200401097A

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１６年度　総括・分担研究報告書

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．分担研究報告
1．汎用有限要素解析コードを用いた信頼性評価に関する研究　・・・・・・・・・・　4
佐々木哲也
2．外部加熱を利用した疲労き裂検出手法の開発　・・・・・・・・・・・・・・・・　6
本田　尚
3．軸力と曲げを受けるステンレス鋼切欠配管の塑性崩壊荷重に関する研究　・・　8
松原雅昭
4．切欠付オーステナイトステンレス鋼の塑性崩壊と延性疲労き裂評価　・・・　10
伊澤　悟

Ⅲ．研究成果の刊行に関する一覧表　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　12

Ⅳ．研究成果の刊行物・別刷　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　13

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

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。３年目に当たる本年は、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、群馬大学、小山工業高等専門学校の３ヶ所で実施する。３年目に当たる平成１６年度は次のような方法で研究を実施する。

まず、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ので、倫理面の問題はないと考える。

C．研究結果

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。

一方、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付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、切欠き付オーステナイトステンレス鋼の塑性崩壊荷重を軸力ー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。

汎用有限要素解析コードによる信頼性評価では、データのやり取りを有限要素解析プログラムの入出力データファイルを介して行うため、使用する有限要素解析プログラムに応じてデータ書き換えに使用する **perl** プログラムを変更する必要があるが、一方で汎用性は非常に高い。また、赤外線計測に外部加熱を利用したき裂評価では、赤外線画像が不鮮明で、き裂長さを定量的に評価するまでに至らなかったが、この原因として赤外線画像の取り込みに NTSC 信号を利用していることが挙げられる。NTSC ではなくデジタル出力を利用することで、今後精度改善が図れることが考えられる。

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違が生じることが明らかになったため、信頼度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。さらに、切欠付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。

E．結論

平成１６年度の研究により、以下の結論を得た。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 曲げの予荷重すなわち圧縮残留応力の存在の影響について検討した結果、き裂発生サイクルの増加には効果があるが、き裂進展速度への影響は少ないことがわかった。

F．健康危険情報

なし

G．研究発表

1. 論文発表

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

伊澤 悟, 松原雅昭, 坂本賢治, 光弾性被膜法による軸力ー曲げ複合荷重下の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, 2004.7.

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, 2005.3.

(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

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

分担研究報告書

汎用有限要素解析コードを用いた信頼性評価に関する研究

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　構造信頼性評価に際して、限界状態関数の評価に有限要素解析等の大規模数値計算が必要な場合にも既存の構造信頼性評価プログラムを利用可能な方法を提案した。

A．研究目的

近年、パイプや圧力容器の構造健全性評価に際して破壊評価線図を用いる手法が主流となりつつあるが、R6 法オプション 3 のように高いレベルの解析を行うためには、有限要素解析等の大規模な数値計算が必要になる。そこで本研究では、限界状態関数の評価に有限要素解析等が必要な場合にも既存の構造信頼性評価プログラムで信頼性評価を可能にすることを目的とする。

B．研究方法

構造信頼性評価に際しては、限界状態関数を繰り返し計算する必要がある。限界状態関数の評価に有限要素解析等による大規模な数値計算が必要になる場合でも、信頼性評価プログラムの中に有限要素解析等の数値計算プログラムを組み込めば、限界状態関数の評価が可能になる。しかし、有限要素解析プログラムは一般に大規模な汎用ソフトウェアとして独立に存在しているのが普通であり、既存の構造信頼性解析プログラムに組み込むことは困難である。そこで本研究では、有限要素解析プログラムを独立した外部プログラムと考え、これを構造信頼性解析プログラムから適宜呼び出すことによって信頼性解析を実施する手法を開発した。

（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ので、倫理面の問題はないと考える。

C．研究結果

既存の構造信頼性評価プログラムにおいて限界状態関数の評価に汎用有限要素解析プログラムを利用可能にするために、有限要素解析プログラムを独立したプログラムとみなし、構造信頼性評価プログラムの中から必要なときに呼び出すこととした。構造信頼性評価プログラムと有限要素解析プログラムのデータのやり取りは、有限要素解析プログラムの入出力データファイルを perl で順次書き換えることによって行った。

