

厚生労働科学研究費補助金  
労働安全衛生総合研究事業

負荷履歴の影響を考慮した経年圧力設備の  
高信頼度弾塑性破壊評価手法の開発

平成14年度～平成16年度 総合研究報告書

主任研究者 佐々木 哲也

平成17（2005）年3月

## 目 次

I. 総括研究報告書	
負荷履歴の影響を考慮した経年圧力設備の高信頼度弾塑性破壊評価手法の開発 . . . . .	1
佐々木哲也	
II. 研究成果の刊行に関する一覧表 . . . . .	6
III. 研究成果の刊行物・別刷 . . . . .	8

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

（総合）研究報告書

負荷履歴の影響を考慮した経年圧力設備の高信頼度弾塑性破壊評価手法の開発

主任研究者 佐々木 哲也 独立行政法人産業安全研究所主任研究官

研究要旨 本研究は、負荷履歴の影響を考慮した信頼性の高い弾塑性破壊評価手法を開発することを目的としている。初年度は、オーステナイトステンレス鋼製切欠き付き平板を用いて負荷履歴を変化させた弾塑性破壊実験を行い、負荷履歴が塑性崩壊点に及ぼす影響を明らかにするとともに、光弾性法で塑性崩壊形態の違いも明らかにした。一方で、弾塑性破壊における信頼性に大きな影響を及ぼすパラメータを明らかにするために、周方向切欠き付配管の曲げ破壊における確率論的影響度評価を行うとともに、精度の高い応力拡大係数評価を行うために、ハイブリッド赤外線計測法を開発を行った。さらに、互いに離れた3研究機関での共同研究を効率的に行うために、インターネットによる弾塑性破壊試験機の遠隔制御を試みた。2年目は、オーステナイトステンレス鋼製切欠き付き配管を用いて負荷履歴を変化させた弾塑性破壊実験を行い、負荷履歴が塑性崩壊点に及ぼす影響を明らかにするとともに、光弾性法で塑性崩壊形態の違いも明らかにした。一方で、R6法オプション2、3に適用可能な信頼性評価法として、応答曲面法の高度化について検討するとともに、赤外線応力測定の精度を向上させるために、熱伝導の影響について評価した。3年目は、引き続き軸力・曲げ同時負荷制御試験機を用いた実験と理論的検討により、切欠き付き配管・平板に対して負荷履歴が弾塑性破壊挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、曲げ疲労による延性き裂発生ポイントおよびき裂成長評価をCTOA（Crack Tip Opening Angle）で評価することを試みた。一方で、汎用有限要素解析コードによる信頼性評価を可能にする手法を開発するとともに、赤外線計測によるき裂検出に外部加熱を利用する手法について検討した。

分担研究者氏名・所属機関名及び所属機関における職名

本田尚・独立行政法人産業安全研究所主任研究官

松原雅昭・群馬大学工学部助教授

伊澤悟・小山工業高等専門学校機械工学科講師

A. 研究目的

我が国では各種産業プラントにおける圧力設備の経年化が急速に進んでいるが、経

済の低成長化のために更新は困難であり、既存設備の寿命延伸に対する要求が強くなっている。このため、既存圧力設備の寿命延伸を可能にすることを目的として、破壊力学の手法を取り入れた維持基準の整備が産官学の協力体制の下で進められている。しかし、従来の弾塑性破壊評価では負荷履歴等の影響は考慮されていないため、長期間運転した圧力容器や配管の破壊評価に適用した場合には非安全側の評価となっている可能性がある。そこで本研究では、これ

まで研究の行われていない弾塑性破壊挙動に及ぼす負荷履歴の影響を明らかにするとともに、その影響を信頼性工学的手法によって解析して現状の簡易弾塑性破壊評価手法へ組み入れることにより、信頼性の高い弾塑性破壊評価手法を開発することを目的とする。

## B. 研究方法

本研究は3年計画で独立行政法人産業安全研究所（一部は筑波大学）、群馬大学、小山工業高等専門学校との3ヶ所で実施する。

### (1) 平成 14 年度

まず、産業安全研究所では、R6法オプション1を用いてパラメータの影響度評価を行い、各確率因子が破壊確率に及ぼす影響度を明らかにする。また、赤外線計測に有限要素解析を併用したハイブリッド赤外線計測による応力拡大係数範囲の非接触評価手法を開発する。

群馬大学、小山工業高等専門学校においては、既に開発済みの軸力・曲げ同時負荷制御試験機の改良を行う。そして、オーステナイト系ステンレス鋼製の切欠き付き平板を用いて、①軸力・曲げ同時負荷試験、②軸力負荷後曲げ試験、③曲げ負荷後軸力試験の3種類の負荷履歴について実験を行い、塑性崩壊点や崩壊形態の違いを調べる。また、光弾性法によって切欠き付き平板の塑性崩壊を評価する手法を開発する。

さらに、本研究は互いに離れた3研究機関の共同研究であるため、遠隔地共同実験者との実験データの共有及び試験の円滑な実施のため、インターネットを用いて軸力・曲げ同時負荷制御試験機を遠隔制御し、実験データの取得が出来るようにすることを試みる。

### (2) 平成 15 年度

産業安全研究所（一部は筑波大学）では、R6法オプション2、3に適用可能な信頼性評価法として、応答曲面法の高度化について検討する。また、赤外線応力測定精度を向上させるために、熱伝導の影響について評価する。

群馬大学、小山工業高等専門学校においては、既に開発済みの軸力・曲げ同時負荷制御試験機を用いて、オーステナイト系ステンレス鋼製の切欠き付き配管に対して、①軸力・曲げ同時負荷試験、②軸力負荷後曲げ試験、③曲げ負荷後軸力試験の3種類の負荷履歴について実験を行い、塑性崩壊点や崩壊形態の違いを調べる。また、光弾性法によって切欠き付き配管の塑性崩壊を評価する手法を開発する。

### (3) 平成 16 年度

産業安全研究所では、汎用有限要素解析コードによって信頼性評価を可能にする手法を開発し、最も信頼性が高くなるように負荷履歴の影響をR6法に組み入れる方法を検討する。また、赤外線によるき裂検出に外部加熱による方法を適用するとともに、赤外線計測によって塑性崩壊を判定することを試みる。

群馬大学・小山高専においては引き続き軸力・曲げ同時負荷制御試験機を用いた実験と理論的検討により、切欠き付き配管に対して負荷履歴が弾塑性破壊挙動に及ぼす影響を明らかにする。

### (倫理面への配慮)

本研究の実施によって生体及び環境へ影響を及ぼすことはないため、倫理面の問題は無いと考える。

## C. 研究結果

### (1) 平成 14 年度

産業安全研究所においては、周方向貫通き裂付き配管の曲げ破壊に対して、R6法に基づくパラメータの確率論的影響度評価を行い、曲げモーメントが最も大きな影響を及ぼすことを明らかにした。また、赤外線計測法と有限要素法を組み合わせたハイブリッド赤外線計測法を開発を行った。これにより、応力拡大係数範囲の保守的な評価が可能になった。

一方、群馬大学、小山工業高等専門学校においては、既に開発済みの軸力・曲げ同時負荷制御試験機を改良して試験速度・精

度の改善を図るとともに、オーステナイト系ステンレス鋼製の切欠き付き平板を用いて負荷履歴が塑性崩壊荷重に及ぼす影響を明らかにした。また、光弾性被膜法によって負荷履歴による塑性崩壊形態の違いを調べた結果、塑性変形域における最大すべり線は、光弾性縞の進展経路と非常によく一致を示した。

さらに、軸力・曲げ同時負荷制御試験機のインターネットによる遠隔制御では、群馬大学をサーバー、産業安全研究所、小山工業高等専門学校をクライアントとして、試験条件の入力、試験の実施及びデータの共有に成功した。

## (2) 平成 15 年度

産業安全研究所（一部は筑波大学）においては、R 6 法オプション 2, 3 に適用可能な信頼性評価手法として、ニューラルネットワークを用いた応答曲面法を提案した。また、赤外線計測による応力評価、応力拡大係数範囲の評価に及ぼす熱伝導の影響を非定常熱伝導解析によって明らかにし、計測誤差を減少させる方法を示した。

