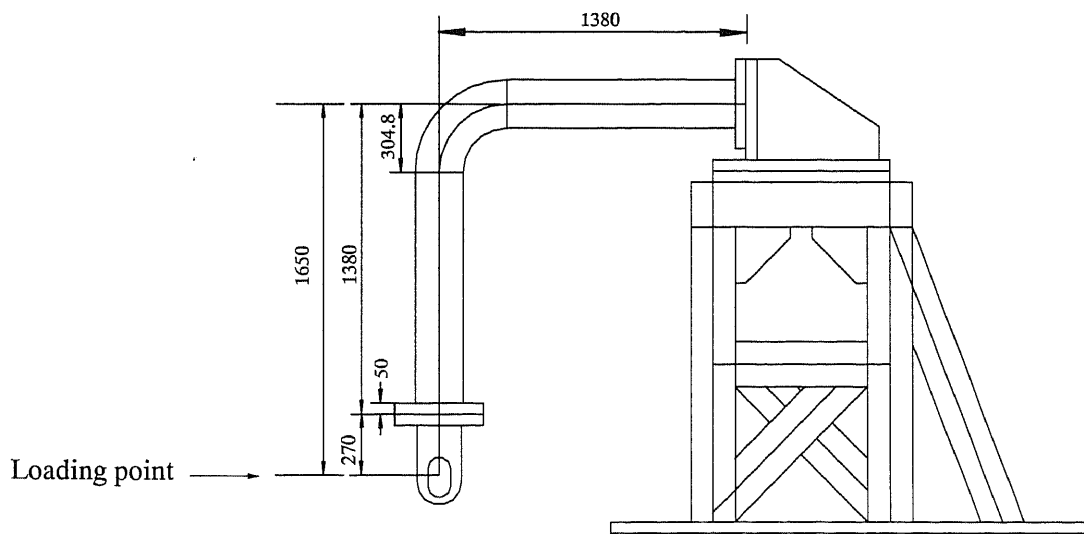
(a) In-plane.



(b) Out-of-plane.



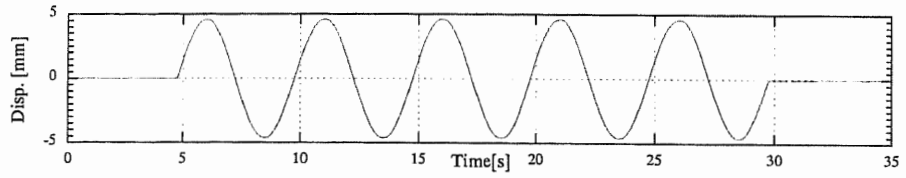
(c) In-plane + Out-of-plane.



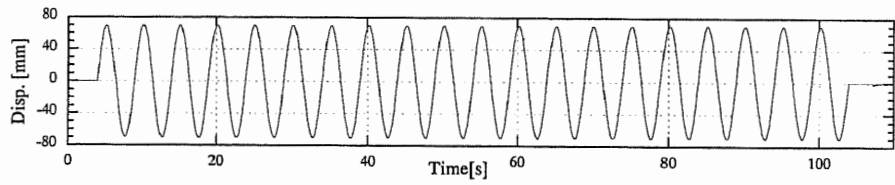
(d) Dimension of the test equipment and the specimen.

図 2.3.1-5 一端固定型面内および面外曲げ用载荷装置

Fig.2.3.1-5 Test equipment for In-plane and Out-of-plane bending (Support condition : Pin - Fixed support).



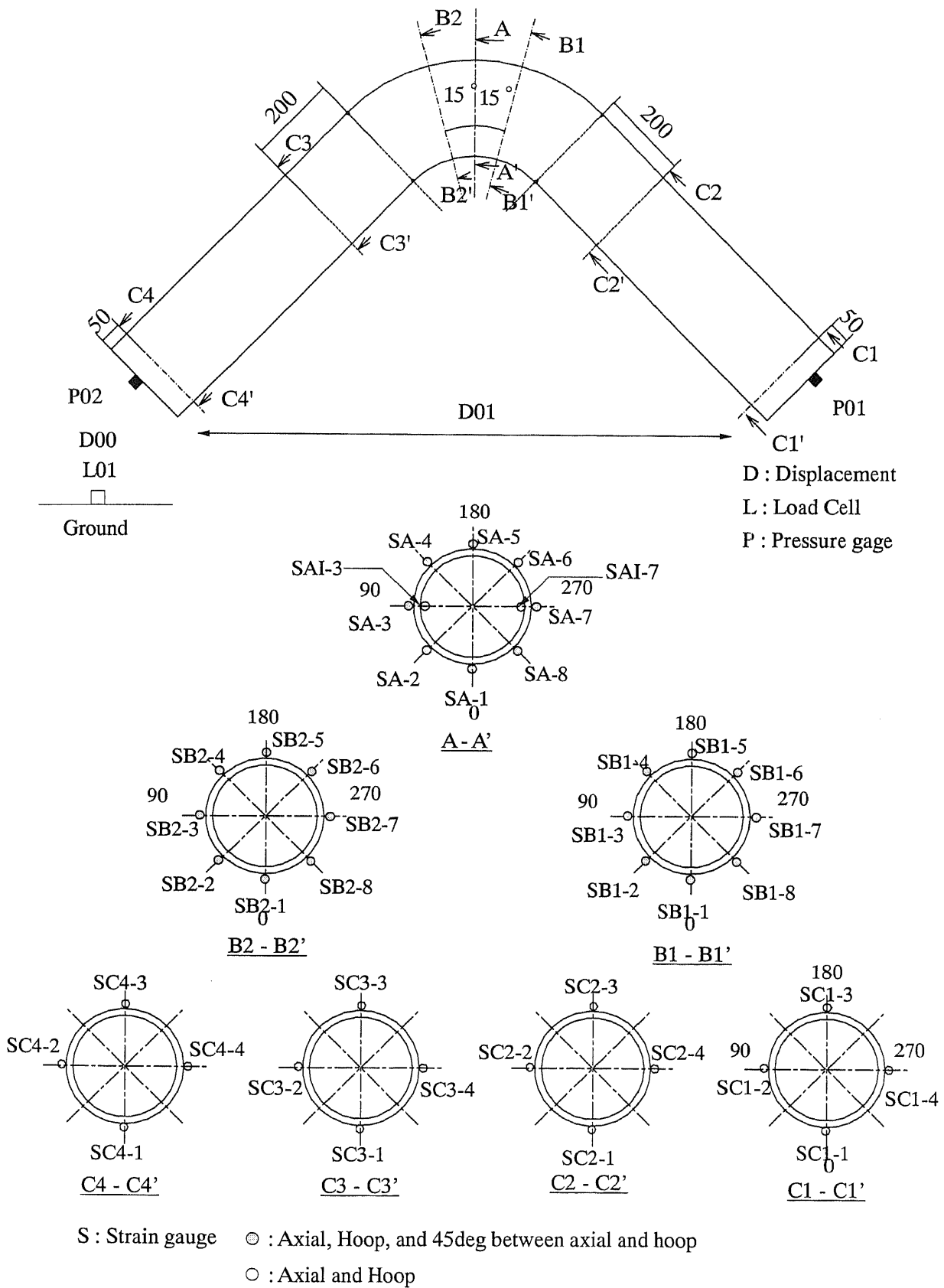
(a) Sinusoidal wave with 5 cycles.



(b) Sinusoidal wave with 20 cycles.

図 2.3.1-6 入力変位波形

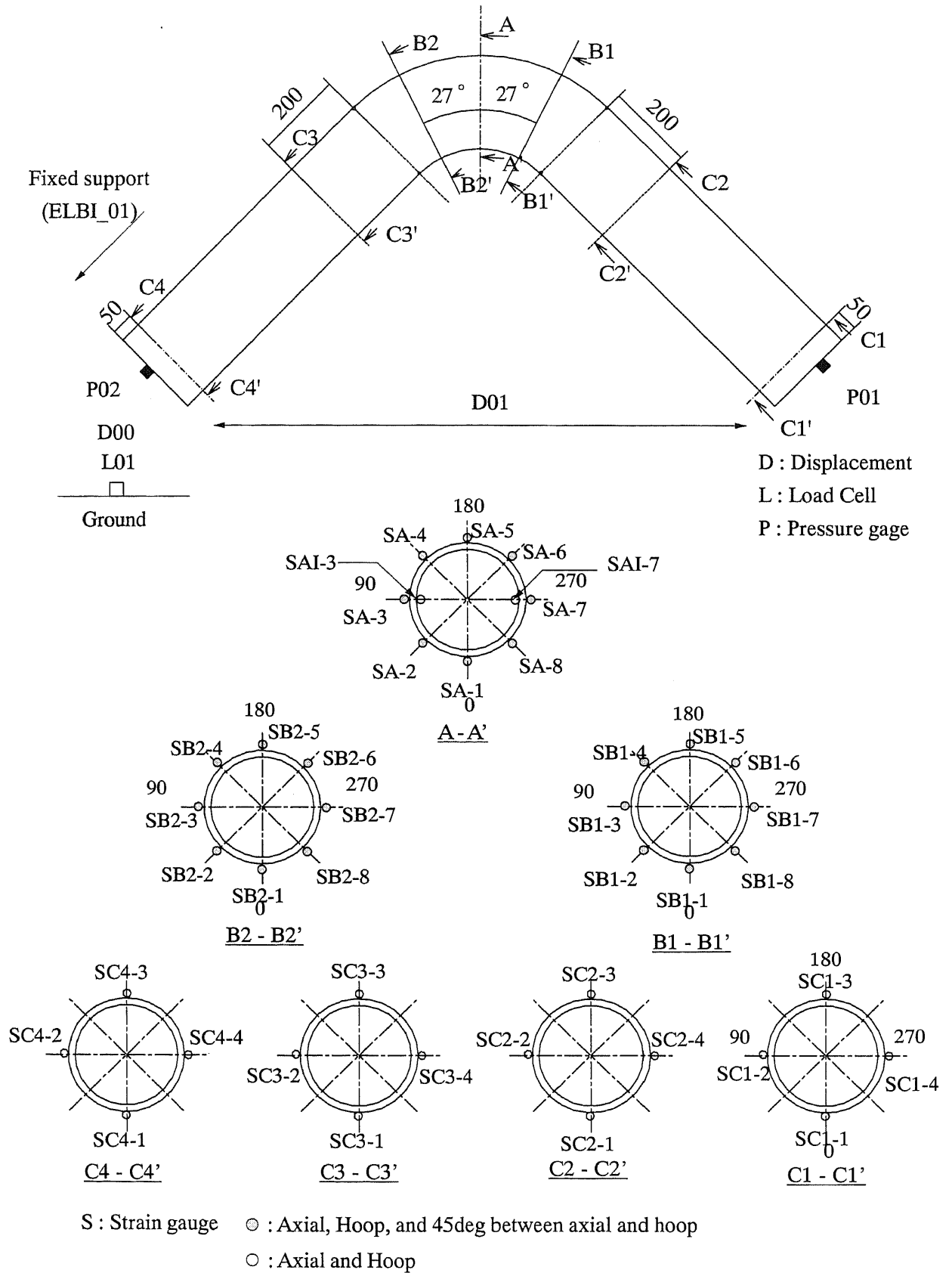
Fig.2.3.1-6 Time histories of input displacement.



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

図 2.3.1-7 曲管要素試験体計測点 (1/3)

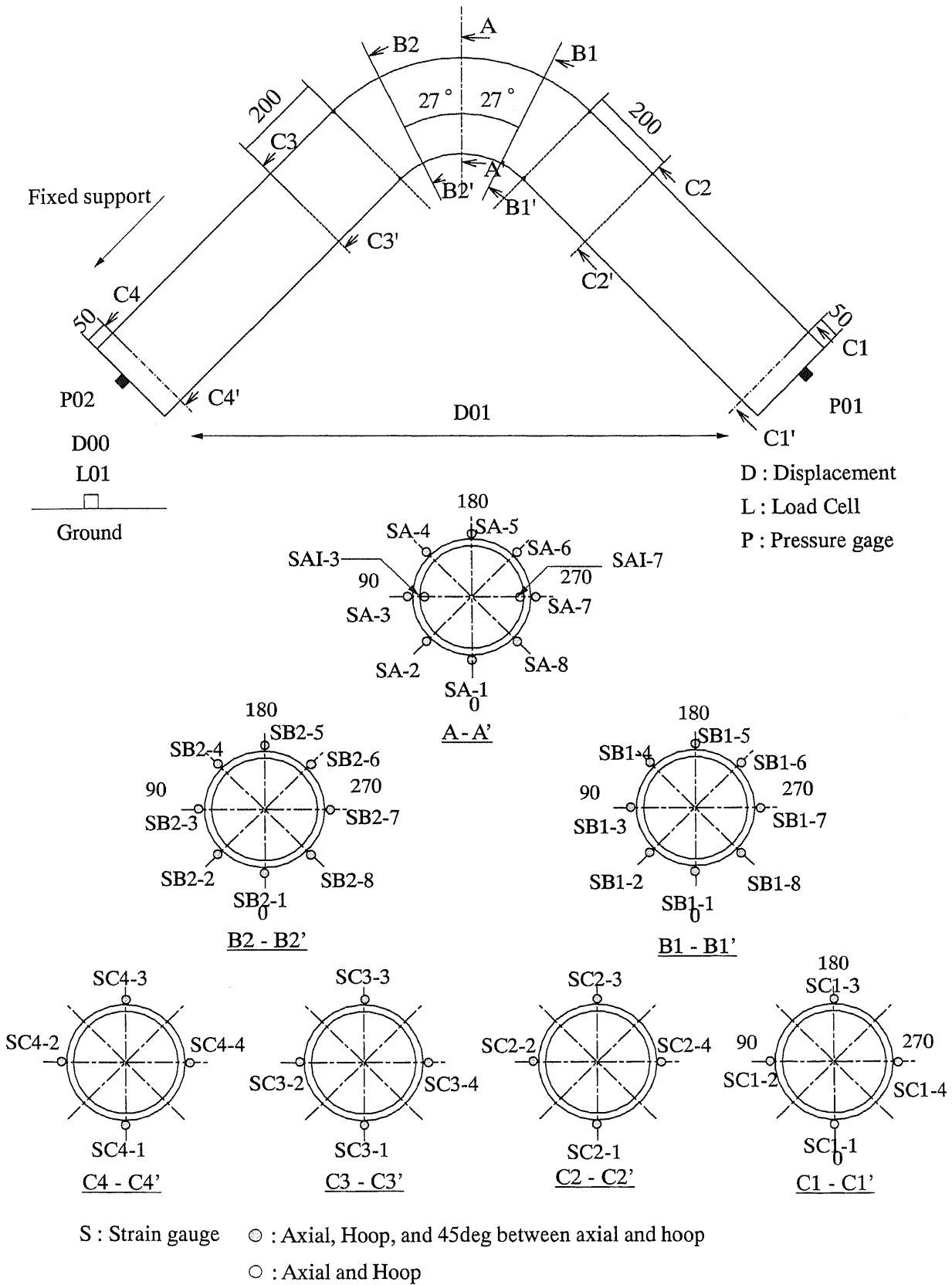
Fig.2.3.1-7 Measurement points of specimens for bend pipe element tests(1/3).



(b) Measurement points of specimens for In-plane bending (ELB05 & ELBI_01).

図 2.3.1-7 曲管要素試験体計測点 (2/3)

Fig.2.3.1-7 Measurement points of specimens for bend pipe element tests(2/3).



(c) Measurement points of specimens for Out-of-plane bending (ELBO_01, ELBO_02, ELBM_01).

図 2.3.1-7 曲管要素試験体計測点 (3/3)

Fig.2.3.1-7 Measurement points of specimens for bend pipe element tests(3/3).

2.3.2 曲管試験体の試験結果

2.3.2.1 破損状況

曲管要素試験の試験結果を表 2.3.2-1 にとりまとめて示す。本試験では、負荷荷重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、内外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 2.3.2-1 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 2.3.2-2 に ELB02、ELBO_02 および ELBM_01 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 2.3.2-3 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ほとんど損傷は発生しなかったため破損させずに試験を終了させた。

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^{3)~7)}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全周50%減肉試験体では、図2.3.2-2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。

2.3.2.2 外径変化

図2.3.2-4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。外径変化率は試験後の外径から試験前の外径の差をとった値を試験前の外径で除した値と定義する。ここで、A、B、C断面の位置は図2.3.1-7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2.3.1-3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2.3.2-4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。健全配管の外径変化率は約2%~4%、減肉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2.3.1-3(c)、(d)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、腹部側の方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 2.3.1-3 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 の载荷 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 を追加で実施している。その結果、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 2.3.2-5 に面外曲げおよび面内+面外曲げを载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極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、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。

2.3.2.3 荷重変形特性

载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 回目の载荷による荷重変形関係を図 2.3.2-6 に示す。図では変形が曲管部分でのみ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、両端ピン支持型载荷装置および一端固定型の载荷装置における変形は、図 2.3.2-7 に示すようになる。従って、振動台入力変位を δ 、载荷方向で計測された反力を P 、载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 、载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 はそれぞれの载荷装置の形状に従って以下の式で表される。

(1) 両端ピン支持型载荷装置

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2 \times \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}l_0 - \delta}{2l_0} \right) \quad (2.3.2.1)$$

$$M = P \cdot l_1 \cos \theta \quad (2.3.2.2)$$

(2) 一端固定型载荷装置

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{l_0} \right) \quad (2.3.2.3)$$

$$M = P \cdot l_1 \quad (2.3.2.4)$$

図 2.3.2-6 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。図 2.3.2-8 に、各試験体の弾性域の载荷で得られた初期剛性と減肉割合の関
係を、図 2.3.2-9 に試験体反力と減肉割合の関係を示す。ここで、減肉割合は図 2.3.1-3
に示した曲管中央断面の減肉形状で、健全肉厚に対する最大減肉深さの比に、テーパ
部分を含む周方向の減肉範囲の比率をかけた値をパーセント表示したものである。
従って、部分減肉試験体である ELB03 では 25%、ELB04 では 35% となり、その他の試験
体は最大減肉深さと一致する。図 2.3.2-8 および図 2.3.2-9 から、初期剛性、試験体反力
とも減肉割合に応じて比例的に低下していることがわかる。同様に、図 2.3.2-10 に、面
外曲げ試験の健全試験体 (ELBO_01) と全周 50% 減肉試験体 (ELBO_02) について、入
力変位 195mm 1 回目の载荷による荷重変形関係を示す。面外曲げ試験についても面内
曲げ試験と同様、減肉の存在により剛性と試験体反力が低下する傾向が現れているが、
面内曲げ試験で健全試験体 (ELB01) に対する全周 50% 減肉試験体 (ELB05) の反力は
約 55% であったのに対し、ELBO_01 に対する ELBO_02 の反力は約 75% となっており、
面内曲げに比べて減肉による反力低下の影響は小さかった。

図 2.3.2-11 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、破損が生じた载荷ブロックの荷重変形関係を示す。図 2.3.2-11 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 2.3.2-11 から、面内曲げ
で载荷を行った 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、破損後は急激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。

2.3.2.4 曲管部分のひずみ挙動

図 2.3.2-12～図 2.3.2-16 に、ELB03、ELB05、ELBO_01、ELBO_02、ELBM_01 の 5 体につ
いて、弾塑性レベルの繰り返し载荷 1 回目で計測された曲管中央断面 (図 2.3.1-7 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 2.3.1-7 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。図 2.3.1-7 に示したように、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する。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。

(1) 面内曲げ

図 2.3.2-12 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、2.3.2.1 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、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少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 2.3.2-13 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、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の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 2.3.2-17 に示す。図 2.3.2-17 で、図の縦軸は図 2.3.1-6(b) 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 2.3.2-17(a) と図 2.3.2-17(b) を比較すると、初期の載荷のうち 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、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 2.3.2-14 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2.3.2-15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2.3.2-16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2.3.2-15、図2.3.2-16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。

なお、図2.3.2-12～図2.3.2-16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、どの载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。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⁸⁾。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。

表 2.3.2-1 曲管要素試験 試験結果

Table 2.3.2-1 Test results of bend pipe element tests.

Name	Condition of wall thinning	Bending direction *	Support condition	Internal Pressure (P) [MPa]	Hoop stress by P (σ_H) [MPa]	σ_H/\bar{S}_y	Input disp. [mm]	No. of input cycles	Max. reaction moment [kN-m]	Test results
ELB01	No defect	I	Pin - Pin	10	82	0.22		179	146	Fatigue failure at flank of the elbow
ELB02	50% full circumferential			10 ~ 7	183	0.51		319	85	Fatigue and buckling failure accompanied with ratchet deformation
ELB03	50% partial			10	182	0.50	231	102	Fatigue failure at flank of the elbow (thinned wall side) * A number of small cracks observed at the inner surface of nominal thickness side.	
ELB04	70% partial				320	0.88	177	91	Fatigue failure at ratchet deformation	
ELB05	50% full circumferential				152	0.43	264	78	Fatigue and buckling failure accompanied with ratchet deformation	
ELBI_01	No defect	I	Pin - Fixed support		66	0.19	185	134	Fatigue failure at flank of the elbow	
ELBO_01	No defect			62	0.18	300	137	No failure		
ELBO_02	50% full circumferential	O		152	0.43	40	105	Fatigue and buckling failure accompanied with ratchet deformation		
ELBM_01	50% full circumferential	I+O		162	0.43	34	90	Fatigue and buckling failure accompanied with ratchet deformation		

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

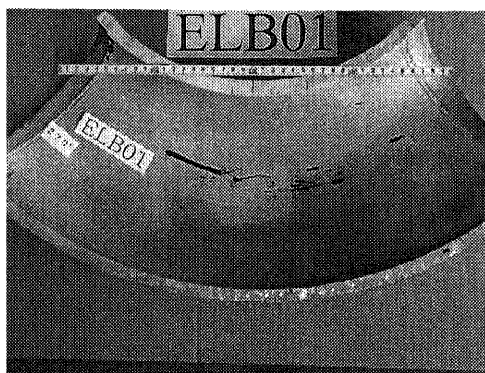
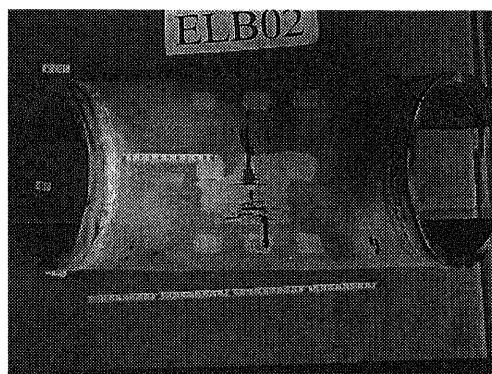
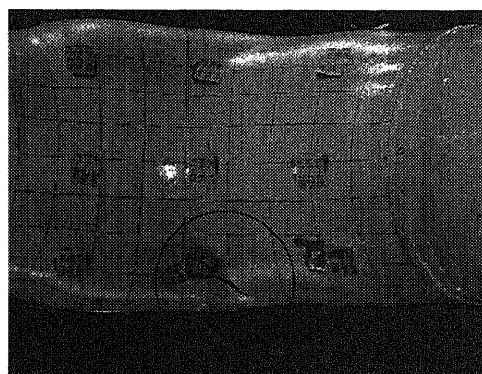


図 2.3.2-1 曲管脇部軸方向疲労き裂 (ELB01、浸透探傷試験結果)

Fig.2.3.2-1 Fatigue failure at a flank of the elbow (ELB01, the penetration test result).

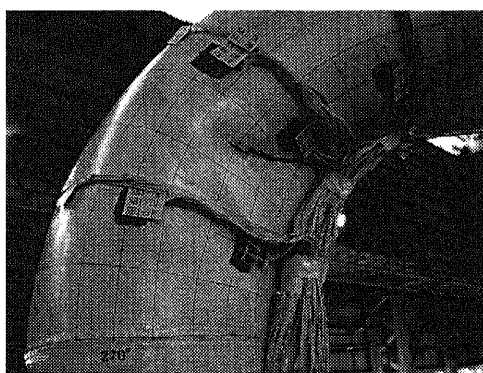


(a) ELB02.



(b) ELBO_02 (view from the intrados).

(the penetration test result, view from the intrados)



(c) ELBM_01.

図 2.3.2-2 ラチエット変形を伴う局所座屈の発生およびき裂貫通

Fig.2.3.2-2 Fatigue and buckling failure accompanied with ratchet deformation.

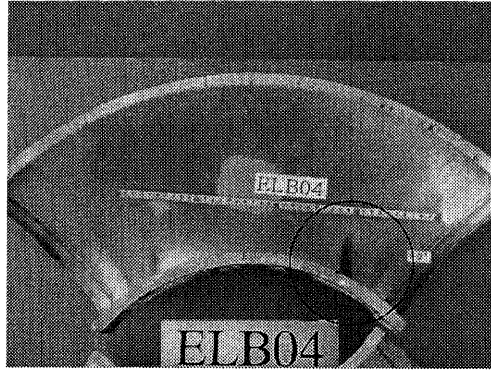
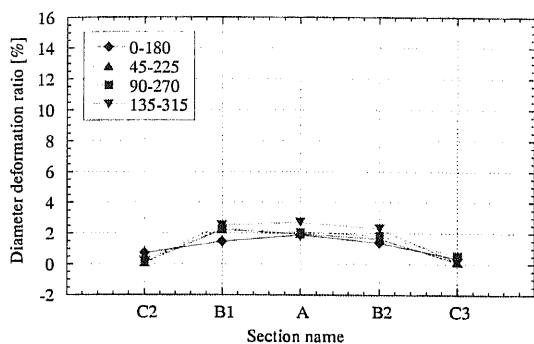
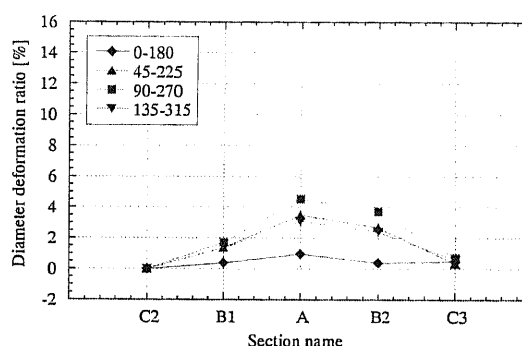


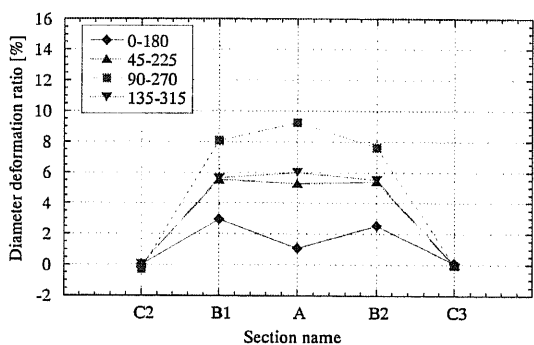
図 2.3.2-3 ラチェット変形部分の周方向き裂（ELB04、浸透探傷試験結果）
Fig.2.3.2-3 Fatigue cracks in circumferential direction at ratchet deformation
(ELB04, the penetration test result).



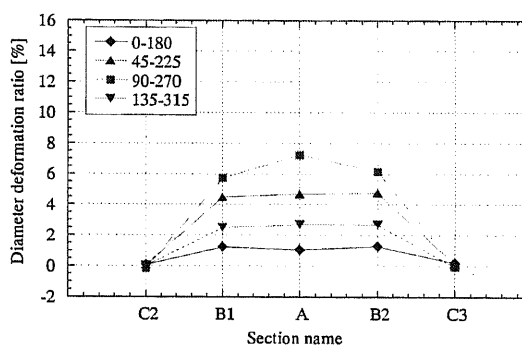
(a) ELB01.



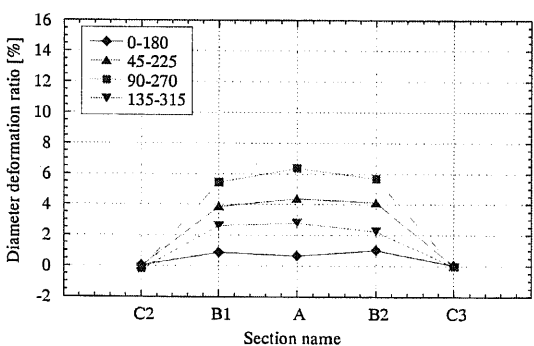
(b) ELBI_01.



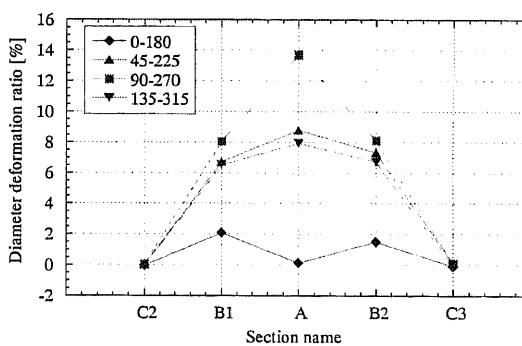
(c) ELB02.



(d) ELB03.



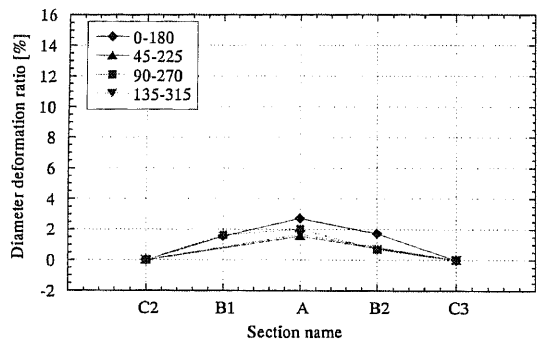
(e) ELB04.



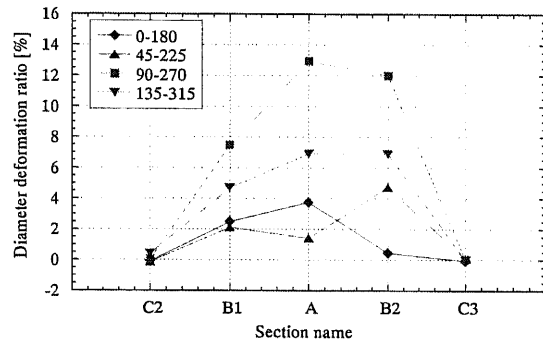
(f) ELB05.

図 2.3.2-4 面内曲げを行った試験体の外径変化率

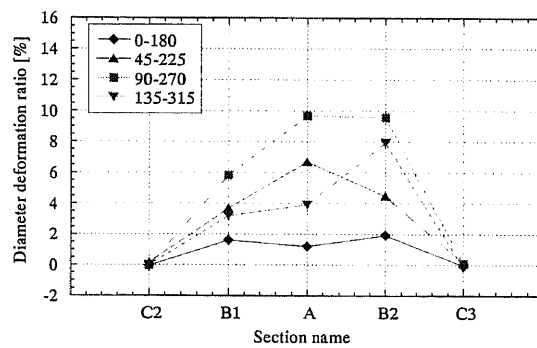
Fig.2.3.2-4 Diameter deformation ratio of specimens subjected to In-plane bending.



(a) ELBO_01.

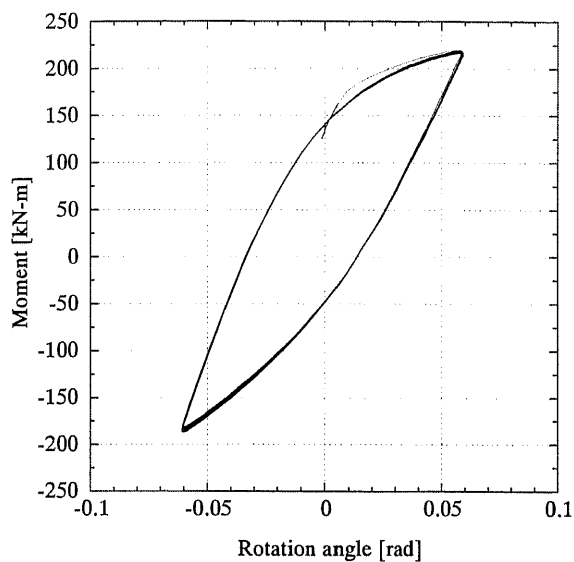


(b) ELBO_02.

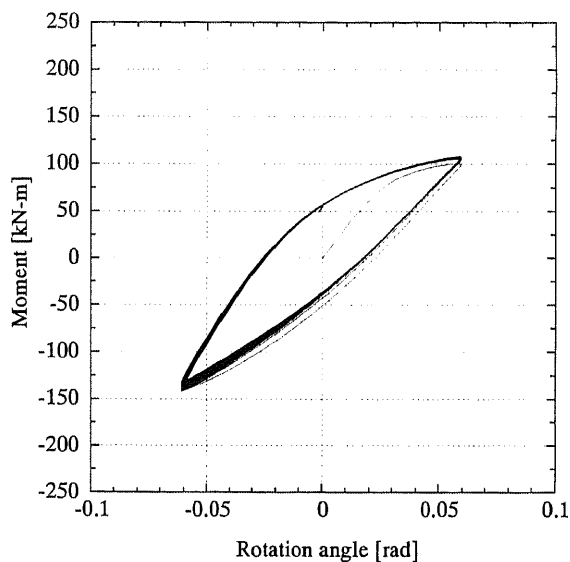


(c) ELBM_01.

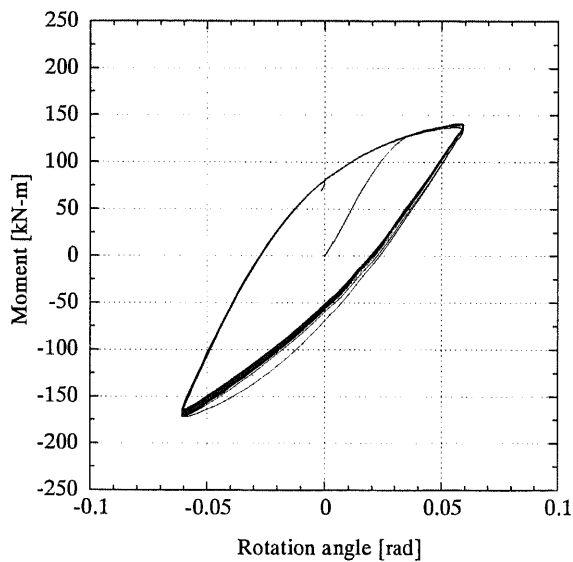
図 2.3.2-5 面外曲げまたは面内+面外曲げ試験を行った試験体の外径変化率
 Fig.2.3.2-5 Diameter deformation ratio of specimens subjected to Out-of-plane or In-plane & Out-of-plane bending.



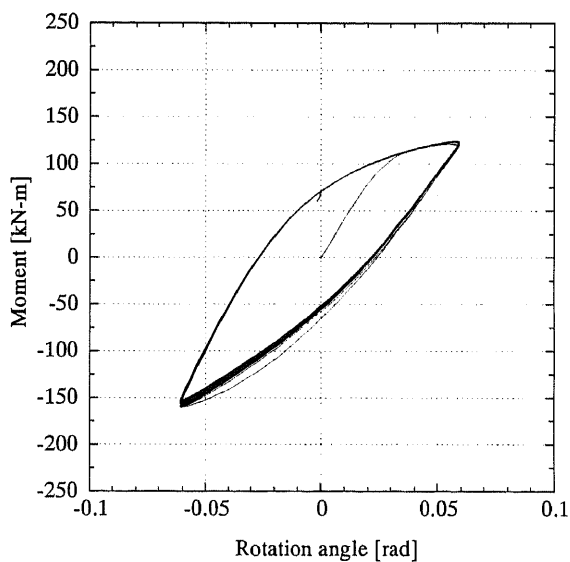
(a) ELB01 (No defect).



(b) ELB05 (50% full circumferential).



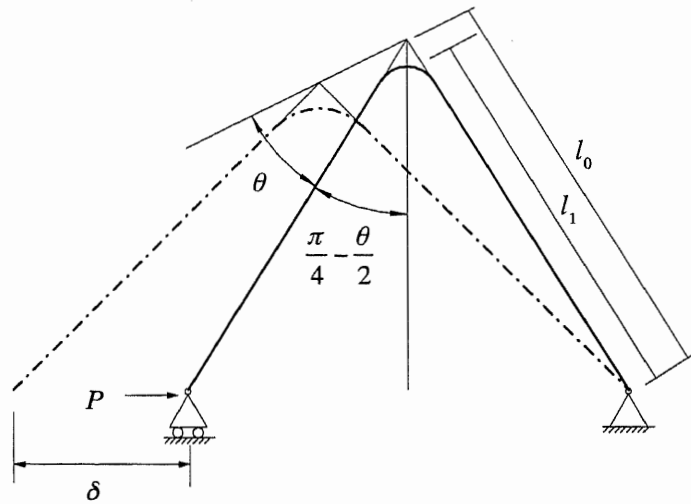
(c) ELB03 (50% partial).



(d) ELB04 (70% partial).

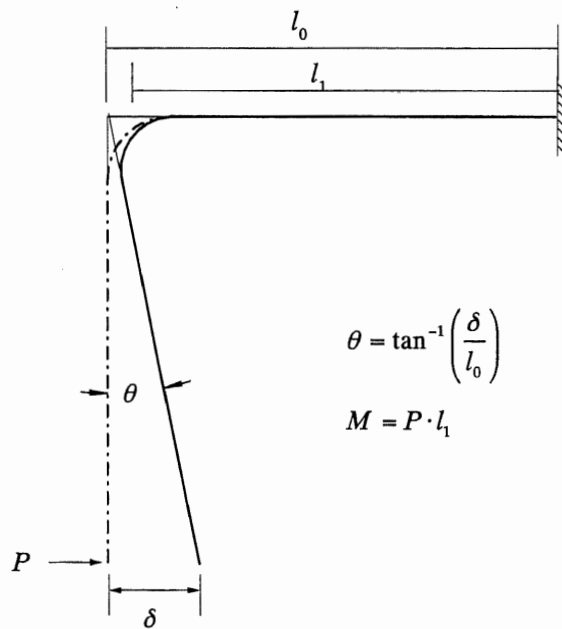
図 2.3.2-6 面内曲げ試験の回転角 - 曲げモーメント関係 (入力 70mm 1 回目)

Fig.2.3.2-6 Relation between rotation angle and bending moment of specimens under In-plane bending (at 70mm #01 loading).



$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2 \times \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}l_0 - \delta}{2l_0} \right), \quad M = P \cdot l_1 \cos \theta$$

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



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

$$M = P \cdot l_1$$

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

* In this series of tests, $l_0=1650\text{mm}$ and $l_1=1560.7\text{mm}$

図 2.3.2-7 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.2.3.2-7 A schematic illustration of bending moment and elbow deformation angle according to the type of test equipments.

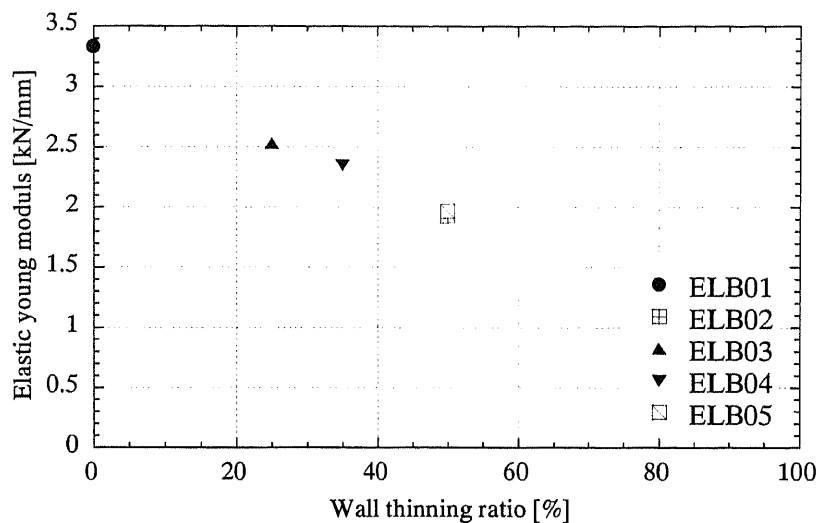


図 2.3.2-8 減肉割合と初期剛性の関係

Fig.2.3.2-8 Relation between wall thinning ratio and elastic stiffness.