既に開発済みの汎用構造信頼性評価プログラムに、上記の機能を組み込んで汎用有限要素解析コード MARC と連携させることを試みたところ、提案法によって限界状態関数の評価に有限要素解析が必要な場合にも構造信頼性解析が可能になることが示された。

D．考察

今回提案する手法では、構造信頼性評価プログラムと有限要素解析プログラムのデータのやり取りを有限要素解析プログラムの入出力データファイルを介して行うため、使用する有限要素解析プログラムに応じてデータ書き換えに使用する perl プログラムを変更する必要がある。しかし、このようにすることによって汎用性は増しており、

任意の有限要素解析プログラムを利用可能になる。

E．結論

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、その有効性を確認した。提案法は有限要素解析プログラムを外部プログラムとして利用し、その入出力ファイルを逐次書き換えることによって信頼性評価を行うため、極めて汎用性の高い手法であるといえる。

F．健康危険情報

なし

G．研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

（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

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

分担研究報告書

外部加熱を利用した疲労き裂検出手法の開発

分担研究者　本田　尚　　独立行政法人産業安全研究所主任研究官

研究要旨　既存設備の寿命延伸と安全性確保を目的として、経年損傷の一つである疲労き裂を、外部加熱を利用した赤外線サーモグラフィー法で検出する手法を開発した。

A．研究目的

既存設備の寿命延伸と安全性確保には、非破壊検査による疲労き裂の確実な検出とその評価が欠かせない。しかしながら、一般に疲労き裂は閉じていることが多く、また機械・設備は塗装されていることから、定期点検で多用されている目視検査では検出が難しい。そこで、疲労き裂を容易に検出する方法として、キセノンフラッシュランプを利用した外部加熱による赤外線非破壊評価法の開発を試みた。

B．研究方法

金属材料に、疲労き裂のような構造不連続部が存在していると、熱伝導が阻害されるため、熱的不連続部が生じる。そこで、被検査物を外部熱源により加熱し、加熱後の熱伝導を観察することによって、熱的不連続部から疲労き裂を検出することができる。

金属材料は熱伝導に優れているため、外部熱源には瞬間的に大きな熱を発生することのできるキセノンランプを 2 個使用した。これを任意の間隔で点滅させるとともに、ランプの点滅間隔に対して､位相を 0～1sec の間で任意にずらして赤外線画像を取り込む装置を開発した。赤外線カメラには Nikon 社製 サーマルビジョンを使用し、NTSC によるビデオ出力信号を赤外線画像として装置に取込んだ。

この装置を用いて、ボルト接合継手に発生する疲労き裂の検出を試みた。なお、実験に用いたボルト継手の材質はアルミニウム合金 2024-T3 であり、疲労試験機で疲労き裂を導入したのち実験に供した。

C．研究結果

キセノンフラッシュランプは、単発発光エネルギー **1000 J/F** 、発光半価幅 **8 ms**、であり、これを試験体であるボルト継手から約 **20cm** に配置し、**8** 秒間隔で発光させた。計測した赤外線画像を解析すると、熱伝導により、キセノンランプの発光から **33.3ms** 後に疲労き裂が最も良く検出された。しかしながら、赤外線画像は不鮮明で、き裂先端を特定することは難しく、き裂長さを定量的に評価することは困難であった。

D．考察

赤外線画像が不鮮明で、き裂長さを定量的に評価するまでに至らなかった原因として、赤外線画像の取り込みに NTSC 信号を利用していることが挙げられる。NTSC では一画像を得るのに、1/30 秒掛かるため、金属材料のように熱伝導に優れた材料では、この間に熱が拡散してしまう。今回使用した赤外線カメラは、フォーカルプレーンアレイの赤外線検出器を使用しており、1/60 秒で計測が可能であることから､NTSC ではなくデジタル出力を利用することで、今後精度改善が図れることが考えられる。

E．結論

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。その結果、キセノンランプの発光から **33.3ms** 後の赤外線画像に疲労き裂が検出されることが分った。き裂先端が不明瞭であるため、き裂長さを定量的に評価することはできなかったが、疲労き裂の検出には十分実用性があることが確認できた。

F．健康危険情報

なし

G．研究発表

1. 論文発表

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

なし

(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

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

分担研究報告書

軸力と曲げを受けるステンレス鋼切欠配管の塑性崩壊荷重に関する研究

分担研究者　松原　雅昭　群馬大学工学部教授

研究要旨　本年度は構造健全性評価を行う上で実用上重要と考えられる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した。軸力と曲げを受ける SUS304 ステンレス鋼周方向切欠付配管について、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。