群馬大学、小山工業高等専門学校においては、既に開発済みの軸力・曲げ同時負荷制御試験機を用いて、オーステナイト系ステンレス鋼製の切欠き付き配管に対して負荷履歴が塑性崩壊荷重に及ぼす影響を明らかにした。また、光弾性被膜法によって負荷履歴による塑性崩壊形態の違いを調べた結果、切欠き付き配管のリガメント部の全断面降伏による崩壊定義は、複合荷重条件によって適用に限界があることが示された。

## (3) 平成 16 年度

産業安全研究所においては、汎用有限要素解析コードによって信頼性評価を可能にする手法として、有限要素解析コードを外部プログラムとして取り扱う手法を提案した。また、赤外線計測によるき裂検出に外部加熱を利用する手法として、キセノンフラッシュランプを利用した外部加熱システムを構築し、アルミニウム合金 2024-T3 で作製したボルト継手に発生する疲労き裂の検出を試みた。

群馬大学、小山工業高等専門学校においては、減肉と貫通き裂が重畳した軸力と曲げを受ける配管について塑性崩壊荷重を理論的に検討するとともに、軸力と曲げを受ける SUS304 ステンレス鋼周方向切欠き付き配管について不静定破壊力学実験装置を用いた塑性崩壊実験を行い、上記理論的検討の検証を行った。また、切欠き付きオーステナイト系ステンレス鋼の塑性崩壊荷重を軸力・曲げ複合荷重下で評価し、同材料の曲げ疲労による延性き裂発生ポイントおよびき裂成長評価を破壊力学パラメータとして CTOA (Crack Tip Opening Angle) を用いて行なった。

## D. 考察

### (1) 破壊力学的評価関連

軸力と曲げの負荷順序を 3 種類に変えたオーステナイト系ステンレス鋼製切欠き付き平板と切欠き付き配管を用いた弾塑性破壊実験から、従来の理論崩壊曲線は軸力と曲げの組み合わせとは関係なく、安全側の評価を与えることが明らかになった。今後は別の材料、試験片形状について同様の結果が得られるかについて検討する必要がある。

一方、減肉と貫通き裂が重畳した軸力と曲げを受ける配管では、曲げモーメント主体による塑性崩壊荷重については周方向欠陥主体の場合と減肉欠陥主体の場合で差が生じることが明らかになったため、信頼性の高い強度評価に際しては損傷形態を考慮する必要があると考えられる。

### (2) 信頼性解析手法関連

周方向貫通き裂付き配管の曲げ破壊におけるパラメータの確率論的影響度評価結果は特定の解析対象・条件下で得られたものであるから、今後種々の解析対象・条件下で同様の解析を行う必要がある。また、ニューラルネットワークを用いた応答曲面法による信頼性評価では、実験点の選択方法によって得られる信頼性指標の値が変化するため、引き続き効率良く応答曲面を構築するための手法を検討する必要がある。

### (3) 実験力学的評価関連

ハイブリッド赤外線法による応力拡大係数評価では、解析解と比較して10%程度大きい値となっているため、今後誤差を小さくするための検討が必要である。また、赤外線法による応力評価では、熱伝導が応力の測定値に大きな影響を及ぼすが、き裂近傍から流出した熱量が非常に小さいため、 $r^{1/2}$ の特異性を持つ領域の温度勾配は、繰返し速度の変化に対して殆ど変化しない。したがって、赤外線計測値から応力拡大係数範囲を求める場合に限れば、荷重繰返し速度を考慮する必要はない。

## E. 結論

平成14年度から平成16年度までの3年間の研究により、以下の結論を得た。

### (1) 破壊力学的評価関連

オーステナイトステンレス鋼製の切欠き付き平板、切欠き付き配管を用いて負荷履歴を変化させた弾塑性破壊実験を行い、負荷履歴が塑性崩壊点に及ぼす影響を明らかにした。その結果、いずれの場合も理論崩壊限度曲線は軸力と曲げの組み合わせとは関係なく安全側の評価を与えることが明らかになった。また、減肉と貫通き裂が重畳した軸力と曲げを受ける配管について、塑性崩壊荷重を理論的に検討するとともに、実験的に検証した。さらに、切欠き付き配管のリガメント部の全断面降伏による崩壊定義は、複合荷重条件によって適用に限界があり、延性材料の疲労き裂発生と進展を評価するパラメータとしてCTOAが有効であることが示された。

### (2) 信頼性解析手法関連

周方向切欠き付き配管の曲げ破壊における確率論的影響度評価を行い、曲げモーメントが弾塑性破壊における信頼性に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。また、ニューラルネットワークを用いた応答曲面法の開発により、離散的にしか値が得られない複雑な限界状態関数も近似可能とした。さらに、既存の汎用有限要素解析コードを利用して、限界状態関数の評価に大規模な数値計算が必要な場合にも構造信頼性評価が

可能な手法を提案した。

### (3) 実験力学的評価関連

光弾性法で負荷履歴による塑性崩壊形態の違いを明らかにした。また、ハイブリッド赤外線計測法の開発を行い、応力拡大係数範囲の保守的評価を可能にするとともに、赤外線計測における誤差要因をあきらかにした。さらに、外部熱源としてキセノンフラッシュランプを利用した赤外線非破壊評価手法を開発し、アルミニウム合金2024-T3で作製したボルト継手に発生する疲労き裂の検出を試みた。

### (4) その他

互いに離れた3研究機関での共同研究を効率的に行うために、インターネットによる弾塑性破壊試験機の遠隔制御を試み、基礎実験に成功した。

## F. 健康危険情報

なし

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

M.Matsubara, S.Izawa, N.Hirao, K.Busujima, T.Koyama, K.Machida, D.Kawada, K.Sakamoto and K.Nezu: Development of Testing Equipment for Studying Statically Indeterminate Fracture Mechanics, Pressure Vessel Technology 2003, pp.481-486, 2003.

伊澤 悟, 松原雅昭, 根津紀久雄, 橋本彰三, 光弾性皮膜法による軸力-曲げ複合荷重下のSUS316鋼片側切欠部材の塑性崩壊挙動, 実験力学, Vol.4, No.1, pp.55-60, 2004.

松原雅昭, 佐々木哲也, 伊澤 悟, 欠陥を有する矩形断面構造の簡易崩壊応力評価, 圧力技術, Vol. 42, No. 2, pp. 76-80, 2004.

S.Izawa, M.Matsubara, K.Nezu, K. Sakamoto, Plastic Collapse Evaluation of Notched Stainless Steel Piping Subjected to Combined Tension and Bending by Photo-elastic Coating, Key Engineering materials, Vols.270-273, pp.2001-2005, 2004.

本田 尚, 佐々木哲也, 大塚輝人, 吉久悦二, 赤外線計測による応力拡大係数範囲の

測定精度改善に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, 投稿中.

## 2. 学会発表

T.Honda, T.Sasaki and E.Yoshihisa, "A study to improve the measurement accuracy of stress intensity factor by the infrared method", Proceedings of 7th International Conference on Assessment and Control of Damage and Fracture Mechanics, Maui (Hawaii), U.S.A., pp.265-272, 2002,

松原雅昭, 伊澤 悟, 根津紀久雄, 坂本賢治, 近藤正幸, 太田敦士: 軸力と曲げを受ける SUS304 切欠付配管の塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴の影響, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会・2002 宇都宮・講演論文集, No.020-2, pp.149-150, 2002.

太田敦士, 松原雅昭, 伊澤 悟, 坂本賢治: ステンレス鋼切欠部材の塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴の影響, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会・2002 宇都宮・講演論文集, No.020-2, pp.151-152, 2002.

S.Izawa, M.Matsubara, K.Nezu and K. Sakamoto, "LOAD HISTORY EFFECT ON PLASTIC COLLAPSE IN A SINGLE-EDGE NOTCHED SUS316 SUBJECTED TO A COMBINED TENSION AND BENDING", 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol.443-2, Fatigue, Fracture, and Damage Analysis-2002, Volume II, pp.91-97, 2002.