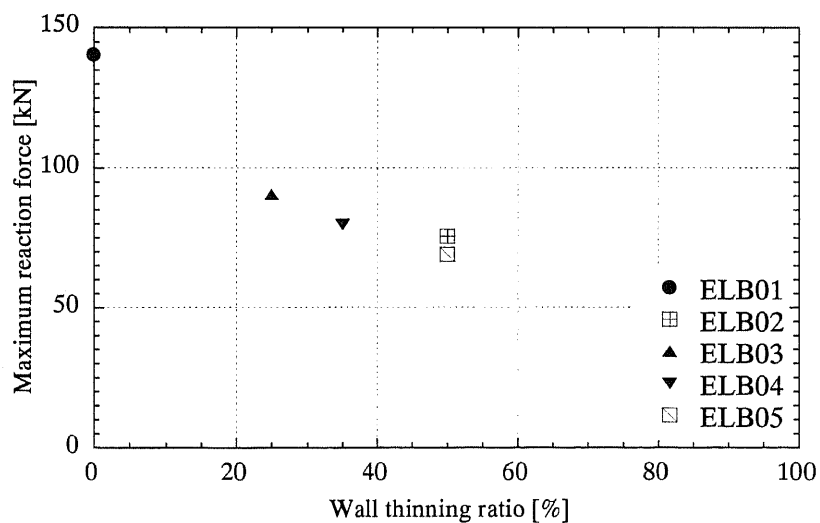
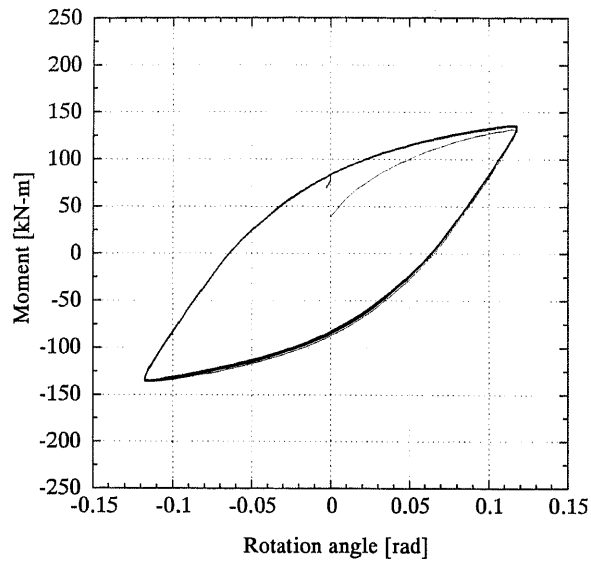
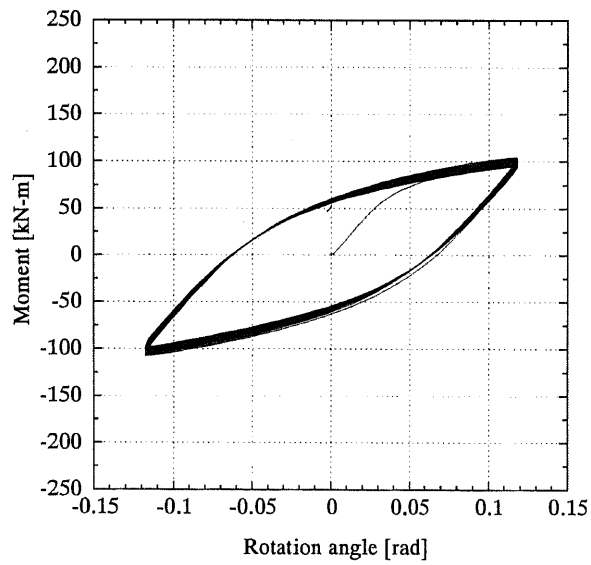


図 2.3.2-9 減肉割合と最大反力の関係

Fig.2.3.2-9 Relation between wall thinning ratio and max. reaction force.



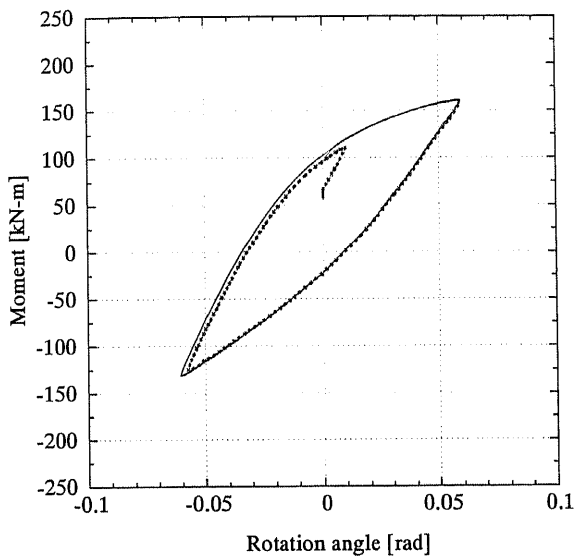
(a) ELBO_01 (No defect).



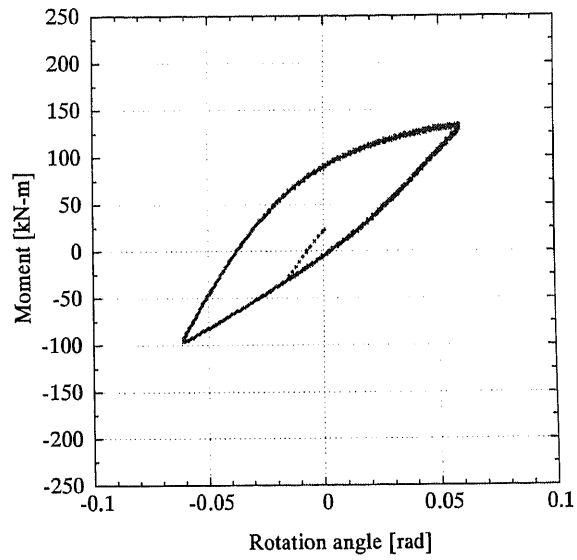
(b) ELBO_02 (50% full circumferential).

図 2.3.2-10 面外曲げ試験の回転角 - 曲げモーメント関係

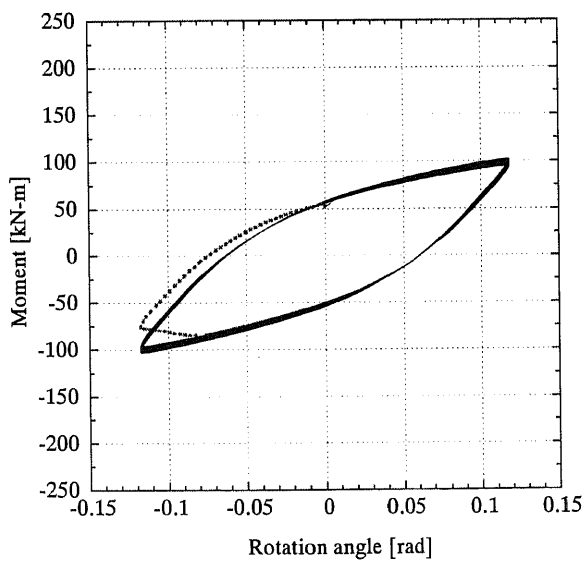
Fig.2.3.2-10 Relation between rotation angle and bending moment of specimens under Out-of-plane bending.



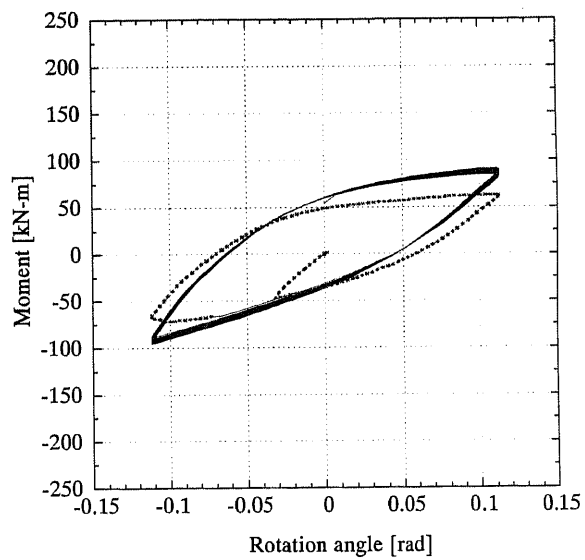
(a) ELB03.



(b) ELB05.

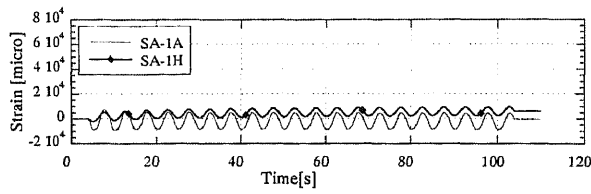


(c) ELBO_02.

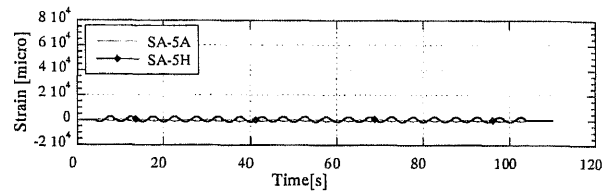


(d) ELBM_01.

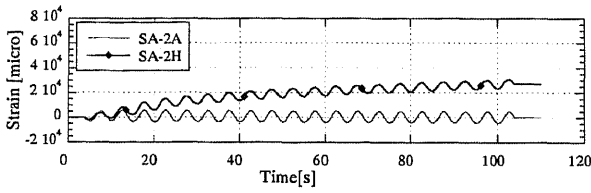
図 2.3.2-11 破損が生じたときの回転角 - 曲げモーメント関係
 Fig.2.3.2-11 Relation between rotation angle and bending moment at failure.



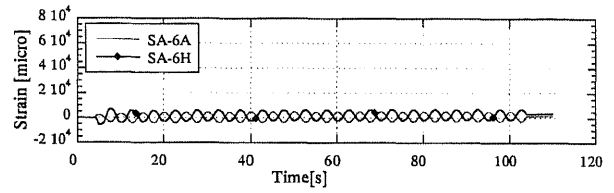
(a) SA-1.



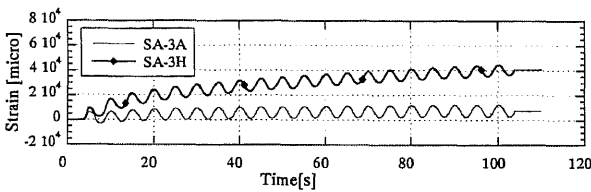
(f) SA-5.



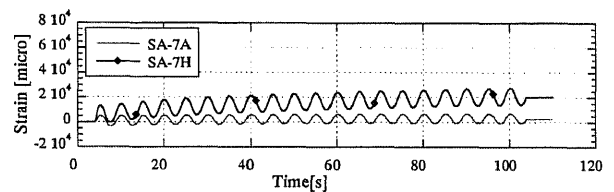
(b) SA-2.



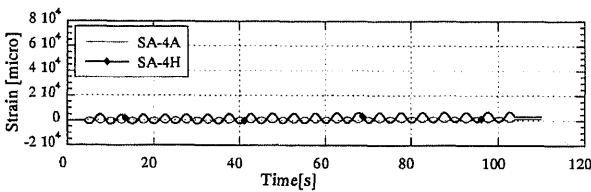
(g) SA-6.



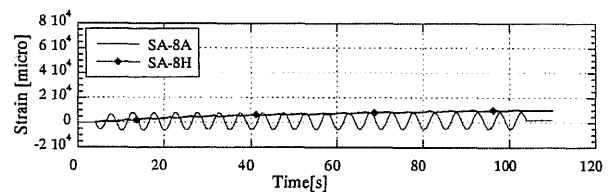
(c) SA-3.



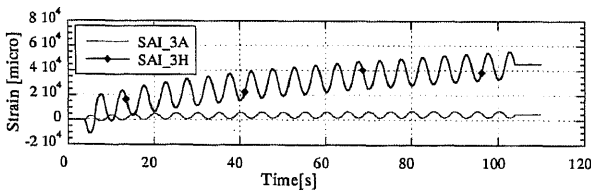
(h) SA-7.



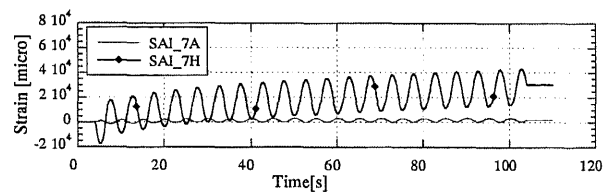
(d) SA-4



(i) SA-8.



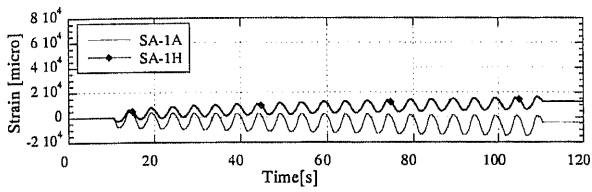
(e) SAI-3.



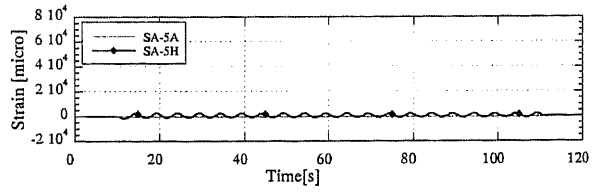
(j) SAI-7.

図 2.3.2-12 ELB03 弾塑性载荷 1 回目のひずみ履歴

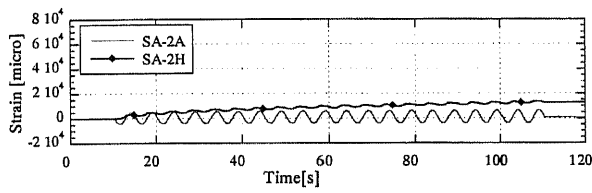
Fig.2.3.2-12 Strain time histories of ELB03 at 1st elastic-plastic cyclic load.



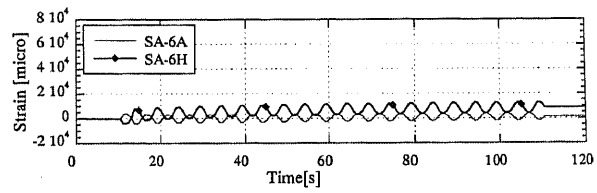
(a) SA-1.



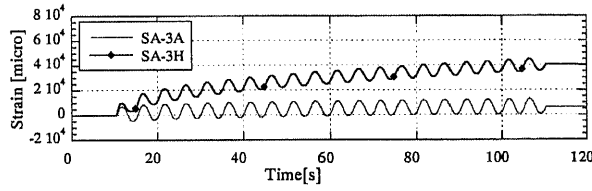
(f) SA-5.



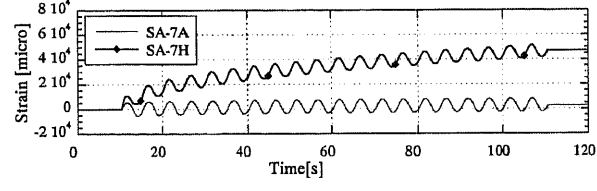
(b) SA-2.



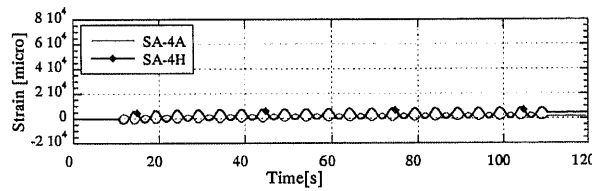
(g) SA-6.



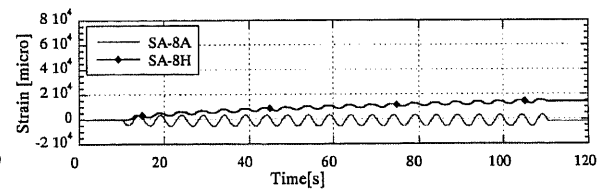
(c) SA-3.



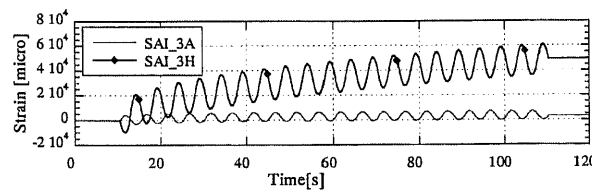
(h) SA-7.



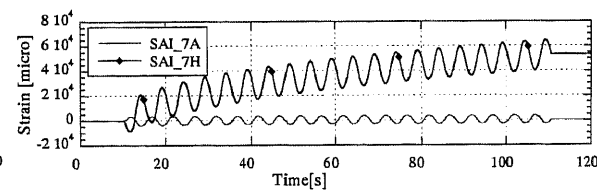
(d) SA-4.



(i) SA-8.



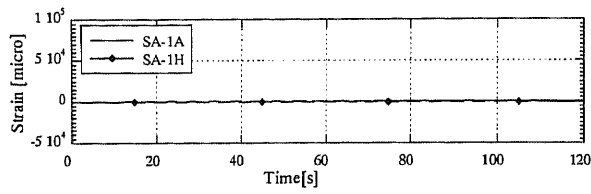
(e) SAI-3.



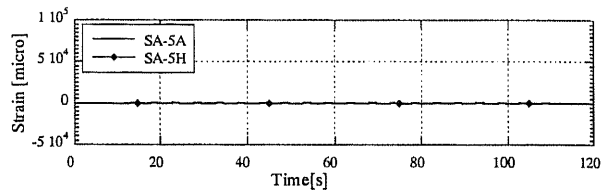
(j) SAI-7.

図 2.3.2-13 ELB05 弾塑性載荷 1 回目のひずみ履歴

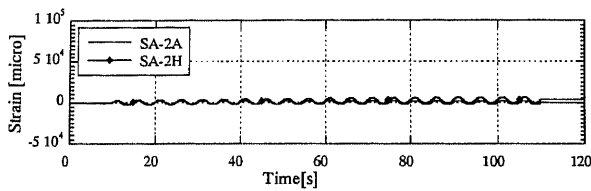
Fig.2.3.2-13 Strain time histories of ELB05 at 1st elastic-plastic cyclic load.



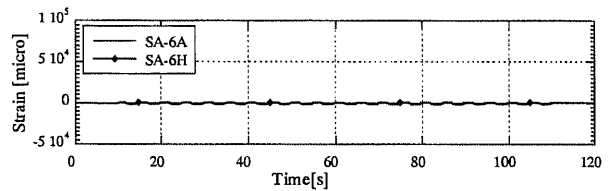
(a) SA-1.



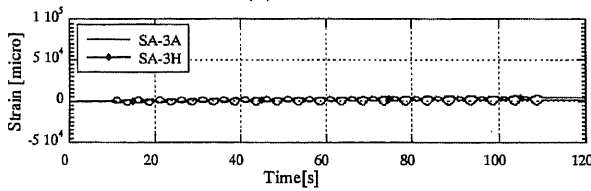
(f) SA-5.



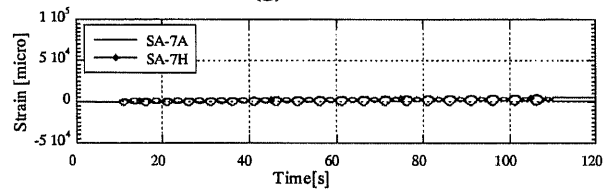
(b) SA-2.



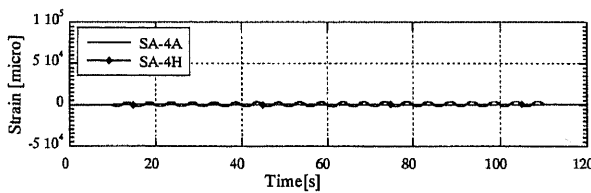
(g) SA-6.



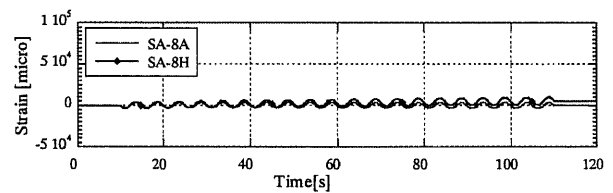
(c) SA-3.



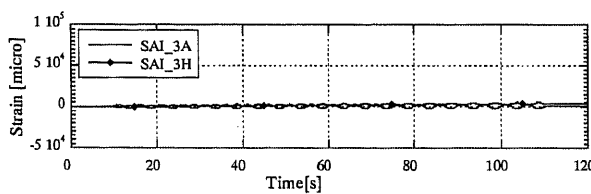
(h) SA-7.



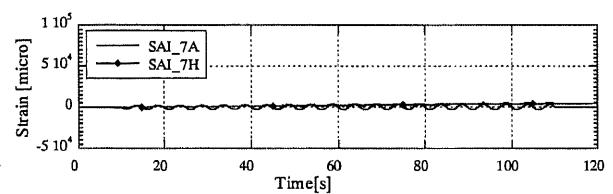
(d) SA-4.



(i) SA-8.



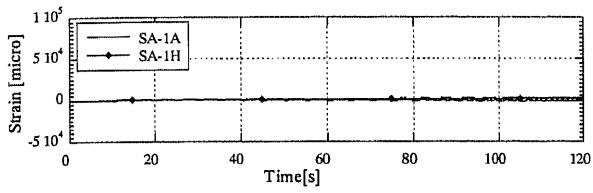
(e) SAI-3.



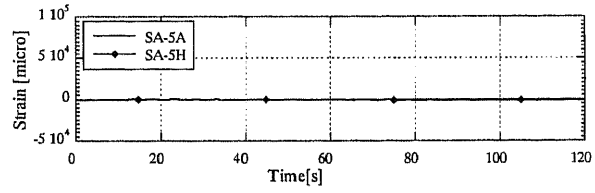
(j) SAI-7.

図 2.3.2-14 ELBO_01 弾塑性荷重 1 回目のひずみ履歴

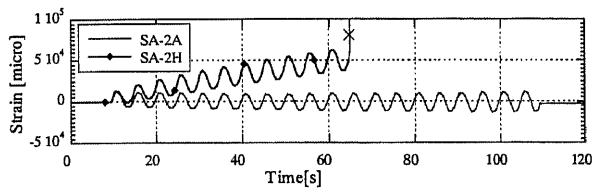
Fig.2.3.2-14 Strain time histories of ELBO_01 at 1st elastic-plastic cyclic load.



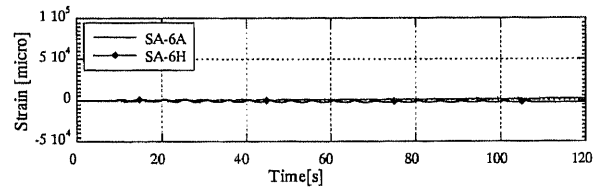
(a) SA-1.



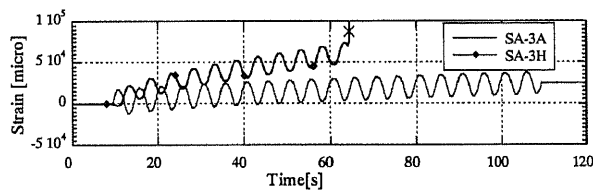
(f) SA-5.



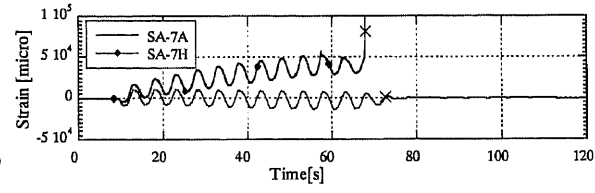
(b) SA-2.



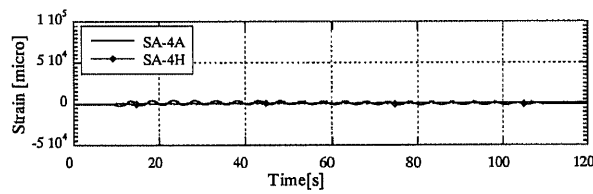
(g) SA-6.



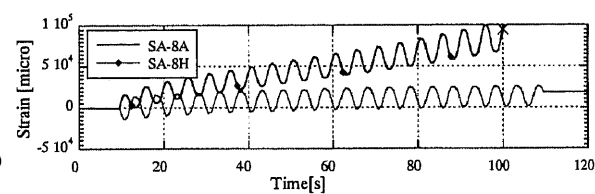
(c) SA-3.



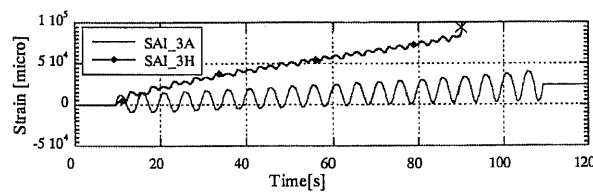
(h) SA-7.



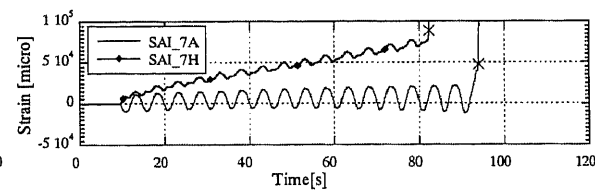
(d) SA-4.



(i) SA-8.



(e) SAI-3.

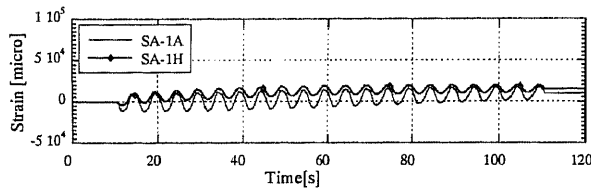


(j) SAI-7.

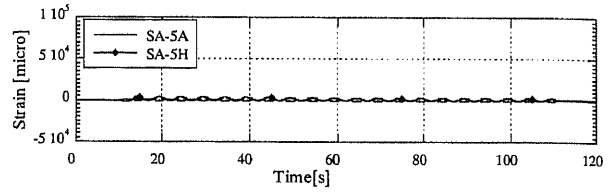
× : Strain gauge damaged

図 2.3.2-15 ELBO_02 弾塑性荷重 1 回目のひずみ履歴

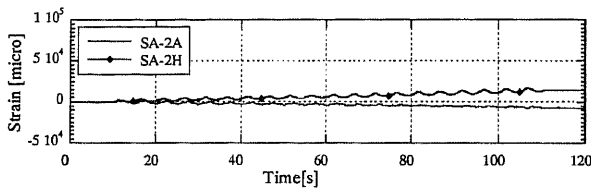
Fig.2.3.2-15 Strain time histories of ELBO_02 at 1st elastic-plastic cyclic load.



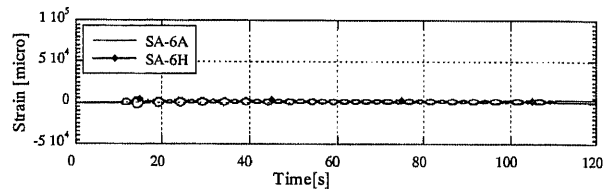
(a) SA-1.



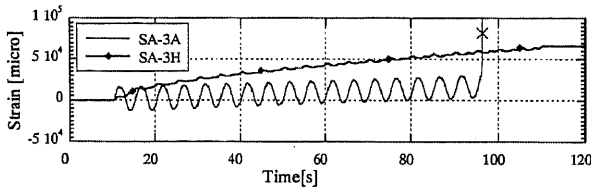
(f) SA-5.



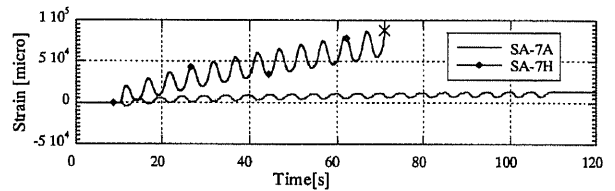
(b) SA-2.



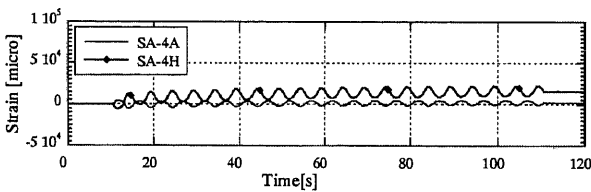
(g) SA-6.



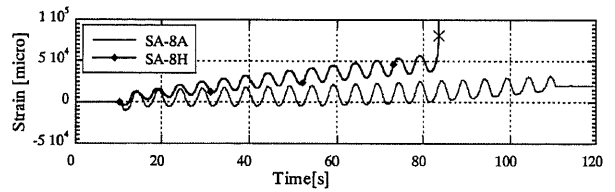
(c) SA-3.



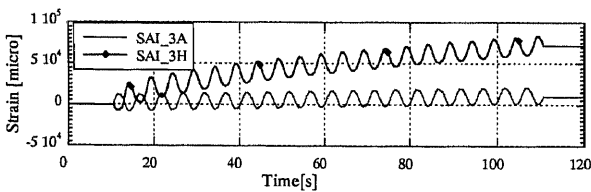
(h) SA-7.



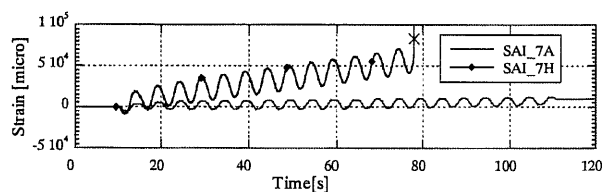
(d) SA-4.



(i) SA-8.



(e) SAI-3.

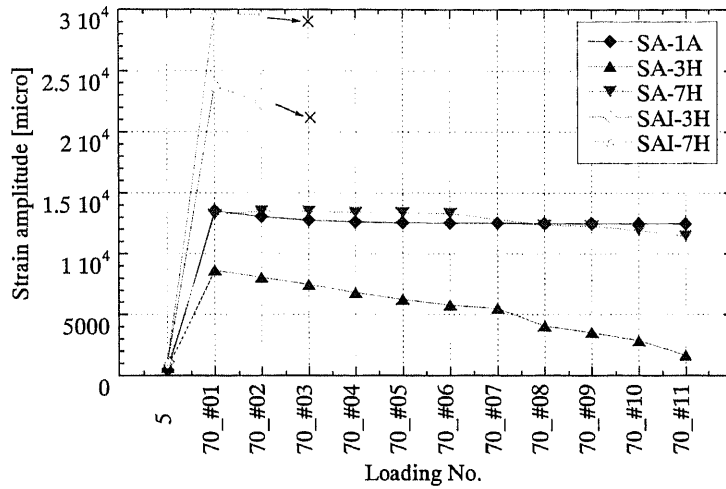


(j) SAI-7.

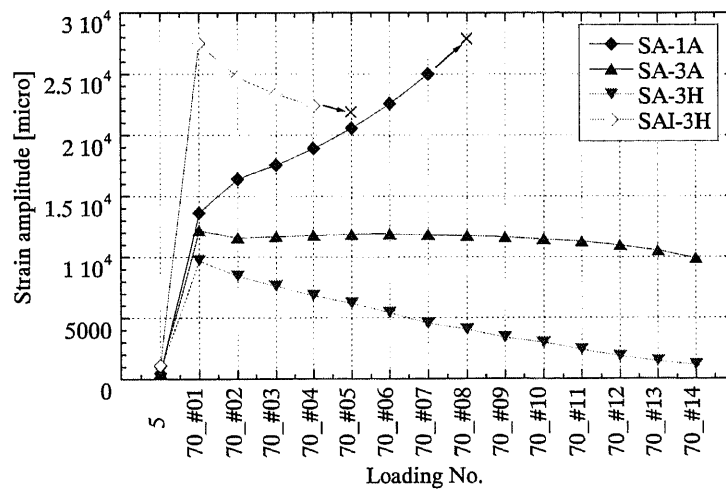
× : Strain gauge damaged

図 2.3.2-16 ELBM_01 弾塑性荷重 1 回目のひずみ履歴

Fig.2.3.2-16 Strain time histories of ELBM_01 at 1st elastic-plastic cyclic load.



(a) ELB03.



(b) ELB05.

× : Strain gauge damaged

図 2.3.2-17 ELB03 と ELB05 の载荷に伴うひずみ振幅の変化
 Fig.2.3.2-17 Strain amplitude transition of ELB03 and ELB05.

2.4 考察

直管要素試験の減肉試験体および曲管要素試験の結果から、減肉配管ではラチェット現象の発生が配管の最終破損形態に影響を与えることが明らかになった。これらの試験では、試験前後の外径計測結果から外径変化率を求めているが、この外径変化率はそれぞれの試験体で生じたラチェット現象の程度を示している。外径変化率は同じ減肉量では入力変位が大きいほど、入力変位が同じ場合は減肉量が大きいほど、あるいは内圧が高いほど大きくなる傾向があった。また、ELB02、ELB04、ELB05のように、大きな肉厚変化部のある位置では応力集中の効果によりラチェット現象による配管の変形が集中することが確認された。ラチェットは一方向の重畳応力が作用する条件下で、それと直交する方向に繰り返し負荷がかかる場合に発生するが、生じるラチェットひずみは重畳応力が大きいほど、また繰り返し負荷の振幅が大きいほど大きくなることが知られている⁹⁾。内圧の作用している配管で繰り返し負荷に伴いラチェット現象が発生することは過去の研究により知られていたが、減肉配管では配管の肉厚が減少することで内圧による重畳応力の効果が大きくなるためにラチェット現象の発生する程度は健全配管よりも大きくなると考えられる。また、局所的に減肉が発生し、健全肉厚部と減肉部が隣接するような場合、形状不連続による応力集中もラチェット現象の発生を促す効果があると考えられる。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、曲管要素試験の全周50%減肉試験体(ELB02、ELB05、ELBO_02、ELBM_01)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十分考慮する必要がある。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。以上のように、試験の結果からは、減肉配管で生じるラチェット現象は、作用荷重の大きさおよび種類、減肉量(内圧値)、減肉形状による応力集中に依存すると考えられ、今後はこれらの影響を定量的に評価していく必要がある。

曲管要素試験の結果より、曲管においては負荷荷重の種類にかかわらず、ひずみ振幅の大きい位置は脇～腹側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ていないことが明らかになった。また、このため、ラチェット現象も背側よりも腹側において大きく発生する。これらの結果から、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、検査によりこの位置に減肉が検出された場合は減肉の影響を十分評価する必要があると考えられる。

本研究では、減肉は全て機械加工で肉厚を低減することにより模擬しているためなめらかな表面形状となっているが、実際の減肉配管はピット状の腐食、肉厚の不規則な分布など複雑な形状となることが知られている^{10), 11)}。また、本研究では経年化による材質の変化は考慮していない。今後はこのような条件を考慮した試験を実施し、実際の腐食状況が破損形態に与える影響を把握する必要がある。き裂付き配管については、自然欠陥である SCC と人工欠陥である EDM き裂を使用して比較载荷を行い、SCCの方がEDM き裂よりも概して長寿命になるという結果が得られているが、疲労寿命にばらつきがあることを考慮すると、より多くの比較载荷を行い結果を蓄積する必要があると考えられる。

2.5 結論

き裂または減肉といった構造劣化部分がある配管要素単体に対する変位制御の繰り返し载荷を行った。その結果、き裂付き配管においては、き裂の大きさや種類（SCC と EDM き裂）の違いは配管の剛性にはほとんど影響しないことがわかった。また、自然き裂である SCC を、投影面積と等価な深さと断面積を持つ半楕円形の EDM き裂で模擬すると概して SCC の方が EDM き裂よりも長寿命になることがわかった。

減肉配管においては、減肉の程度に応じて剛性や反力が低下すること、また内圧と繰り返し応力の重畳によるラチェット現象が発生するため、減肉量や内圧条件、作用外力の条件により破損形態が変化することが明らかになった。

第3章 配管系振動試験

3.1 概要

き裂や減肉といった構造劣化を有する配管系について、そのような劣化部分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ために配管系振動試験を実施した。配管系振動試験では、振動台上に劣化部分を有する配管系を設置し加振実験を行った。試験では配管系の形状や導入する劣化の種類、劣化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。また、劣化条件は減肉またはEDMき裂とした。

3.2 平面配管系試験

3.2.1 試験方法

3.2.1.1 試験体の概要

図3.2.1-1に平面配管系試験で使用した試験体の形状を示す。試験体は劣化を導入する部分（部分A）と、劣化を導入しない部分（部分B）に分かれ、フランジで接合した。接合部分のフランジは閉止してあり、部分Aと部分Bの配管経路は分離している。平面配管系試験で導入した劣化条件は直管部減肉および曲管（エルボ）部減肉の2種類とした。また、比較のために劣化部分のない健全試験体についても加振実験を行った。使用した配管の種類は高温配管用炭素鋼鋼管STPT370で、配管口径は100Aとした。肉厚は、試験体部分である部分Aではsch80（肉厚8.6mm）、部分Bではsch120（肉厚11.1mm）とした。部分Bは全ての試験で共通に使用し、部分Aを交換することにより異なる劣化条件の試験を実施した。試験で使用した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：2D_A01

劣化条件：劣化なし

(2) 試験体名：2D_B01

劣化条件：直管部減肉

図3.2.1-1に示した位置の直管部分の肉厚を機械加工により通常肉厚の50%に低減し、全周減肉を模擬した。直管部分の減肉形状は図2.2.1-5(a)に示した要素配管試験の全周減肉試験体と同形状である。

(3) 試験体名：2D_C01

劣化条件：曲管部減肉

図3.2.1-1に示したエルボ1をsch40の曲管とすることにより全周減肉を模擬した。Sch40の曲管の肉厚は公称6.0mmであり、減肉量は30%となる。図3.2.1-2にエルボ1部分の形状を示す。

表3.2.1-1に試験体の特性をまとめて示す。また、図3.2.1-3に固有値解析で求めた2D_A01の固有振動数と振動モードを示す。試験体の一次固有振動モードで支配的な変形はエルボ1、2、3の面内変形であり、健全状態の場合、最大応力が発生するのはエルボ1であるが、エルボ2の応力もほぼ同程度であった。

3.2.1.2 加振条件

3.2.1.1で述べた配管系試験体に対して、防災科学技術研究所の一次元大型振動台を用いて加振実験を行った。入力加速度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、2.5Hz～3.5Hzの狭帯域ランダム波を作成して使用した。図3.2.1-4に試験で使用した狭帯域ランダム波の加速度時刻歴波形と応答スペクトルを示す。実験ではこの狭帯域ランダム波の入力レベルを弾性レベル（約120Gal程度まで）から最大1600Gal程度まで増加させ、各入力レベルにおける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。健全配管系試験体については各加振レベルで5回ずつ加振を行い、応答性状を取得するのみで破損させずに試験を終了させた。

試験体の部分Aには常温水を満たし、11MPaの内圧を負荷した。部分Bは内圧なし（内部水なし）で試験を行った。試験では、試験体が損傷し内部水の漏洩を目視確認した時点で振動台の入力を終了させた。

3.2.1.3 計測

実験では以下の項目を計測した。

- (1) 振動台加速度
- (2) 試験体の応答加速度
- (3) 中央部応答変位（振動台との相対変位）
- (4) 内圧
- (5) 試験体外表面の軸方向および周方向ひずみ

図3.2.1-5に試験体の計測点を示す。これらは全て500Hzのサンプリング周波数で収録

した。また、この他に、試験の前後において曲管部分および減肉導入部分の配管外径を測定した。

表 3.2.1-1 平面配管系試験体一覧

Table 3.2.1-1 Test models for 2-D piping system tests.

Name	Material	S_y [MPa]	S_u [MPa]	S_m [MPa]	Internal pressure (P) [MPa]	Condition of defect		
						Type	Configuration	Defected part (See Fig. 3.2.1-1)
2D_A01	STPT370	302	473	158	11	No defect	---	---
2D_B01						Wall thinning	Full circumferential thinning Depth : $0.5 t^*$	Straight pipe near the anchor
2D_C01						Wall thinning	Full circumferential thinning Depth : $0.3 t^*$	Elbow 1

* 't' denotes the normal pipe thickness

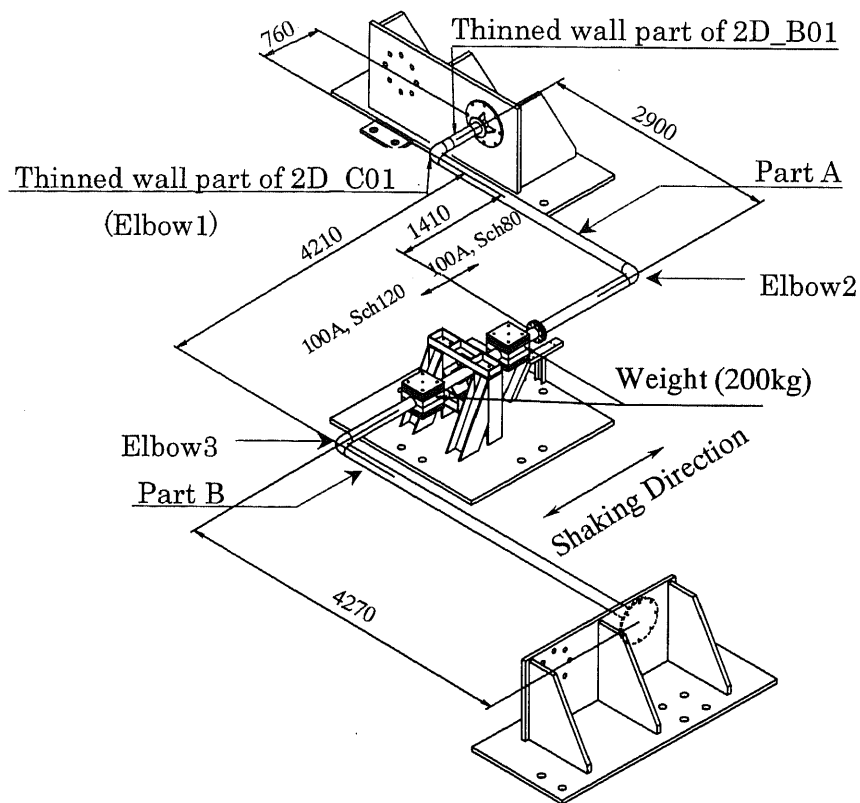


図 3.2.1-1 平面配管系試験 試験体形状
 Fig.3.2.1-1 2-D piping model for piping system test.