A．研究目的

軸力と曲げを受ける周方向欠陥付減肉配管について、塑性崩壊荷重を理論的に検討する。理論的検討結果を検証するため、軸力と曲げを受ける SUS304 ステンレス鋼周方向切欠付配管について、不静定破壊力学実験装置を用いた塑性崩壊評価実験を行う。

B．研究方法

軸力と曲げを受ける周方向欠陥付減肉配管について、弾完全塑性体を仮定して欠陥断面での力と曲げモーメントのつり合いを考えることによって塑性崩壊荷重を理論的に評価する。検討対象とする配管は直径 32mm であり、管厚は 1.5、2.0 および 3.0mm の３通りである。

理論検討結果を実験的に検証するため、不静定破壊力学実験装置を用いて軸力と曲げを受ける SUS304 ステンレス鋼周方向切欠付配管について、塑性崩壊荷重評価実験を行う。検討対象とする配管は直径 32mm であり、管厚は 1.5、および 3.0mm の２種類である。

（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ので、倫理面の問題はないと考えるが、平成 16 年８月に 11 人の死傷者を出した美浜原発３号機の蒸気噴出事故と直結する問題を取り扱っているので実験データの客観性に注意を払った。

C．研究結果

理論検討結果より、軸力が主体で塑性崩壊して設計限界に到達するときの実断面積は欠陥形状に関係なくほぼ一定であることが分かった。曲げモーメントが主体で塑性崩壊して設計限界に到達するときの実断面係数は、周方向貫通欠陥が主体の場合よりも減肉主体の場合の方が 20%低下する。

軸力と曲げを受ける SUS304 ステンレス鋼周方向切欠付配管について行った不静定破壊力学実験結果より、理論的検討結果は実験結果と一致するかあるいは安全側評価を与えることがわかった。

D．考察

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違が生じる。

E．結論

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し、実験的に検証した。

F．健康危険情報

なし

G．研究発表

1.　論文発表

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).

2.　学会発表

なし

（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

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

分担研究報告書

切欠付オーステナイトステンレス鋼の塑性崩壊と延性疲労き裂評価

分担研究者　伊澤　悟　小山工業高等専門学校機械工学科助教授

研究要旨　　切欠付オーステナイト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た。また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。この際、負荷履歴として圧縮残留応力がき裂発生および進展に及ぼす影響についても評価した。

A．研究目的

経年圧力設備の安全性確保のため、圧力プラント機器材料として使用されるオーステナイトステンレス鋼の延性破壊挙動を精度よく求める。延性破壊挙動に及ぼす負荷履歴の影響を、塑性崩壊荷重および疲労き裂進展解析を通じて解明する。

B．研究方法

軸力－曲げ複合荷重を受ける切欠を有するオーステナイトステンレス鋼の塑性崩壊荷重の評価を、不静定破壊力学実験装置を用いて実験的に行なう。

また、同材料の SENB 試験片に繰り返し曲げ負荷を加え、き裂の発生ポイントおよび進展速度を CTOA パラメータによって整理する。

（倫理面への配慮）

本研究の実施によって、生体および環境へ影響を及ぼすことはないので倫理面の問題はないと考える。

C．研究結果

光弾性皮膜法により得られた切欠付配管の崩壊荷重は、負荷履歴に関係なく従来得られていた理論崩壊限度線図の外側に沿う。ここで、軸力負荷後曲げ試験ではリガメント部の全断面降伏崩壊前にき裂の発生が確認された。

モアレ法を用いて CTOA を計測し、SENB 試験片の疲労き裂発生ポイントとき裂進展速度について CTOA との相関関係を求めた。

D．考察

切欠付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。

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。圧縮残留応力は、き裂発生サイクルの増加には効果的であるが、き裂進展速度や CTOA への影響は小さい。

E．結論

切欠付オーステナイトステンレス鋼部材について、塑性崩壊荷重へ及ぼす軸力と曲げの負荷履歴の影響は小さいが、軸力負荷後曲げ試験では全断面降伏以前のき裂発生の可能性がある。