Tetsuya SASAKI, Teruhito OHTSUKA and Etsuji YOSHIHISA, The Effect of Heat Conduction on Stress Concentration Factors and Stress Intensity Factors Determined by Thermoelastic Stress Analyses, ATEM'03, Nagoya, Sept. 10-12, 2003.

伊澤 悟, 松原雅昭, 根津紀久雄, 坂本賢治, 太田敦士: 軸力と曲げを受ける SUS304 切欠付配管の塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴の影響, 第 52 期学術講演会講演論文集, pp.208-209, 2003.

松原雅昭, 針塚宏樹, 太田敦士, 伊澤 悟,

根津紀久雄, 坂本賢治: ステンレス鋼切欠付配管の塑性崩壊実験に関する研究, 関東支部 10 周年記念ブロック合同講演会・2003 桐生・講演論文集, No.030-2, pp.107-108, 2003.

伊澤 悟, 松原雅昭, 根津紀久雄, 坂本賢治・光弾性被膜法による切欠付ステンレス配管の塑性崩壊判定・日本実験力学会 2003 年度年次大会講演論文集・pp.98-99・2003.

宮田覚史, 伊澤 悟, 松原雅昭, 太田敦士, 軸力と曲げを受けるステンレス鋼片側切欠部材の応力解析に関する研究, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会・2003 桐生・講演論文集, pp.103-104, 2003.

S.Izawa, M.Matsubara, K.Nezu, K. Sakamoto・PLASTIC COLLAPSE EVALUATION OF NOTCHED STAINLESS STEEL PIPING SUBJECTED TO COMBINED TENSION AND BENDING BY PHOTO - ELASTIC COATING・11th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing 2003 Abstract book, p.128, 2003.

伊澤 悟, 松原雅昭, 坂本賢治, 光弾性被膜法による軸力-曲げ複合荷重下の SUS304 配管の塑性崩壊挙動, 日本実験力学会 2004 年度年次大会講演論文集, pp.108-111, 2004.

伊澤 悟, Albert S. Kobayashi, SUS316SENB 試験片の CTOA 解析, 日本実験力学会 2005 年度年次大会講演論文集, pp.27-30, 2005.

(発表誌名巻号・頁・発行年等も記入)

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む。)

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

研究成果の刊行に関する一覧表

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻名	ページ	出版年
T.Honda, T.Sasaki and E.Yoshihisa	A study to improve the measurement accuracy of stress intensity factor by the infrared method	Proceedings of 7th International Conference on Assessment and Control of Damage and Fracture Mechanics		265-272	2002
松原雅昭, 伊澤 悟, 根津紀久雄, 坂本賢治, 近藤正幸, 太田敦士	軸力と曲げを受ける SUS304 切欠付配管の塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴の影響	日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-2002 宇都宮・講演論文集	No.020-2	149-150	2002
太田敦士, 松原雅昭, 伊澤 悟, 坂本賢治	ステンレス鋼切欠部材の塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴の影響	日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-2002 宇都宮・講演論文集	No.020-2	151-152	2002
S.Izawa, M.Matsubara, K.Nezu and K.Sakamoto	LOAD HISTORY EFFECT ON PLASTIC COLLAPSE IN A SINGLE-EDGE NOTCHED SUS316 SUBJECTED TO A COMBINED TENSION AND BENDING	Proceedings of 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference	Vol. II	91-97	2002
伊澤 悟, 松原雅昭, 根津紀久雄, 橋本彰三	光弾性皮膜法による軸力-曲げ複合荷重下の SUS316 鋼片側切欠部材の塑性崩壊挙動	実験力学	Vol.4, No. 1	55-60	2004
T.Honda, T.Sasaki and E.Yoshihisa	The Effect of Heat Conduction on Stress Concentration Factors and Stress Intensity Factors Determined by Thermoelastic Stress Analyses	Proceedings of 7th International Conference on Assessment and Control of Damage and Fracture Mechanics	CD-ROM		2003
M.Matsubara, S.Izawa, N.Hirao, K.Busujima, T.Koyama, K.Machida, D.Kawada, K.Sakamoto and K.Nezu	Development of Testing Equipment for Studying Statically Indeterminate Fracture Mechanics	Pressure Vessel Technology 2003		481-486	2003



発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻名	ページ	出版年
伊澤 悟, 松原 雅昭, 根津紀 久雄, 坂本賢 治, 太田敦士	軸力と曲げを受ける SUS304 切欠付配管の塑性崩壊荷重 に及ぼす負荷履歴の影響	第 52 期学術講演会講演論文集		208-20 9	2003
松原雅昭, 針 塚宏樹, 太田 敦士, 伊澤 悟, 根津紀久 雄, 坂本賢治	ステンレス鋼切欠付配管の 塑性崩壊実験に関する研究	関東支部 10 周年記念ブロック 合同講演会-2003 桐生-講演論文 集	No.030-2	107-10 8	2003
伊澤 悟, 松 原雅昭, 根津 紀久雄, 坂本 賢治	光弾性被膜法による切欠付 ステンレス配管の塑性崩壊 判定	日本実験力学学会 2003 年度年次 大会講演論文集		98-99	2003
宮田覚史, 伊 澤 悟, 松原 雅昭, 太田敦 士	軸力と曲げを受けるステン レス鋼片側切欠部材の応力 解析に関する研究	日本機械学会関東支部ブロッ ク合同講演会-2003 桐生-講演 論文集		103-10 4	2003
S.Izawa, M.Matsubara, K.Nezu, K. Sakamoto	Plastic Collapse Evaluation of Notched Stainless Steel Piping Subjected to Combined Tension and Bending by Photo-elastic Coating	Key Engineering materials	Vols.270- 273	2001-2 005	2004
松原雅昭, 佐々木哲也, 伊澤 悟	欠陥を有する矩形断面構造 の簡易崩壊応力評価	圧力技術	Vol. 42, No. 2	76-80	2005
伊澤 悟, 松 原雅昭, 坂本 賢治	光弾性被膜法による軸力- 曲げ複合荷重下の SUS304 配 管の塑性崩壊挙動	日本実験力学学会 2004 年度年次 大会講演論文集		108-11 1	2004
伊澤 悟, Albert S. Kobayashi	SUS316SENB 試験片の CTOA 解析	日本実験力学学会 2005 年度年次 大会講演論文集		27-30	2005
本田 尚・佐々 木哲也・大塚 輝人・吉久悦 二	赤外線計測による応力拡大 係数範囲の測定精度改善に 関する研究	日本機械学会論文集 A 編	投稿中		

# A study to improve the measurement accuracy of stress intensity factor by the infrared method

T. Honda, T. Sasaki & E. Yoshihisa  
*National Institute of Industrial Safety, Japan.*

## Abstract

Stress intensity factors evaluated by an infrared stress analysis method have usually been lower than analytical values. In order to reveal the source of the error, an unsteady heat conduction analysis under cyclic loading was carried out and the results were compared with the measurement values. As a result, it was clear that the errors of stress intensity factor between evaluated values and analytical values were caused not by heat conduction but by the plastic zone size of a crack tip. Then, the hybrid method adopting a numerical analysis was developed in order to improve the measurement accuracy of stress intensity factor by the infrared method. The stress intensity factors revalued by this hybrid method were almost somewhat higher than analytical values.

## 1 Introduction

The local stresses and strains near notches or cracks are very important for fracture analyses of cyclically loaded structure components. Thus, a number of experimental methods such as a photoelasticity method and numerical methods such as a finite element analysis have been developed to evaluate stresses and strains near notches or cracks. Among those methods, an infrared stress measurement method, which is based on the measurement of infrared radiation emitted from the surface of a body, can measure a two-dimensional stress distribution of real structure components without preparing special models like a photoelasticity method.