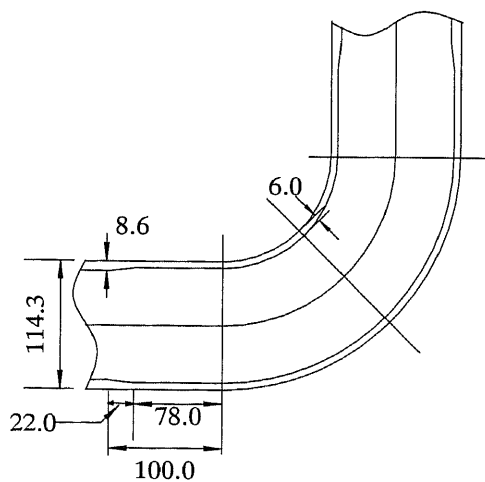


図 3.2.1-2 曲管減肉部分の形状
 Fig.3.2.1-2 Cross section of thinned wall elbows in longitudinal direction.

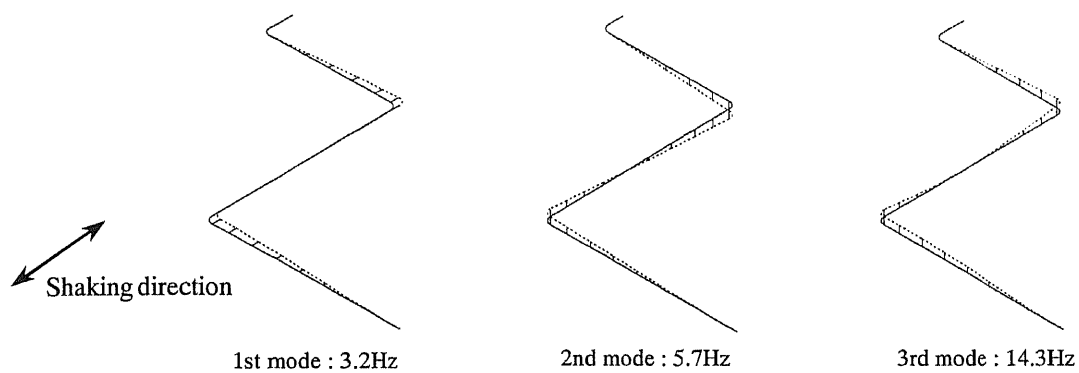
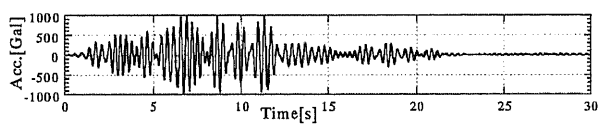
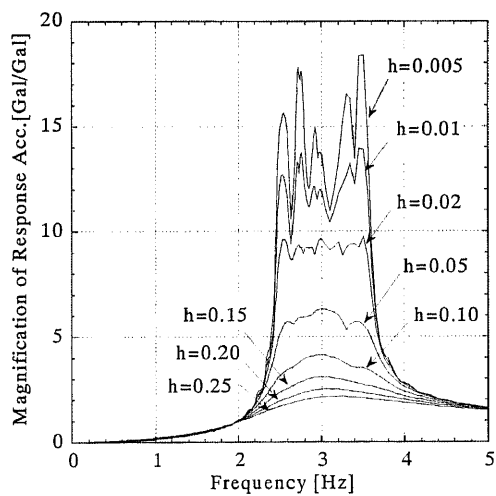


図 3.2.1-3 平面配管系試験体の振動モード
 Fig.3.2.1-3 The vibration mode of the 2-D piping model.



(a) Time history of input acceleration.



(b) Response spectrum (h: damping ratio).

図 3.2.1-4 平面配管系試験で使した狭帯域ランダム波
 Fig.3.2.1-4 Narrow band random wave used for the piping system test of the 2-D piping model.

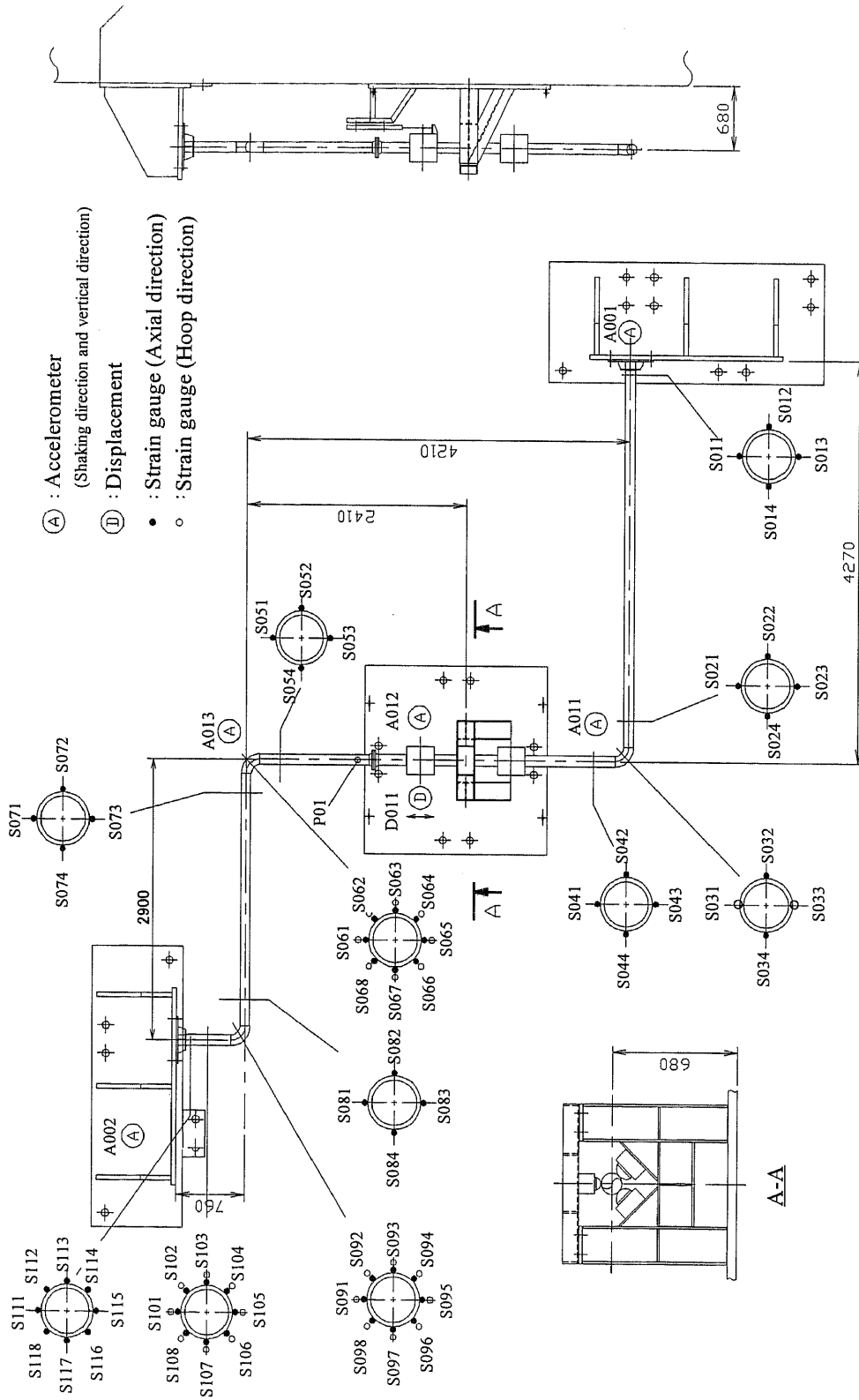


图 3.2.1-5 平面配管系試験体 計測点
 Fig.3.2.1-5 Measurement points of the 2-D piping model.

3.2.2 試験結果

3.2.2.1 破損状況

平面配管系試験の試験結果を表3.2.2-1に示す。各試験体の破損状況は以下のようになった。

(1) 健全試験体 (2D_A01)

スイープ加振から得られた一次固有振動数は3.35Hzであった。また、スイープ加振で得られた伝達関数より求めた減衰比は0.4%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として、入力レベル400Gal、700Gal、1300Galの加振をそれぞれ5回実施し、弾塑性域における応答特性を取得して試験を終了した。加振実験中に試験体の破損は生じなかった。また、実験後、試験体の3箇所曲管を切り出し、その内面の浸透探傷(PT)検査を実施した結果、き裂の発生は認められなかった。

(2) 直管部減肉試験体 (2D_B01)

スイープ加振から得られた一次固有振動数は3.28Hz、また減衰比は0.42%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入力レベル400Gal、1200Galの加振をそれぞれ5回実施した。その後試験体が破損するまで入力加速度1600Galの加振を繰り返した。その結果、1600Galの22回目の加振において、試験体のA001アンカ部近傍において周方向き裂が発生し、破断寸前となっていることが確認された。図3.2.2-1にこのときの破損状況を示す。このアンカ部近傍の配管には試験体の振動応答により曲げモーメントが大きくなる位置に圧力センサ設置用の台座が溶接されており、その隅肉溶接部分からき裂が発生し、周方向に進展したものと考えられる。破損部近傍で計測したひずみを確認したところ、1600Galでの加振3回目より出力異常が生じていた。従って、この破損は入力レベル1600Galの加振3回目より発生しており、加振の繰り返しによりき裂が進展し、22回目の加振で破断に近い状態に至ったと推察される。

上記のアンカ部近傍における破損のあと、破損部を切り出し、その部分へ別の配管を溶接することで補修を行った。補修後、1600Galでの加振を再開した結果、28回目の加振においてエルボ2の下面側部(図3.2.1-5におけるS065-S066の位置、以下S065側)で微少なき裂の貫通による少量の内部水漏洩が確認された。さらに加振を継続し、29回目の加振において、この位置で軸方向き裂が進展し、内部水の噴出が生じた。図3.2.2-2に破損状況を示す。本試験体で直管に導入した

全周50%減肉部分については、ラチェット変形が発生し、顕著な膨らみが確認されたがこの部分での破損は生じなかった。図3.2.2-3に直管減肉部分の変形状況を示す。

試験後、全ての曲管および直管減肉部分を切り出し、内面のPT検査を実施した。その結果を図3.2.2-4に示す。図3.2.2-4に示したように、き裂貫通部であるエルボ2のS065側内面においては、外面よりも広い範囲にわたり軸方向き裂の発生が確認された。また、き裂が貫通しなかった側の曲管脇部（図3.2.1-5のS061側）においても内面に軸方向き裂の発生が確認された。このことから、エルボ2の軸方向き裂は内面から発生し、外面に向けて進展、貫通に至ったものと考えられる。この試験体では、エルボ1の内面においても脇部に軸方向き裂の発生が確認された。全周50%減肉を導入した直管部分では、外径の膨らみは顕著であったが、き裂の発生は確認されなかった。直管部の膨らみはこの位置における曲げ剛性を大きくする効果および断面係数を大きくする効果があり、ラチェットにより配管外径が大きくなることで、曲げ変形とそれにより生じる応力が小さくなり、き裂が発生しなかったものと考えられる。

(3) 曲管部減肉試験体 (2D_C01)

スイープ加振から得られた一次固有振動数は3.22Hz、減衰比は0.45%であった。弾性域レベルでの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。入力レベル400Galの加振を10回、1200Galの加振を5回実施したあと、1600Galでの加振を破損まで繰り返した。その結果、1600Galの加振27回目において、減肉曲管であるエルボ1でき裂が貫通した。破損状況を図3.2.2-5に示す。

試験後、全ての曲管を切り出し内面のPT検査を実施した。その結果、き裂が貫通したエルボ1の他、健全配管であるエルボ2の内面においても脇部に軸方向き裂の発生が確認された。図3.2.2-6にPT探傷結果を示す。

3.2.2.2 劣化条件と応答値の関係

実験から得られた一次固有振動数は、健全試験体(2D_A01)で3.35Hz、直管部減肉試験体(2D_B01)で3.28Hz、曲管部減肉試験体で3.22Hzとなり、2D_A01と比較して2D_B01では約2%、2D_C01では約4%の振動数の低下が認められた。これは減肉があることで系の剛性が低下するためと考えられる。2D_B01と2D_C01の減肉量はそれぞれ50%、30%であり、2D_B01の減肉量が大きいが、固有振動数の低下率は2D_C01の方が大きい。減肉を付与した位置は図3.2.1-1に示したとおり両試験体ともアンカA002近傍

であり、振動応答により発生するモーメントのレベルはほぼ同等であると考えられる。2D_C01の固有振動数が減肉量の大きい2D_B01のものよりも低い値となったのは、曲管における面内曲げ剛性が、減肉を付与した直管部の曲げ剛性よりも試験体全体のモード剛性に与える影響が大きいためと考えられる。このことから、曲管における減肉は、直管部に減肉がある場合よりも固有振動数の変化に与える影響が大きいと考えられる。

弾塑性レベルの加振では、試験体の一部が塑性域に入り剛性が低下するために、振動応答の卓越振動数が低下する。図3.2.2-7(a)に入力加速度と卓越振動数との関係を、図3.2.2-7(b)に卓越振動数の低下率を示す。試験では試験体中央の重錘部で配管系の応答変位（振動台との相対変位）を計測しているが、この応答変位の最大応答発生時点1サイクルを抽出し、その逆数として試験体の卓越振動数を定めた。また、卓越振動数の低下率は、2D_A01の弾性域レベルの加振で得られた卓越振動数を基準として、それぞれの試験体の各加振レベルにおける卓越振動数を基準の振動数で除して求めたものである。図3.2.2-7に示したように、配管系の卓越振動数は入力加速度の増加とともに低下し、最大入力レベルで各試験体とも約2.8～3.0Hzとなっていた。最大入力レベルにおける卓越振動数は、配管系が健全である場合の弾性域における固有振動数と比較すると約10～12%低下していた。振動数の低下傾向は全ての試験体で同様であり、減肉の有無や位置の影響は明確ではなかった。

図3.2.2-8に入力加速度と試験体の中央重錘部分で計測した応答加速度との関係を、図3.2.2-9に入力加速度と応答変位の関係を示す。図3.2.2-8および図3.2.2-9に示すように、入力レベルの大きい加振では最大応答加速度および最大応答変位ともに入力加速度の増加率に対し応答の増加率が低くなる傾向が認められる。これは、試験体の塑性変形に伴い振動エネルギーが消費されたためと考えられる。本試験結果では、入力レベルと最大応答の関係において、振動数の低下傾向と同様、減肉の有無や減肉の存在位置による弾塑性応答の傾向の違いは確認されなかった。

3.2.2.3 外径変化

健全試験体2D_A01、直管減肉試験体2D_B01、曲管減肉試験体2D_C01での主要部分の外径変化率を図3.2.2-10に示す。ここで、外径変化率は試験後の外径から試験前の外径の差をとり、試験前の外径で除した値としている。図3.2.2-10に示したように、健全試験体では外径変化がほとんどなく、直管部減肉試験体および曲管部減肉試験体では減肉部分の外径変化が大きいことがわかる。2D_B01では、減肉部分でラチェット変形

により 10% 以上の外径の増加が確認されたにもかかわらず、3.2.2.1 で述べたように疲労き裂の発生は確認されなかった。直管減肉部の外径増加は、配管の曲げに対する剛性を高める効果があるため、曲げにより生じる配管軸方向ひずみの振幅が加振を繰り返すとともに小さくなっていったと推察される。一方 2D_C01 では、減肉曲管であるエルボ 1 の面外方向の外径増加率は約 2% 程度であった。

表 3.2.2-1 平面配管系 試驗結果

Table 3.2.2-1 Test results of 2-D piping system tests.

Name	Condition of defect		Internal pressure (P) [MPa]	Natural frequency (f) and damping ratio (h) at 1st mode	Contents of the excitation test by narrow band random wave		Test results
	Type	Depth*			Max. input acc. [Gal]	Number of times	
2D_A01	No defect	0	11	$f = 3.35$ [Hz] $h = 0.0044$	30 - 120 (Elastic level)	10	* No failure occurred after 5 excitation tests with an input level of 1300Gal. * Small cracks were observed on the inner surface of the elbows.
					400	5	
					700	5	
					1300	5	
2D_B01	Wall thinning at straight pipe	0.5t	11	$f = 3.28$ [Hz] $h = 0.0042$	30 - 120 (Elastic level)	7	* A fatigue crack penetrated at Elbow 2. * Thinned wall part swelled because of ratchet but no crack appeared on the inner surface. * Small cracks were observed on the inner surface of the elbows.
					400	5	
					1200	5	
					1600	29	
2D_C01	Wall thinning of Elbow1	0.3t	11	$f = 3.22$ [Hz] $h = 0.0045$	30 - 120 (Elastic level)	5	* A fatigue crack penetrated at Elbow 1 (the thinned wall elbow). * Small cracks were observed on the inner surface of the elbows.
					400	10	
					1200	5	
					1600	27	

* 't' denotes the normal pipe thickness

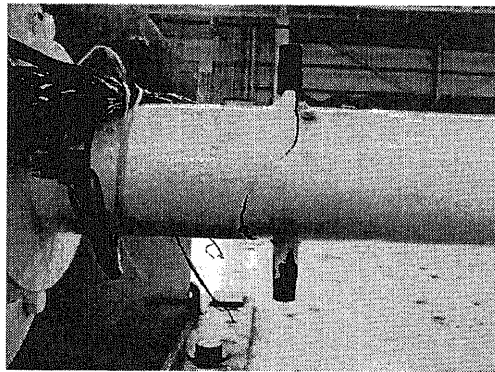
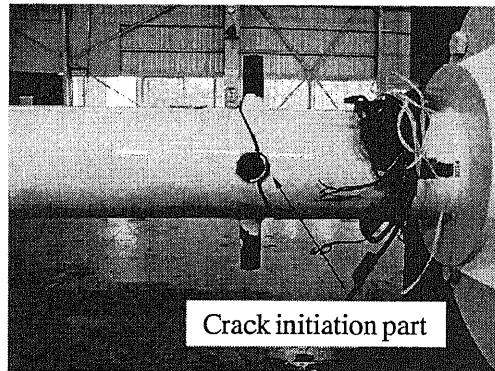


図 3.2.2-1 2D_B01 におけるアンカ近傍での破損
Fig. 3.2.2-1 Unexpected break of pipe near an anchor on the test of 2D_B01.

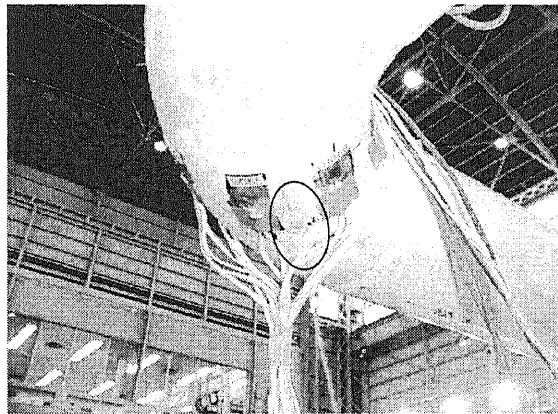
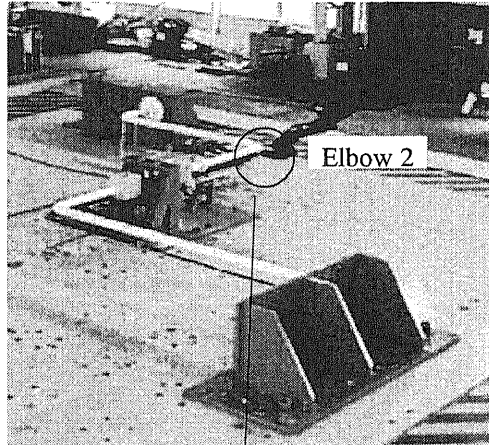


図 3.2.2-2 エルボ 2 でのき裂貫通 (2D_B01)

Fig. 3.2.2-2 Penetration of the crack on Elbow 2 of 2D_B01.

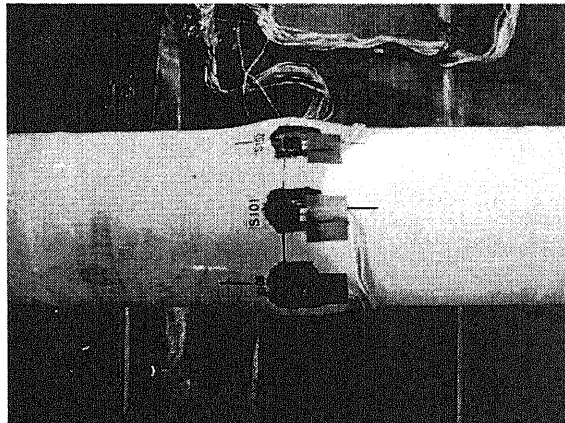
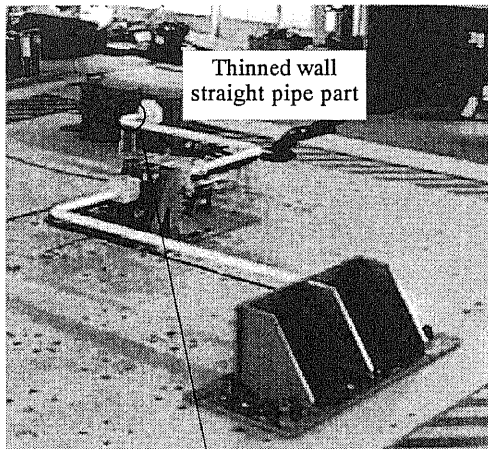
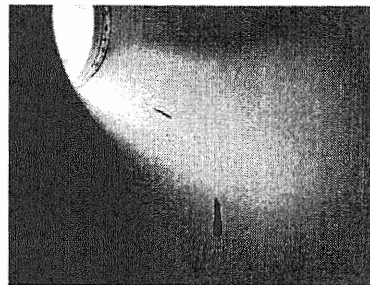
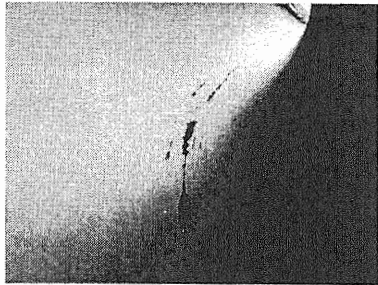
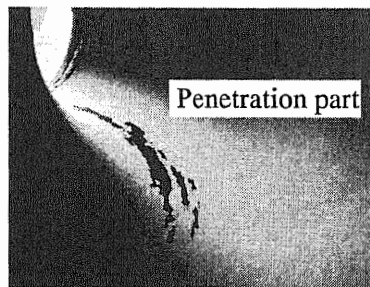
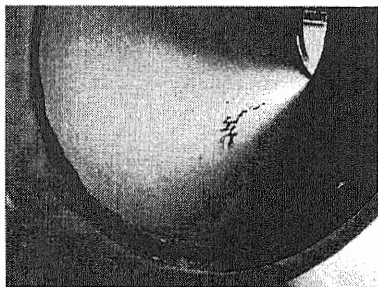


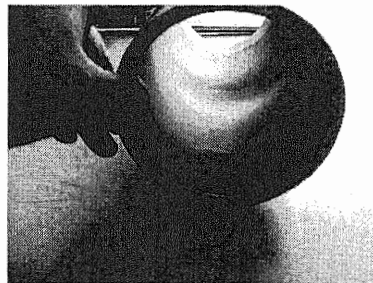
図 3.2.2-3 2D_B01 における減肉部分の膨らみ
Fig. 3.2.2-3 Bulge of the thinned wall part of 2D_B01.



(a) Crack on side inner surface of Elbow 1.



(b) Crack on side inner surface of Elbow 2.



(c) No crack on thinned wall straight pipe part.

図 3.2.2-4 2D_B01 の浸透探傷試験結果
Fig. 3.2.2-4 Penetration test results of 2D_B01.

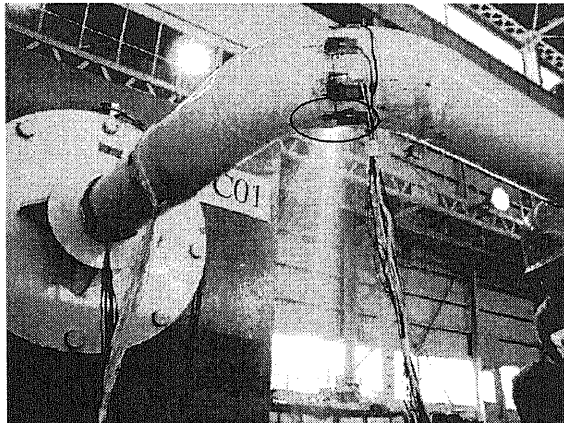
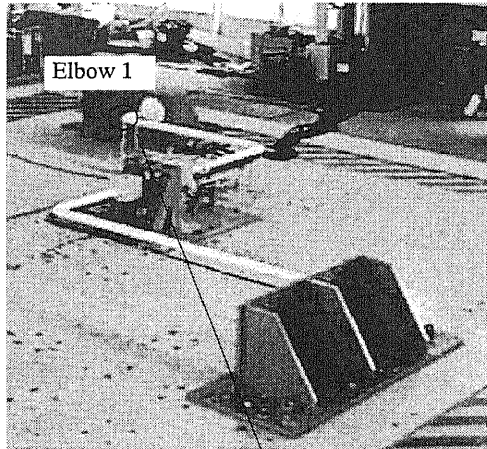
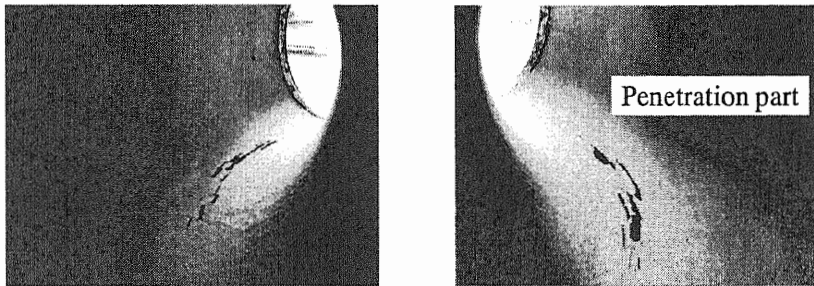
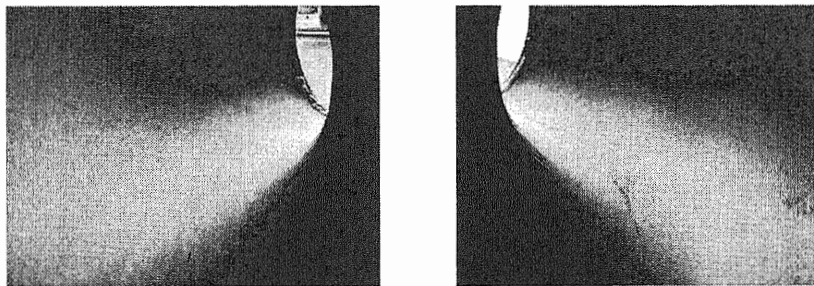


図3.2.2-5 エルボ1（減肉エルボ）におけるき裂貫通（2D_C01）
Fig. 3.2.2-5 Penetration of crack on Elbow 1 (thinned wall elbow) of 2D_C01.

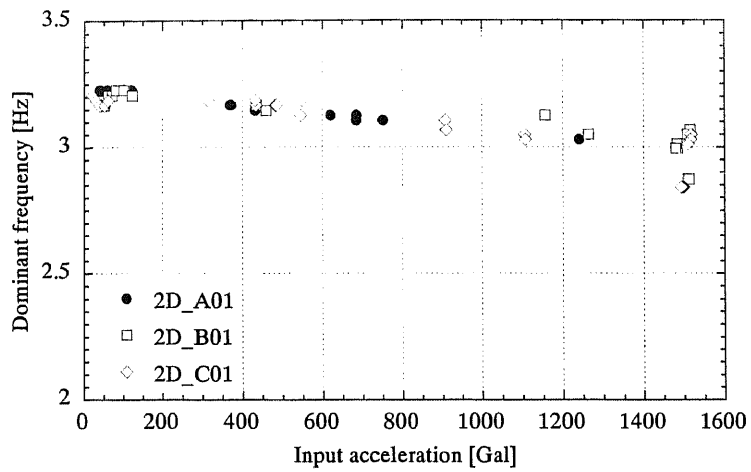


(a) Crack on side inner surface of Elbow 1.

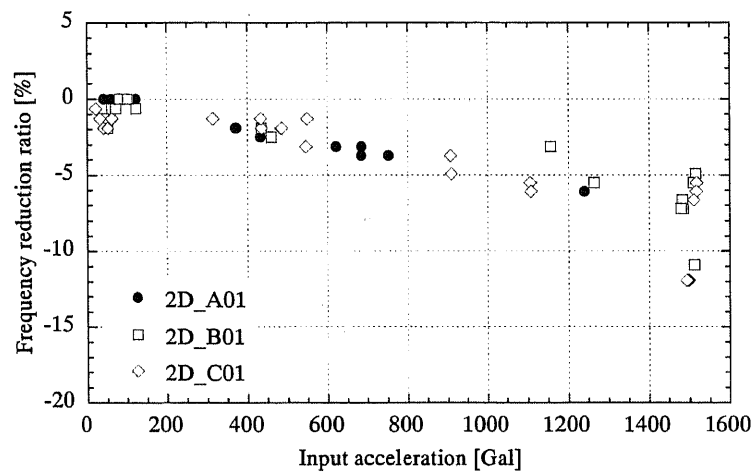


(b) Small crack on side inner surface of Elbow 2.

図 3.2.2-6 2D_C01 の浸透探傷試験結果
Fig. 3.2.2-6 Penetration test results of 2D_C01.



(a) Dominant frequency at each input acceleration.



(b) Frequency reduction ratio.

図 3.2.2-7 入力加速度と最大応答時点における卓越振動数の関係

Fig. 3.2.2-7 Relation between the max. input acc. and the dominant frequency at the max. response.

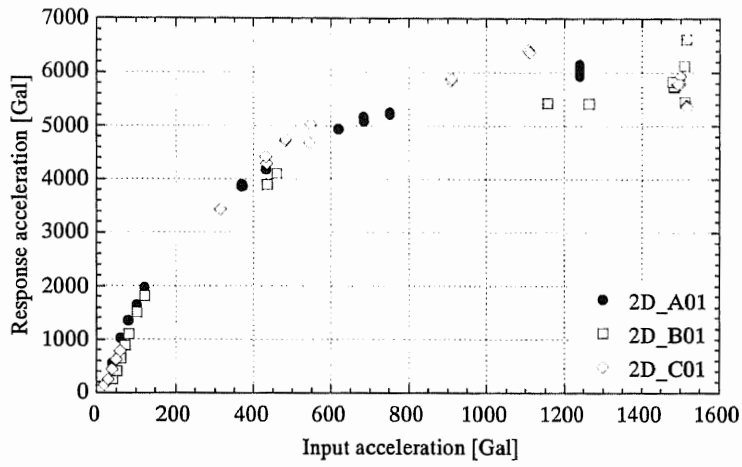


図 3.2.2-8 入力加速度－応答加速度関係
 Fig. 3.2.2-8 Relation between input acc. and response acc..

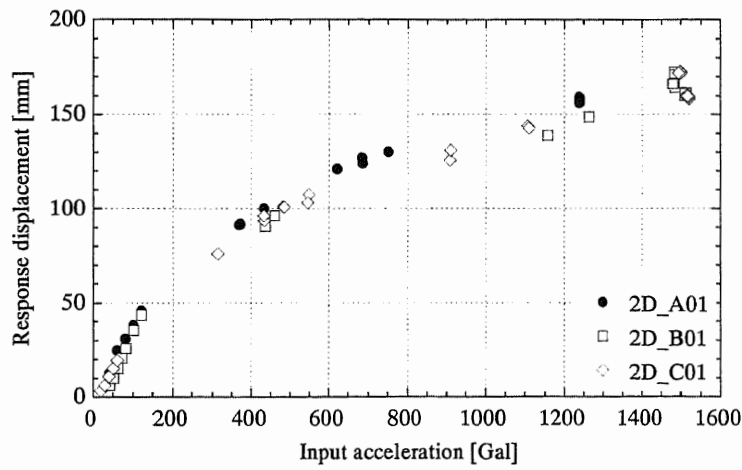


図 3.2.2-9 入力加速度－応答変位関係
 Fig. 3.2.2-9 Relation between input acc. and response disp..

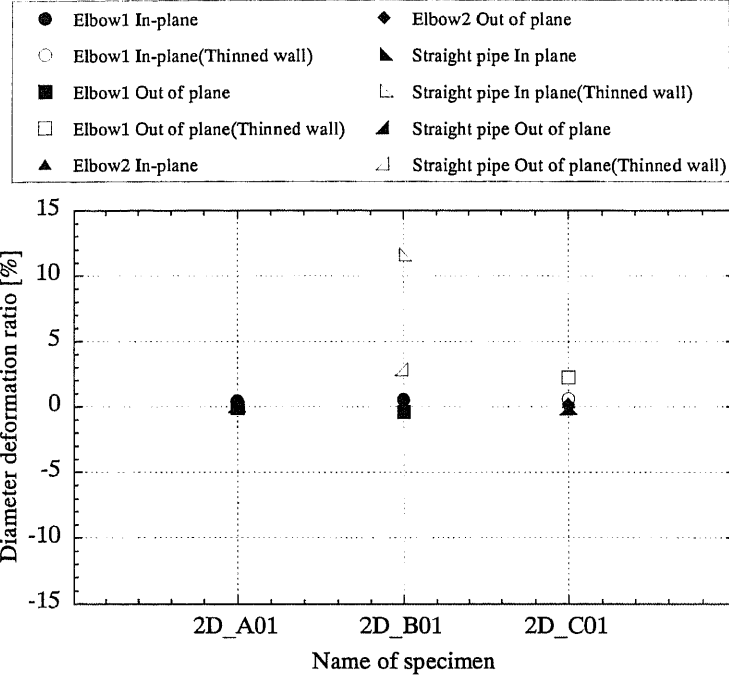


図 3.2.2-10 平面配管系試験体における外径変化率
 Fig. 3.2.2-10 Diameter deformation ratio of 2D piping models.

3.3 立体配管系試験

3.3.1 試験方法

3.3.1.1 試験体の概要

図 3.3.1-1 に立体配管系試験体の形状を示す。試験体はエルボ 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、フランジで接合した。立体配管系試験体は平面配管系試験体と異なり、部分 A、B、C がつながり一つの配管経路となっている。立体配管系で導入した劣化条件は、曲管部減肉またはエルボ 1 近傍の直管部分における EDM き裂の 2 種類とした。平面配管系試験と同様、劣化部分のない健全試験体についても加振実験を行った。設定する劣化条件に従い部分 A または部分 B の一部に劣化を導入した。部分 C は全ての試験体で共通に使用した。

試験で使用した配管は、基本的に平面配管系試験体と同様、高温配管用炭素鋼鋼管 STPT370 としたが、減肉曲管は配管用炭素鋼鋼管 FSGP エルボで代用したため曲管部減肉試験体では減肉曲管部分のみ材質が異なっている。また、EDM き裂付き試験体ではき裂導入部分となる部分 A に配管用ステンレス鋼管 SUS304 を使用した。配管は 100A、sch80 のものを使用した。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 3.3.1-1 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。FSGP エルボの肉厚は公称 4.5mm であり、減肉量は 48% となる。減肉させた曲管周りの形状を図 3.3.1-2 に示す。

(3) 試験体名：3D_C02

劣化条件：エルボ 1 減肉

エルボ 1 を FSGP エルボとすることにより減肉量 48% の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 を FSGP エルボとすることにより減肉量 48% の全周減肉を模

擬した。

(5) 試験体名：3D_D01

劣化条件：EDM き裂（部分き裂）

図3.3.1-1に示すエルボ1近傍の直管部分に半楕円形状のEDMき裂を導入した。導入したEDMき裂の形状は、図2.2.1-4に示した直管要素試験体EM07と同一形状とし、最大き裂深さを曲げモーメントが最大となる方向（Z軸+方向）に一致させた。

(6) 試験体名：3D_D02

劣化条件：EDM き裂（全周き裂）

図3.3.1-1に示すエルボ1近傍の直管部分に全周EDMき裂を導入した。き裂深さは肉厚の50%とした。

表3.3.1-1に試験体の特性をまとめて示す。また、図3.3.1-3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。健全状態の場合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。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%程度低い値となった。

3.3.1.2 加振条件

前項で述べた配管系モデルに対して、一次元大型振動台を使用して加振実験を行った。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3.3.1-4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力レベルを弾性レベル（約100Gal程度まで）から最大1850Galまで増加させ、各入力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内圧を負荷した。内圧値は、健全試験体および減肉試験体で10MPa、き裂付き試験体で8MPaに設定した。3D_A01、3D_C01、3D_D01については、試験体が破損し内部水の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、3D_D02では、漏洩を確認したあとも図3.3.1-4に示した加速度入力が終了するまで加振を継続した。

3.3.1.3 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) 試験体およびアンカ部の応答加速度
- (3) エルボ 1 とエルボ 2 の面内開閉変位
- (4) 内圧
- (5) 曲管部、曲管近傍直管部、アンカ近傍直管部、サポート近傍直管部における外表面の軸方向および周方向ひずみ
- (6) エルボ 3 位置における三次元絶対応答変位
- (7) き裂開口変位（き裂付き試験体のみ）

図 3.3.1-5 に試験体の計測点を示す。これらは全て 500Hz のサンプリング周波数で収録した。また、健全試験体および減肉試験体では、この他に試験の前後において曲管部分の配管外径を計測した。

表 3.3.1-1 立体配管系試験 試験体一覧
Table 3.3.1-1 Test models for 3-D piping system tests.

Name	Material	S_y^{*1} [MPa]	S_u^{*1} [MPa]	S_m^{*1} [MPa]	Internal pressure (P) [MPa]	Type	Condition of defect	
							Configuration	Defected part
3D_A01	STPT370	302	473	158	10	No defect	---	---
3D_C01	FSGP Elbow (Elbow 1 & Elbow 2) / STPT370 (Ordinary part)	351	452	151	10	Wall thinning	Full circumferential thinning Depth : 0.48 t ^{*2}	Elbow 1 and Elbow 2
								Elbow 1
3D_C03	FSGP Elbow (Elbow 2) / STPT370 (Ordinary part)	351	452	151	8	EDM	Partial EDM notch Depth : 0.49 t ^{*2} Full crack angle : 14.87[deg.]	Straight pipe near Elbow 1 (See Fig. 3.3.1-1)
3D_D01	SUS304 (Part A) / STPT370 (Part B & Part C)	311	617	206	8	EDM	Full circumferential EDM notch Depth : 0.5 t ^{*2} Full crack angle : 360[deg.]	Straight pipe near Elbow 1 (See Fig. 3.3.1-1)
3D_D02	SUS304 (Part A & Part B) / STPT370 (Part C)	311	617	206				

*1 Value at defected part

*2 't' denotes the normal pipe thickness

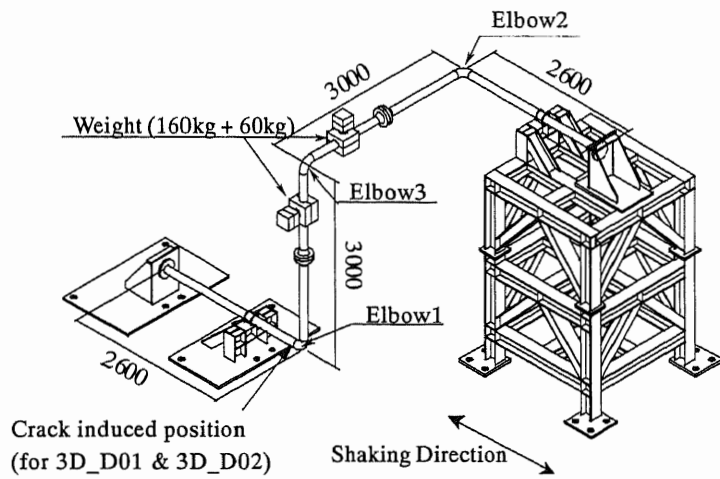


図 3.3.1-1 立体配管系試験 試験体形状

Fig.3.3.1-1 3-D piping model for piping system test.

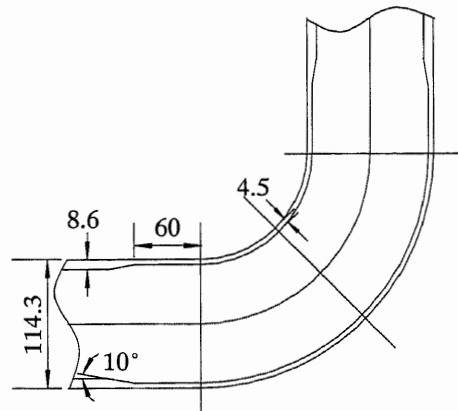


図 3.3.1-2 曲管減肉部分の形状

Fig.3.3.1-2 Cross section of thinned wall elbows in longitudinal direction.