同部材の延性疲労き裂発生および進展に及ぼす曲げの予荷重すなわち圧縮残留応力の存在は、き裂発生サイクルの増加に効果があるがき裂進展速度への影響は少ない。

F．健康危険情報

なし

G．研究発表

1. 論文発表

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

2. 学会発表

伊澤　悟，松原雅昭，坂本賢治・光弾性被膜法による軸力ー曲げ複合荷重下の **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・2004.7

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・2005.3

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
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	2001-2005	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ー曲げ複合荷重下の 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		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		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		

Key Engineering Materials Vols. 270-273 (2004) pp. 2001-2005
online at http://www.scientific.net
© 2004 Trans Tech Publications, Switzerland

Plastic Collapse Evaluation on the Notched Stainless Steel Piping Subjected to Combined Tension and Bending by Photo-Elastic Coating.

Satoru Izawa[1], Masaaki Matsubara[2], Kikuo Nezu[2] and Kenji Sakamoto[2]

[1] Department of Mechanical Engineering, Oyama National College of Technology
Nakakuki 771, Oyama, Tochigi, 323-0806 Japan

[2] Department of Mechanical System Engineering, Gunma University
Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu, Gunma, 375-8515 Japan

Keywords: Plastic Collapse, Photo-Elastic Coating, Tension and Bending, Notched Piping

Abstract. This study is concerned with the structural integrity evaluation of stainless steel piping with a notch. Structural engineers seek to prevent such problems by guaranteeing a sufficient margin for the fracture strength based on the existence of assumed defects. In this study, both the tension force due to internal pressure and the bending moment caused by earthquakes are considered as a given load for a structure. Collapse load is now evaluated when a plant is under complex load condition. The stress state of a plastic collapse point is assessed using a chart of membrane stress and axial displacement as well as a chart of bending stress and deflection angle. The collapse point adopted here for evaluation method is two-times displacement method for the reason of determining the collapse point on the chart comparatively clearly. On the other hand, by observing the ligament portion of a specimen is observed using the photo elastic coating and the collapse point is determined by comparing it to a penetration point in the plastic region in the ligament. It has been found that a different load pattern affects the formation of the plastic region and also the position of the plastic collapse point. As a result, a new method for the assessment of the plastic collapse under complex load has been successfully developed.

Introduction

Single-edge cracked member subjected to combined tension and bending is a representative model in carrying out the structural integrity evaluation. The research has been carried out until now on this model from various fields of ductile fracture and plastic collapse[1]-[6]. The crack seems to finally come to the plastic collapse with the decrease in the ligament area, if crack extension does not become unstable under progress, when structural member with the crack does ductile fracture. It is important to clarify the load history dependency on the plastic collapse load of single-edge cracked member subjected to combined tension and bending in order to improve the accuracy of structural integrity evaluation. Authors developed statically indeterminate fracture mechanics experimental equipment which enabled us to examine the load history dependency on plastic collapse load of the member[7]. We visualized the plastic region by the photo elastic coating method to observe the formation process of the plastic region of the ligament, using a photo elasticity film made of cold setting epoxy resin.

Experimental method

Experimental equipment has been specially developed to cope with the indeterminate problems in fracture mechanics. It is possible that the equipment take axial force and bending at the simultaneous load or optical order. The experiment is carried out in the three test cases shown,

(1) Axial force and bending simultaneous load test = Pattern (Tension + Bending).
(2) Tension-after-bending test = Pattern (Bending → Tension).
(3) Bending-after-tension test = Pattern (Tension → Bending).

The material tested is the austenite stainless steel SUS304 pipe of the 32mm external diameter and the 1.5mm board thickness. The notch angle was made to be 60 degrees. The specimen geometry is shown Fig. 2. The mechanical properties of tested materials are listed in Table 1.

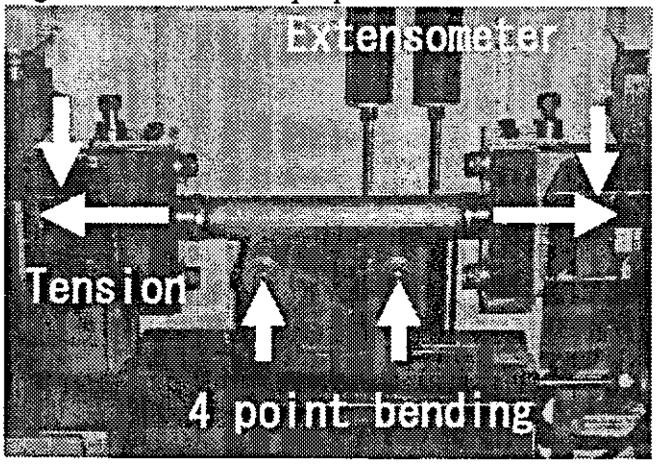

Fig. 1. A photograph of testing equipment.