When this technique was used to evaluate the stress intensity factors for CT and CCT specimens, the determined values tended to be somewhat lower than numerical results, and the error increased in proportion to those values not to concern with the stress ratio[1]. Thus, in this study, the effect of heat conduction

in a body of sheet specimens under cyclic loading was investigated by a finite differential analysis to examine the source of the error, and the results were compared with experimental results. Also, the hybrid method adopting a numerical analysis was developed in order to improve the measurement accuracy of stress intensity factor by infrared method.

## 2 Theory of the thermoelastic stress analysis

Based on a theoretical treatment of the thermoelastic effect by Lord Kelvin [2], the temperature change associated with adiabatic elastic deformation in a body can be expressed in the form :

$$\Delta T = -\frac{E\alpha T}{\rho C_\epsilon(1-2\nu)} \sum_{i=1,2,3} \Delta \epsilon_{ii} = -K_m T \sum_{i=1,2,3} \Delta \sigma_{ii} \quad (1)$$

where  $\Delta T$  is change in temperature,  $E$  is the Young's modulus,  $\alpha$  is the coefficient of linear thermal expansion,  $T$  is absolute temperature,  $\rho$  is the mass density,  $C_\epsilon$  is the specific heat at constant strain,  $\nu$  is the Poisson's ratio,  $\Delta \epsilon_{ii}$  is the normal strain change,  $K_m$  is the thermoelastic constant,  $\Delta \sigma_{ii}$  is the sum of normal stress changes. Therefore, only the principal stress sum can be measured by an infrared stress analysis method.

## 3 Infrared stress analysis method

Figure 1 shows the schematic of the infrared stress analysis system using in this study. Cyclic load is applied to the specimen. An infrared camera, of which sensitivity is 0.001 K corresponded to 1 MPa in steel, generates a signal in phase with the load signal in response to the infrared emission from the surface of a

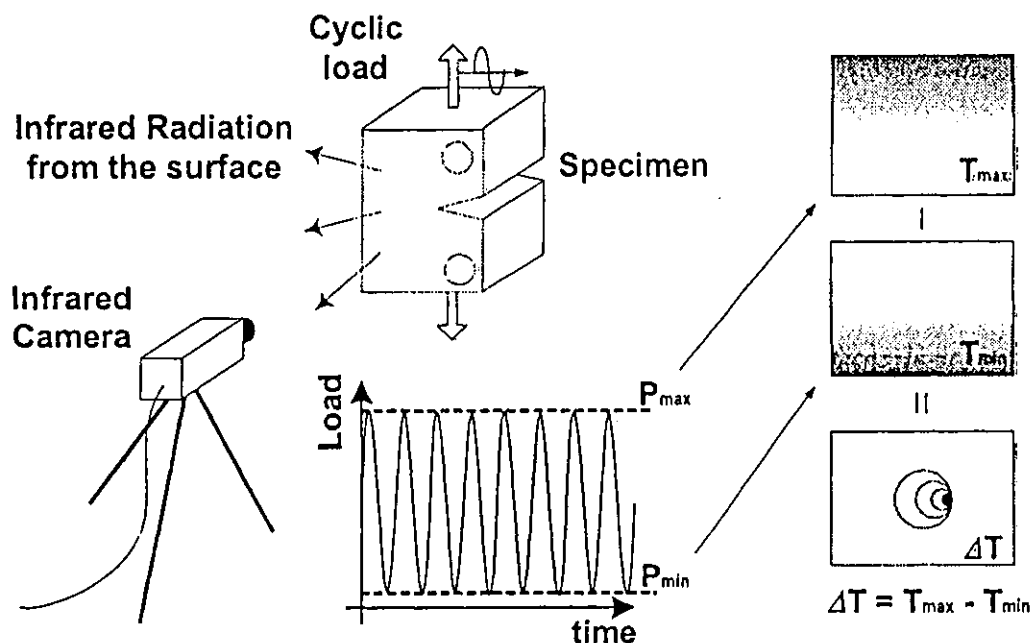


Figure 1 : A schematic of the infrared stress analysis method.

specimen. Since the temperature changes due to thermoelastic effect are very small, the generated signals are averaged in the measurement time in order to improve the S/N ratio. The image of change in temperature  $\Delta T$  is obtained by subtracting the temperature image in minimum load  $T_{min}$  from the one in maximum load  $T_{max}$ .

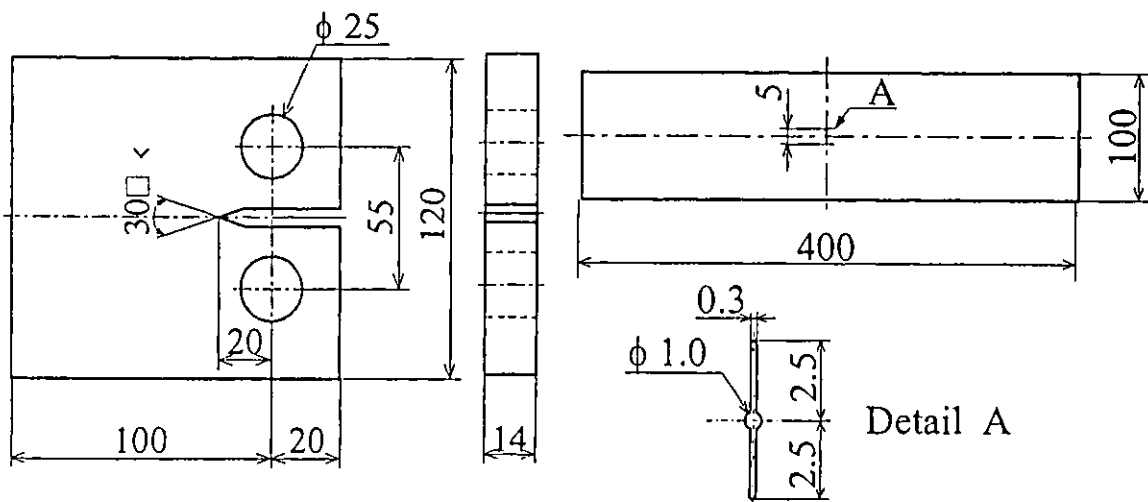
#### 4 Test procedures

Two types of specimen were prepared in this study, one was CT specimen made of JIS SM490A steel, and the other was CCT specimen made of JIS S45C steel. The mechanical properties of the materials used are given in Table 1. The configurations of two type specimens are shown in Figure 2.

Table 1: Mechanical properties of the materials used.

Material	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SM490A	402	520	27
S45C	450	550	30

The pre-cracking CT specimens were cyclically loaded at frequency of 5Hz using a servo-hydraulic fatigue machine of 196 kN capacity. The stress waveform was sinusoidal and the stress ratio was 0.1. While CCT specimens were loaded at different levels of frequency of 1, 5, 10 and 15 Hz in order to investigate the effect of heat conduction in the body. Prior to the stress measurement, all specimens were cleaned with acetone and then coated with matt black spray paint to maximize their emissivity. The stress measurement by thermoelastic technique was carried out using an infrared stress analysis system developed by JEOL. The typical example of stress contour around a crack tip is



(a) CT specimen

(b) CCT specimen

Figure 2: The configurations of CT and CCT specimen.

shown in Fig.3.

## 4 Effect of heat conduction

### 4.1 Unsteady heat conduction analysis

The unsteady heat conduction analysis under cyclic loading was carried out by finite differential method (FDM) in order to investigate the effect of the heat conduction in a specimen on measured value. Prior to the unsteady heat conduction analysis, the stresses of CCT specimens were analyzed by the finite element method (FEM) under the plane stress condition using a two-dimensional mesh. Considering the symmetrical configuration, one fourth of the CCT specimen was analyzed. The temperature range of each node was obtained by substituting the values of normal stresses analyzed by the finite element method into the eqn (1) and it was found that the temperature waveform was sinusoidal.