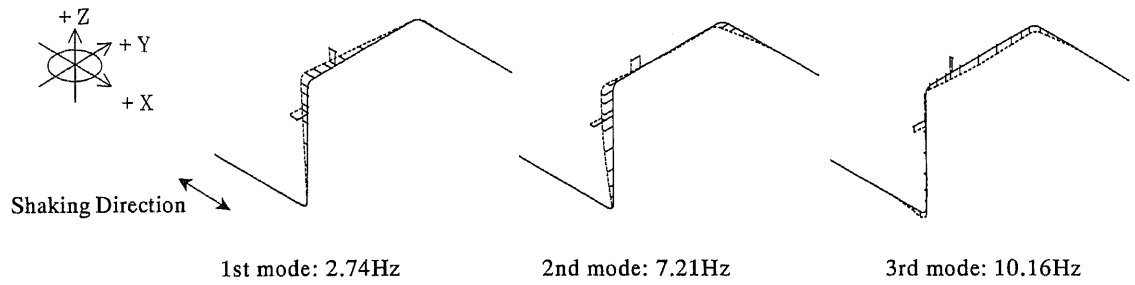
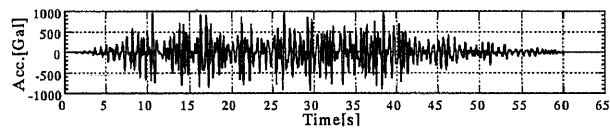
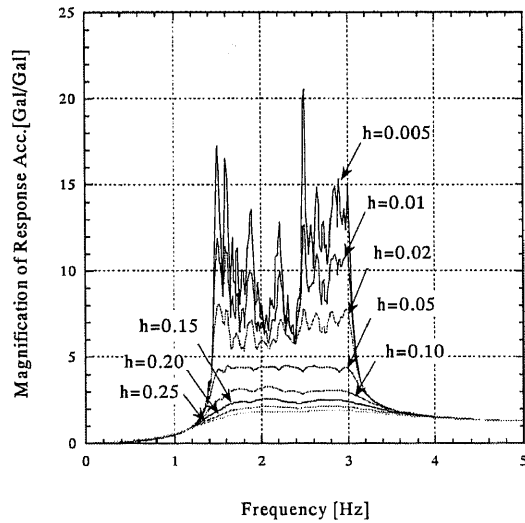


図 3.3.1-3 立体配管系試験体の振動モード
 Fig.3.3.1-3 The vibration mode of the 3-D piping model.



(a) Time history of input acceleration.



(b) Response spectrum (h: damping ratio).

図 3.3.1-4 立体配管系試験で使した狭帯域ランダム波
 Fig.3.3.1-4 Narrow band random wave used for the piping system test of the 3-D piping model.

3.3.2 試験結果

3.3.2.1 破損状況

立体配管系試験の試験結果を表3.3.2-1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)

スイープ加振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。入力加速度1850Galの弾塑性レベル加振13回目が終了したあと、エルボ1脇腹片面(図3.3.1-5におけるS047-S048の位置、以下S047側という)で配管外表面にくぼみの発生が確認され、14回目でその部分から配管軸方向に疲労き裂が貫通した。図3.3.2-1にエルボ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)

スイープ加振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1850Galの弾塑性レベル加振1回目でエルボ1脇腹S047側において配管外表面のくぼみ発生が確認された。その後、入力加速度1850Galの加振3回目で軸方向に疲労き裂が貫通した。図3.3.2-2に3D_C01の損傷状況を示す。

(3) エルボ1減肉試験体

スイープ加振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1400Galの弾塑性レベル加振1回目のあとにエルボ1脇腹S047側で配管外表面に変化が認められた。また、入力加速度1850Galの加振1回目のあとに、エルボ1の反対側の脇腹(図3.3.1-5におけるS042-S043の位置、以下S043側という)でもくぼみの発生が確認された。この試験体は1850Galの加振3回目でS047側の曲管脇部で軸方向の疲労き裂が貫通した。き裂貫通後も加振を継続したため、S043側の曲管脇部からもき裂が貫通した。図3.3.2-3にき裂貫通前に目視確認された配管外表面のくぼみを、図3.3.2-4にエルボ1の損傷状況を示す。

(4) エルボ2減肉試験体

スイープ加振から得られた一次固有振動数は2.62Hzであった。入力加速度1400Galの弾塑性レベル加振2回目のあとにエルボ2脇腹片面(図3.3.1-5におけるS094-S095の位置、以下S095側という)で配管外表面にくぼみが発生した。その後、入力加速度1850Galの加振1回目においてこの部分で軸方向疲労き裂が貫通した。図3.3.2-5に3D_C03の破損状況を示す。

(5) 部分 EDM き裂付き試験体 (3D_D01)

スイープ加振から得られた一次固有振動数は 2.79Hz であった。この試験体ではクリップゲージを使用して EDM き裂の開口変位を計測していたが、実験の途中から計測していた開口変位量が増加しなくなったため、加振を継続しても破損までに多くの時間がかかるものと判断して加振を中止した。この試験体に対しては、弾塑性レベルの加振を、入力加速度 800Gal のものを 1 回、1200Gal のものを 13 回実施したが試験体は破損しなかった。試験終了後、き裂導入面を切りだして観察したところ、初期 EDM き裂からのき裂進展量は約 0.5mm となっていた。

(6) 全周 EDM き裂付き試験体 (3D_D02)

この試験体では、スイープ加振を行うと共振状態になったときにき裂が貫通するおそれがあったため、広帯域ランダム波を使用して固有振動数を求めた。広帯域ランダム波加振から得られた一次固有振動数は 2.75Hz であった。入力加速度 1850Gal の加振 1 回目が終了したあと、EDM き裂を付与した位置に対応する配管外表面の一部にくぼみが発生した (図 3.3.2-6)。EDM き裂は入力加速度 1850Gal の加振 2 回目で、図 3.3.1-5 における S032 方向に貫通した。貫通後も加振を継続したため、後続の応答により周方向にき裂が伝播し、全周破断に至った。き裂貫通方向が S031 方向からずれているのは、試験体のエルボ 1 近傍の変形が曲管の純粋な面内曲げではなく、若干の面外変形が混在しているためと考えられる。図 3.3.2-7 にき裂が貫通したときの状況を、図 3.3.2-8 に全周破断後の試験体の状況を示す。また、図 3.3.2-9 にき裂が貫通した加振におけるエルボ 3 の応答加速度と内圧変化の時刻歴波形を示す。図 3.3.2-9 から、き裂貫通後 5～6 サイクルで全周破断に至ったことがわかる。

試験終了後、3D_A01 および 3D_C01～3D_C03 についてはエルボ 1、2 を切り出して浸透探傷検査を行った。その結果、3D_A01 では破損しなかったエルボ 2 の内面に若干の微少なき裂の発生が認められたが、その他の試験体では破損した曲管以外の内面にき裂の発生は認められなかった。また、破損した曲管の内面には、貫通き裂以外に多数の微少な未貫通き裂の発生が認められた。

き裂貫通までに要した弾塑性レベルの加振回数は、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、試験体の寿命は約1/3以下に低下したと考えられる。

立体配管系試験体では、3D_C01において、試験終了後エルボ1が開く方向に約2.6度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。本実験においては、深さ50%の全周き裂を施した試験体以外では、損傷に伴い変形が不安定に進行するような現象は発生せず、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。

3.3.2.2 劣化条件と応答値の関係

実験から得られた健全試験体(3D_A01)の一次固有振動数は2.78Hzであった。これに対し、き裂付き試験体の固有振動数は、部分EDMき裂つき試験体(3D_D01)で2.79Hz、全周EDMき裂つき試験体(3D_D02)で2.75Hzとほぼ健全試験体と同等となった。一方、エルボ1減肉試験体(3D_C02)の固有振動数は2.55Hz、エルボ2減肉試験体(3D_C03)は2.62Hz、エルボ2箇所減肉試験体(3D_C01)は2.42Hzとなり、健全試験体の固有振動数に比べそれぞれ約8%、6%、13%低下した。これらの結果から、き裂が存在しても配管系の固有振動数にはほとんど影響が表れないが、減肉が存在すると系の固有振動数が低下することがわかった。一方配管系の減衰比は、表3.3.2-1に示したようにき裂や減肉の存在にかかわらず約0.01であった。き裂つき試験体で固有振動数が健全試験体とほとんど同程度となったのは、配管要素試験結果から明らかなようにき裂の存在は配管の剛性にはほとんど影響しないためと考えられる。一方減肉試験体で確認された固有振動数の低下は、曲管部分の減肉により配管系試験体の剛性が低下したためと考えられる。減肉試験体で確認された固有振動数の低下割合は減肉の程度(本実験の場合は減肉の個数)に依存していると考えられる。本実験では、エルボ1、2それぞれを減肉させた試験体を使用して振動実験を実施したが、減肉曲管の存在位置と固有振動数の低下率に明確な違いは現れなかった。

平面配管系試験結果でも述べたように、弾塑性レベルの加振では試験体の一部が塑性域に入り剛性が低下するために、振動応答の卓越振動数が低下する。図3.3.2-10(a)に入力加速度と試験体の最大応答発生時点の卓越振動数との関係を、図3.3.2-10(b)に卓越振動数の低下率を示す。ここで、卓越振動数は、エルボ3位置で計測した応答加速度の、最大応答時点の1サイクルの逆数として求めた。また、図3.3.2-10(b)は、そのようにして求めた各加振レベルの卓越振動数を、3D_A01の入力加速度20Galの加振における振動数で除して求めた。図3.3.2-10(a)に示したように、初期状態では試験体の劣化条

件に応じて2.5Hz～2.8Hz程度の間分布していた卓越振動数が入力加速度レベルの増加に伴い低下し、1850Galの入力加速度レベルでは、1.8Hz～2.5Hz程度まで低下していることがわかる。図3.3.2-10(b)から、振動数の低下割合は、入力加速度レベルが大きいほど、また、減肉の箇所が多いほど大きいことがわかる。1850Galの入力加速度レベルでは、3D_A01では初期状態と比較して10%程度振動数が低下した。また、エルボ1箇所が減肉している3D_C02および3D_C03では、低下割合は約15%～20%であり、エルボ2箇所が減肉している3D_C01では全ての曲管が健全である場合の初期状態と比較して、卓越振動数は約35%低下した。一方き裂つき配管である3D_D01および3D_D02については、応答が弾塑性域に入ることに伴う振動数の低下は認められるが低下の傾向は健全試験体の傾向と同程度であり、き裂の有無および大きさによる違いは明確ではなかった。

図3.3.2-11に立体配管系試験体の入力加速度とエルボ3の位置における応答加速度の関係を示す。入力加速度400Gal以上の弾塑性レベルの加振では、入力加速度の増加率に対し応答加速度の増加率が低くなる傾向が認められた。これは、試験体の一部に塑性変形が発生し、それに伴い振動エネルギーが消費されたためと考えられる。また、同一の入力加速度に対する応答加速度のレベルを試験体間で比較すると、き裂つき試験体では健全試験体とほぼ同程度であるが、曲管を減肉させた試験体では健全試験体の応答加速度に比べ低い値となった。減肉試験体における応答加速度の健全試験体に対する低下割合は、固有振動数の低下と同様減肉の程度に依存し、減肉の存在位置による違いは現れなかった。

実験では、光学式三次元変位計を使用して、振動台外部からエルボ3位置における絶対変位を求めた。この計測結果による加振方向変位より振動台入力変位の差を取ったものがエルボ3位置における振動台に対する試験体の相対変形量であり、以後試験体の応答変位と表記する。実験では試験体の変形を把握するためにエルボ1およびエルボ2の開閉変位も計測している。この開閉変形量は開閉変形の計測位置と曲管変形の幾何学的関係より曲管の開閉変形角に換算した。図3.3.2-12にこれらの計測値の概念図を示す。

図3.3.2-13に、入力加速度と試験体の応答変位との関係を示す。図3.3.2-11に示した入力加速度と応答加速度の関係と異なり、試験体の応答変位は劣化の程度にかかわらず試験体間でほぼ同程度の値となった。図3.3.2-14に、健全試験体と、応答加速度が健全試験体と比較して低い値となった減肉試験体について、エルボ3位置における相対応答加速度 (A_{03X_r}) と、応答変位 (D_{03X}) に卓越振動数の2乗 (f^2) を乗じたものとの

関係を示す。図 3.3.2-14 に示したように、 $A03X_r$ と $D03X \cdot f$ はほぼ比例関係にあることがわかり、図 3.3.2-11 と図 3.3.2-13 に示した、入力加速度に対する応答加速度の傾向と応答変位の傾向との差は最大応答時点での卓越振動数の違いが影響しているものと考えられる。平面配管系では、図 3.2.2-7 に示したように試験体間で弾塑性レベルにおける卓越振動数にほとんど差がないため、入力加速度に対する応答加速度の傾向と応答変位の傾向が同様であったと考えられる。

3.3.2.3 曲管の開閉変形挙動

立体配管系試験体の主要な変形はエルボ 1 およびエルボ 2 の面内開閉変形であり、健全試験体および減肉試験体ではこの開閉変形の繰り返しにより曲管脇部軸方向に疲労き裂が発生し、損傷に至った。健全試験体および減肉試験体について、試験体の最大応答変位とエルボ 1、2 の開閉変形角範囲との関係をとると図 3.3.2-15 のようになる。ここで、曲管の開閉変形角範囲とは、図 3.3.2-12 に示したように、一回の振動応答で得られた最大開き変形角から最大閉じ変形角の差を取ったものと定義している。図中、塗りつぶした印は健全曲管を、白抜きの印は減肉曲管を示している。前述したように、試験体の応答変位は減肉の有無に影響されないが、同じ試験体の応答変位に対する曲管の開閉変形角範囲は、減肉曲管と健全曲管とでは異なり、特に試験体が塑性域に入るような大レベル加振においては、減肉曲管の変形量は健全曲管の変形量の 2 ～ 3 倍となっていることがわかる。この結果から、配管系内に減肉した曲管が存在する場合、配管系の変形は減肉した曲管部分に集中する傾向となると考えられる。

図 3.3.2-16 に、健全試験体および減肉試験体について、エルボ 1 とエルボ 2 の変形角比と入力加速度の関係を示す。ここで、エルボ 1 とエルボ 2 の変形角比とは、エルボ 1 の最大開閉変形角範囲をエルボ 2 の最大開閉変形角範囲で除したものである。弾性域レベルにおける曲管の変形角比は、3D_A01 および 3D_C01 ではともに約 1.3 であった。このことは、配管系試験体の中の 2 つの曲管の肉厚が同じである場合は、健全曲管か減肉曲管かにかかわらず 2 つの曲管は同じ比率で変形していることを示している。一方 3D_C02 の変形角比は 2.3、3D_C03 の変形角比は 0.6 であった。このことから、2 つの曲管の一方のみが減肉している場合は、健全曲管の変形に比べて減肉曲管の変形の方が大きくなることがわかる。弾性域レベルの加振においては、いずれの試験体についても曲管の変形角比はほぼ一定で推移しているが、弾塑性レベルではこの変形角比が若干変化し、3D_A01 および 3D_C02 では変形角比が大きく、また 3D_C03 では変形角比が小さくなっている。すなわち、3D_A01 では弾性域レベルの応答で作用曲げモーメン

トの大きいエルボ1の、また、3D_C02および3D_C03ではそれぞれ減肉曲管の変形が大きくなっている。これらの変形角比の変化は、弾塑性応答時には試験体の振動応答形状が弾性域における応答形状から変化し、配管系の変形は配管系内で最も塑性化しやすい部分に集中していくことを示唆している。一方、2箇所曲管を減肉させた3D_C01では、入力加速度700Galの加振で変形角比がわずかに増加したあと、1400Galおよび1850Galの加振では弾塑性レベルの加振に伴い変形角比が減少する傾向、すなわちエルボ1に対するエルボ2の変形量が相対的に大きくなる傾向となった。これは、本実験で実施した弾塑性レベルの加振による振動応答で、試験体のエルボ1が耐荷重の限界点に達し、試験体内で荷重分担の変化が起こり、エルボ2部分で負担する荷重が増加したためではないかと考えられる。図3.3.2-15に示したように、3D_C02および3D_C03の減肉曲管について、弾塑性レベルの開閉変形角範囲は3D_C01の曲管と同程度であり、これらの曲管も耐荷重の限界に達した可能性があるが、これらの試験体では一方が剛性の高い健全曲管であるため、変形角比に影響が現れるほどの大きな荷重分担の変化が生じなかったものと考えられる。

3.3.2.4 試験体の外径変化

健全試験体および減肉試験体では、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。計測位置は曲管の中央断面（曲管の始点から45°の位置）である。各試験体の外径変化率を図3.3.2-17に示す。図3.3.2-17で、○はエルボ1面内方向、□はエルボ1面外方向、△はエルボ2面内方向、◇はエルボ2面外方向の外径変化率である。ここで、面内方向とは、曲管の腹部-背部方向で計測した外径を、面外方向とは曲管の脇部-脇部方向で計測した外径を意味している。また、塗りつぶした印は健全曲管を、白抜きの印は減肉曲管を意味している。この図から、曲管は载荷に伴い面内方向の外径が減少し、面外方向の外径が増加する傾向のあることがわかる。これは、曲管中央部が面外方向を長軸とした楕円形に扁平化していることを示唆している。減肉曲管は全般に外径変化率が大きく、また、3D_C01のエルボ1のように、面内方向、面外方向ともに外径が増加するものもあるが、これは断面の扁平化にラチェット変形が重畳するためと考えられる。損傷した曲管と損傷しなかった曲管とでは損傷した曲管の方で外径変化率が大きくなる傾向があるが、特に片方の曲管のみ減肉した3D_C02および3D_C03では、健全曲管にはほとんど外径変化がなく、減肉曲管が著しく変形している。このことから試験体の損傷は最も弱い曲管に集中する傾向があることがうかがえる。損傷した曲管の最終的な面外方向の外径増加率は、健全曲管で約3%、減肉曲管

では約 10 ～ 12% となった。

図 3.3.2-18 に試験体 3D_C01 の弾塑性レベル 1 回目（入力加速度 700Gal）における入力加速度、エルボ 1 の曲管開閉変形角、エルボ 1 脇側側面（S047 側）における周方向ひずみの時刻歴波形を示す。図から、曲管部分でひずみが著しいラチェット現象を示していることがわかる。また、ラチェットひずみの増加は要素試験のランダム振幅波による載荷試験の結果と同様、振動応答中一様に累積していくのではなく、数回ある曲管開閉変形角の大振幅近傍で発生し、その他の部分ではひずみ振動成分のみが生じていることがわかる。このことから、ラチェット現象が発生する閾値となる応力レベルが存在することが推測できる。

表 3.3.2-1 立体配管系試驗結果
Table 3.3.2-1 Test results of 3-D piping system tests.

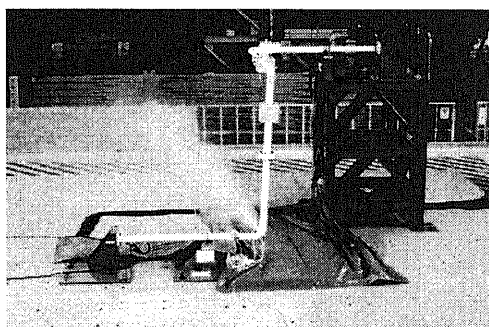
Name	Condition of defect		Internal pressure (P) [MPa]	Natural frequency (f) and damping ratio (h) at 1st mode	Contents of the excitation test by narrow band random wave		Test results
	Type	Depth*1			Max. input acc. [Gal]	Number of times	
3D_A01	No defect	0	10	f = 2.78 [Hz] h = 0.0106	20-100 (Elastic level) 400-700 1400 1850	10 4 2 14	* Penetration of fatigue cracks in a longitudinal direction at Elbow 1. * A number of small cracks were observed on the inner surface of Elbow 2.
3D_C01	Wall thinning at Elbow1&2	0.48t		f = 2.42 [Hz] h = 0.0121	20-80 (Elastic level) 700 1400 1850	4 1 2 3	* Penetration of a fatigue crack in a longitudinal direction at Elbow 1. * No crack was observed at Elbow 2. * The residual deformation was clearly observed after the test.
3D_C02	Wall thinning at Elbow1	0.48t	10	f = 2.55 [Hz] h = 0.0131	20-80 (Elastic level) 700 1400 1850	4 1 2 3	* Penetration of fatigue cracks in a longitudinal direction at Elbow 1. * No crack was observed at Elbow 2.
3D_C03	Wall thinning at Elbow2	0.48t		f = 2.62 [Hz] h = 0.0109	20-80 (Elastic level) 700 1400 1850	4 1 2 1	* Penetration of a fatigue crack in a longitudinal direction at Elbow 2. * No crack was observed at Elbow 1.
3D_D01	Partial EDM notch at straight pipe	0.49t	8	f = 2.79 [Hz] h = 0.0100	20-80 (Elastic level) 800 1200	4 1 13	* Excitation test was ended before the failure occurred. Initial EDM notch did not penetrate after 13 excitation tests.
3D_D02	Full circle EDM notch at straight pipe	0.5t		f = 2.75 [Hz]*2 h = 0.00938	20-80 (Elastic level) 1850	4 2	* Full circumferential break occurred at second excitation with elastic-plastic level.

*1 't' denotes the normal pipe thickness

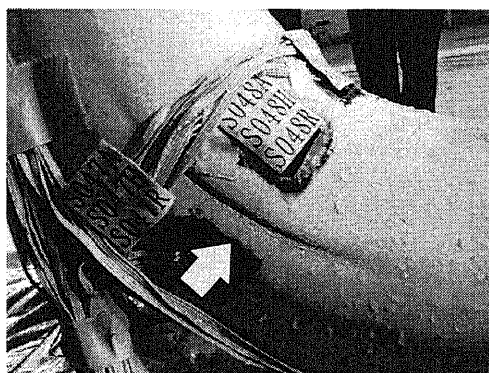
*2 Obtained from a wide band random wave excitation test



図 3.3.2-1 エルボ 1 における疲労き裂 (3D_A01)
Fig. 3.3.2-1 Fatigue crack at Elbow 1, 3D_A01.

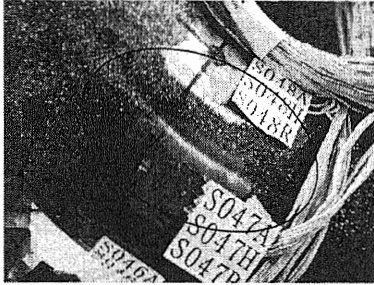


(a) Crack penetration occurred at Elbow 1 during 1850Gal_#03 excitation.

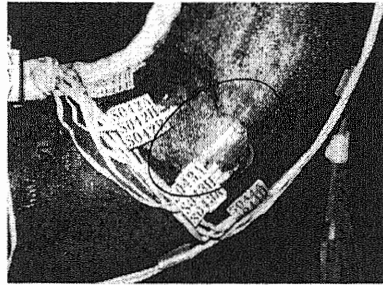


(b) Fatigue crack at Elbow 1.

図 3.3.2-2 3D_C01 の破損形態
Fig. 3.3.2-2 Failure mode of 3D_C01.



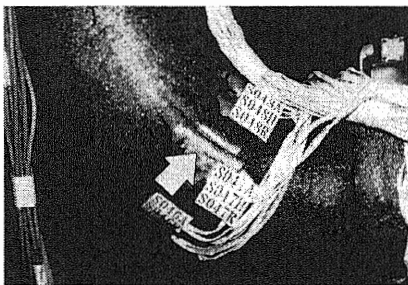
(a) S047 side.



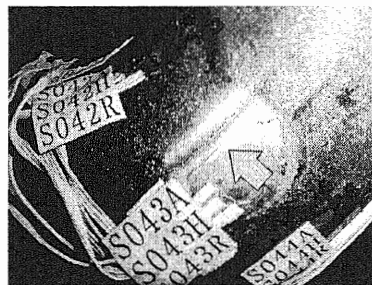
(b) S043 side.

図 3.3.2-3 3D_C02 エルボ 1 で確認されたき裂貫通前の配管表面の変化
(1850Gal、1 回目の加振後)

Fig. 3.3.2-3 Pipe surface deformation before crack penetration at Elbow 1, 3D_C02
(after 1850Gal_#01 excitation test).



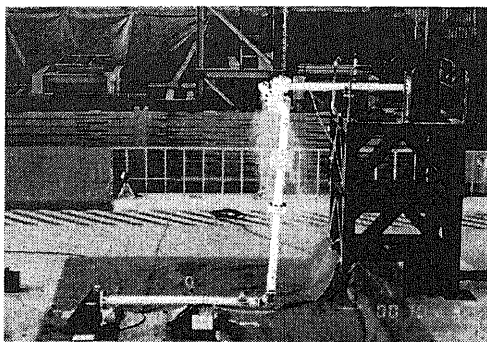
(a) S047 side.



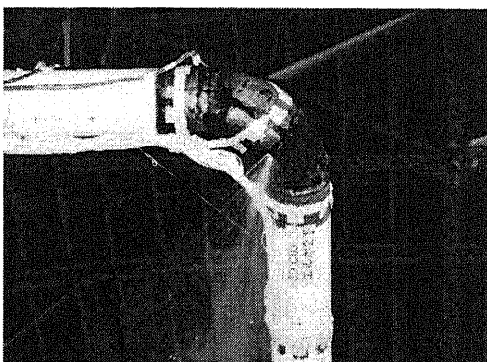
(b) S043 side.

図 3.3.2-4 エルボ 1 における疲労き裂 (3D_C02)

Fig. 3.3.2-4 Fatigue crack at Elbow 1, 3D_C02.



(a) Crack penetration occurred at Elbow 2 during 1850Gal_#01 excitation.



(b) Leak of water at Elbow 2.

図 3.3.2-5 3D_C03 の破損形態
Fig. 3.3.2-5 Failure mode of 3D_C03.

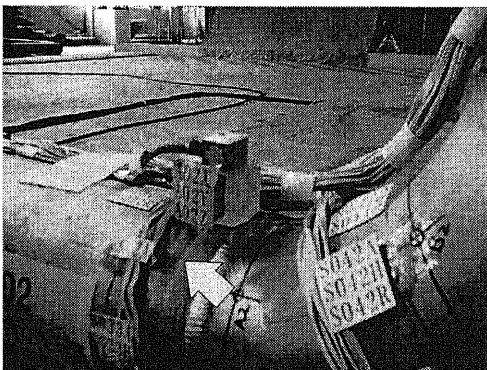


図 3.3.2-6 3D_D02 において EDM き裂からのき裂貫通前に配管表面で確認された筋
(1850Gal、1 回目の加振後)

Fig. 3.3.2-6 A line on the pipe surface before crack penetration at EDM notch, 3D_D02
(after 1850Gal_#01 excitation test).

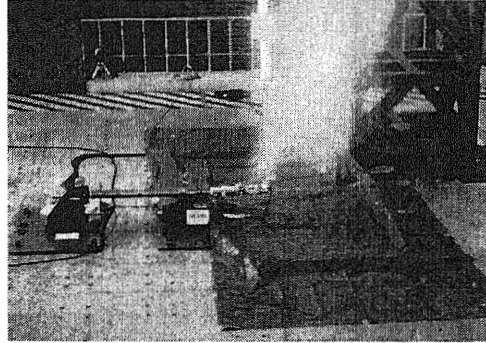
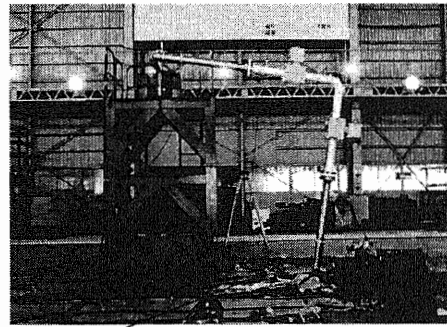
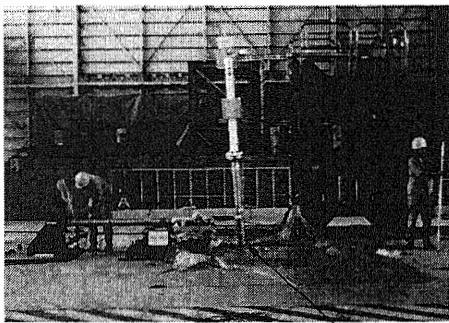


図 3.3.2-7 1850Gal 2 回目の加振中におけるき裂貫通の状況

Fig. 3.3.2-7 Crack penetration occurred at EDM notch during 1850Gal #02 excitation test.



Broken point

(a) View from the front.

(b) View from the excitation direction.

図 3.3.2-8 3D_D02 の破損状況

Fig. 3.3.2-8 Failure mode of 3D_D02.

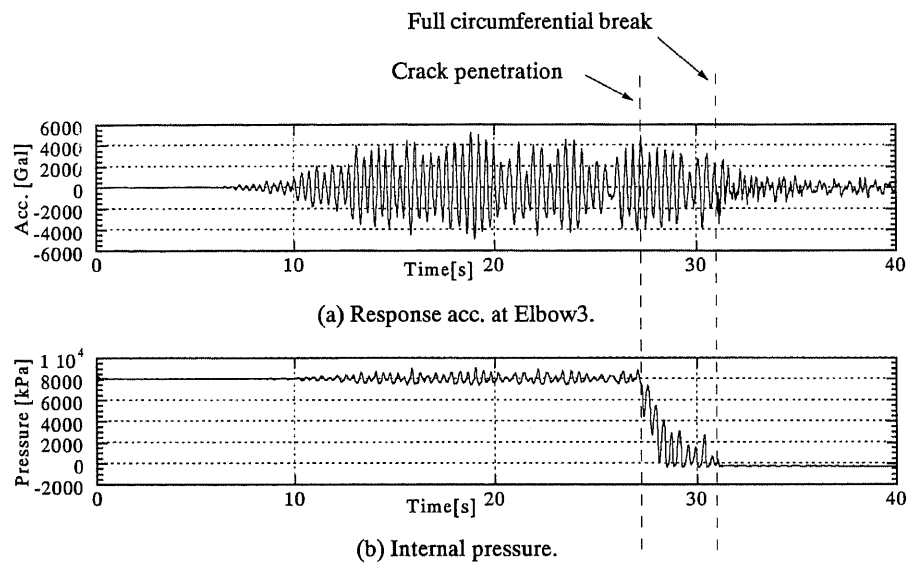
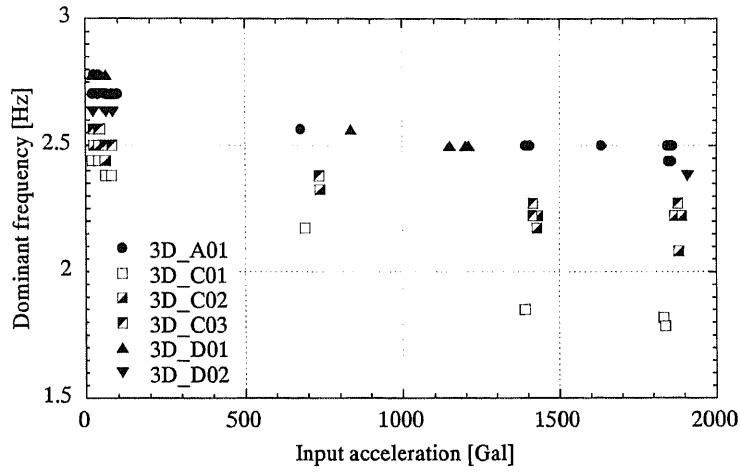
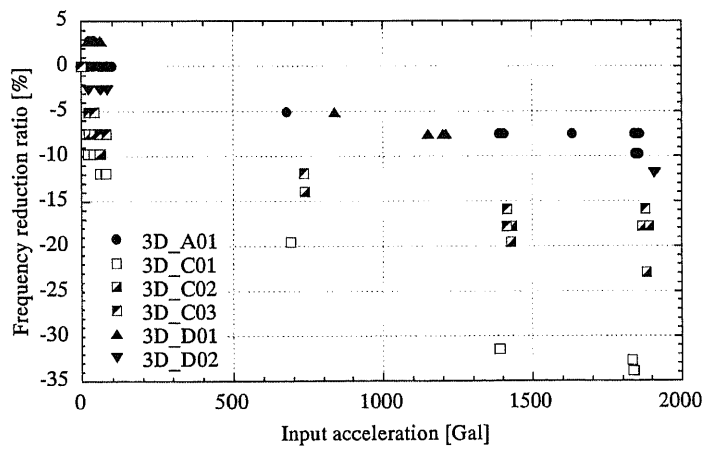


図 3.3.2-9 エルボ 3 における応答加速度と配管内圧 (3D_D02, 1850Gal 2 回目)
 Fig. 3.3.2-9 Response acc. at Elbow 3 and internal pressure (3D_D02, 1850Gal_#02).



(a) Dominant frequency at each input acceleration.



(b) Frequency reduction ratio.

図3.3.2-10 入力加速度と最大応答点における卓越振動数の関係

Fig.3.3.2-10 Relation between the max. input acceleration and the dominant frequency at the max. response.

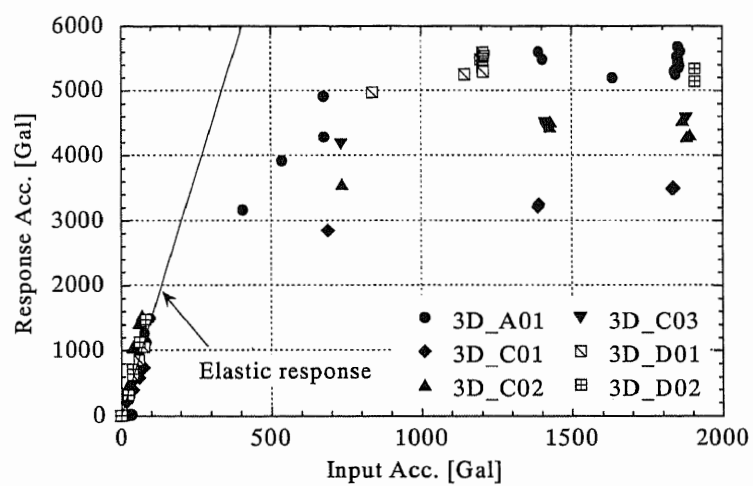
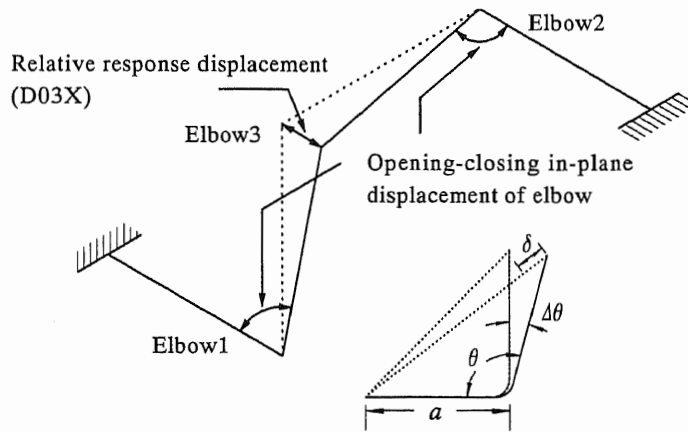


図 3.3.2-11 入力加速度とエルボ 3 における応答加速度関係
 Fig. 3.3.2-11 Relation between input acc. and response acc. at Elbow 3.



a : Distance from the center of the elbow
 δ : Change of the in-plane displacement(measured)
 θ : Elbow interior angle

$\Delta\theta$: Elbow deformation angle

$$\frac{\theta}{2} = \sin^{-1} \left(\frac{\delta + \sqrt{2}a}{2a} \right), \quad \Delta\theta = \theta - 90^\circ$$

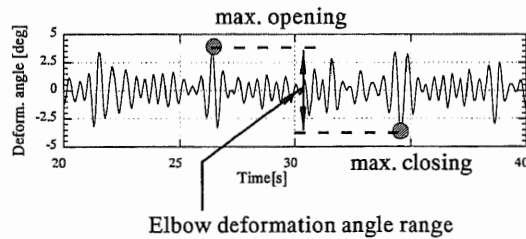


図 3.3.2-12 試験体応答変位とエルボ開閉変形角の概念図

Fig.3.3.2-12 A schematic illustration of the relative response displacement and elbow deformation angle.

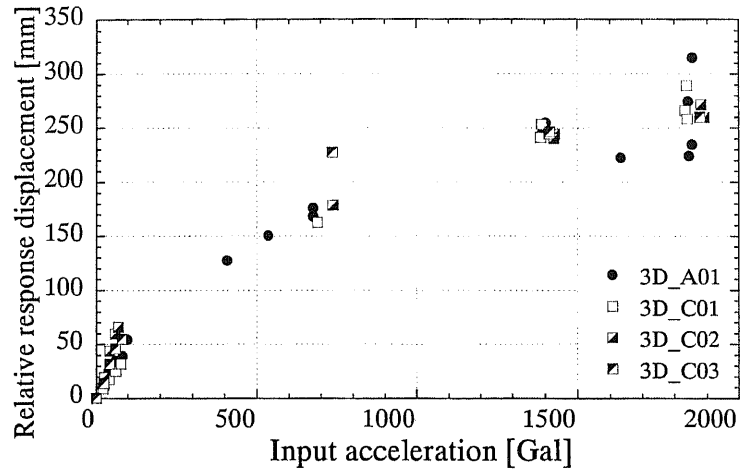


図 3.3.2-13 入力加速度とエルボ 3 位置における応答変位の関係

Fig.3.3.2-13 Relation between input acceleration and relative response displacement at Elbow 3.

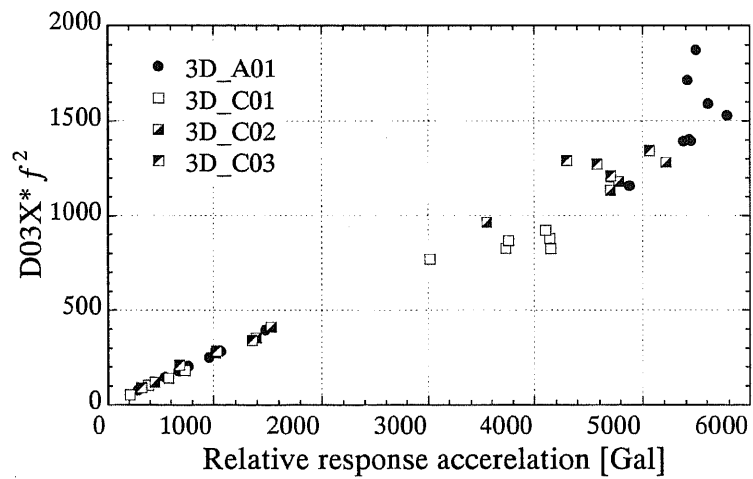


図 3.3.2-14 相対応答加速度と卓越振動数の 2 乗を乗じた相対応答変位の関係

Fig.3.3.2-14 Relation between the relative response acceleration and the product of the response displacement multiplied by the square of the dominant frequency.

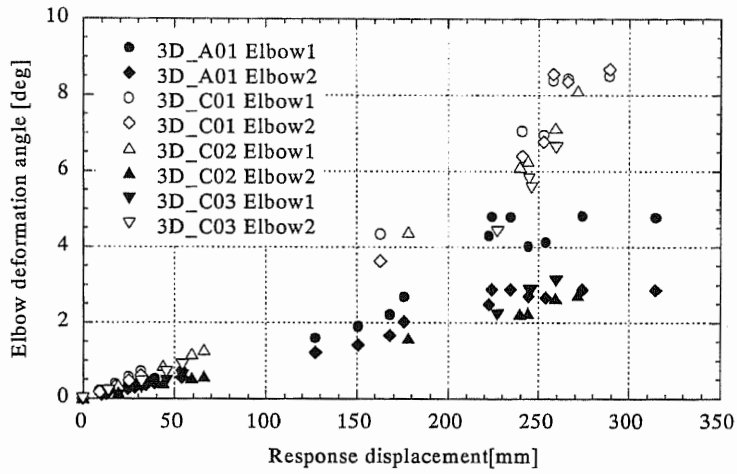


図 3.3.2-15 最大応答変位－エルボ変形角範囲関係

Fig. 3.3.2-15 Relation between max. response disp. and range of elbow deformation angle.

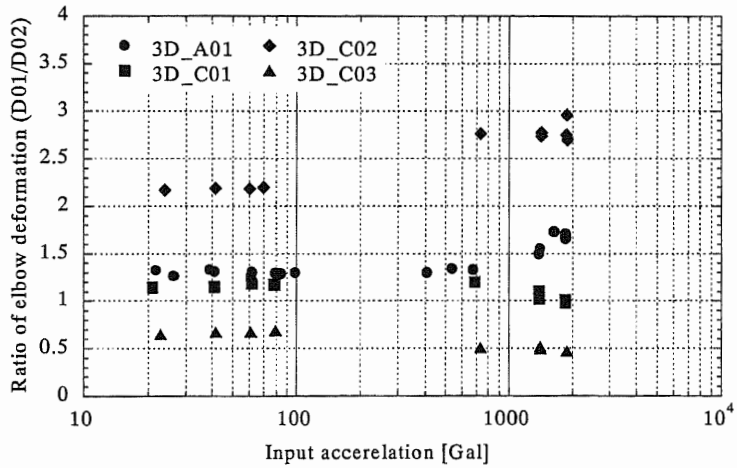


図 3.3.2-16 入力加速度－エルボ変形角比関係

Fig. 3.3.2-16 Relation between input acc. and ratio of elbow deformation.