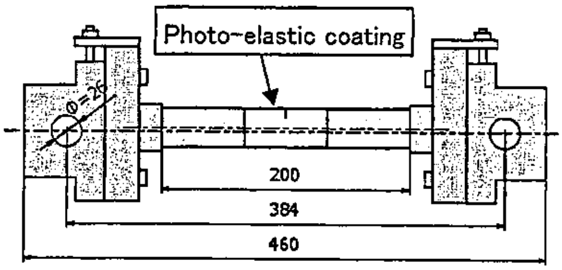

Fig. 2. Geometries figure of the specimen.

Table 1. Mechanical properties tested materials.

Yield stress σ_y [MPa]	Tensile strength σ_B [MPa]	Elongation ϕ [%]
298	602	61.5

Formulation

Figure 3 show the stress distribution in the pipe in the notched section. To interpret the stress state of the notched piping, model has been formulated based on the axial force and bending moment in the ligament. The piping was assumed the elastic perfect plasticity body. The stress system has to safety equilibrium with the applied loading, i.e., axial forces F and bending moment M.
From the force equilibrium in Fig.3,

$$F = 2(\pi - \alpha - \gamma)Rt\sigma_y - 2\gamma Rt\sigma_y = 2(\pi - \alpha - 2\gamma)Rt\sigma_y \tag{1}$$

where α = half notch angle, R = mean radius, t = pipe thickness and γ = distance of neutral axis and axial force.
From moment equilibrium in Fig.3,

$$M = 2\left\{\int_{\alpha}^{\pi-\gamma} R(\cos\phi + \cos\beta)\quad t\sigma_y R d\phi + \int_{\pi-\gamma}^{\pi} R(-\cos\phi - \cos\beta)\quad t\sigma_y R d\phi\right\} \tag{2}$$

which can be solved to obtain

$$M = 2\{2\sin\gamma - \sin\alpha + (\pi - \alpha - 2\gamma)\cos\beta\}\sigma_y R^2 t \tag{3}$$

Membrane stress intensity has been formulated based on the balance of axial forces.

$$P_m = \frac{\pi - \alpha - 2\gamma}{\pi - \alpha}\sigma_y \tag{4}$$

On the other hand, bending stress intensity has been formulated based on the balance of bending moment.

$$P_b = \frac{2\{2\sin\gamma - \sin\alpha + (\pi - \alpha - 2\gamma)\cos\beta\}}{Z}\sigma_y R^2 t \tag{5}$$

Thus, general equation of plastic collapse stress is derived for notched piping subjected combined tension and bending.

$$\frac{P_b}{\sigma_y} = \frac{2}{Z}\left[2\sin\left\{\frac{\pi - \alpha}{2}\left(1 - \frac{P_m}{\sigma_y}\right)\right\} - \sin\alpha + (\pi - \alpha)\frac{P_m}{\sigma_y}\cos\beta\right]R^2 t \tag{6}$$

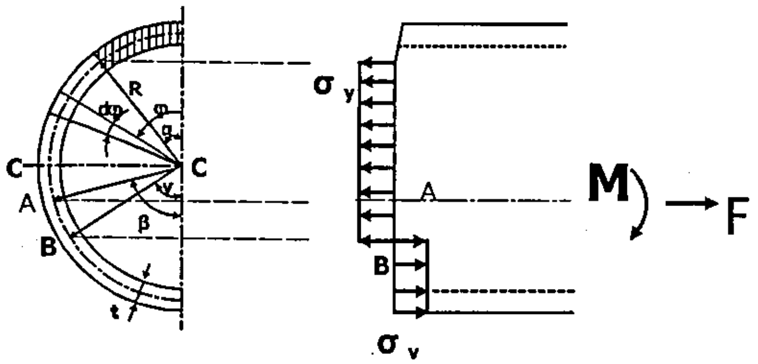

Fig. 3. Geometrical details of notch in a pipe and resulting stress distribution under plastic collapse.