### 4.2 Experimental and analytical results

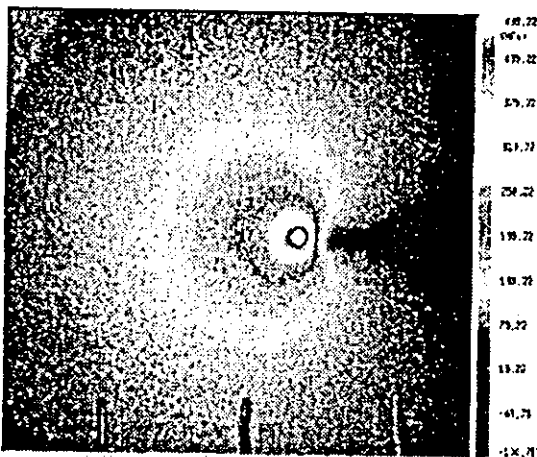


Figure 3: Typical example of stress contour around a crack tip.  
 $\Delta K = 18.5 \text{ MPa m}^{1/2}$

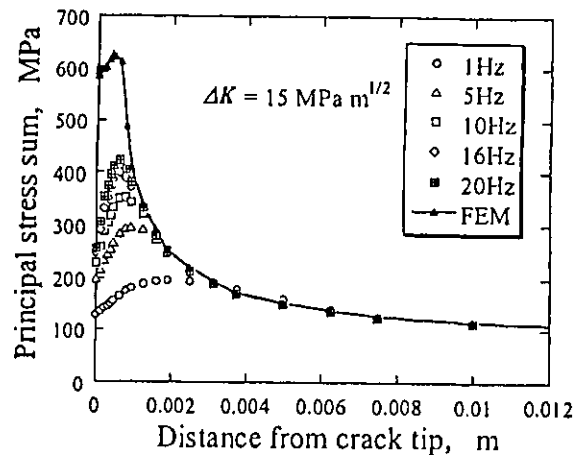


Figure 4: The distribution of the principal stress sum in the ligament analyzed by FDM.

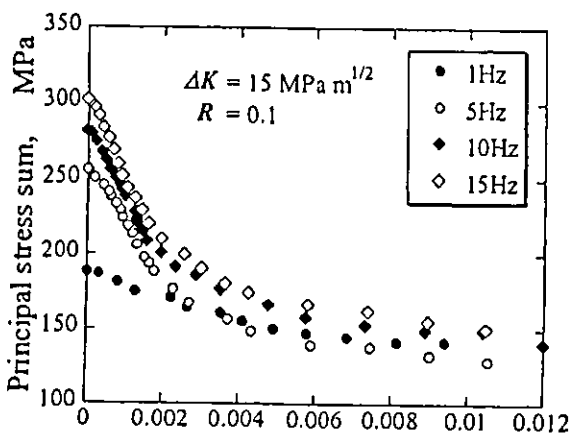


Figure 5: The distribution of the principal stress sum in the ligament measured

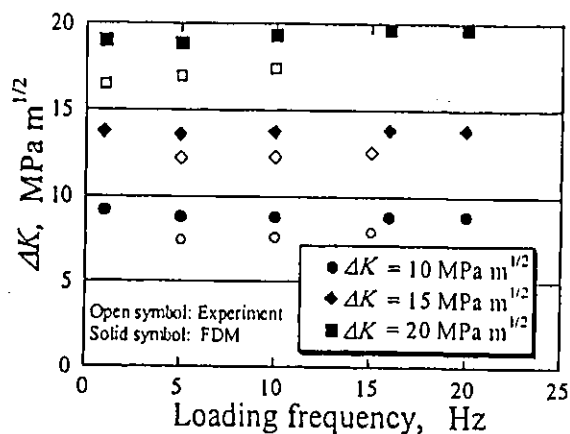


Figure 6: Effect of loading frequency on  $\Delta K$ .

Figure 4 shows the distribution of the principal stress sum along the ligament of CCT specimen analyzed by FDM. Also, the measurement results are shown in Figure 5. As can be seen those figures, it is clear that the stress distributions were affected by heat conduction in the specimen. Then stress intensity factor ranges  $\Delta K$  were calculated by the extrapolation method often used in the photoelasticity and compared with experimental results. Figure 6 shows the relationship between  $\Delta K$  and the loading frequency. However, each value of  $\Delta K$  was hardly affected by the loading frequency and practically constant. The cause is that the stresses of crack vicinity, which affect the accuracy of  $\Delta K$ , can not be measured accurately by an infrared technique due to plastic deformation around the crack tip.

## 5 Hybrid method

The stress intensity factor range evaluated by the extrapolation method underestimated compared with the actual value since the stresses near crack tip can not be measured accurately due to plastic deformation around the crack tip. Accordingly, a technique aided by the finite element method for estimating the stresses near the crack tip from the measured values in parts where there were no effects of plastic deformation was devised.

### 5.1 Principle of the hybrid method

In a infrared stress measurement technique, only the stress invariant of the first order  $J_1$  can be measured and resolution of stress components was thought to be impossible. Then, the methods to overcome the disadvantage of this technique have been developed [3][4]. In the same way, it is possible to evaluate the stress intensity factor range using the stress values of the part which are not affected by the plastic deformation near crack tip.

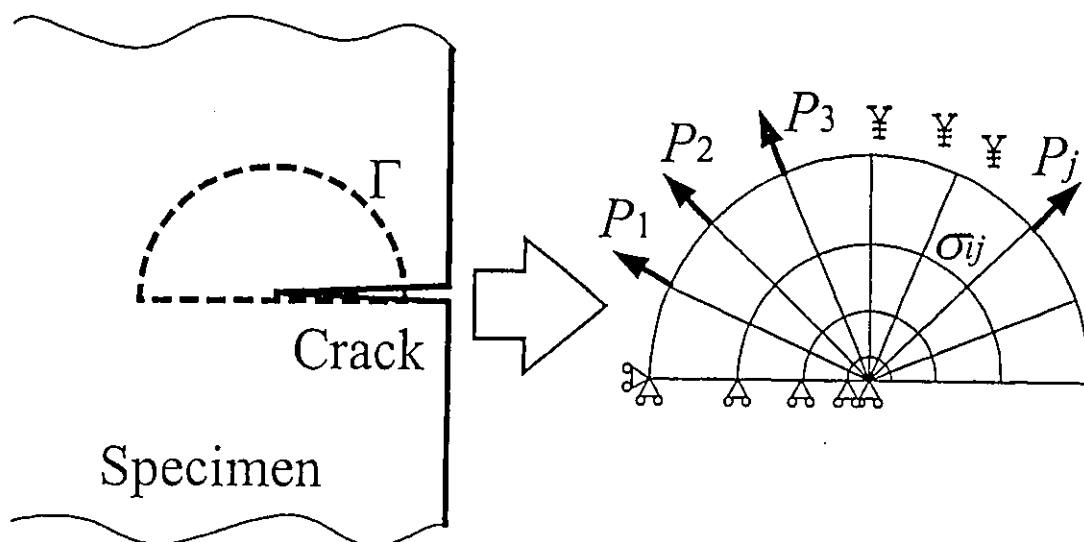


Figure 7: Schematic of the hybrid method adopting numerical analyses.

As shown in Figure 7, the region surrounded in the boundary  $\Gamma$ , which is the part of specimen, is considered. The stress values surrounded in this boundary are known from the infrared measurement results but the load boundary conditions along  $\Gamma$  are unknown. When a unit force in the nominal and then tangential direction is applied to a point  $j$  ( $j = 1$  to  $N$ ) along the boundary  $\Gamma$ , the stress at a point  $i$  ( $i = 1$  to  $M$ ) in the region occurring by this unit force should be  $\sigma_{ij}^*$ . Assuming that the force actually acting on the point  $j$  is  $P_j$ , stress  $\sigma_{ij}$  in the point  $i$  is shown as follows according to the superposition principle:

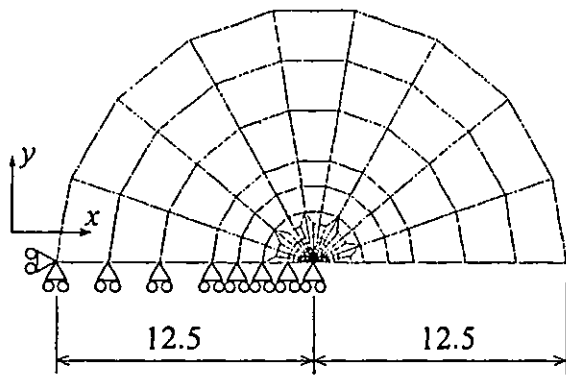


Figure 8: Simulation model. Dimensions are in mm.