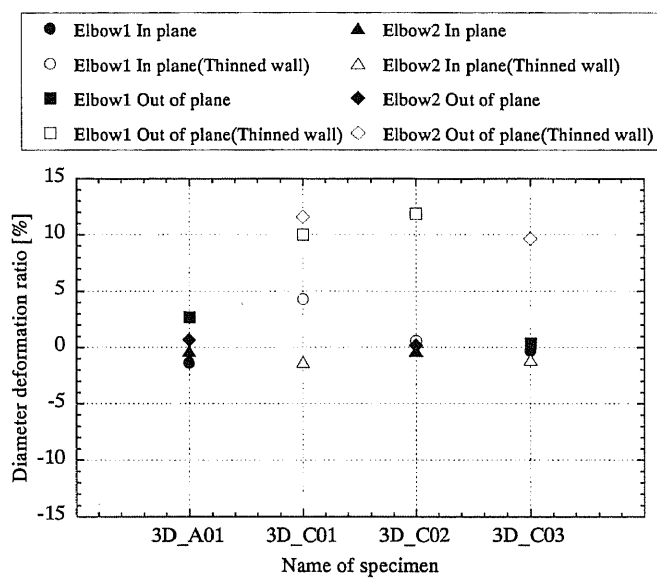
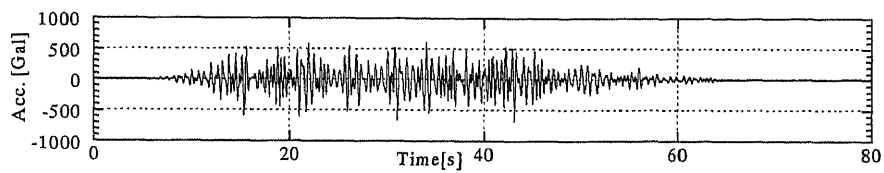
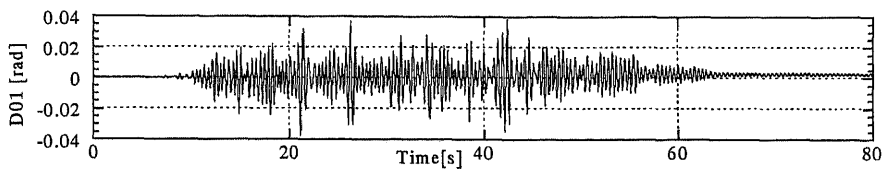


図 3.3.2-17 立体配管系試験体の外径変化率

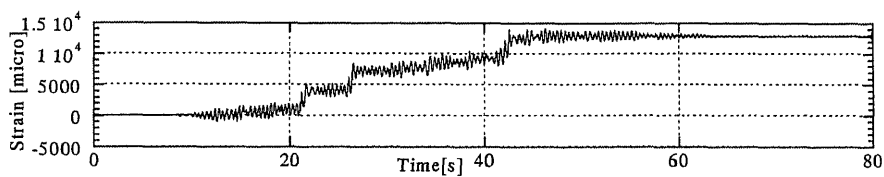
Fig. 3.3.2-17 Diameter deformation ratio of 3D piping system models.



(a) Input acceleration.



(b) Elbow deformation angle of Elbow 1.



(c) Hoop strain at S047 (Elbow 1, side surface).

図 3.3.2-18 減肉エルボ側面の周ひずみにおけるラチェット挙動

Fig. 3.3.2-18 Ratcheting behavior of hoop strain at side surface of thinned wall elbow.

3.4 考察

立体配管系試験で実施したき裂付き配管の加振試験の結果から、き裂付き配管では配管系の固有振動数及び弾塑性域における最大応答加速度値などは健全な配管系とほぼ同程度であり、き裂の存在は配管系の振動応答にほとんど影響を与えないことがわかった。過去に行われた配管要素単体の動的繰り返し試験から、配管要素単体においてはき裂貫通までは表面き裂の存在が一次固有振動数に影響を与えないことは知られていたが、本試験によりその知見は複数の配管要素で構成される配管系にも拡張できることがわかった。また、第2章で述べた配管要素試験の結果から、き裂の種類（SCCとEDM）は配管の剛性には影響を与えないことが確認されているため、配管系にSCCが存在する場合でも同様の結果となると考えられる。このことは、配管系にき裂が検出された場合の耐震性評価は、き裂の存在を無視して配管系の振動応答評価を行い、当該位置における作用応力を算出した上で改めてき裂部分の健全性評価を行えば良いことを意味している。一方減肉が存在する場合には、減肉の程度に応じて配管系の固有振動数や振動応答が変化すること、さらに弾塑性応答時の配管各部の変形は弾性応答時から変化し、配管系の最も弱い部分に集中していく傾向があることが試験結果から明らかになった。従って、配管系内に減肉が検出された場合の耐震性評価は、減肉の程度を考慮して配管系の振動応答評価及び欠陥部分の健全性評価を実施する必要があると考えられる。

本研究で使用した配管系試験体は、全て曲管部分には主に面内曲げが作用する荷重条件となり、試験で確認された破損形態は配管要素試験で実施した曲管面内曲げの健全及び片脇50%減肉試験体と同様、曲管脇部における疲労き裂の発生、貫通であった。配管要素試験で実施した曲管面内曲げの全周50%減肉試験体はラチェット変形の影響で腹部における座屈状の破損形態となったが、ほぼ同程度の減肉量を模擬した立体配管系試験ではそのような破損は生じていない。これは、配管要素試験における配管軸方向減肉形状（図2.3.1-2）と配管系試験における減肉形状（図3.3.1-2）が異なることに起因していると考えられる。配管要素試験で確認されたように、曲管内部に軸方向の肉厚変化部分が存在するとその位置におけるラチェット変形が大きくなる傾向があり、配管要素試験ではその変形が最終的な破損形態を決定した。しかし配管系試験においては図3.3.1-2に示したように肉厚の変化部分は高い応力の発生する曲管部分ではなく曲管に接続する直管部分にあり、曲管内部で肉厚変化による局所的な応力集中が発生しないため、ラチェット変形の集中が生じなかったものと考えられる。

本研究では配管経路内で減肉の位置を変化させた試験体に対して加振試験を行った

が、平面配管系、立体配管系とも減肉の存在位置による配管系の振動応答に与える影響の違いは明確ではなかった。配管系内における減肉の存在位置の影響は、配管系の形状や振動モード、配管系の支持条件、減肉条件などにより変化すると考えられる。従って、そのような影響を明らかにするには、いくつかの配管系形状と減肉条件について調査する必要がある。

3.5 結論

き裂または減肉を有する基本的な形状の配管系に対して振動台を用いた加振実験を行った。その結果、減肉のある配管系では減肉の存在により配管系の剛性が低下するため減肉の程度に応じて固有振動数が低下するが、き裂の存在は配管系の固有振動数にはほとんど影響を与えないことがわかった。また、弾塑性領域における配管各部の変形を比較すると、減肉部分がある場合その位置に変形が集中していく傾向のあることが明らかになった。き裂付き配管系試験体の最終的な破損形態は、全周に深さ50%のき裂のある試験体は全周破断となったが、配管要素試験で用いたSCCと同程度の大きさのEDMき裂のある試験体では10回を超える弾塑性レベルの加振でもき裂は貫通しなかった。一方健全及び減肉のある配管系試験体の最終的な破損形態は負荷荷重の大きい曲管部分における軸方向疲労き裂の発生・貫通であり、本試験で確認された範囲では、全周に深いき裂がある試験体以外では急速破断や損傷に伴い配管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。

第4章 配管要素に対する詳細解析

4.1 概要

第2章で述べた配管要素試験に対し、有限要素法による弾塑性解析を実施した。解析の目的はき裂または減肉といった欠陥を有する配管に対して有限要素法による弾塑性解析を行い、実験で得られた結果と比較することにより、実験をある程度の精度で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。

4.2 き裂つき配管に対する詳細解析

4.2.1 ラインスプリング要素を用いたき裂進展解析

4.2.1.1 ラインスプリング要素

表面き裂を有する配管の弾塑性き裂進展解析を行うためには、表面き裂の J 積分値を求める必要がある。三次元有限要素法によりこの問題を解くことは可能であるが、計算に要する時間が膨大であり現実的ではない。従って、本節では三次元の表面き裂問題を、貫通き裂を有するシェルの中にき裂先端の特異性を有する局所的な解を導入することにより二次元問題として解析するラインスプリングモデルを使用した。ラインスプリングモデルは、はじめRiceらにより提案されたもの¹⁾であり、無限平板中の表面き裂に対して適用可能なものであったが、その後三好らにより一般の板殻解析のための有限要素法プログラムに組み込む定式化が行われた²⁾。本研究では解析に汎用有限要素法解析コードABAQUSを使用した³⁾が、ABAQUSは、コンプライアンスに共役な相対変位と回転からき裂に沿う位置の関数として J 積分を計算する。

4.2.1.2 繰り返し J 積分範囲 ΔJ の評価³⁾

大規模降伏を伴う繰り返し荷重下においては、サイクル毎に過大な除荷、再負荷といった過程を経ながらき裂が進展することから、任意の条件において支配パラメータ ΔJ を何らかの非弾性構成則に基づき直接的に評価することが困難である。従って、解析で得られた J_{\max} から ΔJ を導出する必要がある。

CT試験片を用いた低サイクル疲労試験によれば、完全両振り（応力比 $R=-1$ ）でき裂の閉口が無視できる場合には、

$$\Delta J = 4J_{\max} \quad (4.2.1.1)$$

として工学的に妥当な評価が可能であるとされている⁴⁾が、式(4.2.1.1)はサイクルあたりのき裂進展が微少であることを前提としている。Miuraらは室温下の一定振幅両振り繰り返し荷重を受ける周方向貫通き裂付き配管において、実験的に得られた $\Delta J/J_{\max}$ が

き裂進展に伴い低下することを示し、式(4.2.1.1)に代わって J_{\max} から ΔJ を評価する簡易式を以下のように提案している³⁾。

$$\Delta J = \frac{2a/a_0}{a/a_0 - 1/2} J_{\max} \quad (4.2.1.2)$$

ここで、 a_0 ：初期き裂長さ a ：進展後のき裂長さ

式(4.2.1.2)は、図4.2.1-1に示したように、き裂進展がないときには式(4.2.1.1)に一致し、き裂進展に伴い2に漸近していく。式(4.2.1.2)による評価は、一定振幅荷重を受ける貫通き裂付き配管のき裂進展を精度良く評価できることが確認されており、本節で扱うき裂進展解析の評価式として式(4.2.1.2)を使用する。

4.2.1.3 き裂進展則

大規模降伏を伴う繰り返し荷重を受ける配管におけるき裂進展則については、き裂進展速度 da/dN が ΔJ に対し以下のべき乗則で記述されるとされている⁵⁾。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta J)^m \quad (4.2.1.3)$$

この da/dN - ΔJ 特性は、小規模降伏下の da/dN - $\Delta K^2/E$ とも一致し、試験片形状・寸法、負荷方法によらないことが実証されている。 m は1前後の値となり、この C 、 m 値は材料、応力比、温度に対して鈍感となる。また、上式が成立することは、き裂先端の塑性変形がき裂成長を支配することを意味するものと考えられる。上式中の定数 C 、 m については、SUS304鋼母材において、

$$C = 1.4615 \times 10^{-3}$$
$$m = 1.3742$$

とした⁶⁾。

4.2.1.4 き裂進展の評価手順

大規模降伏を伴う繰り返し負荷を受けるき裂を有する配管に対する破壊評価は以下の手順で行う。

- (1) 初期き裂を想定し、第1サイクルにおける J_{\max} を解析により計算する。
- (2) 式(4.2.1.2)に従い、第1サイクルにおける ΔJ を計算する。
- (3) 式(4.2.1.3)に従い、第1サイクルにおけるき裂進展量を da/dN の積分により計算する。
- (4) 初期き裂長さ a_0 にき裂進展量を加え、き裂長さ a を更新する。

(5) 破損の判定を行う。

破損に至らない場合には次サイクルについて上記の手順を繰り返す。ここで、破損はき裂長さ a が配管の肉厚に達した時点とした。図 4.2.1-2 に破壊評価法の評価フローを示す。

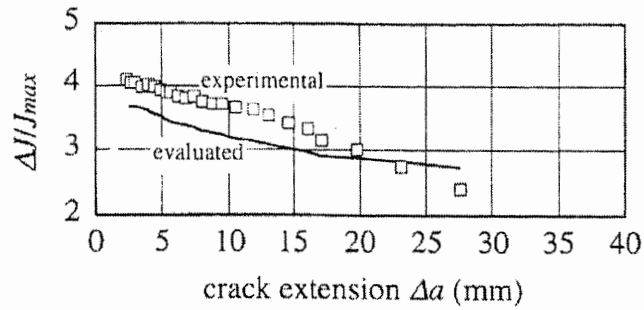


図 4.2.1-1 き裂進展に伴う $\Delta J/J_{max}$ の推移の例³⁾

Fig.4.2.1-1 An example of the transition of $\Delta J/J_{max}$ with crack extension³⁾.

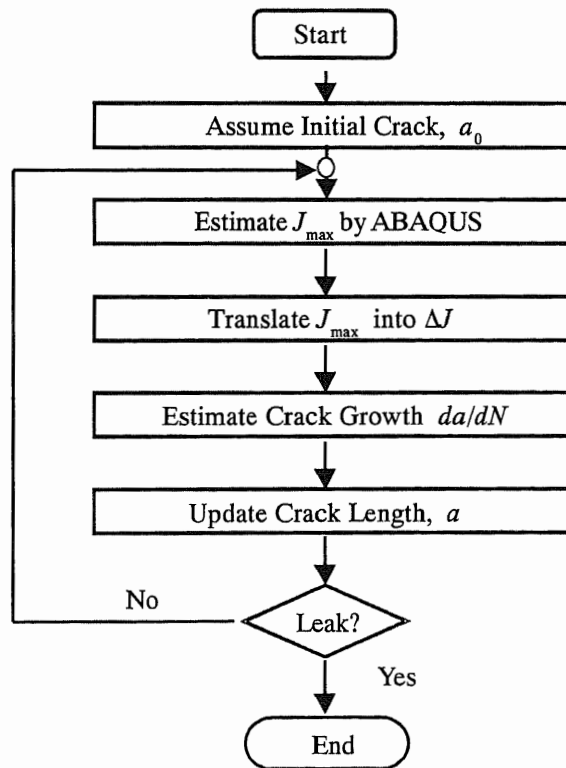


図 4.2.1-2 破壊評価の評価フロー

Fig.4.2.1-2 Flow of the simulation for low cycle fatigue crack propagation.

4.2.2 解析モデルと条件

第2章で述べた配管要素試験のうち、き裂付き試験体である SCC 試験体および EDM 試験体について、有限要素法を用いた弾塑性解析を実施し最大変位時の J_{\max} を求め、き裂進展解析を実施した。解析には有限要素法解析コード ABAQUS を使用し、配管をアイソパラメトリック 8 節点厚肉 Shell 要素で分割した。また、き裂導入部には、表面き裂に沿って対称ラインスプリング要素を使用した。要素数 350、節点数 980 であり、応力-ひずみ曲線は Ramberg-Osgood の式に従うものとして多直線近似して使用した。図 4.2.2-1 に応力ひずみ曲線を、式(4.2.2.1)に近似式を示す。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_0 \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (4.2.2.1)$$

$$E = 193\text{GPa}$$

$$\varepsilon_0 = 0.10152\%$$

$$\sigma_0 = 196\text{MPa}$$

$$\alpha = 1.97$$

$$n = 5.44$$

ABAQUS の弾塑性ラインスプリング要素は、膜変形と曲げ変形によってモード I が卓越する Shell の表面き裂問題に非弾性変形の効果を経済的な方法で含めることができる。今回の解析ではき裂閉口の影響は無視し、き裂開口のみの影響を考慮した。従って、き裂が開口する方向のみに強制変位を与える片振り変位制御の解析を行った。実験では正弦波の負方向の入力がき裂開口方向に当たるため、解析では図 2.2.1-8(a) に示した入力波形の負方向変位のみを入力している。また、実際の試験では入力変位が一定振幅に達するまでに 10 サイクルの漸増部分が存在するが、解析では漸増部分の入力を無視した。ランダム振幅波についても、図 2.2.1-8(b) に示す入力波形の負方向変位のみを入力した。また、内圧は与えていない。

モデルは対称性を考慮して試験体の 1/2 をモデル化し、全周き裂の試験体は断面の半周にき裂を導入した。その他のモデルは実験と同様の形状を入力して解析を行った。配管端部には剛体要素を使用した。図 4.2.2-2 に要素分割図を示す。図中の太線で示したはり要素が全周 EDM き裂付き試験体のラインスプリング要素である。

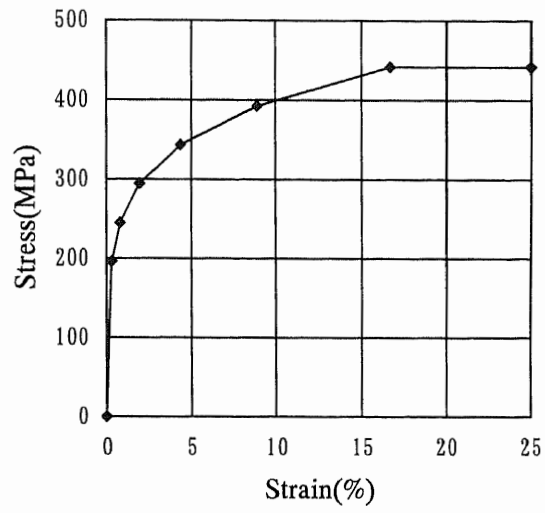


図 4.2.2-1 解析に用いた応力ひずみ関係
 Fig.4.2.2-1 Stress-Strain curve used in the analyses.

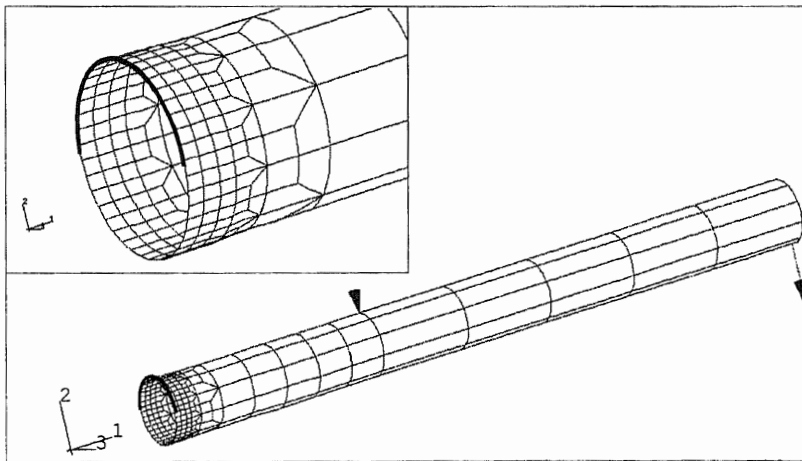


図 4.2.2-2 配管要素分割図
 Fig.4.2.2-2 Finite element mesh subdivision.

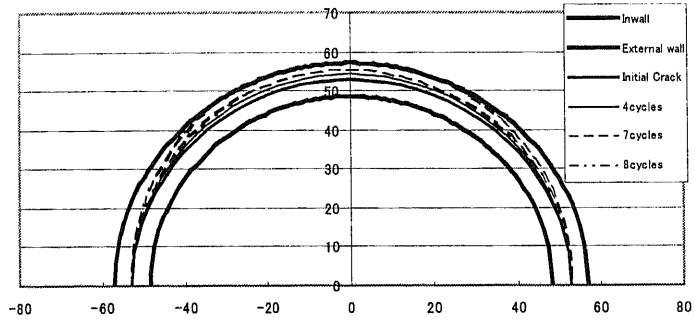
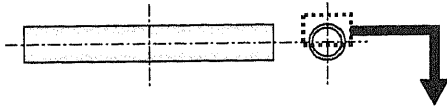
4.2.3 実験結果と解析結果の比較

実験と解析におけるき裂貫通までに要した繰返し数を表4.2.3-1に示す。また、正弦波により载荷を行った各モデルの、繰返しによるき裂進展状況の解析結果を図4.2.3-1に示す。表4.2.3-1および図4.2.3-1から、解析により実験における各試験体のき裂進展・貫通の傾向をほぼ再現できていることがわかる。き裂形状ごとの解析結果を比較すると、全周き裂および内角 90° の矩形き裂を付与した試験体については実験と比較して解析の方が寿命を短く評価しているが、SCCおよびSCCを模擬した半楕円き裂を付与した試験体に対しては実験結果と比較して解析の方が長寿命側の結果となるものが多く、全体にき裂の大きさが小さいほど解析ではき裂進展を遅く評価する傾向となっている。また、実験結果では、SCCよりもSCCを模擬したEDMき裂の方が短いサイクル数でき裂が貫通する傾向にあるが、解析を行ったSC07とEM08を比較すると、SC07の方が短いサイクル数でき裂貫通に至っている。これは、SCCのき裂形状は配管の周方向断面に対して凹凸のある三次元的な形状をしているのに対し、解析ではSCCの周方向断面に対する投影形状のみを考慮し凹凸を無視しているという点が影響している可能性が考えられる。

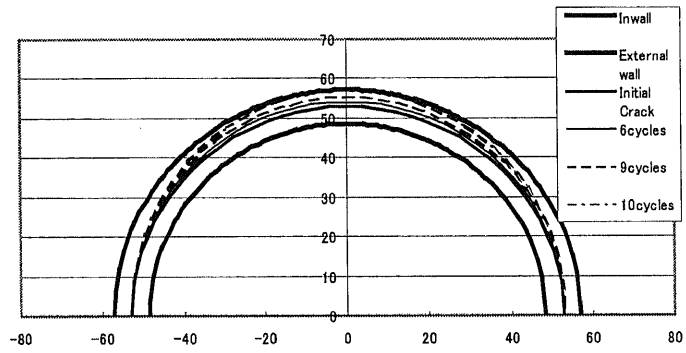
実験と解析で得られた寿命を比較すると図4.2.3-2に示すようになる。図4.2.3-2で、実線で示した直線は実験結果と解析結果が一致することを意味している。また、点線で示した直線で囲まれた範囲は、解析結果が実験結果の $1/2$ 倍～2倍となる範囲を示している。ランダム振幅波で载荷を行ったEM03およびEM05については、解析の方が実験よりも早いき裂進展を予測しているが、正弦波で载荷を行ったその他の試験体については、いずれも実験結果と解析結果が一致する直線近傍に点在しており、今回実施したような解析手法は誤差要因を多く含む極低サイクルの疲労き裂進展・貫通挙動の評価および寿命予測を実用上十分な精度で評価できると考えられる。

表 4.2.3-1 解析結果と実験結果の比較
Table 4.2.3-1 Comparison of analytical results and experimental results.

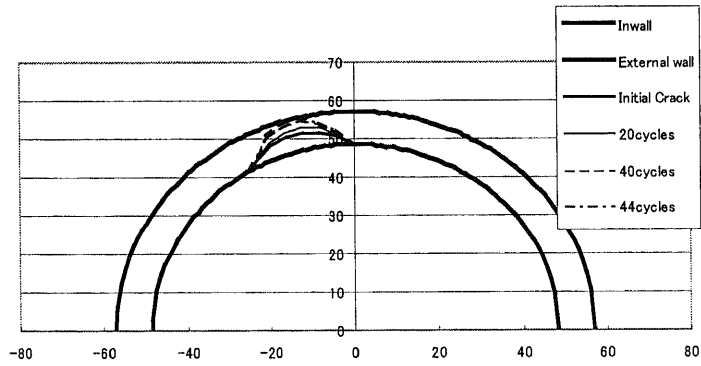
Test specimen Name	Flaw shape and type			Loading condition	Experimental result	Analytical result
	Material	Crack Type	Depth t:Thickness deg			
SC01	SUS304	SCC	-	Sinusoidal	±50mm × 5 blocks	71 (3 blocks correspond.)
SC07	SUS304	SCC	-	Sinusoidal	±50mm × 5 blocks	173 (7 blocks correspond.)
EM02	SUS304	EDM	0.5t	Sinusoidal	±25mm × 1block (Constant region 16 waves)	8
EM03	SUS304	EDM	0.5t	Random amplitude wave	±25mm × 10 blocks	69 (2blocks correspond.)
EM04	SUS304	EDM	0.5t	Sinusoidal	±21mm × 1block (Constant region 18 waves)	10
EM05	SUS304	EDM	0.5t	Random amplitude wave	±35mm × 4 blocks	61 (2 blocks correspond.)
EM06	SUS304	EDM	SCC Crack and equivalent cross section (SC01 simulation)	Sinusoidal	±50mm × 2 blocks	44 (2 blocks correspond.)
EM08	SUS304	EDM	SCC Crack and equivalent cross section (SC07 simulation)	Sinusoidal	±50mm × 4 blocks	214 (9 blocks correspond.)
EM09	SUS304	EDM	0.5t	Sinusoidal	±35mm × 1 block (Constant region 19 waves)	10



(a) EM02.



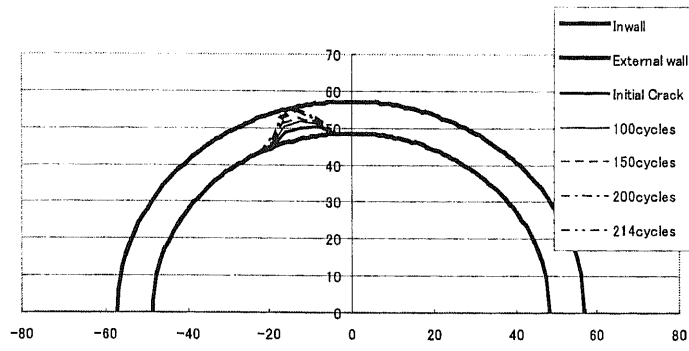
(b) EM04.



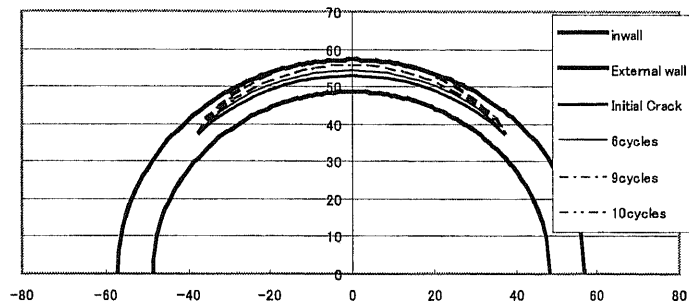
(c) EM05.

図 4.2.3-1 荷重に伴う表面き裂の進展形状 (1/2)

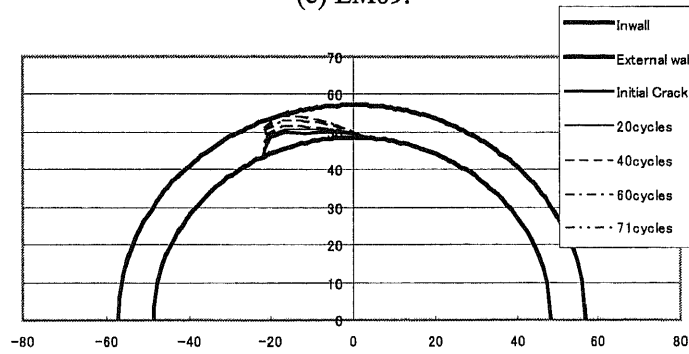
Fig.4.2.3-1 Surface crack extension with increasing load cycles (1/2).



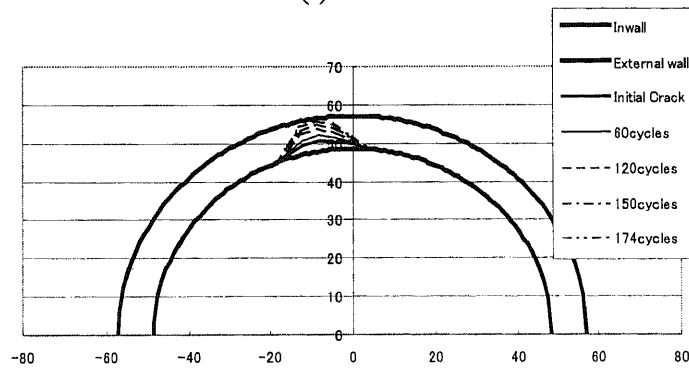
(d) EM08.



(e) EM09.



(f) SC01.



(g) SC07.

図 4.2.3-1 荷重に伴う表面き裂の進展形状 (2/2)

Fig.4.2.3-1 Surface crack extension with increasing load cycles (2/2).

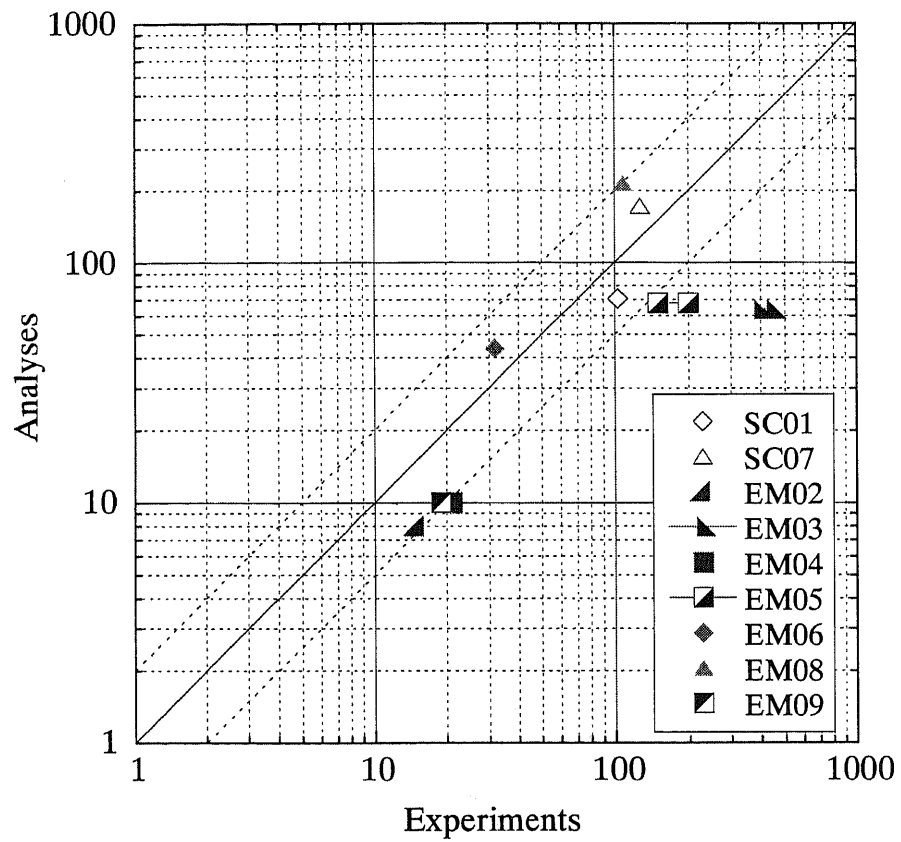


図4.2.3-2 実験と解析におけるき裂貫通までの繰り返し数の比較

Fig.4.2.3-2 Comparison between the experiment and analyses in the number of crack penetration cycles.

4.3 減肉部分を有する直管に対する詳細解析

4.3.1 解析モデルと条件

第2章で述べた直管要素試験のうち、減肉配管試験体について、有限要素法を用いた詳細解析を実施した。解析にあたっては、モデルの作成および要素分割を行うプリプロセッシングにJ-VISIONを、実際に計算を行うソルバーには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。解析では、それぞれの試験体に対して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2.2.1-8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ている。配管はアイソパラメトリック20節点要素を使用した。また、形状は対称性を考慮して1/4モデルを使用し、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、内圧の影響により配管が膨らんでから強制変位を与えた。要素数は1104、節点数は6041であり、図4.3.1-1に示すとおり減肉部分に近づくと分割要素が細くなるように設定した。ここでは図4.3.1-1において左図の右側を固定し、左側の矢印に変位を与えている。

弾塑性解析に使用した式はMisesの降伏条件に基づくPrandtl-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4.3.1-2に解析に用いた材料特性を示す。

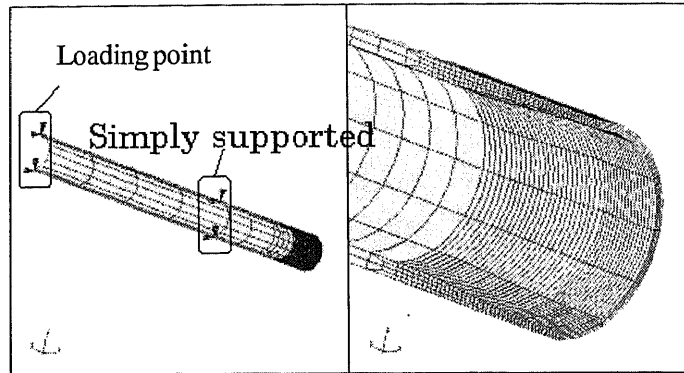


図 4.3.1-1 FEM 解析に用いたメッシュ図
 Fig.4.3.1-1 Finite element mesh subdivision.

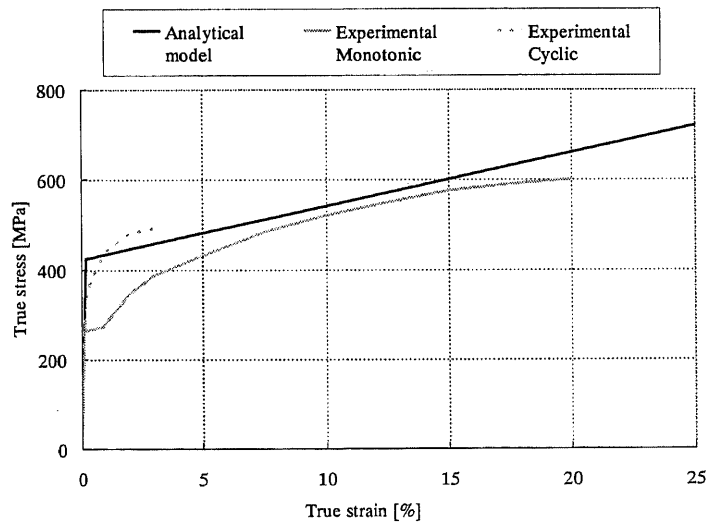


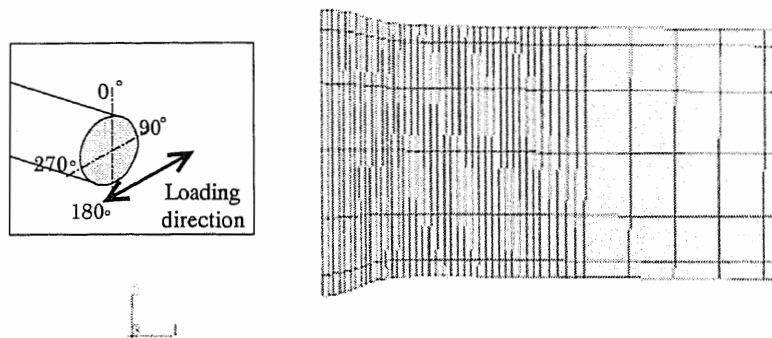
図 4.3.1-2 解析に用いた材料特性
 Fig.4.3.1-2 Material property for the analysis.

4.3.2 実験結果と解析結果の比較

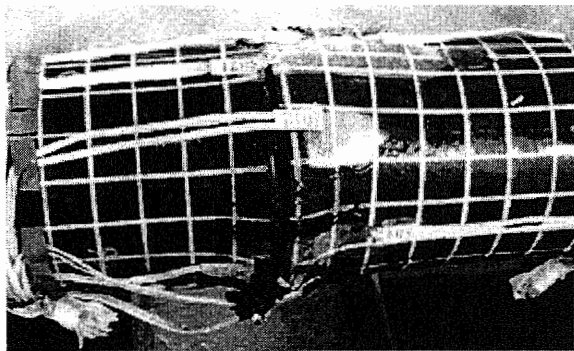
7体実施した試験体のうち、EC05について、図4.3.2-1(a)に解析により得られた変形状況を、図4.3.2-1(b)に実験で得られた配管変形状況を示す。図中 $\theta = 90^\circ - 270^\circ$ は $90^\circ \sim 270^\circ$ 方向（载荷方向）の断面であることを示す。図4.3.2-1(a)、(b)より、実験で観察されたラチェット変形による配管外径の増加が解析によりよく再現できていることがわかる。また、図4.3.2-2に実験と解析の荷重変形関係を、図4.3.2-3に载荷点反力の繰り返し回数に対する変化（実験結果は载荷点反力の時刻歴波形）を示す。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ため、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载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。ここでは省略するが他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。

また、実験のき裂貫通時における外径計測結果と解析結果の比較を図4.3.2-4に示す。図4.3.2-4において、Y1軸は外径を、Y2軸は肉厚を示している。解析結果より、载荷により最も大きな繰り返し応力を受ける部位である 90° および 270° 方向において、7サイクル目あたりから顕著な外径増加および肉厚の減少が生じており、軸方向の繰り返し変形を受ける位置で内圧との重畳によるラチェット現象が生じていることが確認される。一方、载荷直交方向の 0° および 180° 方向における外径増加および肉厚減少の程度は载荷方向に較べて小さい。これは载荷直交方向が中立面にあたり、この位置では軸方向の繰り返し応力が小さいためであると考えられる。第2章で述べたとおり実験結果でも同様の傾向となっており、解析によりラチェット現象による外径増加の傾向をよく再現できていると考えられる。

また、内圧を負荷しないで载荷を行ったEC06について、図4.3.2-5に実験と解析で得られた変形状況を、図4.3.2-6に外径変化の比較および解析の肉厚変化を示す。図4.3.2-5および図4.3.2-6で示されたとおり、内圧の有無にかかわらず解析により実験で得られた挙動がよく再現できている。



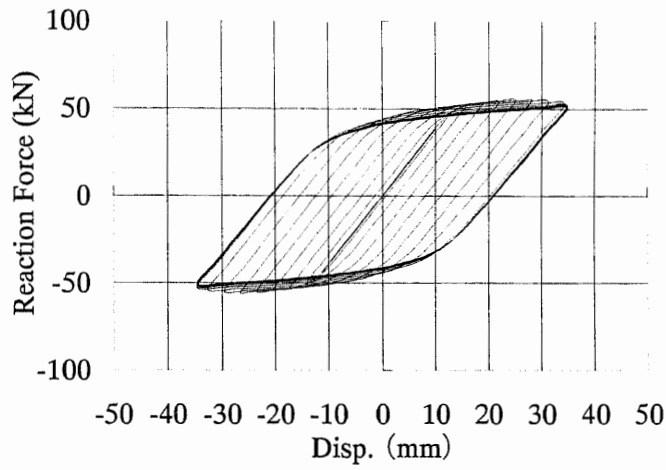
(a) Analysis ($\theta = 90^\circ - 180^\circ$).



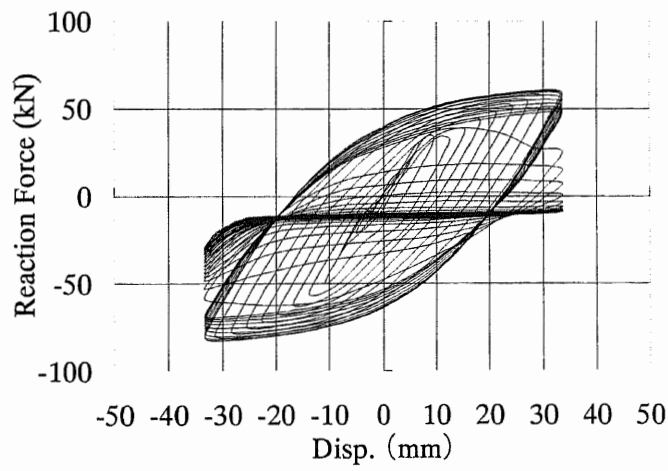
(b) Experiment.

図 4.3.2-1 EC05 の変形図比較

Fig.4.3.2-1 Deformation comparison of EC05.



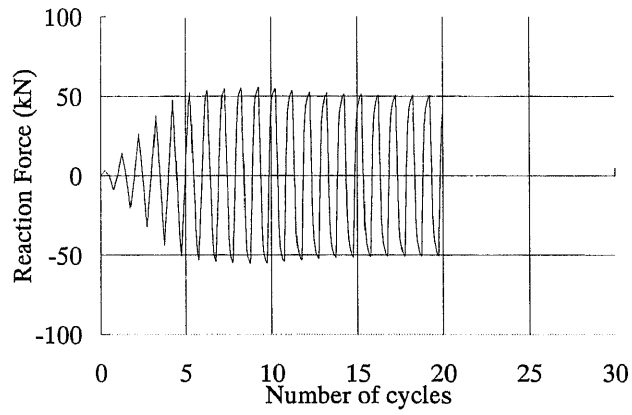
(a) Analysis.



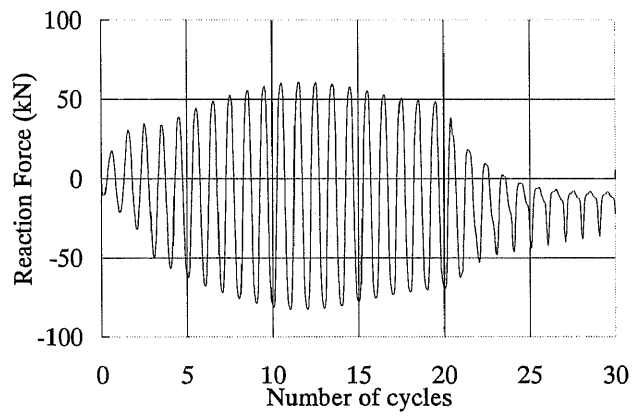
(b) Experiment.