Structural integrity evaluation

Notched piping subjected to combined tension and bending is a representative model in carrying out the structural integrity evaluation. The crack seems to finally come to the plastic collapse with the decrease in the ligament area, if crack extension does not become unstable under progress, when structural member with the crack does ductile fracture. We visualized the plastic region by the photo elastic coating method to observe the progress of the plastic region of the ligament, using a photo elasticity film made of cold setting epoxy resin in the observation. The fringe of the film is seen in the plastic region of the ligament. The first fringe was set to equals the yield point (0.2% proof stress) in the tension test. The penetration point in the ligament of the first fringe that occurred in the top of the notch was defined as a collapse point. The plastic region that evolves in the ligament differs greatly difference depending on load formation of the bending and tension. This difference of the evolution of the plastic region is considered to be due to the different formations of the slip line that directly affect the results of plastic collapse in the ligament.

Result and discussion

In the general equation of the stress in plastic collapse condition that it was defined in this study, the collapse limit curve is obtained substituting shape factors of a specimen. The collapse point is obtained from the chart in the simultaneous load test by the two-times displacement method. Figure 4 shows the results of the distribution of collapse points on the theoretical collapse limit curve. The plastic collapse point is assessed using a chart of membrane stress and notch opening displacement as well as a chart of bending stress and notch opening displacement. We found the plastic collapse points are distributed along the theoretical collapse limit curve. The validity of plastic collapse limit chart deduced in this study was shown.

Figure 5 shows a photograph of the simultaneous test of tension and bending loads. The plastic region that evolves in the ligament differs greatly depending on the load formation of bending and tension. This difference of the evolution of the plastic region is considered to be due to the different formations of the slip line. The fringe can occur in the top of the notch. Photo-elasticity fringe and the slip line field of the schema showed the similar shape. It has a shape of tension test and bending test at the same time.

Figure 6 shows the photo-elasticity photograph of tension-after-bending test pattern. We found that the formation of the plastic region that penetrates the ligament of the notched stainless steel depends on the load history. In this case, the tension as second load is the dominant factor in the plastic collapse.

Figure 7 shows the photo-elasticity photograph of tension after bending test pattern. In both cases tension-after-bending test and bending-after-tension test, the second load is the dominant factor in the plastic collapse. The radius of the slip-line circular arc, produced increases as the ratio of the tension

to the bending increases. In this test pattern, a crack is generated before the plastic collapse. A part of in this load history, it was discovered that the plastic collapse stress criterion was not effective for the structural intensity evaluation.

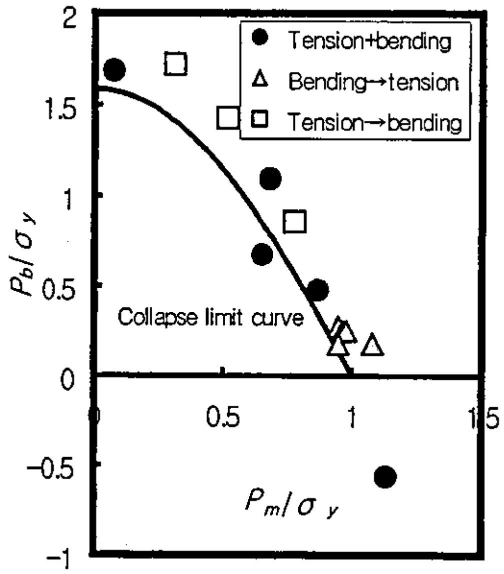

Fig. 4. The distribution of the plastic collapse point.
(Stress intensity- notch opening displacement chart)

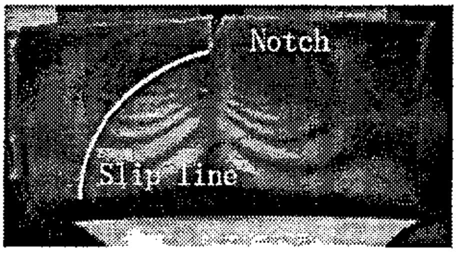

Fig. 5. Photograph of the simultaneous test.