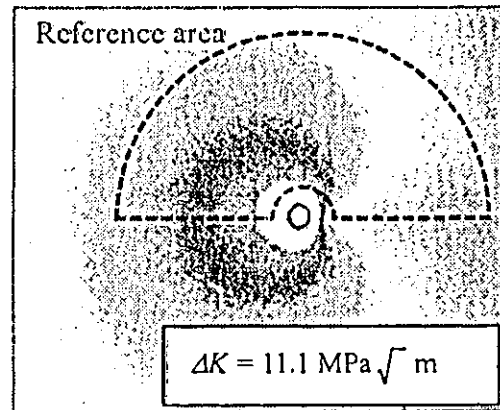


Figure 9: The stress image measured by infrared method used for the determination of the boundary conditions.

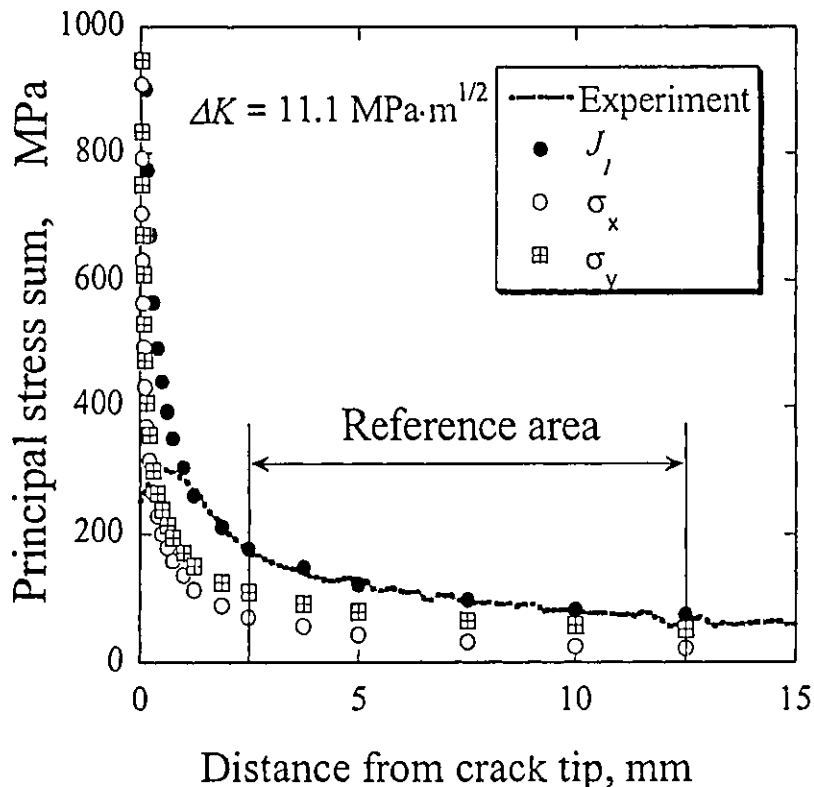


Figure 10 : Distribution of stresses along the ligament analyzed by hybrid method.

$$\sigma_{ij} = \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} * P_j \quad i = 1 \sim M, j = 1 \sim N. \quad (2)$$

In order to determine the optimum values of  $P_j$ , the least square method is applied to S:

$$S = \sum_{i=1}^M \left( \sigma_{ij} - \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} * P_j \right)^2 \quad i = 1 \sim M, j = 1 \sim N. \quad (3)$$

The optimum values of  $P_j$  must satisfy the following equation:

$$\partial S / \partial P_j = 0. \quad (4)$$

Resolving a set of  $N$  linear simultaneous equation,  $P_j$  is determined. Accordingly, the stresses near crack tip are calculated by FEM under the determined boundary conditions.

## 5.2 Results of evaluation

The finite element mesh used in this method, which is shown in Figure 8, consisted of 702 4-node isoparametric elements. FE analyses were carried out under the plane stress condition. The Young's modulus  $E$  was 206GPa and the Poisson's ratio was 0.3. Figure 9 shows a example of the stress image of CT specimen used for this method, and the stress values surrounded with the dotted line are used to determine the boundary conditions  $P_j$ . Figure 10 shows the stress distribution along the ligament estimated by the hybrid method at  $\Delta K = 11.1 \text{MPa m}^{1/2}$ . The stress values estimated by this method were agreed well with the

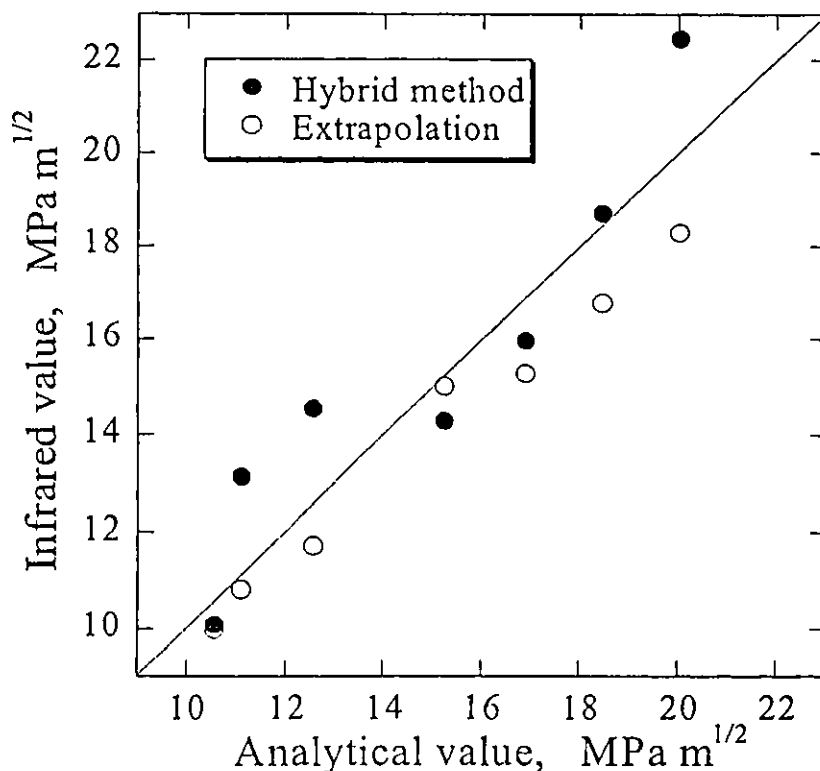


Figure 11 : Comparison between the values of the hybrid method and analytical values.



referenced values. It was also tended to be similar at the other values of  $\Delta K$ . Then, the stress intensity factor ranges were evaluated using the stress values analyzed by this method. Figure 11 shows comparison of  $\Delta K$  between the values derived from the hybrid method and analytical values. The results of the extrapolation method are also shown in this figure. As can be seen in this figure, it was found that  $\Delta K$  obtained by the hybrid method tended to be larger than the values of the extrapolation method though they were scattered around the analytical values.

## 6 Conclusions

In this paper, in order to improve the measurement accuracy of stress intensity factors by the infrared stress analysis method, the cause of the error between measurement results and analytical values was clarified by means of unsteady heat conduction analysis. Then, the hybrid method to overcome the disadvantage that the stresses near crack tip can not be measured by the infrared method is developed. The obtained results are summarized as follows:

- (1) The errors of stress intensity factor between estimated values and analytical results were caused not by heat conduction but by the plastic deformation around crack tips.
- (2) The stresses calculated by the hybrid method were agreed well with the measurement values.
- (3) Stress intensity factor ranges evaluated by the hybrid method were often larger than the values obtained by the extrapolation method.