図 4.3.2-2 EC05 の荷重変形関係

Fig.4.3.2-2 Load - deformation curves of EC05.



(a) Analysis.



(b) Experiment.

図 4.3.2-3 EC05 における荷重点反力の履歴

Fig.4.3.2-3 Load point reaction force of EC05 for Number of cycles.

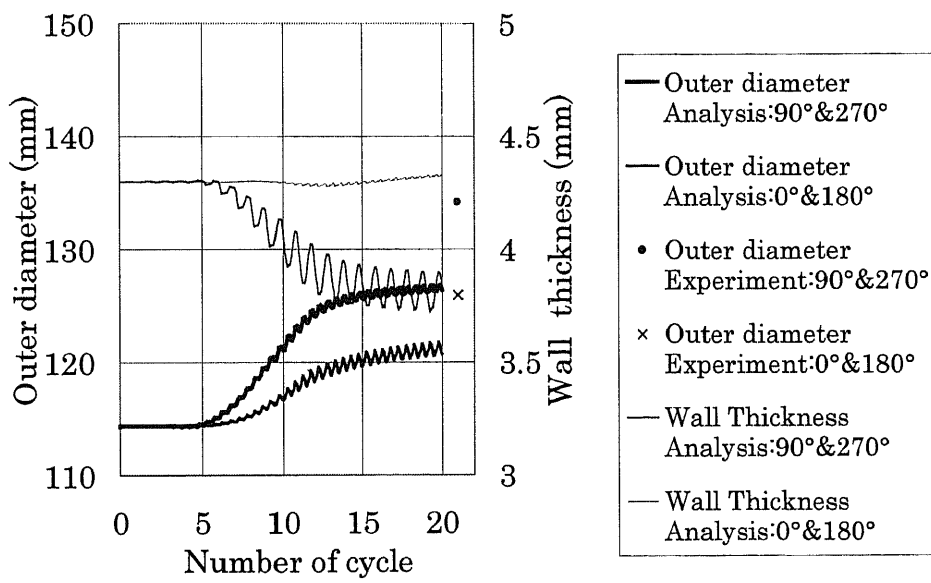
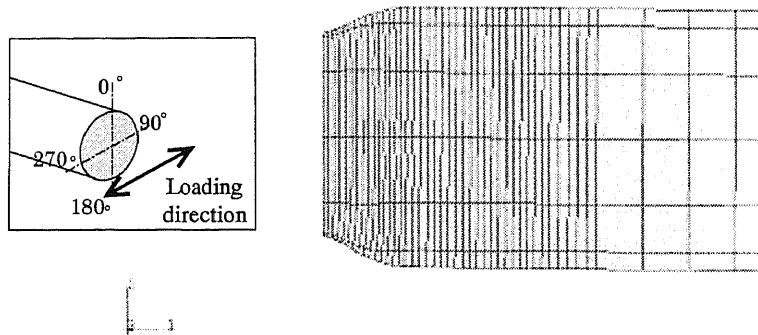
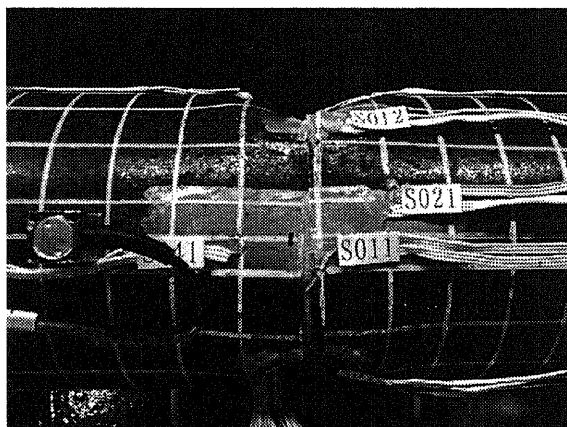


図 4.3.2-4 EC05 のサイクル数に対する外径および肉厚変化

Fig.4.3.2-4 Outer diameter and wall thickness change of EC05 for Number of cycles.



(a) Analysis ($\theta = 90^\circ - 180^\circ$).



(b) Experiment.

図 4.3.2-5 EC06 の変形図比較

Fig.4.3.2-5 Deformation comparison of EC06.

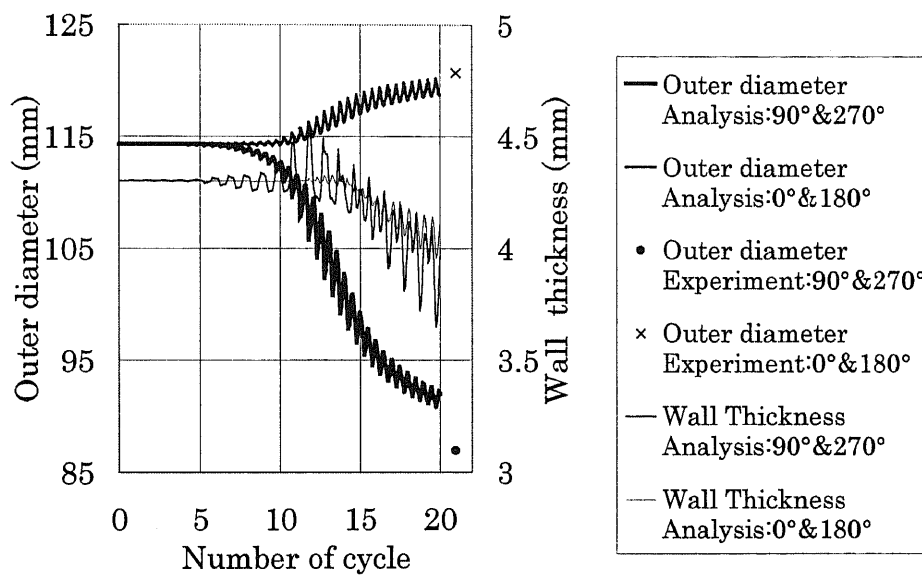


図 4.3.2-6 EC06 のサイクル数に対する外径および肉厚変化

Fig.4.3.2-6 Outer diameter and wall thickness change of EC06 for Number of cycles.

4.3.3 減肉のある直管のき裂発生メカニズムと破損挙動

EC05 の配管断面での相当塑性ひずみ累積値の分布図（以下累積相当塑性ひずみ分布図）を図 4.3.3-1 に示す。図 4.3.3-1 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 4.3.3-1 から、配管中央断面内面の点 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。この、き裂発生位置にあたる点 B について、軸方向、周方向、半径方向の繰り返しに伴うひずみ挙動を図 4.3.3-2 に示す。また、図 4.3.3-3 には同じ点の、対応する繰り返しの応力挙動を示す。これらの図から以下のことが言える。

- (1) 繰り返しに伴い周方向の平均ひずみは増加し、半径方向の平均ひずみは減少する。
これは図 4.3.2-1 において示された 90° の部位における顕著な外径の増加および肉厚の減少に対応しており、この部分でラチェット変形が生じていることを示している。本解析ではラチェット挙動の再現に対する特別な仮定を行っていないが、一般的な弾塑性に関する構成式を用いてラチェット現象が表現できることを示している。
- (2) 三方向のひずみ振幅の中では軸方向のひずみ振幅が最も大きい。実験において、点 B 近傍から周方向にき裂が発生しているのは、この軸方向のひずみ振幅によるものであると考えられる。
- (3) 周方向および半径方向のひずみ振幅の位相は軸方向のひずみ振幅の位相と完全に逆転している。これは繰り返し曲げにより、まず軸方向に大きなひずみが発生し、半径方向および周方向のひずみは軸方向ひずみに対してポアソン効果により生じているためと考えられる。

さらに、図 4.3.3-1 に示す配管の中心近傍の点 A ～点 D についてひずみ挙動の比較検討を行う。点 A ～点 D について、軸方向のひずみ挙動を比較したものを図 4.3.3-4 に示す。点 B が若干の圧縮ひずみで大きなひずみ振幅を保つのに対し、同じ配管中央断面の外表面にあたる点 A においては、10 サイクル（強制入力変位が定常振幅になるサイクル数）あたりで引張に転じ、ひずみ振幅も徐々に減少していく。これはラチェットの発生により配管の外径が増加するに従い形状変化の影響で、図 4.3.3-5 に示すように断面 A-B 部分に配管全体の曲げ（Global Bending）と逆向きに作用する局所的な曲げ（Local Bending）が生じるためであると考えられる。この 2 つの曲げ作用が重なることにより

点Bで非常に大きな軸方向のひずみ振幅が生じると考えられる。肉厚変化部分にあたる点Cおよび点Dについては、点Cでは点Aが引張になる影響で圧縮側に、また点Dでは点Bが圧縮になる影響で引張になる。つまり、全体の曲げに対して点A～点Dにおいて局所的に2つの曲げが起こっていると考えられ、この2つの曲げが配管の破壊に対して影響を与えているものと考えられる。図4.3.3-5は配管中央断面上部が圧縮となるとき軸方向の応力分布を示す。この図において、色が濃くなるにつれて引張応力が大きくなることを示しており、上述したように2つの曲げが生じていることが確認される。この局所的に2つの曲げが生じる現象は、減肉形状が同じで±25mmの正弦波により載荷したEC02にも当てはまる。つまりこれらのモデルでは点Bにおいて軸方向のひずみ振幅が最大となり、上述したような配管全体の曲げと局所的な曲げが重畳するというメカニズムによって点Bの周方向にき裂が発生するものと考えられる。EC06を除く、内圧を負荷した全ての試験体における破壊メカニズムはこの形態であると考えられる。

一方内圧のないEC06について、20サイクルまでの入力を終了した時点の累積相当塑性ひずみ分布図を図4.3.3-6に示す。図4.3.3-1と同様、色が濃くなるにつれて相当塑性ひずみの値が大きくなる。図4.3.3-6に示したように、中央部分の上下断面において局所的な座屈が発生していることがわかる。これはサイクルを重ねるごとに断面が扁平化し、曲げ剛性が低下して最終的にAB断面近傍(90°および270°方向)で局所座屈が発生したのと考えられる。また、図4.3.3-7に点A～点Dにおける軸方向のひずみ履歴を示す。図4.3.3-7に示したように、点Bのひずみ履歴は13サイクルくらいから位相が逆転している。これは13サイクル付近から座屈による断面上下部の折れ込みが激しくなり、形状変化の影響から次第に点Aの軸方向ひずみ振幅が最大となり、外側から周方向にき裂が発生したと考えられる。

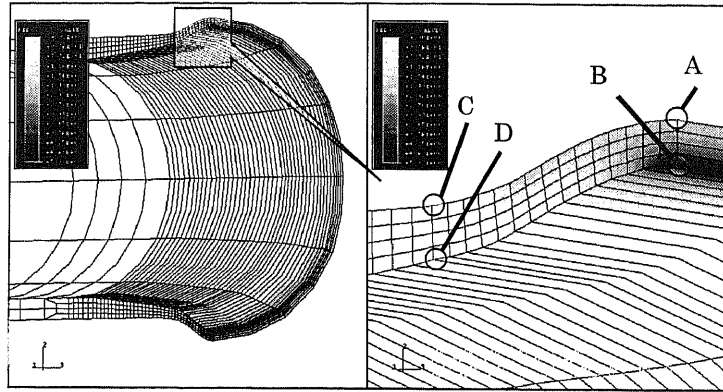


図 4.3.3-1 EC05 の相当塑性ひずみ分布図
 Fig.4.3.3-1 Equivalent plastic strain distribution of EC05.

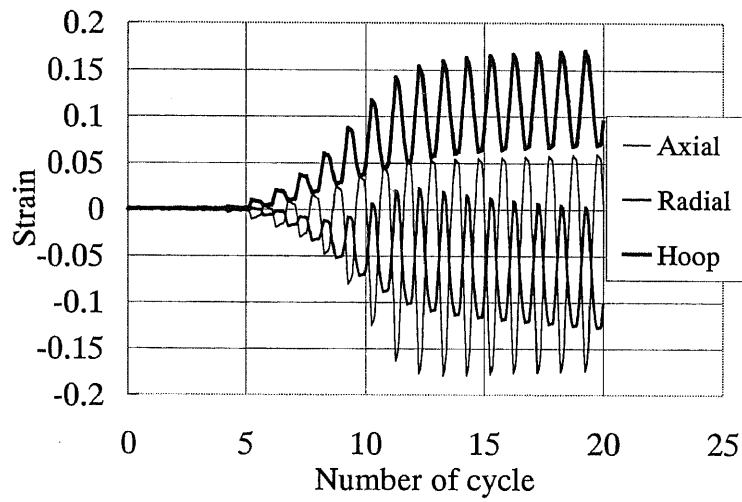


図 4.3.3-2 点 B における 3 方向のひずみ
 Fig.4.3.3-2 Strain of three directions at point B.

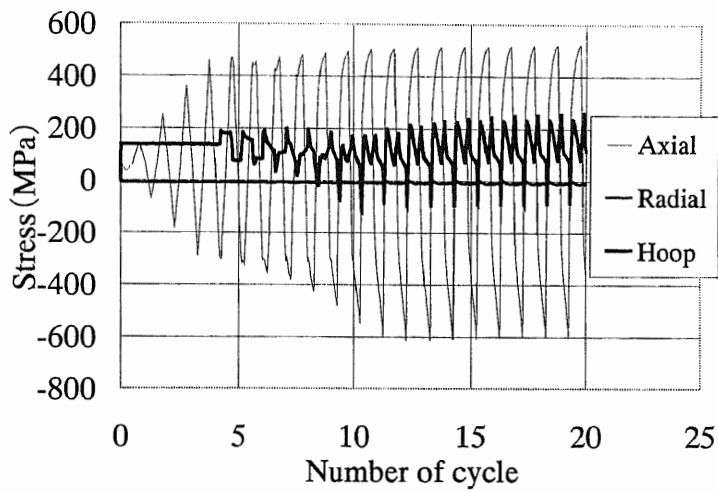


図 4.3.3-3 点 B における 3 方向の応力
 Fig.4.3.3-3 Stress of three directions at point B.

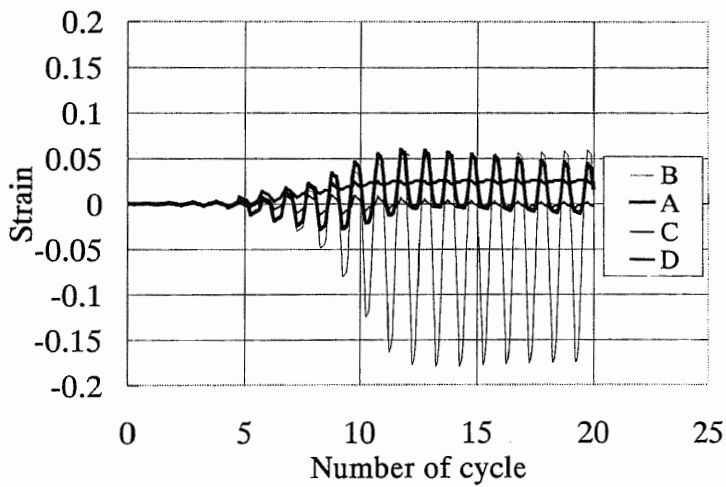


図 4.3.3-4 EC05 の図 4.3.3-1 に示した点 A ~ D における軸方向ひずみ
 Fig.4.3.3-4 Axial strain at point A - D in Fig. 4.3.3-1 of EC05.

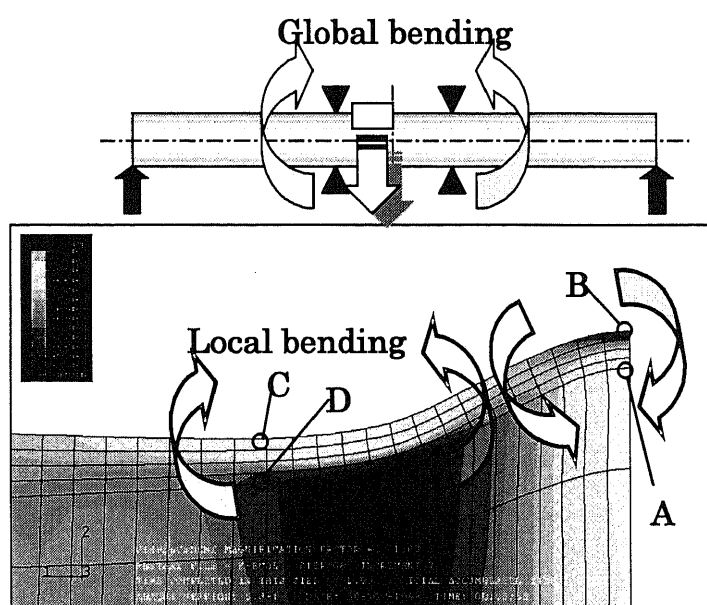


図 4.3.3-5 全体の曲げによる圧縮時の応力分布
 Fig.4.3.3-5 Axial stress in compression.

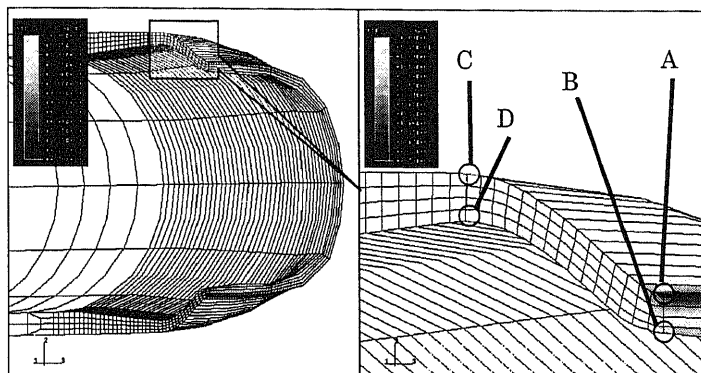


図 4.3.3-6 EC06 の相当塑性ひずみ分布
 Fig.4.3.3-6 Equivalent plastic strain distribution of EC06.

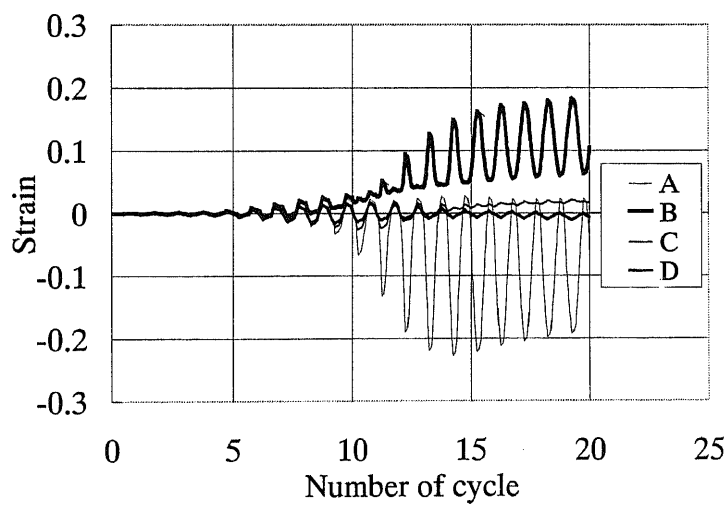


図 4.3.3-7 EC06 の図 4.3.3-6 に示した点 A ~ D における軸方向ひずみ
 Fig.4.3.3-7 Axial strain at point A - D in Fig. 4.3.3-6 of EC06.

4.3.4 Shell モデルによる簡易解析

前節までにおいて、局所的減肉部を有する配管の破壊メカニズムを考察し、累積相当塑性ひずみ分布図を参照することによりき裂発生部の特定を行った。本節では、さらに Shell モデルを使用することで、前節までに行った解析をより簡単に評価した。また、Solid モデルに対する Shell モデルの精度比較を行った。

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。本解析の特徴の一つとして、プリプロセッシングに Excel を使用したことが挙げられる。Excel を使用すると、類似したモデルをいくつか作成する場合、一つのモデルを作成すればあとは変数を変えるだけでモデルが変更できるため、減肉のように多くのパラメトリック解析を行い影響要因を評価する必要がある場合のモデル作成に有利である。

作成した Shell モデルのモデル図を図 4.3.4-1 に示す。モデル化に当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 4.3.1 で述べた条件に準じる。節点数は 582、要素数は 530 で、EC05 のモデルを例に取ると、計算に要した時間は、前述した Solid モデルが CPU-time で 8hours (HP 製 J5000 使用) であるのに対し、Shell モデルは 35min となり、Solid モデルの約 7.3% の時間で計算が実行できる。この計算時間の短縮は、何通りもの解析を行うパラメトリック解析に対し非常に有用である。

Shell モデルの信頼性を評価するために、Solid モデルと Shell モデルのそれぞれの解析で得られた EC05 の荷重変形関係を図 4.3.4-2 に示す。また、サイクル数に対する点 B のひずみについて、それぞれ比較したものを図 4.3.4-3 に示す。図 4.3.4-2 に示したとおり、それぞれの荷重変形関係は非常に類似した形状となっている。また、最大値を比較すると、Solid モデルで 55.4kN、Shell モデルで 55.5kN となり、両者は良く一致している。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ができないが、軸方向および周方向ひずみに関しては良い一致を示している。内圧のない EC06 についても同様に、Solid モデルと Shell モデルについて、サイクル数に対する荷重点反力値を比較した図を図 4.3.4-4 に、サイクル数に対する点 A のひずみを比較した図を図 4.3.4-5 に示す。これらの図から、破損メカニズムの異なる EC06 に関して、精度の良い計算結果が得られていることがわかる。

以上より Shell モデルは Solid モデルと同様の解析結果が得られることがわかった。

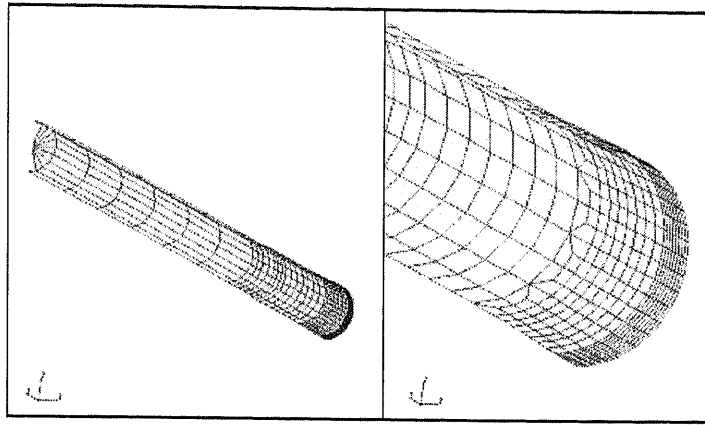
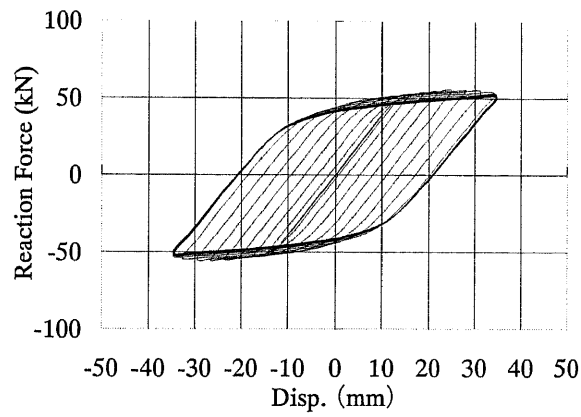
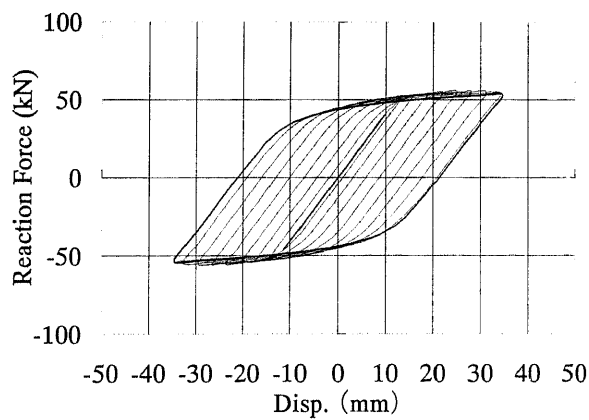


図 4.3.4-1 Shell モデルにおけるメッシュ図
 Fig.4.3.4-1 Finite element mesh subdivision.

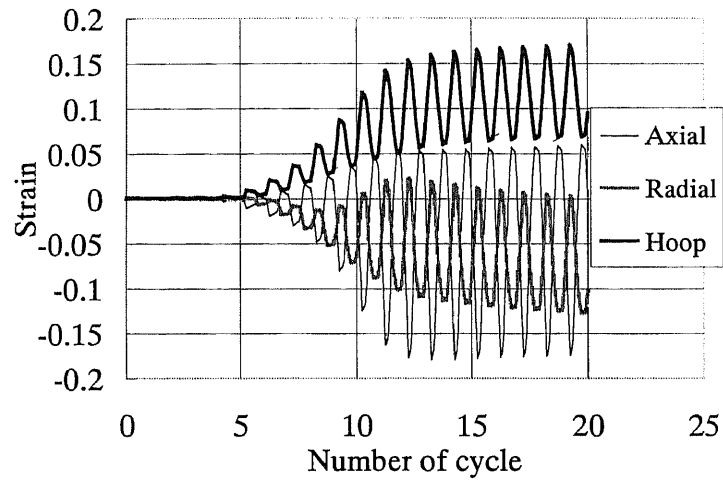


(a) Solid model.

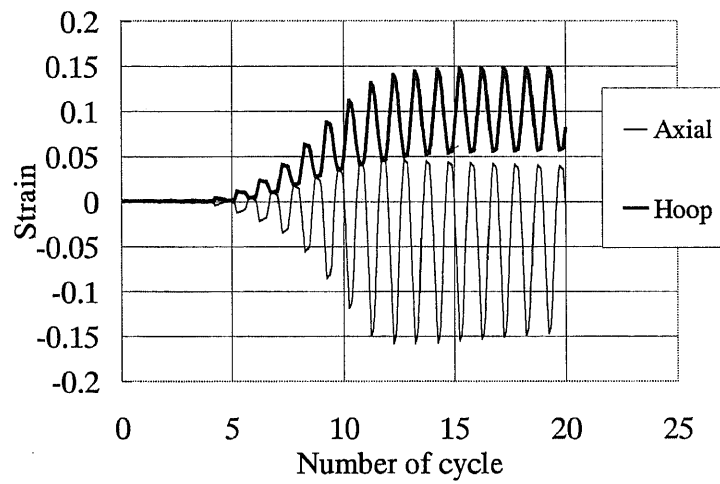


(b) Shell model.

図 4.3.4-2 EC05 における Solid モデルと Shell モデルの荷重変形関係
 Fig.4.3.4-2 Load - deformation curves of EC05 Solid and Shell model.

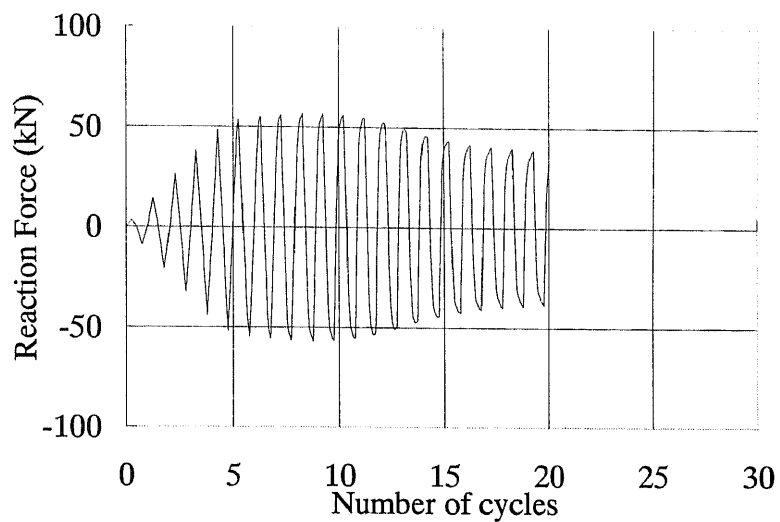


(a) Solid model.

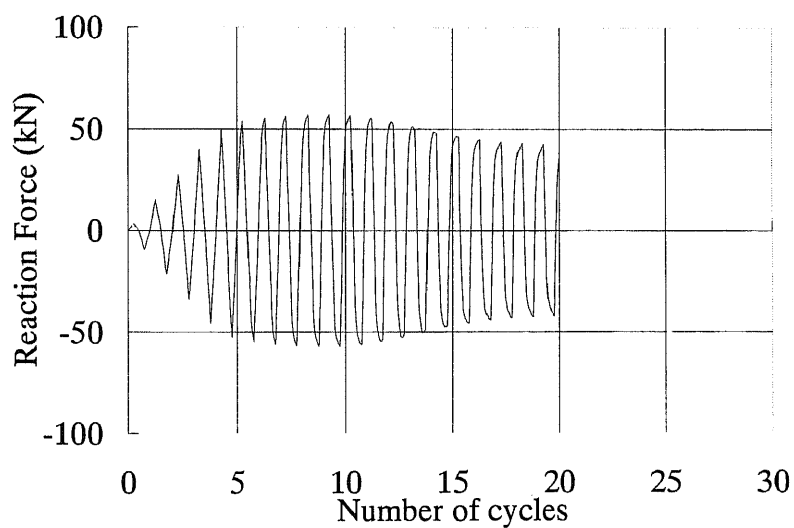


(b) Shell model.

図 4.3.4-3 EC05 における点 B のひずみ履歴
 Fig.4.3.4-3 Strain history of EC05 at Point B.



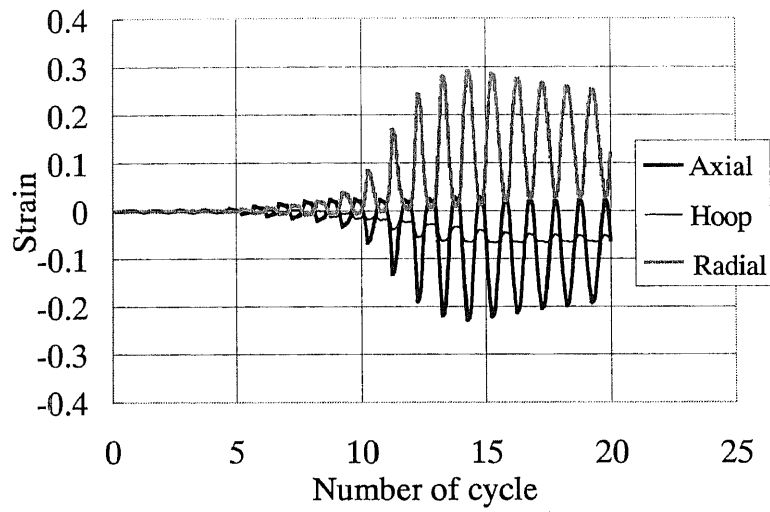
(a) Solid model.



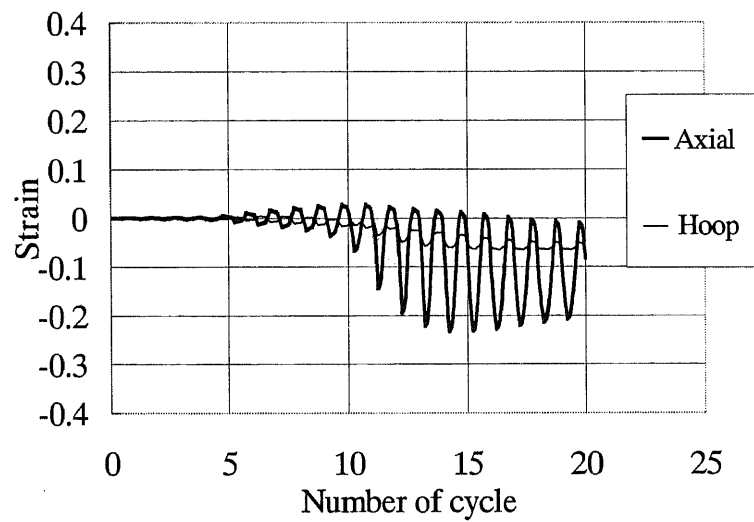
(b) Shell model.

図 4.3.4-4 EC06 における荷重点反力履歴

Fig.4.3.4-4 Load point reaction force histories of EC06.



(a) Solid model.



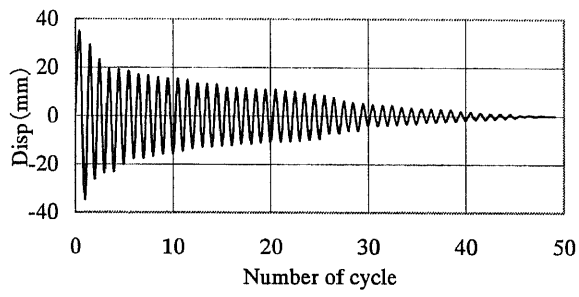
(b) Shell model.

図 4.3.4-5 EC06 における点 A のひずみ履歴

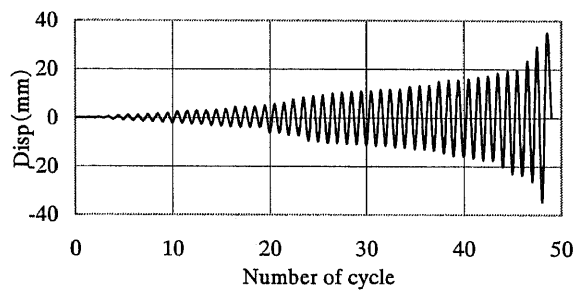
Fig.4.3.4-5 Strain history of EC06 at Point A.

4.3.5 ランダム振幅波の荷重履歴に対するラチェット挙動比較

EC04 の载荷に使用した図 2.2.1-8(b) に示すランダム振幅波の強制変位入力順序を入れ替え、4.3.4 で作成した Shell モデルを使用して解析を行い、ランダム振幅波における入力変位順序の影響を考察する。図 2.2.1-8(b) と同じ入力変位量で、その順序を大から小へ並べ替えた変位波形を入力したモデルを EC041、小から大へ移行させたモデルを EC042 とした。図 4.3.5-1 にのおおのこのモデルに入力した変位波形を示す。解析結果として、図 4.3.5-2 に EC04、EC041 および EC042 の外径および肉厚の変化を示す。図において Y1 軸が外径、Y2 軸が肉厚を示している。この図から、ある一定以上の振幅で外径および肉厚の変化が生じ、それ以下では変化が生じないことがわかる。また、図 4.3.5-3 に 3 つのモデルの点 B における 2 方向のひずみを示すが、ラチェットは強制変位がある一定値を超えたときのみ生じ、それ以外の部分ではひずみ振幅のみが生じていることがわかる。第 2 章、第 3 章で述べたとおり実験でもこのような現象が確認されており、ラチェットの発生には閾値となるレベルがあること、また、Shell モデルを使用した解析で、解析においてもこのような実験で確認された現象をよく再現できることがわかった。



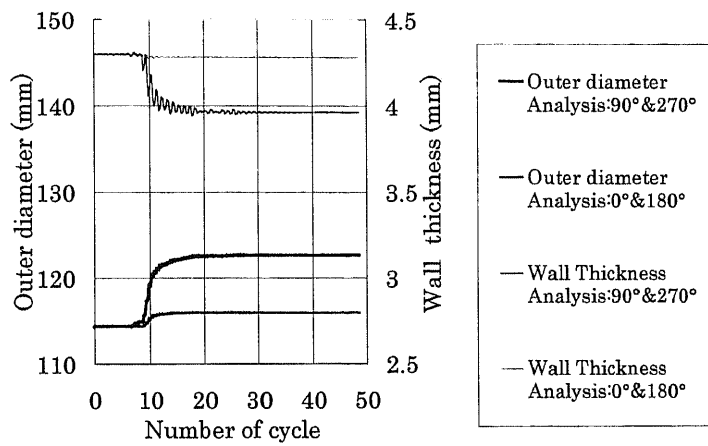
(a) EC041.



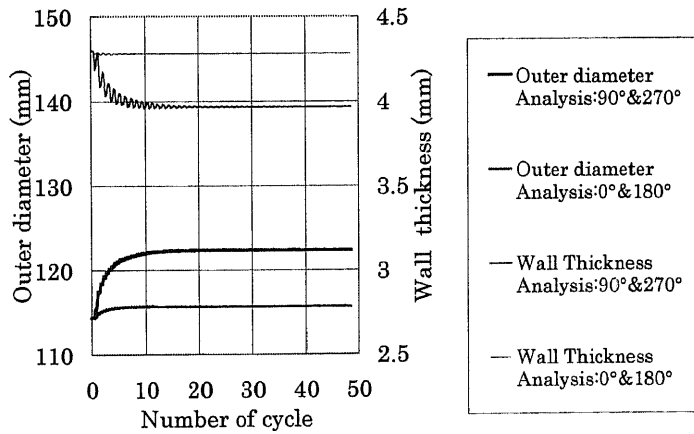
(b) EC042.

图 4.3.5-1 入力波形

Fig.4.3.5-1 Input wave form.



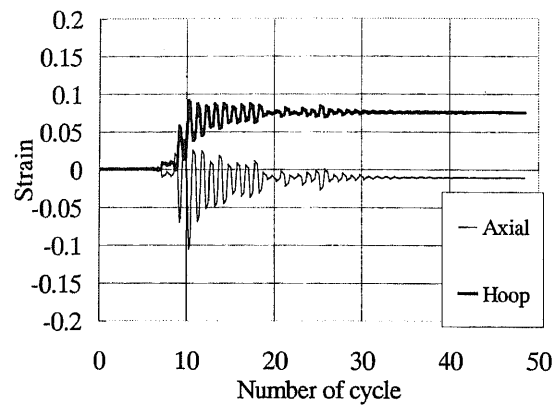
(a) EC041.



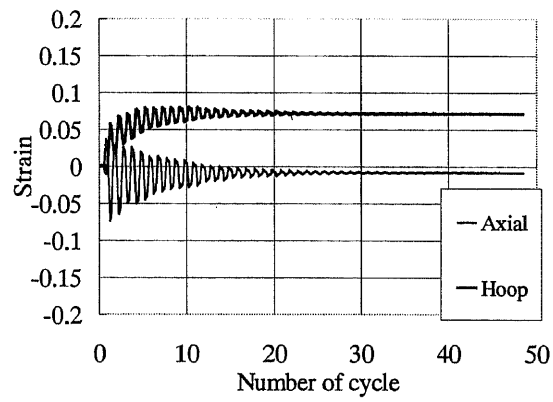
(b) EC042.

図 4.3.5-2 各解析ケースの外径及び肉厚変化

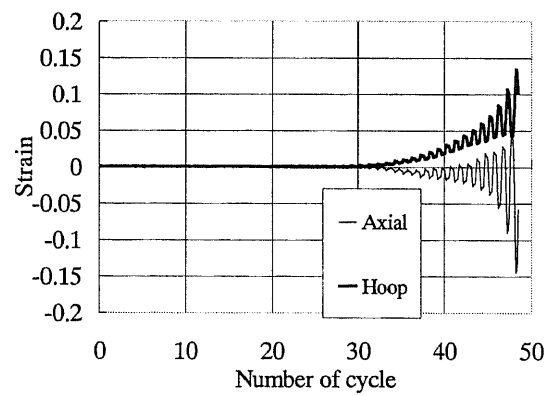
Fig.4.3.5-2 Outer diameter and wall thickness change of each analysis specimen.



(a) EC04.



(b) EC041.



(c) EC042.

図 4.3.5-3 各解析ケースの点 B のひずみ履歴

Fig.4.3.5-3 Strain time history at point B for each analysis specimen.