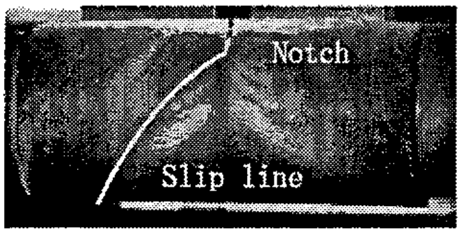

Fig. 6. Photograph of the tension-after-bending test.

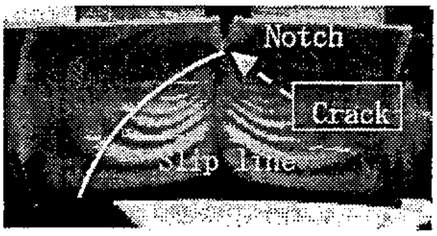

Fig.7. Photograph of the bending-after-tension test.

Conclusion

We have developed the experimental system and analysis model of notched stainless steel piping subjected to combined tension and bending. The conclusions have been deduced by the detailed experimental results.

(1) The simple notched piping model has been formulated based on the equilibrium from the applied axial loading and bending moment. The theoretical collapse limit curve has been to be in good agreement with experimental data.

(2) We have succeeded in using the photo elastic coating method for the plastic collapse evaluation. The effectiveness of structural integrity evaluation using the photo elastic coating method has been verified. It has been discovered that the plastic collapse stress criterion was not effective in a part of load pattern for the structural integrity evaluation.

References

[1] S.Rahman: Engineering Fracture Mechanics Vol.61(1998), p.213.

[2] S.Rahman and G.Wilkowski: Engineering Fracture Mechanics Vol.61(1998), p.191.

[3] Okamura, Kageyama and Takahata: Trans. JSME, 49-455A(1979), p.1076.

[4] A.G.Miller: Int. J. Pres. Ves. & Piping, 32, (1988), p.197.

[5] Green,A.P.: Quart. Journ. Mech. and Applied Math., Vol.6(1953), p.223.

[6] Rice,J.R.: Proceedings of Surface Flaw Symposium, American Society of Mechanical Engineers Winter Annual Meeting, (1972), p.171.

[7] Matsubara, Izawa, Hirao, Busujima, Koyama, Machida, Kawada, Sakamoto and Nezu: Trans. JSME (A), (2001-7), p.1218.

論 文

欠陥を有する矩形断面構造の簡易崩壊応力評価

A Simplified Calculation Procedure of Collapse Stress on a Flawed Rectangular Beam for Combined Tension and Bending

群馬大学工学部
松原　雅昭（Masaaki MATSUBARA）
筑波大学機能工学系
佐々木哲也（Tetsuya SASAKI）
小山工業高等専門学校
伊澤　　悟（Satoru IZAWA）

A simplified procedure can calculate collapse stresses on a flawed rectangular beam for combined tension and bending. The results obtained are as follows :
(1) The method enables us to calculate the collapse stresses for any flaw size and any combination of tension and bending.
(2) The method leads to an allowable flaw size of about one–tenth the beam width.
(3) The method gives the evaluation of safe side for the experimental result in the case that the defect size/beam width ratio is 0.6.
Key words : limit analysis, perfect plasticity, collapse stress, rectangular beam, flaw, combination of tension and bending, limit design, allowable flaw size, maintenance code

1．緒　言

発電用原子力設備に関する構造等の技術基準の第一種容器項において，引張と曲げ荷重が同時に作用した時の部材を単純な矩形断面はりと仮定して崩壊応力に対する設計限界が定められている[1]。この設計限界は実際の崩壊応力に対して安全率を見込んで設定され，その中でき裂等の欠陥の存在は想定していない。近年原子力発電設備の適切な運用を目指して維持基準[2]が策定されつつある。維持基準では適切な検査が行われることを前提として構造物中の欠陥の存在を許容できることとなった。これを崩壊応力の設計基準に当てはめて，崩壊応力のみが構造物の破壊を規定する場合を考える。この場合，問題は欠陥の存在を想定していない構造物の崩壊応力に対して現行の設計限界レベルまでどの程度の寸法のき裂を許容できるかということに置き換えることができる。

本論文では上記に鑑み，軸力と曲げを受けるき裂等の欠陥を有する矩形断面はり構造の崩壊応力を簡易評価する方法を提案する。加えて，欠陥の

原稿受付日　15.10.29