## References

- [1] Kitsunai, Y., Honda, T. & Sasaki, T., The determination of stress concentration factors and stress intensity factors by means of thermoelastic stress analysis. *Trans. the Japan Society of Mechanical Engineers*, A-64, pp. 2782-2787, 1998. ( In Japanese )
- [2] Fing, Y. C., *Foundations of solid Mechanics*, Prentice Hall, 1965.
- [3] Murakami, Y., & Yoshimura, M., Development of system resolving all stress components in thermoelastic stress analysis. *Trans. the Japan Society of Mechanical Engineers*, A-61, pp. 2482-2488, 1995. ( In Japanese )
- [4] Kishimoto, K., Inoue, H., Shinbo & H., Shibuya, T., Inverse analysis related to stress separation in thermoelastic analysis. *Trans. the Japan Society of Mechanical Engineers*, A-62, pp.1204-1211, 1996. ( In Japanese )

# 415 軸力と曲げを受ける SUS304 切欠付配管の 塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴の影響

Load history effect on plastic collapse in a notched SUS304 piping subjected to combined tension and bending.

○ 正 松原雅昭 (群大工) 正 伊澤 悟 (小山高専) 正 根津紀久雄 (群大工)

正 坂本賢治 (群大工) 近藤正幸 (サンヨー) 学 太田敦士 (群大院)

Masaaki MATSUBARA, Kikuo NEZU, Kenji SAKAMOTO and Atsushi OTA,

Gunma University, Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, Gunma

Satoru IZAWA, Oyama National College of Technology, Nakakuki 771, Oyama, Tochigi

Masayuki KONDO, Sanyo Co.Ltd. Sakata 1-1-1, Oizumi, Gunma

**Keywords:** Tension and Bending, Plastic Collapse, Load History, SUS304

## 1. 緒論

軽水炉プラントの配管などのエネルギー機器構造部材として用いられるステンレス鋼は、使用中の破損による被害が甚大となる可能性が高い。このステンレス鋼は荷重負荷に伴い顕著な塑性変形を示し、最終的に塑性崩壊に至ることが知られている。そこでステンレス鋼の構造健全性評価については塑性崩壊基準を対象とするのが一般的である。

著者らは構造健全性評価を行う上で代表的な構造である軸力と曲げを受けるき裂部材に注目した。そして、その塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴依存性を明らかにすることを目的として不静定破壊力学実験装置を開発した。

本報告では、軸力と曲げを受けるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 製切欠付配管について、膜応力および曲げ応力の定式化を行い、膜応力-軸方向変位線図および曲げ応力-たわみ角線図によって塑性崩壊点を判定した。崩壊点は崩壊限度線図上にプロットし、崩壊点へ及ぼす軸力と曲げの負荷履歴の影響について実験的検討を行った。

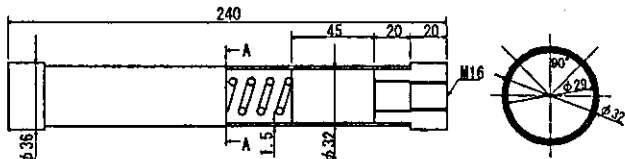
## 2. 実験方法

### 2.1 供試材料および実験装置

実験に用いた供試材料は、外径 32mm、管厚 1.5mm のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 配管である。Table1 にその化学成分を示す。欠陥を想定した平均半径における切欠き角度を  $90^\circ$  と仮定した周方向貫通切欠の加工は、加工幅 0.32mm のワイヤカット放電で実施した。Fig.1 に試験片形状を示す。

Table1. Chemical composition of the material tested.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	(%)
0.02	0.50	1.08	0.28	0.10	9.07	18.03	



A-A cross-section

Fig.1. Geometries figure of the specimen.

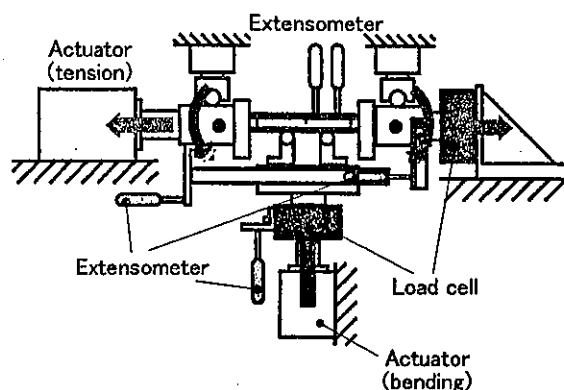


Fig.2. Testing equipment.

また、二軸独立負荷制御可能な不静定破壊力学試験装置の概要を Fig.2 に示す。この試験装置を用いて軸力-曲げ複合荷重下の負荷履歴を変化させて実験を行う。

### 2.2 負荷条件

弾完全塑性体と仮定した配管に軸力  $F$  と曲げ  $M$  が作用する場合のリガメント断面に作用する応力分布を Fig.3 に示す。配管の周方向貫通切欠角度を  $2\alpha$ 、平均半径を  $R$ 、管厚を  $t$ 、降伏応力を  $\sigma_y$ 、軸力の荷重線の位置を角度  $\beta$ 、中立軸の位置を角度  $\gamma$  とすると、軸方向の荷重のつり合いおよび曲げモーメントのつりあいから膜応力強さ  $P_x$  および曲げ応力強さ  $P_b$  は

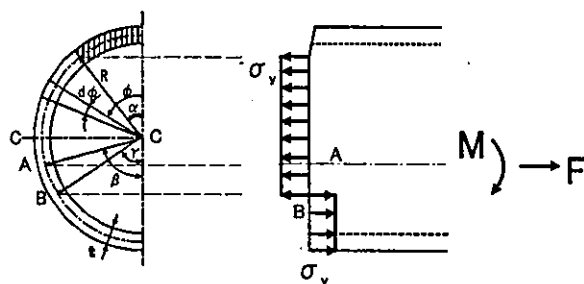


Fig.3. Stress state of the ligament subjected to combined tension and bending.

$$P_m = \frac{\pi - \alpha - 2\gamma}{\pi - \alpha} \sigma_y \quad (1)$$

$$P_b = \frac{2\{2\sin\gamma - \sin\alpha + (\pi - \alpha - 2\gamma)\cos\beta\}}{Z} \sigma_y R^2 I \quad (2)$$

となる。両応力強さから軸力と曲げの複合荷重を受ける配管の塑性崩壊状態における応力の一般式は、

$$\frac{P_b}{\sigma_y} = \frac{2}{Z} \left[ 2\sin\left\{\frac{\pi - \alpha}{2} \left(1 - \frac{P_m}{\sigma_y}\right)\right\} - \sin\alpha + (\pi - \alpha) \frac{P_m}{\sigma_y} \cos\beta \right] R^2 I \quad (3)$$

となる。上式に本試験片の試験片形状の形状係数を代入し、

$$\frac{P_b}{\sigma_y} = 1.41 \left[ 2\sin\left\{\frac{3}{8}\pi \left(1 - \frac{P_m}{\sigma_y}\right)\right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{P_m}{\sigma_y} - 1\right) \right] \quad (4)$$

Fig. 3に示す塑性崩壊限度線図を得る。崩壊限度線図上に膜応力強さと曲げ応力強さの荷重比率を変化させた目標荷重Xを4点設定し、荷重履歴の影響の検討を行った。

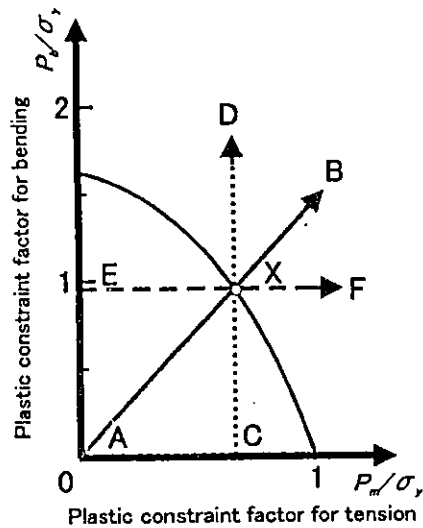


Fig. 3. Loading path on the plastic collapse diagram.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 二倍変位法による崩壊点判定の評価