4.4 減肉部分を有する曲管に対する詳細解析

4.4.1 解析モデルと条件

第2章で述べた曲管要素試験体のうち、両端ピン支持で面内曲げ試験を行った試験体 ELB01～ELB05 について、有限要素法を用いた詳細解析を実施した。4.3 で述べたように、減肉部分を有する直管に対する解析から、Shell モデルにより Solid モデルとほぼ同様の解析結果が得られることが確認されたため、本解析では Shell モデルを使用した。モデルの作成および要素分割を行うプリプロセッシングに Microsoft の表計算ソフト Excel を、ソルバーには 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 をそれぞれ使用した。モデル化に際し、Shell 要素に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。対称性を考慮できない片側減肉試験体 ELB03、ELB04 については配管全体をモデル化（以下 1/1 モデル）し、対称性の考慮できるその他のモデルについては 1/2 モデルとした。1/1 モデルは要素数 2040、節点数 2000 で、1/2 モデルは要素数 1071、節点数 1000 である。それぞれのモデル図を図 4.4.1-1 に示す。曲管部分の分割は、周方向 9° 、軸方向 5° （テーパ部分のみ 2.5° ）刻みとした。解析では図 4.4.1-1 における上部の矢印に強制変位を与え、下部の変位と回転を固定している。支持部および強制変位入力部には剛体要素を導入した。入力試験に対応させて変位制御とし $\pm 70\text{mm}$ の正弦波を与えた。また、入力サイクル数は試験で損傷が発生したサイクル数を基準として入力した。弾塑性解析に使用した材料特性は 4.3 で使用したものと同様である。

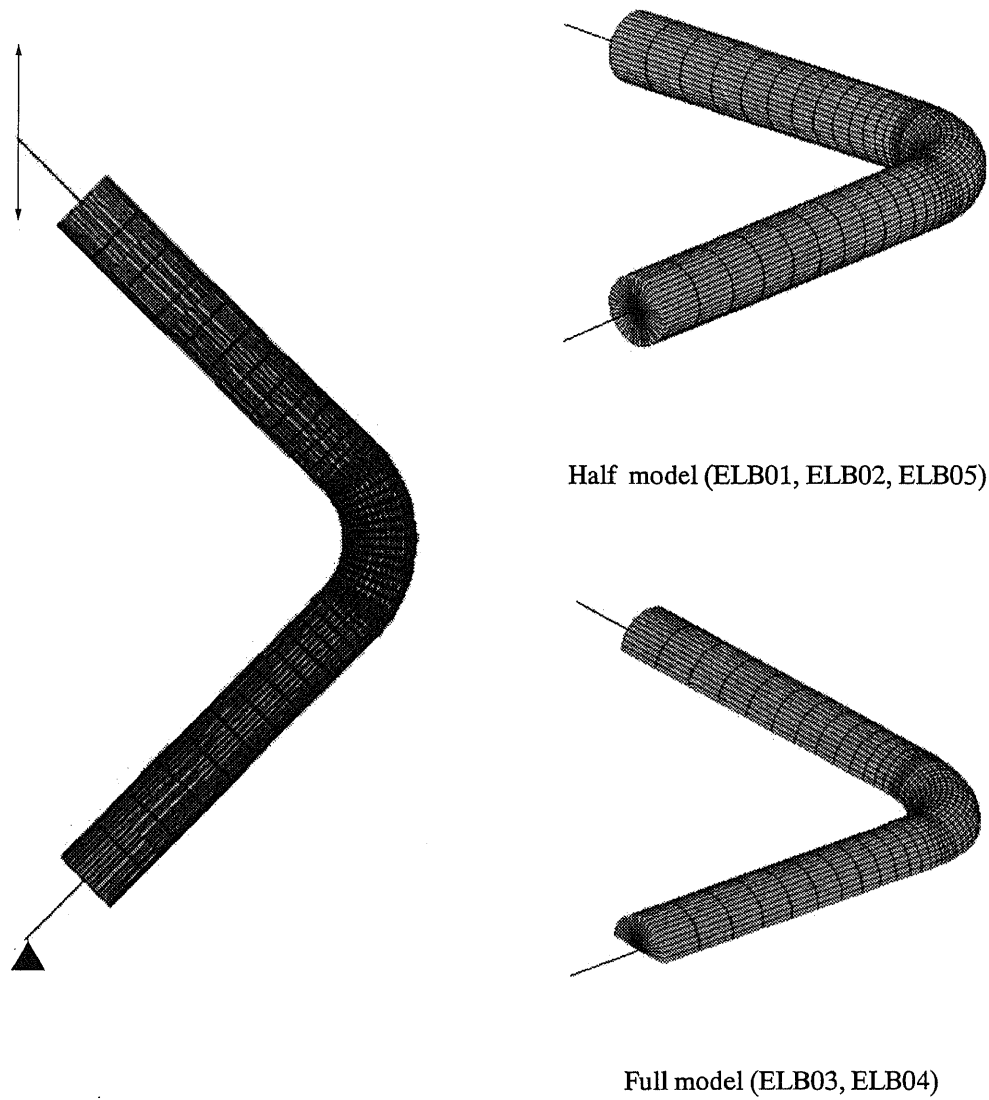


図 4.4.1-1 FEM 解析に用いたメッシュ図
Fig.4.4.1-1 Finite element mesh subdivision.

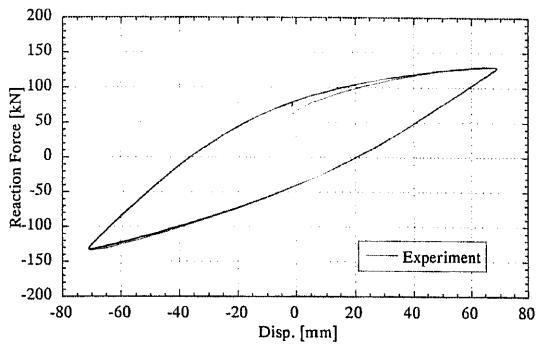
4.4.2 実験結果と解析結果の比較

5体実施した試験体のうち、健全試験体 ELB01、全周減肉試験体 ELB02、片脇 50% 減肉試験体 ELB03 について、実験と解析で得られた荷重変形関係を図 4.4.2-1 に示す。図 4.4.2-1 に示したように、解析においても実験で確認されたように減肉の程度により反力値の低下する傾向が再現できている。実験と解析を比較すると、解析の方が実験よりもやや反力が大きく、また剛性も若干高くなる傾向がある。荷重振幅で比較すると、実験値に対する解析値の誤差は約 10～20% であった。

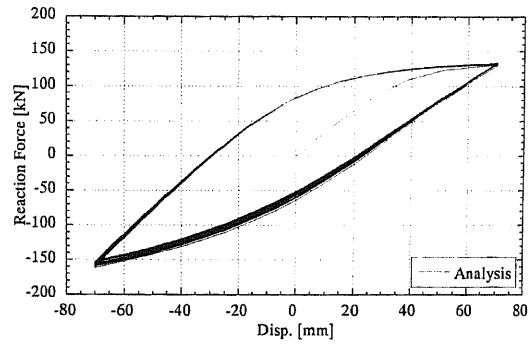
図 4.4.2-2～図 4.4.2-4 に、実験で得られた各試験体の損傷位置と、累積相当塑性ひずみ分布図、および解析により得られた試験体の変形状況を示す。ここで、図 4.4.2-2～4 に示した試験体の変形状況は解析で得られた変形を 5 倍に拡大して示している。図 4.4.2-2～図 4.4.2-4 の、試験におけるき裂発生位置と累積相当塑性ひずみ分布図を比較すると、ELB01 および ELB02 については 4.3.3 で述べた直管同様、き裂発生位置と累積相当塑性ひずみの集中する位置が対応しており、解析においては累積相当塑性ひずみ分布図を参照することでき裂発生位置の予測が可能となると考えられる。また、図 4.4.2-2 および図 4.4.2-3 に示した解析終了後の変形状況から、ELB01 では曲管部分全体にラチェットによる外径増加が発生している一方、ELB02 では腹部に座屈状の変形が生じていることがわかり、解析により変形状況をよく再現できていると言える。ELB03 については、実験では減肉側の脇部において軸方向疲労き裂が発生・貫通し、健全側脇部には内面にわずかな未貫通き裂が発生しているという結果であったが、図 4.4.2-4 に示した累積相当塑性ひずみ分布図では健全側の方で大きな相当塑性ひずみの累積を示しており、減肉側には目立ったひずみ集中が発生していない。後述するように、現在の解析モデルではひずみ振幅は比較的精度良く、かつ実験結果よりも大きめに評価するのに対し、解析により得られる平均ひずみはひずみの増分がサイクルの途中で飽和するため、破損までに多くの繰り返し数を要する場合は実験よりも低く評価する傾向がある。従って、ELB03 のように破損に対してラチェットが顕著な位置（減肉側）とひずみ振幅が支配的となる位置（健全側）が混在する場合、解析ではひずみ振幅を大きく評価する健全側の方に損傷が発生するという結果になったと考えられる。しかし解析結果から判断される ELB03 の損傷形態は曲管脇部軸方向疲労破壊であり、マクロな破損形態は現状の解析モデルでおおよそ予測できると考えられる。

図 4.4.2-5 に、実験と解析で得られた曲管脇部内面周方向と腹部軸方向のひずみ履歴を示す。図 4.4.2-5 に示したように、解析により得られたひずみ履歴は全体に実験で得られたひずみ履歴よりもひずみ振幅を大きく評価する傾向がある。また、ラチェット

の発生する点のひずみでは、载荷の初期においては実験と比較して解析における平均ひずみの増分が大きい、解析における平均ひずみの増分は40サイクル程度で飽和するのに対し、実験で得られた平均ひずみは繰り返しとともに増加する傾向を維持し続けるため、40サイクル前後で実験結果が解析の平均ひずみを上回る。定量的にはこのような違いがあるが、ELB01～ELB03の曲管脇部周方向ひずみにおいてラチェットによる平均ひずみの増加が発生する傾向、およびELB02の腹部軸方向ひずみの振幅が脇部内面周方向ひずみの振幅よりも大きくなる傾向など、定性的な傾向は本解析により再現できていると考えられる。

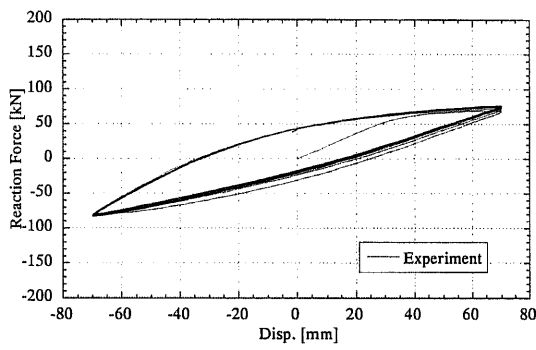


(i) Experiment.

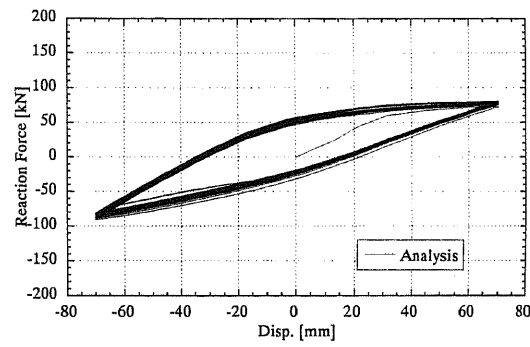


(ii) Analysis.

(a) ELB01.

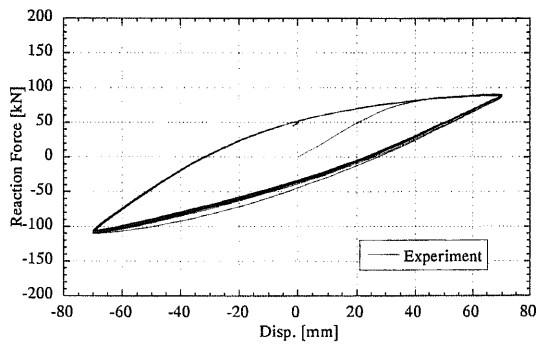


(i) Experiment.

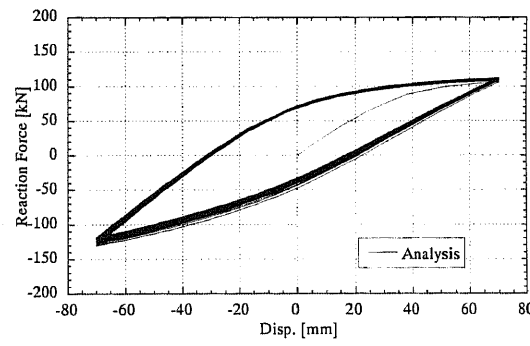


(ii) Analysis.

(b) ELB02.



(i) Experiment.

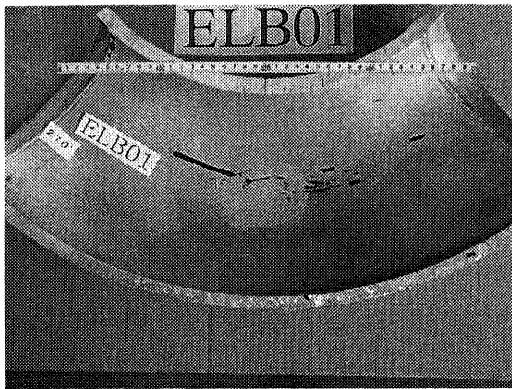


(ii) Analysis.

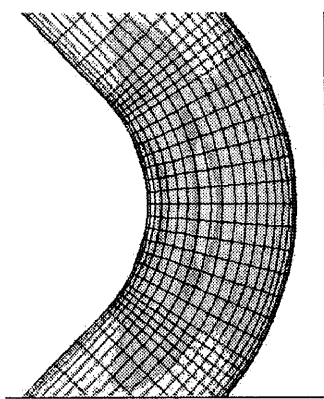
(c) ELB03.

図 4.4.2-1 実験と解析の荷重変形関係

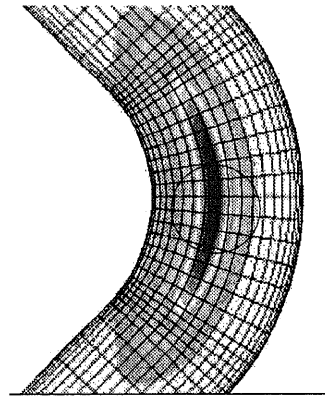
Fig.4.4.2-1 Load - deformation curves obtained through experiments and analyses.



(a) Test result.

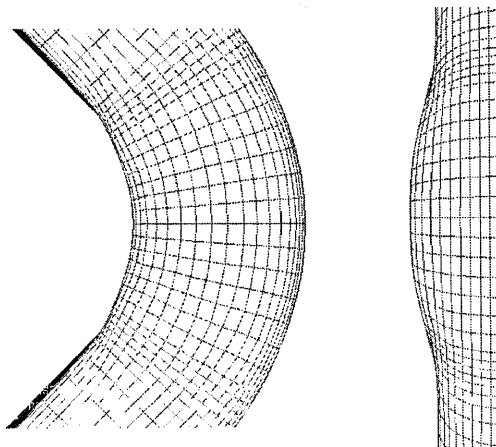


(i) Outside surface.



(ii) Inner surface.

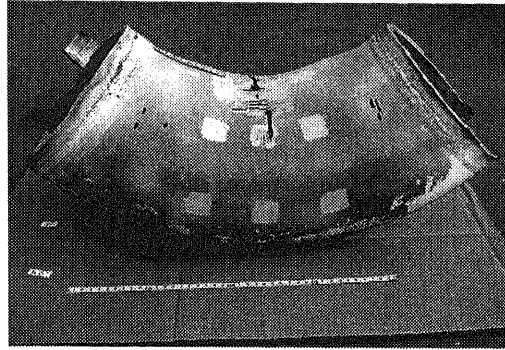
(b) Equivalent plastic strain distribution.



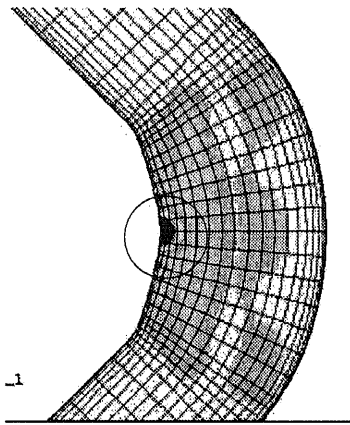
(c) Elbow deformation from analysis.

図 4.4.2-2 実験と解析の変形状況及び損傷形態 (ELB01)

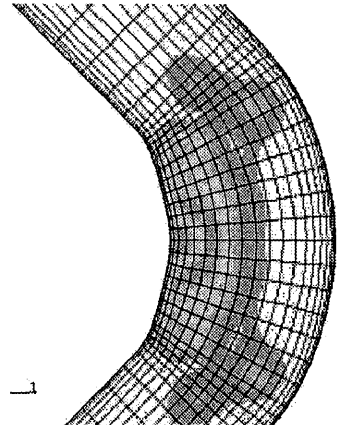
Fig.4.4.2-2 Elbow deformation and failure mode obtained through the experiment and analysis, ELB01.



(a) Test result.

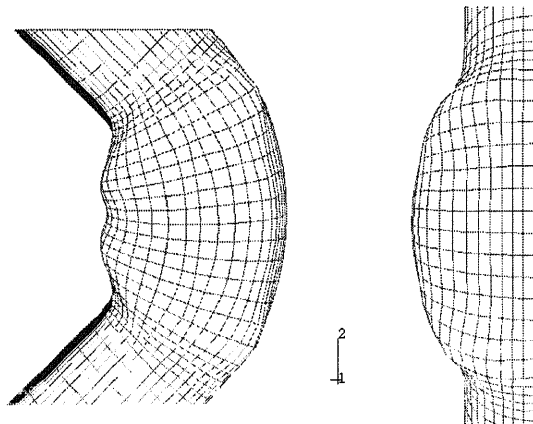


(i) Outside surface.



(ii) Inner surface.

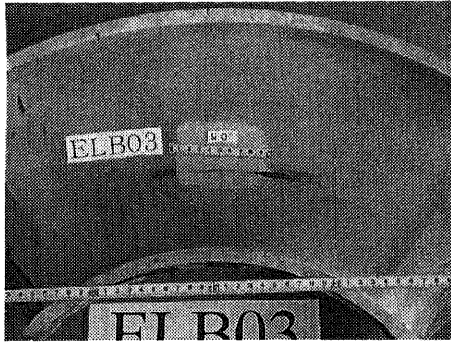
(b) Equivalent plastic strain distribution.



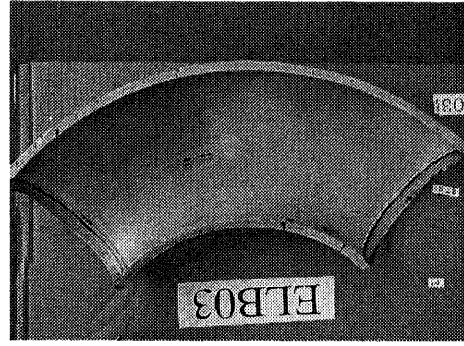
(c) Elbow deformation from analysis.

図 4.4.2-3 実験と解析の変形状況及び損傷形態 (ELB02)

Fig.4.4.2-3 Elbow deformation and failure mode obtained through the experiment and analysis, ELB02.

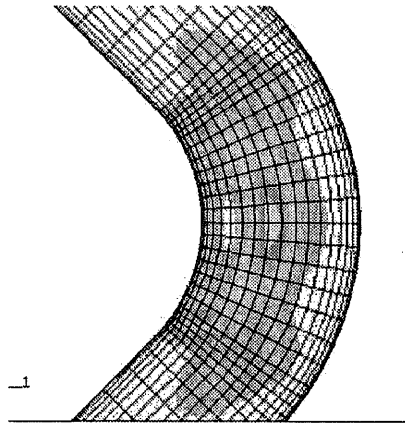


(i) Thinned wall side.

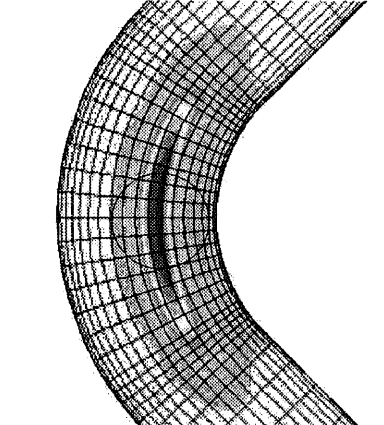


(ii) Nominal thickness side.

(a) Test result.

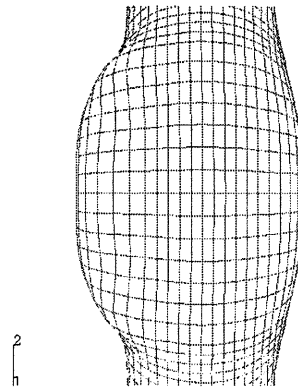
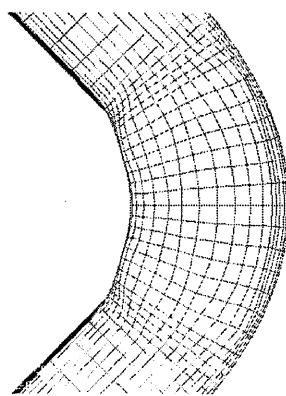


(i) Thinned wall side.



(ii) Nominal thickness side.

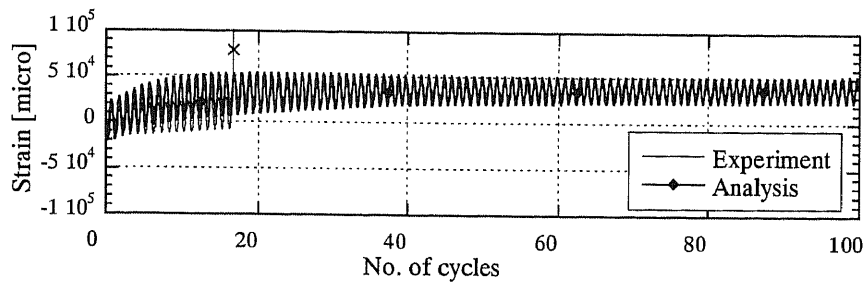
(b) Equivalent plastic strain distribution (Inner surface).



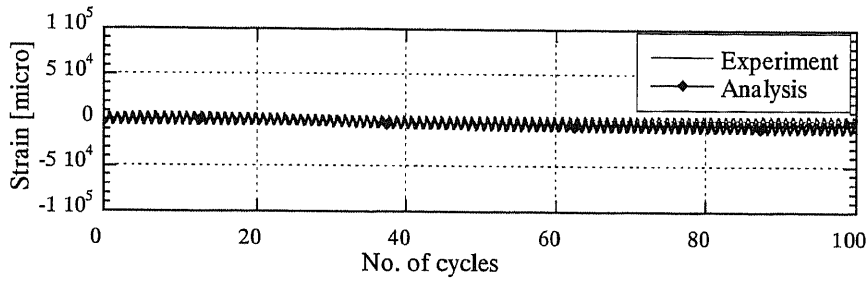
(c) Elbow deformation from analysis.

図 4.4.2-4 実験と解析の変形状況及び損傷形態 (ELB03)

Fig.4.4.2-4 Elbow deformation and failure mode obtained through the experiment and analysis, ELB03.

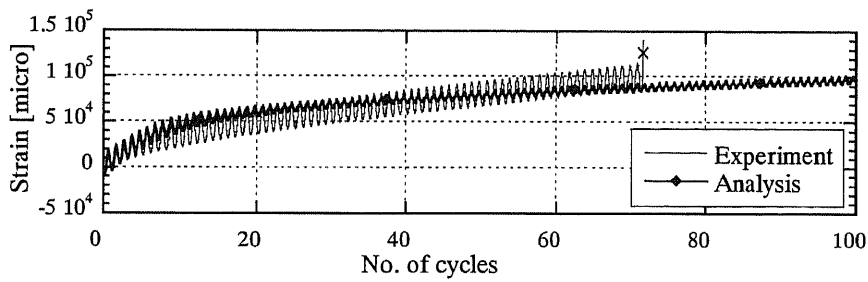


(i) SAI_7H.

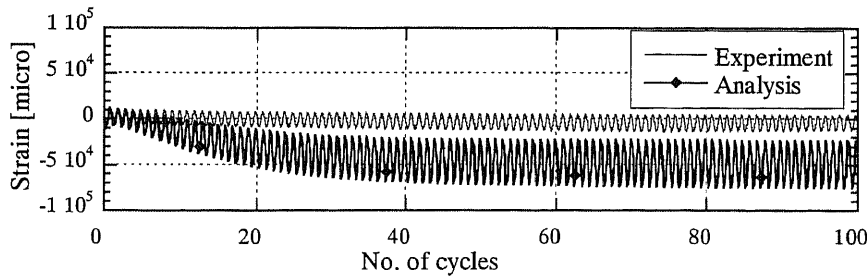


(ii) SA_1A.

(a) ELB01.



(i) SAI_7H.



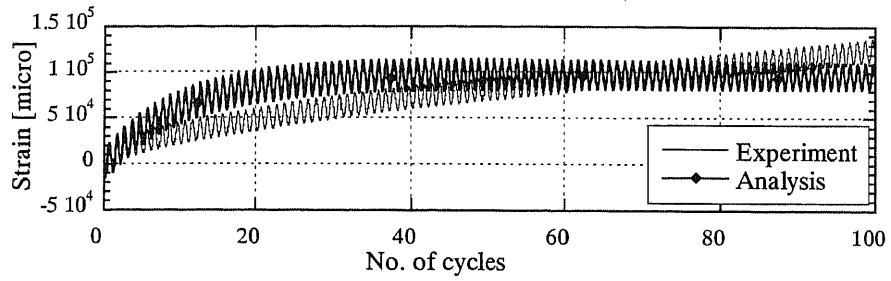
(ii) SA_1A.

(b) ELB02.

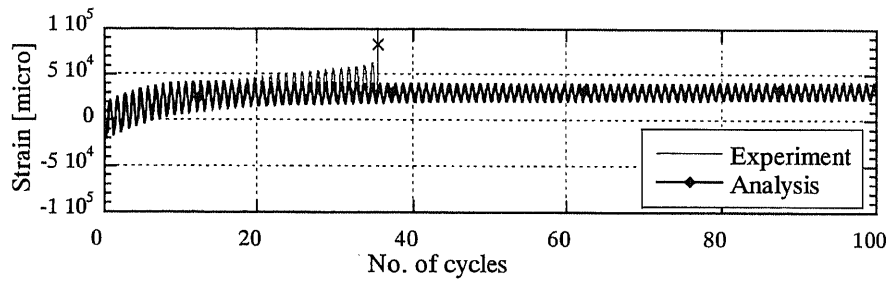
× : Strain gauge damaged in the experiments.

図 4.4.2-5 実験と解析のひずみ履歴 (1/2)

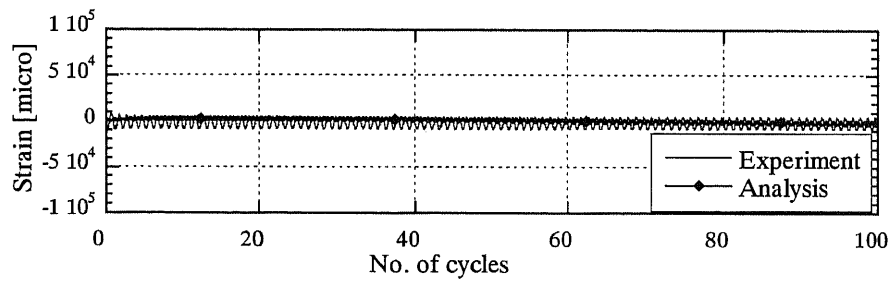
Fig.4.4.2-5 Strain histories by experiments and analyses (1/2).



(i) SAI_3H (thinned wall side).



(ii) SAI_7H (sound side).



(iii) SA_1A.

(c) ELB03.

× : Strain gauge damaged in the experiments.

図 4.4.2-5 実験と解析のひずみ履歴 (2/2)

Fig.4.4.2-5 Strain histories by experiments and analyses (2/2).

4.5 減肉配管に対する累積疲労損傷則を用いた疲労寿命評価

4.5.1 累積疲労損傷則の考え方

減肉配管のように顕著なラチェットを伴う疲労寿命の評価には、ひずみ振幅に加え累積ひずみが重要なパラメータとなると考えられるが、そのような疲労寿命評価に対し、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が Coffin により提唱されている⁷⁾。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ことを目的としている。

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る。金属材料の低サイクル疲労曲線は Manson-Coffin 則、および Basquin 則から次式のように表される⁸⁾。

$$\Delta \varepsilon_t = C_e N_f^{-k_e} + C_p N_f^{-k_p} \quad (4.5.1.1)$$

上式において、 $\Delta \varepsilon_t$ は全ひずみ振幅、 N_f は破断寿命である。また、 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で求められた炭素鋼 STS410 の室温試験の結果⁶⁾を用いた。

$$\Delta \varepsilon_t = 0.6158 N_f^{-0.0746} + 89.08 N_f^{-0.5414} \quad (4.5.1.2)$$

マイナー則により、複数の全ひずみ振幅 $\Delta \varepsilon_{ti}$ がそれぞれ N_{fi} 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。

$$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (4.5.1.3)$$

上式において、累積ひずみがない場合、 $\eta=1$ になったとき破損すると考える。

一方 Coffin 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。

$$D_d = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{f0}} \quad (4.5.1.4)$$

上式において、 ε_f は累積ひずみ量、 ε_{f0} は供試材の真破断延性を表す。 ε_{f0} については次式で表される破断絞り φ [%] によって定義される。

$$\varepsilon_{f0} = \ln \frac{100}{100 - \varphi} \quad (4.5.1.5)$$

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⁹⁾より 112.4% とした。

平均ひずみの増加を伴う低サイクル疲労強度の評価法として、Coffin は次式を提案している。

$$D_d + D_f = 1 \quad (4.5.1.6)$$

$$D_f = (\eta)^n \quad (4.5.1.7)$$

上式において、 n は定数である。式(4.5.1.6) は単軸応力場におけるラチェット疲労強度の評価式であるが、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、内圧のある多軸応力場においては式(4.5.1.7) で求められる値より低サイクル寿命が低くなるとして、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ている¹⁰⁾。

朝田の実験式 I

$$3D_d + D_f = 1 \quad (D_f \leq 0.25) \quad (4.5.1.8(a))$$

$$D_d + 3D_f = 1 \quad (D_f > 0.25) \quad (4.5.1.8(b))$$

朝田の実験式 II

$$D_d + 2\sqrt{D_f D_d} + D_d = 1 \quad (4.5.1.9)$$

ここで、式(4.5.1.7) で定められる D_f の定数 n は、炭素鋼 STS42 に対し 0.6 を使用している。また、累積ひずみ量 ε_f はラチェットにより膨らんだ配管の最終的な周方向ひずみとし、全ひずみ振幅 $\Delta\varepsilon_f$ は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値としている。従って、式(4.5.1.8) および式(4.5.1.9) はき裂発生部における局所的なひずみではなく、マクロ的な変形から導出した実験式である。また、評価式の目的は延性消耗による寿命低下の傾向を捉えた上で保守的な評価をすることとされているので、FEM 解析によって求められた局所的な真ひずみ範囲を使用すると安全側の結果となることが予想される。しかしラチェットを伴う疲労損傷の評価を行う上で延性消耗の影響を考慮することは重要であり、 D_f に対する D_d の値を抽出して破損寿命の比較を行うことは減肉配管の安全性評価に有用であると考えられる。

4.5.2 解析結果による疲労寿命評価結果

直管減肉試験体のうち内圧を負荷していないEC06を除いた全試験体に対し、最も軸方向ひずみ振幅が大きくなる点（図4.3.3-1の点B）について、疲労損傷のパラメータ D_f ($n=0.6$)を横軸に、延性消耗のパラメータ D_d を縦軸にプロットした D_d - D_f 線図を図4.5.2-1に示す。また、表4.5.2-1に実験結果と解析結果の比較を示す。図中にはCoffinによる延性消耗の提案式、朝田の実験式Ⅰ、実験式Ⅱも併記した。なお、計算に使用した ε_f は各サイクルにおける周方向ひずみ ε_h の平均値をとっており、各サイクルの ε_{hmax} と ε_{hmin} を足して2で割った値である。

図中において、EC05およびEC07は20サイクルまでの、その他のモデルは50サイクルまでの加振による D_d - D_f 線図の履歴である。このサイクル数は正弦波の漸増・漸減部分を含むため、50サイクルで正弦波1ブロックに相当する。また、EC05およびEC07の20サイクルは実験で破損が生じるまでのサイクル数に相当する。図に示したように、各モデルの履歴は載荷前に D_d 、 D_f とも0であり、載荷に伴い徐々にその値が増加している。今回の解析結果でCoffin式を満たしたものはEC09のみ、朝田の実験式Ⅰを満たしたものはEC09およびEC05となった。また、朝田の実験式Ⅱを満たしたものはEC02、EC05、EC07、EC09となる。表4.5.2-1に示したように、実験では破損までのサイクル数が短い順にEC07→EC05→EC09→EC02となっているが、今回使用した3つの評価式により取得した破損サイクル数を比較すると、この傾向を最もよく表しているのは朝田の実験式Ⅱであった。特にEC07については、実験では最も早く破損したにもかかわらず疲労損傷のパラメータ D_f はEC05やEC09に比べて低い値となっており、ラチェットの影響を無視できないものと考えられる。表4.5.2-1に示したように、解析により求められた破損サイクル数は実験結果と比較して大きく安全側となっているが、これは前節で述べたように、解析においては局所的な真ひずみ値を使用していることと、式(4.5.1.9)はラチェット疲労の傾向を捉えた上で保守的な評価をすることを目的として提案されているものであるためと考えられる。しかし上述のように寿命の長短の傾向は式(4.5.1.9)によりよく再現できており、延性消耗の影響を無視できない破損形態を示す配管の危険度評価には式(4.5.1.9)に示した朝田の実験式Ⅱが有効な指標となりうると考えられる。

表4.5.2-2にEC06を除く、正弦波で載荷した全ての直管減肉試験体と、曲管減肉試験体のうち面内曲げで載荷を行ったELB01～ELB03の3体について、朝田の実験式Ⅱの値が1になるまで解析を実施した際の入力サイクル数を実験と比較して示す。また、実験で得られた破損サイクル数を横軸に、解析で得られた破損サイクル数を縦軸にして

プロットしたものを図 4.5.2-2 に示す。図 4.5.2-2 には実験と解析による破損サイクル数の差が 1/2 倍～2 倍となる範囲を点線で併記している。図 4.5.2-2 から、本研究で実施した解析結果と朝田の実験式Ⅱを使用して疲労寿命を評価すると、ほぼ 1/2 倍～2 倍の範囲内の精度で寿命評価が可能であるといえる。

表 4.5.2-1 直管減肉試験体の解析結果

Table 4.5.2-1 Analytical result of straight pipe element tests with wall thinning.

Test specimen name	EC02	EC04	EC05	EC07	EC08	EC09
Thinned depth (mm)	4.3	4.3	4.3	6.45	2.15	5.16
Frequency input into the analysis	1 block	1 block	20 cycles (0.4 block)	20 cycles (0.4 block)	1 block	1 block
Pattern of input disp. wave	Sine wave	Random amplitude wave	Sine wave	Sine wave	Sine wave	Sine wave
Damage rate η (In the last cycle)	0.545	0.088	0.784	0.305	0.096	0.869
Df (In the last cycle)	0.695	0.233	0.863	0.491	0.245	0.919
Dd (Maximum value)	0.093	0.073	0.106	0.146	0.072	0.114
Destruction number of cycles using the Coffin equation	-	-	-	-	-	36
Destruction number of cycles using Asada I	-	-	16	-	-	25
Destruction number of cycles using Asada II	12	-	9	8	-	11
Destruction number of cycles by Experiment	3 × 50	5 × 50	20	19	7 × 50	33

表 4.5.2-2 実験と解析で得られた疲労寿命

Table 4.5.2-2 Fatigue lives obtained from experiments and analyses.

Specimen	Experimental results*	Analytical results*
EC02	123	31
EC05	21	15
EC07	19	16
EC08	294	323
EC09	32	19
ELB01	179	246
ELB02	316	237
ELB03	231	189

* Number of cycles of straight pipe element tests (specimens named EC**) include the increasing and decreasing amplitude cycles in front and behind the constant amplitude cycles.

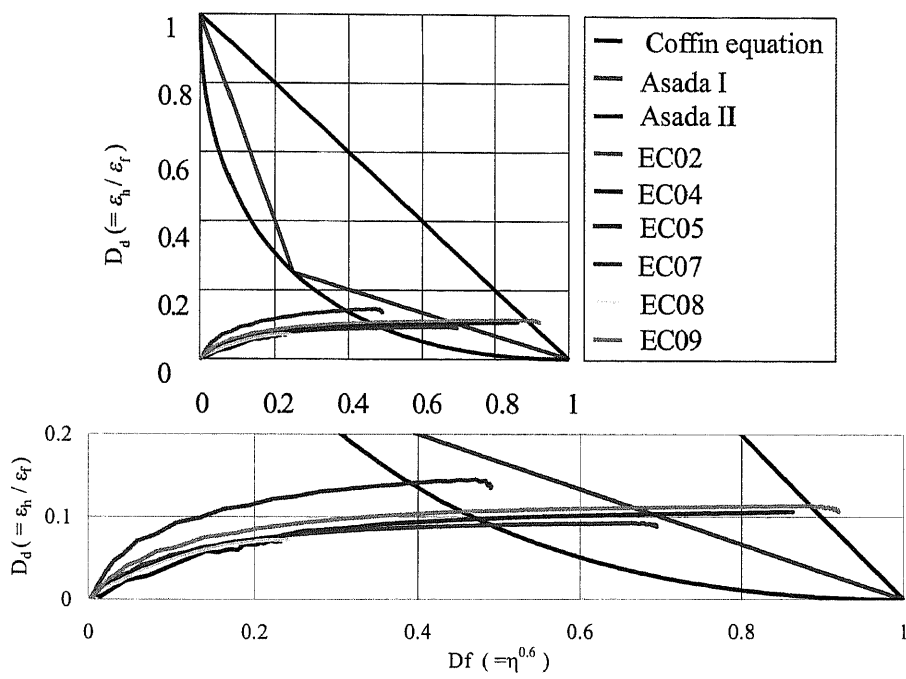


図 4.5.2-1 直管試験体の $D_d - D_f$ 線図

Fig.4.5.2-1 Relation between $D_d - D_f$ of straight pipe specimens.

表 4.5.2-2 実験と解析で得られた疲労寿命

Table 4.5.2-2 Fatigue lives obtained from experiments and analyses.

Specimen	Experimental results*	Analytical results*
EC02	123	31
EC05	21	15
EC07	19	16
EC08	294	323
EC09	32	19
ELB01	179	246
ELB02	316	237
ELB03	231	189

* Number of cycles of straight pipe element tests (specimens named EC**) include the increasing and decreasing amplitude cycles in front and behind the constant amplitude cycles.

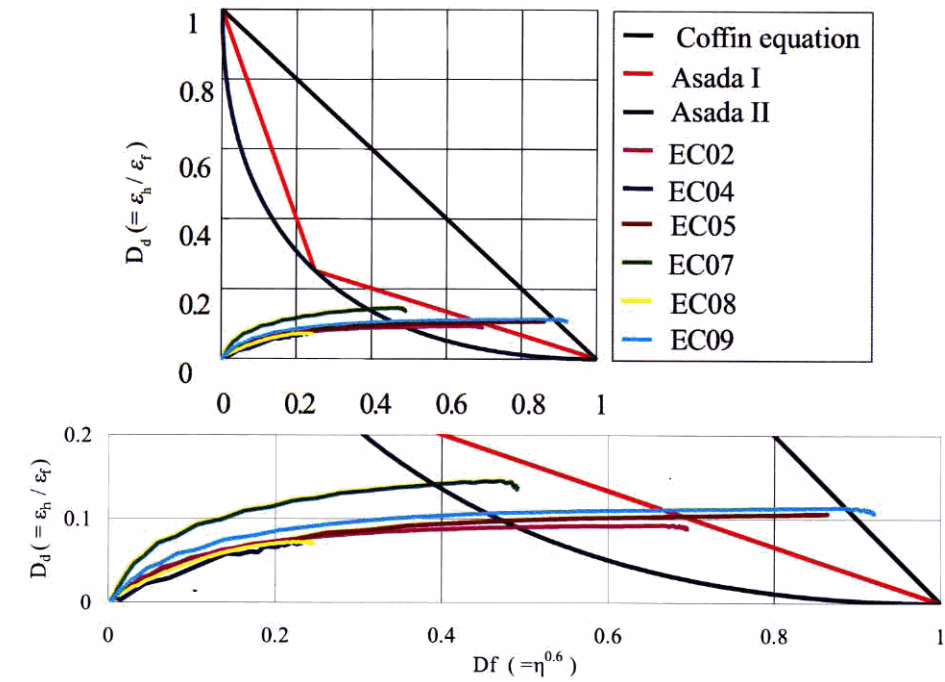


図 4.5.2-1 直管試験体の $D_d - D_f$ 線図

Fig.4.5.2-1 Relation between $D_d - D_f$ of straight pipe specimens.

表 4.5.2-2 実験と解析で得られた疲労寿命

Table 4.5.2-2 Fatigue lives obtained from experiments and analyses.

Specimen	Experimental results*	Analytical results*
EC02	123	31
EC05	21	15
EC07	19	16
EC08	294	323
EC09	32	19
ELB01	179	246
ELB02	316	237
ELB03	231	189

* Number of cycles of straight pipe element tests (specimens named EC**) include the increasing and decreasing amplitude cycles in front and behind the constant amplitude cycles.