軸力曲げ同時荷重試験では曲げ応力強さ-たわみ角線図、膜応力強さ-軸方向変位線図の両方から崩壊点の判定が可能である。また、軸力→曲げ試験ではは曲げ応力強さ-たわみ角線図から、曲げ→軸力試験では膜応力強さ-軸方向変位線図から崩壊点の判定を行い、それぞれの崩壊点と軸力曲げ同時荷重試験から判定した崩壊点を比較した。

この際、本試験で使用したステンレス鋼はひずみ硬化指数が大きいため、弾性域変位の二倍の変位によって崩壊点を定義する二倍変位法により崩壊点を判定した。

#### 3.2 崩壊限度曲線による評価

Fig. 4に、曲げ応力強さ-たわみ角線図より求めた崩壊点を塑性崩壊限度曲線上に示す。軸力曲げ同時荷重試験による崩壊点(●)は塑性崩壊限度曲線に沿うような形で分布している。一方、軸力→曲げ試験による崩壊点(▲)は軸力の荷重履歴が大きい条件ほど塑性崩壊限度曲線から離れた位置に分布する。

同様に、Fig. 5に膜応力強さ-軸方向変位線図より求めた崩壊点を塑性崩壊限度線図上に示す。軸力曲げ同時荷重試験による崩壊点(○)と、曲げ→軸力試験による崩壊点(□)の分布を比較すると、両試験による崩壊点はほぼ同じ  $P_b/\sigma_y$  の値の位置に分布しており、両者の間に荷重履歴の影響があまりないことを表している。

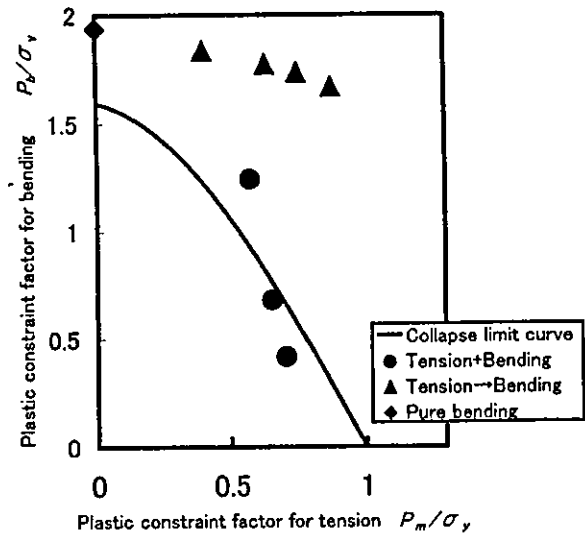


Fig. 4. The distribution of the plastic collapse point. (Bending stress - rotation chart)

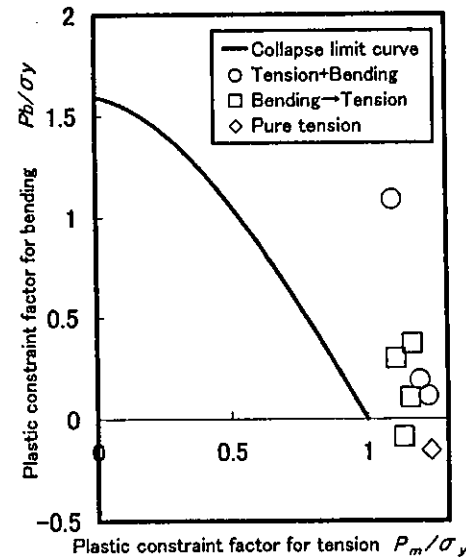


Fig. 5. The distribution of the plastic collapse point. (Membrane stress - rotation chart)

### 4. 結論

不静定破壊力学試験装置を用い、SUS304の切欠付配管の塑性崩壊挙動に及ぼす軸力と曲げの荷重履歴の影響を調べた。

(1) 同時荷重試験における曲げ応力強さ-たわみ角線図から判定した崩壊点は、本研究で導出した塑性崩壊限度線図付近に分布する。

(2) 軸力と曲げの荷重履歴の違いによって、塑性崩壊限度線図上にプロットした崩壊点の分布に影響が出る。

# 416 ステンレス鋼片側切欠部材の 塑性崩壊荷重に及ぼす負荷履歴の影響\*

○学 太田 敦士 (群大院)      正 松原 雅昭 (群大工)  
正 伊澤 悟 (小山高専)      正 坂本 賢治 (群大工)

## Load History Effect on Plastic Collapse in a single-Edge Notched Stainless Steel Subjected to combined Tension and Bending

Atsushi OOTA, Gunma University, Niratsukamachi301-1, Iseaki-shi, Gunma  
Masaaki MATSUBARA, Gunma University  
Satoru IZAWA, Oyama National College Technology

*Key Words*: Plastic Collapse, Combined Tension and Bending, Single-Edge Noched, SUS316

### 1. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼は、原子力プラントや配管に広く使用されており、荷重荷重に伴い顕著な塑性変形を起こすことが知られている。そのため構造健全性評価には、塑性崩壊荷重が重要パラメータとして用いられることが多い。しかし、現行設計に用いられている塑性崩壊限度曲線や破断前漏洩(LBB)設計等は負荷履歴依存性について十分検討されておらず、安全裕度に頼っている。

本研究は、片側切欠ステンレス鋼部材について負荷履歴効果を明らかにし、現行評価法と比較・検討して最適な破壊評価法を確立することを目的とする。

### 2. 解析方法

#### 2.1 崩壊限度線図

Fig. 1に崩壊限度線図を示す。これは、任意のリガメント比  $a/w$  の片側切欠材が剛完全塑性体仮定の下で軸力と曲げを同時に受ける場合について解析されている。 $\sigma_m'$ ,  $\sigma_b'$  は正味断面の膜応力強さ、曲げ応力強さであり、降伏応力  $\sigma_y$  で除して無次元化している。

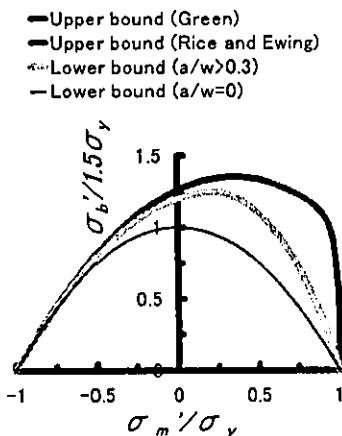


Fig.1 The collapse limit curve

図の上界は、Green<sup>1)</sup>によるすべり線場の純曲げの解と Riceら<sup>2)</sup>による動的可容なすべり線場から導かれる。また下界は、切欠深さを考慮して修正された高畑ら<sup>3)</sup>の解析からなる。

#### 2.2 荷重-変位線図からの崩壊点判定

本研究は接線法、二倍変位法、二倍コンプライアンス法の各方法で荷重-変位線図から崩壊点を導いてみた。同じ試験条件でも判定法によって崩壊点の位置は異なってくるため、後述する視覚的な方法で評価した崩壊点と比較し最適なものを検討した。

#### 2.3 光塑性皮膜法による崩壊点判定

本研究では、塑性崩壊とはリガメント部分を塑性域が貫通し、以後塑性的にしか負荷に耐えられなくなる変形の開始点として定義する。ここで、塑性域の進展の様子は、光塑性皮膜法を使って縞の観察により定量的に評価する。

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験装置および供試材料

本研究の不静定破壊力学試験装置の概要を Fig. 2 に示す。この試験装置は水平荷重、垂直荷重を独立して負荷することが可能である。試験時には、軸方向および垂直方向の変位と荷重、たわみ角および切欠開口変位の計測を行う。また、試験片は片側に切欠を持つオーステナイ

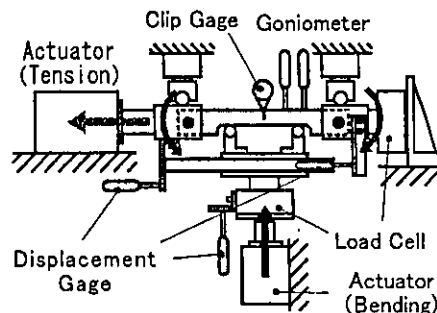


Fig.2 Specimen and load profile of testing equipment