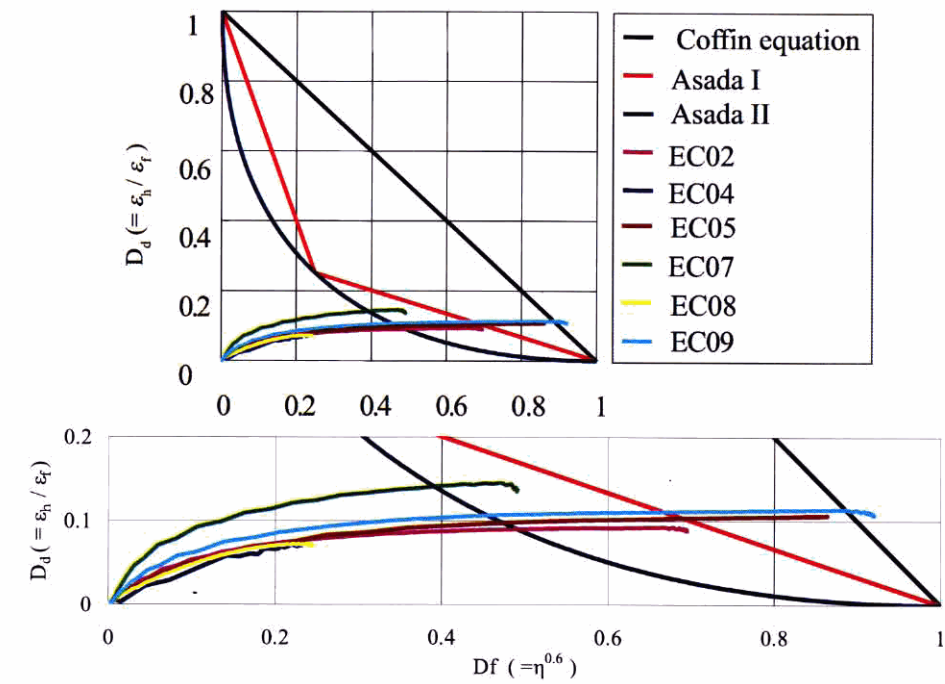


図 4.5.2-1 直管試験体の $D_d - D_f$ 線図

Fig.4.5.2-1 Relation between $D_d - D_f$ of straight pipe specimens.

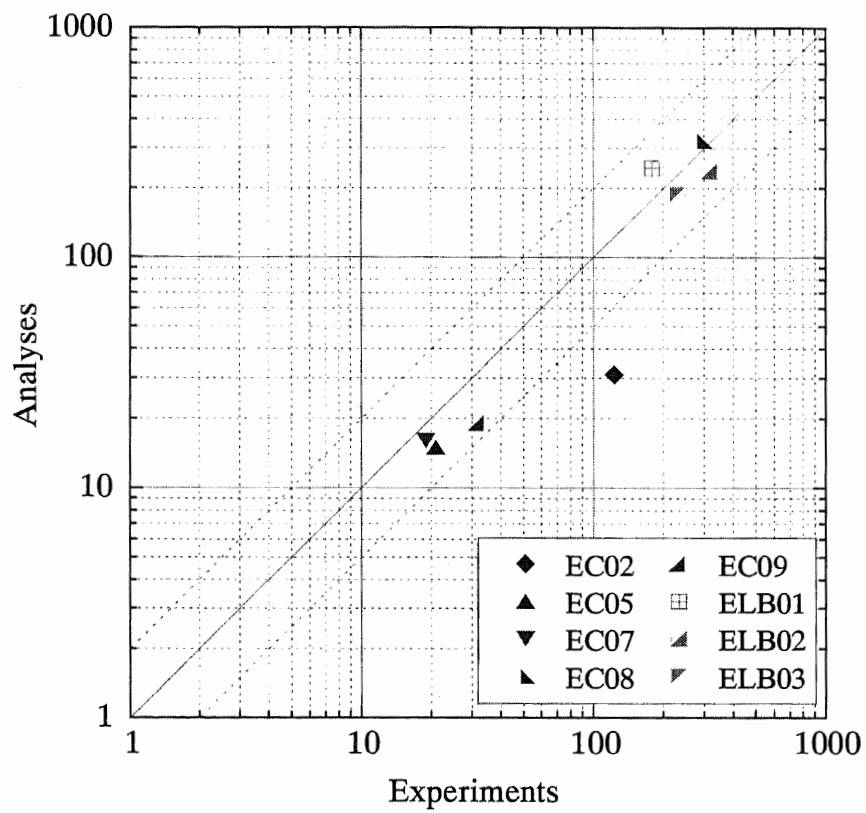


図4.5.2-2 実験と解析の疲労寿命比較

Fig.4.5.2-2 Fatigue life comparison between experiments and analyses results.

4.6 考察

配管要素試験の結果から、減肉配管ではラチェット現象の発生が配管の最終破損形態を支配していることが明らかになっており、解析により減肉配管の破損挙動を評価するためにはラチェット現象を再現することが重要となるが、本章で実施した減肉部分を有する配管の詳細解析により、適切に材料特性を設定することで、汎用的な手法によりラチェット現象を定性的に再現できることがわかった。また、Solidモデルと比較して簡易な解析モデルであるShellモデルにおいてもSolidモデルと同程度の精度で反力やひずみ挙動を評価できることが確認できた。曲管要素試験に対してはShellモデルにより再現解析を実施したが、健全試験体(ELB01)と全周50%減肉試験体(ELB02)の最終破損形態の違いをよく再現でき、Shellモデルによる解析の有用性が確認された。第2章で述べたように、配管要素試験の結果から減肉配管においては作用荷重の大きさや減肉量(内圧値)、減肉形状がラチェット現象の発生に対し影響を与えることが明らかになったが、それぞれの要因による影響を個別に分離して評価するには至っていない。これらの影響を個別に把握するには多くの荷重条件および減肉条件の組み合わせについて調査を行う必要があるが、それら全てを実験により網羅するのは難しく、今後は詳細解析手法を用いて各影響要因の検討を行う必要がある。その際、本章で述べたような、最終的な破損形態を支配するラチェット現象を特殊な条件設定を行わず、比較的簡易なShellモデルにより再現できる解析手法は有用である。

今回解析で使用した材料特性は直管減肉試験体の変形挙動や荷重変形関係を参照して設定している。この材料特性を使用して曲管減肉試験体の挙動を解析した結果、前節で述べたとおり、変形挙動や最終破損形態を良く再現できることが確認された。しかしラチェットを伴うひずみ挙動については、定性的な傾向は再現されているが定量的に精度良く一致させるまでには至っていない。最終的に減肉配管の健全性を評価するには、定性的な変形やひずみ挙動の傾向を再現するだけでなく、破損が予測される位置のひずみ履歴をある程度精度良く定量的に再現する必要がある。ラチェットを伴うひずみ挙動の再現には材料特性の設定方法が影響を与えることがわかっており¹¹⁾、今後ひずみ挙動の再現に焦点を置いてさらに検討を続け解析精度の向上を図る必要があると考えられる。また、今回使用した材料特性は、4.3.1で述べたように、実験結果と解析結果を比較しながら降伏点や二次勾配を決定しているが、今後配管要素の載荷試験を行っていない材質の減肉配管について破損評価を行うことを考慮し、材料試験結果やミルシート値から材料特性を決定する手法を検討していく必要がある。

本研究ではラチェットを伴う疲労損傷の評価式として式(4.5.1.9)に示された朝田によ

る提案式を使用した。この式の使用により延性消耗の影響による寿命低下の傾向を反映した評価が実施できることが確認された。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¹¹⁾では、材料試験から求められた疲労曲線に対し繰り返し回数を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、評価に使用するひずみ振幅や平均ひずみ量の適用範囲を考慮した上で、ラチェットを伴う低サイクル疲労寿命をより精度良く評価できる評価式をさらに検討する必要がある。

き裂つき配管については、第2章で述べたように、実験で使用した試験体に対する破面観察では、EDMノッチ先端からの疲労き裂発生に要した繰り返し数は無視できる程度であり、実験でき裂貫通までに要した繰り返し数のほとんどはき裂進展に要しているという結果が得られている。従って、解析結果と実験結果のき裂貫通に要した繰り返し数の差違は、解析において求められるき裂進展量に誤差が含まれているものと考えられる。この点について精度を改善するには、 J_{\max} や ΔJ の評価精度を向上させることが考えられるが、図4.2.3-2に示したように、現在の解析モデルで実験と解析の寿命の誤差はほぼ1/2倍～2倍の範囲に収まっており、一般的に材料試験で確認される疲労寿命のばらつきが同程度であることを考慮すると、実用上問題のない精度で寿命評価ができていると考えられる。ただしランダム振幅波については、解析の方が試験と比較して上記の誤差範囲から逸脱する程度の早いき裂進展を予測しており、変動荷重が作用する際のき裂進展評価については実際のき裂進展現象の把握も含めてさらに検討が必要である。

4.7 結論

本章では、欠陥を有する配管要素単体について有限要素法を用いて解析を行い、それぞれの弾塑性繰り返し載荷時における損傷挙動の再現と破損寿命の評価を行った。その結果、表面き裂を有する配管についてはラインスプリング要素を用い、破壊力学パラメータ ΔJ を評価することで表面き裂の進展・貫通挙動を精度良く評価することができた。また、減肉部分を有する配管については直管、曲管ともに載荷に伴うラチェット変形挙動や最終的な破損形態を解析により予測することができた。また、実験結果と比較することにより、現時点における解析モデルによるひずみ挙動の再現性を検討し、今後検討すべき点が明らかになった。

第5章 配管系の振動応答に対する評価

5.1 概要

第3章で述べた実験結果から、減肉のある配管系では減肉の程度に応じて弾性域の振動特性や弾塑性振動応答挙動に影響の現れることが明らかになった。減肉部分の存在により配管系の振動応答挙動が受ける影響は、同じ減肉形状であっても配管系の形状や支持条件、劣化部分の存在位置などにより変化すると考えられる。これらの条件の組み合わせは多岐にわたる一方、実験で確認できる数は限られているため、実験のみにより配管系の振動損傷挙動に対する減肉部分の影響を評価することは困難であり、振動破損実験に代わって解析に基づき評価できれば極めて有用である。本章では第3章で述べた配管系振動試験を対象として別途実施された非線形時刻歴応答解析と破損解析の結果を例に、減肉のある配管系の弾塑性振動応答挙動から配管の破損予測までを解析に基づき評価する手法の適用性について述べる。

5.2 配管系の弾塑性振動応答評価と破損寿命評価¹⁾

大地震を想定した入力を受ける配管系の振動応答による損傷評価を行うには、弾塑性振動応答により配管系に発生する変形やひずみを推定する必要がある。この推定を精度よく行うにはFEMを用いた材料および幾何学的非線形を考慮した時刻歴応答解析が有用であると考えられる。本節では三上らにより実施されたFEMを用いた立体配管系に対する非線形時刻歴応答解析とその結果に基づく配管系の損傷評価¹⁾について述べる。

第4章で述べたように、配管要素の詳細解析においては時間軸を無視した静的な弾塑性解析（以下静解析）を行っており、対象とする配管要素をSolid要素またはShell要素によりモデル化し、ひずみ挙動を評価している。しかし配管系の非線形時刻歴応答解析（以下動解析）は多大な時間を要するため、配管要素の詳細解析と同じ要素で解析モデルを作成することは現実的ではない。従って、解析に基づき配管系の弾塑性振動応答による損傷評価を行う場合、動解析による配管系の弾塑性振動応答挙動の再現と静解析による局所の破損評価を分離して行うことが考えられる。この場合、比較的簡易な要素を用いて配管系全体をモデル化した上で動解析を行い、配管系のおよその挙動を把握し、破損が想定される位置における時刻歴応答変位を取得する。一方で破損が想定される配管要素に対しては詳細なモデル化を行い、動解析により求められた応答変位を静解析の入力条件として使用することで配管系に発生する局所的なひずみを求め、破損評価を行う。三上らにより実施された配管系加振試験に対する振動損傷

評価では、立体配管系試験体 3D_C01 を ABAQUS のエルボ要素によりモデル化し、実験で使用した入力加速度を与えて動解析を行った。硬化則は移動硬化則とし、材料特性は静解析と同様二直線近似としている。立体配管系の形状、減肉条件、入力加速度波形は 3.3 節で述べたとおりである。図 5.2-1 に、最大入力加速度 1850Gal を与えた場合のエルボ 3 位置における応答加速度と、エルボ 1 の開閉変形量の時刻歴波形を示す。図 5.2-1(a) に示したように、応答加速度については、時刻歴波形の形状はやや異なるが、最大値はよく一致している。また、図 5.2-1(b) に示したように、実験で確認されたエルボ 1 の残留変形の傾向が解析においてもよく再現できていることがわかる。動解析に引き続き配管系の破損評価を行うために 3D_C01 のエルボ 1 部分を抽出し、第 4 章で述べた配管要素の詳細解析モデルに準じて Shell 要素でモデル化し、動解析で得られたエルボ 1 の開閉変形量を入力とした静解析を実施した。静解析で得られたひずみ集中部のひずみ履歴を用いて、第 4 章で述べた累積損傷則により寿命評価を行ったところ、解析では 1850Gal の加振 2 回目で破損に至るという結果が得られた。第 3 章で述べたとおり、実験では 1850Gal の加振 3 回目で破損するという結果となっており、解析により良い精度で破損評価が行えたと考えられる。

配管系の振動損傷挙動の評価を本節で示したような二種類の解析に分離して実施する場合、静解析の入力条件とする配管系各部の変位応答挙動が動解析により再現できる必要があるが、三上らが使用した解析モデルにより、弾塑性応答時における曲管部分の開閉変形量といった強度解析に必要な応答量のある程度再現できると考えられる。また、本節で例に挙げた解析は全周減肉を有する配管系を対象として実施したものであるが、そのような配管系の弾塑性応答挙動をよく再現できている。これは、今回扱った減肉形状が全周減肉であり、配管系のモデル化の際に対象部分を薄肉の配管で置き換えることにより模擬が可能であることと、配管系加振試験における破損形態が曲管部分の疲労損傷であり、進行性変形のような不安定な破損ではなかったために減肉のある配管系における振動損傷挙動が比較的精度良く再現できたものと考えられる。配管要素試験の ELBO_02、ELBM_01 のように、载荷 1 サイクルごとに大きくラチェット現象が進行し配管形状が変化するような減肉条件・荷重条件のもとでは、劣化部分の損傷の進行に伴い配管系の弾塑性振動応答挙動が 1 回の地震応答中に大きく変化する可能性があるが、その場合は本節で示したような動解析と静解析に分離した評価は適用できなくなると考えらる。しかし、現時点では配管系の振動損傷試験においてそのような急激な振動特性の変化を示した例はない。従って、本研究で扱った程度の減肉条件であれば減肉のある配管系についても本節で示したような、動解析と静解析に分

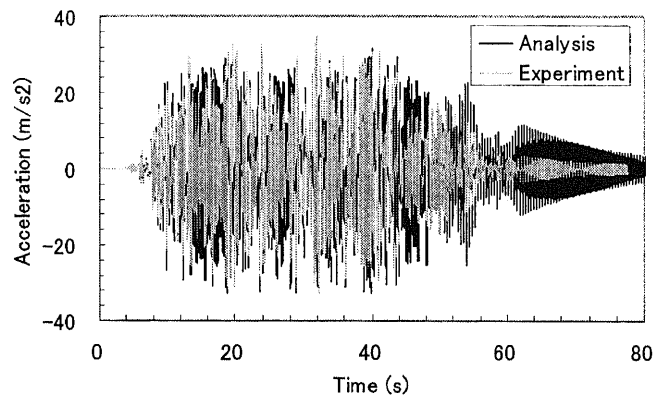
離して評価を行う手法は有用であると考えられる。ただしこの点については、劣化形状が部分減肉である場合や損傷の進展と振動応答が強く連成する場合などについて、実験による検証も考慮に入れた上で評価法の適用範囲を明確にしていく必要がある。

本節では減肉のある配管系について振動損傷評価を行ったが、第3章で述べたように、き裂付き配管においてはき裂の存在は配管系の振動応答挙動には影響せず、配管系の振動応答評価は健全配管に準じて行えばよいので、き裂付き配管についても本節で述べたような二段階の損傷評価が適用できると考えられる。

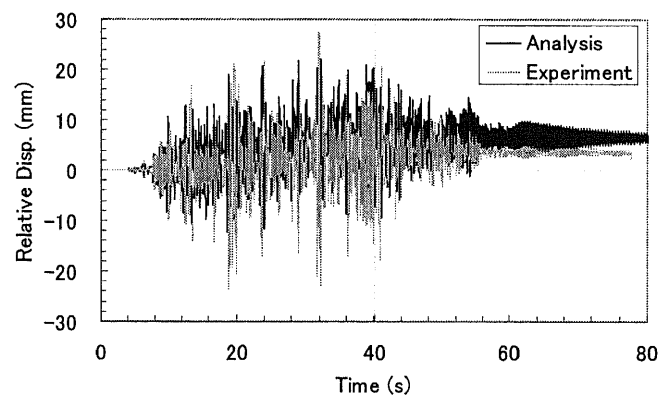
このような一連の解析により配管系の弾塑性振動応答から破損評価までが可能になれば、種々の配管系形状や減肉形状に対しパラメトリック解析を行うことで、配管系における劣化部分の影響要因について影響度の評価が可能になる。最終的に定量的な疲労評価を行うにあたっては、第4章で述べたひずみ挙動の再現精度向上や疲労寿命評価法の検討とともに、配管系の時刻歴応答解析において、応答変位波形の最大値および波形形状がある程度再現できる必要がある。現時点では、解析におけるこれらの応答値は、配管要素に対する解析と同様材料特性の設定や仮定する硬化則に依存することがわかっており、それぞれのパラメータが解析結果に対してどのような影響を与えるか検討されている。今後は静解析における材料特性の設定方法と整合性をとりつつより精度良い解析手法を検討する必要がある。

5.3 結論

本研究において実施した配管系試験に対する振動損傷評価結果の例から、本研究で扱った程度の減肉量であれば、劣化部分を有する配管系についても配管系全体の振動応答を求める非線形時刻歴応答解析と局所のひずみ挙動を求める静的な三次元弾塑性解析を併用して配管系の弾塑性振動応答による損傷評価を行う手法が有用であることが示された。



(a) Response acceleration at Elbow3.



(b) Elbow opening-closing displacement of Elbow1.

図 5.2-1 実験結果と解析結果の比較 (3D_C01) ¹⁾

Fig.5.2-1 Comparison between test results and analysis results¹⁾.

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では高経年化に伴い構造劣化の発生した配管系を対象として、大レベルの地震荷重を受ける際の振動応答挙動および損傷挙動を明らかにすることを目的とした一連の試験を行った。またそれらの結果を精度良く再現することを目的とした有限要素法解析モデルを作成し、解析に基づく振動損傷評価法の適用性について検討を行った。その結果、以下に示す事項が明らかになった。

- (1) き裂または減肉といった構造劣化部分のある配管要素単体に対する繰り返し載荷試験を行い、劣化形状や負荷荷重条件による破損形態の特徴を取得した。その結果、き裂付き配管においては劣化の存在は配管の剛性にほとんど影響しないが、減肉配管の場合には減肉の程度に応じて剛性や反力が低下することがわかった。また、減肉配管ではラチェット現象の発生が配管の最終破損形態に影響すること、および減肉配管におけるラチェット現象の発生は減肉量、減肉形状、作用荷重に依存することが明らかになった。
- (2) 劣化部分を有する基本的な形状の配管系に対し振動台を使用した加振試験を行い、弾性域から弾塑性域までの振動応答挙動および最終破損形態を取得した。その結果、減肉が存在する場合は減肉の程度に応じて配管系の固有振動数や弾塑性域の加速度応答値の低下といった影響が表れるが、き裂の存在は配管系の振動応答特性にほとんど影響しないことがわかった。また、弾塑性応答時の配管系各部の変形を比較することにより、弾塑性応答時には配管系の変形が減肉部分のような系の最も弱い部分に集中する傾向のあることが示された。破損まで加振を繰り返した結果、全周にわたる大きなき裂が存在する場合を除き配管の全周破断や損傷の進展に伴い変形が一方向に大きく進展するような不安定な破損は確認されず、配管系の最終的な破損形態は主に負荷荷重の大きい曲管部分における疲労損傷であることが示された。
- (3) 一連の試験結果から、経年化に伴う構造劣化が検出された配管系の健全性評価に際し、検出された劣化がき裂である場合はき裂の存在を無視し、健全を仮定した配管系において地震による振動応答を評価した上で、改めて当該部位の健全性評価を行えばよいと考えられる。一方減肉に関しては、減肉の程度、部位、作用外力の種類や大きさなどにより配管系の振動応答特性や最終破損形態が変化することから、減肉の存在が配管系の振動応答特性に与える影響を検討した上

で健全性評価を行う必要があると考えられる。

- (4) 汎用的な有限要素法解析コードを使用してき裂または減肉を有する配管要素の詳細解析を実施した。その結果、き裂付き配管についてはラインスプリング要素を使用することで、弾塑性域における表面き裂の貫通寿命を実用上問題のない精度で評価できることが示された。減肉配管については定性的なラチェット現象を再現し、最終破損形態を予測することのできる解析モデルを作成した。また、配管系の非線形時刻歴応答解析の結果を配管要素に対する詳細解析の入力条件とすることで配管系試験体の破損評価を行い、劣化部分を有する配管系について、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。

以上のように、本研究を通じて高経年化に伴い構造劣化の生じた配管系について、劣化の種類や程度による振動応答への影響や高レベルの繰り返し荷重を受ける際の最終的な損傷形態が実験的に把握され、構造劣化のある配管系に対する健全性評価にあたって考慮の必要な事項が明らかになった。また、劣化配管の弾塑性振動応答による損傷予測を解析により評価する手法を検討し、実験結果と比較してその有用性と現時点における解析モデルの問題点が明らかになった。

6.2 今後の課題

本研究では実験とその解析を通じ、高経年化に伴いき裂や減肉といった構造劣化が生じた配管系について、劣化の種類や程度による振動応答への影響や過大な繰り返し荷重を受ける際の最終的な損傷形態を明らかにした。また、劣化配管の損傷形態を解析により評価する手法を検討し、実験結果と比較して汎用的な解析手法により妥当な評価が可能であることを示した。一方、本研究を実施する中で、未解明の点、新たに実験または解析により検討すべき点は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) 自然欠陥と人工欠陥の比較

本研究では、き裂付き配管については自然欠陥である SCC と人工欠陥である EDM き裂とを同条件で載荷することにより破損寿命の比較を行い、概して自然欠陥の方が長寿命となる結果が得られた。しかし疲労寿命のばらつきを考えると、さらに多くの比較試験を実施し、自然欠陥と人工欠陥の差を定量的に把握

する必要がある。また、減肉配管については、全て機械加工で肉厚を低減することにより減肉を模擬し、表面の凹凸状況や材質劣化は考慮しておらず、人工的に加工した減肉と実際の減肉配管との比較は行っていない。今後はこのような条件を考慮した試験を実施し、実際の腐食状況および材質劣化が破損形態に与える影響を検討する必要がある。

(2) 減肉配管の破損挙動に影響を与える要因の定量評価

本研究を通じて、減肉配管の最終破損形態を支配するラチェット現象の発生に影響を与える要因が考察されたが、それぞれの影響要因の定量的評価には至っていない。これは、実験で実施できる条件が限られたものであることと、減肉の存在が配管の荷重変形関係に影響するためそれぞれの要因を分離して評価することが難しいことに起因する。今後は第4章で述べたような詳細解析モデルと実験を併用することで影響要因の定量評価を行い、許容される減肉の程度を明確にしていく必要がある。

(3) 配管系内における減肉の存在が振動応答に与える影響の把握

本研究では、2種類の配管系試験体を用いて加振実験を行い、減肉の存在が配管系の振動応答特性に与える影響を調査したが、本研究で実施した範囲では、配管経路内における減肉の部位が配管系の振動応答挙動に与える影響は明確ではなかった。また、本研究では減肉の存在により配管系の振動応答挙動に影響があるという結果が得られているが、異なる配管形状や減肉条件のもとでどの程度の影響が表れるかは不明である。これらの影響は、配管系の形状や振動モード、配管の支持条件、減肉条件などにより変化すると考えられる。従って、第5章で述べたような解析に基づく振動損傷評価法と実験を併用し、各要因の影響度を把握することが必要である。

(4) 解析における材料特性設定方法の検討

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。しかし現時点の解析モデルでは、定性的なラチェットの傾向は良く再現できるが平均ひずみ、ひずみ振幅ともに定量的に精度良く一致させるには至っていない。ラチェットを伴うひずみ挙動の再現には材料特性の設定や硬化則の選定が影響を与えることがわかっており、より精度良く再現できる構成則を検討する必要がある。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が、今後載荷試験を行っていない材質の配管について減肉の破損評価を

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材料特性を決定する手法を検討していく必要がある。

(5) 疲労寿命評価手法の検討

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。

(6) 減肉配管の安全裕度と許容減肉量の把握

本研究は、劣化配管の破損形態を明らかにし、それら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おり、現行の設計基準に対する安全裕度の評価や許容される劣化の条件については検討を行っていない。日本機械学会の定めた「発電用原子力設備規格 維持規格」¹⁾の中で、き裂に関しては破壊力学的手法を用いて検出された欠陥の評価を行うよう定められているが、減肉に関しては欠陥評価法や許容される劣化形状等の条件は定められていない。また、ASMEの定めた"ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI"²⁾においては、許容減肉条件は定められているが、地震荷重を考慮した際の許容値は明確でない。従って、今後は、実験や解析を通じて現行設計基準に対する減肉配管の安全裕度評価を行い、地震荷重を考慮した際に許容される減肉条件を把握し、減肉配管に対する欠陥評価法を提案していく必要がある。

<謝辞>

本研究の遂行にあたり、横浜国立大学に在籍する前から約6年間にわたり実験及び解析の実施、結果に対する議論など、多岐にわたりご指導、ご助言をいただき、かつ大学で研究する機会を与えてくださいました横浜国立大学白鳥正樹教授に深く感謝の意を表します。また、横浜国立大学中桐滋教授、安藤柱教授、高田一教授、山田貴博助教授にはお忙しい中審査委員の労をお取りいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究で扱った実験および解析は、第1章で述べたとおり原子力安全研究「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」（平成8年度～平成12年度）、「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13年度～平成17年度）の一環で実施したものです。この試験研究課題の実施にあたって組織したAP委員会、NAP研究会では、各分野の専門家、電力会社、プラントメーカーなどの方に委員としてご参加いただきました。この委員会・研究会の中で、委員各位から多くの示唆に富んだ貴重なご意見をいただきましたことに厚く御礼申し上げます。なお、この試験研究課題は、科学技術庁国立機関試験研究費（平成12年度まで）および文部科学省原子力試験研究費（平成13年度以降）を軸に、共同研究を行った横浜国立大学、石川島播磨重工業各機関独自の研究費も利用して実施されました。関係機関の日頃のご援助に対し感謝いたします。

筆者は防災科学技術研究所に入所後、平成10年度より上記の研究課題を担当することとなりましたが、その際に当該分野に対してほとんど知識のなかった筆者に対し、研究の背景にある諸問題についての考え方、研究計画の策定から実験実施、とりまとめに至るまで数々のご指導およびご助言をいただきました防災科学技術研究所の小川信行博士、防災科学技術研究所客員研究員の柴田碧東京大学名誉教授に深く感謝いたします。また、上記研究課題の共同研究相手である石川島播磨重工業の大谷章仁氏には、本研究にかかわる実験の計画および実施、結果に対する議論のみならず原子力配管の耐震、強度評価の諸問題について多くのご助言をいただきました。

平成13年度以降は、防災科学技術研究所に籍を置く傍ら、横浜国立大学の社会人博士課程に入学して研究を続けましたが、そのような状況を許可して下さった防災科学技術研究所の片山恒雄理事長に感謝いたします。また、佐藤正義総括主任研究員をはじめとする、筆者の所属する総合防災研究部門の方々には、研究面のみならず日頃より様々なご支援をいただきました。また、大学で所属した白鳥・于研究室の方には、特に解析に関して多くの議論をいただきました。記して感謝申し上げます。

本研究で扱った実験の実施に際し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に、解析の実施に際しては横浜国立大学白鳥研究室の唐澤巧氏（現 日本発条（株））、矢倉武蔵氏（現 ダイハツ工業（株））、越智洋次氏（現 キヤノン（株））、青島誠氏（現 全日本空輸（株））、宇田川誠氏に多大なご協力をいただきました。また、第2章で述べた破面解析については、物質・材料研究機構の松岡三郎博士、竹内悦男博士に多大なご指導とご助言をいただきました。ここに改めて厚く御礼申し上げます。

大学における諸般の事務手続き等に関しては横浜国立大学白鳥研究室秘書廣田光さん、勤務先における事務手続き、最終的な図表整理等については防災科学技術研究所の小野幸子さんに多くのサポートをいただきました。記して感謝の意を表します。

<参考文献>

第1章

- 1) 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」
- 2) 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）」
- 3) 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」、日本機械学会論文集（第1部）、44巻386号、pp. 3437-3445
- 4) 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、Vol.13 No.4、pp.149-152
- 5) Y. Udoguchi, K. Akino, H. Shibata, 1975, "On the Behavior of Pressurized Pipings under Excessive - Stresses Caused by Earthquake Loadings", 3rd SMiRT, K7/5
- 6) F. Hara, H. Shibata, 1981, "Ratcheting Fatigue in Full-Scale Piping Elements", 6th SMiRT, K15/3
- 7) Hiroshi Yokota, Rokuro Endou, Motoo Kawabata, Takaaki Sakakida, Tatsuya Fujiwaka, Yasuhide Asada, Kohei Suzuki, 2000, "Study on Seismic Design of Nuclear Power Plant Piping in Japan (Part 1: Overview of the Study)", ASME PVP-Vol. 407, pp. 117-123
- 8) Y. Namita, K. Suzuki, H. Abe, I. Ichihashi, K. Suzuki, M. Ishiwata, K. Yoshino, K. Tai, 2001, "Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Piping Component test result and Simplified Piping System Test Planning)", ASME PVP-Vol. 428-1, pp.13-19
- 9) Sam W. Tagart, Jr., Y.K. Tang, Daniel J. Guzy, Sam Ranganath, 1990, "Piping dynamic reliability and code rule change recommendations", Nuclear Engineering and Design, vol. 123, pp. 373-385
- 10) Gerry C. Slagis, 1997, "Experimental Data on Seismic Response of Piping", ASME PVP-Vol. 345, pp.163-177
- 11) W.D. Iwan, C.T. Huang, K.R. Jaquay, N.C. Chokshi, 1997, "Seismic margins for nuclear power plant piping systems", Proceedings of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability,
- 12) Gerry C. Slagis, 2000, "Assessment of Piping Seismic Respons", ASME PVP-Vol. 402-1, pp. 49-55
- 13) F. Touboul, N. Blay, M.H. Lacire, 1999, "Experimental, Analytical, and Regulatory Evaluation of Seismic Behavior of Piping Systems", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 121, pp. 388-392
- 14) 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

- 15) K. Shibata, T. Isozaki, S. Ueda, R. Kurihara, K. Onizawa, A. Kohsaka, 1994, "Results of reliability test program on light water reactor piping", Nuclear Engineering and Design, Vol. 153, pp. 71-86
- 16) R.A. Schmidt, G.M. Wilkowski, M.E. Mayfield, 1991, "The International Piping Integrity Research Group (IPIRG) Program", SMiRT 11, Vol. G, pp.177-188
- 17) K. Kashima, N. Miura, S. Kanno, K. Miyazaki, M. Ishiwata, N. Gotoh, 1997, "A research program for dynamic fracture evaluation of Japanese carbon steel pipes", Nuclear Engineering and Design, Vol. 174, pp. 33-39
- 18) Naoki Miura, Terutaka Fujioka, Koichi Kashima, Satoshi Kanno, Makoto Hayashi, Masayuki Ishiwata, Nobuho Gotoh, 1994, "Low cycle fatigue and ductile fracture for Japanese carbon steel piping under dynamic loadings", Nuclear Engineering and Design, Vol. 153, pp.57-69
- 19) Paul M. Scott, Richard J. Olson, Gery M. Wilkowski, Naoki Miura, Young-Hwan Choi, Tsun-Yung Chang, Nilesh Chokshi, 2001, "Overview of the Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) Program", SMiRT 16, Paper #1758
- 20) D.A. Hale, J.D. Heald, S.R. Sharma, 1984, "Dynamic Tests of Cracked Pipe Component", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 106, pp. 37-46
- 21) 小川信行、箕輪親宏、千葉敏郎、相田重一、小柳良一、勝山ヨシ子、1989、「原子力配管系の他入力振動実験報告書（その2）」、国立防災科学技術センター研究速報、第79号
- 22) Y. Namita, K. Suzuki, H. Abe, I. Ichihashi, M. Shiratori, K. Iwata, N. Kojima, M. Ishiwata, 2002, "Seismic Proving Test of Eroded Piping (Program and Preliminary Analysis of Eroded Piping Tests)", ASME PVP-Vol. 445-1, pp.91 - 97
- 23) (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」
- 24) 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、「サリ一原子力発電所の配管破断事故」、日本原子力学会誌、Vol.29 No. 11、pp. 952-969
- 25) S. Roy, S. Grigory, M. Smith, M. F. Kanninen, M. Anderson, 1997, "Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 119, pp. 457-466
- 26) 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、第36巻第4号、pp.225-233

- 27) Katsumasa Miyazaki, Satoshi Kanno, Masayuki Ishiwata, Kunio Hasegawa, Seok Hwan Ahn, Kotoji Ando, 1999, "Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load", Nuclear Engineering and Design, Vol. 191, pp.195-204
- 28) Seok-Hwan Ahn, Ki-Woo Nam, Yeon-sik Yoo, Kotoji Ando, Su-Hwan Ji, Masayuki Ishiwata, Kunio Hasegawa, 2002, "Fracture behavior of straight pipe and elbow with local wall thinning", Nuclear Engineering and design, Vol. 211, pp. 91-103
- 29) Katsumasa Miyazaki, Akira Nebu, Masayuki Ishiwata, Kunio Hasegawa, 2002, "Fracture strength and behavior of carbon steel pipes with local wall thinning subjected to cyclic bending load", Nuclear Engineering and Design, Vol. 214, pp. 127-136
- 30) Jin Weon Kim, Chi Yong Park, 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, Vol. 220, pp. 274-284
- 31) 長谷川邦雄、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」、日本機械学会論文集（A編）、57巻539号
- 32) 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、第220号

第2章

- 1) Kumiko Araki, Hiroyuki Sakamoto, Akira Nakagawa, Makoto Higuchi, 1998, "Fabrication of Mock-Up Specimens with Natural Flaws", Proc. of the 1st International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components
- 2) 中村いずみ、小川信行、大谷章仁、白鳥正樹、2001、「地震荷重を受けるき裂付き配管の破面解析」、日本機械学会2001年度年次大会講演論文集、vol. I、pp. 427-428
- 3) (財)原子力発電技術機構、2002、「平成13年度 原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書 その3 減肉配管」
- 4) F. Hara, H. Shibata, 1981, "Ratcheting Fatigue in Full-Scale Piping Element", 6th SMiRT, K15/3
- 5) Kouichi Yoshino, Rokuro Endou, Takaaki Sakakida, Hiroshi Yokota, Tatsuya Fujiwaka, Yasuhide Asada, Kohei Suzuki, 2000, "Study on Seismic Design of Nuclear Power Plant Piping in Japan Part 3; Component test results", ASME PVP-Vol. 407, pp. 131-137
- 6) F. Touboul, N. Blay, M.H. Lacire, 1999, "Experimental, Analytical, and Regulatory Evaluation of Seismic Behavior of Piping Systems", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel

Technology, Vol. 121, pp. 388-392

- 7) Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, 2002, "Failure Behavior of Piping Systems with Wall Thinning under Seismic Loading", ASME PVP-Vol.445-1, pp. 1-6
- 8) Masaki Shiratori, Yoji Ochi, Izumi Nakamura, Akihito Otani, 2002, "Failure Analysis of Thinned Wall Elbows Under Excessive Seismic Loading", ASME PVP-445-1, pp. 7-16
- 9) 佐々木克彦、石川博将、1995、「多軸ラチェット変形の実験的考察」、日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集、Vol.B、pp.99-100
- 10) 中村いずみ、小川信行、御子柴正、2003、「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13年度国立機関原子力試験研究成果報告書（第42集）、pp. 51-1 - 51-4
- 11) Evert D.D. Durning, 1997, "Corrosion Atlas Third, Expanded and Revised Edition", ELSEVIER

第3章

- 1) 栗原良一、1998、「軽水型原子炉配管の不安定破壊特性に関する研究」、JAERI-Research 98-043

第4章

- 1) J.R. Rice, N. Levy, 1972, "The Part-Through Surface Crack in an Elastic Plate", Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, March 1972, pp. 185-194
- 2) 三好俊郎、白鳥正樹、根本誠、1982、「表面き裂を有する平板の応力拡大係数およびJ積分の評価」、日本機械学会論文集（A編）、48巻433号、pp. 1128-1135
- 3) Naoki Miura, Terutaka Fujioka, Koichi Kashima, Satoshi Kannno, Makoto Hayashi, Masayuki Ishiwata, Nobuho Gotoh, 1994, "Low cycle fatigue and ductile fracture for Japanese carbon steel piping under dynamic loadings", Nuclear Engineering and Design, Vol. 153, pp. 57-69
- 4) Ryuichi Iwasaki, Takashi Shimakawa, Kazuhiro Nakamura, Hiroyuki Takahashi, Tetsuro Uno, Katsumi Watashi, 1991, "Application of Simplified J-Estimation Methods to Surface Cracked Structures under Creep-Fatigue Loadings", 11th SMiRT, Vol.L, pp.217-222
- 5) 矢川元基編、1988、「破壊力学 理論・解析から工学的応用まで」、培風館
- 6) 唐澤巧、1999、「高経年配管の耐震裕度評価に関する研究」、横浜国立大学平成10年度修士論文
- 7) L.F. Coffin, Jr., 1970, "The deformation and Fracture of a Ductile Metal under Superimposed Cyclic and Monotonic Strain", ASTM STP467, pp. 53-76

- 8) 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」、日本機械学会
- 9) 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」、原子力発電技術機構、pp.104-130
- 10) Y. Asada, 1985, “Failure Criterion on Low-cycle Fatigue with Excessive Progressive Deformation”, Proceedings of 3rd German - Japan Joint Seminar , Vol.II 2.2, pp. 1-13
- 11) 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」、原子力発電技術機構、pp.144-214

第5章

- 1) 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、No.03-26、pp.737-738

第6章

- 1) (社)日本機械学会、2000、「発電用原子力設備規格 維持規格」、日本機械学会
- 2) ASME, 1998, “ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec.IX”, Code Case N-597, ASME

<公表論文>

1. 査読付き論文集

- 1) Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, "Failure Behavior of Piping Systems with Wall Thinning under Seismic Loading", Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology (to be published, February 2004)
- 2) 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巻654号、pp.25-31

2. 国際会議講演論文集

- 1) Akihito Otani, Hiroe Kobayashi, Nobuyuki Ogawa, Izumi Nakamura, Masaki Shiratori, 1999, "Strength of Locally Thinned Piping Subjected to Cyclic Loading", ASME PVP-387, pp. 55-62
- 2) Akihito Otani, Hiroe Kobayashi, Nobuyuki Ogawa, Izumi Nakamura, Masaki Shiratori, 1999, "A Study on the Strength of Locally Thinned Wall Pipes Subjected to Cyclic Loading", 15th SMiRT, IX, pp.137 - 144
- 3) Izumi Nakamura, Nobuyuki Ogawa, Akihito Otani, Masaki Shiratori, 2000, "An Experimental Study on Dynamic Behavior of Piping Systems with Local Degradation", ASME PVP-403-1, pp.15-22
- 4) Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, 2002, "Failure Behavior of Piping Systems with Wall Thinning under Seismic Loading", ASME PVP-445-1, pp. 1-6
- 5) Masaki Shiratori, Musashi Yakura, Takumi Karasawa, Izumi Nakamura, Akihito Otani, 2000, "Failure Analysis of Degraded Piping against Seismic Loading", ASME PVP-402-1, pp.37-48
- 6) Masaki Shiratori, Yoji Ochi, Takumi Karasawa, Izumi Nakamura, Akihito Otani, 2001, "Low Cycle Crack Growth Analysis for the Piping with a Surface Crack", Proc. Of APCFS & ATEM '01, pp.1005-1012
- 7) Masaki Shiratori, Makoto Udagawa, Makoto Aoshima, Izumi Nakamura, Akihito Otani, 2003, "Failure Analysis of Thinned Wall Elbows under Excessive Seismic Loading (Comparison with Experiment)", ATEM'03, Paper #OS12W0087

<添付資料> AP委員会、NAP研究会委員名簿

「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」実験実施委員会
(略称：AP委員会、平成8年度～平成12年度)

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	主査

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）

（役職は委員就任当時、敬称略）

「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」実験実施研究会

(略称：NAP研究会、平成13年度～)

主査	白鳥 正樹	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
	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 助教授
	小笠原 永久	防衛大学校システム工学群機械工学科 助手
	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
	三浦 直樹	電力中央研究所金属材料部 主任研究員
	福田 俊彦	東京電力（株）原子力技術部 課長
	佐藤 隆	東京電力（株）原子力技術部 副長
	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
	堤 喜隆	中部電力（株）原子力計画部建設グループ 副長 (平成15年11月から)
	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 (平成15年4月まで)
	日高 章隆	(株)日立製作所原子力プラント部原プ設 (平成15年11月から)
	小島 信之	三菱重工業（株）原子力事業本部原子力技術センター 軽水炉プラント技術部機器構造技術課 主任

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
岡本 旦夫 石川島播磨重工業 (株) 原子力事業部技術管理グループ
部長

(平成15年4月まで)

小林 博栄 石川島播磨重工業 (株) 原子力事業部プラント設計部
技術グループ 課長
大谷 章仁 石川島播磨重工業 (株) 原子力事業部
原子カプラント設計部 プラントグループ

(役職は委員就任当時、敬称略)